UNIVERSITE BRETAGNE SCIENCES LOIRE POUR L'INGENIEUR

UNIVERSITÉ DE RENNES 1

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE RENNES 1
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE
En Cotutelle Internationale avec
Université Félix Houphouët Boigny, COTE D'IVOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : *Génie Civil*

Par
Lydie Marcelle THIEBLESSON

Elaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées

Thèse présentée et soutenue à Abidjan, le 11/12/2018
Unité de recherche : EA 3913
Thèse N° :

Rapporteurs avant soutenance :

Sofiane Amziane	Professeur, Polytech Clermont-Ferrand
David Boa	Professeur, Université Nangui Abrogua d'Abob-Adjamé

Composition du Jury :

Raphael Aka Kouamé Examinateur	Président, Professeur, Université Félix Houphouet Boigny de Cocody, Abidjan
Sofiane Amziane Rapporteur	Professeur, Polytech Clermont-Ferrand
David Boa Rapporteur	Professeur, Université Nangui Abrogua d'Abob-Adjamé
Florence Collet Examinateur	Maître de conférences HDR, Université de Rennes 1
Edjikémé Emeruwa Examinateur	Professeur, Université Félix Houphouet Boigny de Cocody, Abidjan
Sylvie Prétot Examinateur	Maître de conférences, Université de Rennes 1
Christophe Lanos Directeur de thèse	Professeur, Université de Rennes
Moro Olivier Boffoue Co-directeur de thèse	Maître de conférences, Université Félix Houphouet Boigny de Cocody, Abidjan

République de Côte d'Ivoire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Année Universitaire 2017-2018

Université Félix Houphouët Boigny

UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières

N° d'ordre :

THÈSE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ FÉLIX HOUPHOUËT-BOIGNY

EN SCIENCES DE LA TERRE

***Spécialité* : GÉOMATÉRIAUX**

Et

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE RENNES 1

EN SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Spécialité : GENIE CIVIL

Par :

THIEBLESSON Lydie Marcelle

THÈME

ELABORATION ET CARACTÉRISATION DE MATÉRIAUX ISSUS DE RESSOURCES LOCALES RECYCLEES OU BIOSOURCEES

Soutenue publiquement le 11 Décembre 2018 devant le jury composé de :

AKA KOUAME RAPHAEL	*Professeur Université Félix Houphouët Boigny*	Président
BOFFOUE MORO OLIVIER	*Maitre de conférences Université Félix Houphouët Boigny*	Directeur de thèse
LANOS CHRISTOPHE	*Professeur Université Rennes 1*	Co-directeur de thèse
BOA DAVID	*Professeur Université Nangui Abrogua*	Rapporteur
SOFIANE AMZIANE	*Professeur polytechnique Clermont-Ferrand*	Rapporteur
EMERUWA EDJIKEME	*Professeur Université Félix Houphouët Boigny Cocody*	Examinateur
COLLET FLORENCE	*Maitre de conférences HDR Université de Rennes 1*	Examinateur
PRETOT SYLVIE	*Maitre de conférences Université de Rennes 1*	Examinateur

Dédicace

*À ma mère **GNAZIRI IRÈNE** dit maman LA VIE.*

À toi maman, je dédie cette thèse

Pour moi tu as été un père et une mère

Tu m'as scolarisée,

Tu as fais d'énormes sacrifices

Ton soutien et ton amour ont été sans faille

Ta confiance en moi n'a jamais été corrompue

Je pris le Seigneur Jésus afin que ta récompense soit à la dimension de tes sacrifices et même bien plus grande.

Merci maman, je t'aime.

Merci JESUS pour une maman FORMIDABLE.

À Mes enfants

FORIWA Ama ma princesse

SAMUEL Kouadio mon Champion

C'est vous qui nous donnez la force d'aller toujours de l'avant.

Remerciements

Cette thèse à été possible grâce à la confiance de Monsieur BOFFOUE Moro Olivier et Monsieur EMERUWA Edjikémé qui nous ont accepté depuis le master au sein du laboratoire de Géomatériaux de l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR STRM) de l'Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Nous remercions vivement la bourse AMRUGE (Appuis à la Modernisation et à la Reforme des Universités et Grandes Ecoles) qui a financée cette Thèse.

Ce travail est une cotutelle entre le Laboratoire de Géomatériaux et des technologies de l'Habitat de l'UFR des sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université de Cocody Abidjan en Côte d'Ivoire et le Laboratoire de Génie Civil Génie Mécanique de l'Université de Rennes1 en France.

Ce mémoire a bénéficié du concours technique et soutien de plusieurs personnes. Nous voulons saisir cette opportunité pour exprimer à tous, nos sincères sentiments de gratitude.

Nos deux Directeurs de thèse:

Pr BOFFOUE Moro Olivier

Pour la confiance qu'il a manifestée à notre égard. Il nous a prodigué des conseils, tirer les oreilles quand il le fallait, nous a soutenue et toujours encouragé. Il a su nous motiver au travail. Demeurez béni Professeur.

Pr LANOS Christophe

Nous voulons lui exprimer en toute sincérité notre gratitude pour notre acceptation au sein de son laboratoire en France, son accueil, sa disponibilité, sa gentillesse et surtout sa patience.

A tous les deux, nous souhaitons simplement que notre travail ait justifié votre confiance.

Mes trois encadrants de thèse

Pr KOUAKOU Conand Honoré

Que le Professeur soit assuré de toute notre reconnaissance. Il a accepté de nous encadrer depuis le Master en tant que notre co-encadrant. Malgré ses occupations, il a toujours été disponible pour apporter moyens techniques et conseils scientifiques à nos travaux. Nous prions qu'il trouve en ces mots, la marque de notre profonde gratitude pour ta grandeur d'âme et pour tout l'appui multiforme qu'il n'a jamais cessé de nous apporter.

Dr COLLET Florence

Pour son esprit curieux, son dynamisme et surtout sa rigueur scientifique qui ont contribué à mener à bien ce travail. Trouvez en ces lignes l'expression de notre profonde reconnaissance

Dr PRETOT Sylvie

Pour ses conseils, sa disponibilité, sa gentillesse. Merci encore cela a vraiment compté pour nous.

Grand merci chers encadrants, pour votre disponibilité et la richesse de vos apports qui ont été d'un précieux concours. Cela mérite également ici une mention.

Pr EMERUWA Edjikémé notre responsable du Laboratoire de Géomatériaux et de Technologie de l'Habitat , Pour lui nous exprimons une reconnaissance pour l'appui accordé à ce travail à travers les conseils, les remarques , les aides et les encouragements utiles pour le bon déroulement de ces travaux.

Nos pensées vont au Dr ASSANDE Aka pour tous les conseils et remarques que nous avons eu de sa part. Merci docteur pour vos encouragements et vos conseils.

Nous remercions également Dr KOUADIO Koffi et Dr OUATTARA pour leurs conseils avisés, leurs encouragements, leurs aides. Cela nous a permis de progresser dans nos recherches.

À Dr MAMERY Serifou et Dr OBRE Jolissain merci pour vos conseils et surtout votre rôles de grand frère adopté envers nous dans ce laboratoire, cela nous a permis de travailler dans une bonne ambiance.

A mes rapporteurs, Professeur Boa David, Professeur SOFIANE Amziane, et au président du jury Professeur AKA Kouamé, nous voulons adresser notre profonde reconnaissance pour avoir accepté de consacrer votre temps à l'examen de ce travail.

Plusieurs personnes ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ces travaux, nous tenons à leur dire merci.

Nous adressons une vive reconnaissance à tous nos enseignants de l'U.F.R. S.T.R M en particulier notre parrain Professeur AFFIAN KOUADIO vice-président de l'Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan, aux Pr BIEMI JEAN, Pr AKA KOUAME, et Pr SORO NAGNIN doyen de l'UFR pour leur contribution à notre formation.

Merci également à Feu Professeur LASM Théophile qui malheureusement ne verra pas cette thèse. Merci à vous professeur pour cette bonne humeur que vous nous avez communiqué. Vous êtes gravé en lettre d'OR dans nos cœurs.

Remerciement à tous les enseignants et personnels du LGCGM de l'IUT de Rennes1, à commencer par le responsable de l'équipe LANOS Christophe, Florence COLLET et Sylvie PRETOT, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour leur grande disponibilité et aussi pour m'avoir permis de participer aux conférences internationales et nationales.

Nous remercions particulièrement l'apport du personnel technique du laboratoire, sans lequel cette thèse aurait été plus difficile. Merci pour leur disponibilité, leurs compétences et surtout leur sympathie. Merci à HAUTECOEUR Tony pour son dévouement et son aide précieux dans les différentes manipulations et réalisation de certains essais, à Guy BIANEIS avec qui nous trouvions tout ce dont nous avions besoin, Merci à Alain qui réfléchissait toujours à des moyens de faciliter nos manipulations; Merci à Patrice et Matthieu.

A mes collègues du laboratoire, MAZHOUD Brahim merci parce que nous pouvions toujours compter sur vous pour avoir une explication ou une autre pour une meilleure compréhension des essais. ROJO Amandine pour son amitié, DIABY Ahmadou; DANCA Paul; VIEL Marie, GHOUBALI Redouane, KA Moussa. Ce fut un vrai plaisir d'avoir travaillé avec vous.

Toute notre gratitude à la famille de Géomatériaux. Sachez que nous sommes très sensibles à tous les rôles que vous avez joués dans la réalisation de cette étude. Nos remerciements à DJIRAGBOU, DJOHORE épouse KOUAME et aux Docteurs DJOMO et TRAORE, pour tous les conseils, les aides et les remarques dont nous avons bénéficiés et surtout pour la fraternité qui a toujours régné entre nous. Merci à Sandrine AUGOU notre adorable tutrice. Dieu vous bénisse

Merci à tous les doctorants et master du laboratoire. Dieu vous bénisse.

Nos remerciements à Dr DINZEDI. Merci d'avoir été un messie pour nous et avoir contribué ainsi à notre réussite. Nous sommes reconnaissant pour tes encouragements, tes conseils, ton soutien financier, ta disponibilité sans faille pour la réussite de ce mémoire. Nous bénissons le Seigneur de t'avoir mis sur notre chemin. Reste béni.

Remerciement à SCHWARTZMAN HAIM pour ses encouragements et son soutien financier.

Nous voudrions remercier nos parents spirituels Mr. et Mme N'KUGO pour leur amour et leurs incessantes prières. Plaise à notre seigneur de continuer à les utiliser. Restez bénis

Nous remercions également tous les membres de nouvelle mission chrétienne, le pasteur Zépherin et madame, pasteur AKAFFOU et madame, pasteur Rosy, pasteur Oscar, diacre ORO et madame, papa KOUASSI. Merci aux mamans de l'église: maman N'GORAN, maman AMANI, Mme BOSSON, Mme BROU, maman KOUASSI etc. …. Que la bénédiction de notre seigneur Jésus soit sur vous.

Nos remerciements à toute notre famille biologique pour son soutien incommensurable dans nos moments de joies et de peines. Maman Clémence, papa IRIE bi Guessan Tostao. À tous nos oncles et tantes, Alain, Doulé, Djager , Franck, Jacqueline, Martine, Hortense, Chantal , Danielle à Mr et Mme BLI, à notre grand-mère Odette. Merci à nos sœurs et frères: Trysette pour ses encouragements et sa confiance, Rufine, Nanette, Gisel, Charly, Patrick, Reverdy, Guy-roger, Obed, Ariel, Clerel, Tatiana, César, Boty. DIEU vous bénisse et vous donne longue vie.

Nous avons une pensée pieuse pour notre défunt père THIEBLESSON CÔME qui avait confiance en nous. Nous aurions souhaité sa présence en ce jour.

DIEU VOUS BENISSE.

TABLE DES MATIERES

Introduction **1**

PARTIE 1 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE **4**

CHAPITRE I Contexte et Enjeux 6

I.1 Définition de quelques notions utilisées 7

I.2 Contexte de l'étude 8

I.2.1 Climat en Côte d'Ivoire 8
I.2.2 L'urbanisation en Côte d'Ivoire 9
I.2.3 Le confort intérieur 12
I.2.4 La gestion des déchets (en Côte d'Ivoire) 14

I.3 Enjeux 17

I.3.1 Le développement durable 17
I.3.2 Les matériaux issus de matières premières bio-sourcées 18
I.3.3 Les matériaux issus de matières premières recyclées 20

CHAPITRE II Les charges 22

II.1 Généralités 23

II.1.1 La filière bois 23
II.1.2 La structure et la composition chimique du bois 24

II.2 Laine et fibre de bois 26

II.2.1 La laine de bois 26
II.2.2 La fibre de bois 26

II.3 Le papier 27

II.3.1 La production du papier 27
II.3.1.1 La pâte à bois 28
II.3.1.2 La pâte recyclée 30
II.3.2 Le recyclage du papier 30
II.3.2.1 Le papier ou carton 30
II.3.2.2 La ouate de cellulose 30
II.3.2.3 Les autres usages 31

CHAPITRE III Les liants 32

III.1 Le plâtre 33

III.1.1 Le gypse 33
III.1.2 La fabrication industrielle du plâtre 34
III.1.3 La mise en œuvre et l'utilisation du plâtre 35
III.1.4 Les propriétés du plâtre 37

III.2 L'amidon 40

III.2.1 Généralités 40
III.2.2 Composition et structure moléculaire 42
III.2.2.1 L'amylose 42

III.2.2.2 L'amylopectine 43
III.2.2.3 Structure granulaire semi-cristalline de l'amidon 45
III.2.3 Transformations hydrothermiques de l'amidon 48
III.2.3.1 Gélatinisation -empesage 49
III.2.3.2 Rétrogradation et gélification 51
III.2.4 Bilan des caractéristiques des différents types d'amidons 52

CHAPITRE IV Synthèse de la bibliographie et objectifs des travaux 55

PARTIE 2 METHODES ET MATERIAUX 57

CHAPITRE V Méthodes de caractérisation des matières premières et des composites 59

V.1 Caractérisation physique 60

V.1.1 Masse volumique apparente 60
V.1.1.1 Masse volumique apparente des matériaux en vrac 60
V.1.1.2 Masse volumique apparente des matériaux de forme régulière 61
V.1.2 Masse volumique réelle 62
V.1.3 Porosité totale 64

V.2 Caractérisation Hydrique: Valeur Hydrique Tampon (MBV) 64

V.3 Caractérisation thermique: conductivité thermique ... 66

V.4 Caractérisation mécanique 68

V.4.1 Essai de compression 68
V.4.2 Résistance en traction 71
V.4.3 Méthode acoustique 72

V.5 Résistance au feu 73

V.5.1 Principe des essais 73
V.5.2 Essai à la petite flamme basé sur la norme NBN EN ISO 11925-2 ... 73
V.5.3 Critères de classement (hors revêtements de sols): Référence NF EN ISO 11925-2 74
V.5.4 Test mis en œuvre 74

CHAPITRE VI Matières premières et élaboration des composites . 76

VI.1 Matières premières 77

VI.1.1 Charges 77
VI.1.1.1 Fibre de bois (FB) 77
VI.1.1.2 Ouate de cellulose (OC) 78
VI.1.1.3 Granules de papier (GP) 79
VI.1.2 Liants 80
VI.1.2.1 Plâtre (P) 80
VI.1.2.2 Amidon (A) 81
VI.1.2.2.1 Amidon de pomme de terre (A) 81
VI.1.2.2.2 Amidon de manioc (Am) 82

VI.2 Elaboration des Composites 83

VI.2.1 Production des composites au plâtre 83
VI.2.2 Production des composites à l'amidon 85

VI.2.2.1 Composites à l'amidon de pomme de terre 85
VI.2.2.2 Composites à l'amidon de Manioc 85
CHAPITRE VII Synthèse des méthodes et matériaux 86
PARTIE 3 RESULTATS ET DISCUSSION 88
CHAPITRE VIII Propriétés des matières premières 90
VIII.1 Propriétés des charges 91
VIII.1.1 Masses volumiques apparente et réelle, porosité totale 91
VIII.1.2 MBV 92
VIII.1.3 Conductivité thermique 93
VIII.2 Propriétés des liants 94
VIII.2.1 Masse volumique des liants 94
VIII.2.1.1 Plâtre 94
VIII.2.1.2 Amidon 96
VIII.3 Synthèse des propriétés physiques des matières premières 97
CHAPITRE IX Propriétés physiques des composites 98
IX.1 Séchage des échantillons 99
IX.2 Aspect des échantillons produits 102
IX.3 Masse volumique apparente des composites 104
IX.3.1 Masse volumique apparente des composites à base de plâtre 104
IX.3.2 Masse volumique apparente des composites à base d'amidon 105
IX.4 Synthèse des propriétés physiques des composites ..107
CHAPITRE X Propriétés hygriques des composites 108
X.1 Valeur MBV des composites à base de plâtre 109
X.2 Valeur MBV des composites à base d'amidon de pomme de terre 111
X.2.1 Valeur MBV des différentes formulations 111
X.2.2 Valeur MBV de plaques de différentes épaisseurs 114
X.3 Valeur MBV des composites à base d'amidon de manioc 123
X.4 Synthèse de l'étude du comportement hygrique 124
CHAPITRE XI Conductivité thermique des composites 126
XI.1 Conductivité thermique des composites à base de plâtre 127
XI.1.1 Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR) et au point sec 127
XI.1.2 Conductivité thermique en fonction de la température, au point sec. 132
XI.2 Composites à base d'amidon 134

XI.2.1 Composites à base d'amidon de pomme de terre -Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR) et au point sec 134
XI.2.2 Composites à base d'amidon de pomme de terre -Conductivité thermique en fonction de la température, au point sec 137
XI.2.3 Composites à base d'amidon de pomme de terre - Effet du dosage en granules de papier sur la conductivité thermique 137
XI.2.4 Composites à base d'amidon de manioc- Conductivité thermique à 23°C, 50%HR 138
XI.2.5 Comparaison des conductivités thermiques des composites à base d'amidon à la bibliographie 139
XI.3 Synthèse de l'étude de la conductivité thermique 140
CHAPITRE XII Caractérisation mécanique des composites 142
XII.1 Essai de compression avec chargement monotone ...143
XII.1.1 Composites à base de plâtre 143
XII.1.1.1 Influence de la formulation sur la résistance en compression ... 148
XII.1.1.2 Influence de la formulation sur le module d'Young 149
XII.1.2 Composites à base d'amidon de pomme de terre 150
XII.1.2.1 Influence de la formulation des composites sur la résistance en compression 154
XII.1.2.2 Influence de la composition sur le module d'Young 155
XII.2 Essai de flexion 3 points 157
XII.2.1 Composites à base de plâtre 158
XII.2.1.1 Influence de la formulation sur la résistance en traction 161
XII.2.1.2 Relation entre Rc et Rt 161
XII.2.2 Composites à base d'amidon 162
XII.2.2.1 Influence de la formulation sur la résistance en traction 165
XII.2.2.2 Relation entre Rc et Rt 166
XII.3 Module acoustique 167
XII.4 Synthèse du comportement mécanique des composites 169
CHAPITRE XIII Comportement au feu des composites 170
CONCLUSION GÉNÉRALE.....175
Références bibliographiques.....180

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : PROFIL METEOROLOGIQUE DE LA COTE D'IVOIRE (HTTP://WWW.AVENUE225.COM/WP-CONTENT/MEDIASAVENUE/2010/05/CLIMAT.GIF) 8
FIGURE 2: HABITAT RESIDENTIEL 9
FIGURE 3:HABITAT ECONOMIQUE (YAO-KOUASSI, 2010) 10
FIGURE 4:HABITAT EVOLUTIF (COUR COMMUNE) 10
FIGURE 5:HABITAT SPONTANE (QUARTIER PRECAIRE) 11
FIGURE 6:IMMEUBLES DE BUREAUX A ABIDJAN 11
FIGURE 7:PRINCIPE DU DEVELOPPEMENT DURABLE 17
FIGURE 8:SYNTHESE DES MATERIAUX ISOLANTS COMMERCIALISES SELON (SHIAVONI ET AL., 2016) 18
FIGURE 9: ORGANISATION DE LA FILIERE BOIS (HTTP://VALBOIS.UVED.ECOLEDUBOIS.FR/CO/MODULE_VALBOIS.HTML) 23
FIGURE 10: STRUCTURE MACROSCOPIQUE D'UN ARBRE : DETAIL DES DIFFERENTES PARTIES DU TRONC(HTTP://CERIG.PAGORA.GRENOBLE-INP.FR/TUTORIEL/MORPHOLOGIE-FIBRES-BOIS/PAGE03.HTM) 24
FIGURE 11: ETAPES DE LA FABRICATION DE PATE ET DE PAPIER (WEIDENMÜLLER, 1984) 28
FIGURE 12: SOLUBILITE DES SULFATES DE CALCIUM EN FONCTION DE LA TEMPERATURE(MURAT ET FOUCAULT, 1997) 36
FIGURE 13: ENSEMBLE DES PRODUITS MANUFACTURES ET FABRIQUES A BASE DE GYPSE(ROJO, 2013) 37
FIGURE 14:EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DE LA POROSITE (COQUARD, 1992) 38
FIGURE 15: EVOLUTION DE LA CONTRAINTE LIMITE DE RUPTURE EN FLEXION EN FONCTION DE LA POROSITE. A ET B DESIGNENT LA NATURE DE L'HEMIHYDRATE UTILISE POUR LA PREPARATION DU PLATRE (COQUARD, 1992) 38
FIGURE 16: CYCLE DE VIE DU GYPSE (ROJO, 2013) 39
FIGURE 17: CLASSIFICATION DES POLYMERES BIODEGRADABLES (AVEROUS, 2004) 40
FIGURE 18:STRUCTURE DE L'AMYLOSE(BULEON ET AL (1990)) 42
FIGURE 19 : PROPRIETES DE L'AMYLOSE DES AMIDONS DE DIFFERENTES ORIGINES BOTANIQUES SELON (MALDONADO ALVARADO P.D., 2014). 43
FIGURE 20: AMYLOPECTINE SELON (MALDONADO ALVARADO P.D., 2014)– (A) STRUCTURE EN GRAPPE DE L'AMYLOPECTINE D'APRES (ROBIN ET AL. 1974) (B) STRUCTURE CHIMIQUE DE L'AMYLOPECTINE SELON (BULEON ET AL., 1990) 43
FIGURE 21 : PROPRIETES DE L'AMYLOPECTINE DE DIFFERENTS TYPES D'AMIDON SELON (MALDONADO ALVARADO P.D., 2014) 44
FIGURE 22 : GRAIN D'AMIDON : PHOTOGRAPHIE ET REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ZONES AMORPHES ET CRISTALLINES SELON (MBOUGHENG P.D., 2009) 45
FIGURE 23 : IMAGES DE GRAINS D'AMIDON DE TYPES BOTANIQUES DIFFERENTS REALISEES D'UNE PART PAR MISCROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE ET D'AUTRE PART A LA LUMIERE POLARISEE SELON (PEREZ, 2010) (A)TARO (B)MARRON (C) GINGEMBRE (D) MANIOC (E) MAÏS (F) BANANE VERTE (G) BLE (H) POMME DE TERRE. 46
FIGURE 24 : DIAGRAMME DE DIFFRACTION AUX RAYONS X DES DIFFERENTS TYPES D'AMIDON DONNE PAR (MALDONADO ALVARADO P.D., 2014) SELON ZOBEL (1988). 47
FIGURE 25: DIFFERENTS ETATS DU GRAIN D'AMIDON PLACE EN PRESENCE D'UN EXCES D'EAU ET SOUMIS AU CHAUFFAGE-REFROIDISSEMENT (ANGELLIER, 2005) 48
FIGURE 26 : EVOLUTION DE LA VISCOSITE DE L'AMIDON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE (DAVID A., 2017) .. 49
FIGURE 27 : EVOLUTION DE LA STRUCTURE GRANULAIRE DE L'AMIDON DE POMME DE TERRE SUIVIE PAR MICROSCOPIE OPTIQUE (TENEUR EN EAU 82 WT%) (LIU ET AL., 2002) (LEROY, 2014) 50
FIGURE 28 : THERMOGRAMME D'AMIDON DE POMME DE TERRE CONTENANT DIFFERENTS TAUX D'EAU (DONOVAN, 1979). 51
FIGURE 29: REALISATION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (EXEMPLE DE GP) 61
FIGURE 30:COMPOSITES A CARACTERISER (GAUCHE FIBRES DE BOIS -AMIDON; MILIEU OUATE DE CELLULOSE -AMIDON; DROITE GRANULES DE PAPIER -AMIDON) 62
FIGURE 31: MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE REELLE (DE GAUCHE A DROITE : ECHANTILLONS FB, OC ET GP PLACES DANS LES PYCNOMETRES) 63
FIGURE 32: CLASSIFICATION DES VALEURS TAMPON HYGRIQUE (MBV) SELON LE NORDTEST PROJECT (RODE ET AL 2005) 64
FIGURE 33: ESSAI MBV: A) ARMOIRE CLIMATIQUE VÖTSCH VC 4060; B) MESURE MBV DES COMPOSITES; B) MESURE MBV DES CHARGES 66
FIGURE 34: A) CT METRE ; B) COMPOSITES MAINTENUS SEC DANS DES ARMOIRES A L'AIDE DU GEL DE SILICE, C) MESURE DE LA CONDUCTIVITE DES CHARGES 67
FIGURE 35: PRESSE UTILISEE POUR LES ESSAIS DE COMPRESSION ET DE FLEXION (GAUCHE : COMPRESSION, DROITE : FLEXION) 68
FIGURE 36: COURBES DEFORMATION (M/M) - CONTRAINTE (MPA) TYPES 69

FIGURE 37: COURBES DEFORMATION-CONTRAINTE REPRESENTATIVES DES COMPORTEMENTS (A) ELASTIQUE NON-LINEAIRE ET (B) ELASTOPLASTIQUE 69
FIGURE 38: ECHANTILLONS PREPARES POUR ESSAI MECANIQUE (EXEMPLE DE GP-P(0,6)) 70
FIGURE 39: COURBE TYPE D'UN ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION 3 POINTS 71
FIGURE 40: PUNDIT 72
FIGURE 41: ECHANTILLONS UTILISES POUR LES MESURES ACOUSTIQUES (EX. COMPOSITES OC ET GP) 72
FIGURE 42: DISPOSITIF POUR L'ESSAI AU FEU 75
FIGURE 43:FIBRE DE BOIS (FB) ; GAUCHE) FORME DE PANNEAUX ; DROITE) CARDEE 77
FIGURE 44: FIBRE DE BOIS VUE AU MEB 77
FIGURE 45: OUATE DE CELLULOSE (OC) ; GAUCHE) COMPACTE ; DROITE) EMIETTEE 78
FIGURE 46:OUATE DE CELLULOSE (OC) VUE AU MEB 78
FIGURE 47: DIFFERENTES ETAPES DE TRANSFORMATION DU PAPIER : A) DECHET DE PAPIER;B) LAMELLE DE PAPIER TREMPE DANS DE L'EAU ; C)PAPIER MALAXE ET REDUIT EN PATE ; D) PATE DE PAPIER PRESSE ; E) GRANULES DE PAPIER 79
FIGURE 48: GRANULES DE PAPIER (GP) VU AU MEB 80
FIGURE 49: GACHAGE DU PLATRE 80
FIGURE 50: ECHANTILLON DE PLATRE ELABORE DANS UN MOULE DE DIMENSION 4*4*16 CM^3 81
FIGURE 51: PREPARATION DE L'EMPOIS D'AMIDON DE POMME DE TERRE(A) 82
FIGURE 52: FORMES ET TAILLES DES GRANULES D'AMIDON DE POMME DE TERRE ET DE MANIOC,(MEB GROSSISSEMENT × 280) D'APRES ATKIN, CHENG,ABEYSEKERA ET ROBARDS (1999). 83
FIGURE 53: DIFFERENTES ETAPES D'ELABORATION DES COMPOSITES AVEC LE PLATRE (MALAXAGE DE LA PATE DE PLATRE, INTRODUCTION DES CHARGES, MALAXAGE DE LA PATE, COMPACTAGE DU COMPOSITE) 84
FIGURE 54: COMPOSITES LIES AU PLATRE STABILISE A TEMPERATURE AMBIANTE DU LABORATOIRE 84
FIGURE 55: DIFFERENTES ETAPES D'ELABORATION DES COMPOSITES AVEC L'AMIDON (PREPARATION DE L'EMPOIS, AJOUT DES CHARGES, MALAXAGE DE LA PATE, COMPACTAGE DU COMPOSITE) 85
FIGURE 56: SCHEMA DES ETAPES D'ELABORATION DES COMPOSITES 87
FIGURE 57: VARIATION DU MBV EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE POUR CHAQUE CHARGE 93
FIGURE 58: EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES CHARGES EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE A 23°C, SEC 94
FIGURE 59: EVOLUTION DE LA MASSE VOLUMIQUE DU PLATRE EN FONCTION DU GACHAGE (E/P) 95
FIGURE 60 : ECHANTILLONS (AMIDON) PLACES DANS LES PYCNOMETRES POUR LA MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE REELLE - A) AMIDON DE MANIOC ;B) AMIDON DE POMME DE TERRE 96
FIGURE 61 : EVOLUTION DE LA MASSE DES COMPOSITES FIBRE DE BOIS – PLATRE FBP EN FONCTION DU TEMPS DE SECHAGE POUR DIFFERENTS DOSAGES EN EAU (E/L = 0,6 ; 2 ; 2.5). 100
FIGURE 62 : EVOLUTION DE LA MASSE DES COMPOSITES OUATE DE CELLULOSE – PLATRE OCP EN FONCTION DU TEMPS DE SECHAGE POUR DIFFERENTS DOSAGES EN EAU (E/L = 0,6 ; 2 ; 2.5) 100
FIGURE 63 : EVOLUTION DE LA MASSE DES COMPOSITES GRANULES DE PAPIER – PLATRE GPP EN FONCTION DU TEMPS DE SECHAGE POUR DIFFERENTS DOSAGES EN EAU (E/L = 0,6 ; 2 ; 2.5) 100
FIGURE 64 : EVOLUTION DE LA MASSE DES COMPOSITES FIBRES DE BOIS AMIDON FBA EN FONCTION DU TEMPS DE SECHAGE POUR DIFFERENTS DOSAGES EN EAU (E/L = 3 ; 3,5 ; 4) 101
FIGURE 65 : EVOLUTION DE LA MASSE DES COMPOSITES OUATE DE CELLULOSE AMIDON OCA EN FONCTION DU TEMPS DE SECHAGE POUR DIFFERENTS DOSAGES EN EAU (E/L = 3 ; 3,5 ; 4). 101
FIGURE 66 : EVOLUTION DE LA MASSE DES COMPOSITES GRANULES DE PAPIER AMIDON GPA EN FONCTION DU TEMPS DE SECHAGE POUR DIFFERENTS DOSAGES EN EAU (E/L = 3 ; 3,5 ; 4) 101
FIGURE 67: COMPOSITES ELABORES AU PLATRE (GAUCHE : FB-P, MILIEU : OC-P, DROITE : GP-P) 102
FIGURE 68 : ECHANTILLONS PRODUITS PAR DECOUPE DANS UNE PLAQUE : LIGNE 1) FB-A, LIGNE 2) OC-A, LIGNES 3) GP-A I, LIGNE 4) GP-A II. LES NUMEROS CORRESPONDENT AUX NUMEROS D'ECHANTILLONS 103
FIGURE 69:TRIANGLES DE FORMULATION MONTRANT LES DIFFERENTES PROPORTIONS ET LES MASSES VOLUMIQUES DES COMPOSITES AU PLATRE 105
FIGURE 70: TRIANGLES DE FORMULATION MONTRANT LES DIFFERENTES PROPORTIONS ET LES MASSES VOLUMIQUES DES COMPOSITES AVEC L'AMIDON. 106
FIGURE71: EVOLUTION DE LA MASSE VOLUMIQUE EN FONCTION DU RAPPORT CHARGE/ LIANT POUR LES COMPOSITES GRANULE DE PAPIER (GP-A I (C/A=1,5) ; GP-A II (C/A=4,17)) 107
FIGURE 72: CINETIQUE DE MASSE D'UN ECHANTILLON GP-P AU COURS D'UN ESSAI MBV. 109
FIGURE 73: VALEUR TAMPON HYGRIQUE EN ADSORPTION, DESORPTION ET MOYENNE DES COMPOSITES LIES AU PLATRE. 110
FIGURE 74: VALEUR TAMPON HYGRIQUE DES COMPOSITES LIES AU PLATRE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE. 110
FIGURE 75: CINETIQUE DE MASSE D'UN ECHANTILLON GP-A AU COURS D'UN ESSAI MBV 112

FIGURE 76: VALEUR MBV DES COMPOSITES A BASE D'AMIDON POUR LES DIFFERENTES FORMULATIONS AVEC UN RAPPORT C/A DE 1,5 ET DIFFERENTS RAPPORTS (E/A). 113
FIGURE 77: VALEUR MBV DES COMPOSITES GP-A POUR UN RAPPORT C/A DE 4,17 113
FIGURE 78: VALEUR TAMPON HYGRIQUE DES COMPOSITES A L'AMIDON EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE (ESSAI REALISE APRES SECHAGE PUIS STABILISATION A 23°C, 50%HR) 113
FIGURE 79: EXPOSITION ET EMPLACEMENT DES ECHANTILLONS DANS L'ARMOIRE CLIMATIQUE (MESURES DE MBV DES PLAQUES DE PETITES EPAISSEURS ET GRANDE EPAISSEURS) 114
FIGURE 80: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS FIBRES DE BOIS-AMIDON DE POMME DE TERRE (E/A=3) 115
FIGURE 81: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS FIBRES DE BOIS-AMIDON DE POMME DE TERRE (E/A=3,5)..... 115
FIGURE 82: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS FIBRES DE BOIS-AMIDON DE POMME DE TERRE (E/A=4) 115
FIGURE 83: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS OUATE DE CELLULOSE-AMIDON DE POMME DE TERRE(E/A=3) 116
FIGURE 84: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS OUATE DE CELLULOSE-AMIDON DE POMME DE TERRE (E/A=3,5) 116
FIGURE 85: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS OUATE DE CELLULOSE-AMIDON DE POMME DE TERRE(E/A=4) 116
FIGURE 86: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 1.5) (E/A=3) 117
FIGURE 87: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 1,5) (E/A=3,5) 117
FIGURE 88: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 15) (E/A=4) 117
FIGURE 89: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 4,17 ET E/A = 3)..... 118
FIGURE 90: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 4,17 ET E/A = 3,25)..... 118
FIGURE 91: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 4,17 ET E/A = 3,5)..... 118
FIGURE 92: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 4,17 ET E/A = 3,75)..... 119
FIGURE 93: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET MBV DES ECHANTILLONS INITIAUX ET DECOUPES POUR LES FORMULATIONS GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 4,17 ET E/A = 4)..... 119
FIGURE 94: EVOLUTION DE LA VALEUR MBV EN FONCTION DE L'EPAISSEUR POUR LES FORMULATIONS FIBRES DE BOIS-AMIDON FB/A=1,5 ET E/A = 3 A 4..... 121
FIGURE 95: EVOLUTION DE LA VALEUR MBV EN FONCTION DE L'EPAISSEUR POUR LES FORMULATIONS OUATE DE CELLULOSE-AMIDON OC/A=1,5 ET E/A = 3 A 4 121
FIGURE 96: EVOLUTION DE LA VALEUR MBV EN FONCTION DE L'EPAISSEUR POUR LES FORMULATIONS GRANULE DE PAPIER-AMIDON, HAUT : GP/AI =1,5 ET E/A = 3 A 4 ; BAS : GP/A II=4,17 ET E/A = 3 A 4 122
FIGURE 97: VALEUR TAMPON HYGRIQUE DES COMPOSITES GP-AM EN FONCTION DE LA FORMULATION. 123
FIGURE 98: EVOLUTION DE LA VALEUR HYDRIQUE TAMPON (MBV) DES COMPOSITES AVEC L'AMIDON DE POMME DE TERRE ET DE MANIOC E/A=3, 3,5 ET 4 123
FIGURE 99: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE A (23°C, 50%HR) DES COMPOSITES DE FIBRE DE BOIS-PLATRE 128
FIGURE 100: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE A (23°C, 50%HR) DES COMPOSITES DE OUATE DE CELLULOSE-PLATRE..... 128
FIGURE 101: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE A (23°C, 50%HR) DES COMPOSITES DE GRANULES DE PAPIER-PLATRE..... 128
FIGURE 102: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE A (23°C, 50%HR), BILAN DE L'ENSEMBLE DES COMPOSITES A BASE DE PLATRE..... 129
FIGURE 103: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C, SEC) DES COMPOSITES DE FIBRE DE BOIS-PLATRE 130
FIGURE 104: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C, SEC) DES COMPOSITES DE OUATE DE CELLULOSE-PLATRE..... 130
FIGURE 105: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C, SEC) DES COMPOSITES DE GRANULES DE PAPIER-PLATRE..... 130
FIGURE 106: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C, SEC), BILAN DE L'ENSEMBLE DES COMPOSITES A BASE DE PLATRE..... 131

FIGURE 107: CONDUCTIVITE THERMIQUE AU POINT SEC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DES COMPOSITES FIBRES DE BOIS – PLATRE 133
FIGURE 108: CONDUCTIVITE THERMIQUE AU POINT SEC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DES COMPOSITES OUATE DE CELLULOSE-PLATRE 133
FIGURE 109: CONDUCTIVITE THERMIQUE AU POINT SEC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DES COMPOSITES GRANULES DE PAPIER –PLATRE 133
FIGURE 110: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C, SEC) DES COMPOSITES A BASE D'AMIDON AVEC UN RAPPORT CHARGE/AMIDON DE 1,5 135
FIGURE 111: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C, SEC) ET A (23°C, 50%HR) POUR LES COMPOSITES FIBRES DE BOIS-AMIDON DE POMME DE TERRE (FB/A=1,5) 136
FIGURE 112: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C, SEC) ET A (23°C, 50%HR) POUR LES COMPOSITES OUATE DE CELLULOSE-AMIDON DE POMME DE TERRE (OC/A=1,5) 136
FIGURE 113: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AU POINT (20°C,SEC) ET A (23°C,50%HR) POUR LES COMPOSITES GRANULES DE PAPIER-AMIDON DE POMME DE TERRE (GP/A = 1,5) 136
FIGURE 114: CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DES COMPOSITES A BASE D'AMIDON AVEC UN RAPPORT CHARGE/AMIDON DE 1,5 137
FIGURE 115: CONDUCTIVITE THERMIQUE DES COMPOSITES A BASE D'AMIDON AVEC UN RAPPORT CHARGE/AMIDON DE (GP-A I) = 1,5 ET (GP-A II) = 4,17 138
FIGURE 116: CONDUCTIVITES THERMIQUES DES COMPOSITES A BASE D'AMIDON DE POMME DE TERRE ET A BASE D'AMIDON DE MANIOC EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE. 139
FIGURE 117: SYNTHESE DES CONDUCTIVITES THERMIQUES DES COMPOSITES A BASE DE PLATRE, D'AMIDON DE POMME DE TERRE ET D'AMIDON DE MANIOC. 140
FIGURE 118: ESSAI EN COMPRESSION : EXEMPLE DU COMPOSITE GP-P (GAUCHE : AVANT ESSAI, DROITE : EN FIN D'ESSAI A UNE DEFORMATION DE 0,2 M/M) 143
FIGURE 119: COURBE DEFORMATION (M/M) -CONTRAINTE (MPA) POUR LES COMPOSITES FB-P 144
FIGURE 120: COURBE DEFORMATION (M/M) -CONTRAINTE (MPA) POUR LES COMPOSITES OC-P 144
FIGURE 121: COURBE DEFORMATION (M/M) -CONTRAINTE (MPA)POUR LES COMPOSITES GP-P 144
FIGURE 122: EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE POUR LES COMPOSITES AU PLATRE 148
FIGURE 123: EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE POUR LES COMPOSITES AU PLATRE. 149
FIGURE 124: EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION POUR TOUS LES COMPOSITES FORMULES AVEC DU PLATRE. 150
FIGURE 125: COURBE DEFORMATION (M/M) -CONTRAINTE (MPA) POUR LES COMPOSITES FB-A FORMULES AVEC DIFFERENTS E/A (FB/A=1,5). 151
FIGURE 126: COURBE DEFORMATION (M/M) -CONTRAINTE (MPA) POUR LES COMPOSITES OC-A FORMULES AVEC DIFFERENTS E/A (OC/A=1,5) 151
FIGURE 127: COURBE DEFORMATION (M/M) -CONTRAINTE (MPA) DES COMPOSITES GP-A FORMULES AVEC DIFFERENTS E/A : A) GP/A=1,5 ; B) GP/A=4,17 151
FIGURE 128: EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE (COMPOSITES P ET A). 154
FIGURE 129: EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE (COMPOSITES P ET A). 155
FIGURE 130: EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION POUR TOUS LES COMPOSITES FORMULES AVEC DU PLATRE ET DE L'AMIDON DE POMME DE TERRE. 157
FIGURE 131: ESSAI EN FLEXION 3 POINTS (EXEMPLE DES COMPOSITES GP). 157
FIGURE 132: ESSAI DE FLEXION SUR LES COMPOSITES FB-P 158
FIGURE 133: ESSAI DE FLEXION SUR LES COMPOSITES OC-P 158
FIGURE 134: ESSAI DE FLEXION SUR LES COMPOSITES GP-P 159
FIGURE 135: VARIATION DE LA RESISTANCE EN TRACTION EN FONCTION DU TYPE DE CHARGE ET DE LA FORMULATION (E/P) 161
FIGURE 136: VARIATION DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION TRACTION EN FONCTION DE LA RESISTANCE EN TRACTION POUR LES COMPOSITES AU PLATRE AVEC LES DIFFERENTS TYPES DE CHARGE. 162
FIGURE 137: COURBE DE L'ESSAI EN TRACTION EN FONCTION DU DEPLACEMENT POUR LES COMPOSITES FB-A . 162
FIGURE 138: COURBE DE L'ESSAI EN TRACTION EN FONCTION DU DEPLACEMENT POUR LES COMPOSITES OC-A. 163
FIGURE 139: COURBE DE L'ESSAI EN TRACTION EN FONCTION DU DEPLACEMENT POUR LES COMPOSITES GP-A . 163
FIGURE 140: VARIATION DE LA RESISTANCE EN TRACTION EN FONCTION DU TYPE DE CHARGE ET DE LA FORMULATION (E/A ET C/A). 165

FIGURE 141: VARIATION DE LA RESISTANCE EN TRACTION EN FONCTION DU TYPE DE CHARGE ET DE LA FORMULATION POUR TOUS LES COMPOSITES. 166
FIGURE 142: VARIATION DE LA RESISTANCE EN TRACTION EN FONCTION DU TYPE DE CHARGE ET DE LA FORMULATION (E/P, E/A ET C/A). 167
FIGURE 143: VARIATION DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DU TYPE DE CHARGE ET DE LA FORMULATION POUR LES COMPOSITES AVEC LE PLATRE. 168
FIGURE 144: VARIATION DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DE LA FORMULATION POUR LES COMPOSITES GP-A II. 168
FIGURE 145: ESSAI AU FEU DES COMPOSITES FB-A 171
FIGURE 146 : VISUALISATION APRES ESSAI AU FEU DES COMPOSITES FB-A ET OC-A 172
FIGURE 147: COMPOSITE OC-A - GAUCHE : TEST A LA FLAMME, DROITE : THERMOGRAPHE. 173
FIGURE 148 : COMPOSITES GP-A APRES RETRAIT DE LA FLAMME 173
FIGURE 149 : COMPOSITE GP-A AVEC LE THERMOGRAPHE. 174

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I: COMPOSITION DES DECHETS MENAGERS A ABIDJAN 15
TABLEAU II: QUANTITES DE DECHETS COLLECTEES ET MISES EN DECHARGES (2009 - 2010) 16
TABLEAU III: COMPOSITIONS MASSIQUES MOYENNES DU BOIS (TRO ET AL. 2008) 25
TABLEAU IV: COMPARAISON DES PROCEDES DE FABRICATION DE PATE A PAPIER (SKF INDUSTRIAL DIVISION, 2011) 29
TABLEAU V: DEGRE DE POLYMERISATION DE L'AMYLOSE ET DE L'AMYLOPECTINE D'AMIDONS 44
TABLEAU VI: MAILLE CRISTALLINE DES ALLOMORPHES A ET B DE L'AMIDON 47
TABLEAU VII: GELATINISATION, EMPESAGE ET PROPRIETES D'EMPOIS D'AMIDON D'ORIGINE BOTANIQUE DIFFERENTES (JANE ET *AL.*, 1999)SELON (MALDONADO, 2014) 50
TABLEAU VIII: LES PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DE L'AMYLOSE ET DE L'AMYLOPECTINE (WHISTLER ET *AL.* 1984). 53
TABLEAU IX : CARACTERISTIQUES DES AMIDONS ET LEURS EMPOIS SELON LEUR ORIGINE BOTANIQUE (NAYOUF, 2003) (CHENE, 2004) 54
TABLEAU X: MASSES VOLUMIQUES APPARENTES ET REELLES ET POROSITE TOTALE DES CHARGES 91
TABLEAU XI: VALEUR MOYENNE ET ECART-TYPE DE LA VALEUR MBV DES CHARGES EN ADSORPTION (ADS), EN DESORPTION (DES) ET EN MOYENNE 92
TABLEAU XII: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET POROSITE DES MORTIERS DE PLATRE POUR DIFFERENTS TAUX DE GACHAGE E/P (MESURES DE LA MOYENNE DE TROIS ECHANTILLONS). 95
TABLEAU XIII: MASSE VOLUMIQUE REELLE DES AMIDONS DE POMME DE TERRE ET DE MANIOC OBTENUE PAR LA METHODE DU PYCNOMETRE 96
TABLEAU XIV: ASPECT DES COMPOSITES OBSERVES APRES SECHAGE (FIGURE 67 ET FIGURE 68). 104
TABLEAU XV: CONDUCTIVITES THERMIQUES DE COMPOSITES A BASE DE PLATRE ISSUES DE LA BIBLIOGRAPHIE 132
TABLEAU XVI : CONDUCTIVITES THERMIQUES DE COMPOSITES A BASE D'AMIDON ISSUES DE LA BIBLIOGRAPHIE 139
TABLEAU XVII: CARACTERISTIQUES MOYENNES IDENTIFIEES LORS DES ESSAIS DE COMPRESSION – LIANT PLATRE 147
TABLEAU XVIII: CARACTERISTIQUES MOYENNES IDENTIFIEES LORS DES ESSAIS DE COMPRESSION – LIANT AMIDON 153
TABLEAU XIX: RESISTANCE EN TRACTION PAR FLEXION – LIANT PLATRE 160
TABLEAU XX: RESISTANCE EN TRACTION PAR FLEXION – LIANT AMIDON 164
TABLEAU XXI: CLASSIFICATION DES COMPOSITES EN FONCTION DE LEUR COMPORTEMENT A L'ESSAI 171

Introduction

Selon l'INED, la population mondiale actuelle est de 7,5 milliards d'habitants et elle devrait atteindre 9,7 milliards en 2050. Plus de la moitié de la croissance démographique dans le monde d'ici à 2050 aura lieu en Afrique. Compte tenu de cette évolution, il faut prévoir de répondre aux besoins de la population en terme d'habitat, d'alimentation, de transport et d'accès aux services (éducation, santé…), tout en respectant les principes de développement durable.

Les questions de gestion des déchets et d'un logement sain pour la population sont centrales en matière de bien-être et de réduction de la pollution pour les pays africains en particulier. Pour ces pays, elles s'inscrivent donc parmi les plus grands défis à relever. La politique de ces pays du sud s'inscrit selon deux stratégies différentes relatives à la gestion des déchets : l'une consiste à interdire la production et la commercialisation de certains produits source de pollution, tel le plastique, l'autre à mettre en place des projets de recyclage.

Au niveau de la construction d'habitations, il s'agit de développer des matériaux alternatifs à faible impact environnemental pour varier l'offre sur le marché du bâtiment. Ceux-ci devront notamment contribuer à la performance hygrothermique des bâtiments et au confort intérieur tout en étant abordables d'un point de vue économique. Ceci conduit à utiliser des ressources locales issues de matières premières bio-sourcées ou de la valorisation de déchets.

Il sera question dans ce travail de recycler des déchets, tels que le papier et l'amidon, en matériaux de construction. Ces matériaux sont destinés à être utilisés en faux-plafond ou en cloisonnement intérieur. Ce travail est réalisé en partenariat entre le laboratoire de Géomatériaux et de technologie de l'Habitat de l'Université Félix Houphouët Boigny de cocody Abidjan (Côte d'Ivoire) et le laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique de l'Université de Rennes 1 (France). Il bénéficie du support de bourse AMRUGE-CI (Appui à la Modernisation et à la Réforme des Universités et Grandes Ecoles de Côte d'Ivoire)[1].

Les objectifs spécifiques de cette étude sont donc les suivants :

- élaborer une méthode de valorisation des déchets de papier sous forme de charge à intégrer dans des composites,

[1]http://www.ivoire.campusfrance.org/actualite/bourses-doctorales

- sélectionner des matières premières selon des critères de développement durable et de disponibilité locale d'une part, et pour comparatif d'autre part,

- élaborer différents types de composite réalisés avec deux types de liants (organique : amidon de pomme de terre et amidon de manioc) et trois types de charge (fibres de bois, ouate de cellulose et granules de papier recyclé).

- déterminer les performances hygriques, thermiques et mécaniques des matériaux développés afin d'identifier les meilleurs solutions pour être utilisées en plafond et/ou en cloison.

Pour atteindre ces objectifs, le mémoire est organisé en trois parties subdivisées en onze chapitres.

La première partie consiste en une synthèse bibliographique qui présente dans un premier temps le contexte local de la Côte d'Ivoire. Elle recense les différents modes constructifs utilisés et souligne la transition entre matériaux traditionnels (souvent à base de terre, bois) et matériaux modernes (béton, acier, verre). L'utilisation de ces derniers est souvent source d'inconfort et induit une surconsommation énergétique liée au recours à la climatisation. En parallèle, la problématique de gestion des déchets, avec peu de filières de recyclage développées actuellement, est soulignée. Deux déchets sont identifiés comme valorisables en tant que matière première pour la production de composite : le papier et l'amidon de manioc. Dans un deuxième temps, la revue bibliographique présente l'origine et les modes de transformation des matières premières envisagées. Outre le déchet de papier qui sera valorisé sous forme de granules, deux types de charges cellulosiques sont considérés : la fibre de bois, produit industriel issu des panneaux de fibre de bois et la ouate de cellulose, produit industriel issu du recyclage des journaux. Outre l'amidon de manioc, deux types de liants sont considérés : le plâtre, liant minéral couramment utilisé en France et l'amidon de pomme de terre, autre liant agro-sourcé plus facilement disponible en France.

La deuxième partie présente les méthodes utilisées et les matériaux étudiés. Les méthodes expérimentales permettent une caractérisation physique, hygrique, thermique, mécanique et une étude de la résistance au feu des matériaux. Certaines méthodes sont utilisées pour caractériser les charges et les composites. D'autres sont utilisées uniquement pour les composites. Dans un deuxième temps, les matières premières utilisées et leur mode de préparation sont présentés. Les formulations et méthodes de production des composites sont ensuite détaillées.

La troisième partie présente les caractéristiques multi-physiques des matières premières et des composites. Ces dernières dont détaillées par type de liant et en fonction des

types de charge et des formulations (dosage en eau et dosage en charge). Après avoir attesté de la faisabilité des composites, leurs performances mécaniques sont vérifiées avant de s'intéresser aux performances hygriques et thermiques. Enfin, les résultats relatifs à la résistance au feu sont présentés.

PARTIE 1
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

L'objectif de ces travaux est de développer des composites à faible impact environnemental destinés à la réalisation de faux-plafond et / ou cloisonnement. La synthèse bibliographique effectuée dans le cadre de cette étude est présentée en trois chapitres.

Le premier chapitre présente les contextes et enjeux de l'étude rapportés au contexte local de la Côte d'Ivoire. Ceux-ci intègrent les notions de climat, urbanisation et confort de l'usager ainsi que la problématique de la gestion des déchets. Dans un contexte de développement durable, on recense ensuite différents matériaux peu impactants, issus de matières premières bio-sourcées ou recyclées.

Suite à ce recensement, le deuxième chapitre présente l'origine des charges envisagées pour la production de composites. Ces charges sont issues directement ou indirectement du bois et constituent donc des matières premières bio-sourcées ou une valorisation de déchets.

Enfin, le troisième chapitre porte sur la production et la mise en œuvre des liants envisagés, qui sont de deux types : minéral (le plâtre) et agro-sourcé (l'amidon). En effet, dans une optique de valorisation des déchets, l'amidon de manioc, issu de la préparation du couscous de manioc (attiéké), est très disponible en Côte d'Ivoire. En France, on choisira plutôt l'amidon de pomme de terre, également issu d'un tubercule et produit industriellement.

CHAPITRE I
Contexte et Enjeux

I.1 Définition de quelques notions utilisées

Matériaux bio-sourcés

Un matériau ou un produit de construction est dit biosourcé, s'il intègre dans sa composition une part de biomasse (Matière d'origine biologique à l'exception des matières de formation géologique ou fossile). Les matériaux biosourcés les plus utilisés pour la construction comprennent le bois d'œuvre, les panneaux de bois, les isolants rigides et semi-rigides à base de fibres végétales, la ouate de cellulose, la paille et le béton de chanvre (C&B, 2012).

Matériaux composites

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés couplant les propriétés de chacune des phases. Les renforts de fibres dans une matrice constitue un exemple où les fibres sont utilisées en renfort de la matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes (CARMA, 2006).

Matrices

La matrice ou liant a pour rôle de lier les fibres renforts ou les charges, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit (CARMA, 2006). Il existe deux types de matrice :

-la matrice minérale : (exemple : le ciment, la chaux…)

-la matrice organique : (exemple : la résine, l'amidon…)

Charges

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à une matrice, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé. Il existe deux types de charge :

-les charges organiques (exemples : les fibres de bois, la ouate de cellulose…)

-les charges minérales (exemples : les silices, les craies et les carbonates…)

I.2 Contexte de l'étude

I.2.1 Climat en Côte d'Ivoire

Située dans le carré constitué par le 4^{éme} et le 11^{éme} degré de latitude N et par le 2^{éme} et le 9^{éme} degré de longitude W (**Mourtada, 1995**) la Côte d'Ivoire avec une superficie de 322.462 km^2 présente deux zones climatiques principales en correspondance avec les deux types de paysages rencontrés : savane et forêt claire au nord, forêt dense et humide au sud. La Côte d'Ivoire est située dans la zone de transition entre le climat équatoriale humide au sud et le climat tropical sec au nord (Figure 1).

Le **sud** et le **centre**, sont couverts par une forêt dense, ils sont très humides car toute l'année frappés par des brises de mer chaudes et humides caractérisées par des précipitations abondantes. La température stationne entre 29°C et 32°C.

Le **nord** est plus sec avec des saisons de pluie plus ou moins intense. L'air est sec et les nuits plus fraiches. La température moyenne annuelle s'élève à 26,1°C.

La Côte d'Ivoire présente dans son ensemble un climat équatorial humide avec une température variant de 26 à 32°C. Le climat général est donc chaud et humide toute l'année.

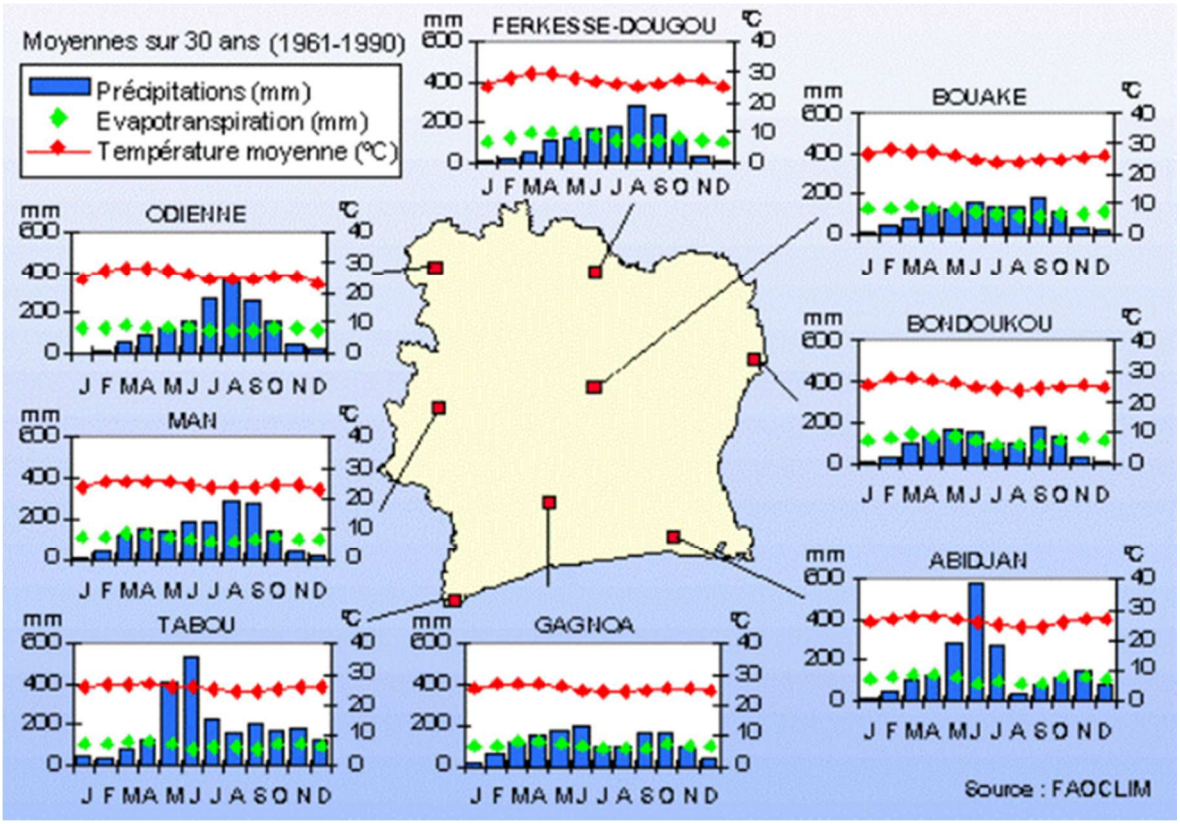


Figure 1 : Profil météorologique de la Côte d'Ivoire (http://www.avenue225.com/wp-content/mediasavenue/2010/05/climat.gif)

I.2.2 L'urbanisation en Côte d'Ivoire

L'explosion urbaine des 40 dernières années dans les métropoles des pays en développement a été marquée par l'extension croissante d'un habitat spontané et les problèmes d'insertion urbaine de ses habitants (**Atta *et al.* 2015**). En Côte-d'Ivoire, l'urbanisation a émergé, surtout dans les années 50, avec une croissance accélérée de la population urbaine. Cette forte croissance démographique a également favorisé le développement des habitats modernes. Cependant, ces habitats modernes sont très coûteux car, pour des raisons d'esthétique mais surtout de protection des bâtiments contre les intempéries (fortes pluies, vent violent), les matériaux locaux ont été abandonnés au profit des matériaux industriels importés comme le ciment. Celui-ci demande une grande dépense énergétique au cours de sa production et conduit à des bâtiments énergivores (utilisation de la climatisation toute l'année).

Cette croissance rapide des métropoles ivoiriennes induit des difficultés pour accueillir et loger les nouveaux arrivants dans de bonnes conditions et impose de gérer d'avantage de déchets susceptibles de polluer l'environnement. Pour loger cette population, il se développe dans les villes quatre types d'habitats:

L'habitat résidentiel (Figure 2) est constitué essentiellement de grandes villas et d'immeubles. Il regroupe les catégories sociales les plus aisées. Ces habitats sont faits avec des matériaux lourds tels que les parpaings de ciment. Les couvertures sont diverses : dalles en béton, tôles aluminium, tuiles métalliques vernies ou de terre cuite colorées. Les plafonds sont en staff ou contreplaqués. Les ouvertures sont vitrées et le plancher est réalisé avec du carrelage.

Figure 2: Habitat résidentiel

L'habitat économique (Figure 3) concerne les logements sociaux réalisés en général par des sociétés immobilières (**DCGTX, 1996)** (devenu aujourd'hui, Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD)).Ce sont des constructions en «bandes»

délimitées par des clôtures sur des espaces réduits. Les murs sont faits avec les parpaings de ciment, les couvertures sont des tôles aluminium, les plafonds en contreplaqués, les ouvertures vitrées et le plancher est réalisé avec du carrelage ou du béton nu.

Figure 3:Habitat économique (Yao-Kouassi, 2010)

L'habitat évolutif ou la cour commune (Figure 4) se présente sous la forme de plusieurs logements dans une cour où cohabitent plusieurs familles (locataires) avec parfois le propriétaire. C'est la plus ancienne forme d'habitat adoptée par les abidjanais. Cet habitat reste largement majoritaire et continue à se développer en périphérie car il permet d'accueillir plusieurs familles. Les murs sont faits avec des parpaings de ciment, les couvertures sont des tôles aluminium, les plafonds en contreplaqués, les ouvertures en bois et le plancher avec du béton nu.

Figure 4:Habitat évolutif (Cour commune)

L'habitat spontané (Figure 5) concerne les habitats précaires. Il se situe hors des lotissements officiels, à proximités des zones résidentielles car ceux qui y vivent travaillent dans les quartiers aisés. Ces habitats sont en général construits sur des terrains de mauvaises qualités (inondables, en pente). Cette catégorie regroupe des constructions de différentes natures, semblables à des constructions rurales et/ou réalisées avec des matériaux de récupération. Les murs sont en terre battue enduits avec du ciment. La couverture est réalisée

soit avec de vielles tôles soit avec du plastique ou de la paille. Il n'y pas de plafond et le plancher est en terre damée.

Figure 5:Habitat spontané (quartier précaire)

Les habitats spontanés et les habitats évolutifs se retrouvent dans toutes les villes de la Côte d'Ivoire.

Contrairement à ces habitats urbains, **en zone rurale** les constructions sont faites avec les matériaux locaux. Les murs sont en briques de terre, la charpente est en bois, la couverture est tissée en chaume ou en nattes et le plafond est réalisé en bambou ou en contreplaqué, le plancher est en terre pleine et les ouvertures sont en bois. Ces habitats sont entourés de végétation.

Les immeubles ou gratte-ciel: à usage de bureaux sont localisés au centre dans les grandes villes. Ces habitats sont faits avec des matériaux lourds tels que les parpaings de ciment. Les séparations entre les bureaux sont soit des contreplaqués, soit des plaques de plâtre. Les couvertures sont des faux plafonds en plaque de plâtre ou en dalle suspendu soit en lambris tendu ou du bois ou des lames PVC... Les ouvertures sont vitrées et le plancher est soit du bois ou du carrelage (Figure 6).

Figure 6:Immeubles de bureaux à Abidjan

I.2.3 Le confort intérieur

Le confort thermique peut se définir comme la satisfaction exprimée par un individu à l'égard de l'ambiance thermique du milieu dans lequel il évolue. Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique et hydrique entre le corps humain et son environnement. Il est majoritairement lié à la température et l'humidité relative de l'air ambiant, la température radiante moyenne, la vitesse relative de l'air environnant. Il dépend de l'activité physique du métabolisme, de l'habillement et de la sensibilité (aspect psycho-sociologue) de chaque individu **(Maamar, 2016).**

Le PMV («predictive mean vote») permet d'évaluer le ressenti thermique qu'exprimerait un groupe d'individu dans une situation donnée. Il est gradué de +3 (ressenti très chaud) à -3 (ressenti très froid). Cette évaluation peut dépendre de la zone climatique d'origine des personnes : des personnes habituées à vivre dans des ambiances chaudes peuvent trouver confortable des niveaux de températures plus élevés : alors qu'en climat européen la plage confortable en ambiance chaude correspond plutôt à un PMV de 0 à 0,5, **(Jannot et Djiako, 1994)** s'intéressent au confort ressenti par des personnes résidant en zone tropicale et indiquent qu'un PMV entre 0 et 1,5 peut être considéré acceptable. Dans ces travaux, l'effet de la température d'air sur le confort est estimé et l'inconfort est exprimé en zone tropicale quand elle dépasse 30°C. La température radiante, notamment liée aux plafonds qui reçoivent beaucoup d'apports solaires, influe sur le confort surtout quand un écart de plus de 3°C est observé entre la température d'air et la température radiante. L'humidité relative souhaitable est de 30 à 80%. Pour respecter de bonnes conditions de confort, l'étude préconise des températures de murs et d'air maximums de 32°C en saison sèche et 30°C en saison humide.

Atteindre ces conditions de confort dans les bâtiments peut s'effectuer de manière bioclimatique ou en ayant recours à des techniques de climatisation active. Le choix des matériaux de construction est essentiellement déterminé par leur disponibilité locale, leur coût, leur durabilité et leur adéquation à un climat particulier **(Maamar, 2016)**. L'utilisation des matériaux traditionnels disponibles dans chaque zone climatique comme le bois, la brique de terre, la pierre et les matériaux modernes, tels que le parpaing de ciment doit être judicieuse. La nature des matériaux qui couvrent l'enveloppe extérieure des bâtiments et leur propriété de réflectivité doivent être considérées surtout en climat chaud, car elles ont une influence directe sur l'augmentation de la température moyenne radiante et donc sur le confort **(Cherier *et al.* 2013)**.

En outre, la conception des bâtiments (orientation, choix des matériaux, ratios vitrés, ventilation …) peut notablement influer sur leur consommation énergétique. **(Jannot et Djiako, 1994)** constatent que le rayonnement solaire est l'une des principales sources d'échauffement en zone tropicale et conseillent des maisons allongées d'est en ouest, des protections solaires au nord et sud, une limitation des apports notamment par une bonne isolation du plafond. Un sol non isolé est en général favorable de même qu'une ventilation naturelle traversante et la présence de végétation avoisinante. Ces critères sont également identifiés comme essentiels dans le cadre d'un climat tropical thaïlandais par **(Rattanongphisat, 2013)**. Une étude bibliographique **(Manzano-Agugliaro *et al* 2015)** recense différentes stratégies de conception en fonction de la zone climatique de construction et relie les principes actuels préconisés en conception bioclimatique et architecture vernaculaire.

Des études sont menées pour relier confort et optimisation énergétique du bâtiment à partir de relevés de consommation sur site ou de simulations numériques de comportements de bâtiments. On recense différentes d'études adaptées aux habitations situées en climat tropical.

En France, ces travaux ont notamment été effectués dans le cadre de l'établissement de la règlementation thermique dans les départements et région d'outre-mer (DROM) dans lesquels le climat rencontré est soit équatorial, soit tropical humide. L'impact de différentes solutions techniques a été envisagé grâce au logiciel de simulation thermique Codyrun **(Boyer 1993)** et comparé à des expérimentations in situ sur 280 projets construits en 1996 **(Garde *et al.* 1997**). L'ensemble des résultats a donné lieu à la publication des recommandations ECODOM **(Garde *et al*. 1996).** L'étude montre que 70% des solutions d'amélioration du confort passe par la protection par rapport aux apports solaires du toit et par la ventilation.

(**Lucas *et al.* 2006)** s'intéressent à l'optimisation du confort en zone tropicale à l'aide des données obtenues grâce au code Codyrun (température d'air, température radiante moyenne, température résultante, humidité relative) avec des conditions météorologiques obtenues par un générateur spécifique aux climats chauds et humides NewRunéole **(Adelard *et al.* 2000)**. Plusieurs scénarios sont envisagés combinant traitement de l'enveloppe (casquettes, stores, retour de bâtiment, isolation des parois opaques…) et type de ventilation (ventilation mécanique, surventilation, brasseur d'air et climatisation …). Il apparait notamment que le recours à la climatisation peut être évité dans certaines zones du bâtiment en fonction des choix retenus dans le scénario.

Le logiciel de simulation thermique dynamique Pléïades Comfies est utilisé par **(Kemajou *et al.* 2011)**, pour relier confort et choix de matériaux de construction au Cameroun en comparant l'utilisation de matériaux de type parpaings aux matériaux traditionnels (bois, brique de terre). Les simulations ont été effectuées à partir de données météorologiques issues de relevés établis sur 5 ou 10 ans et portent sur un habitat mono zone de 15 m² avec ouvertures en façade nord. Elles montrent que pour un climat équatorial, une bonne protection solaire, une inertie légère et une ventilation permanente sont adéquates pour un bon confort alors qu'en climat tropical, les pointes de température observées requièrent plutôt l'utilisation de bonnes protections solaires, d'une inertie thermique élevée et une bonne ventilation nocturne.

I.2.4 La gestion des déchets (en Côte d'Ivoire)

Le code de l'environnement ivoirien définit le terme « déchet » comme l'ensemble des produits solides, liquides ou gazeux, résultant des activités des ménages, d'un processus de fabrication ou tout bien meuble ou immeuble abandonné ou qui menace ruine (**Code de l'environnement, 1996**).

En Côte d'Ivoire, ce sont essentiellement des déchets ménagers qui sont produits, biodégradables (papier-carton) ou non (le plastique) (Tableau I).En milieu rural, les déchets ménagers sont éliminés par les habitants eux-mêmes (brûlés ou donnés aux animaux), tandis que les collectivités locales collectent les déchets non dangereux qui ne proviennent pas des ménages, mais des commerçants et artisans. Comme toutes les grandes villes africaines, Abidjan connaît une forte poussée démographique qui n'est pas en adéquation avec les infrastructures urbaines. Cette inadéquation occasionne l'apparition d'activités informelles, de façon anarchique, qui échappe à tout contrôle tant au niveau fiscal qu'organisationnel. La conjugaison de ces deux phénomènes : la forte poussée démographique et les activités informelles, ont une incidence directe sur l'environnement et le cadre de vie des populations. Uniquement pour le district autonome d'Abidjan, ce sont environ 3600 tonnes de déchets qui sont produits quotidiennement soit un peu plus de 1,3 million de tonnes par an. (**Fraternité matin du mercredi 29 mars, 2017) (**Tableau II).

La gestion des ordures ménagères se regroupent en quatre étapes :

- **la précollecte** est l'ensemble des opérations nécessaires au cheminement des déchets depuis leur génération dans l'habitation jusqu'au lieu de prise en charge par le service de collecte (**Chalot, 1991**). Cette activité est étendue au curage des caniveaux, au balayage des voies, des lieux publics, à l'entretien des marchés et des espaces verts.

- **la collecte** achemine les ordures ménagères des centres de groupage au centre de transfert ou à la décharge.
- **le transport** consiste à conduire les ordures ménagères des centres de groupages vers la décharge par des camions de grande capacité (15 à 30 tonnes).
- **la mise en décharge** consiste à contrôler quantitativement les déchets à l'entrée de la décharge. Ce contrôle comprend essentiellement l'origine des déchets (provenance du camion) et leur quantité pesée.

Le problème des déchets étant relégué au second plan par les autorités publiques depuis les différentes crises, les populations entreprennent des initiatives telles que le porte à porte afin de s'assurer au quotidien du ramassage de leurs déchets ménagers. Contre toute attente, cela crée des engorgements de déchets dans les points de regroupement car il n'y a pas de cohérence entre les opérations de pré collecte et de collecte dans la mesure où les opérateurs sont distincts.

En ce qui concerne la valorisation des déchets produits en Côte d'Ivoire, il n'existe encore aucune structure accomplissant cette tâche. Cependant, plusieurs partenariats et des projets sont émis afin de faire face au problème d'insalubrité dans les villes. Au niveau de la recherche scientifique, certaines études sont menées dans le domaine de la valorisation des déchets tels que le plastique, la sciure de bois, les déchets agricoles, le papier carton (CNUDD, 2012).

Tableau I: Composition des déchets ménagers à Abidjan

Nature des éléments	Beture 1977	SEDEP 1994	ATS 1995
Fermentescibles	44,2 %	52,80%	50 ,69%
Végétaux	4,6 %	9,5 %	15,76 %
Fines : sables cendres	37,6 %	25,7 %	14,76 %
Plastiques	1,1 %	4,7 %	6,99 %
Papiers, cartons	5,3 %	4,1 %	6,66 %
Textiles	1 %	1,3 %	2,65 %
Métaux	1,1 %	0,9 %	1,03 %
Verres	1,1 %	1,2 %	0,71 %
Autres (cailloux)	-	-	0,75 %

ATS : Afrique Technopole Service
BETURE : Bureau d'Etude en Environnement
SEDEP : Société d'Etude et de Développement Electrotechnique Polynésien
Source : Ministère de l'environnement et du cadre de vie de la Côte d'Ivoire

Tableau II: Quantités de déchets collectées et mises en décharges (2009 - 2010)

Commune	Superficie	Nombre d'Habitants 2010	Quantité de déchets collectés (T/ans)	
			2009*	2010**
Abobo	120 km^2	820 206	138 502	119 921
Adjamé	11,2 km^2	334 296	112 185	71 426
Anyama	20,8 km^2	133 664	7 864	2 725
Attiecoubé	68,2 km^2	310 409	56 748	36 933
Bingerville	12 km^2	66 264	17 251	3 548
Cocody	132 km^2	280 786	117250	91 745
Koumassi	8,7 km^2	384 439	50 777	28 433
Marcory	12,5 km^2	247 044	65 176	52 743
Plateau	3,9 km^2	12000	7298	7 909
Port Bouet	111 km^2	325 737	82 159	41 420
Songon		56 154	12 774	3 448
Treichville	8,9 km^2	183 863	58 167	48 585
Yopougon	150 km^2	942 497	167 154	135 812
Total Abidjan		4 097 360	893 305	644 649
Taux de collecte moyen		**:**	**81%**	**58%**

Source : * Rapport d'activités ANASUR (Agence Nationale de la Salubrité Urbaine) 2009
Source : **PUIUR, (Projet d'Urgence d'Infrastructures Urbaines) Mai 2011

I.3 Enjeux

I.3.1 Le développement durable

La prise de conscience environnementale collective de ces dernières années concernant l'impact de l'activité des hommes sur la planète, l'accélération des échanges avec le reste du monde, l'accroissement des inégalités entre pays riches et pays pauvres et les prévisions de croissance démographiques qui estiment 9 milliards d'habitants sur la planète d'ici 2050 a abouti à la naissance d'un nouveau modèle de gestion de la planète : le développement durable (ou « sustainable development »).

Le développement durable s'appuie sur trois piliers avec quatre principes fondamentaux qui s'emmêlent et se complètent (Figure 7). L'aspect écologique auquel on pense en priorité lorsqu'on entend développement durable se mêle à l'aspect social et économique. Il est question de construire une société (économique) respectueuse de l'environnement (écologique) et de l'individu (social).

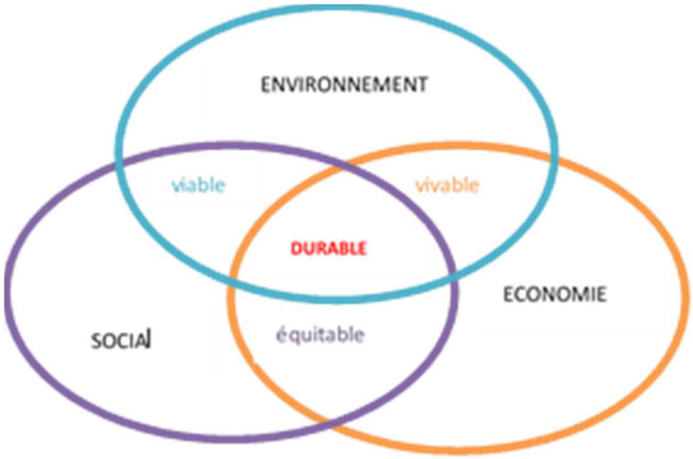


Figure 7:Principe du développement durable

Ce modèle de fonctionnement vise à réduire les consommations d'énergie et les émissions des gaz à effet de serre des industries, des transports et des bâtiments. Afin de réduire l'impact du bâtiment, de nombreux travaux sont menés pour développer des matériaux efficaces énergétiquement qui respectent l'environnement et la santé de l'homme.

Un éco matériau de construction doit répondre aux critères techniques habituellement exigés des matériaux de construction mais également à des critères environnementaux ou socio-environnementaux, tout au long de son cycle de vie (c'est-à-dire de sa production à son élimination). Dans la construction, les éco-matériaux sont employés pour différentes fonctions, ils comprennent par exemple le bois d'œuvre, les panneaux de bois, les isolants

rigides et semi-rigides à base de fibres végétales, la paille et le béton de chanvre (**C&B, 2012**). Les synthèses bibliographiques menées par **(Asdrubali *et al.*, 2015)** et **(Shiavoni *et al.*, 2016**) sur les matériaux isolants du bâtiment montrent qu'actuellement des isolants durables sont développés et issus soit du bio-sourcé soit du recyclage.

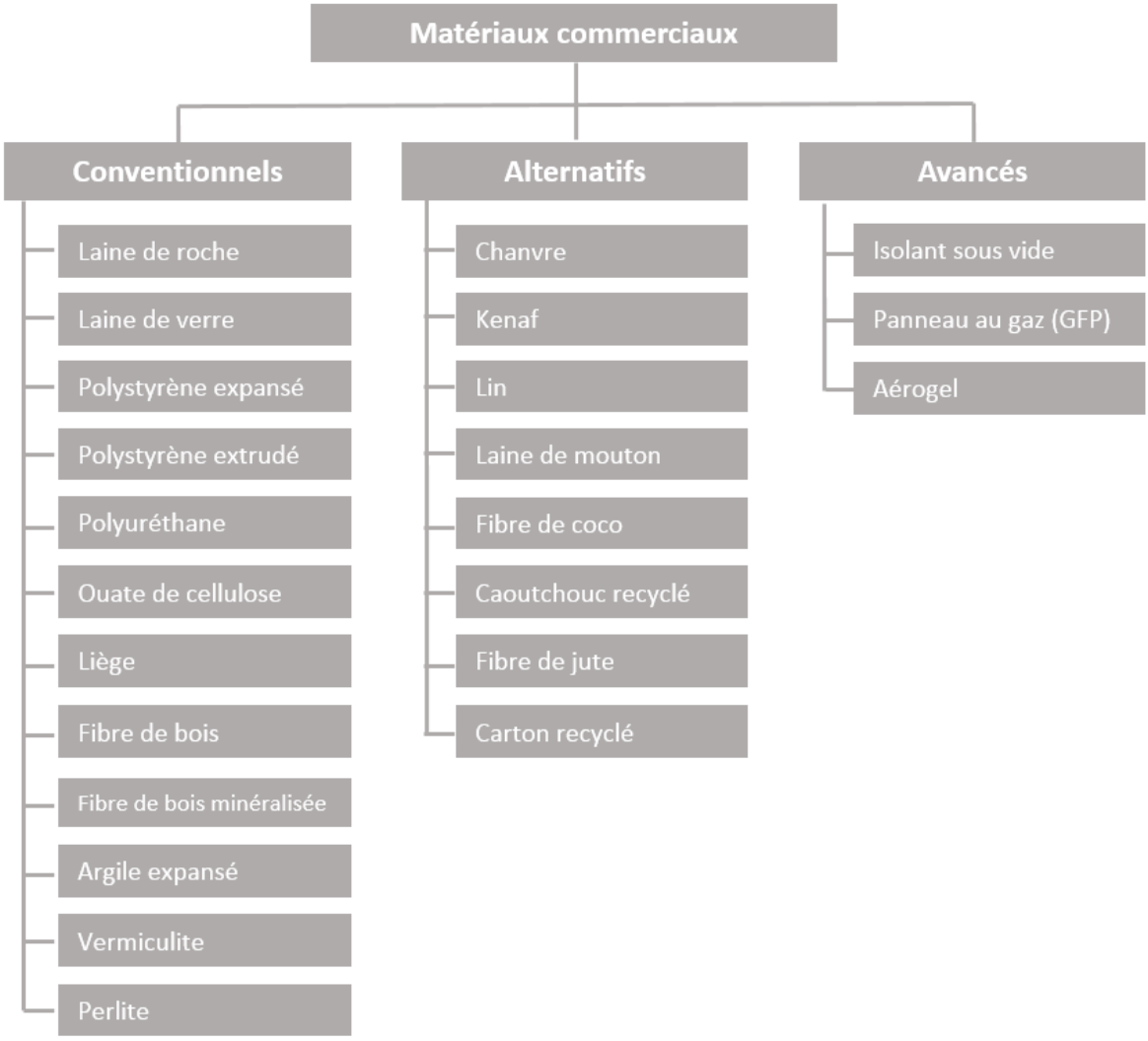


Figure 8:Synthèse des matériaux isolants commercialisés selon (Shiavoni et al., 2016)

I.3.2 Les matériaux issus de matières premières bio-sourcées

La bibliographie montre qu'il existe actuellement différentes possibilités d'utilisation de matières premières végétales pour des matériaux de construction. Parmi celles-ci, on trouve le bois, le chanvre, le lin, le colza, la jute, le tournesol, le blé, le palmier…**(Hernandez-Olivares *et al.*, 1999), (Magnion *et al.*, 2012),(Nozahic *et al.*, 2012), (Cherki *et al.*, 2014), (Belayachi *et al.*, 2016), (Morales-Conde *et al.*, 2016), (Mazhoud *et al.*, 2017), (Braiek *et al.*, 2017), (Lamrani et Case, 2017),(Viel *et al.*, 2017)**, utilisées avec différents types de liants.

Le chanvre a été particulièrement étudié ces dernières années. Il est associé à différents liants: à base de chaux, ciment, terre et liants végétaux **(Collet, 2004)**, **(Magniont, 2010), (Chamoin, 2013) (Amziane *et al.* 2017),(Mazhoud, 2017).** Parmi ces solutions, les liants végétaux semblent adaptés aux matériaux à développer dans une partie de cette étude. **(Umurigirwa 2014)** étudie un agro-composite à base de chanvre (chènevottes) et d'un liant végétal à base d'amidon de blé. Dans le but d'optimiser la formulation du liant, plusieurs mélanges sont réalisés et étudiés en fonction du rapport massique Amidon/Eau variant de 0 à 0,2. Le rapport Amidon/Eau égal à 0, 2 a été retenu et maintenu constant et le rapport massique Amidon/Chanvre (A/C) variable afin de déterminer l'influence du taux de chènevotte sur les caractéristiques mécaniques de l'agro composite. Comparé au béton de chanvre-chaux, il a été constaté que la masse volumique de la composition optimale retenue (A/C=0,31) de 177 kg/m3 reste inférieure à celle du béton de chanvre-chaux (200 à 500 kg/m3). **(Le *et al.*, 2014)**montrent également que la masse volumique du composite chanvre-amidon est inférieure à celle du béton chanvre-chaux. Ils montrent également que les valeurs de la résistance en traction de l'agro matériau chanvre-amidon sont inférieures à celles obtenues avec le béton de chanvre/chaux de 0,7 à 1,2 MPa **(Elfordy *et al.*, 2008**). Etant un matériau fibreux, le chanvre-amidon absorbe les hautes fréquences et s'avère plus performant sur le plan acoustique que le béton de chanvre-chaux. Pour des fréquences comprises entre 630 et 5000 Hz, le coefficient d'absorption acoustique tend vers une valeur asymptotique entre 0,86 et 0,91 (**Umurigirwa, 2014)**.

(**Tran Le, 2010)** s'est intéressé au comportement mécanique, acoustique et hygrothermique du matériau chanvre-amidon. Toutes les propriétés mécaniques mesurées ont montré que le béton de chanvre-amidon 30L/70C présente une bonne résistance en flexion et en compression. Sa résistance de compression est supérieure à celle du béton de chanvre-chaux de faible masse volumique (environ 250 kg/m^3) avec une résistance de 0,95 MPa comparée à 0,25 MPa. En ce qui concerne le module de Young, elle est de 3,94 MPa pour le béton amidon 30L/70C et de même ordre que celle du béton de chanvre-chaux (4 MPa). Les résultats acoustiques montrent que le béton de chanvre à base d'amidon assure une bonne performance acoustique en absorption de bruits aériens, meilleure que le béton de chanvre à base de chaux. Pour une fréquence comprise entre 1000 et 4000 Hz, le coefficient d'absorption moyen varie dans l'ordre de 0,86 à 0,91.La mesure de la conductivité thermique est effectuée pour deux types de formulation chanvre-amidon 60L/40C et 70L/30C dont les épaisseurs sont respectivement 4,34 cm et 3,27 cm. Les valeurs des conductivités sont respectivement de 0,057 W/(m.K) pour une masse volumique de 159 kg/m^3 et 0,0617

W/(m.K) pour 176 kg/m^3 contre 0,1 W/(m.K) pour le béton chanvre chaux. Le remplacement de la chaux par l'amidon a amélioré considérablement la conductivité thermique du matériau. En plus, en ce qui concerne le béton de chanvre-amidon, sa conductivité thermique varie de 8,2 % lorsque la teneur en liant change de 10% montrant que le liant semble avoir de l'influence sur la conductivité thermique. Comparés aux conductivités d'autres matériaux tels que le bois dur (0,13 W/m.K), le béton cellulaire (0,14 W/m.K) et le béton classique (1,6 W/m.K), les résultats montrent que la conductivité thermique du béton de chanvre-amidon est très faible par rapport aux autres matériaux du génie civil.

Dans sa caractérisation du béton de chanvre-amidon, Tran Le fait une simulation pour étudier le comportement hygrothermique d'un local en béton de chanvre-amidon sous des conditions hivernales et caniculaires. En hiver, la variation de l'humidité relative dans un local chauffé en béton de chanvre-amidon est très proche de celle béton de chanvre-chaux et permet de réduire les consommations énergétiques de 22,16 %. Pour les conditions estivales, le local en béton de chanvre-amidon tout comme le local en chanvre-chaux permet d'assurer un confort thermique en atténuant les pics de température pendant la journée. Sous conditions caniculaires, la consommation énergétique de climatisation des locaux en béton de chanvre-amidon et en béton de chanvre-chaux est presque équivalente. Le béton chanvre-chaux possède des propriétés hygrothermiques satisfaisantes pour assurer le confort dans les locaux. En fin de vie, il peut être aussi recyclé et réutilisé comme matières premières.

I.3.3 Les matériaux issus de matières premières recyclées

Les matériaux de constructions peuvent valoriser diverses matières recyclées. En Côte d'Ivoire, sur le plan politique, plusieurs partenariats se créent afin de réduire les déchets par leur valorisation. Dans les travaux de (**Sérifou, 2013)**, les pneus usagés ainsi que les bouteilles ont été recyclés pour être utilisés comme granulats pour l'élaboration des bétons. Les déchets de la scierie (sciure de bois) ont été valorisés pour faire des briques argile-sciure de bois stabilisés avec du ciment par (**Ouattara, 2013)**. (**Djomo, 2017)**a recyclé des bouteilles pour les utiliser comme granulat dans la confection des carreaux. (**Traoré, 2013**) avec les plastiques a réalisé des pavés. Nos travaux de master ont envisagé l'utilisation de déchets de papier pour l'élaboration de faux plafond **(Thieblesson, 2014).**

Recycler le papier pour l'introduire dans le bâtiment comme matériau de construction est une initiative qui a été entreprise il y a plus de 93 ans. Ce fut la découverte d'un nouveau matériau appeler papier-liant ou Paper-crête, ce matériau a fait l'objet d'un brevet déposé en

1928. Il est fabriqué à partir de déchet de papier, d'eau, de sable et d'un liant tel que la chaux ou le ciment (**Ballon, 2014).**

Vers les années 1990, Eric Patterson et Mike Mc Cain travaillant indépendamment l'un de l'autre, ont eu l'idée de mélanger du papier avec le ciment. Eric Patterson imprimeur de métier a recherché comment employer tous ces déchets de papier. Ils ont chacun de leur côté malaxé un lot de papier, du ciment et de l'eau pour obtenir un adobe; le papier représentant les fibres. Ils ont fabriqué des briques et construit des maisons avec ce matériau appelé liant-papier (**Papercrete news, 1998**).

Actuellement, la ouate de cellulose est un exemple d'éco-matériau issu du recyclage des journaux invendus. Les journaux sont transformés en usine en ouate de cellulose, rendus ignifuges et utilisés comme isolant thermique dans le bâtiment (**Boscher, 2012).**

CHAPITRE II
Les charges

Ce chapitre présente les trois types de charge qui seront utilisés dans ce travail, tous issus de la filière bois. La fibre de bois et la ouate de cellulose utilisées sont des produits commerciaux tandis que les granules de papier sont développés spécifiquement dans un objectif de valorisation des déchets de papiers.

II.1 Généralités

II.1.1 La filière bois

L'industrie du bois est très vaste et constitue un ensemble d'activités économiques classées selon trois niveaux de transformation. La première transformation correspond aux métiers dont la matière première est le bois à l'état brut. La seconde transformation permet d'obtenir un produit fini plus élaboré à partir des matières issues de la première transformation. La troisième transformation concerne le recyclage des produits et des déchets issus des deux premières transformations (Figure 9).

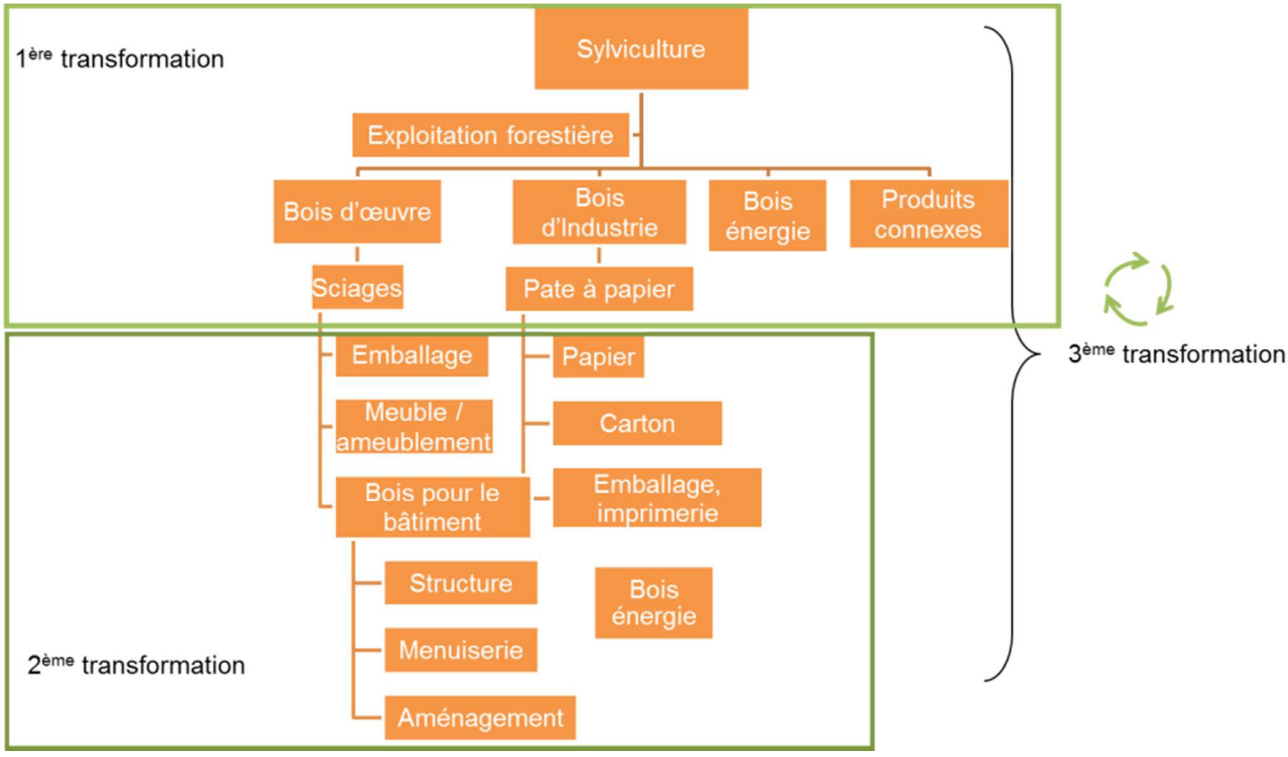


Figure 9: Organisation de la filière bois
(http://valbois.uved.ecoledubois.fr/co/module_VALBOIS.html)

Historiquement, une part importante de l'utilisation du bois dans la construction concerne la structure et la menuiserie. Désormais il est utilisé dans de nouvelles applications telles que les panneaux isolants de fibres de bois.

II.1.2 La structure et la composition chimique du bois

Les essences productrices de bois peuvent être classées en deux catégories : les gymnospermes, groupe auquel se rattache l'ordre des conifères ou résineux et les angiospermes, groupe auquel appartiennent les feuillus. Le bois est une matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc et les racines des arbres. L'ensemble de tissus est composé des fibres ligneuses, de parenchyme et de vaisseaux.

La structure macroscopique des arbres est comparable entre eux (Figure 10). Pour le tronc d'un arbre, elle comprend, depuis l'extérieur jusqu'à l'intérieur, l'écorce, le phloème, le cambium, l'aubier et le bois de cœur. La production des couches de tissus cellulaires se fait au niveau du cambium: bois sur la face interne et liber (transformé par la suite en écorce) sur la face externe.

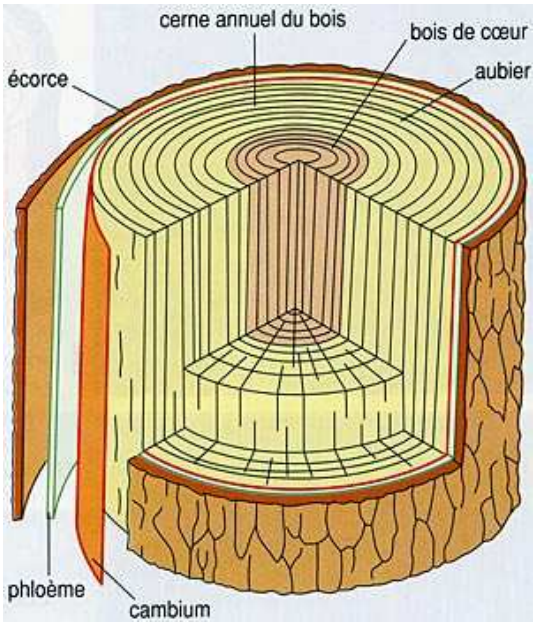


Figure 10: Structure macroscopique d'un arbre : détail des différentes parties du tronc(http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/tutoriel/morphologie-fibres-bois/page03.htm)

L'aubier fait partie des tissus vivants de l'arbre. C'est dans cette zone que circule de manière ascendante la sève brute. Ce bois est situé en périphérie de l'arbre. En se déplaçant vers le centre de l'arbre, les parois cellulaires se transforment et les tissus meurent. C'est alors du bois parfait ou bois de cœur. Si le bois de cœur est facilement identifiable de l'aubier alors il est appelé duramen comme par exemple pour le chêne ou le Douglas.

D'autre part, des alternances de zones claires et sombres sont visibles. Ces dernières correspondent aux cernes annuels. Un cerne représente la production de cellules de bois au cours d'une année. C'est en comptant le nombre de cernes qu'il est possible de connaître l'âge des bois.

Parmi les principaux constituants organiques, le bois est essentiellement constitué de la cellulose (environ 50%), de lignine (environ 20%) et des hémicelluloses (environ 30%) (Tableau III).

Tableau III: Compositions massiques moyennes du bois (TRO et al. 2008)

	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Résineux	42%	27%	28%
Feuillus	45%	30%	20%

Chimiquement, le bois se compose d'environ 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% d'éléments divers. De plus, l'eau contenue dans le bois joue un rôle très important sur toutes les propriétés : densité, propriétés physiques, caractéristiques mécaniques, etc. Elle peut atteindre 100% (et parfois plus) de la masse du bois sec. Elle est présente dans le bois à trois niveaux différents ; on distingue en effet :

- L'eau de constitution, combinée chimiquement à la matière ligneuse (elle reste présente dans le bois dit « anhydre »)
- L'eau d'imprégnation, contenue dans les membranes des cellules
- L'eau libre, qui remplit les vides des tissus et l'intérieur des cellules lorsque les membranes sont saturées d'eau. La quantité d'eau (eau d'imprégnation et eau libre) contenue dans le bois est caractérisée par un paramètre appelé « taux d'humidité du bois », et est définie comme le rapport :

$$H\% = \frac{(M_h - M_0)}{M_0} * 100$$

H : taux d'humidité (%)

M_h : masse de l'échantillon humide (kg)

M_0 : masse de l'échantillon anhydre (kg)

Au cours du séchage du bois, c'est d'abord l'eau libre qui s'évapore. Le « point de saturation» du bois est atteint lorsque l'humidité est de H=30% environ. Le séchage continuant, c'est l'eau d'imprégnation qui commence à s'évaporer. Le bois « sec à l'air » a une humidité de 13 à 17% suivant les saisons. On peut obtenir un état plus sec par séchage artificiel ; en particulier, on atteint l'état anhydre après passage durant plusieurs heures dans une étuve à la température de 100 à 105°C.

II.2 Laine et fibre de bois

La laine de bois se présente principalement sous forme de panneaux flexibles ou semi-rigides, mais également en vrac. La fibre de bois est un isolant rigide de par sa densité, qui présente une inertie thermique plus importante. Le procédé de fabrication, différent entre laine de bois et fibre de bois, induit des épaisseurs, des densités et des capacités thermiques et phoniques différentes.

II.2.1 La laine de bois

La laine de bois en vrac est obtenue grâce à des fibres de bois qui sont déchiquetées, broyées puis séchées. Une fois sèches, les fibres obtenues sont traitées afin de les rendre ignifuges et de les protéger contre les moisissures et les attaques des rongeurs. La laine de bois en vrac s'utilise généralement pour l'isolation des combles non aménagés (épandage manuel ou soufflage à la machine). Elle s'utilise également en caisson pour les murs, plancher et toiture. La masse volumique est de l'ordre de 40 kg/m^3 et la conductivité thermique de 0,038 W/(m.K) (fiche technique Steico Zell).

Dans le cas des panneaux de laine de bois, les fibres sont déchiquetées, mélangées avec un liant (polyester ou autre) et passées au four afin d'assurer le collage. Les panneaux sont alors traités (feu, moisissures…). Ces panneaux sont généralement utilisés pour isoler les murs et toitures. La densité des panneaux de laine de bois diffère selon les marques et leur procédé de fabrication. Leur densité est de l'ordre de 40 à 55 kg/m^3, pour des conductivités thermiques de l'ordre de 0,036 W/(m.K).

II.2.2 La fibre de bois

Pour fabriquer les panneaux de fibre de bois, il existe deux méthodes différentes, dites "humide" et "sèche".

Pour les deux procédés, la première étape consiste à défibrer des copeaux de bois qui peuvent provenir de différentes sources (rémanents de bois, les déchets des scieries) et de différentes essences de bois (épicéa, le mélèze, le sapin ou le pin). Les copeaux sont d'abord ramollis par l'action de vapeur sous pression dans des préchauffeurs avant d'être transférés dans les défibreurs réduisant les copeaux en fibres élémentaires.

Dans le procédé humide, celles-ci sont ensuite mélangées avec de l'eau, créant ainsi une pâte qui est, par la suite, essorée et pressée afin d'être transformée en panneaux. Le panneau de fibres a une densité assez homogène le long de son épaisseur et les fibres sont

essentiellement orientées dans une direction privilégiée, parallèlement aux faces du panneau **(Huyen, 2012).**

Le procédé à sec nécessite un liant de type résine thermodurcissable (habituellement PMDI). Les fibres sont séchées et encollées, puis agglomérées et compactées dans une presse à chaud à la densité et à l'épaisseur voulues afin de polymériser la résine et de stabiliser le panneau **(Delisee, 2009).**

La densité des panneaux de fibre de bois dépendra du degré de compression des fibres : plus elles sont compactées, plus l'isolant est dense et rigide. Par exemple, le panneau « Steicotherm » a une masse volumique de l'ordre de 160 kg/m³ et une conductivité thermique de 0.042 W/m/K (fiche technique Steico therm).

II.3 Le papier

II.3.1 La production du papier

Le papier se présente sous la forme de feuille à microstructure poreuse composée essentiellement de fibres ou d'éléments de fibres en général d'origine végétale, cellulosique, dont la caractéristique essentielle est de pouvoir se lier les unes aux autres par des liaisons de type hydrogène (**Marulier, 2013**), (**CNRTL, 2012**), (**Marina et Cristina, 2011**).

La fabrication du papier s'effectue en deux étapes : la fabrication de la pâte de papier, constituée en tout ou partie de pâte à bois et de pâte recyclée, puis sa transformation (Figure 11).

Dans tous les cas, la pâte à papier est constituée de fibres cellulosiques issues du bois ou d'autres végétaux ligneux ou d'autres sources de fibres (**Chouaib, 1997**) **; (Lam, 2000**). Le bois est aujourd'hui à la base de 95 % des papiers fabriqués dans le monde, le restant est fourni par la paille de céréales classiques, d'alfa, de bagasse, de chanvre et de roseaux.

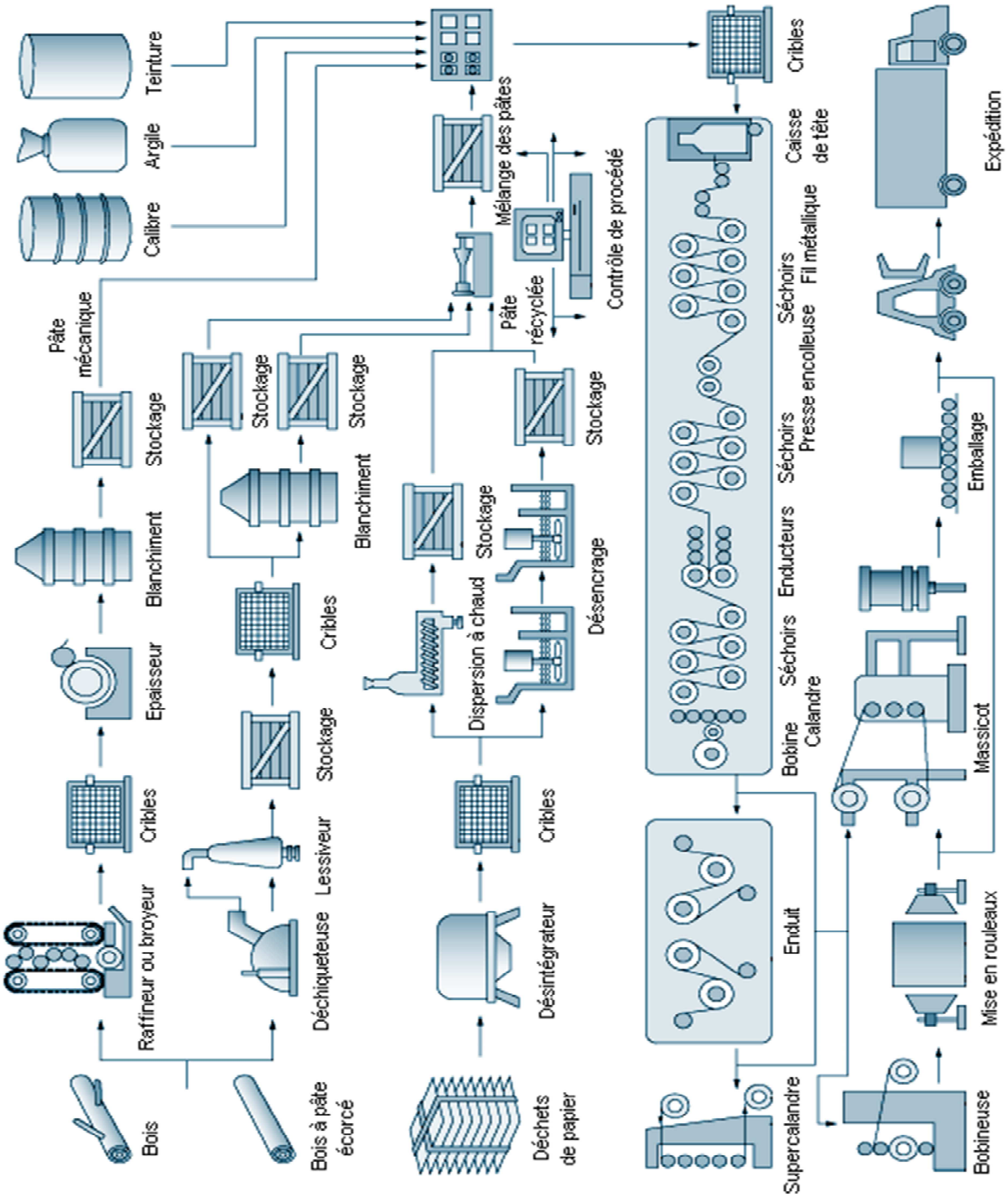


Figure 11: Etapes de la fabrication de pâte et de papier (Weidenmüller, 1984)

II.3.1.1 La pâte à bois

La pâte à papier est fabriquée à partir des fibres cellulosiques contenues dans le bois. Elle est obtenue soit mécaniquement, soit grâce à un procédé chimique à température élevée

qui permet d'isoler la cellulose de la lignine. Le choix du procédé est lié à la qualité du papier à produire (Tableau IV).

La préparation par voie mécanique consiste à râper des rondins de bois préalablement écorcés ou des déchets de scierie ou de débitage dans des défibreurs munis d'une grosse meule actionnée en milieu aqueux. La pâte mécanique conserve tous les constituants du végétal original ; elle est obtenue avec un bon rendement qui dépasse généralement 85%. Deux procédés principaux sont également dérivés de la voie mécanique : thermo-mécanique et chimico-mécanique. Le procédé thermomécanique consiste à passer les copeaux à la vapeur avant et pendant le raffinage, en général sous pression. Pour le procédé chimico-mécanique, le bois est passé à la vapeur, puis mis à bouillir dans une liqueur chimique avant d'être moulu dans un broyeur en pierre.

La procédé chimique dissout la lignine se trouvant entre les fibres du bois, afin qu'elles se détachent sans être trop détériorées. Comme ce procédé élimine la plupart des matières non fibreuses du bois, le rendement se situe habituellement entre 40 et 55% (**Seme, 2001**).

Tableau IV: Comparaison des procédés de fabrication de pâte à papier (SKF Industrial Division, 2011)

	Procédé mécanique	Procédé chimique
Avantages	• Haut rendement (90%) • Prix de revient faible • Opacité	• Les résidus ligneux et produits chimiques brûlés fournissent de l'énergie au site de production
Inconvénients	• Forte dépense en énergie • Caractéristiques mécaniques faibles • Jaunit dans le temps	• Rendement moindre (45 à 55%) • Forte pollution
Utilisation	• Papier journal • Papier pour magazines • A moindre échelle papiers à usage graphique, carton, papiers sanitaires et domestiques.	• Emballage • Papiers impression/écriture

Les pâtes mécaniques, thermomécaniques ou mécano chimiques se présentent toujours après traitement sous l'état liquide. Elles sont alors lavées, filtrées et épurées en plusieurs stades, et éventuellement blanchies.

II.3.1.2 La pâte recyclée

La production de la pâte recyclée consiste à dissoudre les papiers dans un important volume d'eau, dans des cuves munies d'hélices, qui assurent une bonne homogénéité. Des épurateurs éliminent tous les corps étrangers (ficelles, agrafes...) **(Seme, 200**1). Cette étape est suivie par le désencrage qui a pour but d'enlever l'encre de la pâte du papier recyclé (Figure 11). La principale technique utilisée pour la phase d'élimination de l'encre est le procédé par flottation. Le procédé repose sur les différences physiques et physico-chimiques superficielles des fibres et des particules d'encre. La suspension fibreuse est envoyée dans une succession de cellules à la base desquelles des bulles d'air sont injectées. En montant à la surface, ces cellules d'air se chargent des particules d'encre, séparées des fibres, qui se concentrent sous forme de mousses à la surface des cellules. Ces mousses sont raclées, aspirées puis évacuées vers l'installation de traitement des boues de l'usine (**Petit-Conil, 1999**).Le résidu de désencrage peut potentiellement être épandu sur des sols agricoles.

En France, l'industrie papetière utilise en majorité du papier recyclé pour la fabrication du papier. D'après la COPACEL, le syndicat de l'industrie papetière, le pourcentage de fibres recyclées dans la fabrication du papier s'élevait à 66 % en 2014.

II.3.2 Le recyclage du papier

II.3.2.1 Le papier ou carton

A chaque recyclage, les fibres de cellulose se raccourcissent, si bien que l'on ne peut pas réutiliser indéfiniment le papier. Au bout de 6 à 8 cycles, les fibres de papier sont très fines et courtes. Par exemple, le papier journal peut contenir plus de 80% de papier recyclé, le carton ondulé 100%. Enfin, le papier hygiénique ou les mouchoirs peuvent être produits avec les fibres les plus courtes.

II.3.2.2 La ouate de cellulose

La ouate de cellulose est fabriquée à partir du recyclage de papier journaux. Le papier sélectionné est broyé pour obtenir de toutes petites particules. La ouate de cellulose subit ensuite un traitement ignifuge, anti-fongique et anti-nuisibles (insectes et rongeurs).Elle est ensuite compactée au maximum pour faciliter son transport et son stockage **(Semi sarl, 2014)**. Elle a alors un aspect floconneux. La ouate de cellulose peut être mise en œuvre en vrac, par insufflation, elle présente alors une conductivité thermique à l'état sec qui varie de 0,035 à 0,041W/(mK) pour une masse volumique de 25 à 50 kg/m^3. Ce matériau est particulièrement sensible à l'humidité et au tassement (qui peut être de l'ordre de 20%).

II.3.2.3 Les autres usages

Le papier, notamment souillé, peut être composté et servir d'amendement organo-minéral enrichissement du fumier en fibres végétales, en argile et en carbonates de calcium (chaux microfine) **(Hebert, 2009).** Le papier, sous forme de granules, peut être utilisé comme litière animale **(Pettex, 2016), (Hebert, 2009**). Des briquettes de papiers recyclés sont également fabriquées comme combustible pour l'allumage de feu dans les cheminées.

CHAPITRE III
Les liants

Trois types de liants sont considérés dans cette étude. Le plâtre, liant couramment utilisé en France, servira de référence. L'amidon de manioc, déchet issu de la préparation du couscous de manioc (attiéké), est disponible en quantité importante en Côte d'ivoire. Il est étudié en vue de la valorisation de ce déchet. L'amidon de pomme de terre produit industriellement en France, est également utilisé car également issu d'un tubercule.

III.1 Le plâtre

Le terme plâtre désigne à la fois le matériau de structure solide et la poudre qui permet de l'obtenir. Cette poudre (sulphate de calcium hémihydraté, $CaSO_4,½H_2O$) s'obtient en déshydratant du gypse (sulphate de calcium dihydraté, CaSO4,2H2O). C'est la réhydratation de l'hémihydrate en gypse (après mélange de la poudre avec de l'eau) qui permet la constitution d'un matériau solide.

III.1.1 Le gypse

Le sulfate de calcium se présente dans la nature sous forme de gypse : $CaSO_4,2H_2O$ ou d'anhydrite : $CaSO_4$. Ce sont les gisements de gypse qui sont principalement exploités pour produire du plâtre. Ils sont nombreux dans le monde, particulièrement en France et aux États-Unis, mais absents des régions volcaniques comme le Japon. Les réserves mondiales sont estimées à 2,6 milliards de tonnes. Les exploitations, qu'elles soient souterraines ou à ciel ouvert, sont dénommées carrières. Le gypse exploité en France qui a une pureté supérieure à 90 % (souvent 98 %) ne nécessite pas de traitement de purification. Voici un exemple de composition de gypse : $CaSO_4,2H_2O$: 91,5 % $MgCO_3$: 1 % $CaCO_3$: 6 % Argile et silice : 1,5 % . Le gypse est principalement utilisé pour fabriquer le plâtre (75 % à 80 % des utilisations en France et aux États-Unis). Il entre également dans la composition des ciments (à une teneur d'environ 5 %), comme régulateur de prise (20 à 25 % des utilisations en France, 10 % à 15 % aux États-Unis) (**Vignes *et al.* 1996**). Il est aussi employé comme amendement agricole (5 à 10 % des utilisations aux États-Unis), comme charge dans les industries du papier et des peintures, dans le traitement des eaux, la dépollution de contaminations par les hydrocarbures. Le gypse est le matériau de base de la fabrication industrielle des plâtres. Il en existe deux types :

-Les gypses naturels : le gypse qui se trouve dans la nature est sous forme d'une roche compacte, avec une porosité totale de l'ordre de 10 à 15%. C'est une roche sédimentaire provenant de l'évaporation intense, en milieu lagunaire, d'une eau riche en sulfate de calcium dissout. Formé à l'ère tertiaire (il y a 65 millions d'années), il est extrait dans des carrières à

ciel ouvert ou souterraines. Les gypses naturels de grande pureté permettent d'obtenir des plâtres de qualité. Les principales impuretés des gypses sont la calcite, la silice et la dolomie. En France, c'est dans le bassin parisien que sont exploités les meilleurs gypses.

-Les gypses de synthèse : diverses industries (chimiques, centrales thermiques, traitement des fumées…) produisent du gypse comme sous-produit. Ce gypse (désulfogypse, phosphogypse...), qui concentre les impuretés du minerai de base, pose souvent des problèmes de stockage et de préservation de l'environnement. Après purification, une utilisation comme matière première pour fabriquer du plâtre peut être envisagée, en particulier dans certains pays dépourvus de gypse naturel (Belgique, Pays- Bas, Japon…).

III.1.2 La fabrication industrielle du plâtre

Quelle que soit l'origine du gypse, naturelle ou synthétique, une déshydratation partielle, par chauffage entre 150 et 170°C, donne de l'hémihydrate de calcium selon la réaction

$$CaSO_4,2H_2O \rightarrow CaSO_4,1/2\,H_2O \oplus 3/2 H_2O$$

Un chauffage à plus haute température, 290°C, donne de l'anhydrite $CaSO_4$, sulfate complètement déshydraté, appelé «surcuit» par la profession. Un chauffage à plus de 700°C, donne une anhydrite très peu réactive à l'eau, appelée «plâtre cuit à mort». Deux types de procédés sont employés.

Le procédé par voie sèche, qui est le plus utilisé, est réalisé à la pression atmosphérique. Il donne, vers 150-170°C, de l'hémihydrate **β** et par chauffage vers 400-600°C, de l'anhydrite ($CaSO_4$). Le chauffage est effectué dans divers types de fours. Ces fours, alimentés par du gypse concassé d'une granulométrie inférieure à 25 mm, donnent directement le mélange souhaité hémihydrate - anhydrite ou, fonctionnant à température constante, donnent soit de l'hémihydrate soit de l'anhydrite, le mélange étant effectué par la suite **(Nolhier, 1986);**

Le procédé par voie humide s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau, dans des autoclaves, sous 2 à 7 bar, pendant quelques heures. Il donne de l'hémihydrate **α** utilisé pour des plâtres spéciaux et pour les moulages dentaires. La résistance mécanique de l'hémihydrate α, avec une structure en forme de tiges et de prismes de faces planes, est nettement plus importante que celle de l'hémihydrate β qui a une structure en forme d'aiguilles, avec des pores et de fins cristaux, mais les coûts de production sont beaucoup plus

élevés. En conséquence, la production annuelle française est faible, de l'ordre de 15 000 tonnes par an, par comparaison à celle du plâtre obtenu par voie sèche (3 millions de tonnes par an). Le plâtre utilisé en construction, appelé plâtre de Paris, est un mélange. Il est principalement constitué d'hémihydrate β ($CaSO_4$, ½ H_2O) - 60 à 80 % - et d'anhydrite ($CaSO_4$). Il est obtenu selon le procédé par voie sèche. Les propriétés du plâtre donc ses utilisations dépendent, en grande partie, de sa composition en hémihydrate et en anhydrite. Le plâtre utilisé pour élaborer des produits préfabriqués (carreaux, plaques...) n'est généralement constitué que d'hémihydrate β, en dehors des impuretés initialement présentes dans le gypse.

III.1.3 La mise en œuvre et l'utilisation du plâtre

La poudre obtenue après traitement thermique est mélangée à l'eau pour réaliser la base de tous les produits à base de plâtre qu'ils soient fabriqués en usine ou sur chantier. Le rapport massique eau/plâtre (E/P), également appelé taux de gâchage, va conditionner les propriétés de mise en forme de la pâte ainsi que celles du matériau fini. L'hémihydrate α nécessite un taux de gâchage faible (rapport massique initial entre eau et poudre de plâtre E/P = 0,4) et conduit à des plâtres de faible porosité ayant de bonnes caractéristiques mécaniques (plâtre de moulage, biomatériaux). L'hémihydrate β , produit en plus grande quantité et utilisé en tant que matériau de construction, se gâche à E/P = 0,8.

Après mise en forme, la pâte va durcir progressivement, on appelle ce phénomène exothermique la prise. Celle-ci a été décrite comme une recristallisation par Lavoisier dès 1768, qui a proposé la réaction suivante d'hydratation(**Lavoisier, 1768**).

$$CaSO_4, 1/2 H_2O \oplus 3/2\, H_2O \rightarrow CaSO_4, 2 H_2O$$

Le mécanisme est ensuite décrit par Le Chatelier **(Le Chatelier,1883)**comme un phénomène de dissolution del'hémihydrate puis de cristallisation du gypse. Le plâtre fait prise du fait de la différence de solubilité entre l'hémihydrate et le dihydrate (le gypse) (Figure 12). La solubilité de l'hémihydrate est, à 20°C, de 9 $g.l^{-1}$, alors que celle du gypse est de 2 $g.l^{-1}$. En conséquence, en présence d'eau, l'hémihydrate passe en solution, le dihydrate se forme en fixant une partie de l'eau de la solution, la solution devient sursaturée en sulfate qui précipite. Il se reforme ainsi du gypse produit de départ du plâtre. En trente minutes environ, 95 % de l'hémihydrate se transforme en dihydrate et il faut moins de deux heures pour que la réaction soit totale. L'anhydrite, constituant minoritaire du plâtre, est moins soluble que l'hémihydrate,

et s'hydrate plus lentement. Le plâtre pris se présente sous la forme d'un matériau poreux à texture désordonnée. Sa microstructure est formée d'un assemblage de cristaux de gypse, aléatoirement enchevêtrés. Il doit sa bonne cohésion à cet enchevêtrement et aux interactions inter cristallines **(Coquard, 1992)**. Les points forts du plâtre pris, par rapport aux autres matériaux de construction, sont essentiellement sa faible densité apparente et sa grande porosité (~50%).

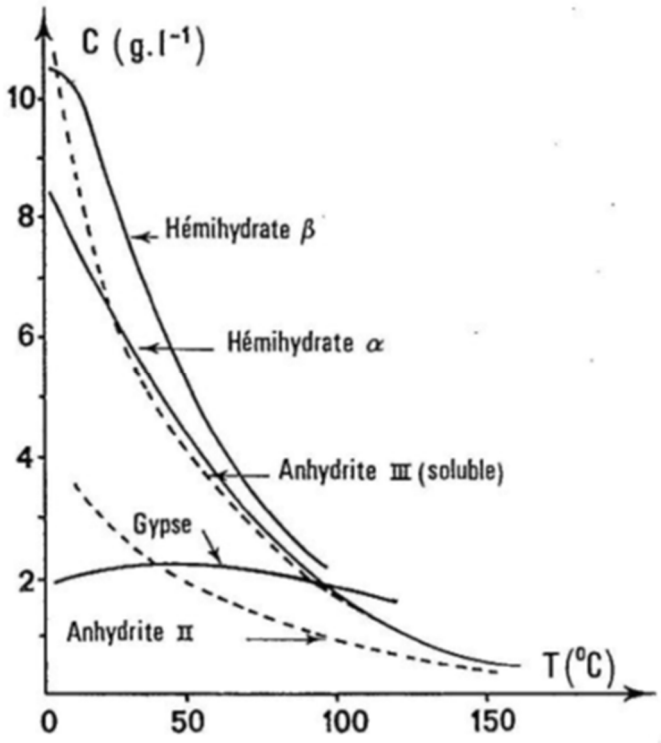


Figure 12: Solubilité des sulfates de calcium en fonction de la température(Murat et Foucault, 1997)

Industriellement, des carreaux et des plaques de plâtre sont réalisés. Ces éléments sont mis en forme puis séchés avant d'être commercialisés. Les carreaux de plâtre sont principalement destinés à la réalisation de cloisons intérieures et se présentent sous la forme d'éléments rectangulaires moulés, d'épaisseur variable, pleins ou alvéolés. Les plaques de plâtre sont utilisées pour la réalisation de cloisons, de plafonds ainsi que pour la finition des murs intérieurs. Les plaques sont constituées de plâtre moulé entre deux feuilles de carton recyclé. (Figure 13).

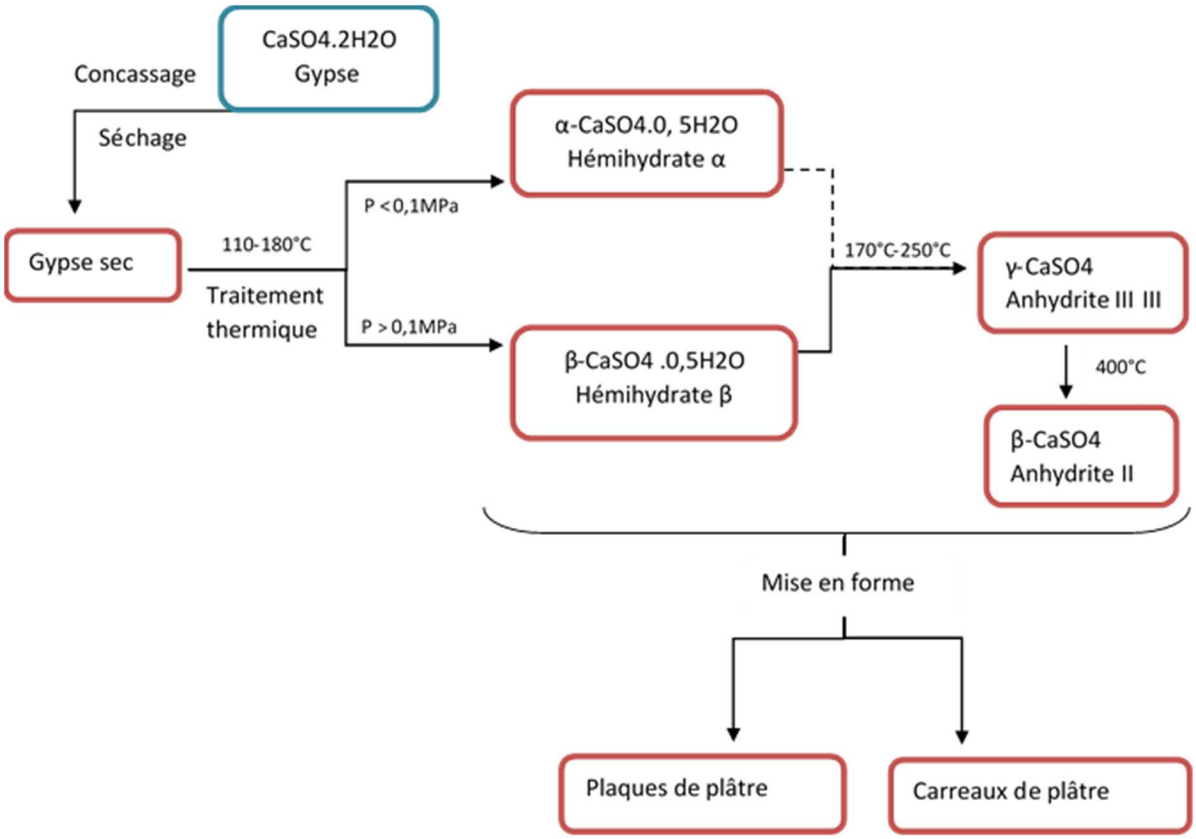


Figure 13: Ensemble des produits manufacturés et fabriqués à base de gypse(Rojo, 2013)

III.1.4 Les propriétés du plâtre

Le plâtre pris est un matériau poreux constitué principalement de cristaux de gypse enchevêtrés. Sa microstructure finale dépend de la porosité totale, de la distribution de tailles de pores, de la texture cristalline (enchevêtrement, taille et faciès des cristaux) et des forces d'adhésion mises en jeu (**Jacques *et al.* 2009); (Thomas, 2002); (Weber, 2012**).

(Coquard, 1992), en se basant sur différents travaux, a mis en avant la corrélation existante entre le taux de gâchage et la porosité du plâtre (fraction volumique de vide). Plus le taux de gâchage est élevé, plus la porosité est importante, diminuant ainsi les propriétés mécaniques. L'évolution de l'élasticité et des contraintes limites de rupture en fonction de la porosité est représentée sur les Figure 14 et Figure 15.

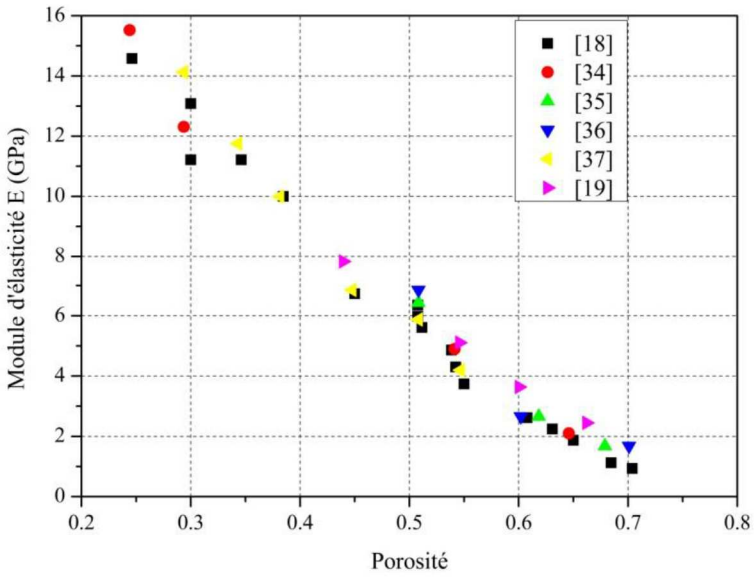


Figure 14:Evolution du module d'Young en fonction de la porosité (Coquard, 1992)

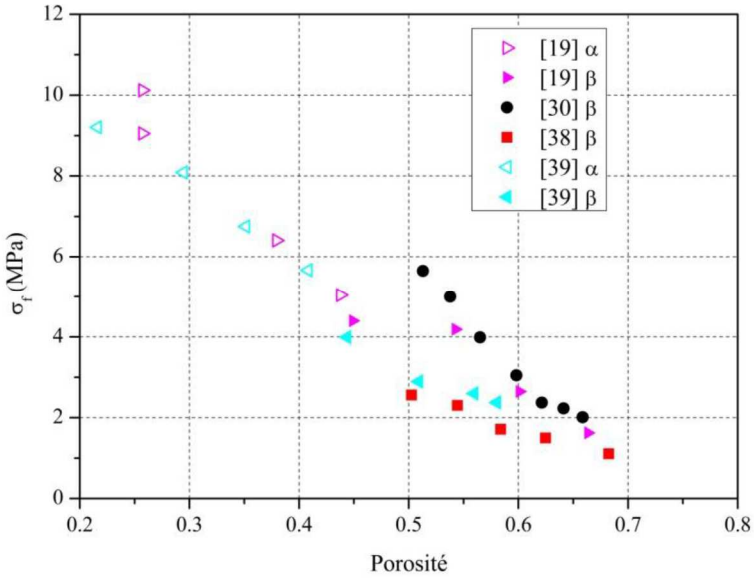


Figure 15: Evolution de la contrainte limite de rupture en flexion en fonction de la porosité. α et β désignent la nature de l'hémihydrate utilisé pour la préparation du plâtre (Coquard, 1992)

Le plâtre a une conductivité thermique comprise entre 0,4 et 0,8 W/(m.K) qui dépend de sa masse volumique, liée à son taux de gâchage . Il possède également une bonne capacité de régulation hygrique à l'intérieur des bâtiments (MBV autour de 1 g/(m².%HR) **(Rode, 2005).** Il est utilisé pour la protection contre les incendies car il présente une bonne résistance au feu (présence d'eau de structure), il est classé incombustible (M0). Au cours d'un incendie, le plâtre ne libère pas de produit toxique, mais seulement de la vapeur d'eau (**Vignes et al, 1997).** Le plâtre renferme en masse, après prise, 21 % d'eau de cristallisation qui est libérée pour les 3/4 vers 150°C et vers 290°C pour le 1/4 restant. La vaporisation de cette eau

consomme, par kilogramme de plâtre : 710 kJ pour briser les liaisons cristallines et 543 kJ de chaleur latente de vaporisation, soit plus de 1250 kJ/kg de plâtre. L'eau du plâtre, en se vaporisant au cours d'un incendie, absorbe ainsi de la chaleur et retarde la montée en température.

Enfin, les déchets de plâtre sont facilement recyclés. Les industries plâtrières s'engagent de plus en plus à réutiliser les déchets de fabrication mais également les produits en fin de vie. Le cycle d'hydratation / déshydratation du plâtre peut être reproduit à l'infini, comme le présente la Figure 16.

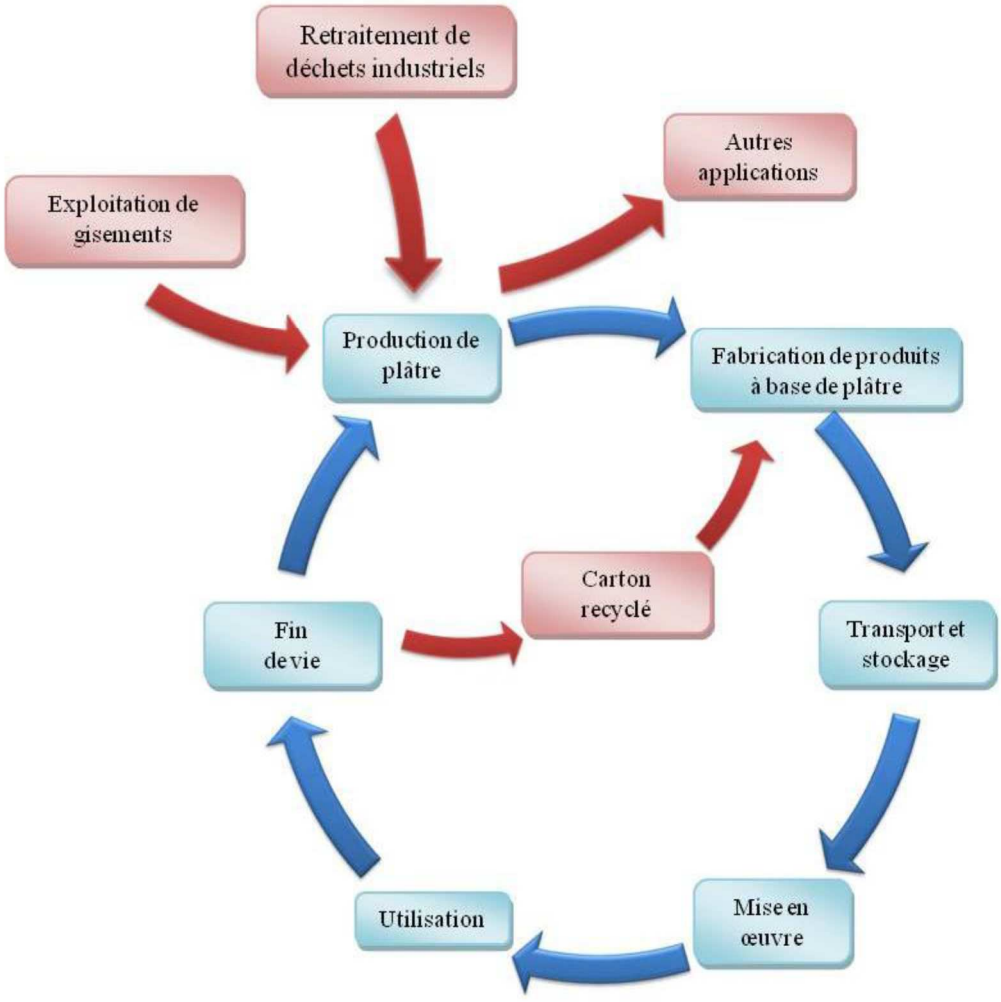


Figure 16: Cycle de vie du gypse (Rojo, 2013)

III.2 L'amidon

III.2.1 Généralités

La contribution au développement durable et les nouvelles règlementations concernant le recyclage des déchets incitent à développer des matériaux innovants issus de ressources renouvelables. L'utilisation de polymères biodégradables, tel l'amidon, comme liant dans les matériaux constructifs constitue une alternative à l'utilisation des polymères pétrochimiques traditionnels.

La norme européenne EN 13432:2000 et la norme américaine ASTM D-5488-94d permettent de définir et estimer la biodégradabilité et la compostabilité (**Stanojlovic, 2006).** Les polymères biodégradables se regroupent en deux grandes familles : les agropolymères et les polyesters biodégradables . Les agropolymères sont directement issus de la biomasse tandis que les polyesters sont issus de monomères bio-dérivés ou de la pétrochimie. Les agropolymères sont des polysaccharides tels que l'amidon, la cellulose ou des protéines (gluten, caséine...). La Figure 17 montre la classification des polymères biodégradables (**Averous, 2004).**

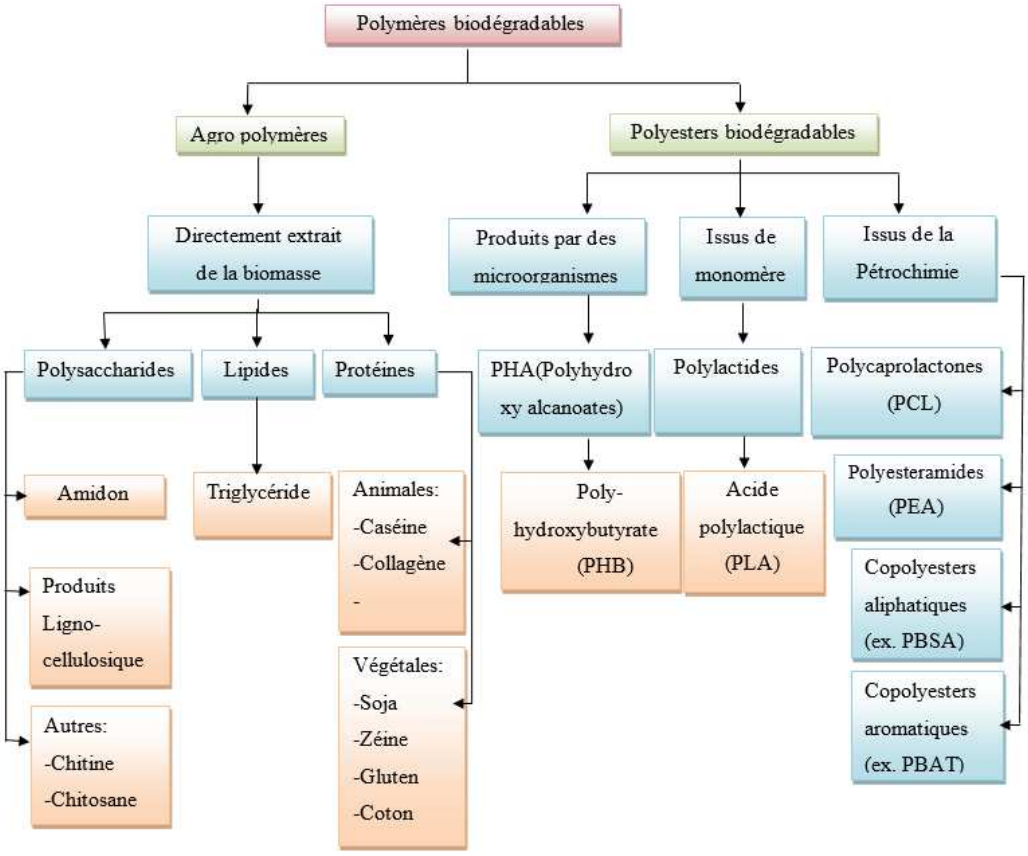


Figure 17: Classification des polymères biodégradables (Averous, 2004)

L'amidon est un polysaccharide d'origine végétale composé d'unités glucose $C_6H_{12}O_6$. Il est la principale substance glucidique de réserve des plantes supérieures. L'amidon représente une fraction pondérale importante des matières premières agricoles. On le trouve stocké dans les organes de réserve des végétaux tels que les céréales (30-70% de la matière sèche), les tubercules (60-90 %) et les légumineuses (25 à 50 %) **(Boursier, 2005*).***

Les matières premières les plus utilisées industriellement pour obtenir de l'amidon sont le maïs et la pomme de terre qui contiennent respectivement 71 et 74% d'amidon rapporté à l'extrait sec. Le blé (contenant environ 76% d'amidon sur extrait sec), le manioc et le riz (environ 90% d'amidon sur extrait sec) représentent des volumes plus faibles. Le choix de la matière première repose plutôt sur les caractéristiques de texture apportées par le type d'amidon ; cette texture est fortement influencée par le teneur en amylose, qui dépend de l'origine botanique de l'amidon (Tableau IX).

L'amidon, peu cher et disponible en grandes quantités, est utilisé couramment dans l'industrie alimentaire. Les utilisations alimentaires de l'amidon sont plus vastes que son rôle nutritionnel d'origine. Il possède beaucoup de propriétés physiques et chimiques qui le diffèrent d'autres ingrédients, ce qui lui confère sa grande diversité d'application. (**Takache, 2006**). Il est utilisé comme agent épaississant, liant, gélifiant et comme matière sucrante. Il est responsable de la texture d'une grande diversité d'aliments (soupes, sauces, etc...).L'amidon peut également trouver des applications dans de nombreux secteurs industriels non-alimentaires : production papetière, industrie pharmaceutique, cosmétique, textile etc. (**Lafargue, 2007**). Il peut également être à la base de la production de matières plastiques biosourcées et biodégradables (**Leroy, 2014)** (**Zhang *et al.*, 2014)**, et , de carburant pour moteur à explosion (bioéthanol) (**Debiton C., 2010**).Des applications comme liant sont également possibles dans le domaine des matériaux de construction **(Tran le, 2012) (Umurigirwa, 2014**).

III.2.2 Composition et structure moléculaire

Il existe différents types d'amidon, essentiellement liés à l'origine botanique de ceux-ci. Les principales caractéristiques qui donnent à chaque type d'amidon ses propriétés uniques sont liées :

- au rapport amylose / amylopectine, qui sont les deux polymères de base constituant l'amidon. La teneur en amylose des espèces sauvages telles que la pomme de terre, le blé et le pois lisse varie entre 18 et 35 %. Pour l'amidon de manioc, les teneurs en amylose varient de 14,20 ± 1,98 à 25,92 ± 2,78 % quand celles de l'amylopectine oscillent entre 85,80 ± 2,32 et 74,08 ± 1,45 %. L'amylopectine est donc le constituant principal de la plupart des amidons **(Lafargue, 2007) (Monnet, 2008) (Wertz, 2011**) **(Doué 2014)**.

- aux degrés de polymérisation des molécules d'amylose et d'amylopectine.

- à la structure granulaire de l'amidon.

III.2.2.1 L'amylose

L'amylose est une macromolécule linéaire, très peu ramifiée, constituée d'unités α-D-Glucose, liées par des liaisons de type α-(1-4) (Figure 18). L'amylose native présente des degrés de polymérisation entre 500 et 6000 qui varient selon l'origine botanique de la molécule (Tableau VII). **(Buléon *et al* (1990))**. Dans sa bibliographie, **(Maldonado Alvarado P.D., 2014)** relève les caractéristiques de l'amylose de différents types d'amidon, et en particulier celles de l'amidon de pomme de terre et de l'amidon de manioc (Figure 19).

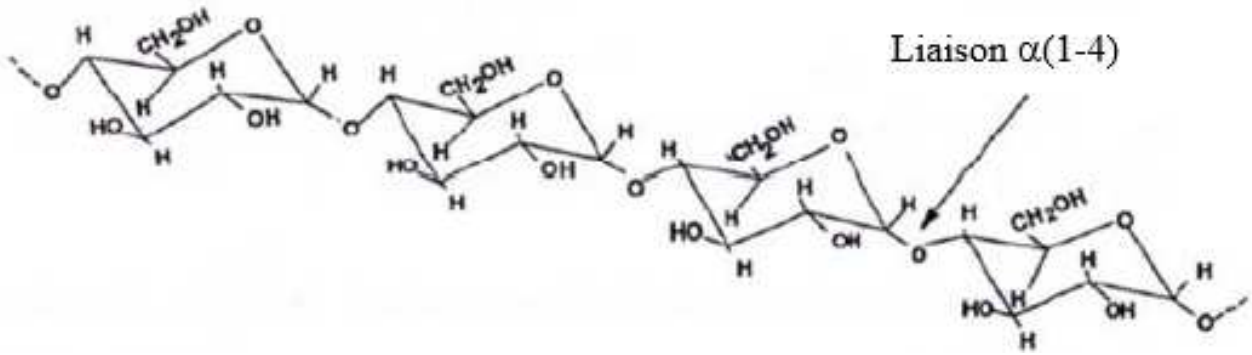


Figure 18:Structure de l'amylose(Buléon et al (1990))

Amidon	Teneur (%)	Masse Moléculaire (10^5 g.mol^{-1})	Degré de polymérisation (DPn)	Masse du degré de polymérisation (DPw)	DP de distribution apparent	Viscosité limite (η-mL.g^{-1})	Références
Manioc	14-26[a] 17[b] 17,8[c]	2,3[f] 4,3[g] 5,2 et 12,5[h]	2600[ego] 2660[o] 3642[k]	6680[ngq] 7710[h]	580 - 22400[ngq]	384[ngq] 465[h]	[a] (Sánchez *et al.*, 2009) [b] (Swinkels, 1985) [c] (Jane *et al.*, 1999)
Pomme de terre	16,9[c] 21[b] 23,8[d]	7,0[i] 8,7[j] 9,0[k]	2100 - 4920[ng] 4070[h]	5130 - 6360[ng] 5170[h]	560 - 21800[ing] 840 - 21800[op]	368 - 384[ng] 420[h]	[d] (L. Wang & Wang, 2001)1) [e] (Takeda, Hizukuri, & Juliano, 1987) [f] (Ciacco & D'Appolonia, 1977)
Maïs	28[b] 27,5[d] 22,5[c]	20[l]	960[o] 990[p]	2550[o]	390 - 13100[o] 400 - 14700[p]	169[o] 183[p]	[g] (Takeda *et al.*, 1984) [h] (Susuki, Takeda, & Hizukuri, 1985) [i] (Roger & Colonna, 1996)
Blé	28[b] 25,8[c]	3,9[k] 5,1[i] 5,8[j]	1290[o] 980 - 1570[p]	2360 - 5450[r]	460 - 18200[p]	118 - 237[p]	[j] (Meuser, Manners, & Seibel, 1995) [k] (Ong, Jumel, Tokarczuk, Blanshard, & Harding, 1994)
Riz	15-19[e] 21,8[d] 20,5[c]	0,1-5,2[m]	920 - 1100[o] 920 - 1040[p]	2750 - 3320[o]	210 - 12900[o] 320 - 11700[p]	180 - 216[o] 180 - 249[p]	[l] (Fiedorowicz, Tomasik, You, & Lim, 1999) [m] (Ramesh, Mitchell, Jumel, & Harding, 1999) [n] (Hizukuri & Takagi, 1984) [o] (Morrison & Karkalas, 1990) [p] (Takeda, Hizukuri, Takeda, & Suzuki, 1987) [q] (Emiola & Delarosa, 1981) [r] (Shibanuma, Takeda, Hizukuri, & Shibata, 1994)

Figure 19 : Propriétés de l'amylose des amidons de différentes origines botaniques selon (Maldonado Alvarado P.D., 2014).

III.2.2.2 L'amylopectine

L'amylopectine est un polymère fortement branché constitué de résidus D glucopyranose liés par des liaisons α. Les liaisons glucosidiques sont de type α(1-4) sauf aux points de branchement, représentant 5 à 6 % des liaisons, où elles sont de type α(1-6) (Figure 20).

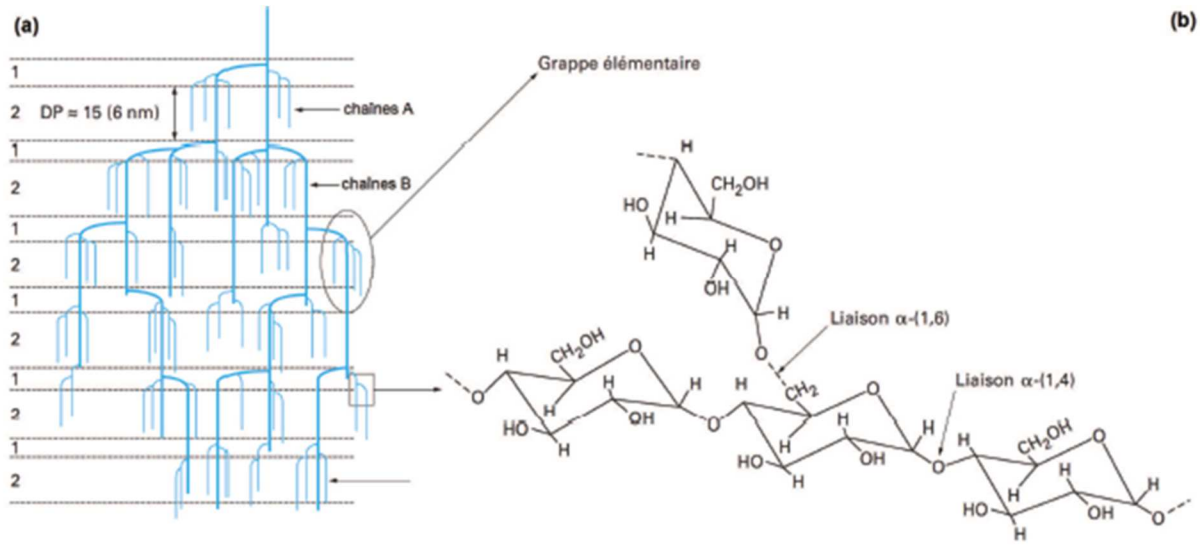


Figure 20: Amylopectine selon (Maldonado Alvarado P.D., 2014)– (a) Structure en grappe de l'amylopectine d'après (Robin et al. 1974) (b) structure chimique de l'amylopectine selon (Buléon et al., 1990)

Dans l'amylopectine, on distingue trois types de chaînes (Figure 20) :

→ des chaînes courtes (S, short ou A) de degré de polymérisation DP 12 à 20

→ des chaînes longues (L, long ou B) de degré de polymérisation DP 30 à 45

→ des chaînes de de degré de polymérisation DP > 60 (chaînes C)

Les chaînes de DP > 60 sont beaucoup moins nombreuses que les deux autres. Suivant l'origine botanique, le rapport chaînes longues (L) / chaînes courtes (S) varie. La cristallinité des grains d'amidon est essentiellement due aux molécules d'amylopectine organisées en lamelles cristallines**. (Boursier, 2005)**

Les masses moléculaires de l'amylopectine se situent entre 10^7 et 10^8 g/mol. Les caractéristiques de l'amylopectine de différents types d'amidon **sont répertoriées par (Maldonado Alvarado P.D., 2014)** (Figure 21).

Amidon	Masse moléculaire (10^8 g.mol^{-1})	Degré de polymérisation (DP)	Longueur de chaîne (LC)	Références
Manioc	0,7[a]	1300[c]	21[d]	[a] (Yoo & Jane, 2002)
	3,1 - 4,2[b]		21[o]	[b] (Rolland-Sabaté *et al.*, 2012)
			28[m]	[c] (Würzburg, 1986)
Pomme	1,7[a]	9800[l]	23[o]	[d] (Susuki *et al.*, 1985)
de terre	1,9[j]	11200[n]	24[d]	[e] (Hizukuri & Maehara, 1990)
	0,5[k]		29[m]	[f] (Takeda, Shitaozono, & Hizukuri, 1988)
Maïs	4,9[a]	8200[f]	22[o]	[g] (Takeda, Maruta, Hizukuri, & Juliano, 1989)
	0,1[j]	10200[h]	22[g]	[h] (Morrison & Karkalas, 1990)
	0,6[k]	15900[n]	24[m]	[i] (Seib, 1994)
Blé	3,1[a]	4800[e]	20-21[o]	[j] (Banks & Greenwood, 1975)
	0,01-0,1[i]		20[g]	[k] (Lelievre, Lewis, & Marsden, 1986)
			23[m]	[l] (BeMiller & Whistler, 2009)
Riz	26,8[a]	9000[g]	19-22[o]	[m] (Jane *et al.*, 1999)
		4700 - 12800[h]	20-21[g]	[n] (Takeda, Shibahara, & Hanashiro, 2003)
		8200 - 10900[n]	23[m]	[o] (Hizukuri, Abe, & Hanashiro, 2006)

Figure 21 : Propriétés de l'amylopectine de différents types d'amidon selon (Maldonado Alvarado P.D., 2014).

Les degrés de polymérisation (DP) de l'amylose et de l'amylopectine pour certains amidons sont repris au Tableau V**.**

Tableau V: Degré de polymérisation de l'amylose et de l'amylopectine d'amidons

Céréale ou tubercule	Amylose	Amylopectine
Riz	1100	13000
Maïs	990	7200
Pomme de terre	4920	9800
Blé	1180	-
Amylomaïs	690	-

III.2.2.3 Structure granulaire semi-cristalline de l'amidon

L'amidon, après extraction se présente sous la forme d'une poudre blanche. Cette poudre est constituée d'entités microscopiques de 2 à 100 µm de diamètre selon l'origine botanique, nommées grains d'amidon. La morphologie (sphérique, lenticulaire ou polyédrique…) du grain d'amidon, la composition, la position du hile (point de départ de la croissance du grain) sont dépendantes de l'origine botanique **(Lafargue, 2004)(Perez, 2010).** Elles résultent de l'agencement de l'amylose et de l'amylopectine en zones amorphes et cristallines (Figure 22).

Les grains d'amidon montrent donc une organisation de type « oignon » formée de couches concentriques alternativement amorphes et semi-cristallines. (**Angellier, 2005**), (**Lafargue, 2007).** Ces couches correspondent aux anneaux de croissance du grain d'épaisseur variant entre 120 et 400 nm. La taille et le nombre de ces anneaux dépendent de l'origine botanique de l'amidon (. La façon dont les lamelles sont organisées dans le grain fait l'objet de nombreuses investigations (**Angellier, 2005), (Lafargue, 2007).**

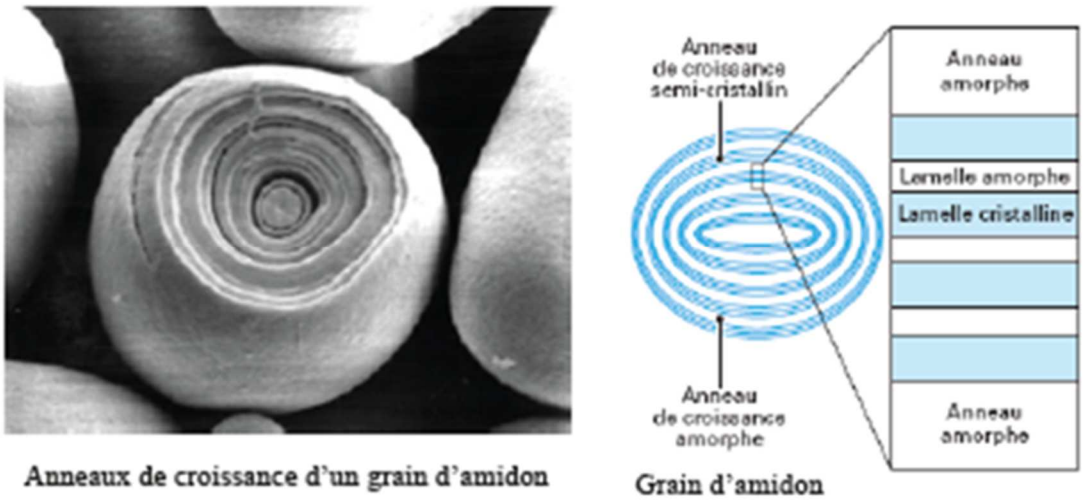


Figure 22 : Grain d'amidon : Photographie et représentation schématique des zones amorphes et cristallines selon (MBougheng P.D., 2009)

En lumière polarisée, les grains d'amidon sont biréfringents (en croix de Malte) dont les branches se rejoignent au niveau du hile (Figure 23). La biréfringence est positive ce qui indique une organisation radiale des chaînes à l'intérieur du grain.

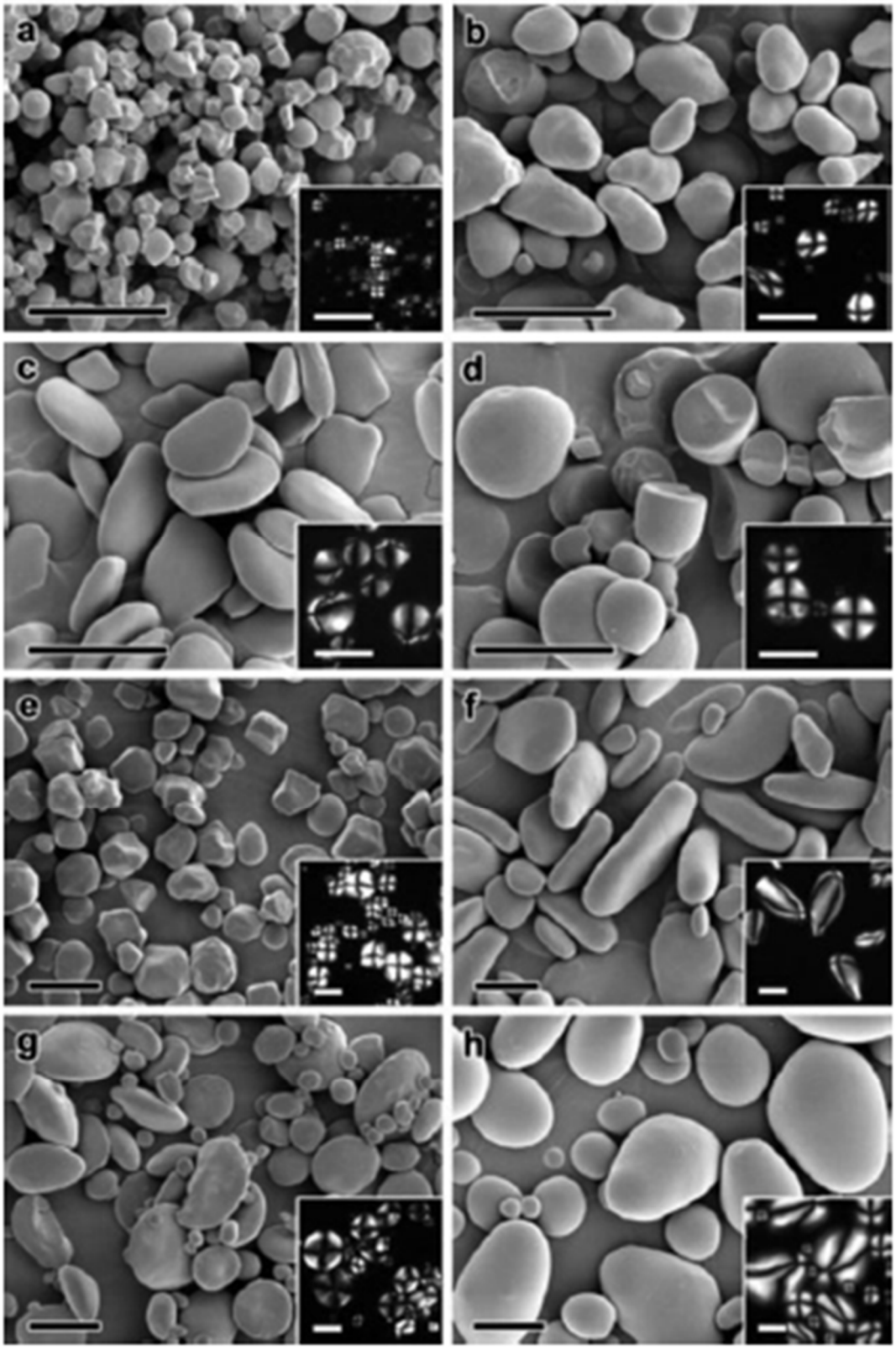


Figure 23 : Images de grains d'amidon de types botaniques différents réalisées d'une part par miscroscopie électronique à balayage et d'autre part à la lumière polarisée selon (Perez, 2010) (a)taro (b)marron (c) gingembre (d) manioc (e) maïs (f) banane verte (g) blé (h) pomme de terre.

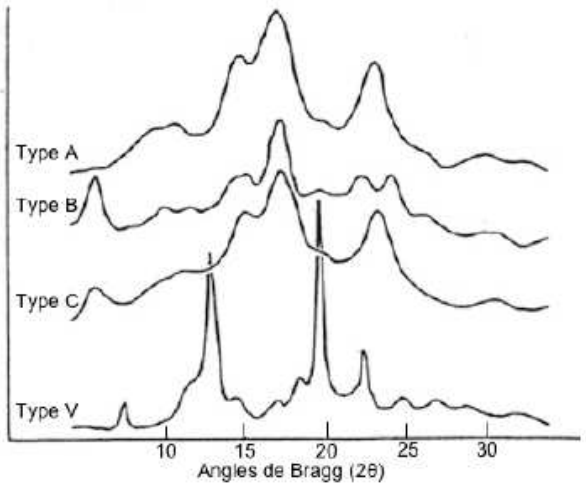


Figure 24 : diagramme de diffraction aux rayons X des différents types d'amidon donné par (Maldonado Alvarado P.D., 2014) selon Zobel (1988).

La nature semi-cristalline des amidons natifs a été mise en évidence par diffraction des rayons X **(Lafargue, 2007).** Les amidons natifs peuvent être classés en trois groupes selon leur diagramme de diffraction : A, B et C. Le type A est caractéristique des amidons de céréales (amidon de blé et de maïs cireux). Le type B caractérise des amidons de tubercule et de céréales riches en amylose. Enfin, le type C est caractéristique des amidons de légumineuses. Il correspond à un mélange des deux types cristallins A et B (Tableau VI).

Tableau VI: Maille cristalline des allomorphes A et B de l'amidon

Amidon **Type de maille**	**Allomorphe A** **Monoclinique**	**Allomorphe B** **Hexagonale**
a (nm)	2,124	1,85
b (nm)	1,172	1,85
c (nm)	1,069	1,04
γ (°)	123,5	120

Une autre différence majeure entre ces deux structures est la quantité d'eau que la maille contient. En effet, dans une maille monoclinique, 4 molécules d'eau sont fixées tandis qu'il y en a 36 dans une maille hexagonale. Ainsi, une forte humidité et une température basse favorisera la formation de l'allomorphe B tandis qu'une température élevée et une faible humidité favorisera la formation de l'allomorphe A.

III.2.3 Transformations hydrothermiques de l'amidon

L'amidon en poudre contient une quantité d'eau variable en équilibre avec l'humidité relative du milieu **(Buleon *et al.* 1998).** Les amidons sont traditionnellement commercialisés avec des teneurs en eau de 12 à 13% pour ceux des céréales, du manioc ou du pois, et 18 à 19% pour celui de la pomme de terre. Sous cette forme, il présente un faible intérêt technologique mais peut néanmoins être utilisé pour quelques applications comme le poudrage des gants chirurgicaux ou le coffrage en confiserie.

A température ambiante, les grains d'amidon sont insolubles dans l'eau (dans la gamme de pH compris entre 3 et 10). Toutefois, ils peuvent absorber une légère quantité d'eau (10 à 20%) par diffusion ou absorption dans les parties « amorphes » des granules. Cette absorption s'accompagne d'un début de gonflement radial des granules qui est réversible par séchage **(Billaderis C.G. 1991)**.

Des traitements hydrothermiques ou thermo-mécaniques, permettant de détruire la structure granulaire de l'amidon, sont donc requis pour étendre ses domaines d'application **(Schwach, 2004).**

Lors d'un traitement hydro thermique, différentes transformations de l'amidon, initialement en solution sont observées en fonction de la température : gélatinisation provoquant l'empesage lors de la montée en température, rétrogradation et gélification lors du refroidissement (Figure 25). Ces étapes sont abondamment décrites dans la littérature **(Buleon et *al* 1990) (Billaderis, 1991) (Angellier, 2005), (Lafargue, 2007), (Monnet, 2008), (Mbougheng, 2009), (Bahrani, 2012), (Maldonado, 2014), (David, 2017)**.

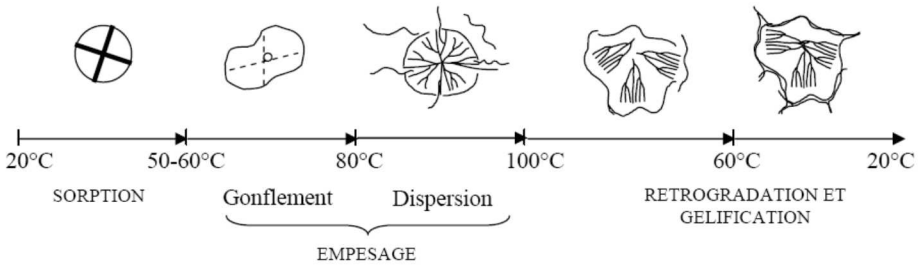


Figure 25: Différents états du grain d'amidon placé en présence d'un excès d'eau et soumis au chauffage-refroidissement (Angellier, 2005)

Ces étapes s'accompagnent d'une évolution de la rhéologie de l'amidon (Figure 26).

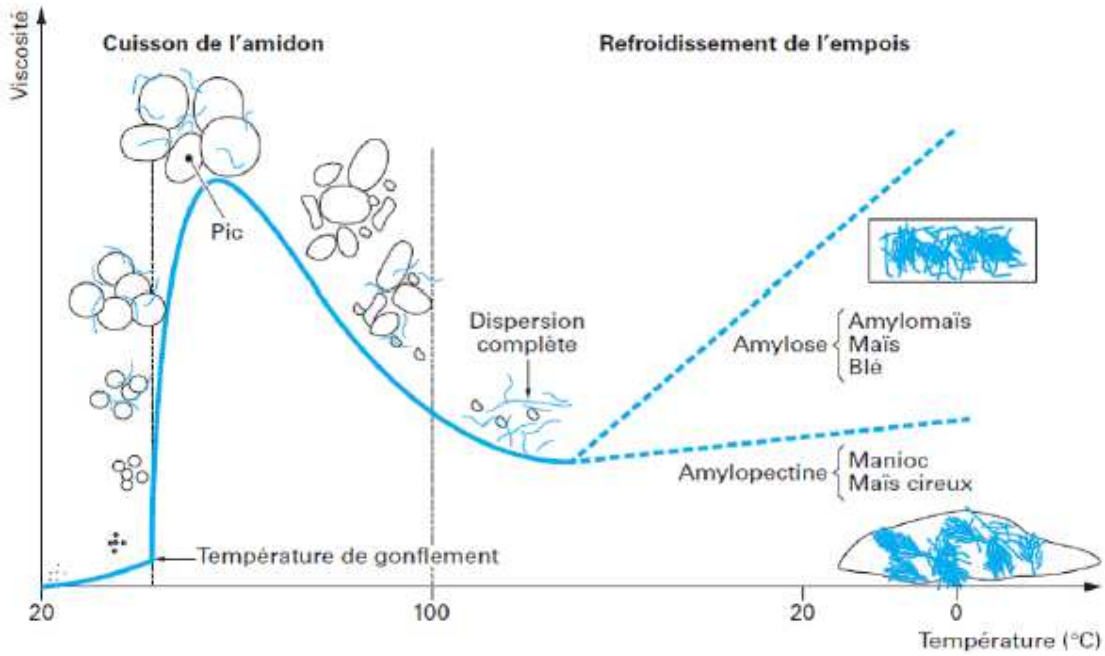


Figure 26 : Evolution de la viscosité de l'amidon en fonction de la température (David A., 2017)

III.2.3.1 Gélatinisation -empesage

Lorsqu'on chauffe une suspension d'amidon où l'eau est en excès, et qu'on atteint la température de gélatinisation (température de gonflement), l'eau pénètre de plus en plus dans les régions amorphes des grains, qui gonflent. La viscosité augmente : on obtient un empois contenant des granules d'amidon gonflés et des chaines d'amylose en suspension dans l'eau. Cette phase, également appelée l'empesage, est irréversible comme en atteste l'altération des figures de diffraction X et de biréfringence en lien avec la perte de structure cristalline des grains d'amidon. Quand on poursuit le chauffage, on atteint un pic de viscosité, qui diminue ensuite en liaison avec la solubilisation de l'amylose en dehors du grain. Si le chauffage se poursuit encore, toutes les macromolécules du grain vont se disperser (au-delà de 90°C).

La viscosité dépend également de la structure chimique de l'amidon, de sa concentration, des conditions d'essai (température, vitesse de cisaillement, vitesse de chauffage) et des conditions de stockage (température et temps).

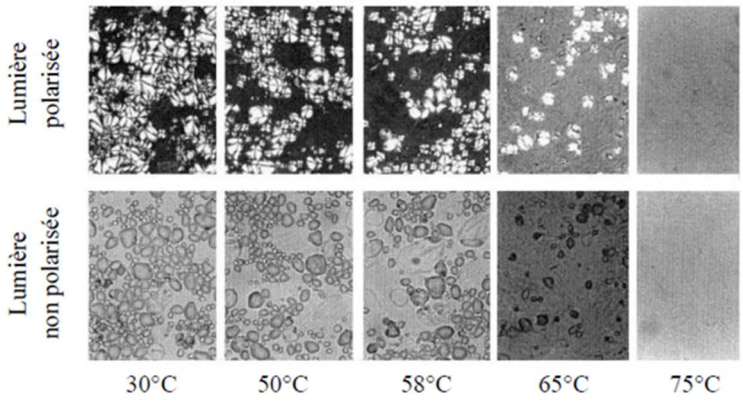


Figure 27 : Evolution de la structure granulaire de l'amidon de pomme de terre suivie par microscopie optique (teneur en eau 82 wt%) (Liu et al., 2002) (Leroy, 2014)

La plage de température où la gélatinisation se produit dépend de différents paramètres parmi lesquels (**Maldonado, 2014**) souligne que le type de granules, donc le type botanique de l'amidon, et la concentration en amidon sont prédominants. La température de gélatinisation, de l'ordre de 60°C, est donnée pour différents type d'amidons par (**Monnet 2008**) (Tableau VII).

Tableau VII: Gélatinisation, empesage et propriétés d'empois d'amidon d'origine botanique différentes (Jane et *al.*, 1999)selon (Maldonado, 2014)

Amidon	Gélatinisation [a]			Rétrogradation [b]	Empesage et propriétés d'empois [c]			
	T_o (°C)	Plage (°C)	Enthalpie (ΔH, J/g)	(%)	Température d'empesage (°C)	Viscosité (RVU)		
						Viscosité maximale	Holding strength	Viscosité finale
Type A								
Maïs normal	64,1	10,8	12,3	47,6	82,0	152	95	169
Maïs cireux	64,2	10,4	15,4	47,0	69,5	205	84	100
Maïs cireux "du"	66,1	14,4	15,6	71,2	75,7	109	77	99
Riz normal	70,3	9,9	13,2	40,5	79,9	113	96	160
Riz cireux	56,9	13,4	15,4	5,0	64,1	205	84	100
Riz doux	58,6	12,8	13,4	4,3	64,6	219	100	128
Blé	57,1	9,1	10,7	33,7	88,6	104	75	154
Quenouille du mil	67,1	8,5	14,4	53,8	74,2	201	80	208
Haricot Mung	60,0	11,5	11,4	58,9	73,8	186	161	363
Taro chinois	67,3	12,5	15,0	32,0	73,1	171	88	161
Manioc	64,3	10,1	14,7	25,3	67,6	173	61	107
Type B								
Maïs cireux "ae"	71,5	25,7	22,0	61,6	83,2	162	150	190
Pomme de terre	58,2	9,5	15,8	43,4	63,5	702	165	231
Type C								
Racine de Lotus	60,6	10,5	13,5	43,2	67,4	307	84	138
Banane verte	68,6	7,5	17,2	47,7	74,0	250	194	272
Châtaigne d'eau	58,7	24,1	13,6	47,9	74,3	61	16	27

[a] Les paramètres de gélatinisation ont été obtenus par ACD. La plage correspond à la différence de température entre la température finale et la température initiale (T_o).
[b] Le % de rétrogradation est calculé par le rapport Δ*H* amidon rétrogradé / Δ*H* gélatinisation.
[c] Déterminé par un viscoanalyseur rapide, utilisant 8% (m/m, b.s.) d'amidon dans l'eau (28 g de la masse totale).

La gélatinisation est une transformation endothermique qui peut être analysée par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) qui permet de déterminer les températures caractéristiques et enthalpies des différentes phases pour différentes teneur en eau (Figure 28).

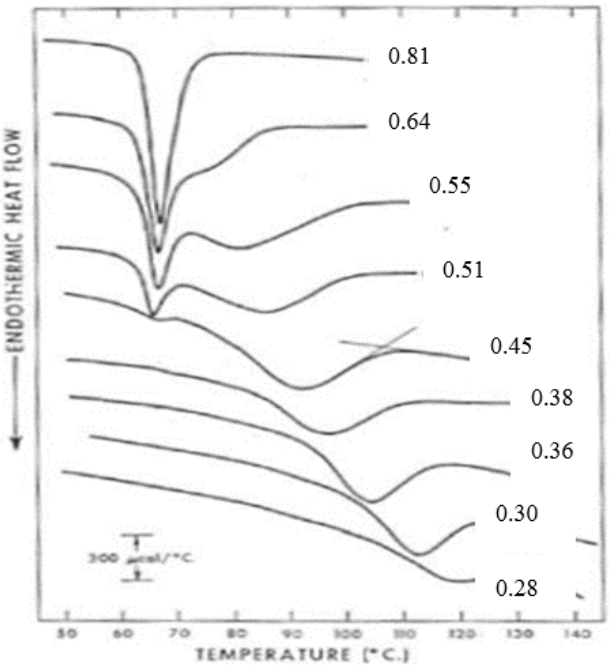


Figure 28 : Thermogramme d'amidon de pomme de terre contenant différents taux d'eau (Donovan, 1979).

Pour de faibles teneurs en eau un seul pic, attribué à la fusion de la structure cristalline est observé. La température de ce pic diminue quand la quantité d'eau augmente. Pour des teneurs en eau élevée, un pic correspondant à la gélatinisation est observé vers 65°C et ne dépend plus de la teneur en eau. Aux teneurs en eau intermédiaires, les deux pics sont observés. Le pic de gélatinisation apparait seul pour des quantités d'eau supérieures à 80%. **(Leroy, 2014)** pour l'amidon de pomme de terre et 86% (fraction volumique) pour l'amidon de manioc **(Garcia *et al* (1996)).**

III.2.3.2 Rétrogradation et gélification

Lorsque la température diminue, pour une transformation obtenue avec excès d'eau, l'amidon gélatinisé se réorganise pour atteindre un état énergétiquement plus stable et forme un gel. Les chaînes, après être sorties du grain, se recombinent sous forme de double hélice mais de manière aléatoire. La recristallisation se produit de proche en proche conduisant à la rétrogradation et à la gélification. La rétrogradation de l'amylose est plus rapide que celle de l'amylopectine. Au cours de ce phénomène, la solubilité de l'empois diminue pour finalement

donner un gel blanc et opaque, mélange d'amylose et d'amylopectine *(***Mbougueng, 2009) (Bahrani, 2012).**

Au cours de ce refroidissement, la viscosité diminue. Plus l'amidon contient d'amylopectine plus il aura une texture de gel longue et élastique tandis que l'amylose rendra le gel plus ferme et de texture plus courte.

La rétrogradation dépend de nombreuses variables telles que la structure de l'amylose et de l'amylopectine et leurs proportions relatives, du degré et du temps de cuisson, ainsi que des autres constituants qui peuvent être présents dans le milieu. L'amidon de manioc présentant une teneur en amylose parmi les plus faibles, présente un taux de rétrogradation également faible par rapport aux autres amidons.

III.2.4 Bilan des caractéristiques des différents types d'amidons

De manière générale, les amidons sont composés d'amylose et d'amylopectine dont les caractéristiques principales sont recensées dans le Tableau VIII.

En fonction de l'origine botanique, les propriétés chimiques et physiques des amidons diffèrent, les principales sont répertoriées dans le Tableau IX.

Parmi les amidons d'origine naturelle, l'amidon de manioc est le moins riche en amylose, l'amidon de pomme de terre présente une teneur en amylose légèrement plus forte. La taille des grains est plus élevée pour l'amidon de pomme de terre. L'amidon de manioc présente une température de gélatinisation légèrement plus élevée que celle de l'amidon de pomme de terre.

Tableau VIII: les propriétés physicochimiques de l'amylose et de l'amylopectine (Whistler et *al.* 1984).

Propriétés	Amylose	Amylopectine
Masse moléculaire	5 000 – 200 000	un à plusieurs millions
Liaison glycosidique	(1-4)-α-D-	(1-4)-α-D- et (1-6)-α-D
Susceptibilité pour rétrogradation	grande	petite
Structure moléculaire	linéaire	chaînes ramifiées

Tableau IX : Caractéristiques des amidons et leurs empois selon leur origine botanique (Nayouf, 2003) (Chene, 2004)

Propriétés	Maïs	Maïs cireux[1)]	Pomme de terre	Manioc	Blé	Pois
Taille des grains d'amidon (µm)	2-30	2-30	5-100	4-35	2-55	
% d'amylose	28	<2	21	17	28	35
% d'amylopectine	72	>98	79	83	72	65
Pouvoir de gonflement à 95 °C (g/g)	24	64	1150	71	21	
Texture de l'empois	courte	filante	très filante	filante	courte	
Aspect de l'empois	opaque	légèrement trouble	translucide	translucide	trouble	
Résistance au cisaillement	moyenne	très faible	moyenne à faible	très faible	moyenne	
Tendance à la gélification	élevée	très faible	moyenne à faible	moyenne	élevée	

[1]« cireux » s'applique aux variétés donnant un amidon exempt d'amylose

CHAPITRE IV

Synthèse de la bibliographie et objectifs des travaux

La forte croissance démographique en Côte d'Ivoire nécessite la construction de nombreux habitats. A l'heure actuelle, ces habitats sont construits sans tenir compte du climat chaud et humide du pays et ne répondent pas aux critères de développement durable. Ils sont donc source de dépense d'énergie par l'utilisation de la climatisation toute l'année ou sont inconfortables. En fin de vie, ces bâtiments produisent également des déchets non recyclables. D'autre part, on constate que les déchets sont mal collectés et peu valorisés en Côte d'Ivoire. Parmi ceux-ci, le papier et l'amidon de manioc sont identifiés comme ressources potentielles.

Dans ce contexte, ces travaux ont pour objectif de développer des matériaux issus de matières premières bio-sourcées ou recyclées. Ces matériaux, destinés à un usage en faux-plafond ou en cloisonnement, devront présenter des performances multi-physiques (mécaniques et hygrothermiques) adaptées à l'usage envisagé.

Les charges qui seront utilisées sont les fibres de bois, la ouate de cellulose et les déchets de papier. Ce sont des matériaux fibreux à base cellulosique qui se distinguent par les différents procédés utilisés pour obtenir le produit fini. Ces charges seront liées avec trois types de liants: du plâtre (liant minéral), de l'amidon de pomme de terre et de l'amidon de manioc (liants agro-sourcés). Le plâtre est traditionnellement utilisé comme liant pour la confection de panneaux légers et faux plafonds. Son utilisation permet de produire une base de donnée de référence en terme de performance d'usage qui pourra être utilisée pour évaluer la pertinence des composites élaborés à base d'amidon. L'amidon de pomme de terre a été choisi car issu d'un tubercule, comme l'amidon de manioc. La comparaison des performances obtenues sur les composites formulés avec les deux amidons va permettre d'évaluer l'incidence d'un changement de ressource et ainsi évaluer la robustesse des formulations. L'étude bibliographique montre que le rapport Amylose/Amylopectine est équivalent pour ces deux amidons mais que le taux de gonflement de l'amidon de pomme de terre est beaucoup plus fort que celui de l'amidon de manioc. Cette propriété sera à prendre en compte lors de la mise en œuvre du composite.

PARTIE 2
METHODES ET MATERIAUX

Les performances d'un matériau dépendent d'une part des propriétés intrinsèques des matières premières entrant dans sa composition et d'autre part de sa formulation et de la méthode de production.

Cette partie présente dans un premier temps les méthodes de caractérisation utilisées pour les matières premières (charges et liants) et/ou les composites : caractérisation physique (masse volumique apparente, réelle et porosité), caractérisation hydrique (Moisture Buffer Value MBV), caractérisation thermique (conductivité), caractérisation mécanique (résistance en compression et en traction) et réaction au feu.

Dans un deuxième temps, la préparation des matières premières est présentée. Les formulations et méthodes de production des composites sont ensuite détaillées.

CHAPITRE V

Méthodes de caractérisation des matières premières et des composites

V.1 Caractérisation physique

V.1.1 Masse volumique apparente

La mesure de la masse volumique apparente des charges est réalisée sur les charges en vrac dans le cas de la ouate de cellulose et des granules de papier, elle est réalisée sur un échantillon parallélépipédique pour les fibres de bois et les composites. Préalablement aux mesures, les échantillons sont soit stabilisés en armoire climatique soit séchés en étuve à 40°C puis refroidis à 23°C dans un dessiccateur. Durant la stabilisation, les échantillons sont pesés chaque jour jusqu'à stabilisation complète de leur masse.

V.1.1.1 Masse volumique apparente des matériaux en vrac

Pour les charges en vrac, la mesure de la masse volumique apparente consiste à peser les échantillons et à mesurer le volume correspondant avec de l'eau à l'aide d'un tube cylindrique transparent de 10 à 20 cm de diamètre et au moins deux fois en hauteur son diamètre (Figure 29).La quantité de charge utilisée pour une mesure doit être ajustée à la moitié du volume du cylindre transparent destiné à être utilisé pour mesurer la densité apparente.

Les différentes étapes de la réalisation de cet essai sont décrites dans le protocole Rilem TC 236- BBM **(Amziane *et al.* 2017).**

1. Sécher l'échantillon à 60 ° C jusqu'à obtention d'une masse constante (variation inférieure à 0,1% entre deux pesées réalisées à 24h d'intervalle).
2. Peser le cylindrique transparent vide M_{cyl} (kg).
3. Mettre le matériau en vrac dans le cylindrique, peser et noter la masse de l'ensemble $M_{cyl+ech}$ (kg).
4. Retourner le cylindre 10 fois pour obtenir un arrangement représentatif du matériau en vrac et agiter légèrement pour obtenir une surface horizontale.
5. Placez un disque de carton sur la surface de l'échantillon et marquer le niveau sur le cylindre.
6. Retirer l'échantillon du cylindre.
7. Remplir le cylindre avec de l'eau jusqu'au niveau relevé.
8. Peser le cylindre et noter la masse de l'ensemble. $M_{cyl+eau}$ (kg).

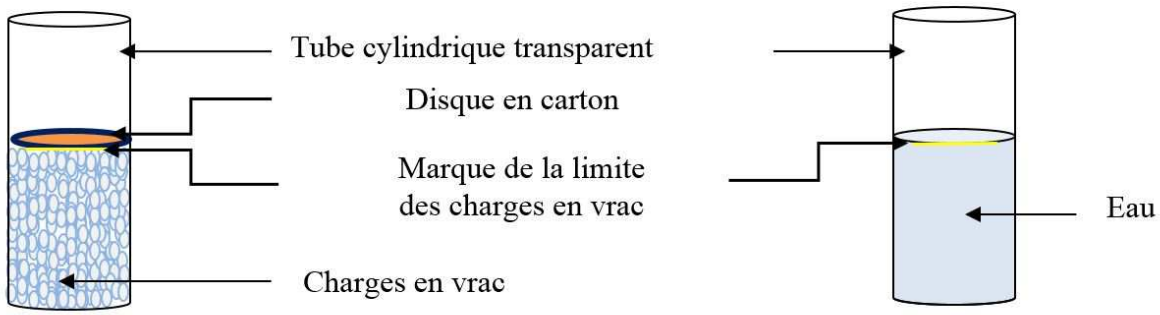


Figure 29: Réalisation de la masse volumique apparente (exemple de GP)

La masse volumique apparente (ρ_a) de l'échantillon est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\rho_a = \frac{M_{cyl+ech} - M_{cyl}}{M_{cyl+eau} - M_{cyl}} * \rho_{eau} \quad \text{(kg/m³)}$$

V.1.1.2 Masse volumique apparente des matériaux de forme régulière

Les échantillons de forme géométrique régulière sont mesurés sur les différents cotés avec un pied à coulisse électronique. Pour chaque dimension la valeur est la moyenne de 4 mesures (longueur (L), largeur (l) et épaisseur (e)). On pèse les échantillons à l'aide d'une balance Sartorius d'une portée maximale de 8200g et de précision de lecture d=0,01g.
La masse volumique apparente ρ_a est donnée par :

$$\rho_a = \frac{m}{L \times l \times e} \text{(kg/m³)}$$

La masse volumique apparente servira en outre à vérifier que les échantillons utilisés pour les différentes caractérisations sont représentatifs du matériau étudié (charge ou composite).

Figure 30:Composites à caractériser (gauche Fibres de Bois -Amidon; milieu Ouate de Cellulose -Amidon; droite Granules de Papier -Amidon)

V.1.2 Masse volumique réelle

La masse volumique réelle des charges et des liants est mesurée, après séchage à l'étuve à 40°C, par méthode pycnométrique. Dans le cas des fibres de bois, celles-ci sont préalablement émiettées.

La masse volumique réelle est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\rho_s(kg\ /\ m3) = \frac{m_s}{V_s}$$

Où : m_s est la masse à l'état sec de l'échantillon (kg);

V_s est le volume à l'état sec de l'échantillon (m^3);

L'échantillon est placé dans un pycnomètre dont le volume est ensuite complété par un liquide chimiquement inerte : ici du toluène. Afin de s'assurer que tous les vides sont comblés par le toluène, l'ensemble est agité et pesé régulièrement jusqu'à stabilisation de la masse. Afin de calculer la masse volumique du toluène, on pèse ensuite le pycnomètre rempli de toluène, puis d'eau à l'aide d'une balance Sartorius BP 301S de précision de lecture 0,01g.

Les pesées successives donnent :

m_1 : masse du pycnomètre (kg),

m_2 : masse pycnomètre + échantillon (kg),

m_3 : masse pycnomètre + échantillon + toluène (kg),

m_4 : masse pycnomètre + toluène (kg),

m_5 : masse pycnomètre + eau (kg).

Les relations qui donnent accès à la masse volumique réelle de l'échantillon sont :

Masse de l'échantillon : $m_s(kg) = m_2 - m_1$

Masse de toluène contenue dans m_3: $m_T(\%) = m_3 - m_2$

Masse volumique du toluène : $\rho_T = \frac{m_4 - m_1}{m_5 - m_1} * \rho_w$

Volume de toluène ajouté à celui de l'échantillon pour remplir le pycnomètre :

$$V_T(m3) = \frac{m_T}{\rho_T}$$

Volume de l'échantillon : $V_s(kg\ /\ m3) = \frac{m_5 - m_1}{\rho_w} - V_T$

La combinaison des équations 3 à 6 donne la masse volumique réelle de l'échantillon :

$$\rho_s(kg\ /\ m3) = \frac{(m_4 - m_2)(m_2 - m_1)\rho_w}{(m_5 - m_1)(m_4 - m_1 - m_3 + m_2)}$$

Figure 31: Mesure de la masse volumique réelle (de gauche à droite : échantillons FB, OC et GP placés dans les pycnomètres)

Les volumes des pycnomètres utilisés sont de l'ordre de 500 ml (Figure 31). La taille des pycnomètres utilisés est fonction de la taille de l'échantillon et de la quantité nécessaire pour avoir des résultats fiables.

Pour les poudres, un autre type de pycnomètre peut être utilisé : le pycnomètre Le Chatelier. C'est un pycnomètre constitué un ballon d'environ 250cm^3 surmonté d'un col étroit comprenant une graduation « 0 », puis une échelle graduée au 1/10 de cm^3.

V.1.3 Porosité totale

La porosité totale est calculée à partir de la masse volumique apparente et de la masse volumique réelle, selon la relation :

$$n_{tot} = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_s}$$

V.2 Caractérisation Hydrique: Valeur Hydrique Tampon (MBV)

La caractérisation hygrique repose sur la mesure de la valeur tampon hygrique qui caractérise l'aptitude d'un matériau à réguler les variations d'humidité ambiante. L'humidité relative (HR) de l'air ambiant (aussi nommée hygrométrie ou degré hygrométrique) se définit comme le rapport de la pression vapeur (p_{vap}) exercée par la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (p_{sat}) (T) à la température T donnée, correspondant au maximum de vapeur d'eau que l'air ambiant peut comporter à cette même température. En outre, le degré d'hygrométrie de l'air ambiant varie si la température ou la pression évolue bien que son humidité absolue reste constante.

La valeur tampon hydrique, appelée en anglais «Moisture buffer value» (MBV), a été mesurée en suivant le protocole du projet NORDTEST Project **(Rode et al 2005)**. Ce protocole a été testé lors d'un round robin test impliquant plusieurs laboratoires européens, sur différents matériaux de génie civil : béton, briques, béton cellulaire, plâtre, bois… Une classification des matériaux a alors été proposée (Figure 32).

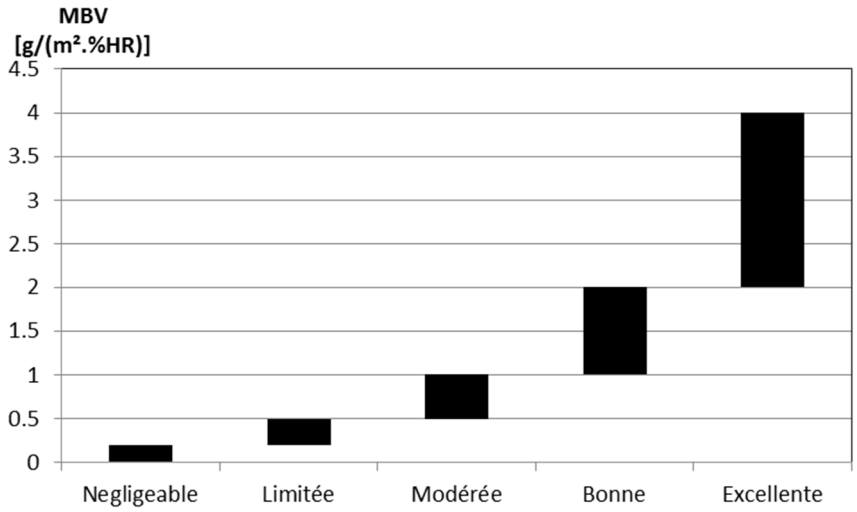


Figure 32: Classification des valeurs tampon hygrique (MBV) selon le Nordtest Project (Rode et al 2005)

Après stabilisation des échantillons à 23°C, 50%HR, ceux-ci sont soumis à des cycles d'humidité journaliers. La valeur MBV est déterminée par la quantité d'eau adsorbée ou désorbée par une unité de surface lorsque l'échantillon est soumis à une variation de l'humidité relative ambiante en un temps donné et elle s'exprime en g /(m^2.% HR), soit :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A\,(HR_{haute} - HR_{basse})}$$

Où : MBV est la valeur tampon hydrique (g/(m².%HR)),

Δm représente la variation de masse au cours de la phase d'absorption / de désorption (g),

A est la surface d'échange (m²) et

HR_{haute} et HR_{basse} les humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%).

Le banc d'essai utilisé est constitué d'une armoire climatique Vötsch VC4000 (Figure 33) au sein de laquelle la température peut être régulée entre 10 et 95 °C et l'humidité relative entre 10 et 98%. La consigne est changée manuellement au cours de l'essai selon le schéma 8/16 heures à 75/33 % HR. Les échantillons sont pesés 5 fois pendant la phase d'adsorption à 75 % d'humidité relative et 2 fois pendant la phase de désorption correspondant à 33 % d'humidité relative. Le test est arrêté lorsque la variation de l'écart de masse entre la phase d'adsorption et de désorption est inférieure à 5 %, sur 3 jours consécutifs. L'ambiance est enregistrée toutes les 5 minutes avec des sondes Sensirion SHT 75 et en continu par le capteur de l'enceinte. La vitesse d'air est mesurée au voisinage des échantillons : les composantes verticales sont de 0,07 à 0,14 m/s alors que les composantes horizontales sont de 0,1 à 0,4 m/s. La précision de lecture de la balance est de 0,01 g et sa linéarité est de 0,01 g. La valeur tampon hydrique est donc obtenue avec une précision de l'ordre de 5%.

Pour les charges en vrac (ouate de cellulose et granules de papier), les échantillons sont placés dans des boites étanches ouvertes en face supérieure et remplies jusqu'à environ 2 cm de la surface d'échange (diamètre environ 12 cm et hauteur environ 14 cm). Les hauteurs initiales et finales sont relevées afin de déterminer la masse volumique apparente des charges et vérifier le tassement au cours de l'essai. La fibre de bois est recoupée de façon cylindrique afin d'épouser la forme de la boite.

Pour les composites, les échantillons sont obtenus par découpe, leur représentativité par rapport à la plaque dont ils sont issus est évaluée via leur masse volumique apparente. Il s'agit de parallélépipèdes de 13 à 14 cm de long, 10 à 11 cm de large et 4 à 6 cm d'épaisseur, supposée supérieure à la profondeur de pénétration. Ils sont étanchés grâce à du scotch

aluminium sur 5 de leurs six faces. Une étude complémentaire est réalisée en fonction de l'épaisseur des échantillons. Ceux-ci sont également obtenus par découpe tout en conservant la même surface d'échange que celle de l'échantillon initial auquel il sera comparé.

Figure 33: Essai MBV: a) armoire climatique Vötsch VC 4060; b) mesure MBV des composites; b) mesure MBV des charges

V.3 Caractérisation thermique: conductivité thermique

La conduction thermique λ est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

La conductivité thermique λ (W/(m.K)) est mesurée en régime transitoire à l'aide d'un CT-mètre (Figure 34), qui est un appareil constitué :

- d'un organe de commande qui permet de régler les différents paramètres (puissance de chauffage, temps de chauffage…) et d'interpréter les mesures. Cet organe est relié à un ordinateur afin d'acquérir les points de mesure,

-d'une sonde de type fil souple chaud long de 5 cm destinée à être placée entre deux échantillons plans.

La mesure est basée sur l'analyse de l'élévation de la température en fonction du temps de chauffage. Le flux de chaleur et le temps de chauffage sont choisis pour atteindre une élévation suffisante de la température (> 10 ° C) et un coefficient de corrélation élevé (R^2) entre les données expérimentales et la courbe théorique.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda}\left(\ln(t) + K\right)$$

Où : q est le flux de chaleur par mètre (W/m), K est une constante qui inclut la diffusivité thermique du matériau, t le temps de mesure (s),et T la température (°C).

Selon le fabricant, le fil chaud est bien adapté pour la mesure de la conductivité thermique dans une gamme de valeurs comprise entre 0,02 et 5 W/(m.K) avec une précision de 5%. Dans cette étude, le temps de chauffage retenu est de 120 s et le flux thermique varie de 2 à 11,4 W/m.

Figure 34: a) CT mètre ; b) composites maintenus sec dans des armoires à l'aide du gel de silice, c) mesure de la conductivité des charges

Pour les charges, la conductivité thermique du matériau en vrac est mesurée en produisant des échantillons représentatifs dans deux cylindres, la sonde étant insérée entre les deux (Figure 34c). Pour les composites, les échantillons utilisés sont les mêmes que pour les essais MBV, utilisés par couple. Les essais sont réalisés après stabilisation à 23°C et 50%HR. L'effet de la température sur la conductivité au point sec est ensuite étudié. Les échantillons sont séchés en étuve à 40°C puis stabilisés en armoire sèche (gel de silice) à différentes températures (40°C ; 30°C ; 20°C ; 10°C) (Figure 34).

V.4 Caractérisation mécanique

V.4.1 Essai de compression

L'essai de compression permet de caractériser le comportement d'un matériau soumis à un écrasement entre deux plateaux. Cet essai est réalisé à l'aide d'une presse universelle Instron 5988. L'effort de compression et la distance entre plateaux sont enregistrés régulièrement, à une fréquence de 10 Hz (Figure 35).

Figure 35: Presse utilisée pour les essais de compression et de flexion (gauche : compression, droite : flexion)

Le principe de l'essai retenu dans le cadre de cette étude correspond à un essai à vitesse de déplacement imposée à chargement monotone. Aucun cycle de charge n'est donc imposé. Par contre, la décharge de l'échantillon en fin d'essai est enregistrée. La vitesse de déplacement au cours de l'essai est de 5 mm/min. Les mesures de la charge et de la hauteur de l'échantillon permettent de calculer la contrainte de compression appliquée et la déformation de l'échantillon (en référence à la hauteur initiale). Les courbes déformation - contrainte sont ainsi identifiées. La Figure 31 présente l'allure de telles courbes.

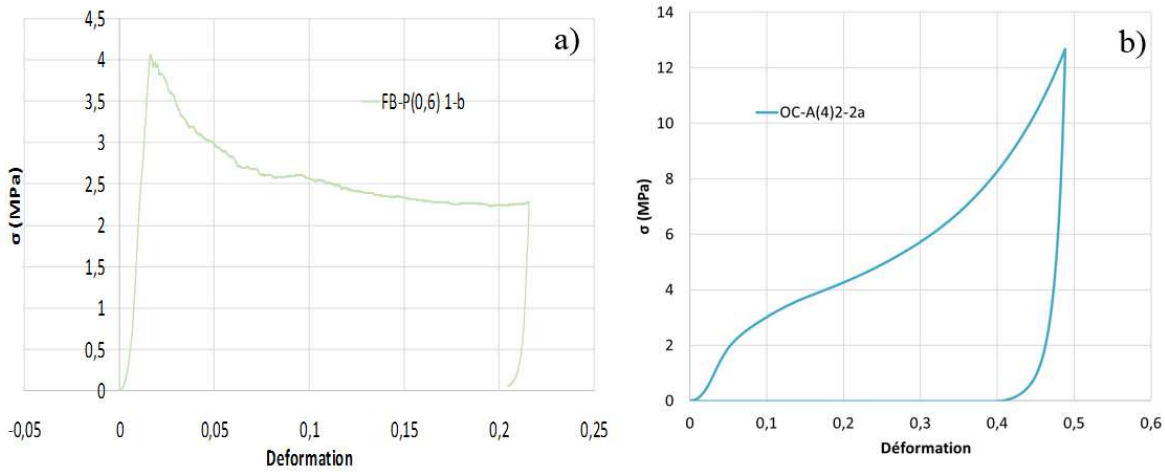


Figure 36: Courbes déformation (m/m) - contrainte (MPa) types

En présence d'une courbe présentant un pic marqué (Figure 36 a) la résistance à la compression Rc est alors prise égale à la valeur correspondant au pic. La déformation associée à cette résistance est également identifiée. Dans le cas d'une courbe plus monotone comme dans le cas de la Figure 36b, la résistance en compression est associée à la limite du comportement élastique, en accord avec les travaux de (**Elfordy et al 2008), (Umurigirwa, 2005) et (Mounanga et al 2009**). Le comportement d'un matériau est élastique lorsque l'histoire des sollicitations n'intervient pas sur la réponse et qu'à un état de contraintes correspond un unique état de déformations. La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible. C'est la manifestation du comportement plastique et potentiellement compactant du matériau constitutif (Figure 37).

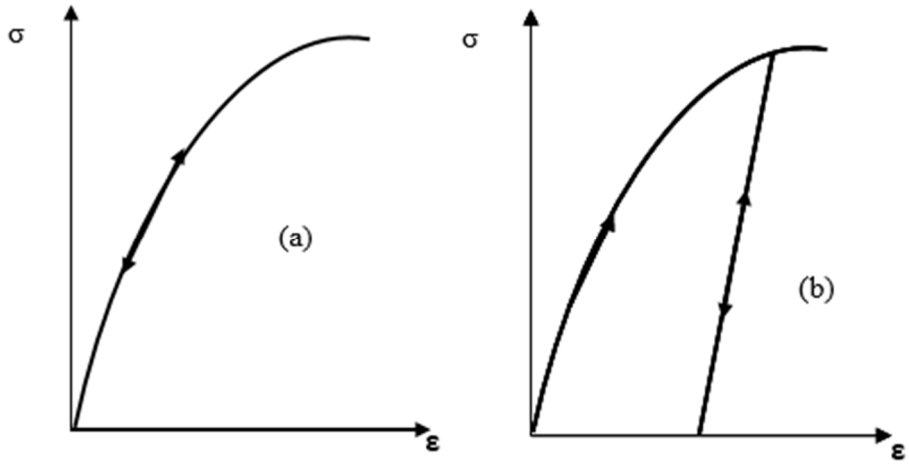


Figure 37: Courbes déformation-contrainte représentatives des comportements (a) élastique non-linéaire et (b) élastoplastique

La résistance en compression est donc identifiée sur les courbes en recherchant le point de plus grande variation de pente. La déformation associée est également notée.

En début d'essai, les courbes peuvent présenter des montées en résistance relativement lentes conduisant à une courbure positive des courbes. De tels enregistrements s'avèrent très pénalisants vis-à-vis de l'évaluation de la déformation au point de résistance en compression. L'exploitation de ce paramètre très variable d'un essai à l'autre sera donc compliquée. L'origine de ce phénomène est essentiellement liée à un contact imparfait entre l'échantillon et les plateaux de la presse en début d'essai.

Les courbes déformation-contrainte permettent également d'évaluer un module élastique apparent lors de la phase de mise en charge initiale. Ce module apparent sera assimilé à un module d'Young. Il est estimé à partir de la pente moyenne de la courbe identifiée dans le domaine élastique.

En fin d'essai, le déchargement de l'échantillon permet également d'identifier un module de retour élastique. La comparaison de ce module avec le module d'Young peut permettre de juger des effets d'endommagement ou de compaction de la matrice durant l'essai de compression.

Les échantillons utilisés sont prélevés par découpe dans les plaques initiales en s'assurant d'avoir des surfaces planes et lisses (Figure 38) et garantir ainsi l'application d'une sollicitation axiale homogène sur l'ensemble de la surface. Pour chaque formulation quatre composites de dimension 4×4×4 cm^3 sont utilisés. L'essai est réalisé après stabilisation à 23°C, 50%HR en chambre climatique.

Figure 38: Echantillons préparés pour essai mécanique (exemple de GP-P(0,6))

V.4.2 Résistance en traction

L'essai de flexion 3 points détermine l'aptitude à la déformation d'un échantillon placé sur deux appuis avec une application de l'effort à l'aide d'un indenteur placé à mi-distance. Les essais sont réalisés à l'aide d'une presse universelle Instron 5988 (Figure 30). Effort et déplacement de l'indenteur sont enregistrés régulièrement à une fréquence de 10 Hz. La vitesse de déplacement est imposée à 5mm/min.

La courbe d'évolution de l'effort en fonction du déplacement est identifiée pour chaque essai (Figure 39). Cette courbe présente un pic plus ou moins marqué. La partie post-pic est potentiellement très marquée.

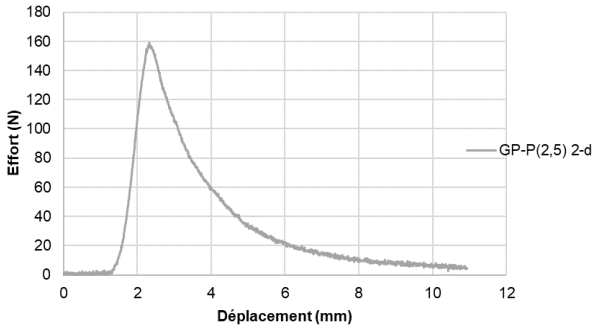


Figure 39: Courbe type d'un essai de traction par flexion 3 points

La résistance en traction Rt est calculée à partir de l'effort au pic en utilisant l'équation suivante :

$$Rt = 3/2.F.L/(l.b^2)$$

Où : F (N): effort au pic, L (mm): distance entre les appuis, l (mm): largeur de l'échantillon, b (mm): hauteur de l'échantillon.

La pente initiale de la courbe peut permettre l'évaluation d'un module élastique. Cependant, en présence de matériaux peu denses, les écrasements sur les appuis ne permettent pas de réellement assimiler la pente de la courbe à un réel module élastique. L'équipement utilisé ne permettant pas de corriger ces éventuels tassements aux appuis, ce module n'est donc pas exploité.

La partie post-pic est représentative de l'énergie nécessaire à la rupture en deux morceaux de l'éprouvette. L'intégrale de la courbe déplacement-effort est alors directement liée à une énergie de rupture. L'exploitation de ce paramètre restera comparative et le calcul rigoureux de ce paramètre n'est pas réalisé car l'essai est parfois arrêté (limite de course de moins 20 mm) alors que l'effort n'est pas encore revenu à zéro. L'énergie de rupture serait alors sous-estimée. Par ailleurs, le déplacement ne prend pas en compte le tassement sur appui

des échantillons. Il est donc illusoire d'estimer correctement l'énergie de rupture, il a été choisi de ne pas recaler l'origine des déplacements de façon à retraduire la variation des épaisseurs des échantillons cassés. L'origine choisie correspond à la position initiale de la traverse.

Les échantillons utilisés sont également prélevés par découpe dans les plaques initiales: un échantillon de $14\times4\times4$ cm^3 et deux échantillons $14\times4\times2$ cm^{3}pour chaque formulation.

V.4.3 Méthode acoustique

L'appareil utilisé pour évaluer la vitesse d'ondes acoustiques longitudinales est le pundit (Figure 40). Il permet de mesurer le temps de parcours d'une onde d'un point émetteur à un point récepteur.

Figure 40: Pundit

Pour réaliser cette mesure, il faut que les côtés des composites sur lesquels doivent être mis les transducteurs soient plans. L'échantillon est comprimé manuellement dans le sens de la longueur (L) entre les deux transducteurs permettant le passage de l'onde acoustique à travers le matériau. L'appareil fournit le temps de propagation t de cette onde. A partir de cette donnée, la vitesse de propagation ou la célérité (c) est déterminée par la formule :

$$c(m/s) = \frac{L}{t}$$

En première approximation, faute de mesurer le coefficient de poisson du matériau, le module acoustique (E) est déterminé par la relation :$E\ (MPa) = \rho.c^2$

Figure 41: Echantillons utilisés pour les mesures acoustiques (ex. composites OC et GP)

V.5 Résistance au feu

Le risque d'incendie est pour la plupart des bâtiments le risque majeur de dégradation pouvant conduire rapidement à la ruine. Il convient de distinguer la réaction au feu des matériaux utilisés (initiation du feu et propagation) de la résistance au feu d'un système ou d'un bâtiment. La réaction au feu des composites développés est abordée dans ces travaux.

La réaction au feu d'un matériau exprime sa capacité à s'enflammer, à contribuer au démarrage et à la propagation d'un incendie. Divers paramètres tels que la nature des matières utilisées pour la fabrication des matériaux de construction, la porosité, la perméabilité, peuvent conditionner l'inflammabilité. Des essais normalisés sont mis en place afin de déterminer la réaction au feu des matériaux de construction.

V.5.1 Principe des essais

Ces essais consistent à soumettre ces produits à des sollicitations thermiques qui vont de l'exposition à une flamme ou une source de chaleur jusqu'à l'immersion complète dans une cellule régulée en température. Sur le plan normatif, des normes de classement sont proposées sur la base des performances mesurées lors de ces essais. En Europe, la norme **EN 13501-1, 2007** permet de classer les matériaux selon différentes classes de réaction au feu : A1, A2, B, C, D, E, et F (de non combustible à très inflammable).

Face à des matériaux inflammables tels que les matériaux bio-sourcés, un classement E et F est courant. Les tests les plus courants pour ces classements sont des tests à la flamme ou l'épi-radiateur (source chauffante radiante). Nous avons retenu un test à la petite flamme dans le cadre de cette étude.

V.5.2 Essai à la petite flamme basé sur la norme NBN EN ISO 11925-2

Le principe de l'essai consiste à soumettre l'échantillon placé verticalement à une petite flamme (0,8 kW) émise par un brûleur à gaz et inclinée à 45 pendant 15 ou 30 secondes. Au cours de l'essai il convient de :

- vérifier s'il y a inflammation ou non.

- évaluer si la flamme dépasse un repère de 150 mm au-dessus du point d'application de la flamme, et en combien de secondes;

- constater la présence de gouttelettes/particules enflammées à l'aide du papier filtrant placé dans un réceptacle placé sous l'échantillon;

- observer le comportement physique de l'éprouvette durant l'essai.

V.5.3 Critères de classement (hors revêtements de sols): Référence NF EN ISO 11925-2

Classe E :

Avec un temps d'exposition de 15 secondes, il ne doit y avoir aucune propagation de flamme au-delà du repère situé à 150 mm au-dessus du point d'application de la flamme d'essai dans les 20 secondes après l'arrêt de la flamme. Remarque : si le produit ne satisfait pas ce critère, il obtient la classe F.

Classe D ou supérieure :

Avec un temps d'exposition de 30 secondes, il ne doit y avoir aucune propagation de flamme au-delà du repère situé à 150 mm au-dessus du point d'application de la flamme d'essai dans les 60 secondes après l'arrêt de la flamme. Si cet essai est validé, il sera alors possible de réaliser les essais permettant d'obtenir une classe supérieure.

V.5.4 Test mis en œuvre

L'objectif est de réaliser un test dont le protocole est proche de l'essai normalisé à la petite flamme **(NBN EN ISO 11925-2)**. Cet essai a pour but d'évaluer l'inflammabilité d'un échantillon disposé verticalement et soumis à une petite flamme (la puissance conventionnelle est de 0,8 kW) attaquant le bord et/ou la surface du matériau sous un angle de 45°C. Le montage est présenté sur la Figure 42. Un bruleur à gaz propane est utilisé pour l'essai. La source d'ignition est disposée sur une plateforme mobile, de façon à permettre une application et un retrait aisée de la flamme sur l'éprouvette. Un petit réceptacle contenant deux couches de papier filtrant est placé sous le produit à tester, afin de récolter les éventuels gouttelettes et/ou débris enflammés et de déterminer s'il ya risque d'inflammation du papier filtrant (ce qui permet de juger du risque de propagation du feu).

Dans notre cas, la puissance du brûleur est de 2,5 kW. Le test est donc plus sévère que le test normalisé de petite flamme. Le protocole est maintenu :

- La flamme est appliquée sur l'échantillon durant 30 secondes

-Pendant et après l'attaque de la flamme, on contrôle si la zone de combustion atteint le repère situé 150 mm au-dessus de la flamme durant les 60 secondes suivant l'arrêt de l'exposition à la flamme.

-La durée de persistance de la flamme après le retrait du brûleur est mesurée. Elle permet de juger de l'existence d'un phénomène de feu couvant.

-Les phénomènes observés sont enregistrés.

-La présence de gouttelettes/ particules enflammées est évaluée à l'aide du papier filtrant placé dans le réceptacle.

Des thermocouples sont placés sur la face non exposée au droit de la flamme.

A l'extinction de la flamme, des thermographes sont réalisés à l'aide d'une caméra infra-rouge afin d'identifier les zones présentant les plus forts gradients de température sur la face arrière non exposée des échantillons.

Dans notre étude, trois éprouvettes de dimension 26×22×1,5 cm^3d'un même composites sont testées. Les composites fibres de bois, ouate de cellulose et granules de papier, tous liés à l'amidon, sont testés.

Figure 42: Dispositif pour l'essai au feu

CHAPITRE VI
Matières premières et élaboration des composites

La confection d'un matériau nécessite des matières premières et une étude de faisabilité aboutissant à une méthodologie d'élaboration bien définie. Dans ce chapitre, nous présenterons les matières premières utilisées ainsi que les caractéristiques physiques de chacune d'elle. Nous présenterons également la méthode d'élaboration des composites ainsi que les formulations utilisées.

Les matières premières utilisées pour ce travail sont des produits industriels à l'exception des granules de papier qui sont produits spécifiquement et de l'amidon de manioc qui est récupéré de la production d'attiéké (plat traditionnel de Côte d'Ivoire).

VI.1 Matières premières

VI.1.1 Charges

VI.1.1.1 Fibre de bois (FB)

Les fibres de bois (FB) sont issues de panneaux industriels vendus par Steico en France. Elles servent généralement comme isolation thermique. Ces fibres sont ignifugées avec du phosphate d'ammonium. Ces panneaux sont cardés avant utilisation (Figure 43).

Figure 43:Fibre de bois (FB) ; gauche) forme de panneaux ; droite) cardée

L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de ces fibres de bois montre des fibres creuses de 20 à 50 µm (Figure 44).

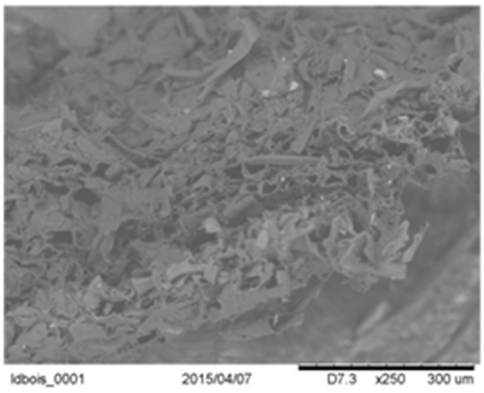


Figure 44: Fibre de bois vue au MEB

VI.1.1.2 Ouate de cellulose (OC)

La ouate de cellulose (OC) est un isolant thermique et acoustique de la gamme Univercell produite par Soprema en France (Figure 45). C'est un produit industriel issu du recyclage des journaux. La ouate de cellulose est traitée avec du sel de bore pour la rendre ignifuge et résistante aux rongeurs et aux moisissures. La ouate de cellulose se présente sous forme de fibres aplaties et de très fine épaisseur compactée dans son emballage, elle dégage beaucoup de poussière de papier lors de son utilisation. Elle est émiettée avant utilisation.

Figure 45: Ouate de cellulose (OC) ; gauche) compacte ; droite) émiettée

Lorsque la ouate de cellulose (OC) est observée au MEB, elle présente un enchevêtrement lâche de fibres de15 à 45 µm (Figure 46).

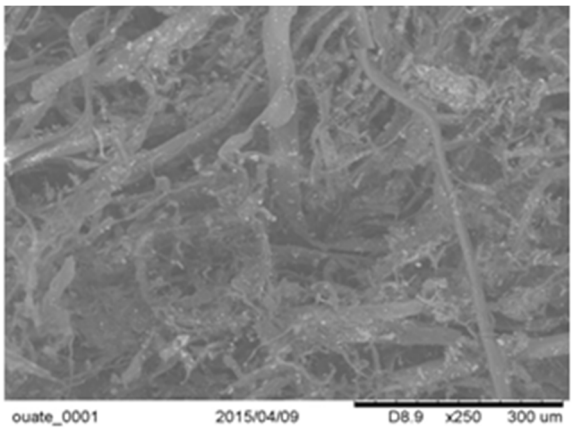


Figure 46:Ouate de cellulose (OC) vue au MEB

VI.1.1.3 Granules de papier (GP)

Les granules de papier (GP) sont développés afin de proposer une valorisation des déchets de papier dans le bâtiment. Différentes étapes sont mises en place pour transformer le papier (Figure 47). Le papier est d'abord déchiqueté en lanières puis recouvert d'eau pendant quelques heures afin d'être bien trempé. Le fait de déchiqueter le papier, facilite et réduit le temps d'immersion. Le papier et l'eau d'immersion sont ensuite réduits en pâte avec un mixeur. Enfin, la pâte est essorée avec une presse puis émiettée sur un tamis posé sur un disque rotatif pour obtenir des granules. Les granules de papier obtenus sont séchés à l'étuve à 40°C.

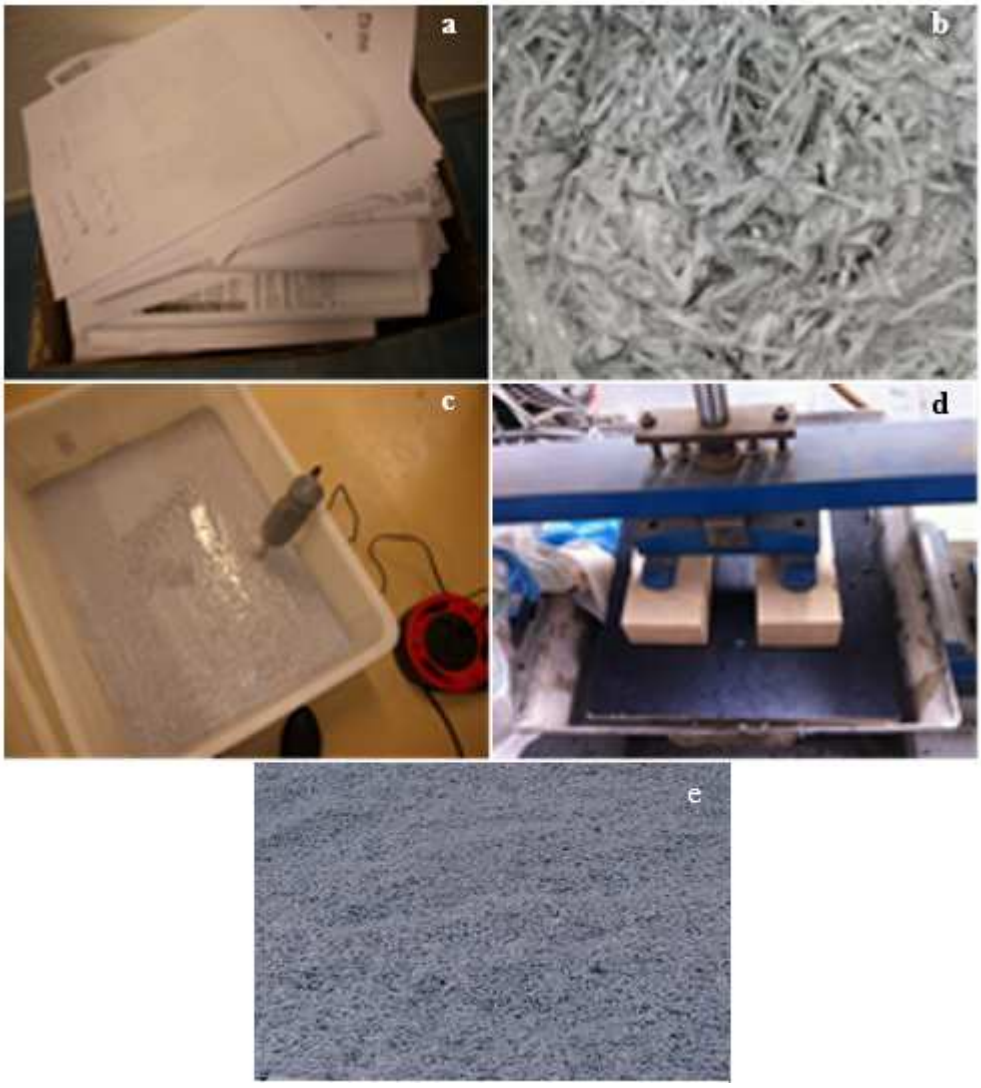


Figure 47: Différentes étapes de transformation du papier : a) déchet de papier;b) lamelle de papier trempé dans de l'eau ; c)papier malaxé et réduit en pâte ; d) pâte de papier pressé ; e) granules de papier

Ces granules de papier (GP), vus au MEB, présentent un enchevêtrement compact de fibres de 15 µm de large (Figure 48).

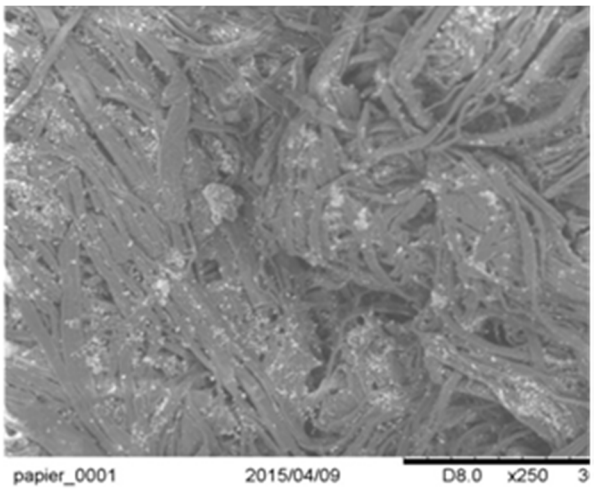


Figure 48: Granules de papier (GP) vu au MEB

VI.1.2 Liants

Deux types de liants sont utilisés pour la fabrication des composites. Un liant minéral (le plâtre) et un liant végétal (l'amidon de pomme de terre et de manioc).

VI.1.2.1 Plâtre (P)

Le plâtre utilisé pour ces travaux est le sulfate de calcium hémihydrate Molda 3 Normal, de St Gobain-France.

La production de la pâte est réalisée en malaxant le plâtre à l'aide d'un malaxeur et en y ajoutant l'eau progressivement (Figure 49). Afin d'optimiser la formulation du liant pour une meilleure maniabilité, l'effet du taux de gâchage est étudié pour des rapports E/P allant de 0,4 à 1,1.

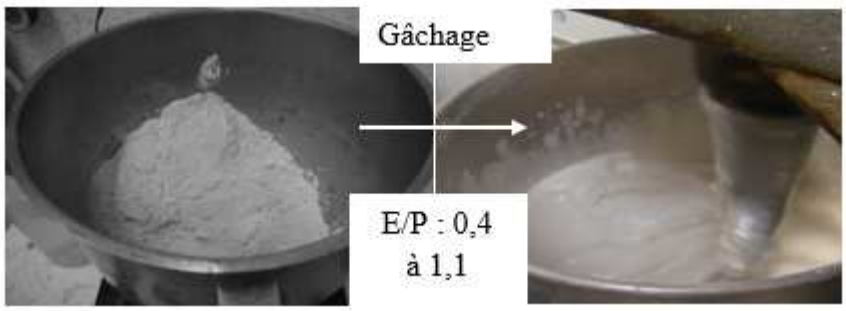


Figure 49: Gâchage du plâtre

Des échantillons de plâtre sont confectionnés dans des moules en caoutchouc de volume (4×4×16)× pour caractériser les différentes pâtes. 24 échantillons de plâtre sont réalisés et démoulés le lendemain (Figure 50).

Figure 50: Echantillon de plâtre élaboré dans un moule de dimension 4*4*16 cm^3

Les rapports massique E/P de 0,4 et 0,5 présentent un malaxage difficile. Pour l'élaboration des composites les rapports E/P retenus sont supérieurs ou égaux à 0,6.

VI.1.2.2 Amidon (A)

VI.1.2.2.1 Amidon de pomme de terre (A)

L'amidon de pomme de terre utilisé dans cette étude est un produit industriel fourni par la société Roquette –France.

Pour obtenir l'empois d'amidon, une partie de l'eau, équivalant à la masse de l'amidon, est chauffée à 50°C puis ajoutée à la poudre d'amidon en malaxant afin d'obtenir un lait d'amidon. L'eau restante est chauffée à environ 90°C puis ajoutée au lait en augmentant la vitesse du malaxage afin de gélatiniser l'amidon. Pendant le malaxage, le malaxeur est arrêté quelques minutes pour racler les contours et le fond du bol afin d'avoir un gel homogène (Figure 51). Les rapports massiques eau /amidon (E/A) varient de 3 à 4 par pas de 0,25.

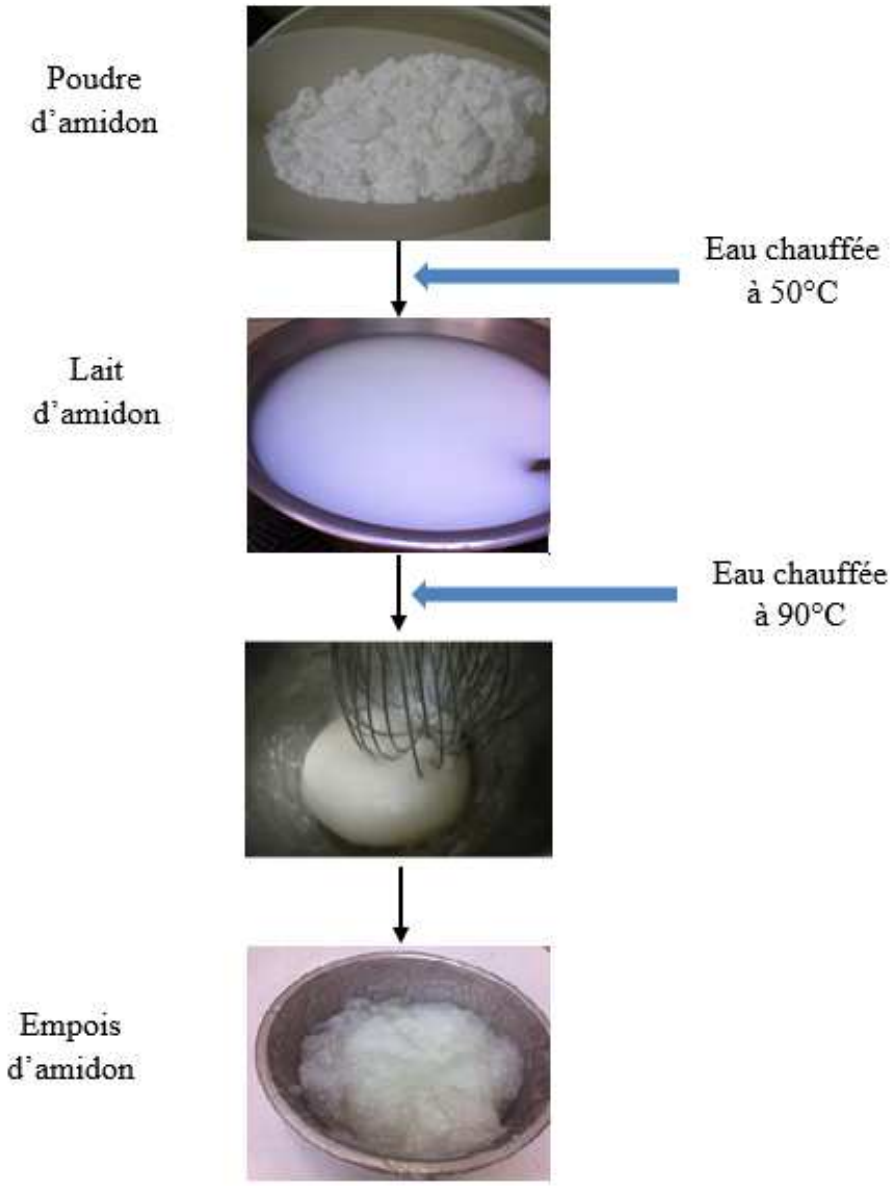


Figure 51: Préparation de l'empois d'amidon de pomme de terre(A)

VI.1.2.2.2 Amidon de manioc (Am)

L'amidon de manioc (Am), est une ressource peu chère et disponible en Côte d'Ivoire. Cet amidon est extrait de manière traditionnelle lors de la préparation du couscous de manioc appelé « attiéké ».

La technique utilisée pour la préparation de l'empois d'amidon de pomme de terre n'a pas permis de produire l'empois d'amidon de manioc. Ainsi, l'énergie apportée par l'eau chaude n'a pas suffi et il a été nécessaire de poursuivre la cuisson sur une plaque chauffante. Les rapports massiques eau /amidon utilisés pour l'élaboration des composites (E/A) varient de 3 à 4 par pas de 0,5.

Cette différence de préparation entre les deux amidons peut être due à la différence de la taille des grains (5-100µm) et (4-35µm) respectivement pour l'amidon de pomme de terre et le manioc. Le pouvoir de gonflement des grains à 95°C est plus élevé pour la pomme de terre (1150) que le manioc (71) **(Nayouf, 2003).**

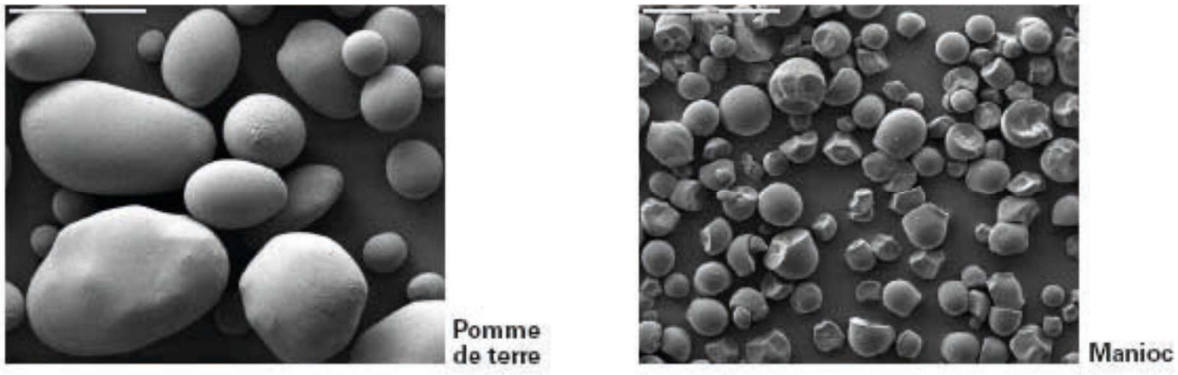


Figure 52: Formes et tailles des granules d'amidon de pomme de terre et de manioc,(MEB grossissement × 280) d'après Atkin, Cheng,Abeysekera et Robards (1999).

VI.2 Elaboration des Composites

VI.2.1 Production des composites au plâtre

Pour l'élaboration des composites, le liant est d'abord préparé. La quantité de poudre de plâtre nécessaire est placée dans le malaxeur. Le mélange du plâtre se fait pendant environ 2 à 3 min avant d'ajouter de l'eau. Ensuite, l'eau est introduite de manière progressive. On laisse le mélange malaxer environ 3 minutes puis on ajoute progressivement les charges à la pâte. L'ensemble est malaxé pendant 5 minutes pour homogénéiser la pâte et limiter le volume d'air occlus. Au cours du malaxage, le bol est raclé afin de remettre dans le mélange les charges accumulées sur le bord du bol. Suite à l'étude du taux de gâchage des pâtes de plâtre, les rapports massiques Eau/Plâtre considérés sont 0,6 ; 1 ; 2 ; 2,5. La quantité de charge est ajustée en fonction de la consistance du mélange. Le rapport Charge/Liant varie ainsi de 0,07 à 1,41.

Les échantillons sont produits par moulage dans des moules de 28×23×7 cm^3. Ils sont ensuite compactés sous une pression de 0,03 MPa à l'aide d'une presse manuelle de façon à s'assurer d'une bonne mise en forme. Cette pression correspond aux pressions rencontrées pour les presses à brique manuelles en Afrique. Pour les mélanges les plus fluides (E/P = 2 à 2,5), une légère fuite du liant plâtre est observée lors du compactage. La Figure 53ci-dessous présente les différentes étapes de l'élaboration des composites.

Figure 53: Différentes étapes d'élaboration des composites avec le plâtre (malaxage de la pâte de plâtre, introduction des charges, malaxage de la pâte, compactage du composite)

Tous les composites liés au plâtre ne sont pas démoulés immédiatement, ils sont laissés quelques heures pour durcir avant d'être démoulés. Ces composites sont dans un premier temps stabilisés à l'air ambiant du laboratoire (Figure 54).

Figure 54: Composites liés au plâtre stabilisé à température ambiante du laboratoire

VI.2.2 Production des composites à l'amidon

VI.2.2.1 Composites à l'amidon de pomme de terre

Pour l'élaboration des composites, l'empois d'amidon de pomme de terre est d'abord préparé avec des rapports massiques eau /amidon (E/A) compris entre 3 et 4. L'empois est malaxé pendant quelques minutes puis la charge est ensuite ajoutée. L'ensemble empois et charge est malaxé avec des arrêts pour ramener dans le bol les fuyants afin d'avoir un mélange homogène. Un rapport Charge /Amidon de 1,5 est utilisé pour l'ensemble des charges. Seuls les granules de papier permettent une quantité de charge plus élevée, tout en gardant une bonne maniabilité. Ainsi, un rapport GP/A de 4,17 est également considéré.

Figure 55: Différentes étapes d'élaboration des composites avec l'amidon (préparation de l'empois, ajout des charges, malaxage de la pâte, compactage du composite)

VI.2.2.2 Composites à l'amidon de Manioc

Seuls les granules de papier sont utilisés pour produire des composites à l'amidon de manioc. Ceux-ci sont élaborés selon le même procédé que celui utilisé pour les composites à l'amidon de pomme de terre. Les rapports E/A considérés sont égaux à 3 ; 3,5 ; 4 et le rapport GP/A est égal à 4,17.

CHAPITRE VII

Synthèse des méthodes et matériaux

La caractérisation des charges et des composites porte sur leurs propriétés physiques (masse volumique apparente et porosité), hydrique (MBV), thermique (conductivité thermique), mécanique (compression, traction par flexion, acoustique) et résistance au feu.

La Figure 56présente le schéma bilan de l'élaboration des composites.

Différents types de composites sont réalisés, avec deux types de liants (plâtre et amidon de pomme de terre ou de manioc) et trois types de charges (fibre de bois, ouate de cellulose, granules de papier). Les formulations varient également par leur dosage en eau. De plus, pour les granules de papier, deux dosages en charge sont considérés.

Après fabrication, les composites sont stabilisés à 23°C, 50%HR avant mesure de la masse volumique puis campagne d'essais. La partie III présente les résultats de la caractérisation des composites.

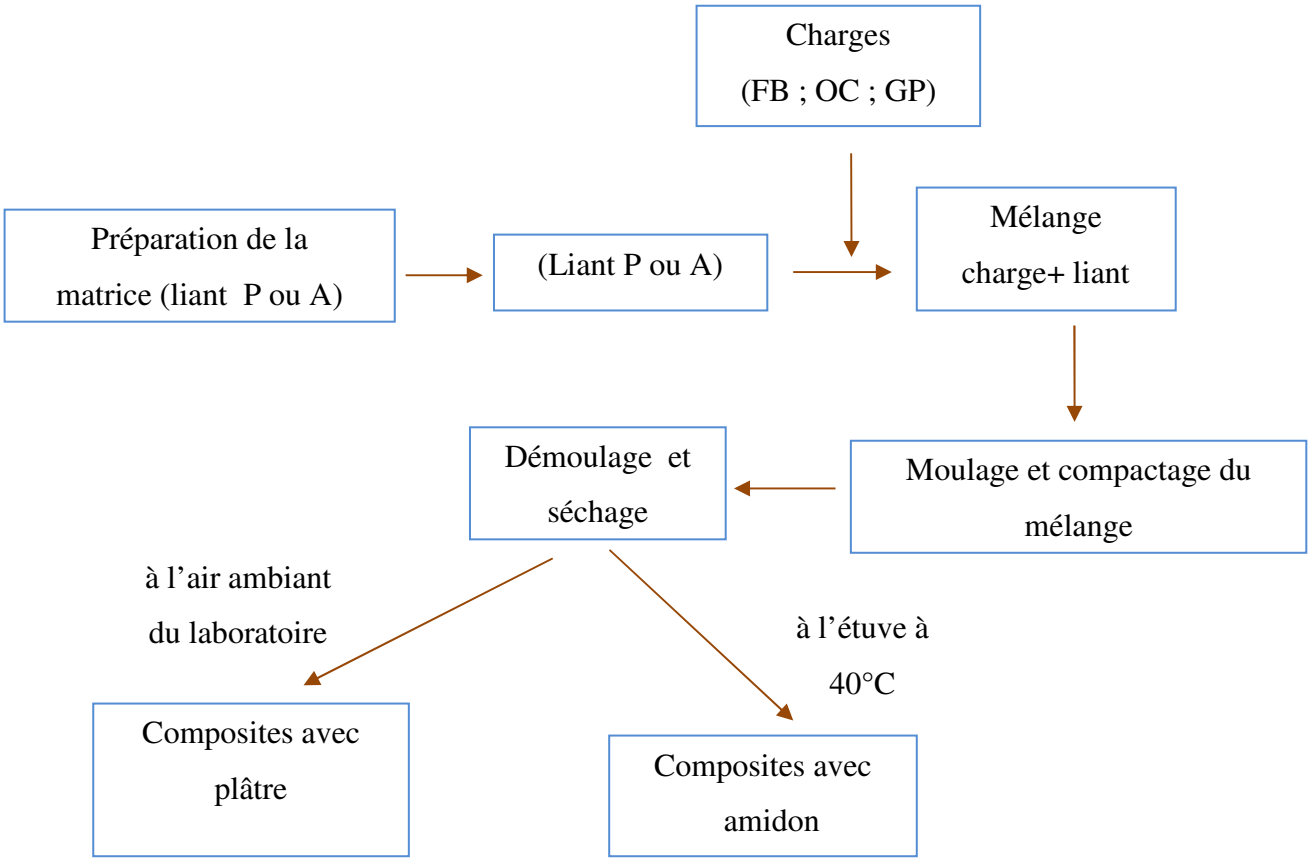


Figure 56: Schéma des étapes d'élaboration des composites

PARTIE 3
RESULTATS ET DISCUSSION

Cette partie présente les résultats obtenus dans cette étude. Elle est composée de six chapitres. Le premier (chapitre VI) porte sur l'ensemble des caractéristiques des matières premières (charges puis liants) : masse volumique apparente, réelle, porosité, MBV, conductivité thermique.

Les cinq chapitres suivants concernent les composites.

Le chapitre VII concerne les propriétés physiques. Il détaille l'aspect des échantillons ce qui permet d'évaluer la faisabilité de tels composites, leur condition de séchage et la gamme de masse volumique apparente accessible.

Le chapitre VIII présente la performance hygrique des composites établie à partir des mesures MBV. L'effet de l'épaisseur de l'échantillon est également considéré afin d'identifier une valeur représentative du matériau (épaisseur estimée supérieure à la profondeur de pénétration) et une valeur représentative du produit en usage.

Le chapitre IX s'intéresse à la conductivité thermique. Les effets de l'humidité d'une part et de la température au point sec d'autre part sont étudiés.

Le chapitre X, consacré aux propriétés mécaniques, porte sur les résistances en compression, en traction par flexion trois points et sur le module acoustique.

Enfin, le chapitre XI présente les résultats des essais réalisés vis-à-vis du comportement au feu.

CHAPITRE VIII
Propriétés des matières premières

VIII.1 Propriétés des charges

VIII.1.1 Masses volumiques apparente et réelle, porosité totale

Préalablement à la mesure de la masse volumique apparente, les charges sont stabilisées à (23°C, 50%HR). Le Tableau IX ci-dessous présente les valeurs obtenues de la masse volumique apparente, réelle et la porosité totale des charges. La masse volumique apparente est mesurée par la méthode Rilem pour les charges en vrac (OC et GP) et par mesure sur un morceau de panneau pour les fibres de bois. La méthode Rilem est bien adaptée à la mesure de la masse volumique apparente des granules de papier. Par contre, la mesure sur la ouate de cellulose nécessite plus de précautions car celle-ci est très sensible au tassement et à l'électricité statique.

Les granules de papier ont une masse volumique apparente (104,9 kg/m^3) plus élevée que les fibres de bois et la ouate de cellulose qui ont des valeurs proches (44,5 kg/m^3 et 35,8 kg/m^3).Les valeurs obtenues sont en accord avec celles données par les fabricants qui sont pour la fibre de bois (autour de 50 kg/m^3) et pour la ouate de cellulose (entre 28 et 35 kg/m^3).

Les masses volumiques absolues sont également plus élevées pour les granules de papier (1688 kg/m^3) que pour la ouate de cellulose et la fibre de bois (1481 et 1458 kg/m^3). Cela se traduit par une porosité totale moindre pour les granules de papier (93,8 %) que pour les autres charges (autour de 97 %). Cette porosité totale ouverte inclut la porosité interparticulaire et la porosité intraparticulaire ouverte. Ainsi, les granules de papier semblent présenter à la fois un empilement plus compact des particules que les autres charges (et donc une porosité interparticulaire plus faible) et un enchevêtrement plus compact des fibres, comme montré sur les visualisations MEB (Figure 48), conduisant à une porosité intraparticulaire plus faible.

Tableau X: Masses volumiques apparentes et réelles et porosité totale des charges

	Fibre de bois	**Ouate de cellulose**	**Granules de papier**
Masse volumique apparente (kg/m^3)	44,5	35,8	104,9
Masse volumique réelle (kg/m^3)	1458	1481	1688
Porosité totale ouverte (%)	96,9%	97,6%	93,8%

Les masses volumiques réelles et les porosités déterminées expérimentalement sont très proches de celles données dans la littérature. (**Glé P, 2014)** a obtenu pour les squelettes des laines des densités comprises entre 1000 et 1550 kg/m^3 avec une porosité se situant entre 88 et 97%. (**Collet, 2004)** sur la laine de chanvre a obtenu les valeurs de 38 kg/m^3 pour la masse volumique apparente, de 1498 kg/m^3 la masse volumique réelle et 97,5 % pour la porosité. Quant à (**Mazhoud, 2017**), il a obtenu sur des chènevottes en vrac une masse volumique de 107,4 kg/m^3 avec une porosité totale de 92,2%.

Au bilan, la fibre de bois, la ouate de cellulose et les granules de papier en vrac sont des produits légers et poreux.

VIII.1.2 MBV

La valeur tampon hygrique est mesurée selon le protocole de Nordtest Project sur les échantillons stabilisés à 23°C et 50 % HR. Le Tableau XI résume les valeurs moyennes et les écarts-types de la valeur tampon hygrique calculée sur les cycles de 3 à 5 en adsorption, en désorption et en moyenne pour les différents échantillons. L'écart type est très faible entre mesures et conduit à un coefficient de variation inférieur à 2 %.Les valeurs MBV pour chaque charge en adsorption et désorption sont différentes avec des écarts faibles montrant que la stabilité est atteinte.

Tableau XI: Valeur moyenne et écart-type de la valeur MBV des charges en adsorption (ads), en désorption (des) et en moyenne

Charges	MBV ads (g/(m².%HR))	MBV des (g/(m².%HR))	MBV moyen (g/(m².%HR))
FB	1,80± 0.06	1,81± 0.06	1,81± 0.06
OC	1,32± 0.02	1,31± 0.02	1,31± 0.02
GP	2,09± 0.02	2,11± 0.02	2,10± 0.02

La ouate de cellulose présente les moins bonnes performances de régulation hygrique avec une valeur MBV de 1,31 g/ (m².%HR). Les fibres de bois ont une performance supérieure avec une valeur moyenne de MBV de 1,81 g/ (m².%HR). Les granules de papiers sont les charges les plus performantes avec une valeur MBV de 2,10 g/ (m².%HR). Ainsi selon la classification du NORDTEST project **(Rode *et al.*, 2005),** les fibre de bois et la ouate de cellulose sont classées comme de bons régulateurs hygriques (1<MBV < 2 g/(m².%HR)) et les granules de papier comme excellents régulateurs hygriques.

La Figure 57 donne la valeur MBV pour chaque type de charges en fonction de sa masse volumique apparente. La valeur MBV augmente avec la masse volumique apparente, mais pas de façon linéaire. Ainsi, la valeur MBV n'est pas uniquement due à la porosité totale des matériaux, elle dépend de la surface spécifique, de la connectivité mais également de la nature des matériaux.

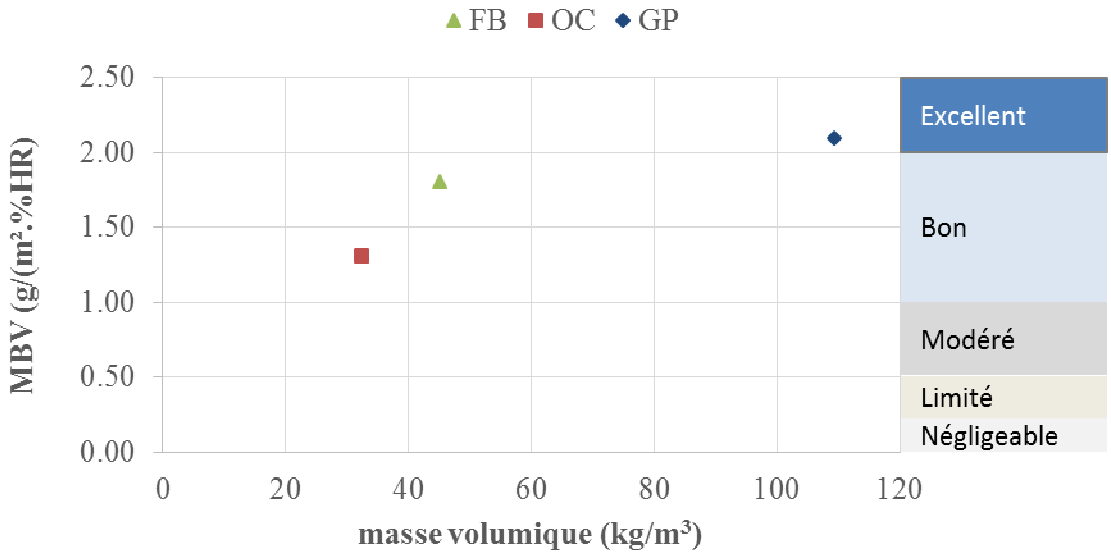


Figure 57: Variation du MBV en fonction de la masse volumique pour chaque charge

Les valeurs MBV obtenues sur les fibres de bois sont légèrement inférieures à celles données par **(Abahri *et al.* 2015).** Selon eux, l'isolant de fibre en bois est classé comme excellent régulateur, son pouvoir tampon étant supérieur à 2 g/m^2%HR.

Les valeurs de MBV obtenues pour la fibre de bois et la ouate de cellulose sont en dessous de celles obtenues par (**Mazhoud, 2017**) pour des chènevottes dont le MBV est de 2,24 g/(m².%HR) lorsqu'elles sont directement stabilisées 23°C 50%HR et de 2,05 g/(m².%HR)lorsqu'elle sont d'abord séchées à 60°C avant d'être stabilisées à 23°C 50%HR. Les granules de papier donnent une valeur moyenne de MBV dans la même gamme que ces valeurs et une valeur voisine de celle des agro ressources 2,07 et 2,29 g/(m².%HR) déterminées par (**Viel *et al.* 2017**).

VIII.1.3 Conductivité thermique

La Figure 58 présente la conductivité thermique des charges FB, OC et GP.

Les conductivités thermiques des fibres de bois et de la ouate de cellulose sont similaires, environ 0,04 W/(m.K). Les granules de papier ont une conductivité plus élevée, autour de 0,063W/(m.K). Ces résultats sont cohérents au regard des masses volumiques

apparentes de ces charges. Ces valeurs permettent de classer ces charges comme isolant thermique du bâtiment au sens de la norme AFNOR NF P75-101 (λ< 65 mW/(m.K)).

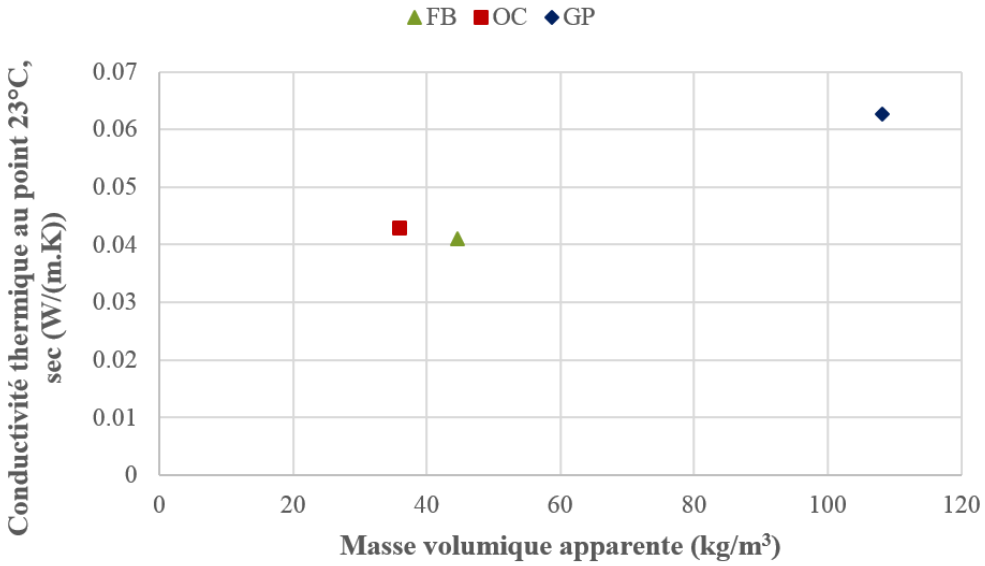


Figure 58: Evolution de la conductivité thermique des charges en fonction de la masse volumique apparente à 23°C, sec

En comparaison avec la bibliographie, (**Mazhoud, 2017**) a obtenu pour les chènevottes une conductivité de 0,056 W/(m.K) pour 100 kg/m^3. De même, (**Viel *et al.*2017**) ont obtenu sur les agro ressources des valeurs de conductivité comprises entre 0,045 et 0,093 W/(m.K) pour des masses volumiques allant de 30 à 392 kg/m^3. Ces valeurs de conductivités sont similaires à celles obtenues dans ce travail.

VIII.2 Propriétés des liants

VIII.2.1 Masse volumique des liants

VIII.2.1.1 Plâtre

La masse volumique réelle de la poudre de plâtre obtenue par pycnométrie est de 2601 kg/m^3. Les masses volumiques apparentes et la porosité des mortiers de plâtre selon le taux de gâchage E/P sont présentées dans le Tableau XII. Lorsque le taux de gâchage baisse de 1,1 à 0,4, la masse volumique apparente des mortiers de plâtre augmentent respectivement de 814 à 1467 kg/m^{3}à 23°C, 50%HR et de 812,56 à 1460,35 kg/m^{3}au point sec. Ces valeurs de masse volumique sont similaires à celles obtenues par (**Rojo, 2013**) (854 à 1476 kg/m^3) et (**Mazhoud, 2017**) (970 à 1400 kg/m^3) pour les mêmes variations de rapport E/P.

Tableau XII: Masse volumique apparente et porosité des mortiers de plâtre pour différents taux de gâchage E/P (mesures de la moyenne de trois échantillons).

Taux de gâchage E/P	$\rho_{a\ 23°C,\ 50\%HR}$ (kg/m³)	$\rho_{a\ 23°C,\ sec}$ (kg/m³)	Porosité
0,4	1467,93	1460,35	43,56
0,5	1329,7	1324,7	48,9
0,6	1184,37	1180,62	54,46
0,7	1077,7	1074,65	58,56
0,8	992,13	989,44	61,86
0,9	922,03	919,45	64,55
1	886,70	847,02	66
1,1	814	812,56	68,7

La Figure 59 présente la variation de la densité apparente des mortiers de plâtre en fonction du taux de gâchage. Elle indique qu'il existe une relation entre E/P et la masse volumique apparente. Cette relation se traduit par une équation de la forme:

$$\rho_a = 905{,}6(E/P)^2 - 2271(E/P) + 2230.$$

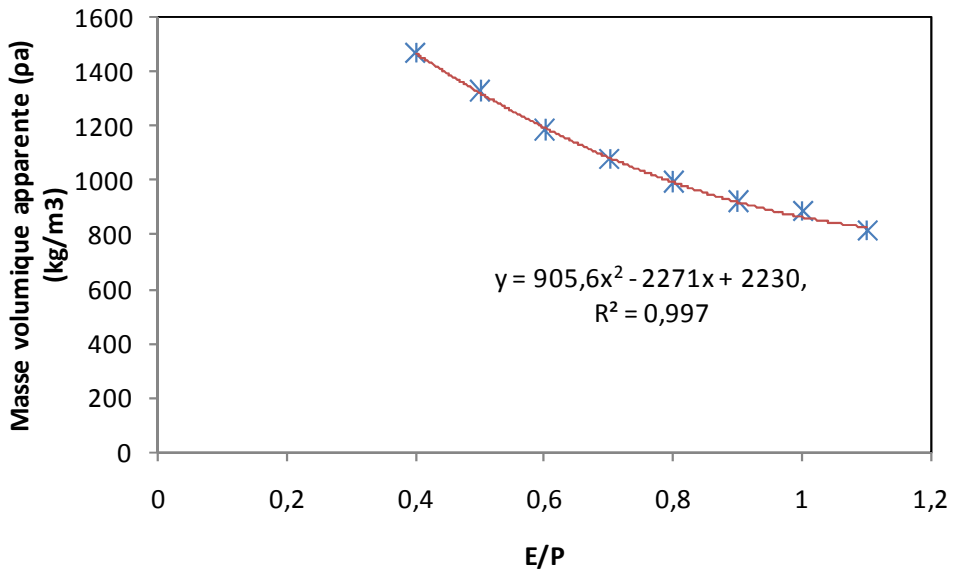


Figure 59: Evolution de la masse volumique du plâtre en fonction du gâchage (E/P)

VIII.2.1.2 Amidon

Le Tableau XIII présente la masse volumique réelle mesurée par pycnométrie sur les deux poudres d'amidon (Figure 60). Elles sont de 1512 kg/m^3 pour la pomme de terre et 1478 kg/m^{3}pour le manioc. Ces valeurs se situent dans la même gamme de masse volumique réelle (1500 kg/m^3) donnée pour les amidons en général de type fécule **(Kouamé, 2009).** Ces valeurs n'ont pas été mesurées sur l'amidon sous forme d'empois seul car les échantillons sans charges moisissent.

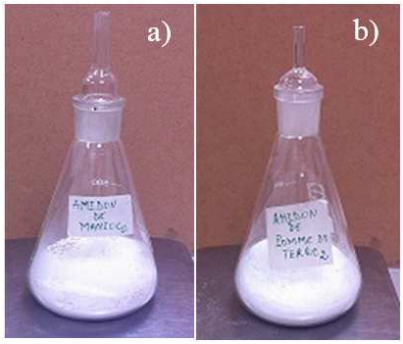


Figure 60 : Echantillons (amidon) placés dans les pycnomètres pour la mesure de la masse volumique réelle - a) amidon de manioc ;b) amidon de pomme de terre

Tableau XIII: Masse volumique réelle des amidons de pomme de terre et de manioc obtenue par la méthode du pycnométre

	Masse volumique réelle (kg/m^3)
Amidon de pomme de terre	1512
Amidon de manioc	1478

VIII.3 Synthèse des propriétés physiques des matières premières

Les propriétés physiques (masses volumiques apparentes et réelles) hygriques et thermiques des charges ont été déterminées. Les masses volumiques apparentes sont respectivement de 44,5 kg/m^3, 35,8 kg/m^{3}et 104,9 kg/m^3, pour la fibre de bois, la ouate de cellulose et les granules de papier. Leur masse volumique absolue sont dans le même ordre, 1458, 1481 et 1688 kg/m^3. De façon générale, ces charges ont une grande porosité totale qui est comprise entre 93,8 et 97,6 %. Cela fait d'elles non seulement de bon à excellents régulateurs hygriques avec une valeur MBV comprise entre 1,31 à 2,10 g/ (m².%HR) mais aussi des isolants thermiques pour bâtiment, avec une conductivité thermique se situant entre 0,04 et 0,06 W/(m.K).

Les masses volumiques réelles des liants sont de 2601 kg/m^{3}pour le plâtre, de 1512 kg/m^{3}pour l'amidon de pomme de terre et 1478 kg/m^{3}pour l'amidon de manioc.

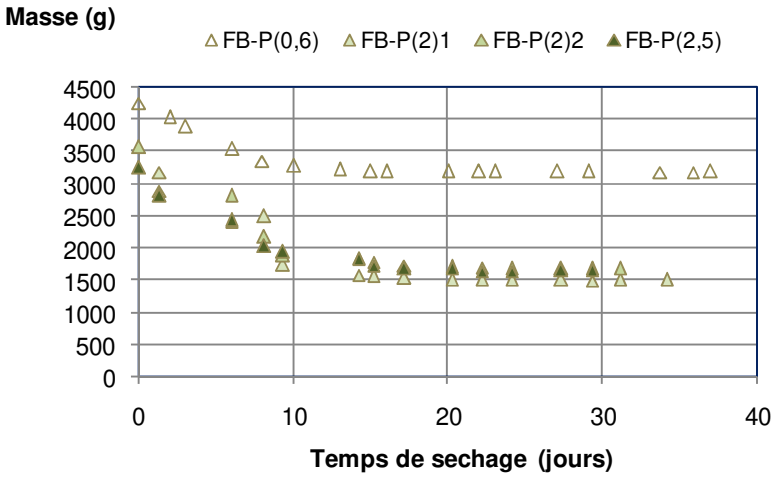
Par ailleurs, la masse volumique apparente des mortiers de plâtre augmente de 814 à 1467 kg/m^3 lorsque le taux de gâchage (E/P) diminue de 1,1 à 0,4 tandis que leur porosité croît de 43,56 à 68,7%.

CHAPITRE IX
Propriétés physiques des composites

Ce chapitre vise à déterminer les conditions de faisabilité des composites à base de charges (fibre de bois, ouate de cellulose et granule de papier) et de liant (plâtre et amidon). Il traitera de l'influence du dosage des différents constituants sur la masse volumique des composites et des conditions de séchage sur l'aspect des échantillons.

IX.1 Séchage des échantillons

Tous les composites sont produits et conditionnés au LGCGM, Rennes, France. Les composites liés au plâtre ne sont pas démoulés immédiatement, ils sont laissés quelques heures pour durcir avant d'être démoulés. Ces composites sont laissés à sécher à l'air ambiant du laboratoire. Les composites réalisés à l'amidon sont séchés à l'étuve afin d'accélérer leur séchage. En effet en cas de séchage à l'air libre, un développement de moisissure peut apparaître. La température de 40°C est choisie, elle constitue un compromis entre auto-contraintes et retrait tout en évitant une dégradation des matériaux cellulosiques.



Les

Figure 61 à Figure 63 donnent les cinétiques de séchage des composites réalisés avec le plâtre et les Figure 64 à Figure 66 celles des composites réalisés avec l'amidon.

Le suivi massique réalisé durant la stabilisation montre que la durée de séchage est comprise entre 15 et 20 jours quelle que soit la formulation et le type de charge pour le composite avec le plâtre.

La durée de séchage, en étuve, est également de 15 à 20 jours pour les composites produits avec l'amidon.

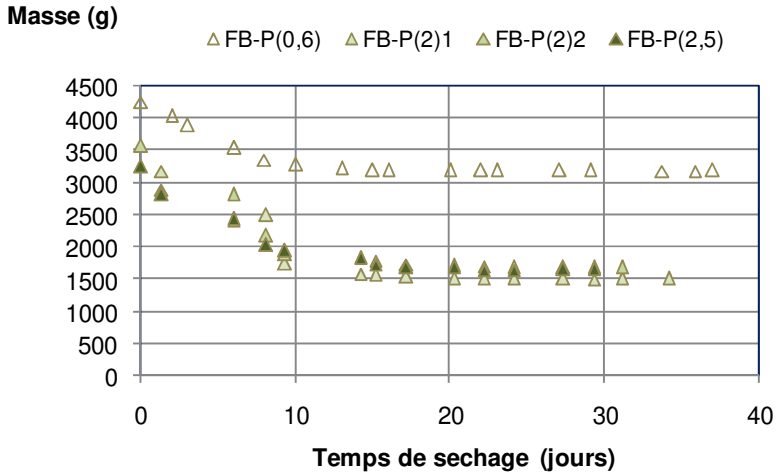


Figure 61 : Evolution de la masse des composites fibre de bois – plâtre FBP en fonction du temps de séchage pour différents dosages en eau (E/L = 0,6 ; 2 ; 2.5).

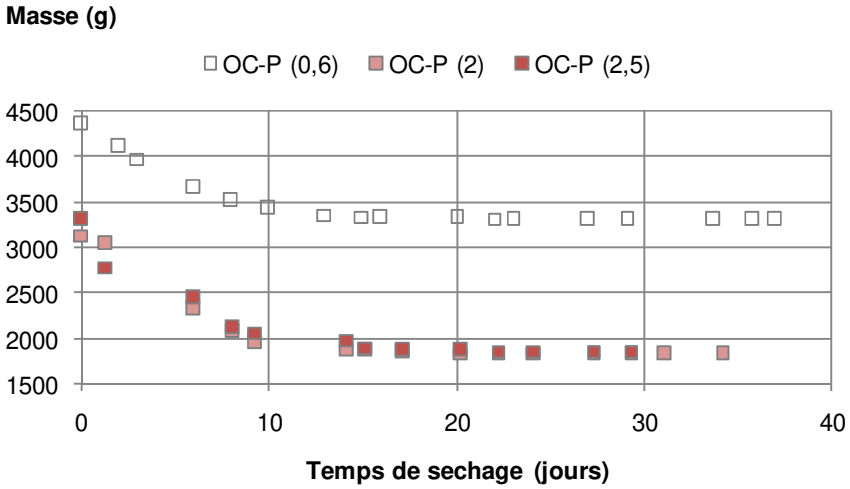


Figure 62 : Evolution de la masse des composites ouate de cellulose – plâtre OCP en fonction du temps de séchage pour différents dosages en eau (E/L = 0,6 ; 2 ; 2.5)

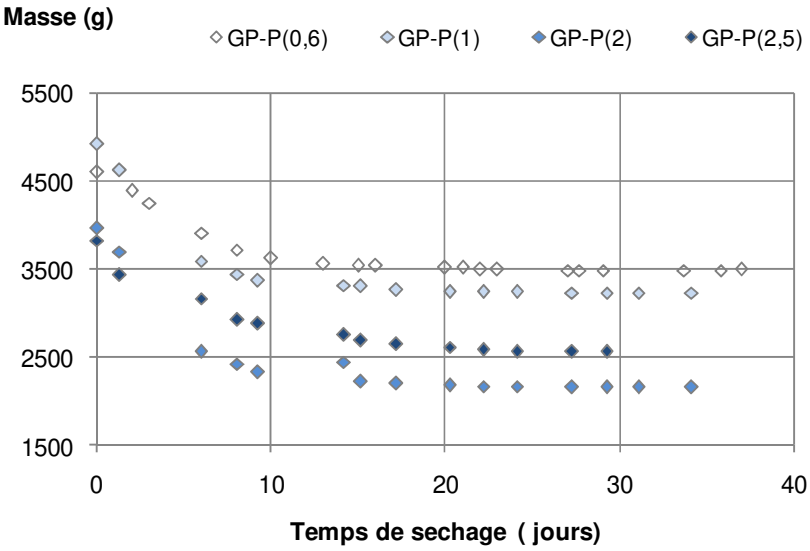


Figure 63 : Evolution de la masse des composites granules de papier – plâtre GPP en fonction du temps de séchage pour différents dosages en eau (E/L = 0,6 ; 2 ; 2.5)

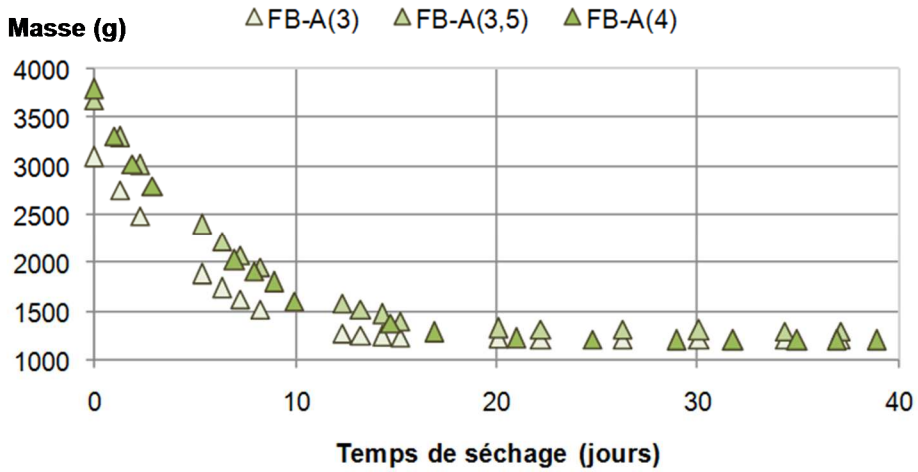


Figure 64 : Evolution de la masse des composites fibres de bois amidon FBA en fonction du temps de séchage pour différents dosages en eau (E/L = 3 ; 3,5 ; 4)

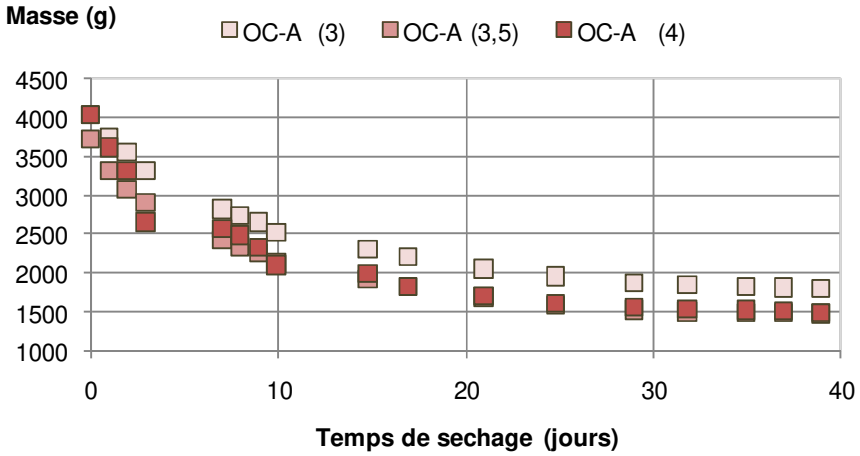


Figure 65 : Evolution de la masse des composites ouate de cellulose amidon OCA en fonction du temps de séchage pour différents dosages en eau (E/L = 3 ; 3,5 ; 4).

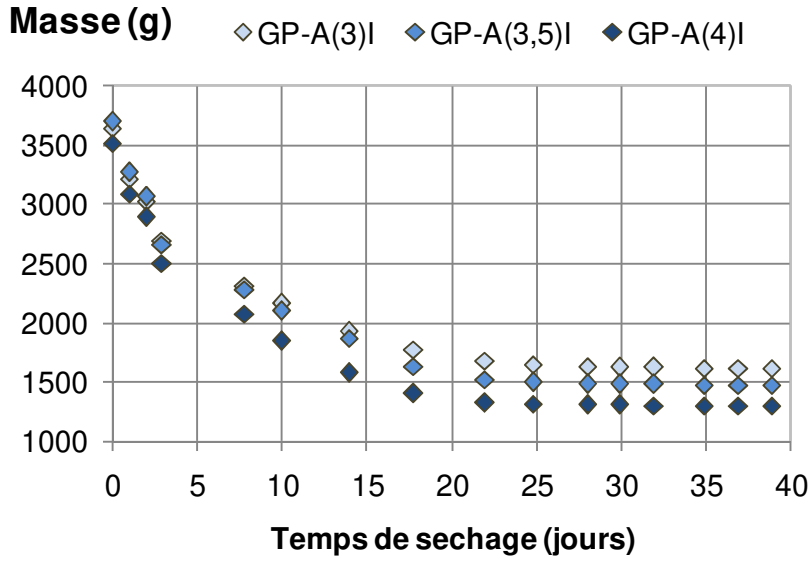


Figure 66 : Evolution de la masse des composites granules de papier amidon GPA en fonction du temps de séchage pour différents dosages en eau (E/L = 3 ; 3,5 ; 4)

IX.2 Aspect des échantillons produits

Après séchage, l'aspect des composites est observé (Figure 67, Figure 68 et Tableau XIIIV) en s'intéressant au retrait et à la répartition des charges dans la matrice liante.

Les composites produits avec le plâtre ne présentent pas de retrait visible à l'œil nu quels que soient le type de charge et le dosage en eau. Par contre, dans le cas des composites réalisés avec des fibres de bois, celles-ci ne sont pas réparties de façon homogène au sein du composite.

Figure 67: Composites élaborés au plâtre (gauche : FB-P, milieu : OC-P, droite : GP-P)

Les composites produits avec l'amidon sont plus ou moins sujets au retrait selon la nature de la charge, le dosage en charge et le dosage en eau (Figure 68, Tableau XIV).

Les échantillons produits avec de l'amidon et de la fibre de bois ne présentent pas un retrait significatif, quel que soit le dosage en eau considéré (Figure 68-ligne 1).

Les échantillons produits avec de l'amidon et de la ouate de cellulose présentent un retrait important qui se traduit à la fois par une variation d'épaisseur entre le centre et les bords des plaques produites et par la présence de cavités d'autant plus importante que le rapport E/A est élevé (Figure 68-ligne 2).

Les échantillons produits avec de l'amidon et des granules de papier présentent un léger retrait dans le cas d'un dosage en charge C/A=1,5 (Figure 68-ligne 3). Par contre, l'augmentation du taux de charge permet de réduire le retrait significativement (ligne 4)

Ainsi, la déformation des échantillons peut s'expliquer par l'importance du retrait de séchage de l'amidon qui dépend :

- du dosage en eau : plus le dosage en eau est élevé, plus le phénomène de retrait est marqué (formulations 3/3.5/4).

- de la nature des charges : les composites à la ouate de cellulose sont les plus impactés alors que ceux aux granules de papier sont les moins impactés.

- et du dosage en charge : les plus forts dosages en granules de papier (composites GP-A II) permet d'éliminer le phénomène de retrait.

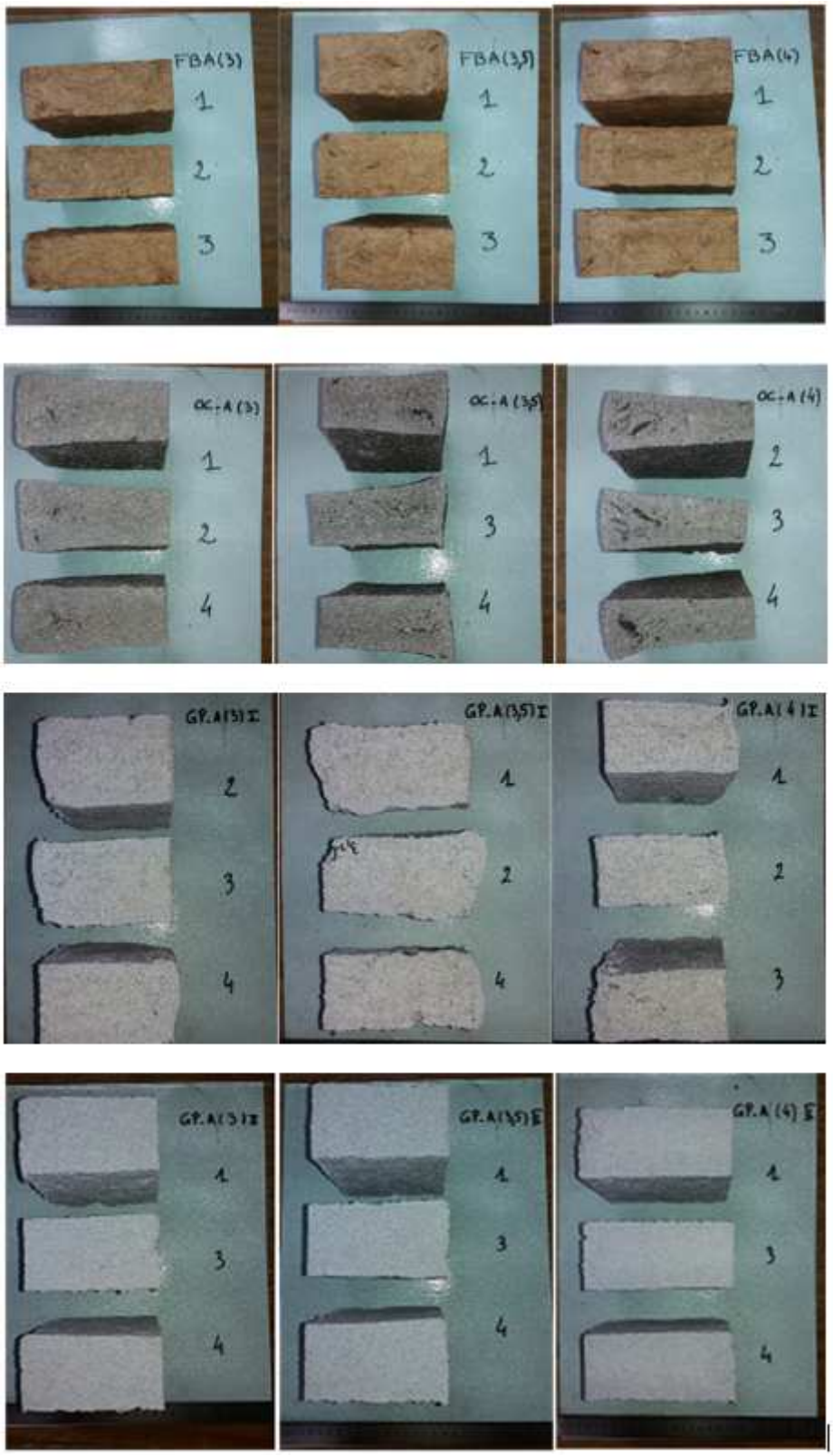


Figure 68 : Echantillons produits par découpe dans une plaque : ligne 1) FB-A, ligne 2) OC-A, lignes 3) GP-A I, ligne 4) GP-A II. Les numéros correspondent aux numéros d'échantillons

Tableau XIV: Aspect des composites observés après séchage (Figure 67 et Figure 68).

Nature du liant	Nature de la charge	Observations
Plâtre	Fibre de bois	Pas de déformation visible, répartition hétérogène des charges
	Ouate de cellulose	Pas de déformation visible
	Granule de papier I	Pas de déformation visible
Amidon	Fibre de bois	Retrait léger avec présence de petites cavités
	Ouate de cellulose	Retrait important avec présence de cavités
	Granule de papier I	Retrait léger
	Granule de papier II	Pas de retrait visible à l'œil nu

IX.3 Masse volumique apparente des composites

IX.3.1 Masse volumique apparente des composites à base de plâtre

Juste après la stabilisation à température ambiante du laboratoire pour les composites au plâtre et à 40°C pour les composites à l'amidon, les dimensions sont mesurées. Les masses volumiques déterminées sont présentées sur des triangles de formulation (Figure 69).

La masse volumique des composites fibres de bois-plâtre est comprise entre 388 kg/m^3 et 1028 kg/m^3. Celle des composites ouates de cellulose-plâtre est comprise entre 573 et 1164 kg/m^3 et celle des composites granules de papier-plâtre entre 595 et 1155 kg/m^3.

La masse volumique diminue quand les dosages en eau et en charge augmentent. Pour les mêmes rapports, les masses volumiques des composites aux granules de papier et à la ouate de cellulose sont similaires alors que celles des composites à base de fibres de bois sont inférieures. Cela pourrait être lié à une plus grande quantité d'air emprisonnée entre les fibres lors du malaxage.

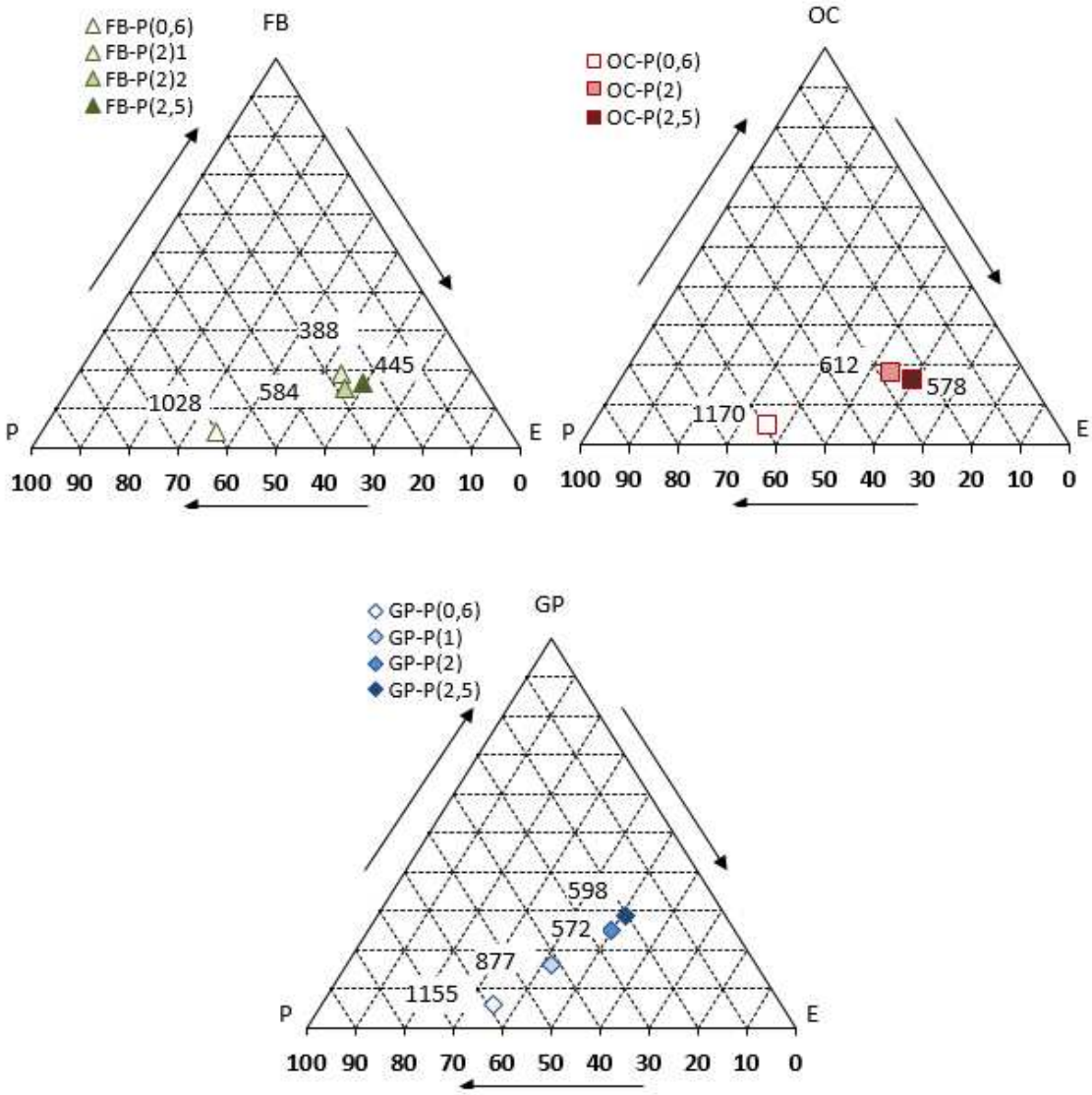


Figure 69:Triangles de formulation montrant les différentes proportions et les masses volumiques des composites au plâtre

IX.3.2 Masse volumique apparente des composites à base d'amidon

Les masses volumiques apparentes des composites à base d'amidon sont données sur les triangles de formulation (Figure 70).

La masse volumique des composites fibres de bois-amidon est comprise entre 331 et 376 kg/m^3. Celle des composites ouates de cellulose-amidon est comprise entre 446 et 473 kg/m^3. Celle des composites granules de papier-amidon est comprise entre 429 et 480 kg/m^3 pour C/A = 1,5 et entre 514 et 577 kg/m^3 pour C/A = 4,17.

La masse volumique des composites FB-A, diminue lorsque la quantité d'eau augmente, aucune tendance n'est apparue pour d'autres charges. Cela peut être dû à l'irrégularité des plaques et des cavités en raison du retrait.

Pour les mêmes dosages charges/liant/eau, les masses volumiques des composites à la ouate de cellulose et aux granules de papier sont comparables, celles des composites aux fibres de bois sont plus faibles.

Pour les composites aux granules de papier, pour un même rapport E/A, lorsque le taux de charge augmente, la masse volumique augmente.

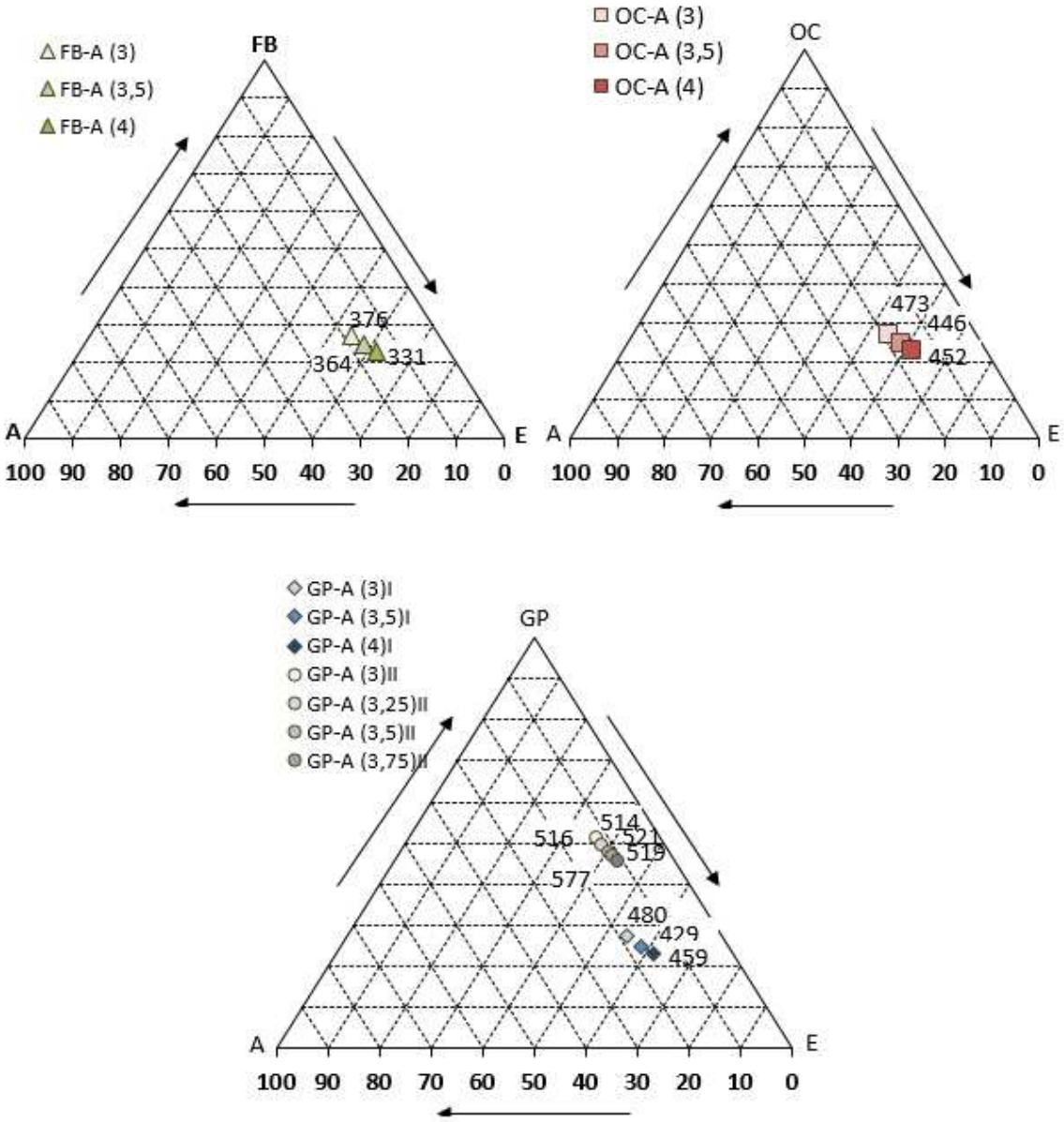


Figure 70: Triangles de formulation montrant les différentes proportions et les masses volumiques des composites avec l'amidon.

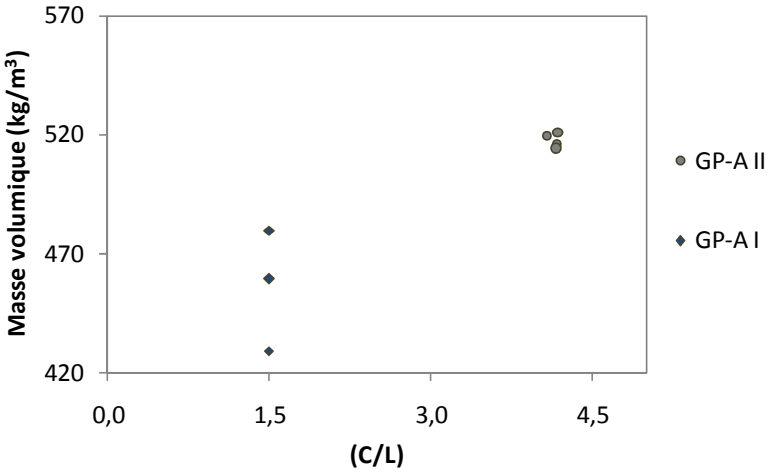


Figure71: Evolution de la masse volumique en fonction du rapport charge/ liant pour les composites granule de papier (GP-A I (C/A=1,5) ; GP-A II (C/A=4,17))

La faible densité des composites avec l'amidon est un avantage pour leur utilisation comme faux plafond dans le bâtiment. Les faux plafonds existant sur le marché sont généralement à base de laine minérale avec une densité d'environ 300 kg/m^3 **(plafond suspendu, 2018),** des dalles de mélamine (80 kg/m^3) (**Ventsys, 2011),** mais surtout des plaques de plâtre. Ces plaques de plâtre sont mises en œuvre avec des filasses (staff) pour faux plafond avec une masse volumique de 1100 kg/m^3, pour les cloisons la masse volumique est de l'ordre de 960kg/m^3 (**Efectis France, 2007).** Ces valeurs sont comparables aux masses volumiques des composites au plâtre. Parmi ces solutions de faux-plafond, seuls ceux à base de plaque de plâtre sont produits en côte d'Ivoire, tous les autres types sont importés.

IX.4 Synthèse des propriétés physiques des composites

Les durées de séchage sont similaires, de l'ordre de 15 jours, pour les composites au plâtre séchés à l'air ambiant et les composites à l'amidon séchés en étuve à 40°C.

Les composites au plâtre ne présentent pas de déformation visible après le séchage contrairement aux composites à l'amidon qui peuvent se déformer et présenter des cavités. Ces phénomènes de retrait dépendent du type et du dosage en charge ainsi que du dosage en eau. Pour les composites réalisés avec des granules de papier, le plus fort dosage en charge (C/A=4,17) permet d'empêcher le retrait.

En général tous ces composites (avec plâtre et amidon) ont une densité faible, dans la même gamme de masse volumique que les matériaux de construction utilisés en faux plafond. Elle se situe entre 300 et 577 kg/m^{3}pour les composites à l'amidon et entre 300 et 1200 kg/m^{3}pour ceux au plâtre.

CHAPITRE X

Propriétés hygriques des composites

Ce chapitre présente le comportement hydrique des composites par la détermination de leur valeur MBV. Les résultats obtenus sont présentés d'abord pour les composites au plâtre, à l'amidon de pomme de terre et à l'amidon de manioc. Les composites sont ensuite comparés en fonction du type de liant. Enfin l'influence de l'épaisseur des différents composites sur la valeur MBV est étudiée.

X.1 Valeur MBV des composites à base de plâtre

La Figure 72 présente le suivi massique d'un échantillon GP-P au cours de l'essai, représentatif du comportement de l'ensemble des échantillons.

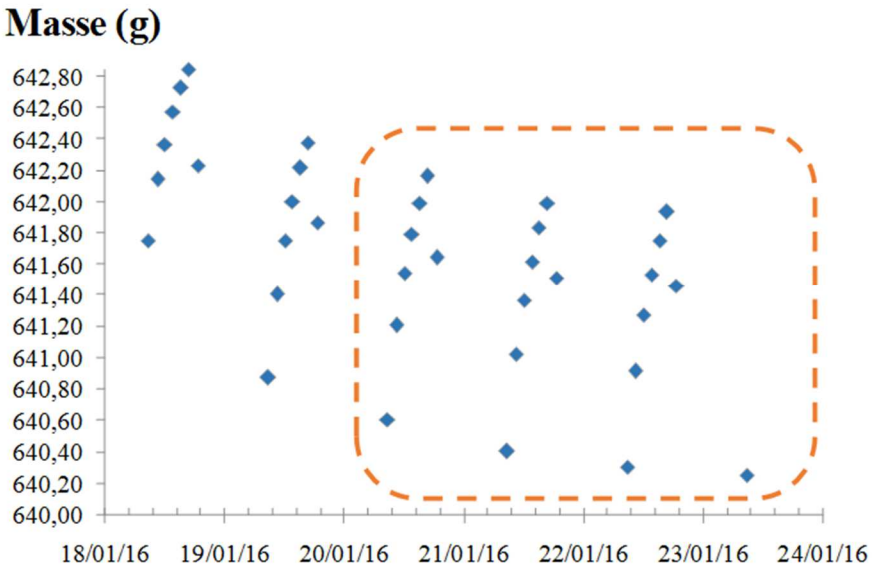


Figure 72: Cinétique de masse d'un échantillon GP-P au cours d'un essai MBV.

Le faisceau des cinétiques de masse présente une tendance décroissante. En effet, après stabilisation des échantillons à 23°C, 50%HR, le test débute par une phase d'absorption. Après plusieurs cycles, les prises et les pertes de masse deviennent stables. Les valeurs MBV obtenues en adsorption et en désorption convergent alors vers la valeur moyenne. Ainsi, les valeurs MBV des composites correspondent à la valeur moyenne sur les cycles 3 à 5.

La Figure 73 donne les valeurs MBV en absorption, désorption et moyenne, pour l'ensemble des composites liés au plâtre. Quel que soit le composite, la valeur en désorption est plus élevée que celle en absorption en liaison avec la première phase d'adsorption (passage de 50 %HR à 75%HR).

La Figure 74 présente l'évolution de la valeur MBV en fonction de la masse volumique des composites réalisés avec du plâtre.

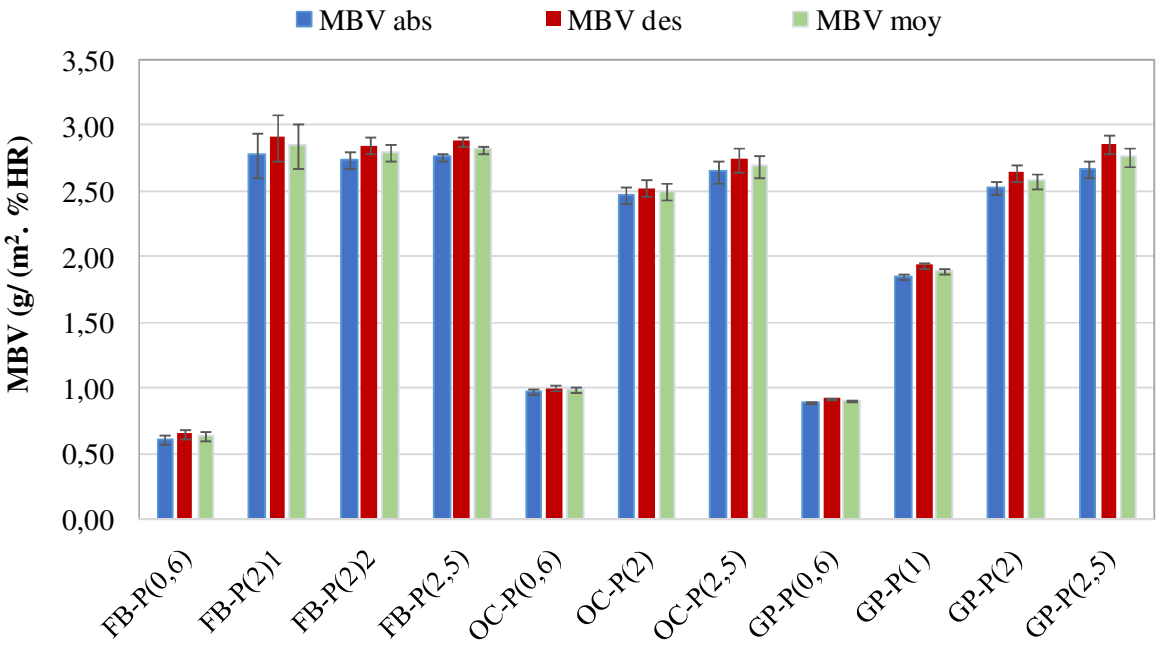


Figure 73: Valeur tampon hygrique en adsorption, désorption et moyenne des composites liés au plâtre.

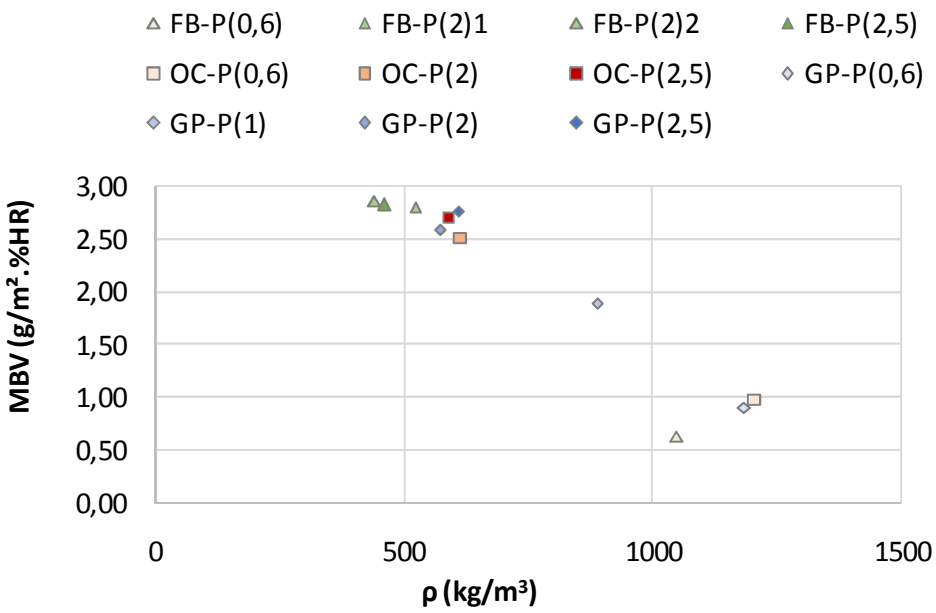


Figure 74: Valeur tampon hygrique des composites liés au plâtre en fonction de la masse volumique.

La valeur MBV des composites fibres de bois-plâtre est comprise entre 0,63 et 2,85 g/(m².%HR), celle des composites ouate de cellulose-plâtre est comprise entre 0,99 et 2,70 g/(m².%HR), celle des composites granules de papier-plâtre entre 0,90 et 2,76 g/(m².%HR).

Pour des masses volumiques autour de 500 kg/m^3, la valeur MBV diminue légèrement lorsque la masse volumique augmente. Pour des masses volumiques plus élevées, la valeur MBV diminue fortement lorsque la masse volumique augmente, en lien avec une diminution de la porosité. Les composites réalisés avec un taux de gâchage E/L de 0,6 et un faible taux de charge ont une valeur MBV entre 0,5 et 1 g/(m².%HR) pour une masse volumique comprise entre 1000 et 1500 kg/m^3. Ces composites ont une capacité modérée à amortir les variations de l'humidité relative ambiante. Cela peut être dû à leur faible porosité, ils sont légèrement meilleurs régulateurs hygriques que le plâtre seul dont le MBV est égal à 0,60 g/(m².%HR) selon (**Rode, 2005**). L'augmentation du taux de gâchage et du dosage en charge conduit à une diminution de la masse volumique. Le composite GP-P(1) est bon régulateur hygrique avec une valeur MBV de 1,89 g/(m.%HR) pour une masse volumique de 888 kg/m^3. Pour les composites avec une masse volumique inférieure à 600 kg/m^3, le MBV est compris entre 2,5 et 3 g/ (m².%RH).Ces composites sont excellents régulateurs hygriques.

La comparaison du MBV des trois types de composites ayant un rapport C/P identique pour un même rapport E/P de 2, montre que le composite FB-P est meilleur régulateur que GP-P et OC-P.

X.2 Valeur MBV des composites à base d'amidon de pomme de terre

X.2.1 Valeur MBV des différentes formulations

Dans un premier temps, la valeur MBV est mesurée sur des échantillons d'épaisseur estimée supérieure à la profondeur de pénétration. La valeur est donc représentative du comportement des matériaux.

Pour les composites à base d'amidon, la stabilité des cycles est atteinte à partir du cycle 3, comme pour les composites à base de plâtre (Figure 75). La valeur MBV est alors calculée à partir des cycles 3 à 5.

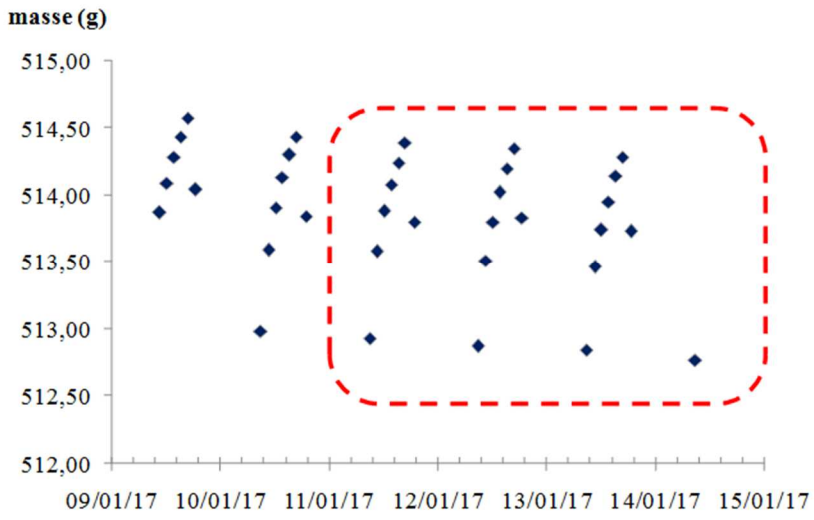


Figure 75: Cinétique de masse d'un échantillon GP-A au cours d'un essai MBV

La Figure 76 présente la valeur MBV des différents composites réalisés avec de l'amidon de pomme de terre, pour les différents types de charge et un rapport C/A de 1,5. La Figure 77donne la valeur MBV des composites réalisés avec de l'amidon de pomme de terre et des granules de papier avec un rapport C/A de 4,17. La Figure 78 présente une synthèse des valeurs MBV en fonction de la masse volumique pour l'ensemble des composites à l'amidon de pomme de terre.

Tous les composites dont le taux de charge est C/A=1,5 sont de bons régulateurs hygriques (MBV compris entre 1 et 2 g/(m².%HR)). Les composites réalisés avec la ouate de cellulose ont les valeurs les plus faibles (entre 1 et 1,5 g/(m².%HR). Les composites réalisés avec les fibres de bois et avec les granules de papier ont des valeurs MBV comparables comprises entre 1,5 et 2 g/(m².%HR)). Les composites réalisés avec des fibres de bois ou de la ouate de cellulose ont des MBV de l'ordre de grandeur des charges seules (respectivement 1,81 et 1,31 g/(m².%HR)). Pour les dosages en eau les plus élevés, les composites ont des valeurs MBV inférieures à celle des charges, inversement pour les dosages en eau les plus faibles les composites ont une valeur MBV supérieures à celles des charges. De façon générale, la valeur MBV diminue lorsque le rapport E/A augmente, simultanément à une diminution de la masse volumique. Les composites réalisés avec les granules de papier présentent tous des valeurs MBV inférieures à celles des charges seules.

Pour les composites réalisés avec des granules de papier, une augmentation du dosage en charge conduit à une augmentation de la valeur MBV. Tous les composites réalisés avec GP/A=4,17 sont excellents régulateurs hygriques. Leur valeur MBV est comparable à celle des charges (2,10 g/(m².%HR)).

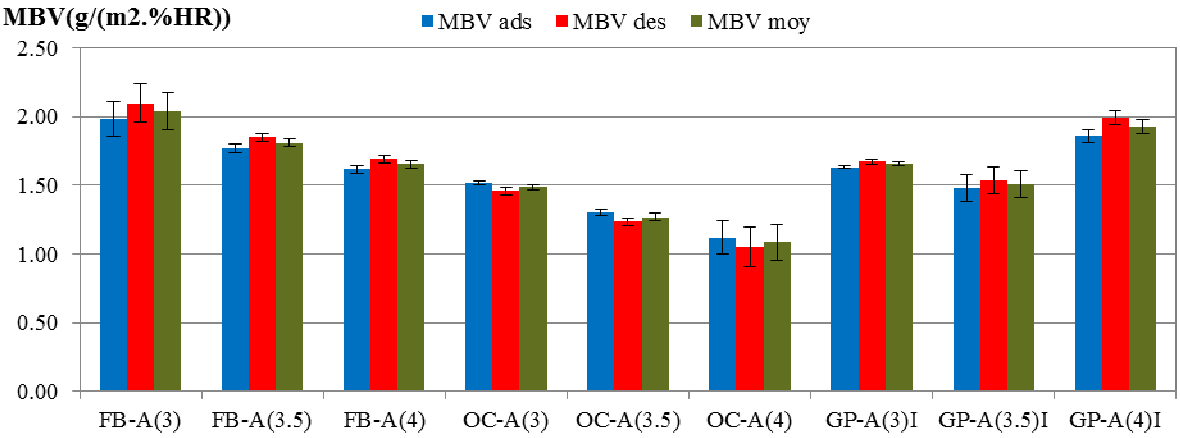


Figure 76: Valeur MBV des composites à base d'amidon pour les différentes formulations avec un rapport C/A de 1,5 et différents rapports (E/A).

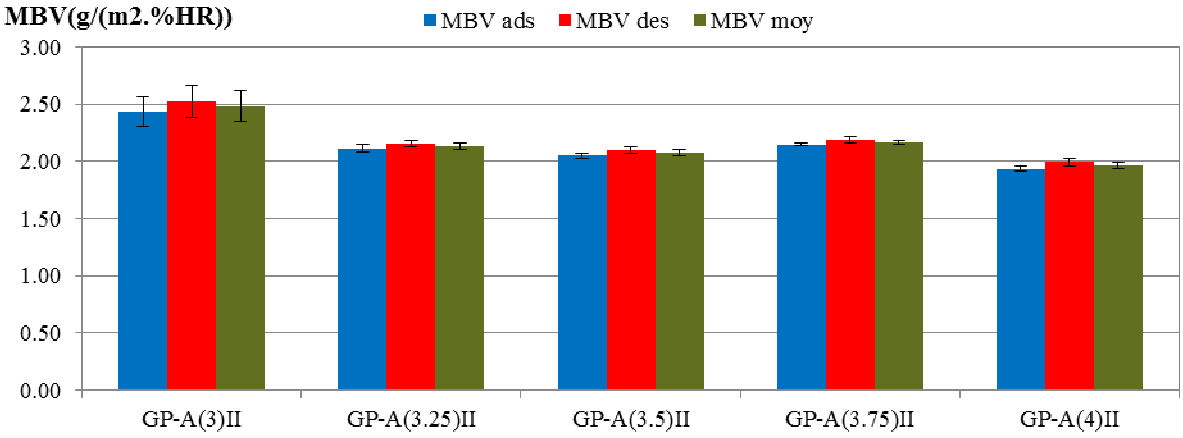


Figure 77: Valeur MBV des composites GP-A pour un rapport C/A de 4,17

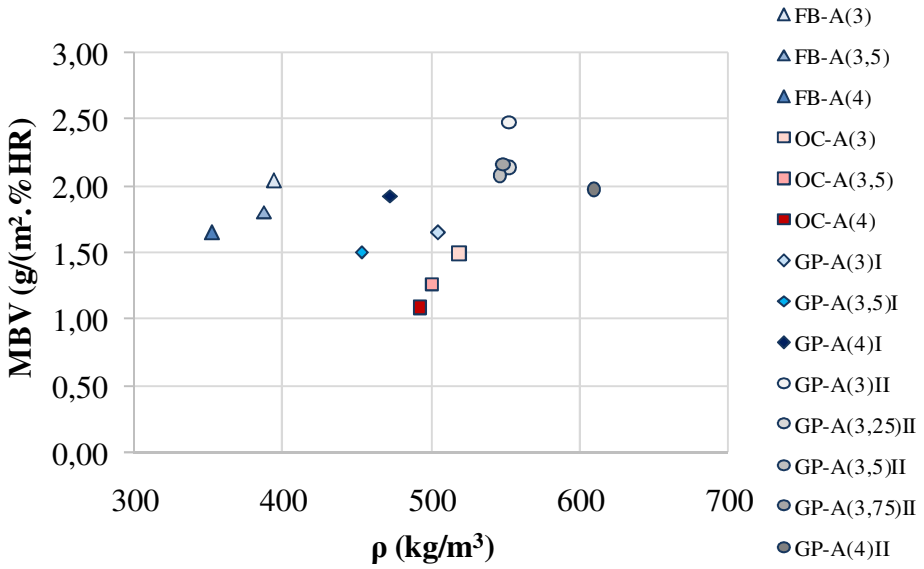


Figure 78: Valeur tampon hygrique des composites à l'amidon en fonction de la masse volumique (essai réalisé après séchage puis stabilisation à 23°C, 50%HR)

X.2.2 Valeur MBV de plaques de différentes épaisseurs

Les matériaux développés étant destinés à la réalisation de cloisons intérieures ou de faux-plafond peuvent être mis en œuvre avec des épaisseurs inférieures à la profondeur de pénétration. L'objet de cette section est d'étudier l'évolution de la valeur MBV pour des épaisseurs plus faibles. Ainsi, les échantillons précédents sont débités pour obtenir des échantillons de plus faible épaisseur tout en conservant leur surface d'échange (Figure 79).

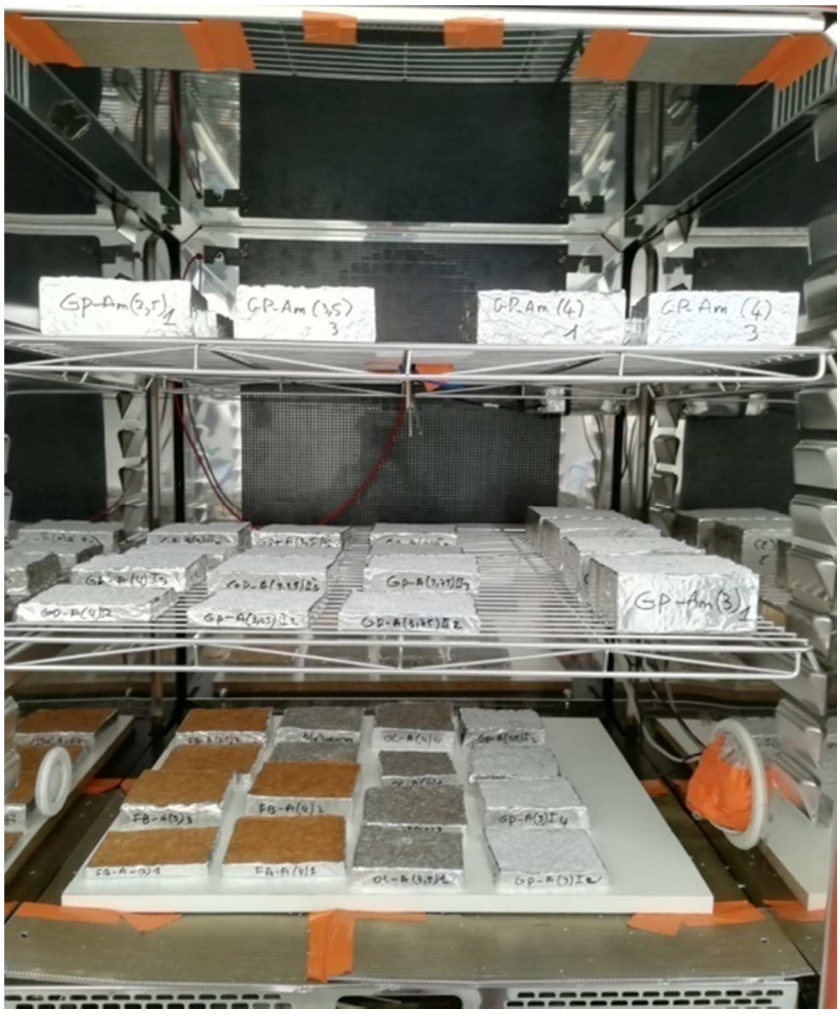


Figure 79: Exposition et emplacement des échantillons dans l'armoire climatique (Mesures de MBV des plaques de petites épaisseurs et grande épaisseurs)

Les Figure 80 à Figure 93 présentent les masses volumiques et les valeurs MBV par échantillon (avant et après découpe). De manière générale, les écarts de masse volumique entre échantillons initiaux et échantillons finaux sont inférieurs à 10 %, les échantillons découpés sont donc représentatifs des échantillons initiaux. Toutefois les échantillons OC-A (3.5)1, OC-A(4)2, GP-A (3) I2 et GP-A (3,5) présentent un écart légèrement plus important (inférieur à 15 %). Dans ces cas, les découpes ont été réalisées en supprimant les alvéoles apparues dans l'épaisseur du fait du retrait de séchage.

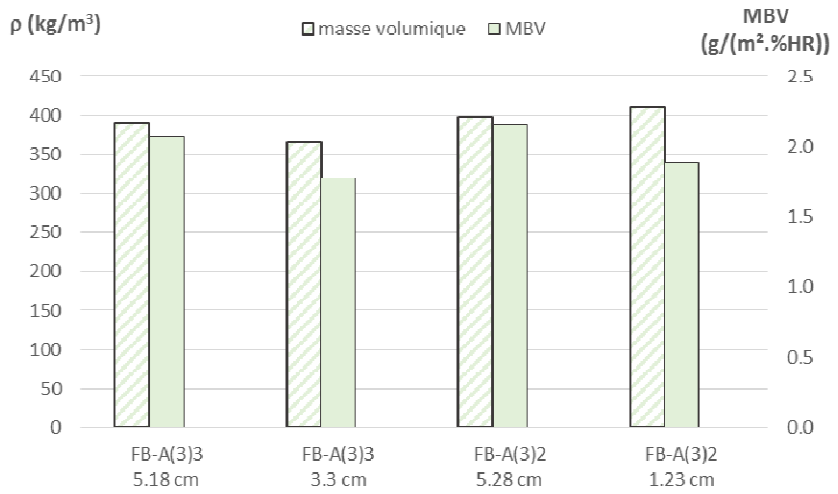


Figure 80: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Fibres de bois-Amidon de pomme de terre (E/A=3)

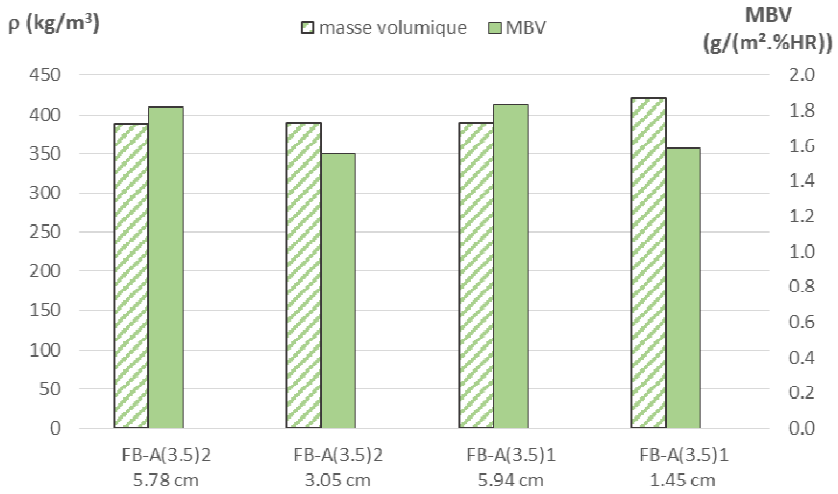


Figure 81: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Fibres de bois-Amidon de pomme de terre (E/A=3,5)

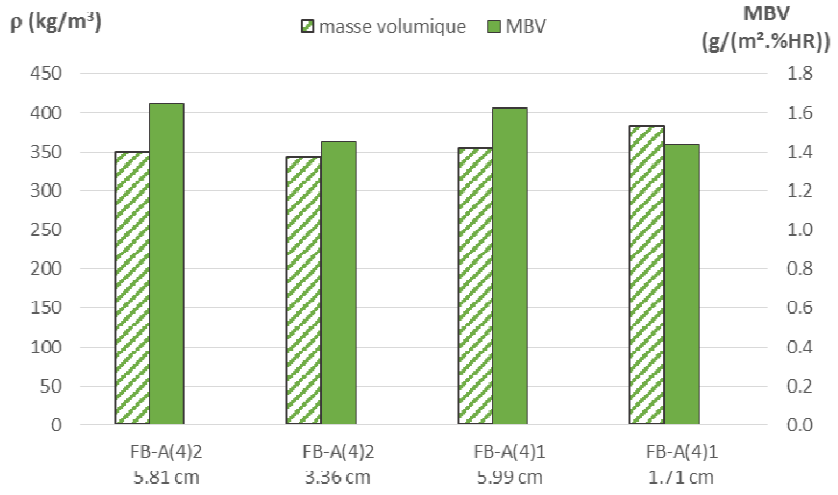


Figure 82: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Fibres de bois-Amidon de pomme de terre (E/A=4)

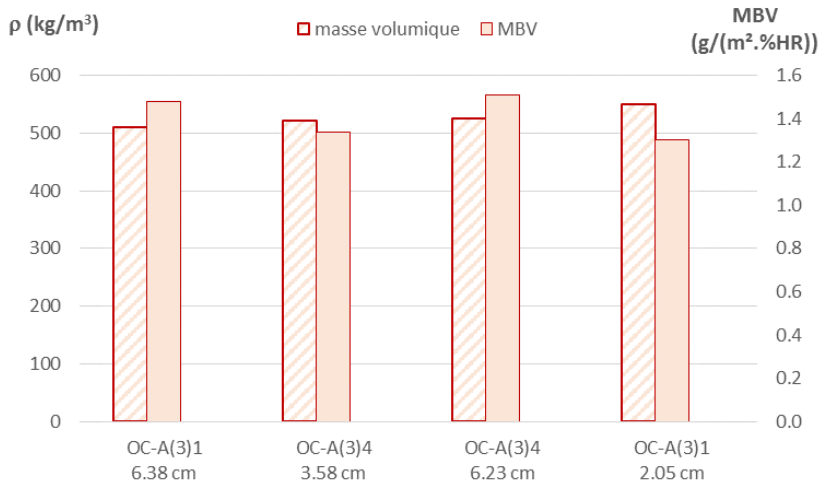


Figure 83: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Ouate de cellulose-Amidon de pomme de terre(E/A=3)

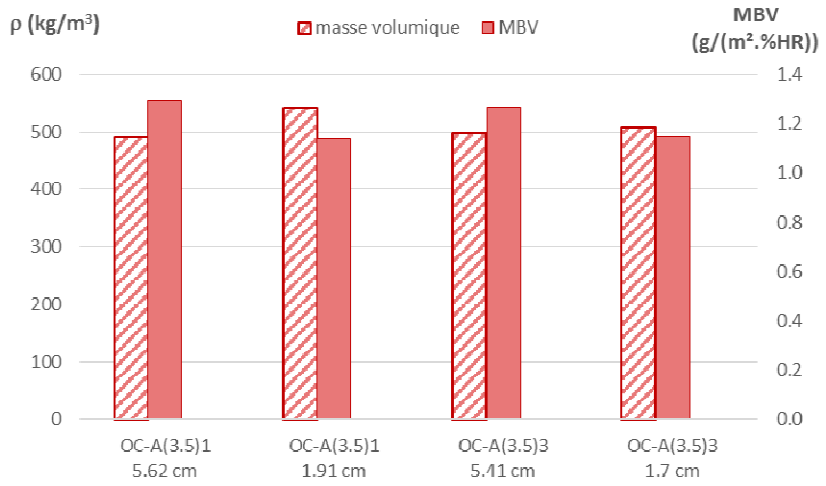


Figure 84: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Ouate de cellulose-Amidon de pomme de terre (E/A=3,5)

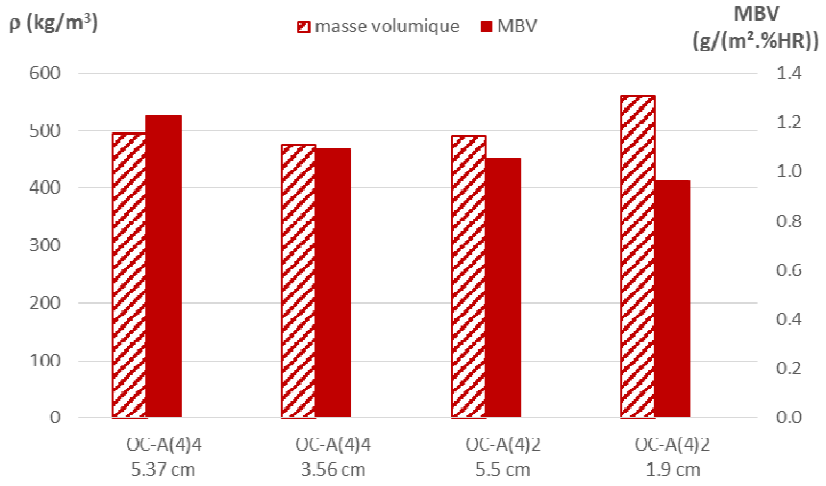


Figure 85: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Ouate de cellulose-Amidon de pomme de terre(E/A=4)

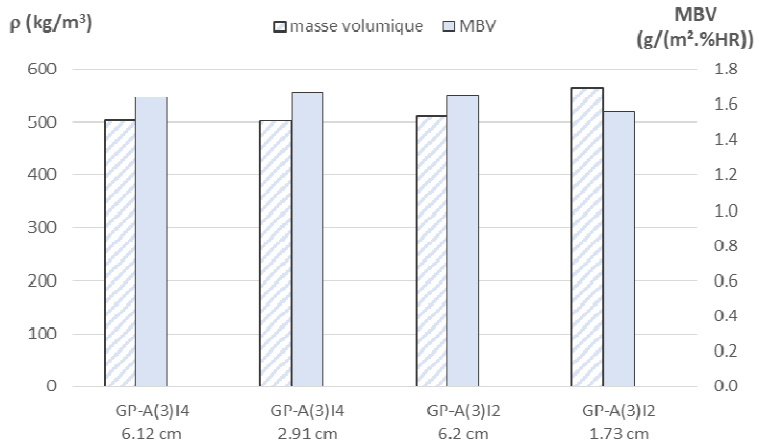


Figure 86: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 1.5) (E/A=3)

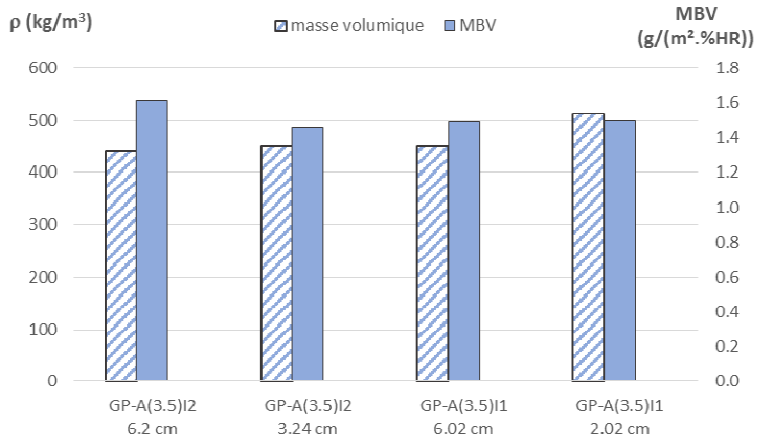


Figure 87: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 1,5) (E/A=3,5)

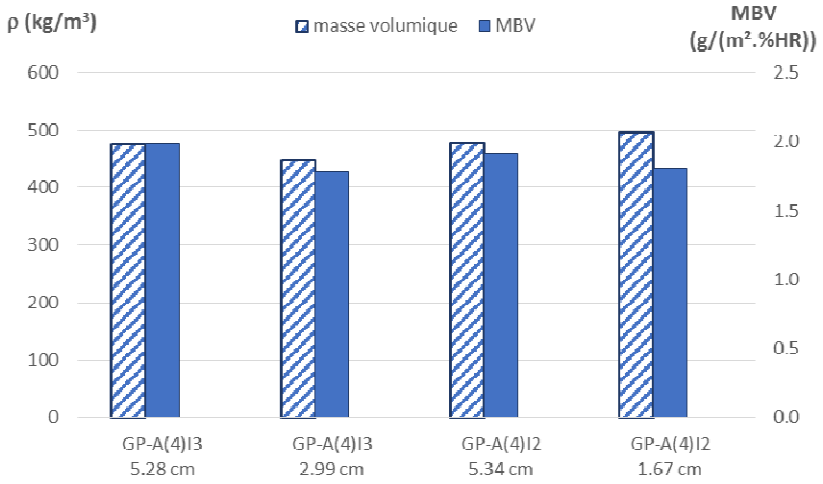


Figure 88: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 15) (E/A=4)

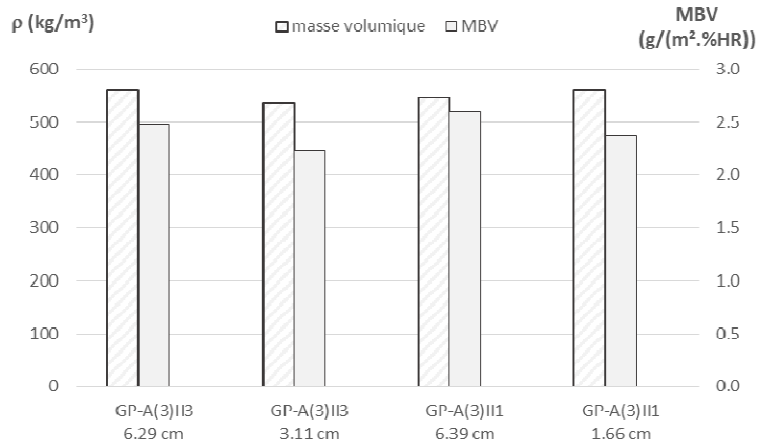


Figure 89: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 4,17 et E/A = 3)

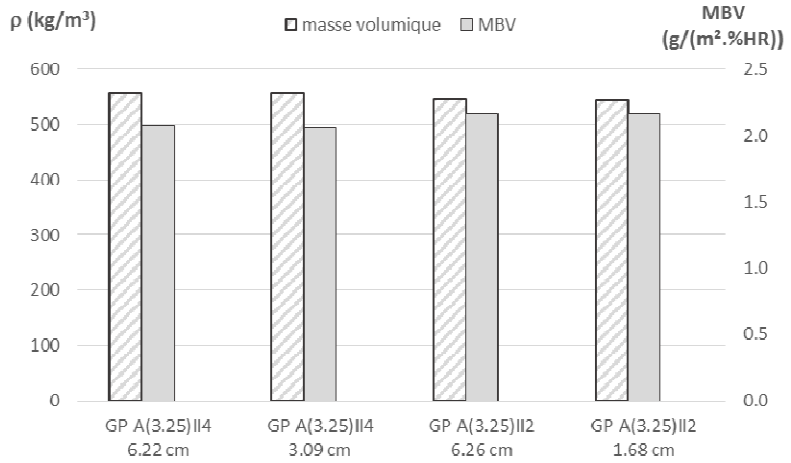


Figure 90: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 4,17 et E/A = 3,25)

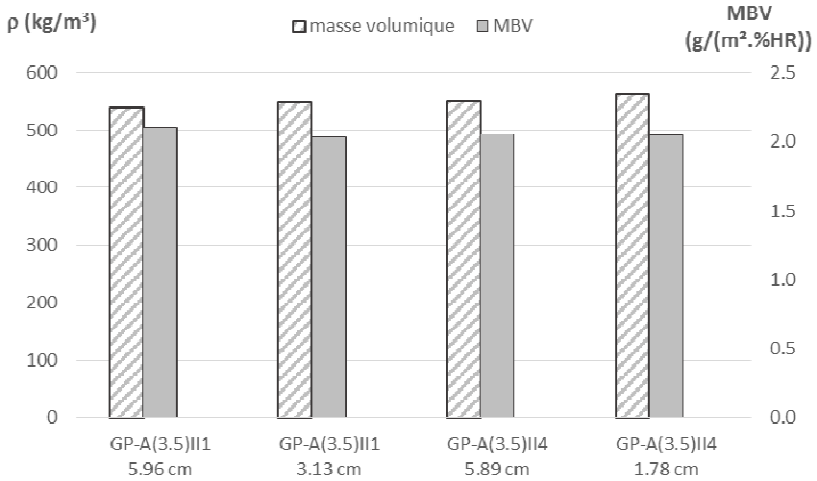


Figure 91: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 4,17 et E/A = 3,5)

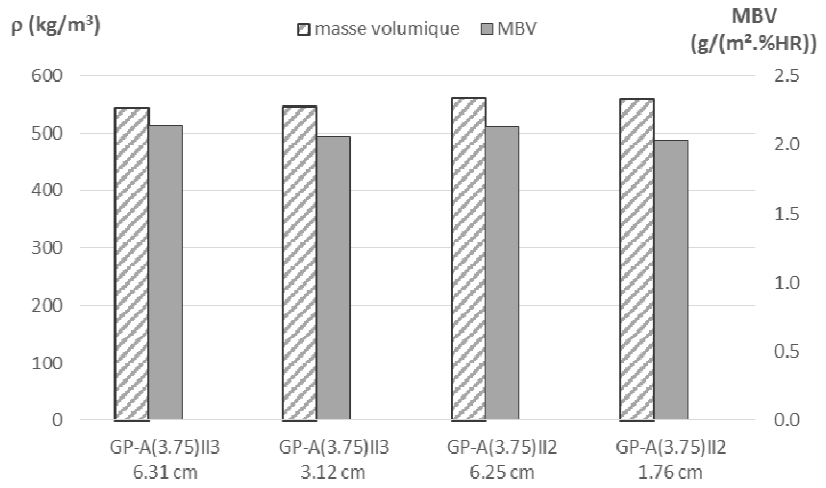


Figure 92: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 4,17 et E/A = 3,75)

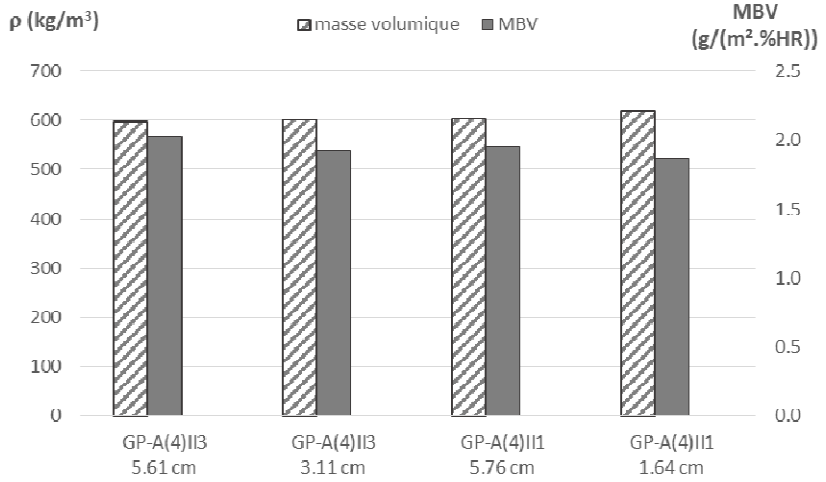


Figure 93: Masse volumique apparente et MBV des échantillons initiaux et découpés pour les formulations Granules de papier-Amidon de pomme de terre (GP/A = 4,17 et E/A = 4)

Pour l'ensemble des formulations, les valeurs MBV obtenues sont légèrement plus faibles sur les échantillons découpés que sur les échantillons initiaux, en liaison avec une épaisseur disponible à la pénétration de la vapeur d'eau plus faible.

Une synthèse de l'évolution de la valeur MBV en fonction de l'épaisseur pour les différents types de charge est présentée Figure 94 à Figure 96.

Pour les échantillons réalisés avec les fibres de bois, l'écart est de l'ordre de 12 à 14 % entre les échantillons découpés et les échantillons initiaux, quelle que soit l'épaisseur de l'échantillon découpé.

Pour les échantillons réalisés avec la ouate de cellulose, l'écart est de l'ordre de 9 à 14 % entre les échantillons découpés et les échantillons initiaux. Pour la formulation OC-A(3), la

plus performante, la réduction est de 10% pour l'échantillon de moyenne épaisseur et 14 % pour l'épaisseur la plus faible. Pour les deux autres formulations, la réduction observée est moins marquée pour les plus faibles épaisseurs que pour les moyennes. Toutefois, cette observation n'est pas forcément représentative en raison de l'hétérogénéité des échantillons initiaux qui présentent des cavités dues au retrait de séchage.

Pour les échantillons réalisés avec les granules de papiers, pour la série la moins dosée en papier, l'écart est de l'ordre de 0 à 10 % entre les échantillons découpés et les échantillons initiaux. L'évolution est moins marquée pour les plaques de faibles épaisseurs pour lesquelles la masse volumique est plus forte que celle des échantillons initiaux.

Pour la série la plus dosée en papier, la réduction est moindre, inférieure à 5 %, à l'exception de la formulation ayant le plus faible dosage en eau.

Au bilan, les faibles épaisseurs, représentatives d'un usage en plaque de faux-plafond, conduisent à des valeurs MBV proches de celles des échantillons initiaux. Les meilleures formulations, classées excellentes régulatrices hygriques, sont les granules de papier-amidon avec le plus fort dosage en papier et un dosage en eau E/A inférieur à 4. Les autres formulations sont classées bonnes régulatrices hygriques. Les formulations à base de ouate de cellulose restent les moins performantes, avec une valeur MBV comprise entre 1 et 1.5 g/(m².%HR). Les autres formulations ont une valeur MBV comprise entre 1,5 et 2 g/(m².%HR).

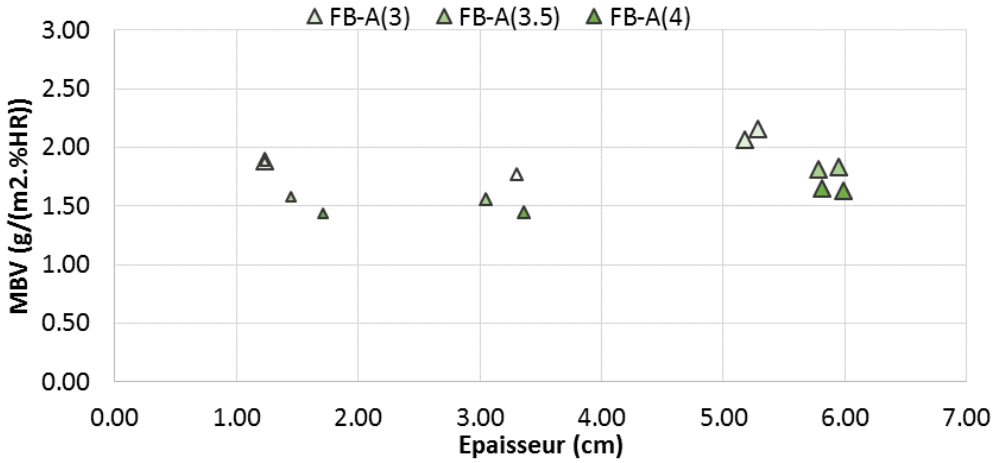


Figure 94: Evolution de la valeur MBV en fonction de l'épaisseur pour les formulations Fibres de Bois-Amidon FB/A=1,5 et E/A = 3 à 4.

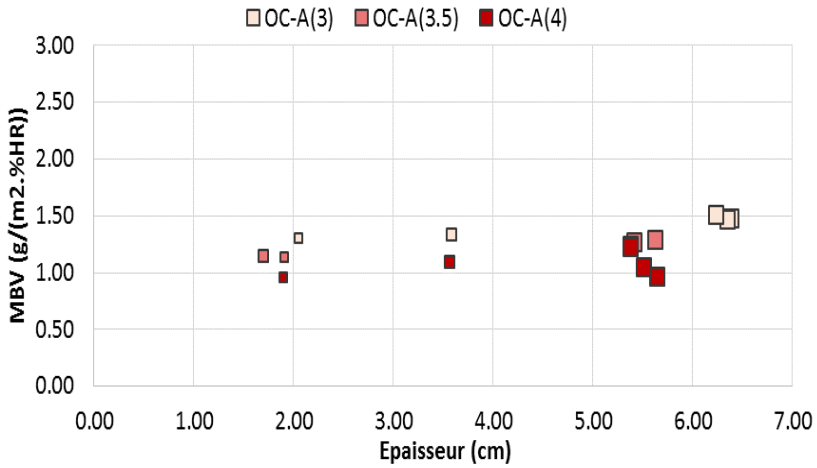


Figure 95: Evolution de la valeur MBV en fonction de l'épaisseur pour les formulations Ouate de Cellulose-Amidon OC/A=1,5 et E/A = 3 à 4

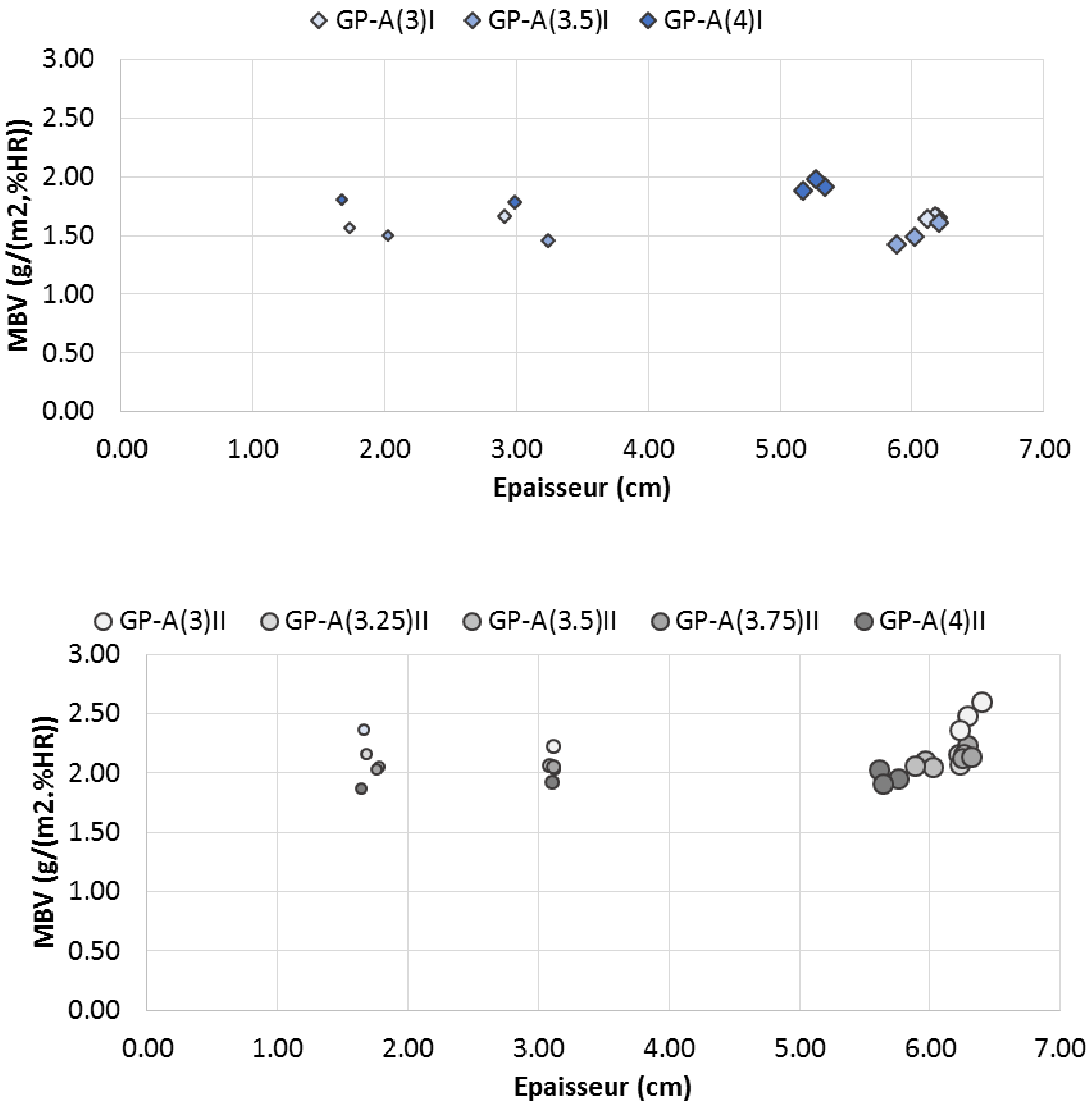


Figure 96: Evolution de la valeur MBV en fonction de l'épaisseur pour les formulations Granule de papier-Amidon, haut : GP/AI =1,5 et E/A = 3 à 4 ; bas : GP/A II=4,17 et E/A = 3 à 4

X.3 Valeur MBV des composites à base d'amidon de manioc

Les valeurs MBV des composites réalisés avec l'amidon de Manioc sont données Figure 97 en fonction de la formulation et Figure 98 en fonction de la masse volumique.

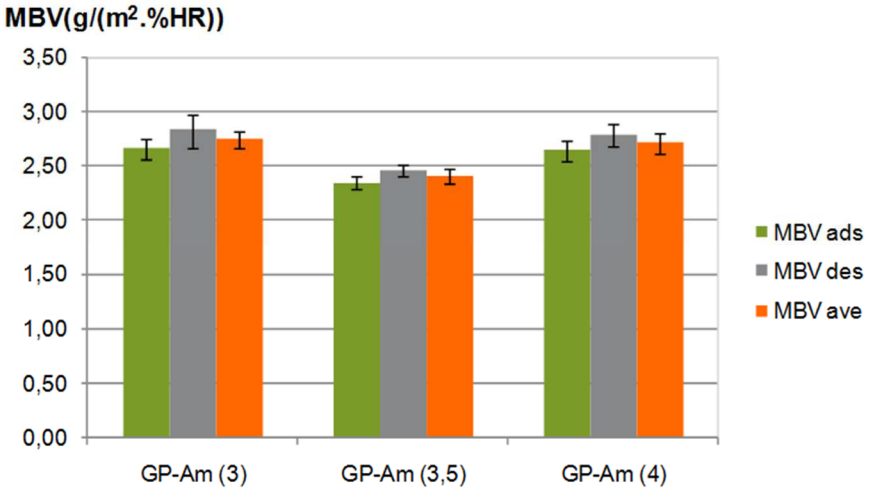


Figure 97: Valeur tampon hygrique des composites GP-Am en fonction de la formulation.

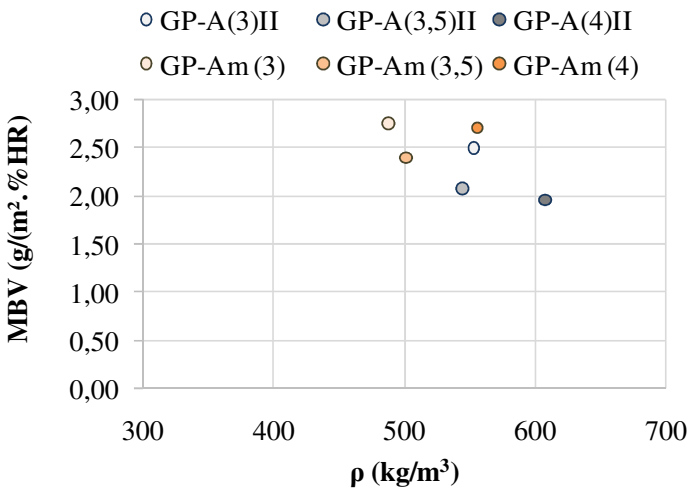


Figure 98: Evolution de la Valeur hydrique tampon (MBV) des composites avec l'amidon de pomme de terre et de manioc E/A=3, 3,5 et 4

Les composites GP-Am ont une valeur MBV comprise entre 2.41 et 2.74 g/(m^2.%HR), ils sont tous excellents régulateurs hygriques selon la classification du Nordtest Protocol. De nouveau, le composite le plus performant est le moins dosé en eau qui présente une masse volumique plus faible. Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues avec l'amidon de pomme de terre pour les mêmes dosages en eau et en granule de papier.

X.4 Synthèse de l'étude du comportement hygrique

La caractérisation hygrique des composites a été effectuée conformément au protocole Nordtest. Pour les mêmes gammes de masse volumique, les composites réalisés avec le plâtre et avec l'amidon de manioc ont des valeurs MBV similaires (autour de 2,5 g/(m².%HR), supérieures à celles des composites réalisés avec l'amidon de pomme de terre. Toutefois, pour un dosage élevé en granule de papier (GP/A=4,17), les performances des composites GP-A se rapprochent de celles des composites réalisés avec le plâtre.

A titre comparatif, (**Umirigirwa, 2014)**a étudié des composites chanvre-amidon de blé ayant un rapport Eau/Amidon de 5 et Chanvre/Amidon de 3.22. Ces composites ont une masse volumique de 177 kg/m^3 et une valeur MBV de 2,49 g/(m².% HR), comparable à celle obtenue pour les composites granules de papier - amidon de manioc. (**Belakroum *et al.*2017)** ont étudié des composites réalisés avec deux types de fibres de palmiers et de la chaux ou de l'amidon de maïs. Pour les composites réalisés à la chaux, les dosages (Fibre/chaux) sont compris entre 0,25 et 1. Pour les composites réalisés avec l'amidon, les dosages (Fibres/Amidon) sont compris entre 0,25 et 0,43. Les composites réalisés avec la chaux ont des masses volumiques comprises entre 625 et 890 kg/m^3 et des valeurs MBV entre 1,5 et 3 g/(m².%HR). Ceux réalisés avec l'amidon ont des masses volumiques comprises entre 386 et 535 kg/m^3. Ils sont plus performants et présentent des valeurs entre 3,5 et 4 g/(m².%HR). Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues ici. Il faut noter que dans leur étude les vitesses d'air sont 2 à 3 fois supérieures aux nôtres, ce qui peut expliquer cet écart.

Les valeurs de MBV des bétons de chanvre et de lin étudiés par (**Mourad *et al.*2014)** (2,02 et 2,32 g/(m².%HR)) sont semblables à celles des composites granules de papier amidon.

Selon **Zürcher et Frank (2014),** les plaques de plâtre, les plaques silico-calcaire et les panneaux d'argile ont des valeurs MBV respectives de 0,61g/m^2%HR, 0,96g/m^2%HR et 1,83g/m^2%HR. Ce sont des régulateurs hygriques classés médiocres pour les deux premiers et bon pour le troisième. Les valeurs obtenues au cours de nos travaux pour tous les composites au plâtre (E/P égal à 0,6) couvrent la même gamme de valeur MBV.

De manière générale, la valeur MBV des composites est faiblement impactée par la diminution de l'épaisseur dans une plage entre 7 et 1,5 cm (représentatif d'un usage en plaque mince). Ce type de résultat est également observé par **Umirigirwa (2014)** qui obtient des valeurs similaires entre des épaisseurs de 2,5 et 5 cm pour des composites chanvre-amidon de

blé (respectivement 2,52 et 2,49 g / (m².% HR)). La majorité de l'épaisseur active est donc incluse dans l'épaisseur envisagée pour une utilisation en faux plafond ou en parement.

CHAPITRE XI
Conductivité thermique des composites

Ce chapitre présente les conductivités thermiques des composites mesurées à (23°C, 50% HR) puis au point sec de 10 à 40°C, selon la méthode au fil chaud décrite dans la partie II. Les mesures de conductivités thermiques sont faites sur la tranche coupée pour chacun des composites parce qu'elle présente une surface lisse et plane qui permet d'avoir un meilleur contact avec la sonde.

Les résultats sont d'abord présentés pour le point (23°C, 50%HR) pour lequel la mesure est réalisée sur 6 couples d'échantillons, puis au point (20°C, sec) sur le couple identifié comme le plus représentatif de la formulation. Ensuite, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température au point sec est étudiée sur ce couple. Cette démarche est adoptée dans un premier temps pour les composites à base de plâtre et dans un deuxième temps pour les composites à base d'amidon.

XI.1 Conductivité thermique des composites à base de plâtre

XI.1.1 Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR) et au point sec

Les conductivités thermiques en fonction de la masse volumique pour chaque type de formulation à base de plâtre au point (23°C, 50%HR) sont données Figure 99 à Figure 101. Une corrélation est établie entre la conductivité thermique et la masse volumique. La Figure 102 donne une synthèse de l'ensemble de ces composites.

Pour chaque couple, les écarts entre les cinq mesures sont très faibles, conduisant à des coefficients de variation inférieurs à 5%. De même, pour les différentes formulations, les écarts entre l'ensemble des mesures réalisées sur les différents couples conduisent généralement à des coefficients de variation inférieurs à 5 %.

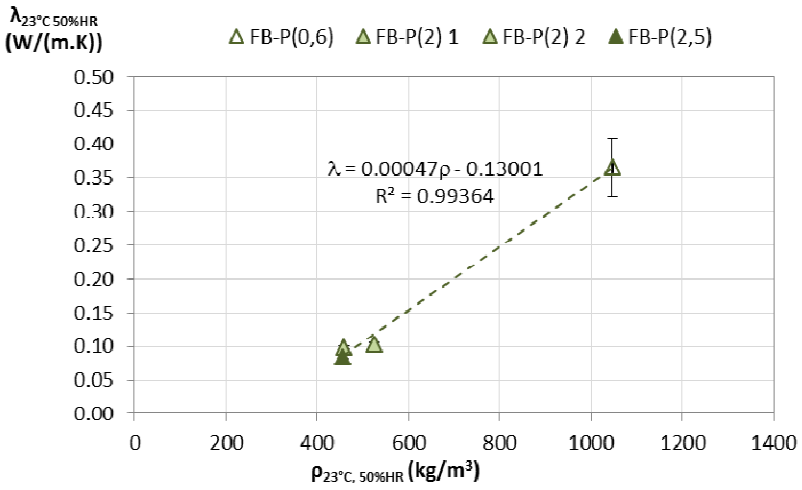


Figure 99: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR) des composites de Fibre de bois-plâtre

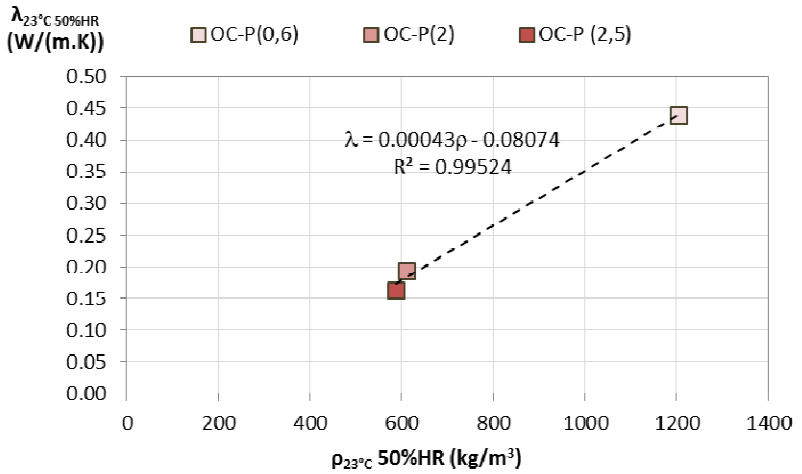


Figure 100: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR) des composites de Ouate de cellulose-plâtre

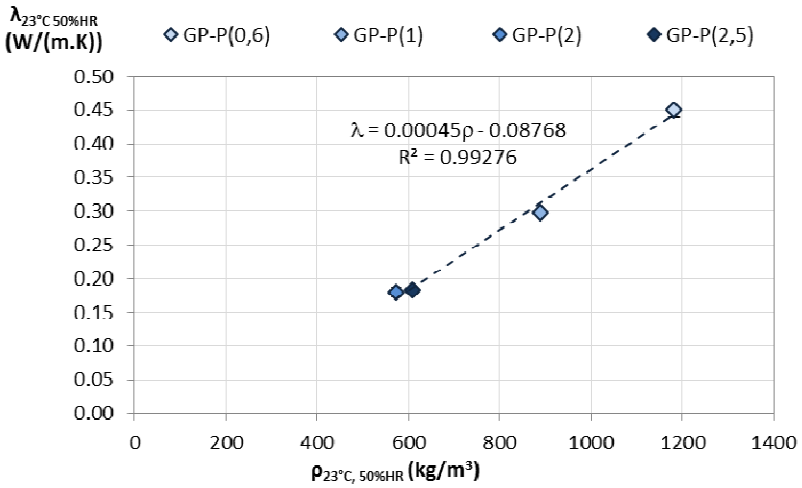


Figure 101: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR) des composites de Granules de papier-plâtre

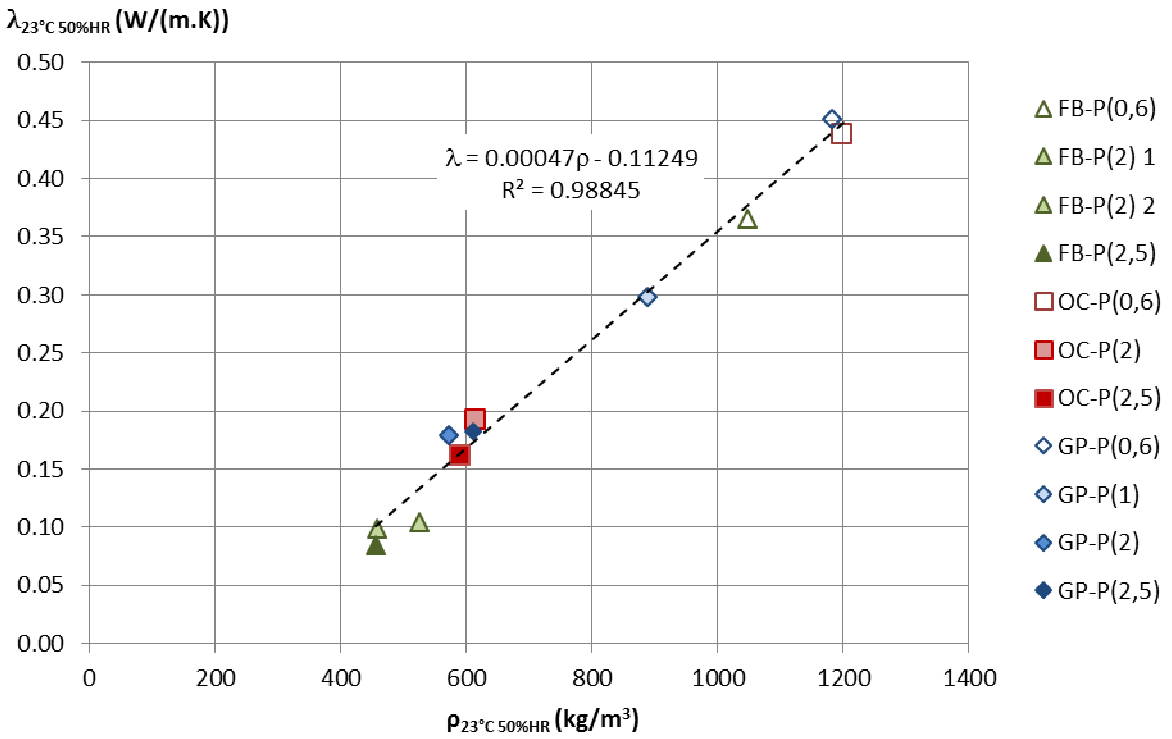


Figure 102: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR), bilan de l'ensemble des composites à base de plâtre

Pour l'ensemble des formulations, la conductivité thermique augmente avec la masse volumique apparente. Les pentes d'évolution sont similaires pour les trois types de composite, entre 0,00043 et 0,00047, avec une valeur légèrement plus forte pour les composites réalisés avec des fibres de bois. Pour les composites à base de ouate de cellulose ou de granules de papier liés au plâtre, les moins dosés en charge (ayant un rapport eau/plâtre égal à 0,6) ont une masse volumique d'environ 1200 kg/m^3 et une conductivité de l'ordre de 0,45 W/(m.K). Pour un taux élevé de plâtre, le type de charge n'influence pas la conductivité qui est légèrement en dessous de celle du plâtre seul (0,48 W/(m.K) pour une masse volumique de 1100 kg/m^3 selon les données de la réglementation thermique française). Pour des masses volumiques comprises entre 550 et 610 kg/m^3, les conductivités thermiques sont comprises entre 0,16 et 0,19 W/(m.K)), comme attendu pour cette gamme de masses volumiques. En outre, les composites réalisés avec de la fibre de bois présentent des valeurs légèrement inférieures à celle de la courbe de tendance globale. Ceci peut être lié à une distribution de la porosité différente.

Afin de pouvoir comparer les composites développés à d'autres matériaux, les conductivités thermiques en fonction de la masse volumique pour chaque type de formulation à base de plâtre au point (20°C, sec) sont donnés en complément Figure 103 à Figure 105. La Figure 106 donne une synthèse de l'ensemble de ces composites.

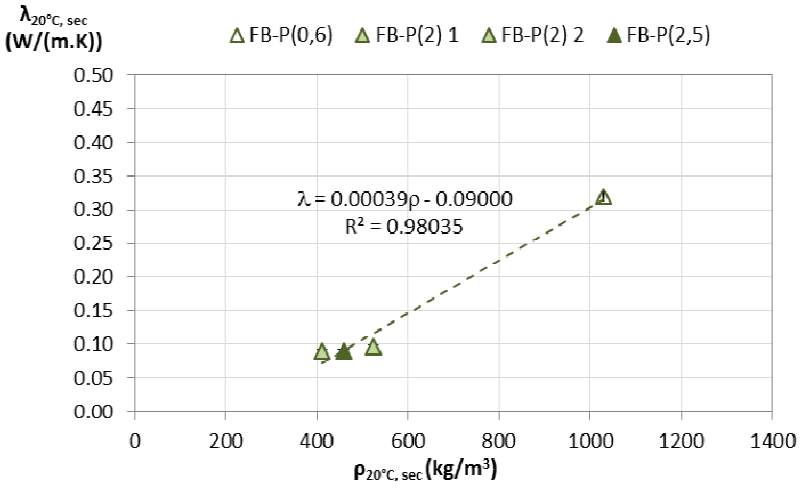


Figure 103: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C, sec) des composites de Fibre de bois-plâtre

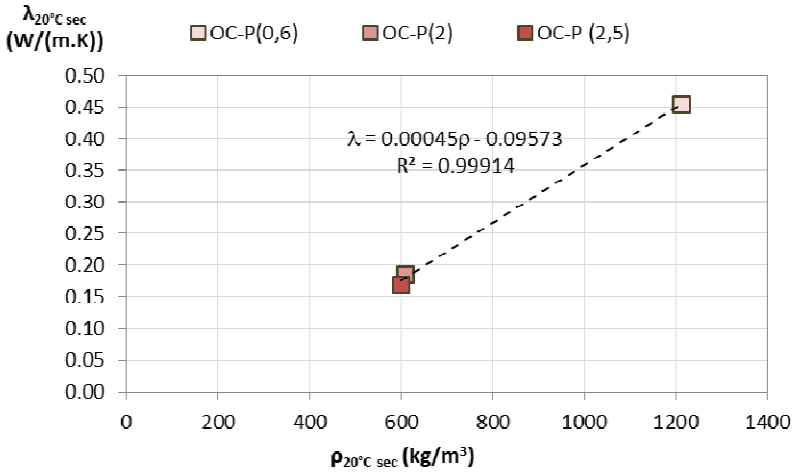


Figure 104: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C, sec) des composites de Ouate de cellulose-plâtre

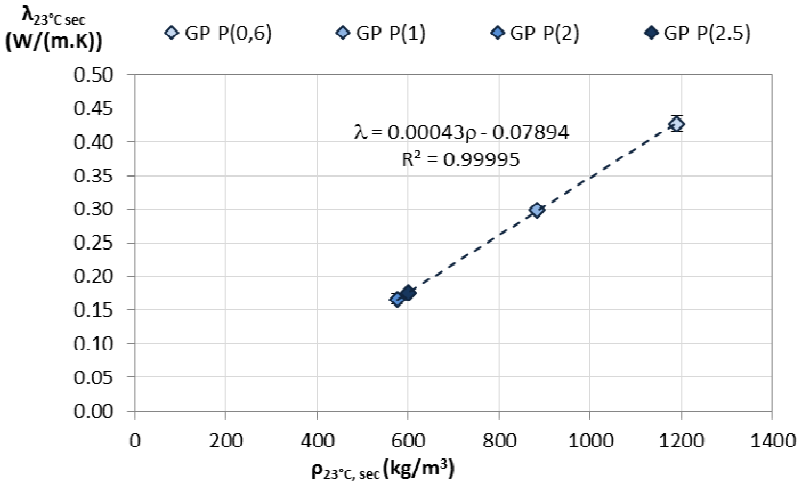


Figure 105: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C, sec) des composites de Granules de papier-plâtre

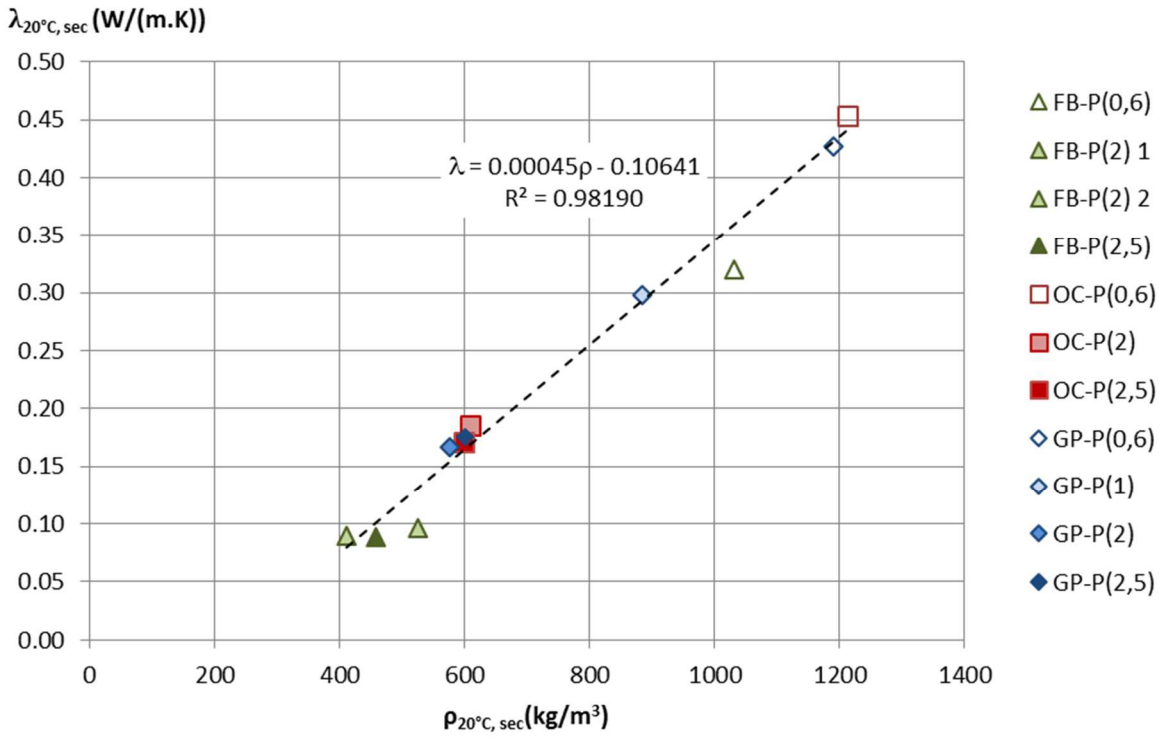


Figure 106: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C, sec), bilan de l'ensemble des composites à base de plâtre

L'écart entre les conductivités thermiques mesurées au point sec à 20°C et celles mesurées à (23°C, 50%HR) est compris entre 2 et 6 % pour les composites réalisés avec de la ouate de cellulose et des granules de papier et jusqu'à 10 % pour ceux réalisés avec de la fibre de bois.

Pour des dosages charge/plâtre/eau similaires, les composites réalisés avec la ouate de cellulose ont une masse volumique plus forte et donc une conductivité thermique plus forte. Ainsi, pour un rapport eau/plâtre de 2, l'augmentation de la masse volumique entre les charges seules et le composite est de 770 % pour la laine de bois et de 1609 % pour la ouate de cellulose. Conjointement, l'augmentation de la conductivité thermique est de 120 % pour la fibre de bois et de 330 % pour la ouate de cellulose. L'impact du liant est donc beaucoup plus marqué dans le cas de la ouate de cellulose.

Enfin, les conductivités thermiques issues de la bibliographie à propos de composites à base de plâtre et de charges bio-sourcées sont données dans le Tableau XV. Les conductivités thermiques obtenues dans cette étude (0,090 à 0,453 W/(m.K)) pour des masses volumiques comprises entre 400 et 1200 kg/m^3) sont dans la même gamme que celles données dans la bibliographie (0,086 à 0,387 W/(m.K)) pour des masses volumiques comprises entre 450 à 1226 kg/m^3). En outre, quelle que soit la charge considérée, une augmentation de son dosage conduit à une diminution de la masse volumique et de la conductivité thermique.

Tableau XV: Conductivités thermiques de composites à base de plâtre issues de la bibliographie

Composite	ρ (kg/m^3)	λ (W/(m.K))	Référence
Plâtre – fibres de palmier dattier	736-1226	0.174-0.387	A. Braiek, M. Karkri, A. Adili, L. Ibos, S. Ben Nasrallah, Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building, Energy and Buildings, 140 (2017), pp. 268-279
Plâtre-Liège	578-864	0,126-0,200	Hernandez-Olivares, M. Del Rio, B. Parga-Landa, Development of cork gypsum composites for building applications, Constr. Build. Mater. 13 (1999)179–186.
Plâtre-Liège	470-802	0,124-0,299	A.-b. Cherki *et al.* / Construction and Building Materials 54 (2014) 202–209
Plâtre-copeaux de bois	702-1250	0,199-0,249	M.J. Morales-Conde, C. Rodríguez-Li˜nán, M.A. Pedre˜no-Rojas, Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works, Constr. Build. Mater. 114 (2016) 6–14.
Plâtre – paille de blé et d'orge	184-456	0,058-0,086	N. Belayachi *et al.* / Construction and Building Materials 125 (2016) 912–918
Plâtre - Cosses de cacahuètes	501-788	0,138-0,271	M. Lamrani *et al.* Case Studies in Construction Materials 7 (2017) 294–304

XI.1.2 Conductivité thermique en fonction de la température, au point sec.

L'évolution de la conductivité thermique au point sec en fonction de la température des composites à base de plâtre est donnée Figure 107 à Figure 109.

Pour l'ensemble des composites, dans la plage de température d'usage probable du matériau, aucun effet notable de la température n'apparaît au point sec.

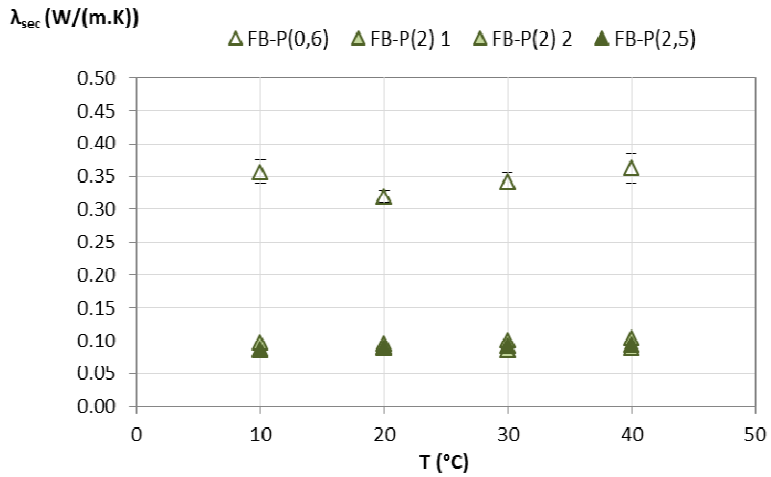


Figure 107: Conductivité thermique au point sec en fonction de la température des composites fibres de bois – Plâtre

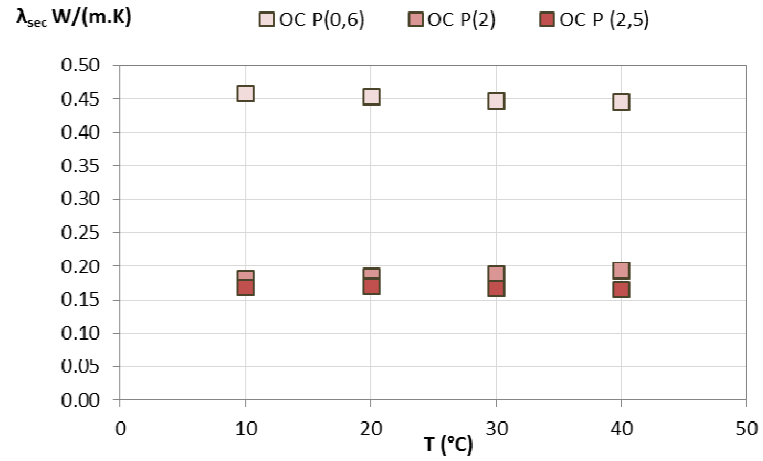


Figure 108: Conductivité thermique au point sec en fonction de la température des composites Ouate de Cellulose-Plâtre

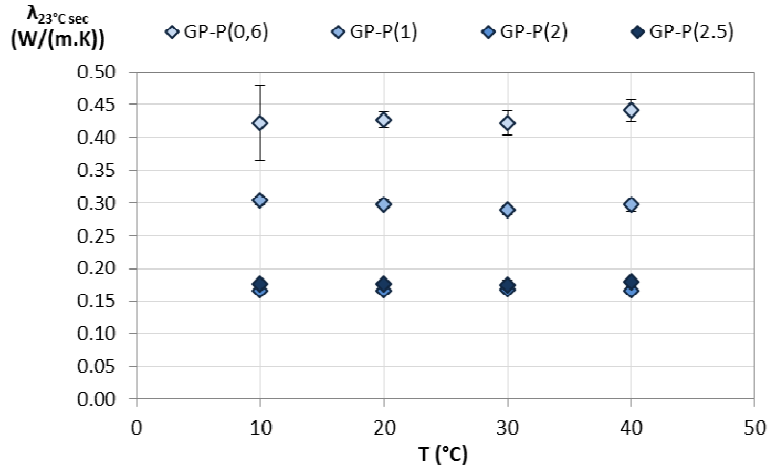


Figure 109: Conductivité thermique au point sec en fonction de la température des composites Granules de Papier –Plâtre

XI.2 Composites à base d'amidon

XI.2.1 Composites à base d'amidon de pomme de terre -Conductivité thermique en fonction de la masse volumique à (23°C, 50%HR) et au point sec

La Figure 110 donne une synthèse pour l'ensemble des composites à base d'amidon, ayant le même taux de charge, au point (20°C, sec). L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des composites à base d'amidon du point (20°C, sec) au point (23°C, 50%HR) est détaillée par type de charge Figure 111 à Figure 113.

Les conductivités thermiques des composites à base d'amidon sont comprises entre 0,096 et 0,155 W/(m.K). Ces composites se placent dans la gamme des matériaux utilisés en isolation répartie et peuvent donc être envisagés comme correcteur thermique. Les composites réalisés avec la fibre de bois présentent les masses volumiques et les conductivités thermiques les plus faibles, entre 0,096 et 0,108 W/(m.K) pour des masses volumiques comprises entre 340 et 380 kg/m^3. Les composites réalisés avec la ouate de cellulose présentent les masses volumiques et les conductivités thermiques les plus élevées (475 à 501 kg/m^3 et 0,145 à 0,155 W/(m.K)). Enfin, les composites réalisés avec les granules de papier présentent des masses volumiques plus fortes que les composites réalisés avec la fibre de bois (441 à 486 kg/m^3) mais des conductivités thermiques du même ordre de grandeur (0,102 à 0,113 W/(m.K)).

Pour un type et un taux de charge donnés, la variation de dosage en eau impacte peu la masse volumique et donc la conductivité thermique.

La comparaison des masses volumiques et des conductivités des charges seules à celles des composites à base d'amidon de pomme de terre montre que l'effet de l'ajout de la matrice liante est plus défavorable à la ouate de cellulose. En effet, les fibres de bois et la ouate de cellulose présentent des conductivités thermiques similaires (Partie 3, chapitre IX) alors que les conductivités des composites sont beaucoup plus fortes dans le cas de la ouate de cellulose. A contrario, l'effet de la matrice amidon sur la conductivité thermique est moins marqué pour les granules de papier. Ceux-ci présentent en effet une conductivité thermique plus élevée que les autres charges alors qu'ils conduisent à une conductivité thermique des composites similaire à celles des composites réalisés avec la fibre de bois.

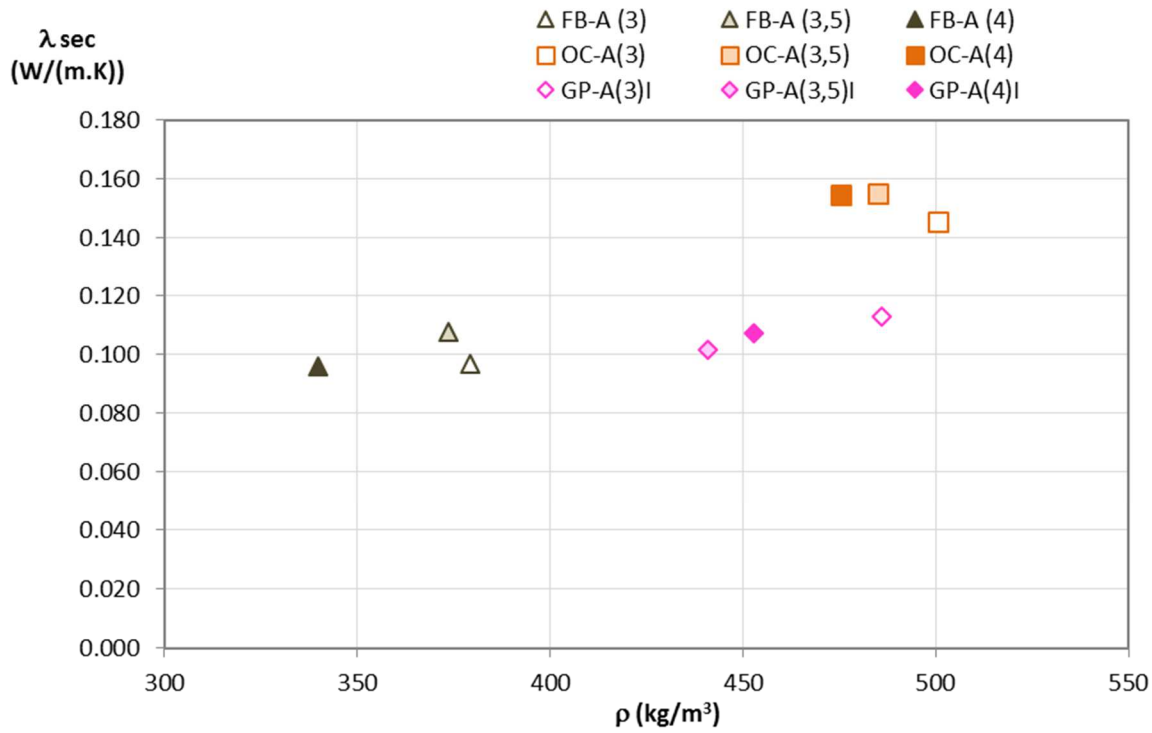


Figure 110: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C, sec) des composites à base d'amidon avec un rapport charge/amidon de 1,5

Entre le point sec et le point (23°C, 50%HR), les évolutions sont similaires quel que soit le type de charge. Les masses volumiques augmentent de 3,4 à 5,2 % alors que les conductivités thermiques augmentent en moyenne de 12,0 %, avec un maximum à 16,2 %.

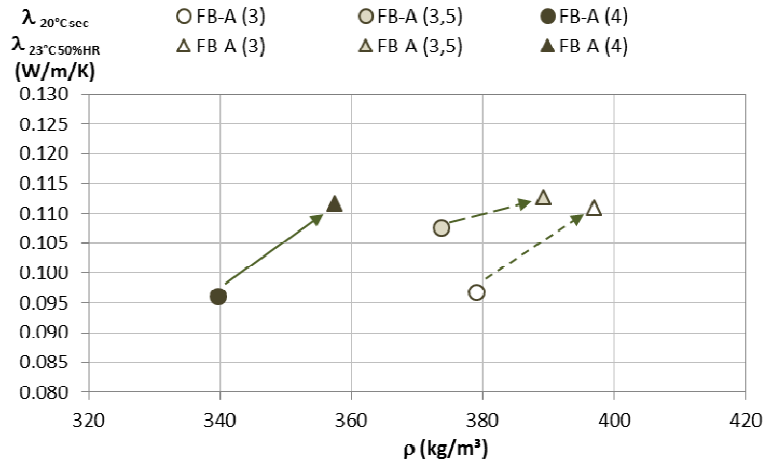


Figure 111: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C, sec) et à (23°C, 50%HR) pour les composites Fibres de bois-amidon de pomme de terre (FB/A=1,5)

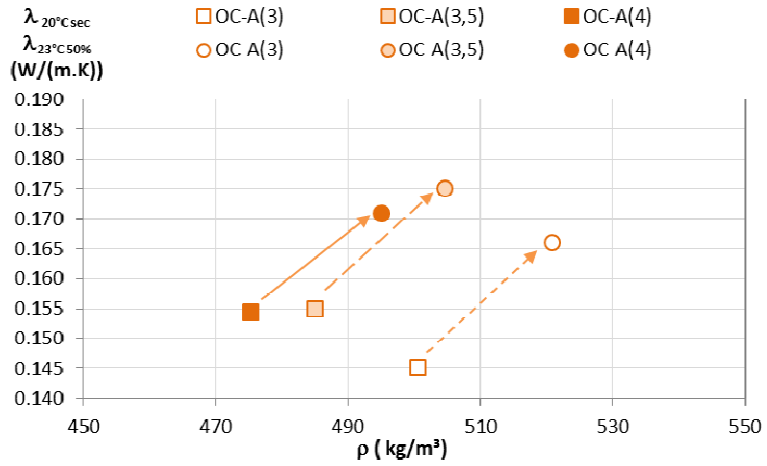


Figure 112: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C, sec) et à (23°C, 50%HR) pour les composites Ouate de cellulose-amidon de pomme de terre (OC/A=1,5)

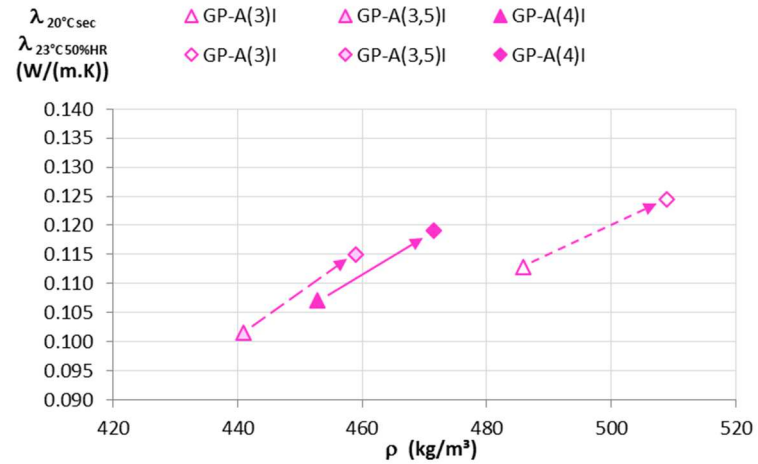


Figure 113: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique au point (20°C,sec) et à (23°C,50%HR) pour les composites Granules de papier-amidon de pomme de terre (GP/A = 1,5)

XI.2.2 Composites à base d'amidon de pomme de terre -Conductivité thermique en fonction de la température, au point sec

La conductivité thermique au point sec des composites à base d'amidon de pomme de terre est faiblement impactée par la température (Figure 114), avec un écart de l'ordre de 7 % entre la valeur minimale et la valeur maximale sur la plage de température considérée.

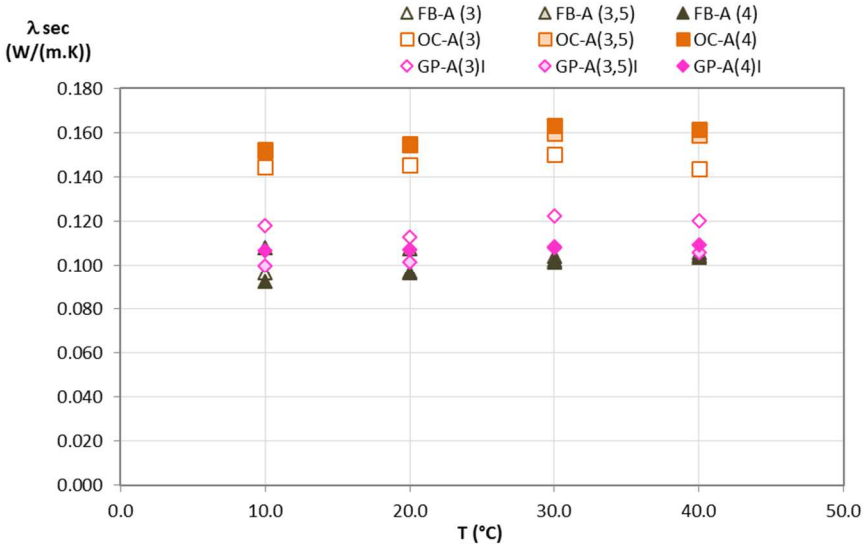


Figure 114: Conductivité thermique en fonction de la température des composites à base d'amidon avec un rapport charge/amidon de 1,5

XI.2.3 Composites à base d'amidon de pomme de terre - Effet du dosage en granules de papier sur la conductivité thermique

La Figure 115 donne l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique pour les composites réalisés avec les différents rapports Eau/Amidon (3 à 4) et deux rapports Granules de papier/Amidon (GP-A I = 1,5 et GP-A II= 4,17).

L'augmentation de la masse volumique induite par l'augmentation du dosage en granules de papier conduit à une augmentation marquée de la conductivité thermique, de 50 à 60 %.

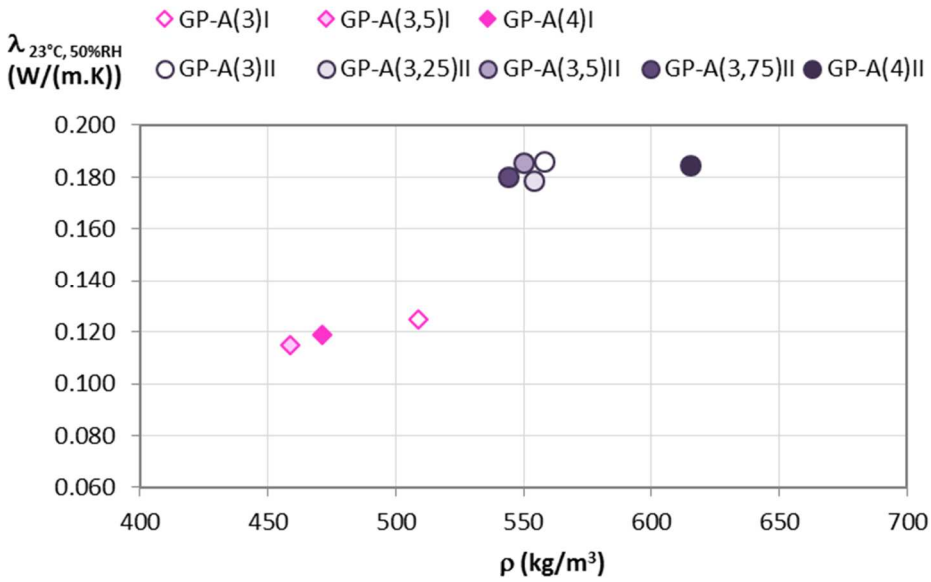


Figure 115: Conductivité thermique des composites à base d'amidon avec un rapport charge/amidon de (GP-A I) = 1,5 et (GP-A II) = 4,17

XI.2.4 Composites à base d'amidon de manioc- Conductivité thermique à 23°C, 50%HR

La Figure 116 présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des composites réalisés avec les deux types d'amidon (A : amidon de pomme de terre, Am : amidon de manioc), différents dosages en granules de papier et en eau.

Pour le même taux de charge, les composites réalisés avec l'amidon de manioc ayant une masse volumique plus faible que celles des composites réalisés avec l'amidon de pomme de terre ont une conductivité thermique plus faible. De plus, pour une masse volumique similaire, la conductivité thermique obtenue avec l'amidon de manioc est plus faible que celle obtenue avec l'amidon de pomme de terre.

D'autre part, pour une masse volumique similaire, les conductivités thermiques obtenue avec l'amidon de manioc et un dosage granules de papier/amidon de 4,17 est supérieure à celle obtenue avec l'amidon de pomme de terre et un dosage granules de papier/amidon de 1,5.

Ainsi, l'amidon de manioc semble plus favorable que l'amidon de pomme de terre d'un point de vue conductivité thermique des composites.

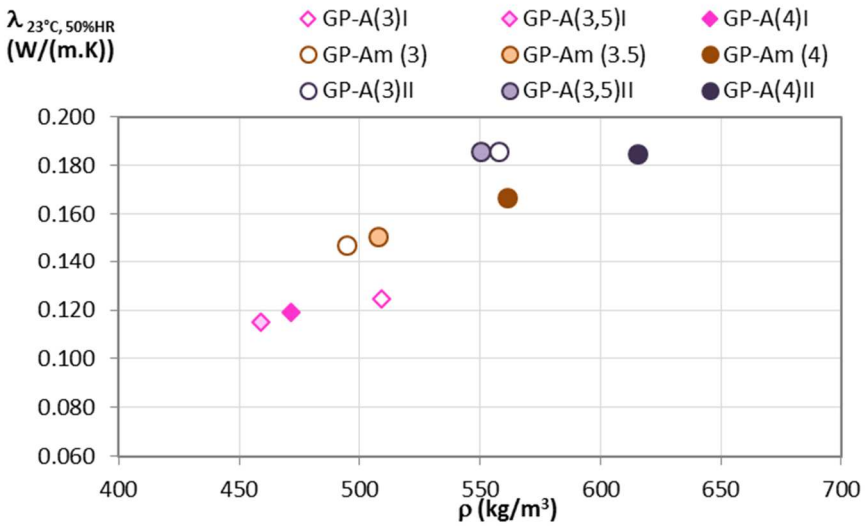


Figure 116: Conductivités thermiques des composites à base d'amidon de pomme de terre et à base d'amidon de manioc en fonction de la masse volumique apparente.

XI.2.5 Comparaison des conductivités thermiques des composites à base d'amidon à la bibliographie.

Les conductivités thermiques rencontrées dans la bibliographie pour des composites à base d'amidon et de charges bio-sourcées sont données dans Tableau XV. Les conductivités thermiques obtenues dans cette étude (0,11 à 0,19 W/(m.K) pour des masses volumiques comprises entre 450 et 620 kg/m^3) sont en adéquation avec les valeurs données dans **(Balčiūnas, 2013)**pour des composites chanvre-amidon. De plus, les résultats donnés dans **(Bourdot *et al.*, 2017)**, **(Tran le, 2010)**, **(Umurigirwa-Vasseur, 2014)**et **(Ali et. Alabdulkarem, 2017)** s'alignent avec le faisceau d'évolution de la conductivité thermique avec la masse volumique obtenu ici.

Tableau XVI : Conductivités thermiques de composites à base d'amidon issues de la bibliographie

Composite	ρ (kg/m^3)	λ (W/(m.K))	Référence
Chanvre-amidon	260-444	0,074-0,112	Balčiūnas *et al.* / Procedia Engineering 57 (2013) 159 – 166
Chanvre-amidon	110-143	0,048-0,063	Bourdot *et al.*, 2017, Energy and buildings
Chanvre-amidon	159-176	0,057-0,062	Tran Le, thèse 2010
Chanvre-amidon	177	0,053	Umurigirwa-Vasseur, 2014
Fibres de palmier dattier – amidon de maïs	176-260	0,049-0,058	M.E. Ali, A. Alabdulkarem / Construction and Building Materials 138 (2017) 276–284

XI.3 Synthèse de l'étude de la conductivité thermique

La Figure 117présente la synthèse des résultats obtenus à 23°C, 50%HR.

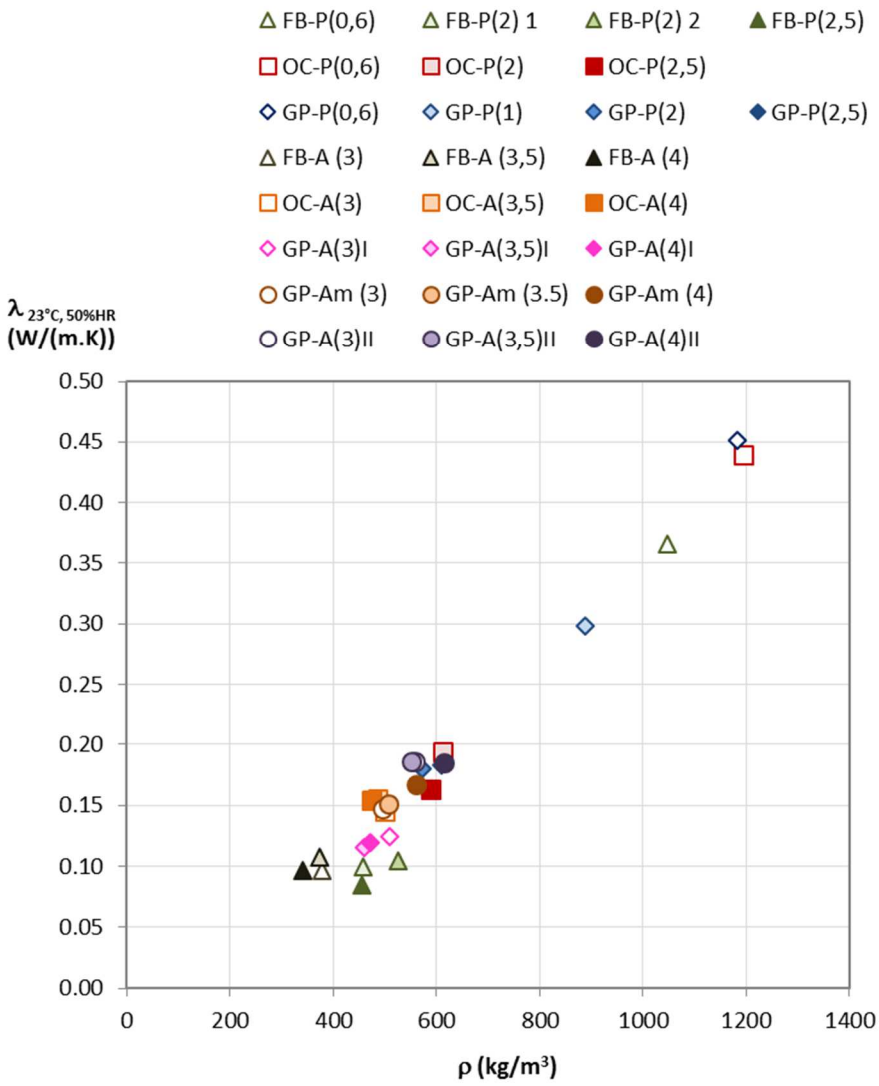


Figure 117: Synthèse des conductivités thermiques des composites à base de plâtre, d'amidon de pomme de terre et d'amidon de manioc.

Les conductivités thermiques obtenues dépendent fortement de la masse volumique des composites. Les composites qui présentent une masse volumique supérieure à 800 kg/m³ sont élaborés à base de plâtre et ont une teneur en charges faible. Leur conductivité est supérieure à 0,3 W/(m.K) et se rapproche de celle du plâtre seul. La majeure partie des composites produits, quelque soit le type de charge ou de liant utilisé, a une masse volumique comprise entre 350 et 620 kg/m³ et une conductivité comprise entre 0,08 et 0,2 W/(m.K), ce qui peut leur permettre de jouer un rôle de correcteur thermique vues les épaisseurs de matériaux prévues pour un usage en faux plafond ou en plaques de parement.

Les conductivités les plus faibles sont obtenues pour les composites à base de fibres de bois pour les deux types de liant. Les composites à l'amidon sont légèrement plus légers (de l'ordre de 350 kg/m³) que ceux fabriqué avec du plâtre (de l'ordre de 420 kg/m³) mais tous présentent une conductivité de l'ordre de 0,1 W/(m.K). Les composites réalisés à base d'amidon et de granules de papier ou de ouate de cellulose avec un taux de charge de 1,5 présentent une conductivité thermique comprise entre 0,1 et 0,15 W/(m.K). Pour la même gamme de masse volumique, ceux réalisés avec du plâtre présentent une conductivité comprise entre 0,15 et 0,2 W/(m.K). Cela peut être lié à la faible conductivité du liant gel d'amidon qui est de 0,04 (W/(m.K)) selon **(Heldman et Singh2008**) comparé à celle du plâtre (0,48 W/(m.K) pour une masse volumique de 1100 kg/m^3 selon les données de la réglementation thermique française).

Pour un même taux de granules de papier, les composites réalisés avec de l'amidon de manioc présentent une conductivité plus faible que ceux réalisés avec l'amidon de pomme de terre. Une étude complémentaire est nécessaire pour vérifier cet effet quel que soit les dosages considérés.

Comparé aux performances des charges seules, les composites présentent des conductivités plus élevées. Quel que soit le type de liant, l'impact est plus élevé pour la ouate de cellulose que pour la fibre de bois ou le granule de papier. Ainsi la ouate de cellulose semble être le type de charge le moins adapté d'un point de vue conductivité thermique pour produire les composites.

Pour les composites granules de papier -amidon, bien que les charges seules aient une conductivité faible, l'augmentation du taux de charge de 1,5 à 4,17 conduit à une augmentation de la conductivité et de la masse volumique contrairement à ce qu'on observe pour d'autres type de granulats **(Mazhoud 2017**). Il est alors probable qu'il existe une quantité optimale de liant, comme montré dans **(Umurigirwa2014).** Des investigations complémentaires peuvent permettre d'identifier la formulation optimale d'un point de vue conductivité thermique. D'autre part, les composites aux granules de papier ayant une masse volumique plus élevée peuvent présenter un intérêt complémentaire d'un point de vue inertie thermique, ce qui reste à étudier.

Sur la plage étudiée (10 à 40 °C) la température n'a pas induit d'effet significatif sur la conductivité à l'état sec. L'étude pourra être complétée en s'intéressant à l'effet de l'humidité à différentes températures.

CHAPITRE XII
Caractérisation mécanique des composites

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des caractérisations mécaniques effectuées sur les plaques de composites réalisées avec différents granulats : fibre de bois (FB), ouate de cellulose (OC) et granules de papier (GP), liés au plâtre ou à l'amidon. Le comportement mécanique est évalué à l'aide d'essais de compression, de flexion trois points et de mesure de la célérité acoustique.

Ces essais permettent de caractériser le type de rupture, d'évaluer les résistances en compression et flexion et également d'évaluer la rigidité des composites.

XII.1 Essai de compression avec chargement monotone

Cet essai permet d'identifier l'allure de courbe déformation-contrainte et d'identifier à partir de cette courbe différentes caractéristiques : la résistance en compression du matériau Rc, le module de Young E tels que définis dans le chapitre IV.

La Figure 118illustre la réalisation de l'essai sur des éprouvettes prismatique GP. La rupture est caractérisée par une fragmentation de l'échantillon. Il est cependant intéressant de constater une certaine cohésion entre les morceaux ainsi produits.

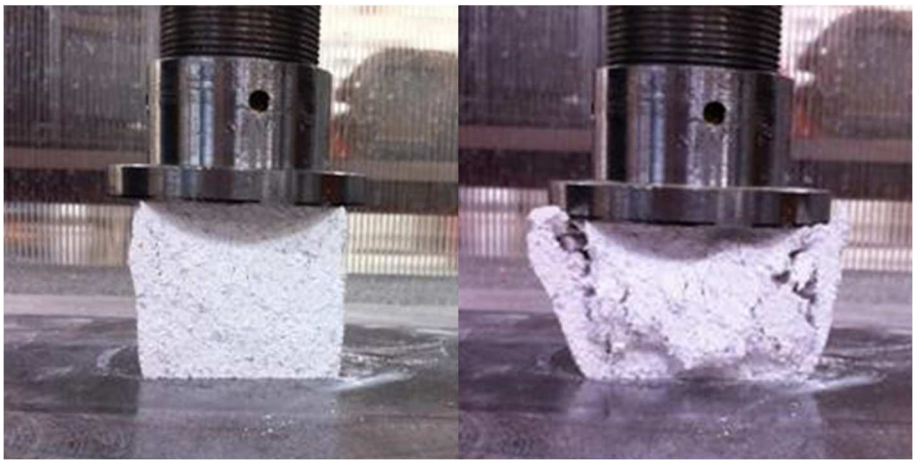


Figure 118: Essai en compression : exemple du composite GP-P (gauche : avant essai, droite : en fin d'essai à une déformation de 0,2 m/m)

XII.1.1 Composites à base de plâtre

Les courbes déformation-contrainte représentatives du comportement des composites à base de plâtre et de fibres de bois, de ouate de cellulose et de granule de papier pour les différents taux de gâchage (rapports E/P) sont données Figure 119 à Figure 121. L'ensemble des courbes correspondant aux différents essais sont placées en annexe de ce mémoire.

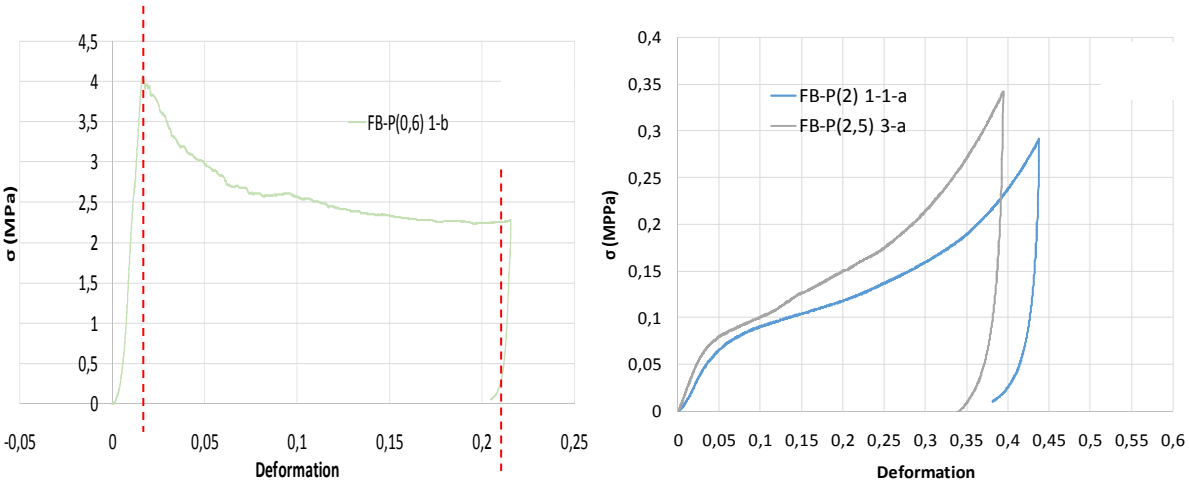


Figure 119: Courbe déformation (m/m) -contrainte (MPa) pour les composites FB-P

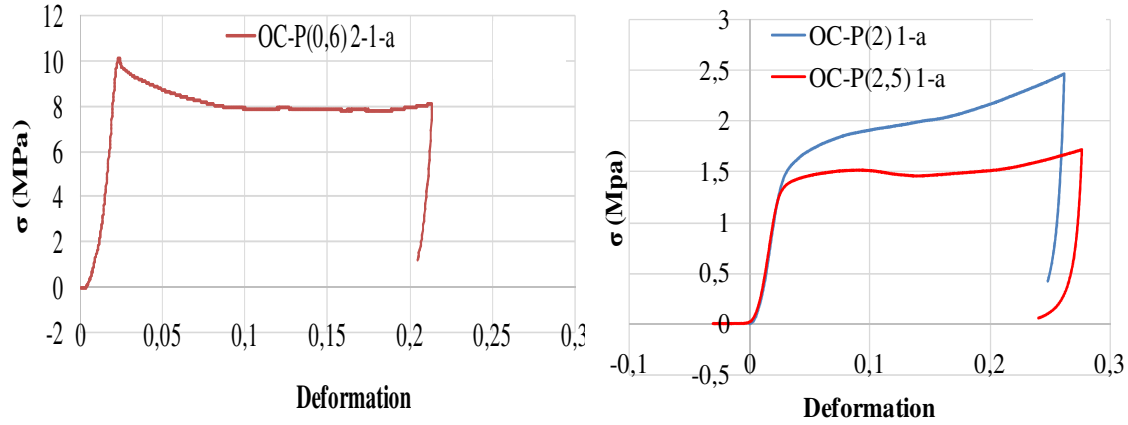


Figure 120: Courbe déformation (m/m) -contrainte (MPa) pour les composites OC-P

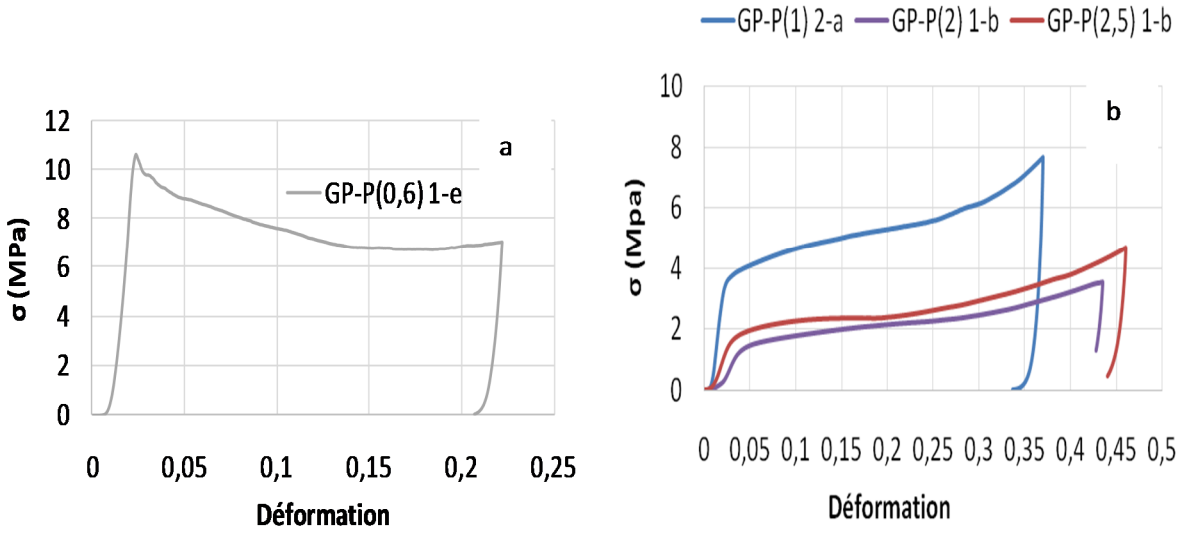


Figure 121: Courbe déformation (m/m) -contrainte (MPa)pour les composites GP-P

Les Figure 119a, Figure 120a et Figure 121a présentent respectivement l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation des composites FB-P; OC-P et GP-P pour un rapport E/P égal 0,6. Les résultats obtenus avec les rapports E/P égaux à 1 ; 2 et 2.5 sont présentés sur les Figure 119 b, Figure 120 b et Figure 121b.

Les courbes correspondant à E/P=0,6 sont caractérisées par un pic de contrainte obtenu à des faibles déformations (inférieures à 10%), caractéristique d'un comportement plutôt fragile de la pâte de liant, conduisant à la fragmentation de l'échantillon. La résistance en compression est alors associée à ce pic de contrainte. Pour cette valeur de E/P la pâte de liant est assez compacte et sa rupture conduit à une fracture franche. L'effet des charges se traduit par un comportement post-pic caractérisé par un niveau de résistance qui reste très élevé, même pour des déformations de 20%. La résistance post-pic est voisine de 70% de la résistance en compression. L'augmentation de la contrainte dans la zone terminale de la courbe n'est certainement pas caractéristique du comportement. En effet, l'élancement faible de l'éprouvette, déformée axialement à 20%, peut conduire à des effets de rigidification.

Il faut également constater que la pente de la courbe à la décharge en fin d'essai reste assez comparable à la pente de la courbe de chargement aux petites déformations. Le module d'Young ainsi identifié semble peu évoluer. Les déformations plastiques après essai peuvent être considérables.

Dans le cas des rapports E/P supérieurs à 0,6, les courbes sont globalement toujours croissantes et le pic de contrainte aux faibles déformations n'est pas identifié. L'allure des courbes est caractéristique d'un comportement essentiellement compactant entraînant des déformations plastiques importantes. Après un chargement évoquant un comportement élastique, les courbes présentent un changement de pente qui est associable à la résistance en compression. Au-delà, la matrice solide de l'échantillon se compacte.

Au déchargement, les pentes des courbes sont systématiquement supérieures à celles des chargements initiaux. Ce changement de module est une conséquence directe de la compaction durant l'essai.

Le module d'Young associé à la pente initiale de la courbe diminue lorsque E/P augmente, la matrice de gypse moins compacte conduisant à une déformabilité élastique plus importante.

La résistance en compression (changement de pente de la courbe) intervient systématiquement pour des déformations inférieures à 10%. La résistance en compression s'avère nettement influencée par E/P. Plus la matrice de gypse est compacte, plus la résistance en compression est élevée.

Lorsque le rapport E/P est faible, la concentration du plâtre dans la pâte est élevée, cela augmente la rigidité de la matrice durcie et accentue le contraste de propriétés entre les constituants. Or, l'effet de ce contraste est d'autant plus visible que la concentration en liant par rapport aux particules est élevé. Cela se traduit par une résistance élevée du matériau. L'hydratation du plâtre mobilisant toujours la même proportion d'eau, l'eau excédentaire induit une porosité pénalisante pour la rigidité et la résistance.

Ce type de résultat est similaire à celui observé dans certains matériaux très poreux soumis à une compression ou contrainte d'indentation (**Brigitte de Bruijn, *et al.*2009), (Tran le 2011).**

Les valeurs moyennes des différents paramètres de comportement obtenues lors des essais de compression réalisés sur les différentes éprouvettes d'une même formulation sont rassemblées dans le Tableau XVII.

Certaines formulations sont testées sur un nombre d'échantillons très limités, ce qui peut induire des valeurs d'écart-type très importantes. Ces données sont conservées à titre indicatif mais s'avèrent difficilement exploitables.

Tableau XVII: Caractéristiques moyennes identifiées lors des essais de compression – liant plâtre

		ρ(kg/m^3)	Rc (MPa)	E (MPa)	def à Rc
FB-P(0,6)	moyenne	1053,17	3,81	365,57	0,02
	Ecart type	73,85	1,95	202,00	0,01
	Coeff Var	0,07	0,51	0,55	0,45
FB-P(2)1	moyenne	431,75	0,08	2,45	0,05
	Ecart type	27,58	0,02	1,00	0,00
	Coeff Var	0,06	0,22	0,41	0,06
FB-P(2)2	moyenne	497,50	0,10	2,34	0,05
	Ecart type	36,67	0,01	0,21	0,01
	Coeff Var	0,07	0,14	0,09	0,11
FB-P(2,5)	moyenne	444,00	0,09	2,80	0,04
	Ecart type	11,17	0,02	0,45	0,01
	Coeff Var	0,03	0,26	0,16	0,16
OC-P(0,6)	moyenne	1175,33	9,10	690,67	0,02
	ecart type	12,34	1,76	130,15	0,00
	Coeff Var	0,01	0,19	0,19	0,10
OC-P(2)	moyenne	611,00	1,19	53,55	0,03
	ecart type	32,06	0,25	15,06	0,01
	Coeff Var	0,05	0,21	0,28	0,18
OC-P(2,5)	moyenne	565,50	1,34	62,61	0,04
	ecart type	11,36	0,11	22,57	0,01
	Coeff Var	0,02	0,08	0,36	0,28
GP-P(0,6)	moyenne	1181,00	10,15	762,56	0,02
	ecart type	24,71	0,93	109,72	0,00
	coeff var	0,02	0,09	0,14	0,12
GP-P(1)	moyenne	888,25	3,41	287,23	0,02
	ecart type	452,43	1,56	135,27	0,04
	coeff var	0,51	0,46	0,47	1,89
GP-P(2)	moyenne	569,25	1,19	48,51	0,05
	ecart type	228,28	0,40	45,09	0,75
	coeff var	0,40	0,33	0,93	16,24
GP-P(2,5)	moyenne	588,50	1,42	61,80	0,04
	ecart type	27,68	0,17	18,46	0,01
	coeff var	0,05	0,12	0,30	0,18

XII.1.1.1 Influence de la formulation sur la résistance en compression

La comparaison des performances obtenues avec les différentes charges doit être évaluée en prenant en compte les modifications de masse volumique induite par la variation du rapport E/P. Les résistances en compression des différents mélanges sont présentées sur la Figure 122 en fonction de la masse volumique.

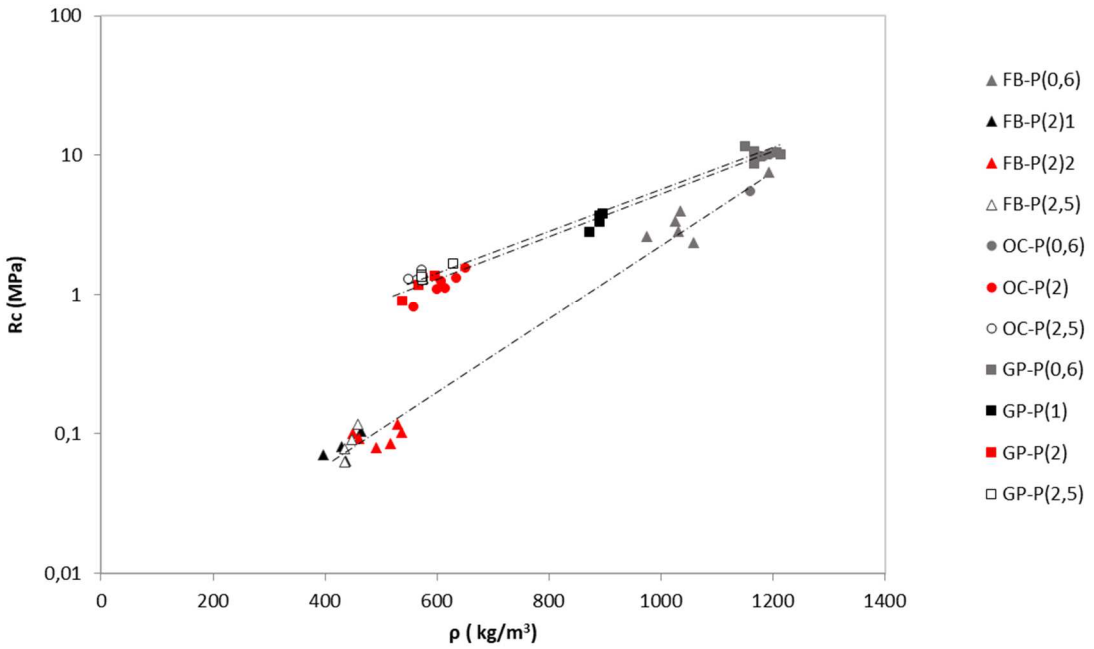


Figure 122: Evolution de la résistance en compression en fonction de la masse volumique pour les composites au plâtre

Les courbes de tendances identifiées pour les trois types de charges sont globalement linéaires dans un diagramme semi logarithmique ce qui se traduit par une évolution exponentielle de la résistance en fonction de la masse volumique.

La fibre de bois présente une résistance bien inférieure à celles des autres types de charges. Les tendances associées aux granules de papier et à la ouate de cellulose s'avèrent très voisines.

Les valeurs de Rc peuvent être comparées à des valeurs de référence obtenues dans la même gamme de densité sur des composites différents. (**Cerezo, 2005)** signale pour une formulation de béton de chanvre très dosée en liant Rc = 10 MPa et pour une formulation toit Rc = 0,2 MPa. Pour des E/P élevés, la contrainte des composites est supérieure à 10MPa (GP-P) pour des masses volumiques cependant supérieures à celles de béton de chanvre. Pour **(De Bruijn *et al* 2009)** les valeurs de Rc sont comprises entre 0,15 et 0,83 MPa pour le béton de chanvre-chaux dans une gamme courante de masse volumique (250 à 450 kg/m^3). Les

composites formulés avec la ouate de cellulose et les granules de papier sont au-dessus de cette tendance. Par contre la fibre de bois reste moins performante.

Une valeur de Rc de 10 MPa peut être comparée à celle de mortiers pâte de papier–plâtre élaboré par **(Agullo *et al* 2006)** qui obtient Rc = 6,5MPa. Ce résultat reste supérieur à celui obtenu avec des rapports E/P égaux à 1 ; 2 et 2,5 pour lesquels la masse volumique diminue rapidement.

XII.1.1.2 Influence de la formulation sur le module d'Young

La Figure 123présente l'évolution du module d'Young en fonction de la masse volumique des composites. A l'image des résultats obtenus pour la résistance en compression, les courbes de tendances identifiées pour les trois types de charges sont globalement linéaires dans un diagramme semi logarithmique ce qui se traduit par une évolution exponentielle de la résistance en fonction de la masse volumique.

La fibre de bois présente une raideur bien inférieure à celles des autres types de charges. Les tendances associées aux granules de papier et à la ouate de cellulose s'avèrent très voisines.

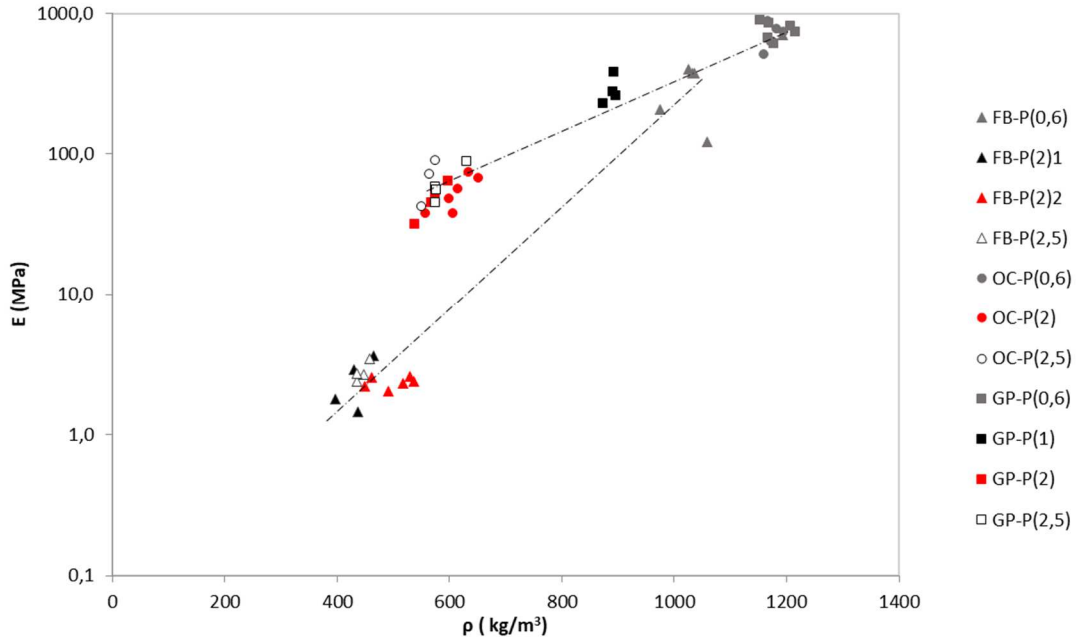


Figure 123: Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les composites au plâtre.

Une telle évolution du module d'Young est confirmée dans le cas des études sur le béton de chanvre de **(Cerezo, 2005)**. Elle a montré que lorsque la concentration en liant augmente le module est voisin de 100 MPa à 160 MPa et que pour les faibles dosages en liant,

le module se limite à 1 MPa à 3 MPa. Ces valeurs sont globalement inférieures à celles obtenues.

Le dosage en liant dans le matériau influence la valeur du module d'Young tout en affectant également la résistance en compression. La relation entre ces deux paramètres est illustrée sur la Figure 124. On identifie une tendance linéaire sur cette courbe qui s'avère quasiment universelle pour le liant testé, quelle que soit la charge utilisée.

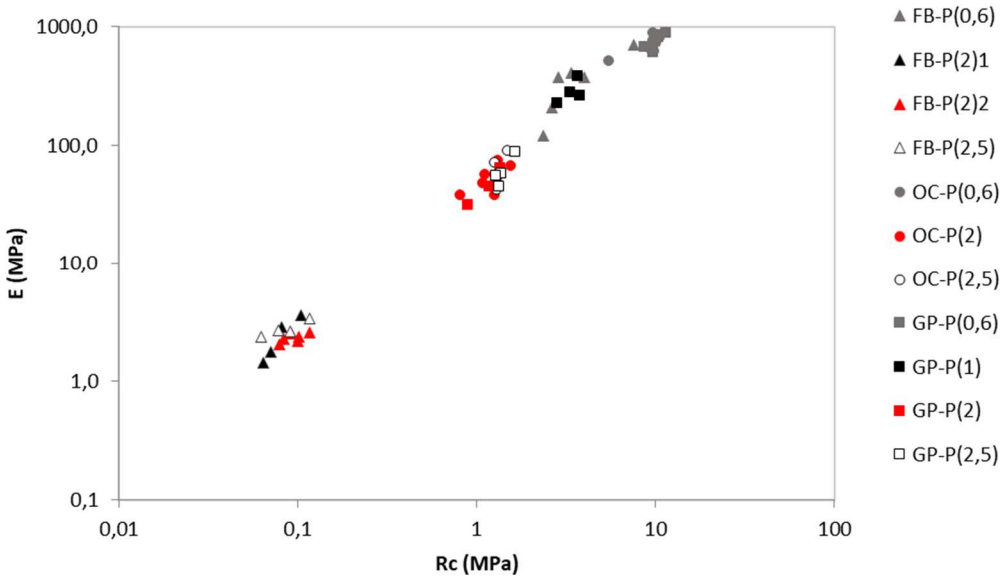


Figure 124: Evolution du module d'Young en fonction de la résistance en compression pour tous les composites formulés avec du plâtre.

XII.1.2 Composites à base d'amidon de pomme de terre

Les Figure 125, Figure 126 et Figure 127 présentent les courbes déformation-contrainte représentatives du comportement des composites à base d'amidon et de fibres de bois, de ouate de cellulose et de granule de papier pour les différents taux de gâchage (rapports E/A) et différents taux de charges C/A.

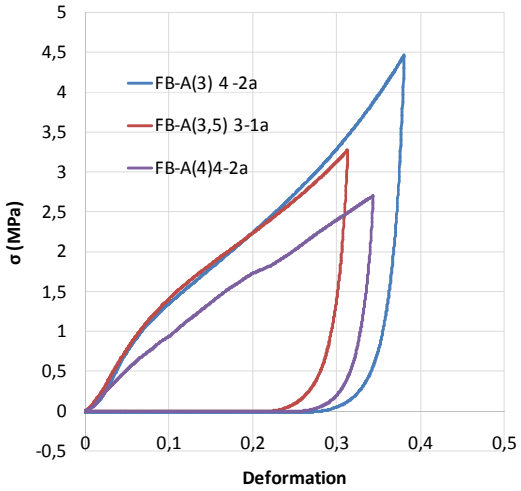


Figure 125: Courbe déformation (m/m) -contrainte (MPa) pour les composites FB-A formulés avec différents E/A (FB/A=1,5).

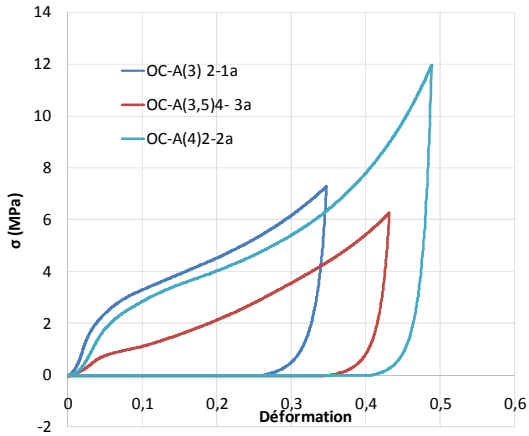


Figure 126: Courbe déformation (m/m) -contrainte (MPa) pour les composites OC-A formulés avec différents E/A (OC/A=1,5)

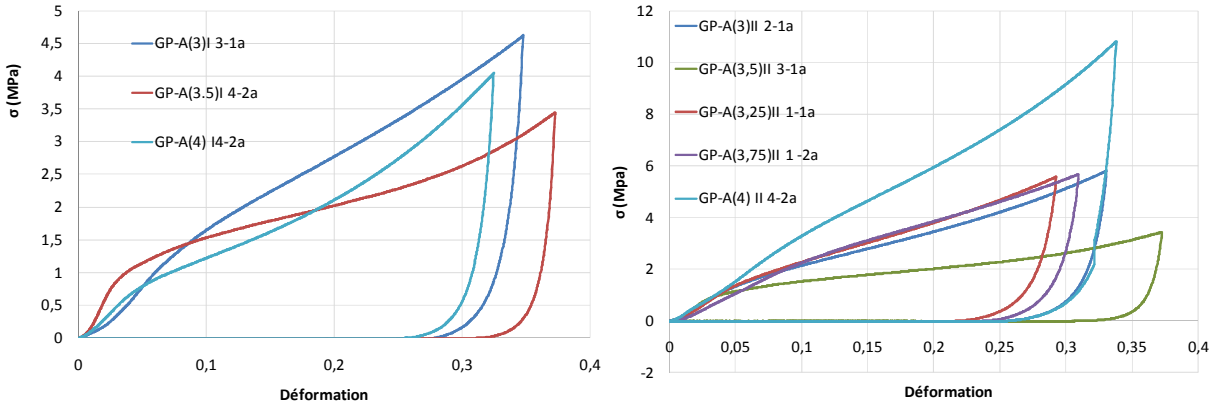


Figure 127: Courbe déformation (m/m) -contrainte (MPa) des composites GP-A formulés avec différents E/A : a) GP/A=1,5 ; b) GP/A=4,17

L'allure des courbes déformation-contrainte des composites formulés avec l'amidon est semblable à celle des courbes obtenues avec les composites à base de plâtre avec des rapports E/P élevés (E/P de 1; 2 et 2,5). Ces composites à base d'amidon présentent donc un comportement compactant sans présenter une réelle rupture avec fragmentation. Les courbes correspondant aux différents essais sont placées en annexe de ce mémoire.

La résistance en compression identifiée sur ces courbes est globalement associée à une déformation plus élevée que celle obtenue en présence de plâtre : 0,05 au lieu de 0,02 typiquement. Le liant de ces composites est donc plus souple.

Pour un rapport C/A donné, l'augmentation de E/A se traduit globalement par une baisse des résistances.

Les valeurs moyennes des différents paramètres de comportement obtenues lors des essais de compression réalisés sur les différentes éprouvettes d'une même formulation sont rassemblées dans le Tableau XVIII. La variabilité des paramètres apparaît beaucoup plus importante que dans le cas des composites à base de plâtre.

Certaines formulations sont testées sur un nombre d'échantillons très limités, ce qui peut induire des valeurs d'écart-type très importantes. Ces données sont conserves à titre indicatif mais s'avèrent difficilement exploitables.

Tableau XVIII: Caractéristiques moyennes identifiées lors des essais de compression – Liant amidon

		ρ (kg/m^3)	Rc (Mpa)	E (MPa)	def à Rc
FB-A(3)	moyenne	391,40	0,71	16,84	0,05
	Ecart type	12,05	0,20	2,35	0,01
	Coeff de Var	0,03	0,28	0,14	0,17
FB-A(3,5)	moyenne	381,50	1,26	20,97	0,08
	Ecart type	2,53	0,12	7,94	0,03
	Coeff de Var	0,01	0,10	0,38	0,35
FB-A(4)	moyenne	349,47	0,97	15,67	0,08
	Ecart type	3,93	0,29	4,03	0,03
	Coeff de Var	0,01	0,30	0,26	0,34
OC-A(3)	moyenne	509,11	1,80	52,32	0,06
	Ecart type	31,05	0,95	24,98	0,02
	Coeff de Var	0,06	0,53	0,48	0,39
OC-A(3,5)	moyenne	486,10	1,97	83,39	0,04
	Ecart type	44,21	1,80	71,07	0,01
	Coeff de Var	0,09	0,92	0,85	0,23
OC-A(4)	moyenne	462,18	1,54	42,35	0,05
	Ecart type	31,22	0,68	10,10	0,01
	Coeff de Var	0,07	0,44	0,24	0,23
GP-A (2,86)	moyenne	556,00	2,80	92,79	0,06
	ecart type	16,85	0,26	40,17	0,02
	coeff var	0,03	0,09	0,43	0,35
GP-A(3)I	moyenne	479,06	0,87	28,98	0,04
	Ecart type	14,00	0,46	18,24	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,53	0,63	0,37
GP-A(3,5)I	moyenne	432,72	1,18	34,11	0,05
	Ecart type	22,42	0,48	16,65	0,02
	Coeff de Var	0,05	0,41	0,49	0,42
GP-A(4)I	moyenne	461,54	0,73	18,91	0,06
	Ecart type	13,75	0,15	13,80	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,21	0,73	0,37
GP-A(3)II	moyenne	541,04	1,41	39,29	0,05
	Ecart type	16,28	0,65	15,89	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,46	0,40	0,39
GP-A(3,25)II	moyenne	552,01	1,42	42,71	0,04
	Ecart type	12,18	0,76	17,67	0,01
	Coeff de Var	0,02	0,53	0,41	0,27
GP-A(3,5)II	moyenne	544,05	1,07	32,59	0,04
	Ecart type	11,95	0,40	3,33	0,02
	Coeff de Var	0,02	0,38	0,10	0,37
GP-A(3,75)II	moyenne	552,31	1,74	32,84	0,07
	Ecart type	19,32	0,79	5,61	0,03
	Coeff de Var	0,03	0,45	0,17	0,41
GP-A(4)II	moyenne	605,91	1,88	45,98	0,05
	Ecart type	18,60	0,78	21,64	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,42	0,47	0,41

XII.1.2.1 Influence de la formulation des composites sur la résistance en compression

Les résistances en compression des différents mélanges sont présentées sur la Figure 128 en fonction de la masse volumique, en superposition des données obtenues pour les composites formulés avec le plâtre.

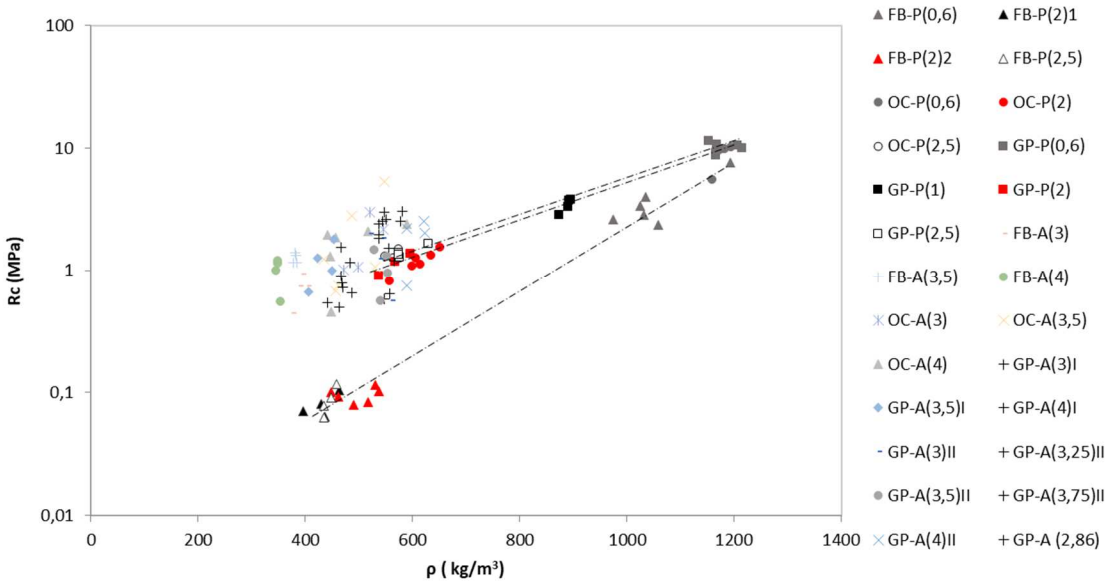


Figure 128: Evolution de la résistance en compression en fonction de la masse volumique (composites P et A).

Les points caractéristiques des composites à base d'amidon ne permettent pas d'identifier clairement des tendances d'évolution de la résistance en compression en fonction de la masse volumique. Le nuage de points ne permet pas de facilement découpler les différentes charges (FB, OC et GP). On peut noter que les points sont globalement plus dispersés que pour les composites P. De plus, la gamme de rapport E/A exploitée ne permet pas de fortement modifier la masse volumique des composites qui reste comprise entre 300 et 600 kg/m^3. Globalement, à masse volumique donnée, l'amidon permet d'obtenir des résistances comparables à celles des composites GP-P ou OC-P.

Comme le montrent les valeurs moyennes du Tableau XVIII, une augmentation de C/A induit une augmentation de la masse volumique. Un tel résultat est directement induit par la faible masse volumique apparente du liant durci par rapport aux granules de papier.

Les résistances obtenues sur les composites à base d'amidon peuvent être comparées à celles identifiées dans la bibliographie. Ainsi, **Umurigirwa (2014)** a obtenu des valeurs de résistance à la compression de 0,4 MPa pour le béton de chanvre-amidon brut et 0,8 MPa pour

le même béton après le traitement des fibres. Ces valeurs restent en deçà des résultats obtenus ici.

XII.1.2.2 Influence de la composition sur le module d'Young

La Figure 129 présente l'évolution du module d'Young des composites à base d'amidon en fonction de la masse volumique des composites. Les données sont superposées à celles correspondant aux composites à base de plâtre. A l'image des résultats obtenus pour la résistance en compression, il n'est pas possible d'identifier clairement des courbes de tendances.

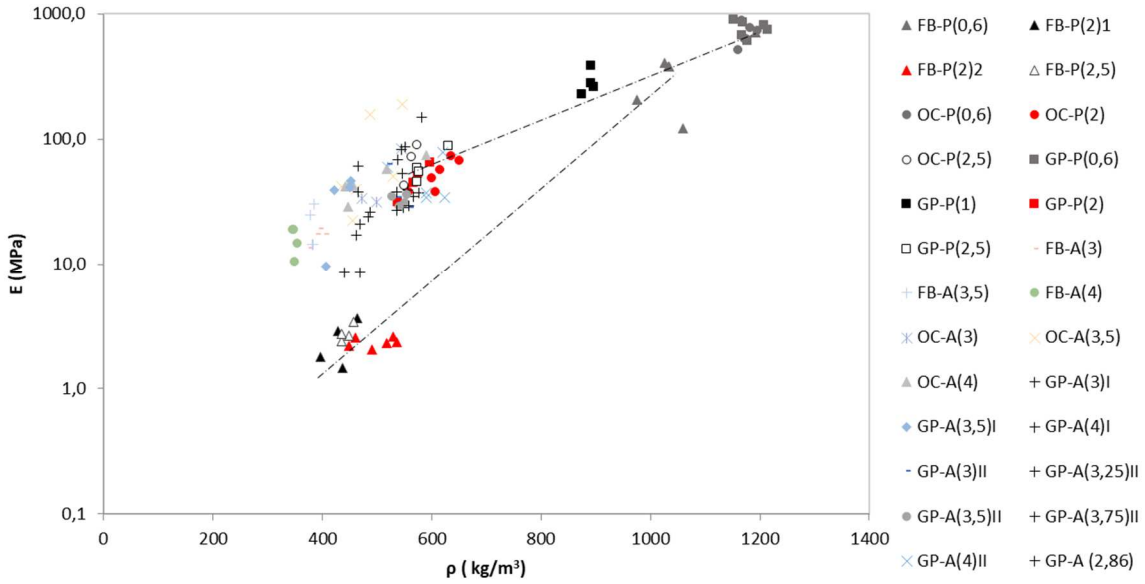


Figure 129: Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique (composites P et A).

Le nuage de points ne permet pas de facilement découpler les différentes charges (FB, OC et GP). On peut noter que les points sont globalement plus dispersés que pour les composites P et se groupent globalement autour de la tendance identifiée pour les composites OC-P et GP-P.

La relation entre résistance en compression et module d'Young est illustrée sur la

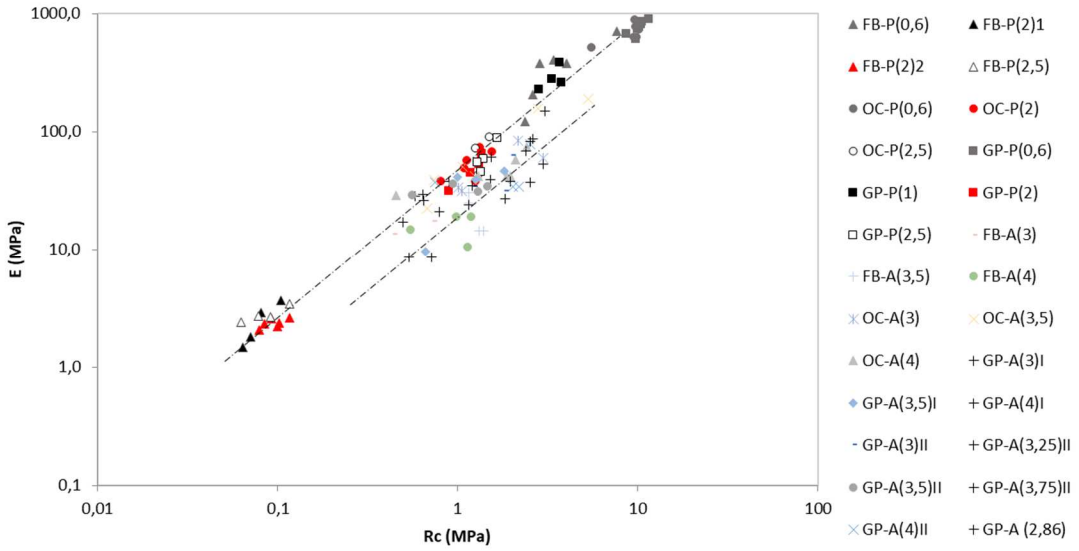


Figure 130. Les points caractéristiques du liant amidon restent assez dispersés mais sont globalement en dessous de ceux des composites à base de plâtre. Une tendance linéaire peut être associée. A résistance en compression identique, un composite formulé avec de l'amidon sera donc plus souple qu'un composite formulé avec du plâtre, ce qui est assez intuitif.

Sachant qu'une augmentation de GP/A conduit à une augmentation des résistances, elle est également coordonnée à une augmentation de la rigidité du composite.

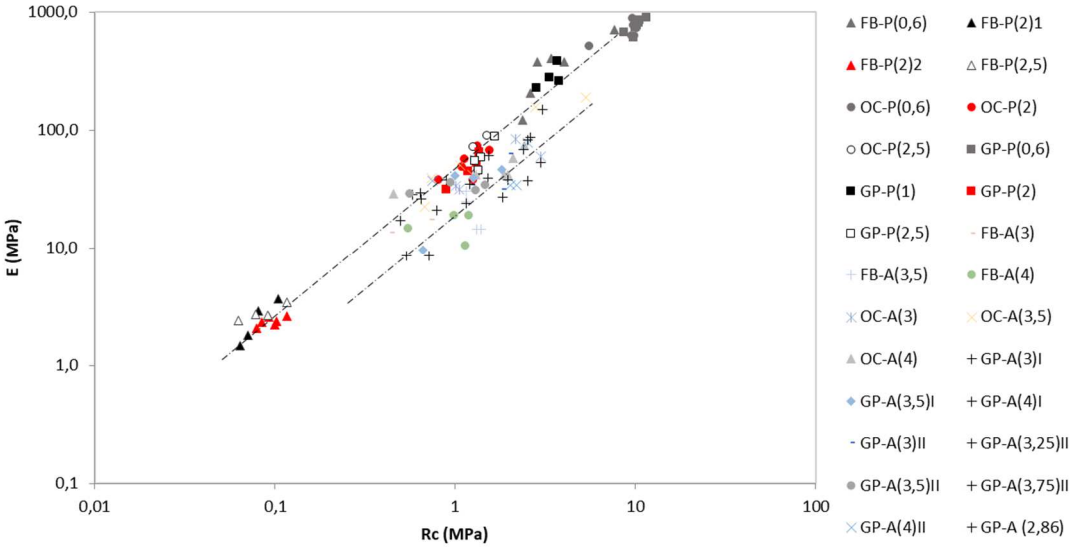


Figure 130: Evolution du module d'Young en fonction de la résistance en compression pour tous les composites formulés avec du plâtre et de l'amidon de pomme de terre.

XII.2 Essai de flexion 3 points

Les essais de flexion réalisés avec un montage déplacé à une vitesse de 0,05 mm/s sont caractérisés par une certaine ductilité des composites induite par un effet de fibrage ralentissant la fragmentation de l'échantillon (Figure 131). L'essai permet d'estimer la résistance en traction (par flexion) Rt.

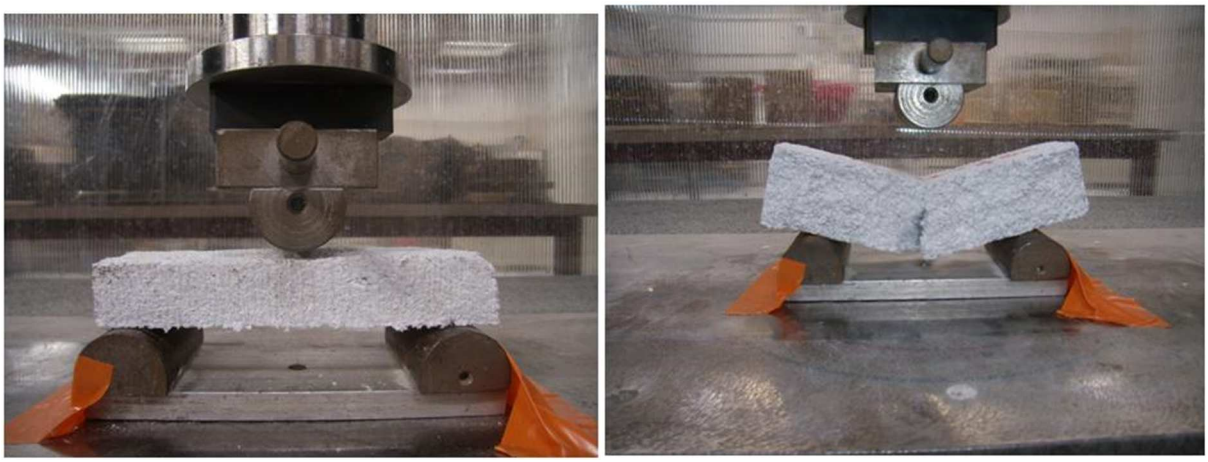


Figure 131: Essai en flexion 3 points (exemple des composites GP).

XII.2.1 Composites à base de plâtre

Les courbes représentatives de l'évolution de l'effort imposé lors de l'essai de flexion en fonction du déplacement de l'indenteur central, obtenues pour différentes formulations sont représentées dans les Figure 132, Figure 133 et Figure 134. L'ensemble des courbes d'essais est présenté en annexe de ce mémoire.

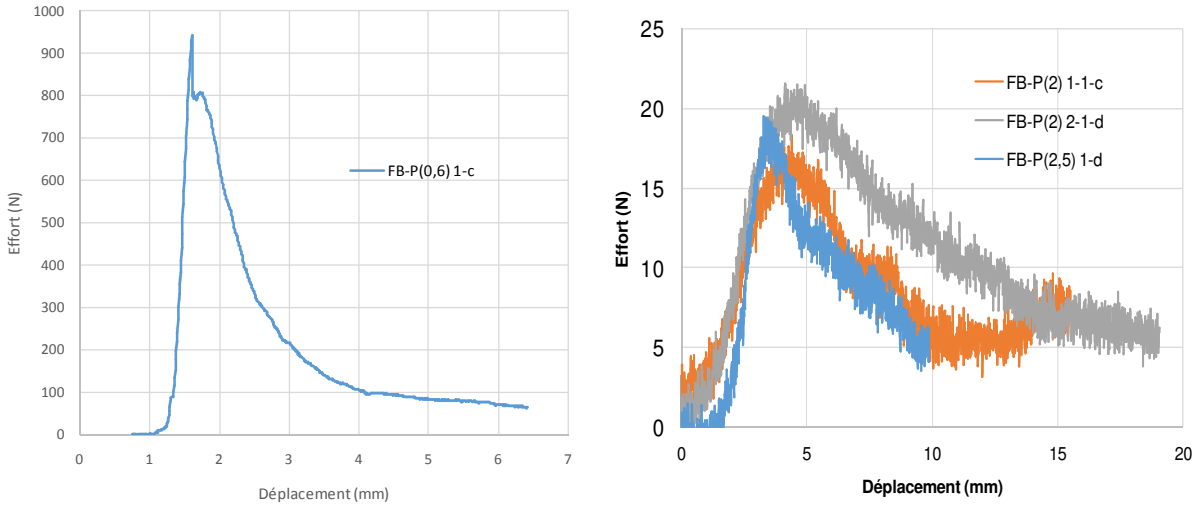


Figure 132: Essai de flexion sur les composites FB-P

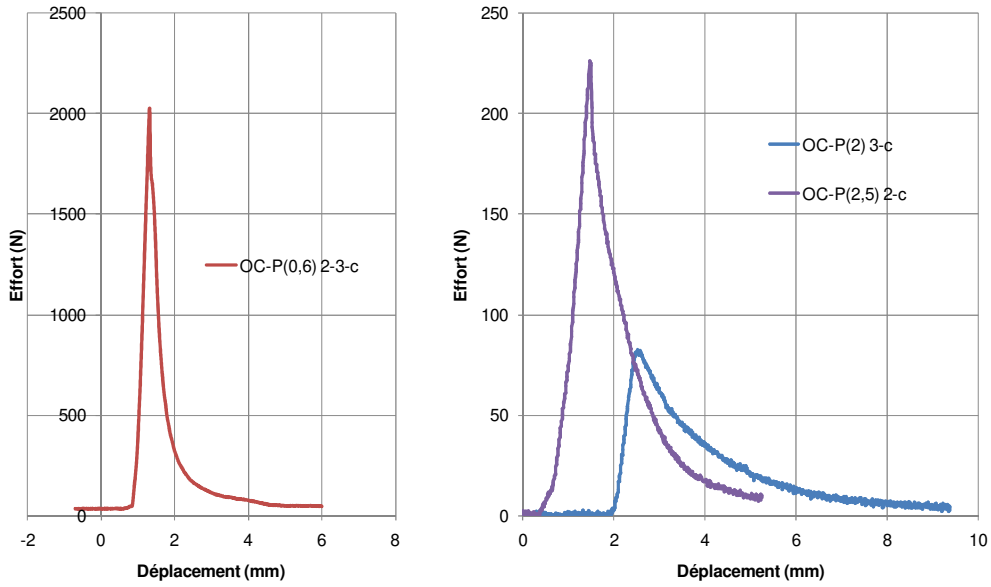


Figure 133: Essai de flexion sur les composites OC-P

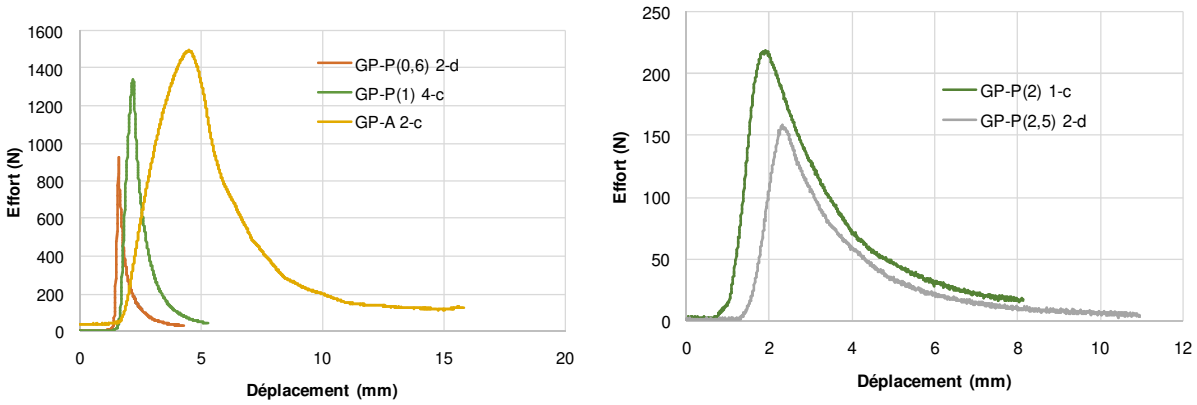


Figure 134: Essai de flexion sur les composites GP-P

Toutes les courbes présentent la même allure et se décomposent en deux parties : une partie linéaire avant le pic et une partie décroissante moins linéaire après le pic.

La première partie peut être associée au comportement élastique linéaire du composite. La rupture de la matrice du composite correspond au pic. Au-delà, on observe une chute brutale de la résistance. En présence de charges assurant le rôle de couture entre les deux parties de l'échantillon, l'effort rémanent dans la zone post-pic est plus ou moins important. Sans charges, le comportement serait fragile.

Globalement, les composites testés ont un comportement assez ductile mais n'ont pas une grande capacité à résister aux sollicitations qui leur sont imposées.

L'influence du rapport E/P ne peut être lue directement sur ces courbes, les dimensions des échantillons n'étant pas systématiquement identiques. Les valeurs moyennes des résistances en traction par flexion obtenues sont présentées dans le Tableau XIX.

Tableau XIX: Résistance en traction par flexion – Liant plâtre

		ρ(kg/m^3)	Rt (MPa)
FB-P(0,6)	moyenne	1026,80	1,51
	Ecart type	52,96	0,80
	Coeff Var	0,05	0,53
FB-P(2)1	moyenne	442,00	0,07
	Ecart type	22,11	0,02
	Coeff Var	0,05	0,27
FB-P(2)2	moyenne	507,33	0,16
	Ecart type	14,74	0,07
	Coeff Var	0,03	0,43
FB-P(2,5)	moyenne	441,67	0,11
	Ecart type	14,57	0,02
	Coeff Var	0,03	0,20
OC-P(0,6)	moyenne	1184,20	4,88
	ecart type	11,14	0,90
	Coeff Var	0,01	0,18
OC-P(2)	moyenne	615,80	0,56
	ecart type	16,12	0,19
	Coeff Var	0,03	0,33
OC-P(2,5)	moyenne	569,25	0,58
	ecart type	20,53	0,08
	Coeff Var	0,04	0,13
GP-P(0,6)	moyenne	1157,80	3,58
	ecart type	6,00	0,71
	coeff var	0,01	0,20
GP-P(1)	moyenne	901,67	2,79
	ecart type	25,01	0,62
	coeff var	0,03	0,22
GP-P(2)	moyenne	568,33	0,73
	ecart type	23,59	0,22
	coeff var	0,04	0,30
GP-P(2,5)	moyenne	597,00	1,08
	ecart type	17,61	0,09
	coeff var	0,03	0,08

XII.2.1.1 Influence de la formulation sur la résistance en traction

Les résistances en traction des différents mélanges sont présentées sur la Figure 135 en fonction de la masse volumique. Les courbes de tendances identifiées pour les trois types de charges sont globalement linéaires dans un diagramme semi logarithmique ce qui se traduit par une évolution exponentielle de la résistance en fonction de la masse volumique.

La fibre de bois présente une résistance en traction inférieure à celles des autres types de charges. Les tendances associées aux granules de papier et à la ouate de cellulose s'avèrent assez voisines.

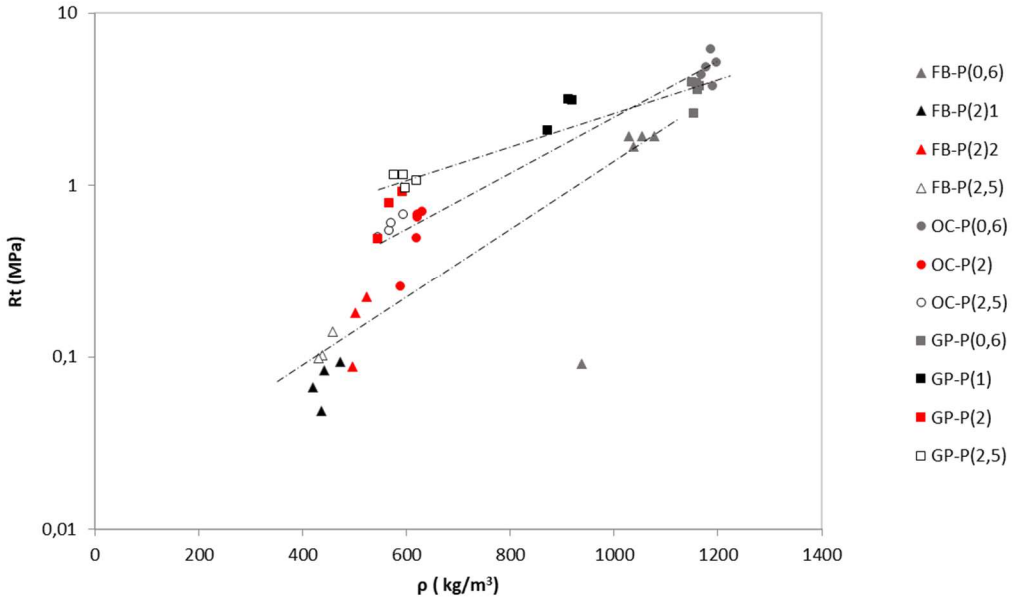


Figure 135: Variation de la résistance en traction en fonction du type de charge et de la formulation (E/P)

XII.2.1.2 Relation entre Rc et Rt

Les résultats obtenus en traction peuvent être couplés à ceux obtenus en compression. La Figure 136 permet d'analyser l'évolution de la résistance en compression en fonction de la résistance en traction. Une tendance linéaire en repère semi logarithmique est visible. Les points caractéristiques des composites GP-P et OC-P restent sur une même tendance alors que les composites FB-P sont caractérisés par une tendance dont la pente est largement plus forte.

Le comportement des fibres de bois induit donc un comportement moins symétrique en compression et traction que les autres charges.

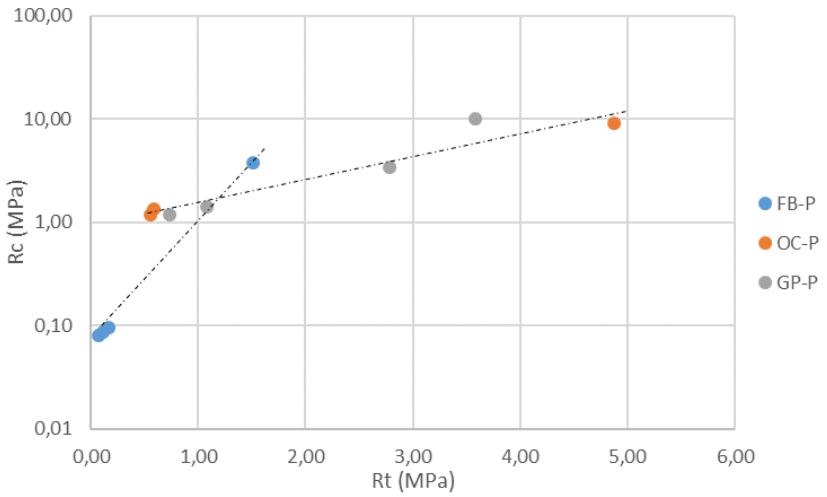


Figure 136: Variation de la résistance en compression traction en fonction de la résistance en traction pour les composites au plâtre avec les différents types de charge.

XII.2.2 Composites à base d'amidon

Les courbes représentatives de l'évolution de l'effort imposé lors de l'essai de flexion en fonction du déplacement de l'indenteur central, obtenues pour différentes formulations sont représentées dans les Figure 137, Figure 138 et Figure 139. L'ensemble des courbes d'essais est présenté en annexe de ce mémoire.

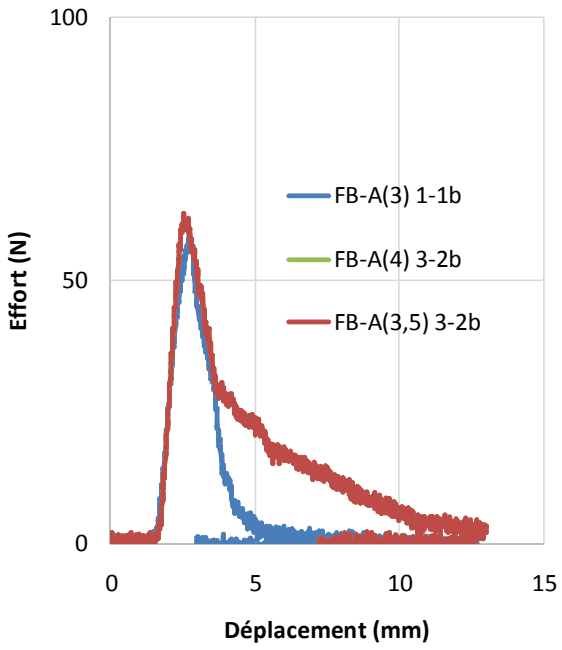


Figure 137: Courbe de l'essai en traction en fonction du déplacement pour les composites FB-A

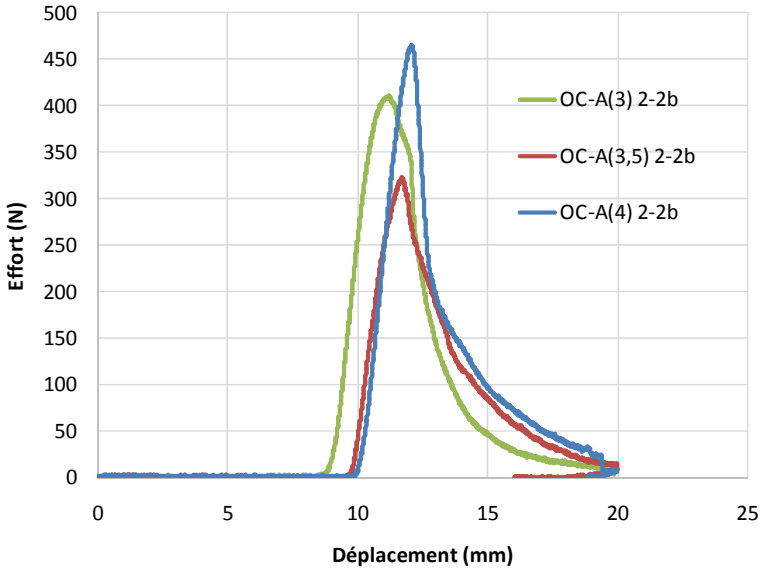


Figure 138: Courbe de l'essai en traction en fonction du déplacement pour les composites OC-A

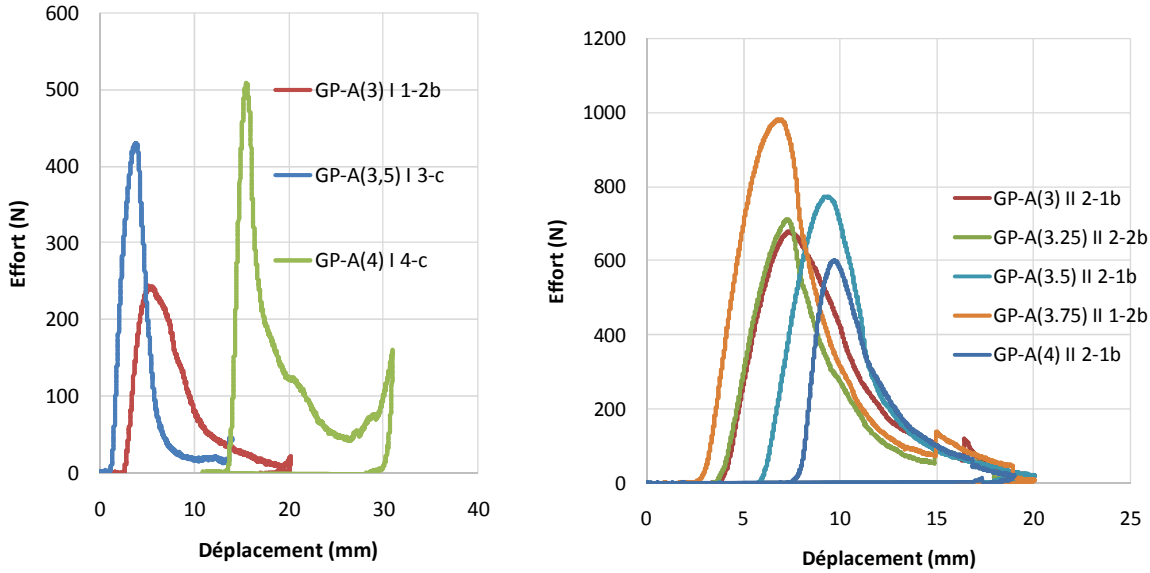


Figure 139: Courbe de l'essai en traction en fonction du déplacement pour les composites GP-A

Les composites avec l'amidon présentent en flexion un comportement qui s'apparente au comportement assez ductile obtenu avec les composites formulés avec le plâtre à E/P compris entre 2 et 2,5.

L'influence du rapport E/A ne peut être lue directement sur ces courbes, les dimensions des échantillons n'étant pas systématiquement identiques. Les valeurs moyennes des résistances en tractions par flexion obtenues sont présentées dans le Tableau XX.

Tableau XX: résistance en traction par flexion – Liant amidon

		ρ(kg/m^3)	Rt(MPa)
FB-A(3)	moyenne	387,23	0,78
	Ecart type	10,07	0,37
	Coeff Var	0,03	0,48
FB-A(3,5)	moyenne	387,21	1,08
	Ecart type	30,22	0,47
	Coeff Var	0,08	0,43
FB-A(4)	moyenne	349,31	1,62
	Ecart type	26,79	1,22
	Coeff Var	0,08	0,76
OC-A(3)	moyenne	511,28	3,12
	Ecart type	3,82	0,39
	Coeff Var	0,01	0,13
OC-A(3,5)	moyenne	482,85	4,11
	Ecart type	28,06	0,77
	Coeff Var	0,06	0,19
OC-A(4)	moyenne	493,59	4,71
	Ecart type	39,60	1,58
	Coeff Var	0,08	0,34
GP-A (2,86)	moyenne	575,60	3,28
	ecart type	31,94	1,75
	coeff var	0,06	0,53
GP-A(3)I	moyenne	503,36	1,43
	Ecart type	27,74	0,60
	Coeff Var	0,06	0,42
GP-A(3,5)I	moyenne	440,90	0,87
	Ecart type	70,17	0,33
	Coeff Var	0,16	0,38
GP-A(4)I	moyenne	436,42	1,22
	Ecart type	7,24	0,05
	Coeff Var	0,02	0,04
GP-A(3)II	moyenne	562,78	3,39
	Ecart type	17,15	0,61
	Coeff Var	0,03	0,18
GP-A(3,25)II	moyenne	553,92	2,66
	Ecart type	10,12	0,39
	Coeff Var	0,02	0,15
GP-A(3,5)II	moyenne	565,51	4,15
	Ecart type	11,81	0,42
	Coeff Var	0,02	0,10
GP-A(3,75)II	moyenne	539,98	3,28
	Ecart type	11,79	0,41
	Coeff Var	0,02	0,13
GP-A(4)II	moyenne	616,80	3,60
	Ecart type	11,08	0,70
	Coeff Var	0,02	0,20

XII.2.2.1 Influence de la formulation sur la résistance en traction

Les résistances en traction des différents mélanges sont présentées sur la Figure 140 en fonction de la masse volumique. Les points d'une même formulation sont très dispersés comme le montrent les valeurs du Tableau XX. L'identification de courbes de tendances linéaires (diagramme semi logarithmique) pour chaque type de charges est acceptable pour OC et GP. Par contre aucune tendance n'est identifiée pour FB.

En conséquence, une augmentation de GP/A qui induit une augmentation de la masse volumique se traduit par une augmentation de la résistance en traction.

La fibre de bois présente une résistance en traction globalement inférieure à celles des autres types de charges.

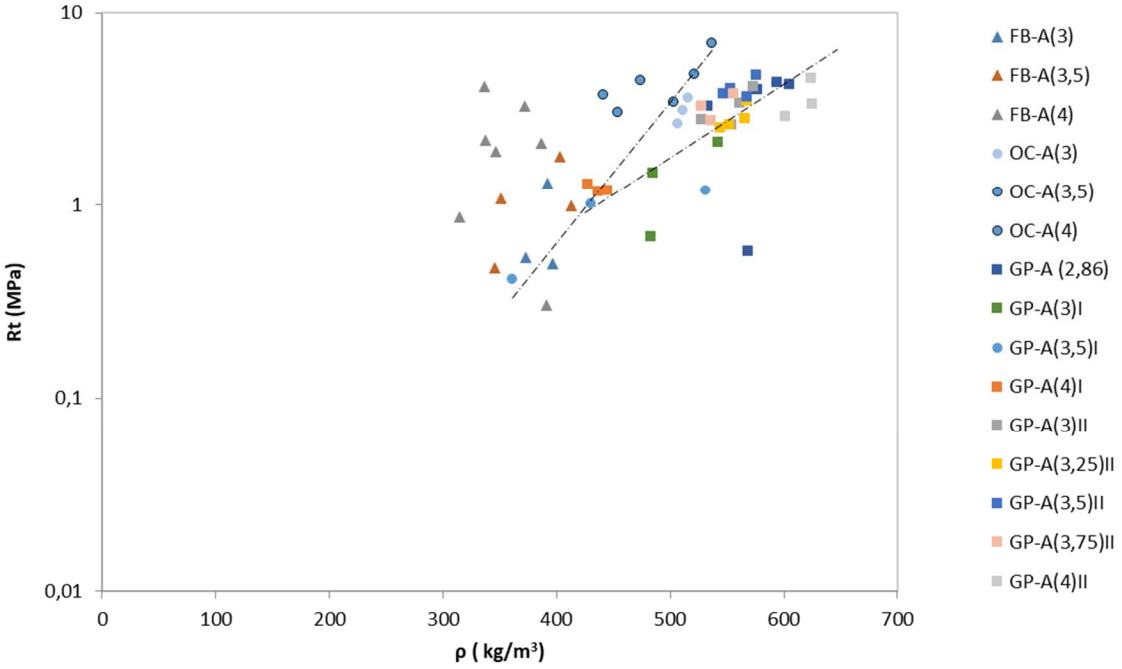


Figure 140: Variation de la résistance en traction en fonction du type de charge et de la formulation (E/A et C/A).

La comparaison des résultats obtenus avec l'amidon et la plâtre est présentée sur la Figure 141.

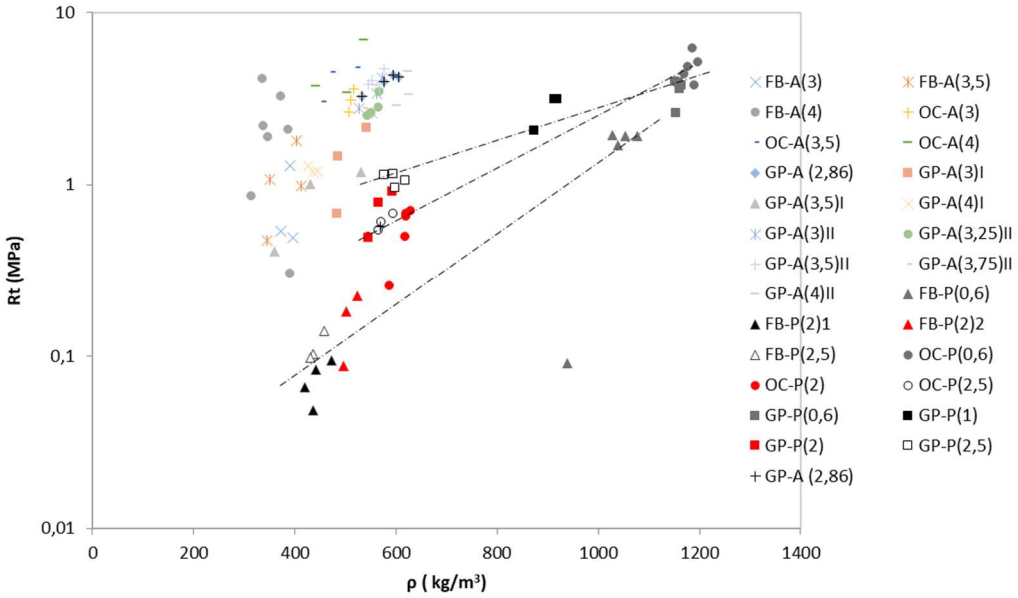


Figure 141: Variation de la résistance en traction en fonction du type de charge et de la formulation pour tous les composites.

A masse volumique identique, les points caractéristiques des composites OC-A, GP-A et dans une moindre mesure FB-A, sont au-delà des courbes de tendances associées aux composites FB-P, OC-P et GP-P. L'utilisation de l'amidon se traduit donc par un gain sensible des résistances en traction.

XII.2.2.2 Relation entre Rc et Rt

Les résultats obtenus en traction sont couplés à ceux obtenus en compression sur la Figure 142. Pour l'ensemble des composites formulés avec l'amidon (FB-A, OC-A et GP-A), une même tendance linéaire en repère semi logarithmique est visible. Cette droite reste en dessous de la tendance associée aux composites GP-P et OC-P.

Le recours au liant amidon conduit donc à des composites dont le comportement en traction et compression est très symétrique.

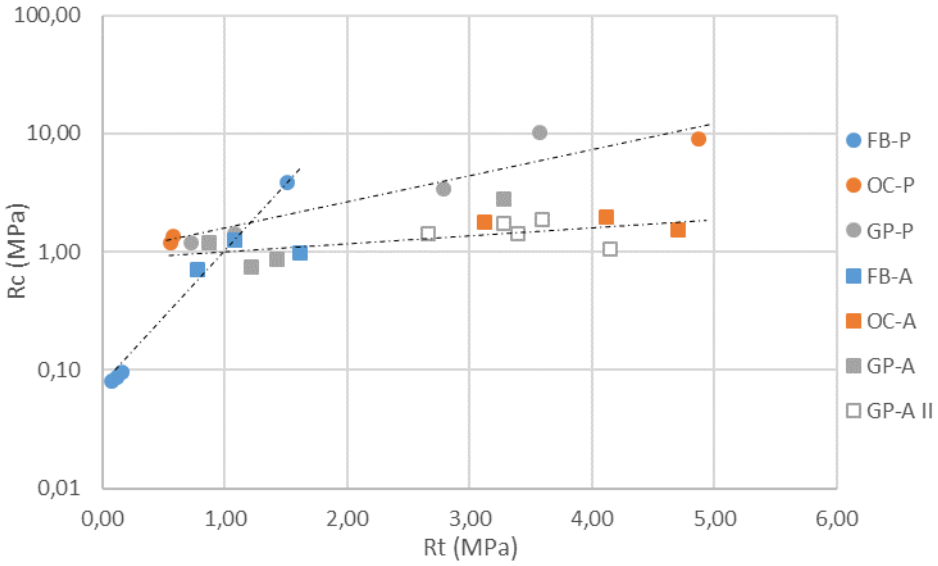


Figure 142: Variation de la résistance en traction en fonction du type de charge et de la formulation (E/P, E/A et C/A).

XII.3 Module acoustique

L'essai avec le pundit permet de déterminer le temps de propagation d'une onde acoustique pour traverser un matériau d'un point à un autre. Les résultats obtenus correspondent à la moyenne de 4 mesures réalisées sur les longueurs des échantillons.

Les mesures sur les composites FB-P n'ont pas pu être interprétées car la sensibilité de l'appareil était insuffisante. De même, les mesures n'ont pas pu être effectuées sur les composites FB-A et OC-A en raison de surfaces d'échantillons non planes induites par un grand retrait au séchage.

Les Figure 143 et Figure 144 présentent les valeurs du module acoustique obtenues à partir des mesures de la vitesse de l'onde acoustique sur les composites GP-P ; OC-P et GP-A.

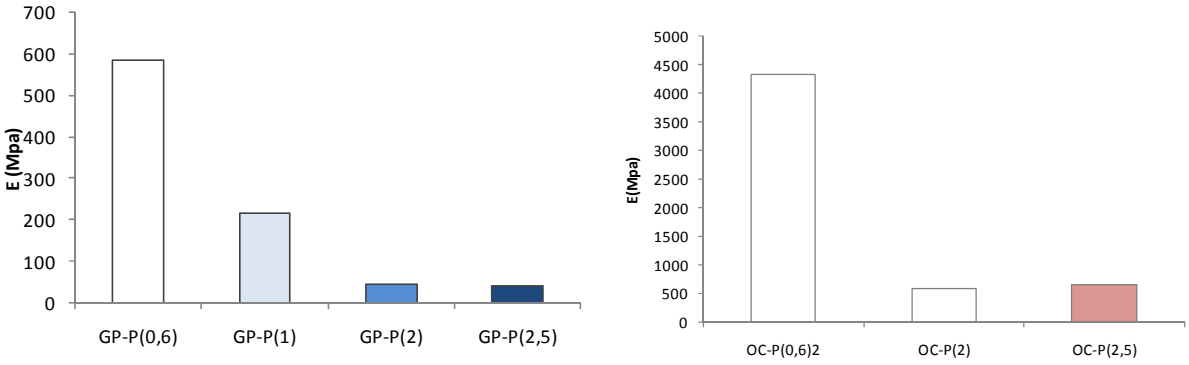


Figure 143: Variation du module d'Young en fonction du type de charge et de la formulation pour les composites avec le plâtre.

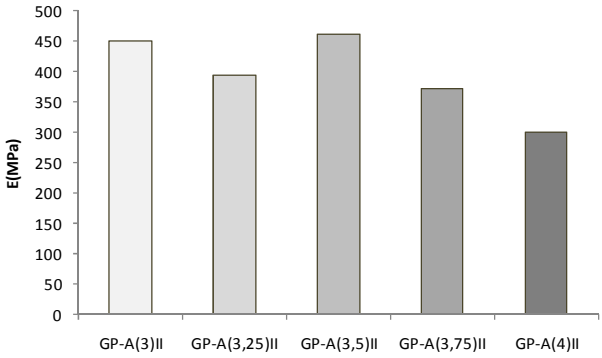


Figure 144: Variation du module d'Young en fonction de la formulation pour les composites GP-A II.

Quel que soit le matériau, le module acoustique varie avec la formulation. Il baisse avec l'augmentation du rapport E/P pour les composites GP-P et OC-P ou E/A pour les composites GP-A.

Le module acoustique peut atteindre 5053 MPa (mesure locale sur un échantillon) pour les composites les plus denses. Une telle valeur reste très largement supérieure au module d'Young identifié lors des essais mécaniques qui reste inférieur à 1000 MPa.

La difficulté de réaliser une mesure acoustique correcte sur des échantillons de masse volumique faible ne permet pas d'envisager une étude plus étendue. Une adaptation de la méthode serait à envisager.

XII.4 Synthèse du comportement mécanique des composites

Le comportement mécanique des composites a été étudié principalement en ayant recours à des essais de compression et de flexion. Les constats principaux suivants ont pu être identifiés.

Le comportement en compression des composites à base de plâtre passe d'un comportement fragile à un comportement compactant lorsque le rapport E/P augmente.

La résistance en compression des composites à base de plâtre évolue avec la masse volumique de façon exponentielle. Il en est de même pour le module d'Young et la résistance en traction.

Les résultats en compression obtenus avec les charges GP et OC sont caractérisés par de tendances d'évolution assez semblables.

Le comportement en compression des composites à base d'amidon est de type compactant.

Dans le cas des composites à base d'amidon, les résultats en termes de résistance en compression et module d'Young sont dispersés et ne permettent pas d'identifier de tendances d'évolution. Globalement, quel que soit le type de charge, les résistances en traction obtenues avec l'amidon sont supérieures à celle des composites formulés au plâtre (à masse volumique identique).

L'augmentation du rapport GP/A conduit à une légère augmentation de la masse volumique coordonnée à une légère augmentation de la résistance en traction.

Le comportement en traction et compression est plus symétrique en présence d'amidon qu'en présence de plâtre.

La mesure de module acoustique reste difficile à réaliser sur cette gamme de composites. La méthode mériterait d'être révisée.

La dispersion des résultats obtenus en présence des composites à base d'amidon ou pour les composites FB-P est vraisemblablement liée à la difficulté de produire des échantillons bien homogènes. Un sérieux travail sur les méthodes de mélangeage et de mise en forme serait nécessaire pour affiner les résultats et guider l'utilisateur vers des formulations optimisées au regard de performances mécaniques cibles. Le potentiel d'exploitation de l'amidon comme liant de charges cellulosiques est cependant complètement validé par les résultats.

CHAPITRE XIII
Comportement au feu des composites

La Figure 145 rappelle le dispositif utilisé. Le Tableau XXI et la Figure 146 présentent les observations réalisées lors de l'essai au feu réalisé sur les composites.

Figure 145: Essai au feu des composites FB-A

Tableau XXI: Classification des composites en fonction de leur comportement à l'essai

Composites	Rapport E/A	Durée d'exposition à la flamme (s)	Durée d'observation après extinction de la flamme (s)	Temps de propagation de la flamme après extinction (s)	Formation de gouttes	Classification
FB-A	3 3,5 4	30	30	Non combustible	absent	D
OC-A	3 3,5 4	30	30	Non combustible	absent	D
GP-A	3 3,5 4	30	30	Petite incandescence avec absence de flamme	absent	D

Figure 146 : Visualisation après essai au feu des composites FB-A et OC-A

Dans le cas de la fibre de bois (FB-A) et de la ouate de cellulose (OC-A) (Figure 146), il n'y a aucune combustion donc aucune inflammation. La surface a été testée d'abord en limitant la puissance du brûleur autour de 0,8 kW selon la recommandation de la norme pendant 15 s mais aucune réaction n'a été observée. La puissance a donc été augmentée à environ 2,5 kW et l'exposition à la flamme a été maintenue durant 30 s. Nous remarquons que toute la surface des plaques est carbonisée sans combustion et avec extinction de la flamme dès l'arrêt du brûleur. Après arrêt, la température de surface est de 150°C sur la face exposée à la flamme (Figure 147) tandis que la face opposée est de 50°C à 15 s et atteint 80°C après 30s d'exposition. Cependant dès le retrait du brûleur, on remarque un refroidissement de l'échantillon (pas de feu couvant).

Pendant l'exposition de la flamme, nous avons noté :

- aucune présence de flamme,
- aucune formation de débris sur le papier filtrant,
- aucune gouttelette,
- une légère fumée qui s'estompe dès que le bruleur est arrêté.

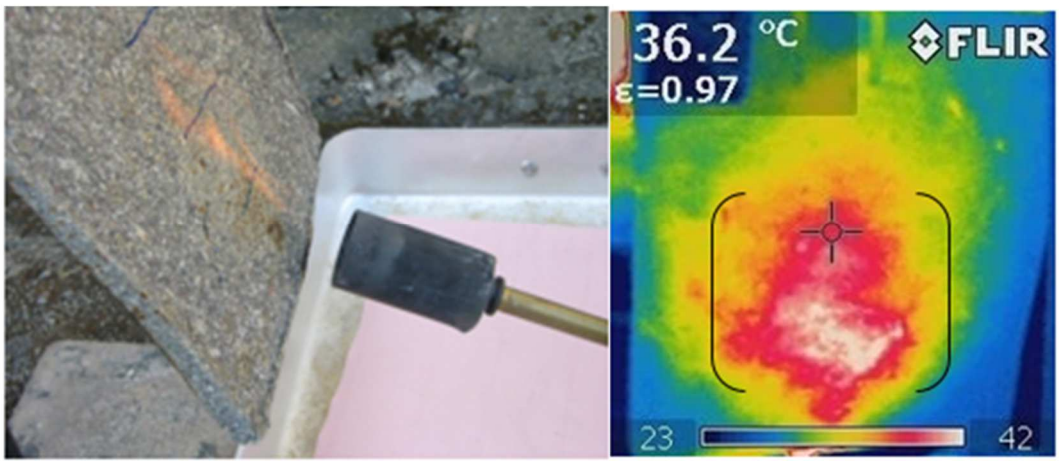


Figure 147: Composite OC-A - gauche : test à la flamme, droite : thermographe

Sur les plaques avec le papier (GP-A), nous ne constatons pas de présence de flamme, mais sur la face exposée nous remarquons la présence de plusieurs petits points blancs qui sont des zones incandescentes qui donnent de petits amas de cendres. Ces zones restent actives longtemps après le retrait du bruleur (Figure 148) et sont susceptibles de se propager s'il a une source d'activation telle que le vent, l'air… Il y a aussi la présence d'une légère fumée pendant l'exposition qui disparait lorsqu'on retire la source.

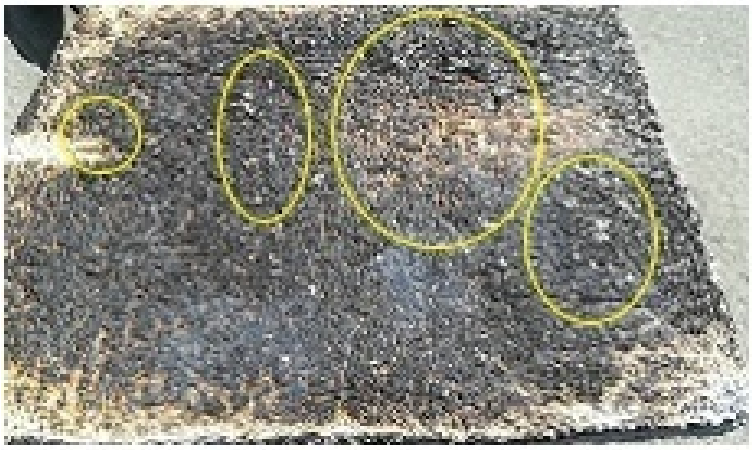


Figure 148 : Composites GP-A après retrait de la flamme

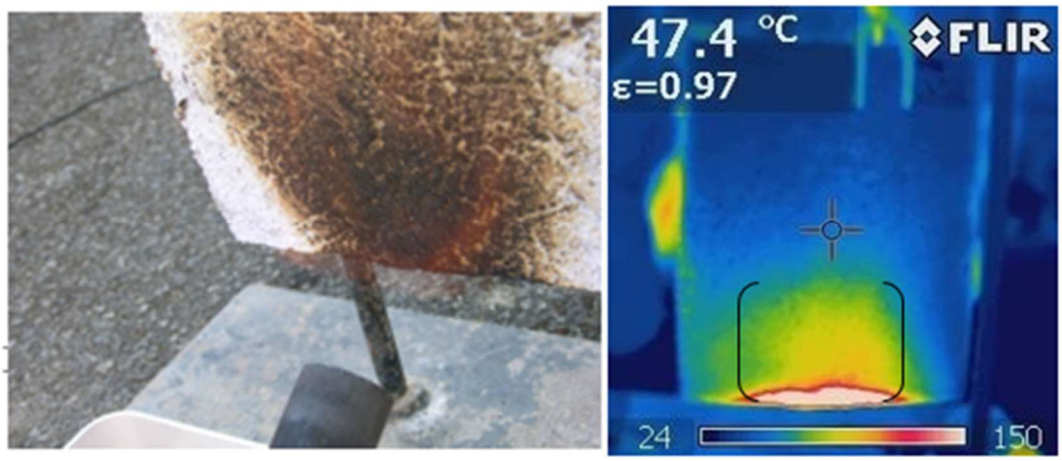


Figure 149 : Composite GP-A avec le thermogramme.

Il n'y a aucune formation de débris. La flamme ayant une forte puissance, la zone active dépasse les 10cm, mais reste en deçà de 15 cm. La combustion se propage automatiquement mais s'arrête dès l'absence de flamme. Les thermogrammes confirment cette tendance (Figure 149), avec une amplitude plus étendue en largeur et en longueur de la répartition de chaleur.

Bilan

Selon les résultats de l'essai de réaction au feu, tous les composites seraient susceptibles d'être classés D au regard de la norme CE européenne de réaction au feu, car avec un temps d'exposition de 30 secondes, il n'y a eu aucune propagation de flamme au-delà de 150 mm verticalement, à partir du point d'application de la flamme d'essai dans les 60 secondes après l'application de la flamme d'une puissance 2,5 kW bien supérieure à celle imposée par la norme.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse a permis d'élaborer et de caractériser des composites utilisables comme produits constructifs de partition (cloison, faux plafond) légers et isolants.

La sélection des matières premières répond à des critères de disponibilité locale et à des critères de développement durable à travers le recours à des éco-matériaux (recyclés et/ou bio-sourcés). Le liant est soit un liant minéral (le plâtre), soit un liant végétal (l'amidon). Les charges sont issues soit de matière première bio-sourcée (fibre de bois issue de panneaux isolants disponibles sur le marché), soit de déchets de papier (ouate de cellulose issue d'une production industrielle et granules de papier issus d'un travail de valorisation original pour lequel un procédé de production a été développé dans cette étude).

Les charges ont des masses volumiques apparentes faibles (44,5 kg/m^{3}pour la fibre de bois, 35,8 kg/m^{3}pour la ouate de cellulose et 104,9 kg/m^{3}pour les granules de papier). Leurs masses volumiques absolues sont du même ordre de grandeur : 1458, 1481 et 1688 kg/m^3 respectivement, conduisant à des porosités totales élevées, entre 93.8 et 97.6 %. La caractérisation hygrothermique de ces charges a montré que selon la classification du Nordtest protocol, les granules de papier sont excellents régulateurs hygriques avec une valeur MBV de 2,10 (g/(m².%HR))devant la fibre de bois 1,81(g/(m².%HR)) et la ouate de cellulose 1,31(g/(m².%HR)) qui sont toutes les deux bons régulateurs hygriques. D'un point de vue thermique, ces charges se classent comme isolant thermique du bâtiment au sens de la norme AFNOR NF P75-101 (λ< 65 mW/(m.K)). Ainsi, la conductivité thermique à 23°C sec des fibres de bois et de la ouate de cellulose sont similaires, autour de0,04 (W/(m.K)) et inférieures à celle des granules de papier qui est de 0,063 (W/(m.K)).

Le taux de gâchage de la matrice plâtre impacte les propriétés multi-physiques de celle-ci. Lorsque le rapport Eau/Plâtre augmente de 0,4 à 1,1, la masse volumique baisse de 1468 à 814 kg/m^3 et la porosité augmente de 43,6 à 68,7 %. La conductivité thermique et les performances mécaniques évoluent de façon coordonnée avec la masse volumique.

Pour l'élaboration des composites, les taux de gâchage du liant plâtre (Eau/Plâtre) retenus sont de 0,6 ; 1 ; 2 et 2,5. La quantité de charge est ajustée en fonction de la consistance du mélange. Le rapport Charge/Liant varie ainsi de 0,07 à 1,41. Pour les composites à l'amidon le rapport Eau/Amidon varie de 3 à 4 et un rapport Charge/Liant égal à 1,5 est choisi pour les trois charges, une valeur complémentaire de Charge/Amidon= 4,17 pour les granules de papier.

Le séchage des composites dure entre 15 et 20 jours, les composites au plâtre séchant à l'air ambiant du laboratoire alors que ceux à l'amidon sont étuvés à 40°C. Les déformations dues au retrait sont plus marquées sur les composites formulés avec l'amidon et ayant un faible taux de charge (Charge/Amidon=1,5). Ainsi, la faisabilité de tels composites est vérifiée mais il est encore possible d'ajuster les formulations vis-à-vis de la problématique du retrait.

De façon générale, les composites au plâtre sont plus denses que ceux réalisés avec l'amidon. Les composites élaborés couvrent une large gamme de masse volumique, allant de 388 à 1155 kg/m^{3}pour les composites au plâtre et de 300 à 577 kg/m^{3}pour les composites à l'amidon.

Les caractérisations hygriques, thermiques, mécaniques et réaction au feu réalisées sur les composites permettent les constats suivants:

- les valeurs MBV obtenues montrent que tous les composites avec le plâtre sont meilleurs régulateurs hygriques (MBV =2,5 à 3 g/m^2.%HR) pour le rapport E/P égal à 2 et 2,5 que ceux réalisés avec l'amidon (MBV = 1 à 2,5 g/m^2.%HR) pour E/A compris entre 3 et 4 et Charge/Amidon égal à 1,5.

- la valeur MBV augmente pour les granules de papier lorsque l'apport en papier augmente, elle passe de 1 à 2,5 g/m^2.%HR.

- pour des dosages équivalents granules de papier / amidon / eau, l'amidon de manioc améliore le comportement hygrique des composites par rapport à l'amidon de pomme de terre. La valeur MBV augmente de 2,5 à 3 g/m^2.%HR.

- l'étude de l'influence des épaisseurs a révélé que les épaisseurs des composites n'ont pas une grande influence sur les valeurs du MBV. La majorité de l'épaisseur active est donc incluse dans l'épaisseur envisagée pour une utilisation en faux plafond ou en parement.

Les conductivités thermiques mesurées à 23°C, 50%HR et au point sec de 10 à 40°C permettent de formuler les constats suivants:

-les valeurs de la conductivité thermique des composites élaborés avec le plâtre dépendent principalement de la masse volumique. Les valeurs de la conductivité thermique de ces composites sont comprises entre 0,05 et 0,2 (W/(m.K))).

-les conductivités thermiques des composites à base d'amidon de pomme de terre sont comprises entre 0,096 et 0,155 (W/(m.K)) pour les composites avec un rapport

Charge/Amidon de 1,5. Les composites aux fibres de bois ont les conductivités thermiques les plus faibles, suivis des composites aux granules de papier puis de ceux à la ouate de cellulose.

- les conductivités thermiques des composites à base d'amidon de pomme de terre et de granules de papier présentent une conductivité thermique plus forte pour un plus grand taux de charge (0,19 W/(m.K) pour Charge/Amidon= 4,17 et 0,12 W/(m.K) pour Charge/Amidon= 1,5).

- les conductivités thermiques des composites à l'amidon de manioc sont plus faibles que celles des composites avec l'amidon de pomme de terre (entre 0,11 et 0,18 W/(m.K) avec l'amidon de manioc et environ 0,19 (W/(m.K) avec l'amidon de pomme de terre).

- la conductivité thermique n'est pas influencée par la température dans la gamme de 10 à 40 °C, quel que soit le liant.

La conductivité thermique de tous ces composites est dans la gamme des matériaux utilisés en isolation répartie. Ils peuvent donc être envisagés comme correcteurs thermiques.

Les caractérisations mécaniques en compression et en flexion des composites montrent que:

-les composites avec le plâtre présentent une résistance (Rc et Rt) qui évolue avec l'augmentation du rapport E/P. Lorsque ce rapport est faible, la masse volumique des composites est grande et leur résistance est élevée.

- le rapport E/A n'influence pratiquement pas le comportement des composites avec l'amidon en compression et en flexion. Cependant, lorsque la quantité de granule de papier augmente dans le composite granule de papier, sa résistance augmente.

- les composites avec l'amidon présentent les mêmes caractéristiques en compression et en flexion que les composites avec le plâtre pour les rapports E/P égaux à 2; 2,5.

Selon la norme européenne de réaction au feu, réalisé sur les composites avec l'amidon, ces derniers seraient susceptible d'être classé D.

Ces travaux ont permis de réaliser des composites avec l'empois d'amidon et montré l'intérêt du développement de composites liés à l'amidon, et en particulier à l'amidon de manioc.

Au terme de notre travail nous pouvons dire que les composites granules de papier-amidon pour le rapport C/A = 4,17 en générale présentent des propriétés intéressantes pour

être utilisé comme faux plafonds et cloison. Nous proposons en particulier le composite granule de papier-amidon de manioc pour un rapport E/A égale à 3 noté GP-Am (3).

Toutefois des investigations peuvent être poursuivies de façon à ajuster les formulations en vue de réduire la conductivité thermique. D'autre part, les composites aux granules de papier ayant une masse volumique plus élevée peuvent présenter un intérêt complémentaire d'un point de vue inertie thermique. De telles propriétés restent à évaluer.

L'étude pourra être complétée en s'intéressant aux propriétés multi-physiques du matériau dans des conditions climatiques variées, telles que rencontrées en conditions tropicales.

Enfin, avant de passer à une phase d'industrialisation, il est également nécessaire de s'intéresser à la durabilité de ces matériaux. Au vu de l'utilisation prévue, le rôle de correcteur acoustique de ces matériaux pourrait présenter un intérêt qui pourrait être démontré par la mesure du coefficient d'absorption acoustique.

Références bibliographiques

Abahri K., Belarbi R., El Hachem C.(2015). Caractérisation macro-hydrique des matériaux biosourcès présenté lors du 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai.

Adelard L., Boyer H., Garde F., Gatina J.C. (2000). A detailed weather data generator for building simulation. Energy and Buildings. 31, pp 75-88

Agullo L. , Aguado A. , Garcia T. (2006). Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures, Building and Environment 41 (2006) 821–827

Ali M.E., Alabdulkarem A. (2017). Construction and Building Materials 138 (2017) 276–284

AL-Muhtaseb A.H., Mcminn W.A.M. , Magee T.R.A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data. Journal of Food Engineering 61: 297–307.

Angellier H. (2005). Nanocristaux de maïs cireux pour applications composites. Thèse de l'université Joseph Fourier Grenoble 1, 285p.

Anh.T. Le, A. Gacoin, A.LI, N. EL Wakil. (2014). Etude mécanique et acoustique d'un bio-composite chanvre-amidon, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai.

Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials, Sustain. Mater. Technol., 4 , pp. 1-17.

Atkin N.J., Cheng S.L., Abeysekera R.M., Robards A.W., (1999). Localisation of amylose and amylopectin in starch granules using enzyme-gold labelling. Starch/Stärke, 51: 163-172.

Atta K., Kone M., Kra K.J. (2015). La nouvelle configuration de l'habitat dans les quartiers précaires d'Abidjan: cas de jean folly, zoe bruno et sagbe. European scientific journal édition vol.11, no.14 issn: 1857 – 7881 (print) e - issn 1857- 7431

Averous L. (2004). Biodegradable Multiphase Systems Based on Plasticized Starch, Journal of macromolecular science, Vol. C44, No. 3, 231-274

Balčiūnas G., Vėjelis S., Vaitkus S., Kairytė A (2013). Physical Properties and Structure of Composite Made by Using Hemp Hurds and Different Binding Materials. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST. Procedia Engineering vol 57 pp159 – 166.

Ballon C. (2014). Enjeux et réusage des matières disponibles : Le papier comme matière première pour la construction. Master 2 Matériaux pour l'éco-conception, 36p, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Malaquais.

Barhani S.A. (2012). Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques : contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.

Belakroum R.,. Gherfi A., Malouf C., El Wakil N.,. Mai T. H, Lachi M., Kadja M (2017). Etudes des propriétés d'absorption hydrique et acoustique d'un nouveau matériau d'isolation bio-sourcé, 9p, 2ème congrès international sur l'Energétique et la Pollution (CIEP), Constantine, Algérie.

Belayachi N., Hoxha D., Ismail B. (2016). Construction and Building Materials 125 (2016) 912–918

Bertolini G., (1994). « Espace et environnement », in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts, comportements, organisation, Economia, p.307.

Billaderis C.G., (1991), The structure and interaction of starch with food constituents, Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, pp 60-78.

Boscher R., (2012). Transition énergétique et écologique, ans pour agir concrètement: les éco territoriales. Focus 6 Quels matériaux locaux et écologiques pour les bâtiments de demain?

Bourdot A, Moussa T. Gacoin A, Maalouf C. (2017). Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. Energy and buildings vol 153, p501-512.

Boursier B. (2005). Amidons natifs et amidons modifiés alimentaires, Techniques de l'Ingénieur, dans http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agroth2/agroalimentaire-ti700/amidons-natifs-et-amidons-modifies-alimentaires-f4690/amidons-modifiesphysiquement-f4690niv10004.html

Boyer H.(1993). Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

BraiekA., KarkriM., AdiliA., IbosL., Ben NasrallahS. (2017). Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building, Energy and Buildings EnergyBuild., 140 pp. 268-279

Buleon A., Colonna P., Leloup V. (1990) "Starch and its derivatives in the cereal industry."Industries Alimentaires et Agricoles, 107(6), 515-532.

Buleon A., Colonna P., Planchot V., BallS., (1998). Starch granules: structure and biosynthesis

Carma. (2006). Glossaire des matériaux composites, actualisation d'octobre.http://sti-Actualisation octobre 2006, beziers.fr/tsipm/spip_tsipm/IMG/pdf/composite3.pdf

Cerezo V. (2005). Commission d'examen Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique, 242p. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Chalot F. (1991). Characterization of agro-resources' by-product as a possible. La commune et ses déchets, Sorman, Paris, 291p.

Chamoin J. (2013). Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation, Thèse de doctorat, université de Rennes 1.

Cherier ,M. K. (2013). Improving of interior temperature by reinforced thermal, insulation of the building Envelope in Ghardaïa (Algerie) climate, Revue internationale d'Héliotechnique, 45pp1-7.

Cherki A.-b (2014). Construction and Building Materials 54 (2014) 202–209

Chouaib N. (1997). Pâtes à haut rendement et fibres secondaires : mise en œuvre de l'ozone et du peroxyde d'hydrogène. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

Christensen A. N, Olesen M., Cerenius Y. (2008). " formation and transformation of five different phases in the $CaSO_4$-H_2O system: Crystal structure of the subhydrate β-$CaSO_4.0.5H_2O$ and soluble anhydrite $CaSO_4$," Chemistry of Materials, vol. 20, no. 6,pp. 2124-2132.

Code de l'environnement (1996). Loi 96-766 du 03/10/1996.

Collet F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. Thèse soutenue devant l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes. 252p.

Constructions et Bioressources, (2012). Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux bio-sourcés. Document technique première édition.

Coquard P. (1992). "Résistance mécanique des plâtres secs et humides," Thèse de doctorat, Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille III, Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérome.

David A (2017), Etude de dérivés d'amidon : relation entre la structure et le comportement thermomécanique, Université de Lille

DCGTX (1996). Bilan diagnostic urbain démographie, Rapport d'étude, Abidjan, 148p

Debiton C. (2010). Identification des critères du grain de blé (Triticum aestivum L.) favorables à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble de cultivars et par l'analyse

protéomique de lignées isogéniques waxy, Thèse, Sciences agricoles. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

De bruijn P., Jeppson K H., Sandin K., Nilsson C. (2009)«Mechanical properties of lime hemp concrete containing shives and fibres.» Biosystems Engineering 103 pp 474-479.

Delisee C., (2009). "Caractérisation et modélisation de structures fibreuses cellulosiques à architecture complexe-apport de la microtomographie X," mémoire de HDR, Université de Bordeaux.

Djomo A.S. (2017) Valorisation des déchets non biodégradables : élaboration de produits (carreaux) a base de poudre et de tessons de bouteille en substitution du sable et stabilisés au ciment, Thèse Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan.

Doizy M.A., Fulacher P. (1997). Papiers et moulins, des origines à nos jours, Technorama / Arts et métiers du livre, Paris, in-quarto, 280 p. (ISBN 2-911-071-03-4), chap. VIII (« La crise du chiffon »).

Donovan J. W., (1979). Phase transitions of the starch-water system, Biopolymers, 18, pp 263-275.

Doué G (2014). Caractérisation physico-chimique, fonctionnelle et digestibilité in vitro d'amidons de nouvelles variétés de manioc (Manihot esculenta Crantz) à chairs colorées introduites en Côte d'Ivoire d'utilisation en agro-industries. Thèse soutenue à l'université Félix Houphouet Boigny de Côte d'Ivoire,p196.

Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y., et Goudet L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (''hempcrete'') manufactured by a projection process. Construction and Building Materials 22 , n° 10 (2008): 2116–2123.

Elouazzani. C D. (2005). Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie. Thèse présentée devant l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Evrard A. (2008). Transient hygrothermal behaviour of lime hemp materials. soutenance de Thèse de l'université catholique de Louvain Belgique.

Gallant D.J., Bouchet B. et Baldwin P. M. (1997). Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. Carbohydrate Polymers, 1997, 32,177-191.

Garde F., Boyer H., Adelard L., Gatina J.C. (1996), Rapport Label Ecodom, Validation des prescriptions du document du label. Application à des logements types à l'Ile de la Réunion. Convention EDF Université de la Réunion.

Garde F, Adelard L., Boyer H., Celaire R. (1997). Demand Side Management in Tropical Island Buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in Buildings. Clima 2000, 1997, Liège, Belgium. pp.1-18.

Garcia, V., Colonna, P., Lourdin, D., Buléon, A., Bizot, H. et Ollivon, M. (1996). Thermal transitions of cassava starch at intermediate water contents. Journal of Thermal Analysis. 47, 1213–1228.

Glé P. (2014). Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation. Thèse soutenue devant 'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État. Ecole Doctorale: Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique, spécialité Acoustique. 389 p.

Hebert M. (2009). Régie de production litière à base de papier. Solution envisageable? Rédiger par Bovin du Québec.

Hernandez-Olivares, M. Del Rio, B. Parga-Landa (1999). Development of corkgypsum composites for building applications, Constr. Build. Mater. 13 (1999)179–186.

Huyen T. (2012). Study of compression behavior of wood-based fiberboard : characterization from non destructive image technique. Phd presented at Bordeaux university.

Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. Comp. Part A 2008; 39: 514–522.

Jacques S. D. M, Gonzalez-Saborido A., Leynaud O. (2009). Structural évolution during the dehydration of gypsum materials," Mineralogical Magazine, vol. 73, no. 3,pp. 421-432, Jun, 2009.

Jannot Y. et Djiako T. (1994). Energy saving and thermal comfort for habitations in tropical climate, International Journal of refrigeration, V17, p 166-173.

Kemajou A. , Mba L. (2011). Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude. Application au cas des régions climatiques camerounaises. Laboratoire de Froid et Climatisation, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique, 'ENSET' Université de Douala, B.P. 1872, Douala, Cameroun, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°2 (2011) 239 – 248.

Kouamé S. A. K. (2009). Etude sur l'Industrie de l'amidon, Institut national Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) –mémoire, Ingénieur des techniques agricoles : option agro- industrie.

Krausz P. (2008). Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. Comp. Part A; vol 39: pp514–522.

Lafargue D. (2007). Etude et élaboration de films à base de polysaccharides pour la fabrication de gélules pharmaceutiques, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, dans http://www.inra.fr/les_partenariats/collaborations_et_partenaires/entreprises/en_direct_des_labos/des_gelules_pharmaceutiques_vegetales

Lam H. Q. (2000). Séparation sélective de la cellulose, des hémicelluloses et des lignines par le système catalyseur/solvant acide formique/acide acétique, de matières végétales à teneur variable en silicium. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

Lamrani M., Case (2017). Studies in Construction Materials 7 (2017) 294–304

Lavoisier A. (1768). Men. Math. Phys., 5 , p. 341.

Le Chatelier H. (1883). Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. Compte rendu de l'académie des sciences de Paris vol 96, N°11, p715.

Le T.A, Gacoin A, Li A.May TH (2014). Experimental investigation on the mechanical performance of starch–hemp composite materials. Construction and Building Materials 61 pp 106–113.

Lemaitre A. (2003). Procédés papetiers, Fabrication des pâtes. Techniques de l'ingénieur, Traité génie des procédés, 2003, Doc. J 6 901, pp. 1-8.

Leroy L, (2014), Structure et comportement thermomécaniques de matériaux à base d'amidon, Université de Lille.

Liu Q, Charlet G, Yelle S, Arul J (2002). Phase transition in potato starch-water system I Starch gelatinization at high moisture level, Food res. Int., vol 35 n°4, pp 397-407

Lucas F., Adelard L., Miranville F., Garde F,Boyer H.(2006). Utilisation d'outils de simulations dynamiques pour l'optimisation des performances d'un bâtiment en climat tropical. ESIM 2006, May 2006, Toronto, Canada. pp.233-240.

Maamar H. (2016). Choix de l'orientation et des matériaux de construction en vue d'améliorer les perfomances thermiques des bâtiments. Thèse en 2016 en Algérie.

Magniont C (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agro-ressources, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier. 343p.

Magniont, C., Escadeillas, G., Coutand, M., and Oms-Multon, C. (2012). Use of plant aggregates in building ecomaterials. European Journal of Environmental and Civil Engineering 16, s17–s33.

Maldonado Alvarado P.D.(2014). Facteurs déterminants du pouvoir de panification de l'amidon de manioc modifié par fermentation et irradiation UV, thèse, université de Montpellier

Manzano A., Montoya F.G., Sabio-Ortega A., Garcia-Cruz A. (2015), Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort, Renewable and sustainable energy reviews, vol 40, issue C, p 736-755.

Marulier C. (2013). Étude multi-échelles des couplages entre les propriétés hygroélastiques des papiers et leur microstructure, thèse soutenue à l'Université de Grenoble.

Mazhoud B. (2017) Elaboration et caractérisation mécanique, hydrique et thermique de composites biosourcés, Thèse de doctorat, INSA de Rennes.212p.

Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., and Lanos, C. (2017). Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites. Construction and Building Materials 155, 1126–1137.

Mbougueng P.D. (2009). Influence des amidons natifs ou acetyles de manioc et de pomme de terre sur les propriétés physico-chimiques et texturales du pâté de bœuf (*Bos indicus*), thèse soutenue à l'ENSAI de l'Université de Ngaoundéré. 192p.

Monnet D.(2008). Etude de l'évolution des propriétés mécaniques de matériaux amylacés par sélection et/ou modifications structurales dirigées, Université de Reims Champagne Ardenne, danshttp://ebureau.univ-reims.fr/slide/files/quotas/SCD/theses/exldoc/GED00000984.pdf

Morales-Conde M.J, Rodríguez-Li˜nán C., Pedre˜no-Rojas M.A. (2016). Physical. And mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works, Constr. Build. Mater. 114, 6–14.

Moreau, B. et GrzebykM, (2008). "Utilisation des matériaux fibreux en France," Hygiène et sécurité du travail - Cahiers de notes documentaires, vol. 1, no. 213, pp. 27-43, 2008

Mounanga, P., P. Poullain, G. Bastian, et P. Glouannec (2009). Effets de la formulation et du procédé de fabrication sur le comportement mécanique de différents bétons de chanvre., Marseille: 19ème Congrès Français de Mécanique, 2009

Mourad R., Tran Le A.D., Douzane O., Promis G., Langlet T. (2014). Capacité Tampon Hygrique des bétons de chanvre et de lin : expérimentation et application. Colloque international (CMMS14) UMMTO Tizi-Ouzou, Algérie 12 au 13 novembre.http://docplayer.fr/55113575-Capacite-tampon-hygrique-des-betons-de-chanvre-et-de-lin-experimenation-et-application.html.

Moutarda A. (1995). Cost and Energy Effects of the Ivorian. Energy Building Code Buildmg and Envrronment, Vol. 31, No. 3, pp. 259-272, 1996

Murat M,. Foucault M (1977). "Sulfates de calcium et matériaux dérivés," in Colloques Internationaux de la RILEM, Saint Rémy les Chevreuses, France.

Nayouf M. (2003). Etude rhéologique et structurale de la qualité texturale du système amidon/kappa-caraghénane en relation avec le traitement thermomécanique. Thèse, Nantes, 2003, 198 p.

NF EN 13501-1. (2003). +A1 Classement au feu des produits et éléments de construction

Nolhier M (1986). Construire en plâtre, L'Harmattan.

Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., and De Baynast, H. (2012). Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder. Cement and Concrete Composites 34, 231–241.

Ouattara S. (2013). Recherche de briques légères : conception et caractérisation de briques crues à base d'argile et de sciure de bois, stabilisées au ciment Portland, Thèse, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan.

Perez S., Bertof E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review, Starch, vol 62, pp 389–420

Perez S., Kouwijzer M., Mazeau K. et. Engelson S.B. (**1996**). Modeling Polysaccharides: Present Status and Challenges, J. Mol. Graphics 14, 307.

Petit-Conil, M. (1999). Procédés papetiers, Fabrication des pâtes. Techniques de l'ingénieur, Traité Génie des procédés, Doc. J 6 900, pp. 1-12.

Pichat P. (1999). La gestion des déchets, Flammarion, Paris, 124p.

Rattanongphisat W, Rordprapat W (2013). Strategy for energy efficient building in tropical climate, Energy Procedia, p10-17.

Rode C. (2005). Moisture buffering of Building Materials, Report BYG·DTU R-126, ISSN 1601 – 2917, 2005,ISBN 87-7877-195

Rojo. A (2013). Etude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie, thèse de doctorat, INSA de Rennes.

Schwach E. (2004). Etude de systèmes multiphases biodégradables à base d'amidon de blé plastifié. Relations structure – propriétés, Approche de la compatibilisation, dans http://ebureau.univreims. fr/slide/files/quotas/SCD/theses/exl-doc/GED00000112.pdf

Schiavoni S., D′Alessandro, F., Bianchi F.and Asdrubali F., (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 62, issue C, 988-1011

Serifou M. (2013). Béton à base de recyclâts : influence du type de recyclâts et rôle de la formulation. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.

Shutz R.A. (1971). La caractérisation des amidons eu égard à leurs utilisations industrielles en particulier dans l'industrie textile et papetière, Die Starke 23. Nr. 10.

Singh R.P. et Heldman D. (2000). Conductivité thermique de différents aliments tableau 6.

Singh R.P. et Heldman D. (2013). Introduction to food engineering, 5ème édition, academic press.

Stanojlovic-davidovic A (2006). Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles - Application à l'emballage alimentaire thèse Soutenue le 14 décembre 2006 à l'Université du Sud Toulon-Var.

Takache H. (2006). Effet du traitement thermique et du cisaillement dans un échangeur tubulaire sur les propriétés rhéologiques d'un système à base d'amidon rapport bibliographique, master d'ingénierie chimique et agroalimentaire. Master recherche – 2ème année Génie des procédés. 15p

Thieblesson L (2014). Recyclage du papier: élaboration de plaques préfabriquées à partir des déchets de papiers et de l'empois d'amidon, rapport de master, p57.

Thomas G. (2002). "Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures," Fire, and materials, vol. 26, pp. 37-45.

Topanou K.A.N (2012). Gestion des déchets solides ménagers dans la ville d'Abomey-Cavali (Benin): Caractérisation et essai de valorisation par compostage. Thèse de doctorat en cotutelles entre l'Université d'Aix Marseille(France) et l'Université d'Abomey-Calavi (Benin).

Tran le. A.D. (2010). Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, thèse soutenue à l'Université de Reims Champagne Ardenne.

Traore B. (2010). Recyclage des déchets plastiques : conception d'un nouveau matériau à base de plastique (polyéthylène) et du sable : plastisable, DEA université Félix Houphouët Boigny 67p

Troedec ML, Sedan D, Peyratout C, Bonnet JP, Smith A, Guinebretiere R, Gloaguen V, Krausz (2008). Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. Comp. Part A; vol 39:pp514-52.

Umurigirwa-Vasseur B.S (2014). Elaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre amidon pour le Bâtiment. Thèse soutenue à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. 132p

Viel M. Collet F. Lanos C. (2017). Chemical and hygrothermal characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material. 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on Ecological valorisation of Granular and FIbrous materials. June 21th - 23th Clermont-Ferrand, France.

Vignes J-L, Essaddam H., Daligand D. (1997). Une vie de plâtre Expériences de chimie sur l'élaboration et la mise en oeuvre d'un matériau. Bulletin de l'union des physiciens 153 Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie :Économie - Industrie -EXC-1ENS de Cachan - 94235 Cachan Cedex et CECM-CNRS - 94400 Vitry-sur-Seine IPEST - La Marsa – Tunisie Syndicat National des Industries du Plâtre.n°790.

Vignes J.-L., Moranville M., Bournazel J.-P. (1996). Une vie de ciment, B.U.P. n° 780, p. 57.Journal of Food Engineering 61: 297–307.

Weber B (2012)."Heat transfer mechanisms and models for a gypsum board exposed to fire,"International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, no. 5-6, pp. 1661-1678.

Wertz J.L. (2011). L'amidon et le PLA : deux biopolymères sur le marché, note de synthèse du 28 janvier 2011,Valbiom, Gambloux Agro-bio tech.

Whistler R., Bemiller J. et Paschall E (**1984**). Starch: Chemistry and Technology, 2nd, ed., Academic Press, New York, 1984, 146-187.

Weidenmuller (1984). Papermaking: The Art and Craft of Handmade Paper, Backbeat Books, ISBN 13: 9780879301576

Yao Kouassi Q.C. (2010). A la recherche d'une synergie pour la gestion des déchets ménagers en Côte d'Ivoire : cas du district d'Abidjan, Thèse de l'Université du Maine

Zhang Y., Rempel C., Liu Q. (2014). Thermoplastic Starch Processing and Characteristics-A Review, Critical reviews in food science and nutrition, volume 54, issue10.

Zürcher C., FrankT. (2014). Physique du Bâtiment: Construction et Energie de: ISBN: 9783728134455.

Sites web et autres références

Analyse et Art (2012). Élèves axe "procédés" - Travaux de classe - YouScribe www.youscribe.com › Catalogue › Education › Travaux de classe100p **.**

Chene. C. (2004). Les Amidons, Journal de l'ADRIANOR, Agro-Jonction n°34, danshttp://www.adrianor.com/adrianor/les%20dossiers%20techniques%20CEAI_fichiers/Amidons%201%E8r e%20partie.pdf.

Cnr (2002). cnr@nordnet.fr www.cercle-recyclage.asso.fr www.produits-recycles.com.

Cnrtl (2012). Papier. http// www.cnrtl.fr consulté en Février 2013

CNUDD 2012. Conférence des Nations Unies sur le Développement Durable (CNUDD) ou Rio +20, rapport pays national du ministère de l'environnement et du développement durable en cote d'ivoire dans la perspective de rio+20.

Efectis France (2007). Rapport de classement n° 12–a–527–révision 1. Selon les normes en 15650 : 2010 et en 13501-3. https://pro.aldes.fr/media/8023/feu-efectis-12-a-527-rc.pdf

Fraternité du matin (2017), mercredi 29 mars, https://www.fratmat.info/index.php/nos-unes/valorisation-simplifiee-des-dechets-quatreentites-s-inscrivent-dansla demarche.

Gonen R.(2010). http://bouchons14.free.fr/Pages/recyclage.htm [archive],« Aboutus » [archive],RecycleBank. Consulté le 13 janvier 2010

Histoire du papier (2013) http://glyco3d.cermav.cnrs.fr/glyco3d/lessons/modeling/index.htmlhttp://inventors.about.com/library/inventors/blpapermaking. htm (http://www.lepapier.fr/lepapier-papiercarton.htm) consulté le 12 03 2015.

Le papier c'est la vie. www.lepapier.fr consulté le 23/03/17

Marina M. et Cristina G. (2011). Le papier : Généralités. ttp//www.wikipedia.org consulté en Janvier 2013.

Papercrete news (2003). http : //jmob.free.fr/liant-papier/liant-paier.htm

Plafond suspendu Owa(2018) http://www.owa.de/docs/pdf/DS_941_F_Gamme_Cosmos_010903.pdf consulté le 19/04/2018pp. 421-432, Jun, 2009.

pettex (2016). http://www.pettex.co.uk/

Semi sarl (2014). http://www.lameilleureisolation.com/qu-est-ce-que-la-ouate-cellulose.html

Seme (surveillance, environnement, marin, estuarien) (2001). La pollution générée par les papeteries, Procédés de fabrication [en ligne], disponible surhttp://www3.uqar.uquebec.ca/jpellerin/seme/04_pollution_matiere_orga/pollution_papeteries.htm (consulté le 20/02/2017)

SKF industrial division (2011) http://www.direct-transmission.fr/docs/applications/Schema_SKF_production_pate_mecanique_detail.pdf

Steico https://www.steico.com/fr/

Ventsys (2011). http://insonorisation.ventsys.net/IMG/pdf/dalle-acoustique-melamine-plafond.pdf consulté le 19/04 2018

Wikimédia-fondation (2010): https://fr.wikipedia.org/wiki/Coton#Histoire page visité le 27/01/2017

www.consoglobe.com, (2012). Consulté le 19 octobre 2016.

www.copacel.fr(2004). industrie-papetiere

www.usipa.fr(2013). (Union des Sindicats des Industries des Produits Amylacés et de leurs dérivés).consulté le 23/03/2017

Annexes

I Annexe essais mécaniques ..... A 2

I.1 Essais de compression A 2

I.1.1 Liant plâtre ..... A 2

I.1.2 Liant amidon ..... A 9

I.2 Essais de flexion A 18

I.2.1 Liant plâtre ..... A 18

I.2.1 Liant amidon ..... A 25

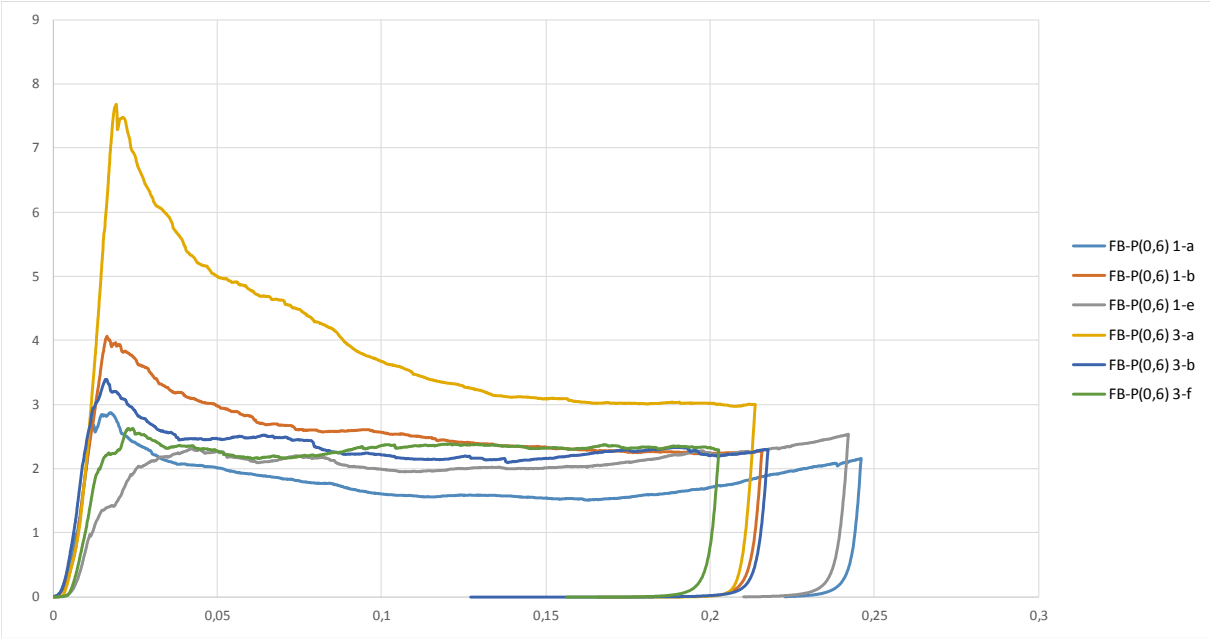
I Annexe essais mécaniques

I.1 Essais de compression

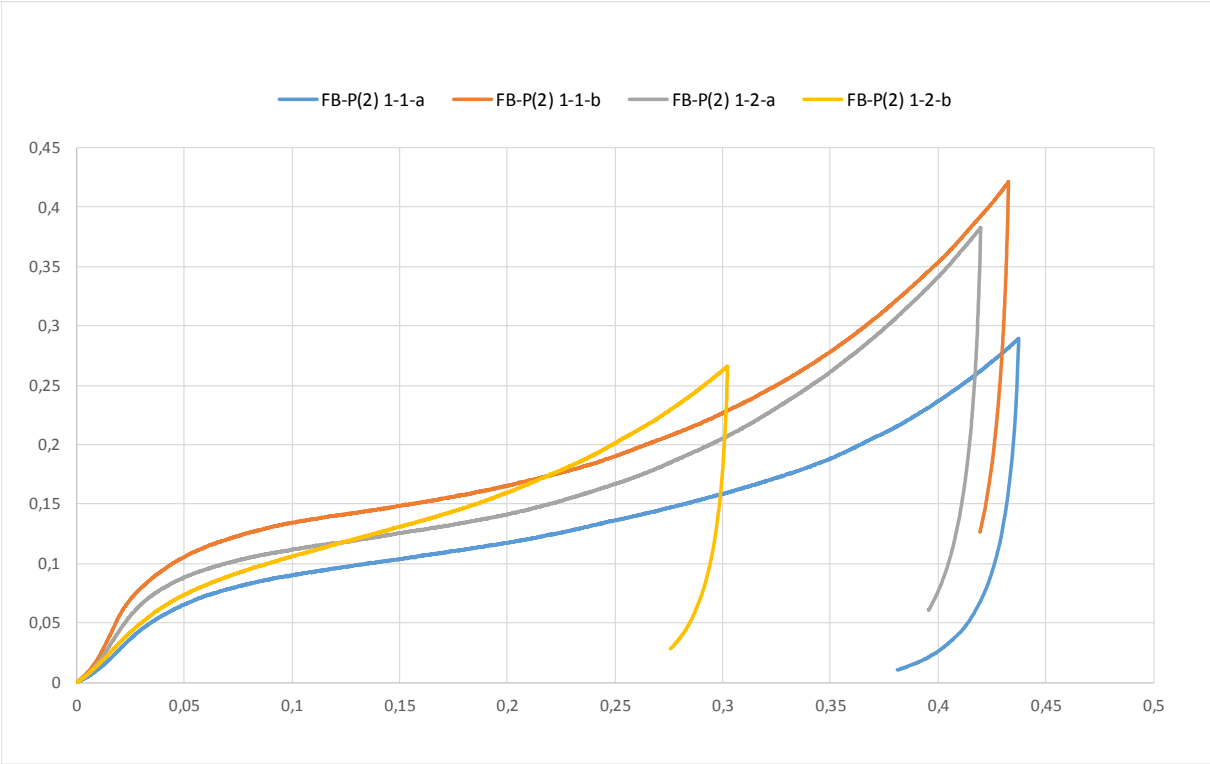
I.1.1 Liant plâtre

Caractéristiques moyennes identifiées lors des essais de compression – liant plâtre

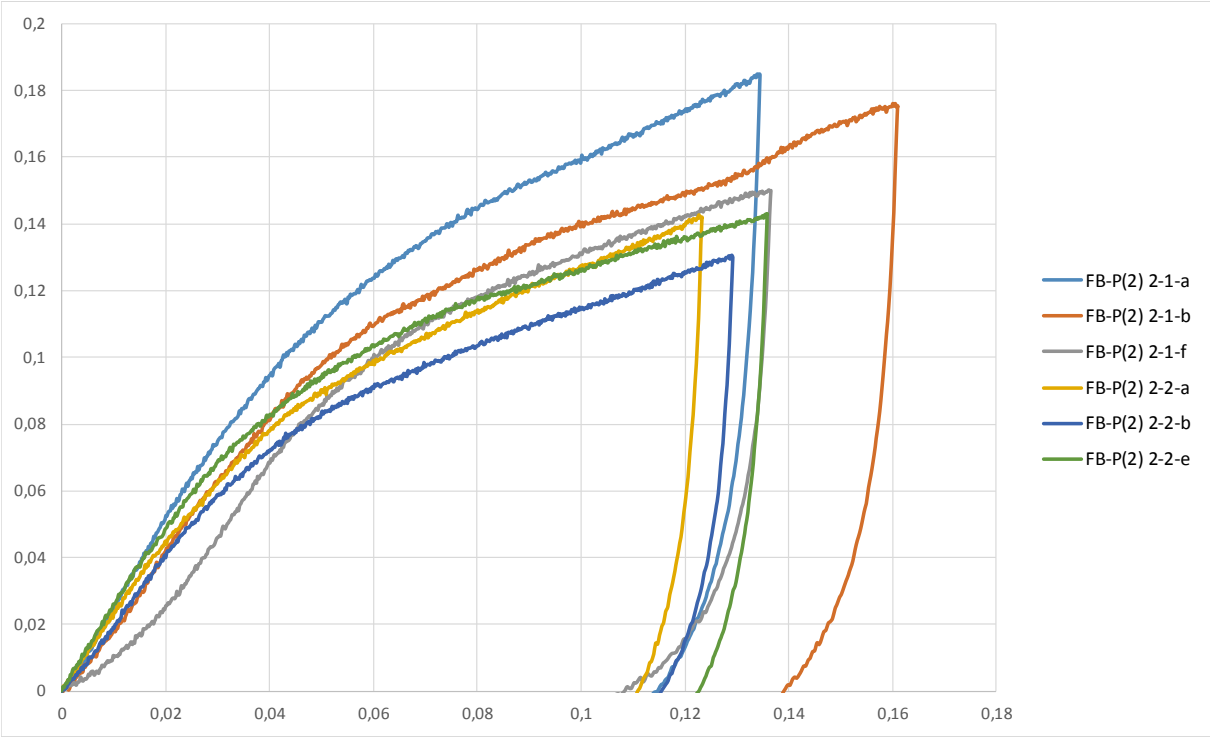
		ρ(kg/m3)	Rc (MPa)	E (MPa)	def à Rc
FB-P(0,6)	moyenne	1053,17	3,81	365,57	0,02
	Ecart type	73,85	1,95	202,00	0,01
	Coeff Var	0,07	0,51	0,55	0,45
FB-P(2)1	moyenne	431,75	0,08	2,45	0,05
	Ecart type	27,58	0,02	1,00	0,00
	Coeff Var	0,06	0,22	0,41	0,06
FB-P(2)2	moyenne	497,50	0,10	2,34	0,05
	Ecart type	36,67	0,01	0,21	0,01
	Coeff Var	0,07	0,14	0,09	0,11
FB-P(2,5)	moyenne	444,00	0,09	2,80	0,04
	Ecart type	11,17	0,02	0,45	0,01
	Coeff Var	0,03	0,26	0,16	0,16
OC-P(0,6)	moyenne	1175,33	9,10	690,67	0,02
	ecart type	12,34	1,76	130,15	0,00
	Coeff Var	0,01	0,19	0,19	0,10
OC-P(2)	moyenne	611,00	1,19	53,55	0,03
	ecart type	32,06	0,25	15,06	0,01
	Coeff Var	0,05	0,21	0,28	0,18
OC-P(2,5)	moyenne	565,50	1,34	62,61	0,04
	ecart type	11,36	0,11	22,57	0,01
	Coeff Var	0,02	0,08	0,36	0,28
GP-P(0,6)	moyenne	1181,00	10,15	762,56	0,02
	ecart type	24,71	0,93	109,72	0,00
	coeff var	0,02	0,09	0,14	0,12
GP-P(1)	moyenne	888,25	3,41	287,23	0,02
	ecart type	452,43	1,56	135,27	0,04
	coeff var	0,51	0,46	0,47	1,89
GP-P(2)	moyenne	569,25	1,19	48,51	0,05
	ecart type	228,28	0,40	45,09	0,75
	coeff var	0,40	0,33	0,93	16,24
GP-P(2,5)	moyenne	588,50	1,42	61,80	0,04
	ecart type	27,68	0,17	18,46	0,01
	coeff var	0,05	0,12	0,30	0,18



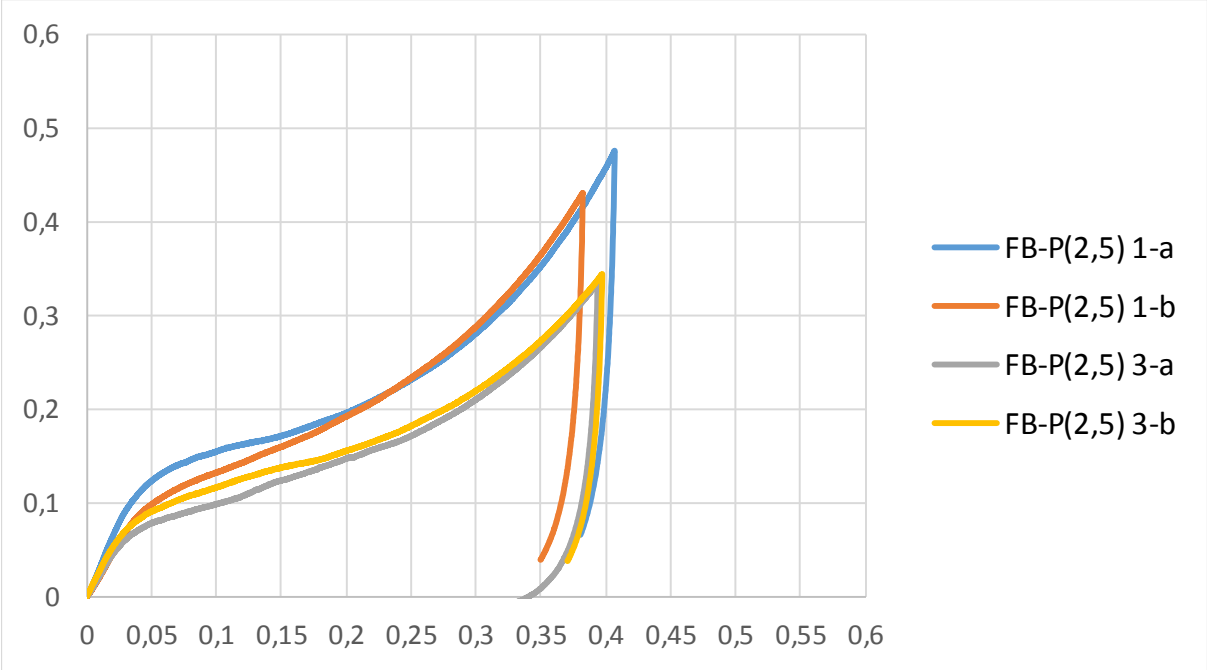
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons FB-P(0,6)



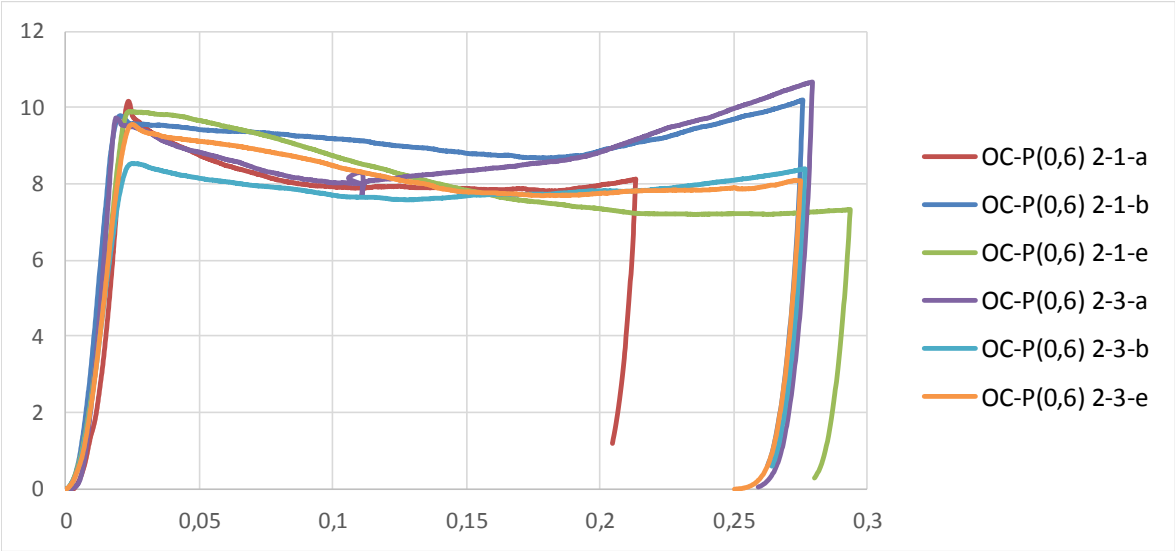
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons FB-P(2)1



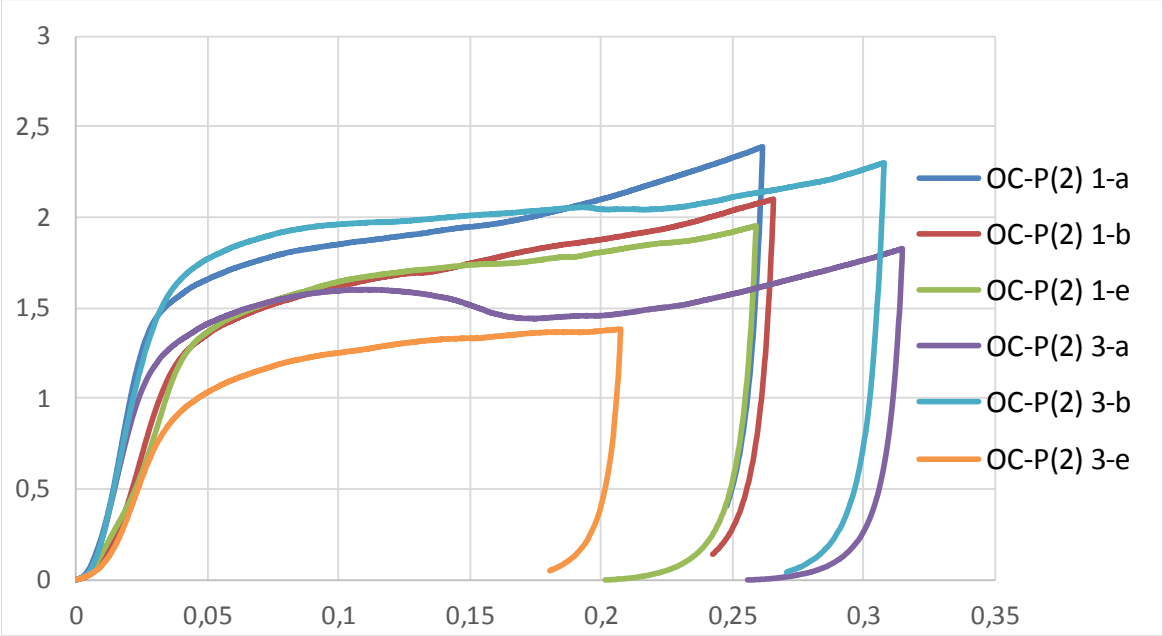
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons FB-P(2)2



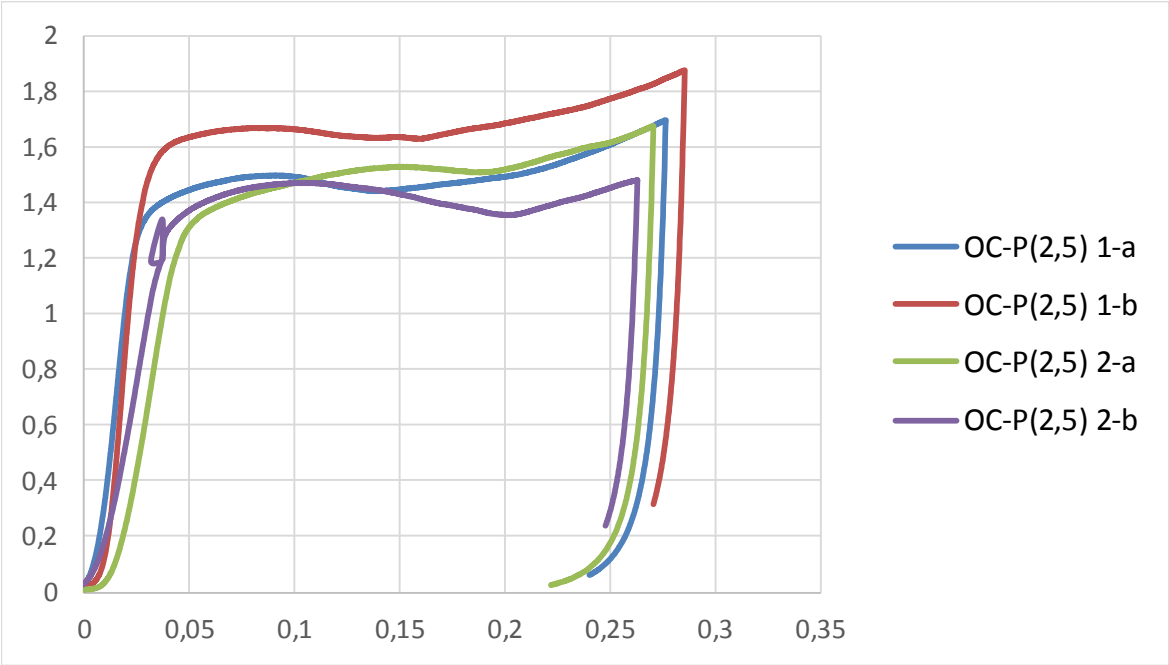
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons FB-P(2,5)



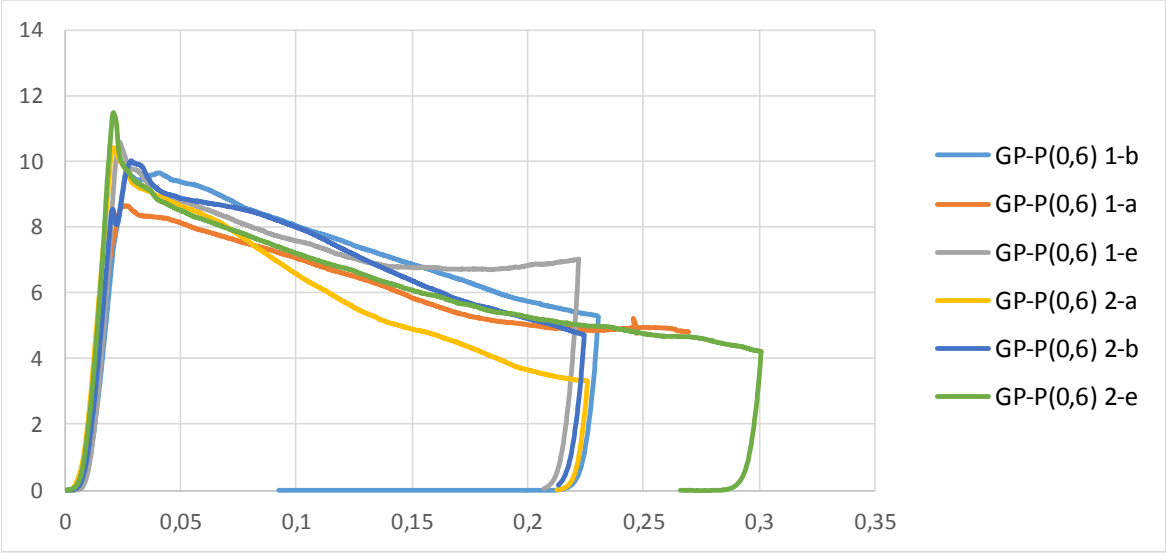
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons OC-P(0,6)



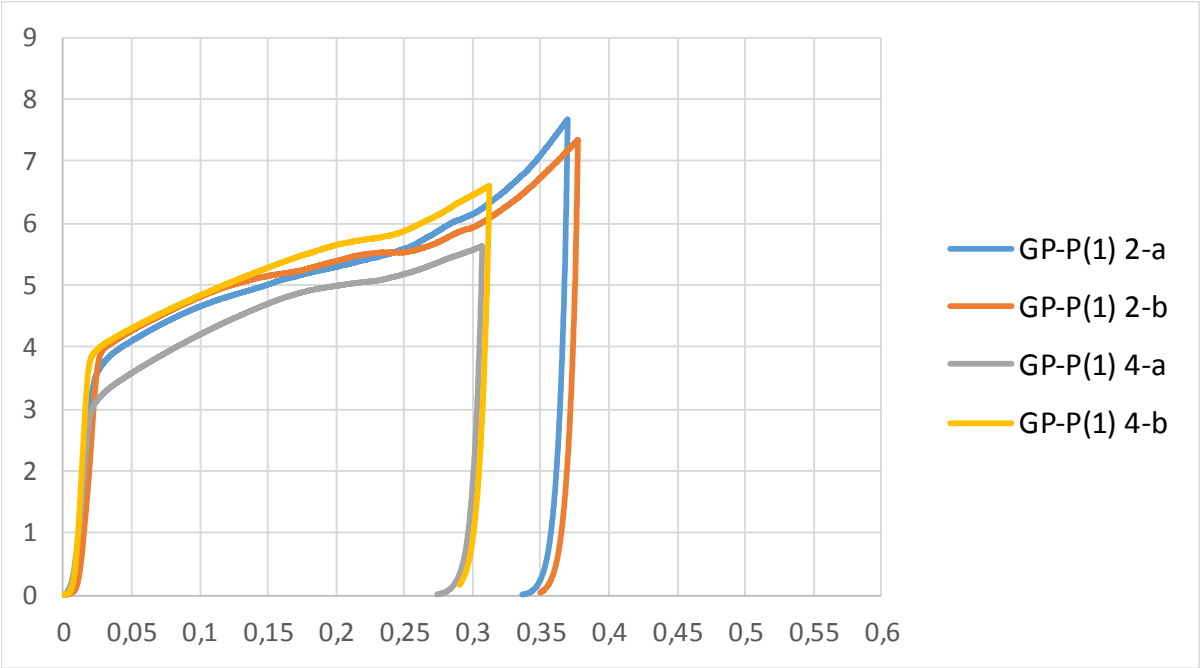
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons OC-P(2)



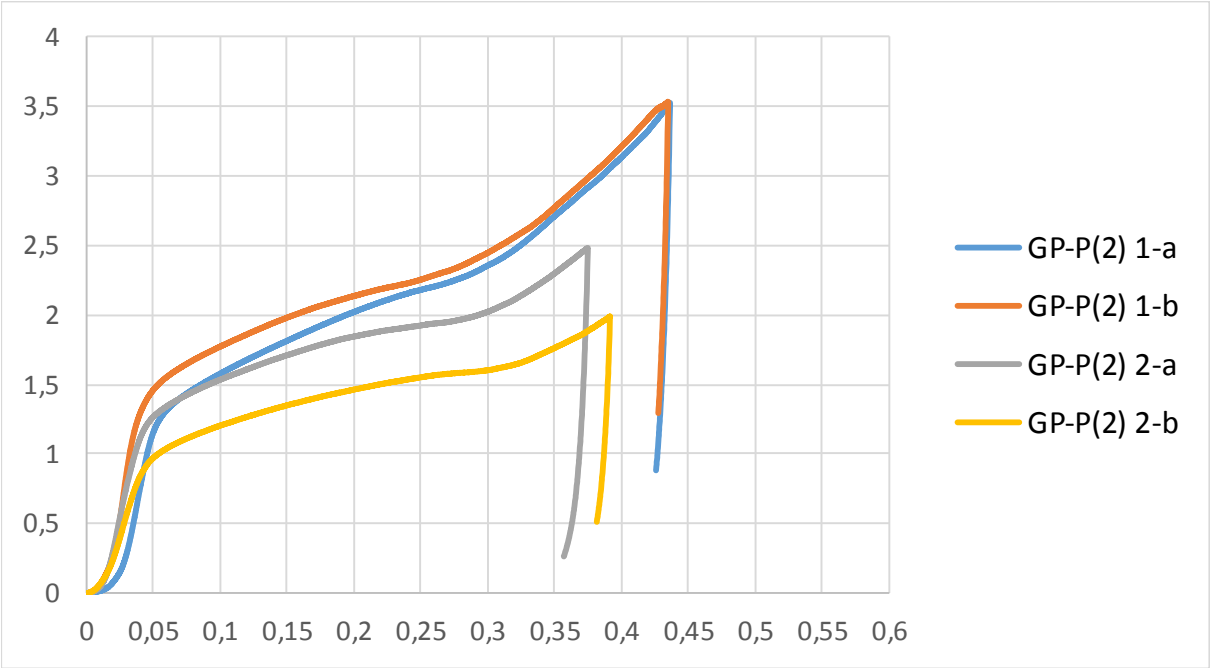
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons OC-P(2,5)



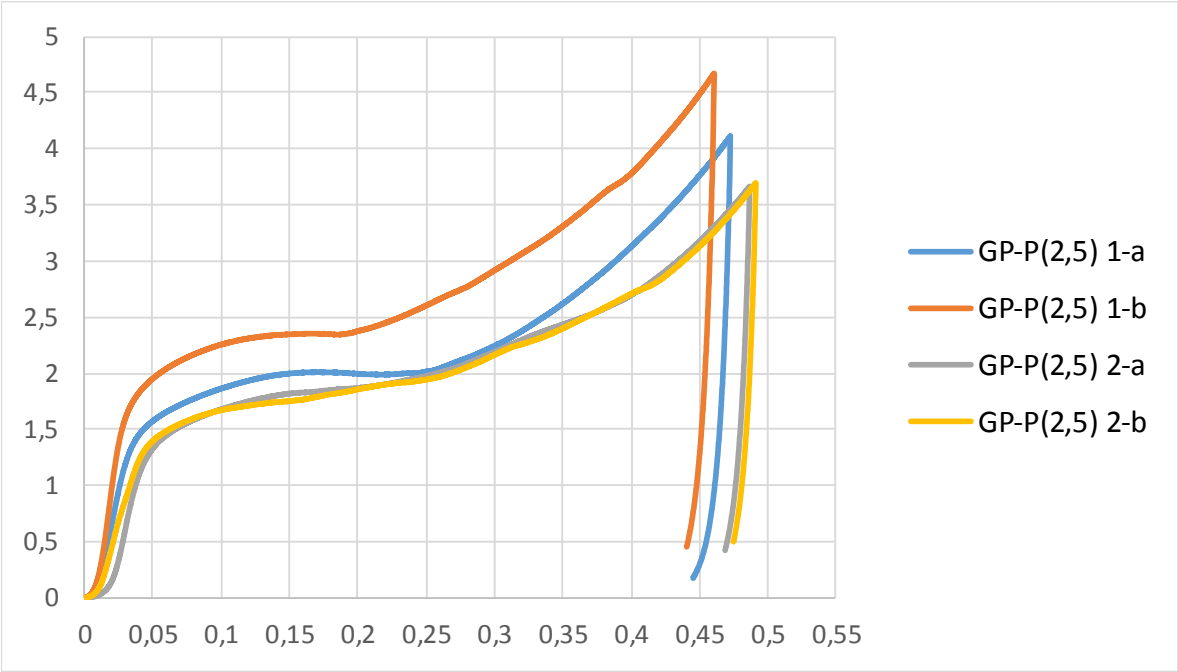
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-P(0,6)



Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-P(1)



Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-P(2)

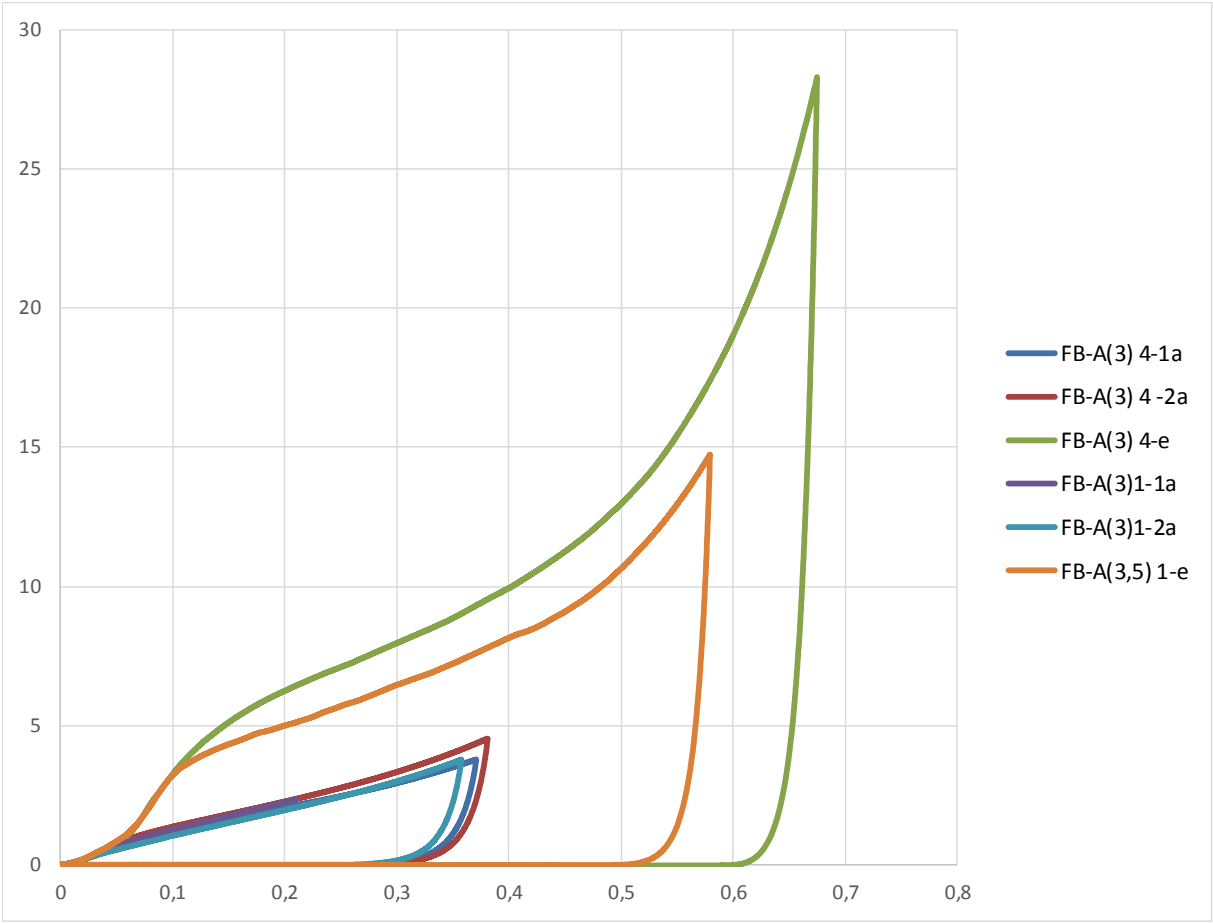


Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-P(2,5)

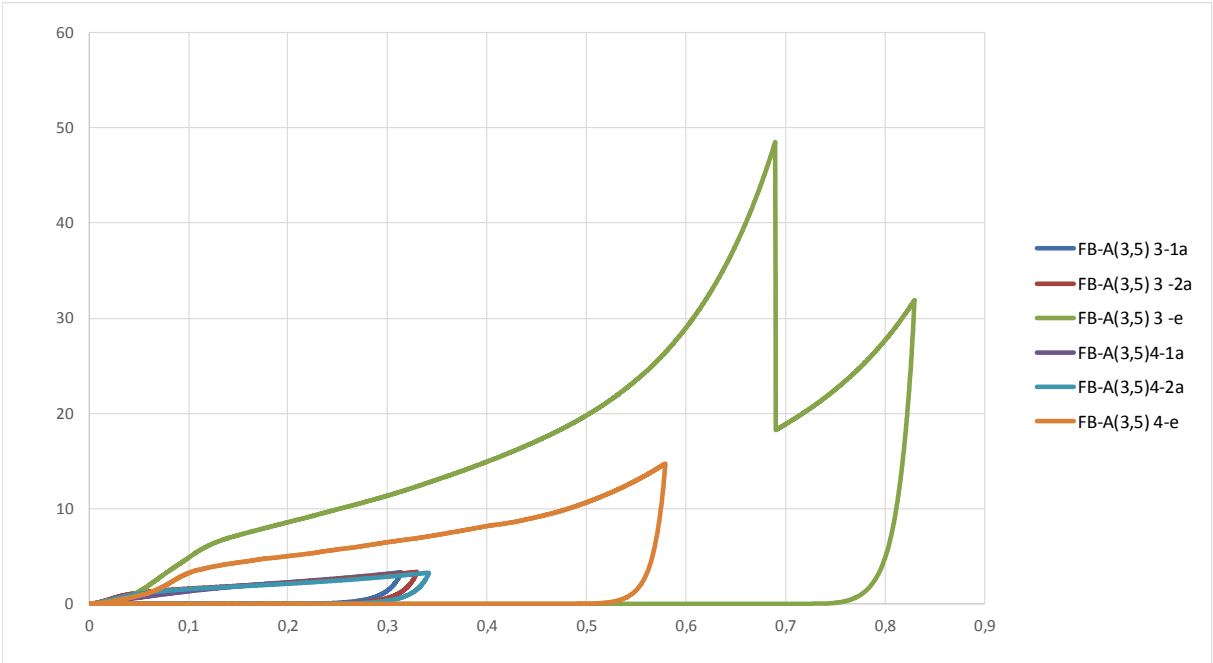
I.1.2 Liant amidon

Caractéristiques moyennes identifiées lors des essais de compression – Liant amidon

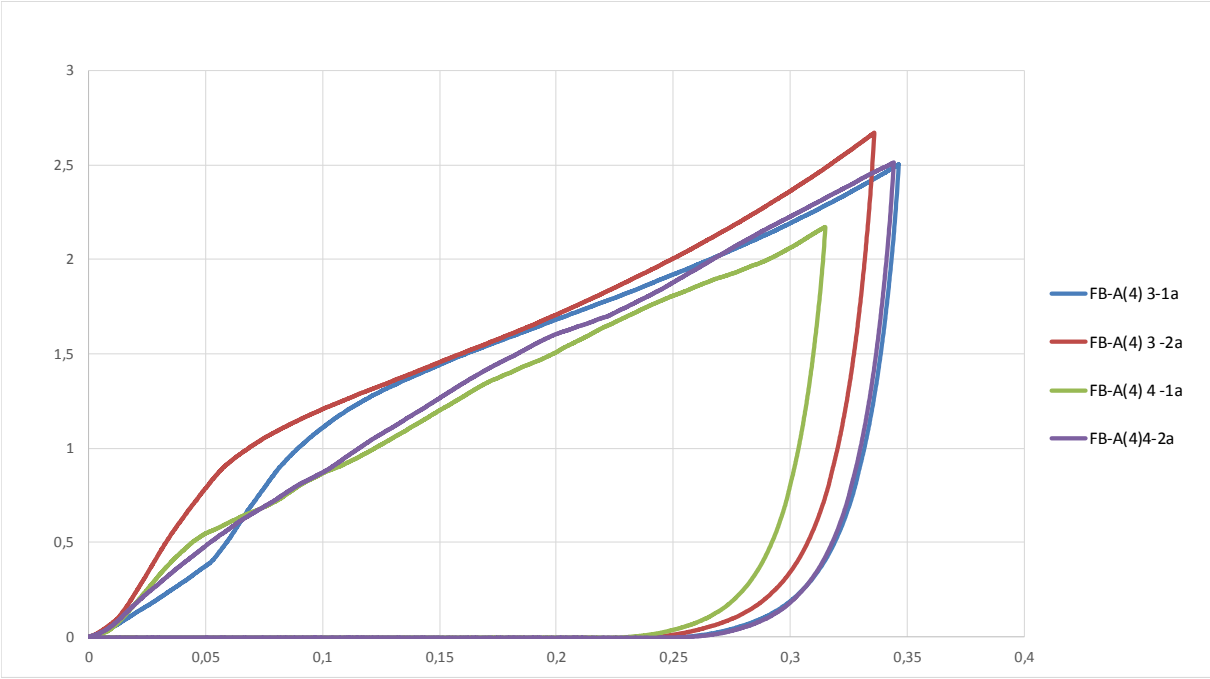
		ρ (kg/m^3)	Rc (Mpa)	E (MPa)	def à Rc
FB-A(3)	moyenne	391,40	0,71	16,84	0,05
	Ecart type	12,05	0,20	2,35	0,01
	Coeff de Var	0,03	0,28	0,14	0,17
FB-A(3,5)	moyenne	381,50	1,26	20,97	0,08
	Ecart type	2,53	0,12	7,94	0,03
	Coeff de Var	0,01	0,10	0,38	0,35
FB-A(4)	moyenne	349,47	0,97	15,67	0,08
	Ecart type	3,93	0,29	4,03	0,03
	Coeff de Var	0,01	0,30	0,26	0,34
OC-A(3)	moyenne	509,11	1,80	52,32	0,06
	Ecart type	31,05	0,95	24,98	0,02
	Coeff de Var	0,06	0,53	0,48	0,39
OC-A(3,5)	moyenne	486,10	1,97	83,39	0,04
	Ecart type	44,21	1,80	71,07	0,01
	Coeff de Var	0,09	0,92	0,85	0,23
OC-A(4)	moyenne	462,18	1,54	42,35	0,05
	Ecart type	31,22	0,68	10,10	0,01
	Coeff de Var	0,07	0,44	0,24	0,23
GP-A (2,86)	moyenne	556,00	2,80	92,79	0,06
	ecart type	16,85	0,26	40,17	0,02
	coeff var	0,03	0,09	0,43	0,35
GP-A(3)I	moyenne	479,06	0,87	28,98	0,04
	Ecart type	14,00	0,46	18,24	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,53	0,63	0,37
GP-A(3,5)I	moyenne	432,72	1,18	34,11	0,05
	Ecart type	22,42	0,48	16,65	0,02
	Coeff de Var	0,05	0,41	0,49	0,42
GP-A(4)I	moyenne	461,54	0,73	18,91	0,06
	Ecart type	13,75	0,15	13,80	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,21	0,73	0,37
GP-A(3)II	moyenne	541,04	1,41	39,29	0,05
	Ecart type	16,28	0,65	15,89	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,46	0,40	0,39
GP-A(3,25)II	moyenne	552,01	1,42	42,71	0,04
	Ecart type	12,18	0,76	17,67	0,01
	Coeff de Var	0,02	0,53	0,41	0,27
GP-A(3,5)II	moyenne	544,05	1,07	32,59	0,04
	Ecart type	11,95	0,40	3,33	0,02
	Coeff de Var	0,02	0,38	0,10	0,37
GP-A(3,75)II	moyenne	552,31	1,74	32,84	0,07
	Ecart type	19,32	0,79	5,61	0,03
	Coeff de Var	0,03	0,45	0,17	0,41
GP-A(4)II	moyenne	605,91	1,88	45,98	0,05
	Ecart type	18,60	0,78	21,64	0,02
	Coeff de Var	0,03	0,42	0,47	0,41



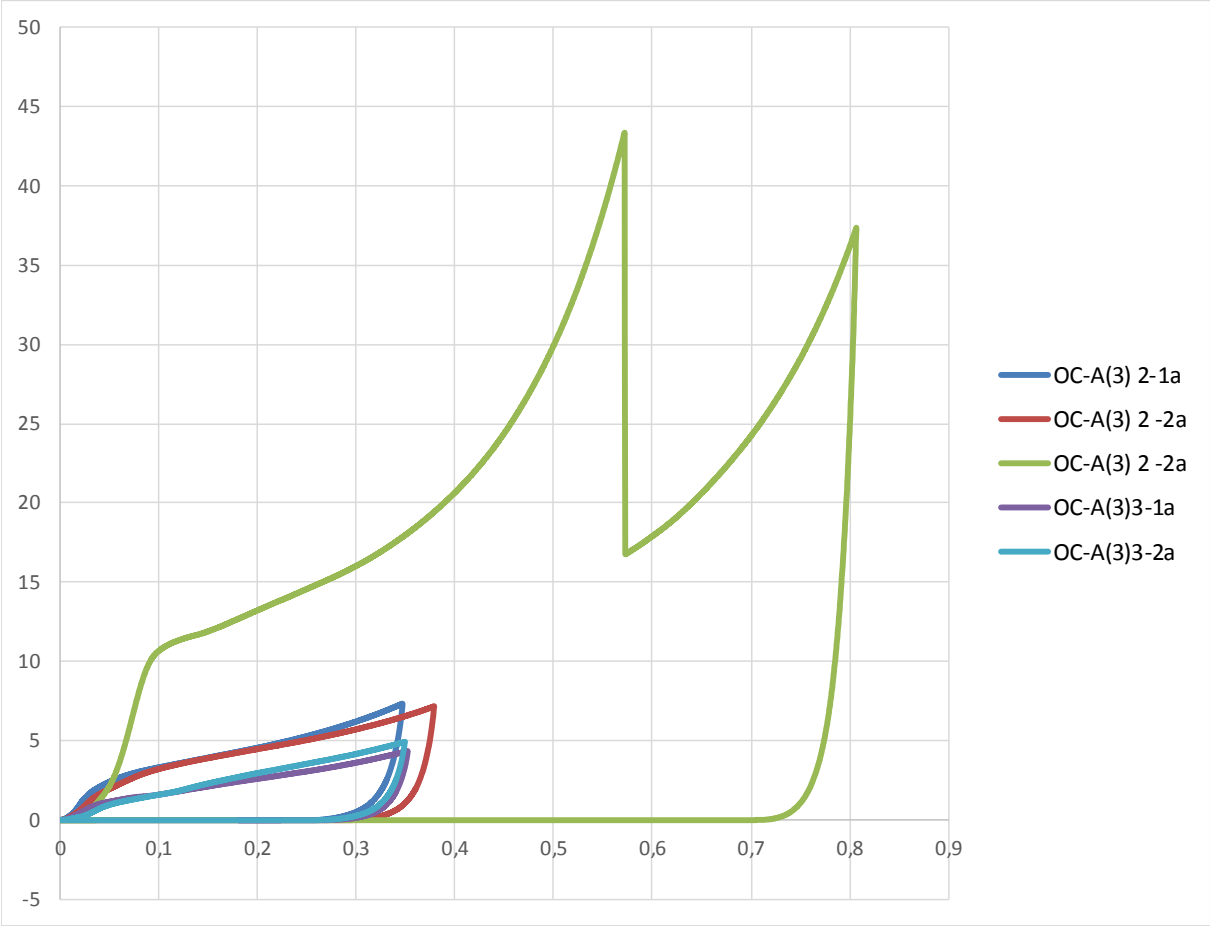
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons FB-A(3)



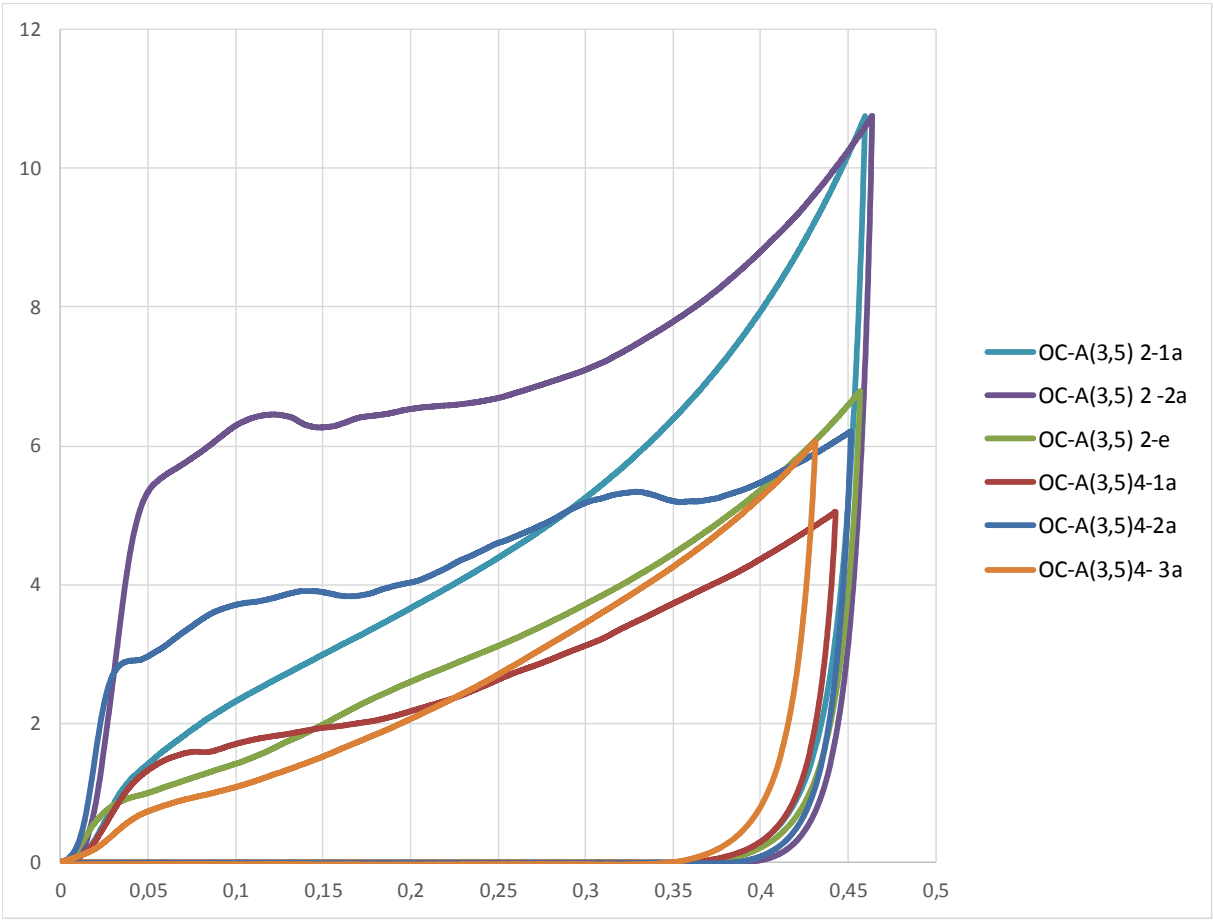
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons FB-A(3,5)



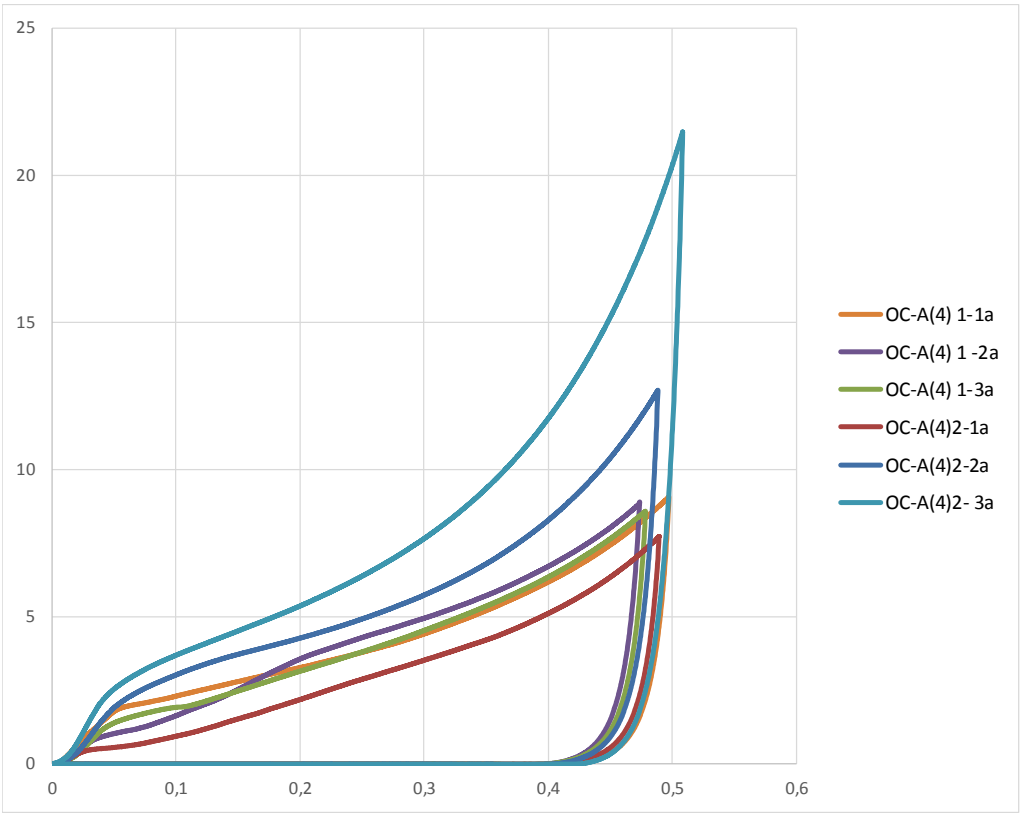
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons FB-A(4)



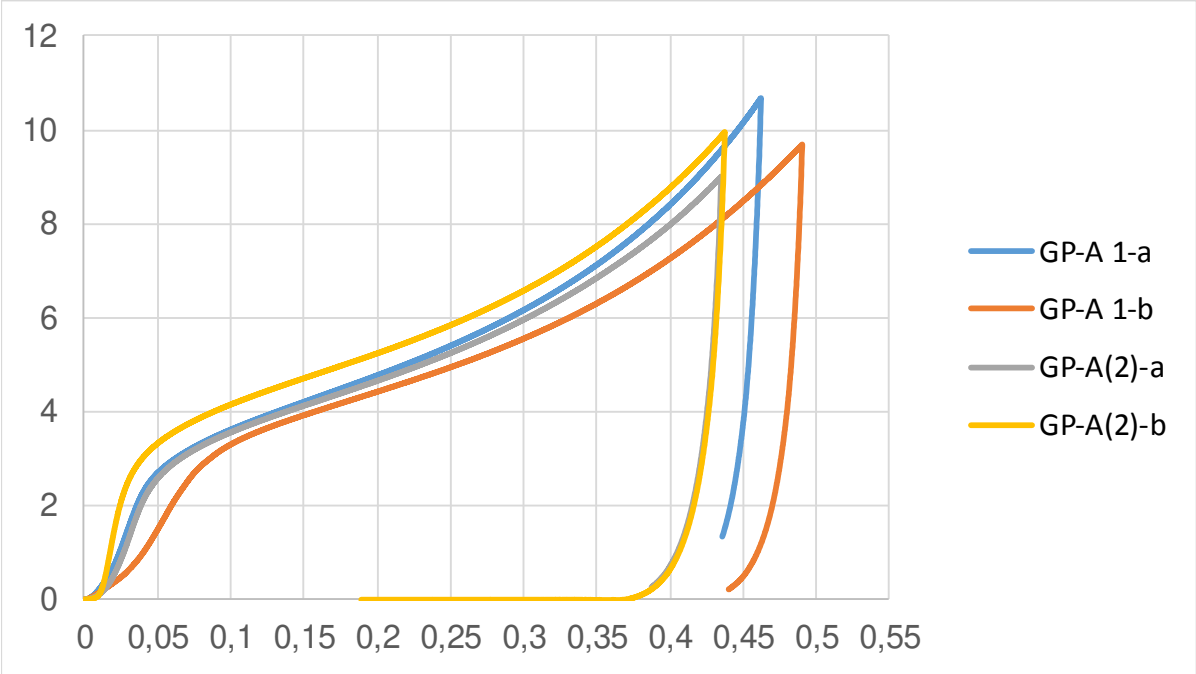
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons OC-A(3)



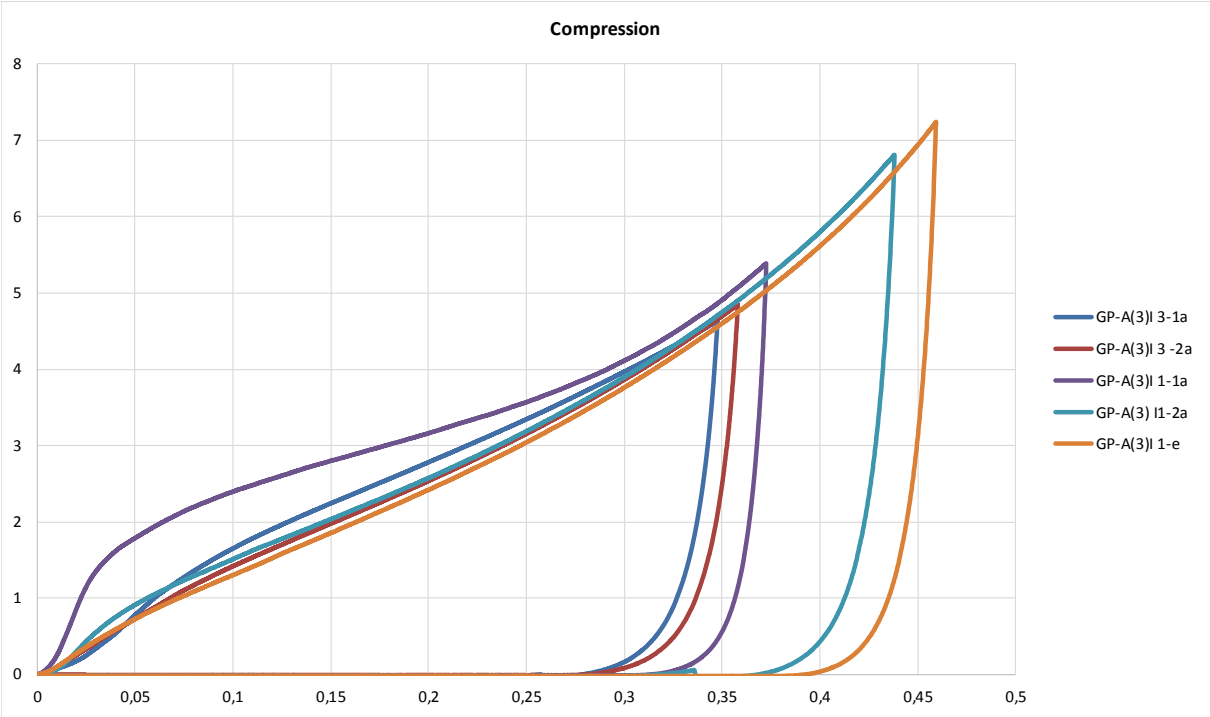
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons OC-A(3,5)



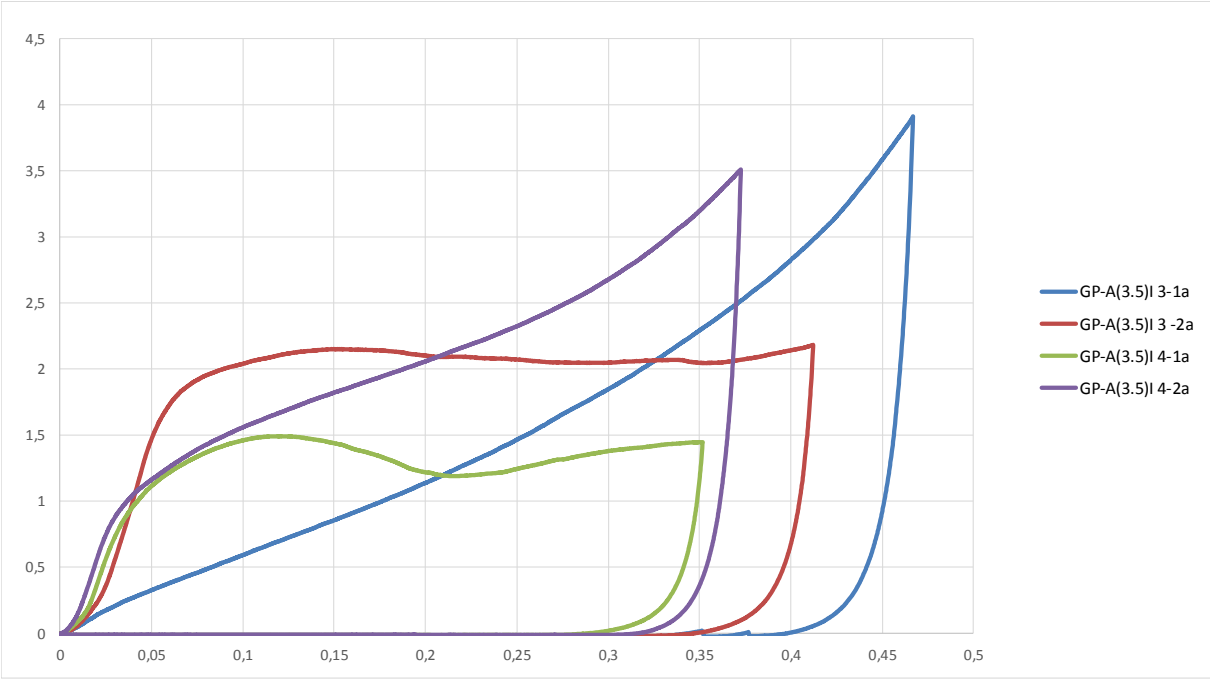
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons OC-A(4)



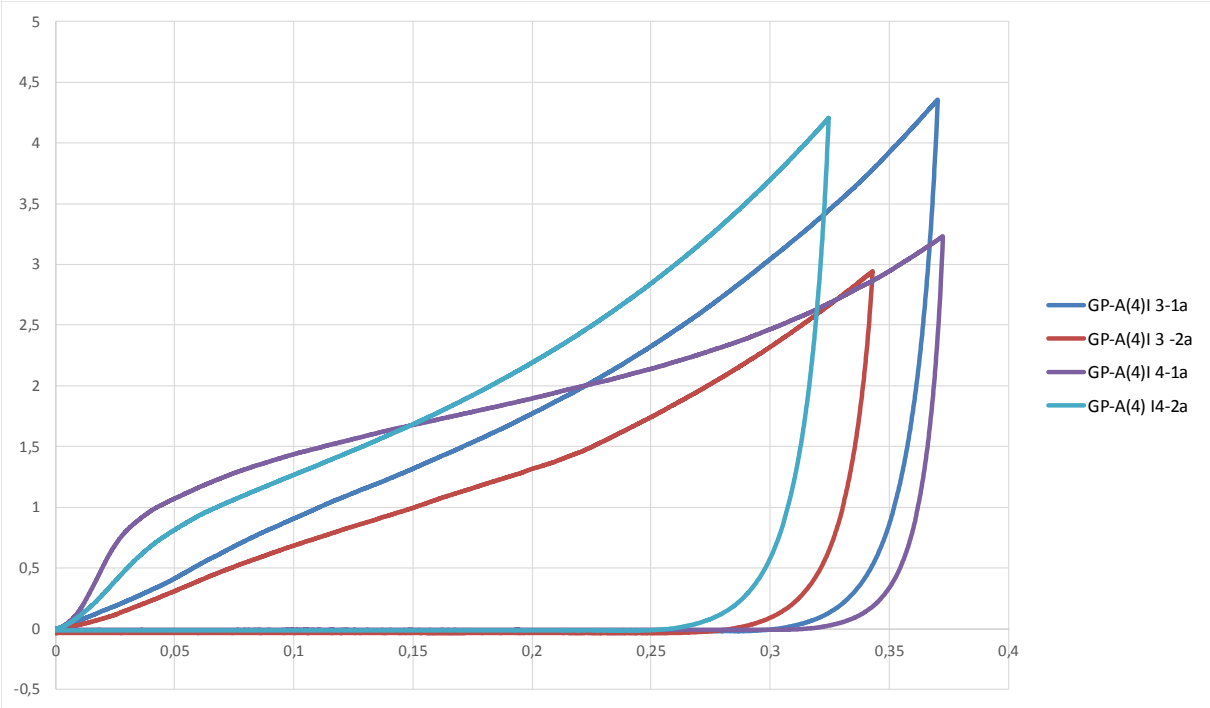
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A (2,86)



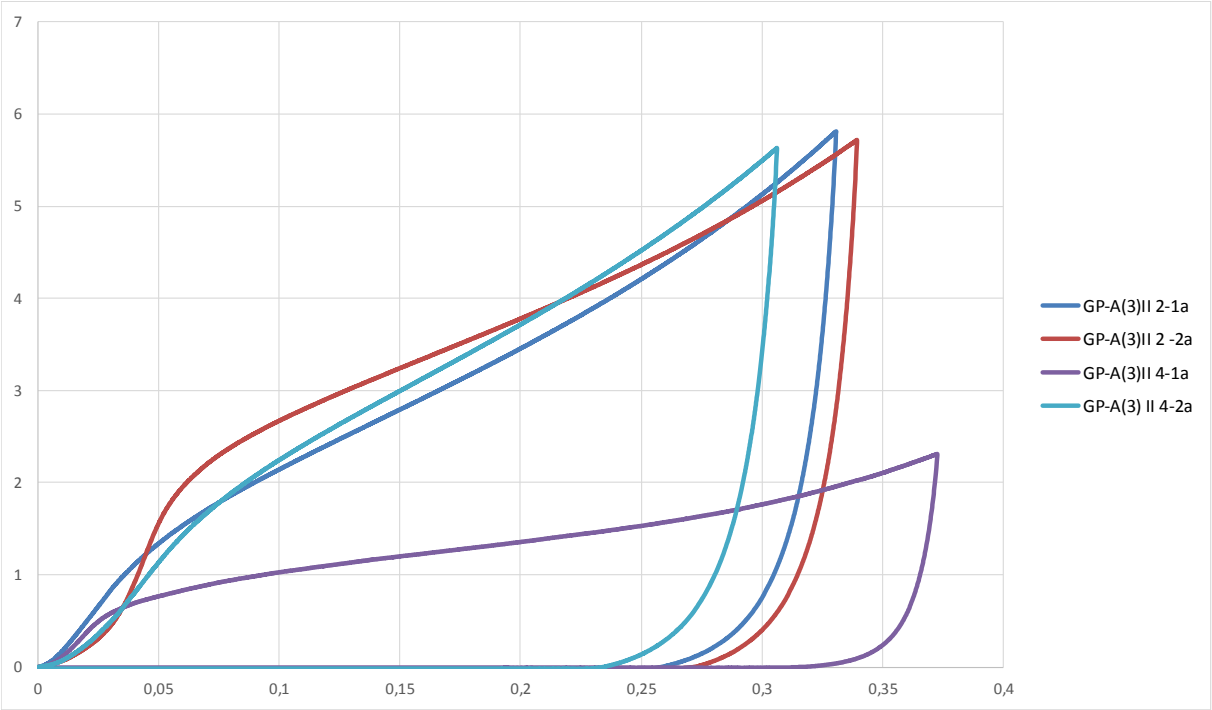
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(3)I



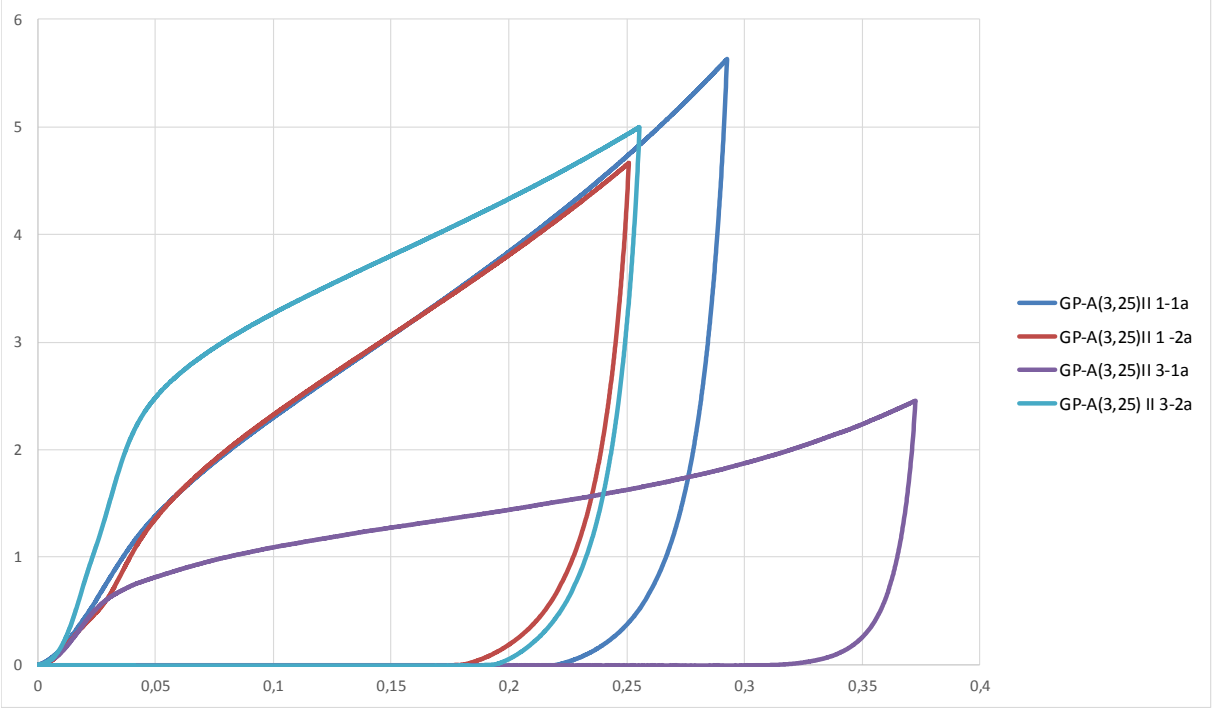
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(3,5)I



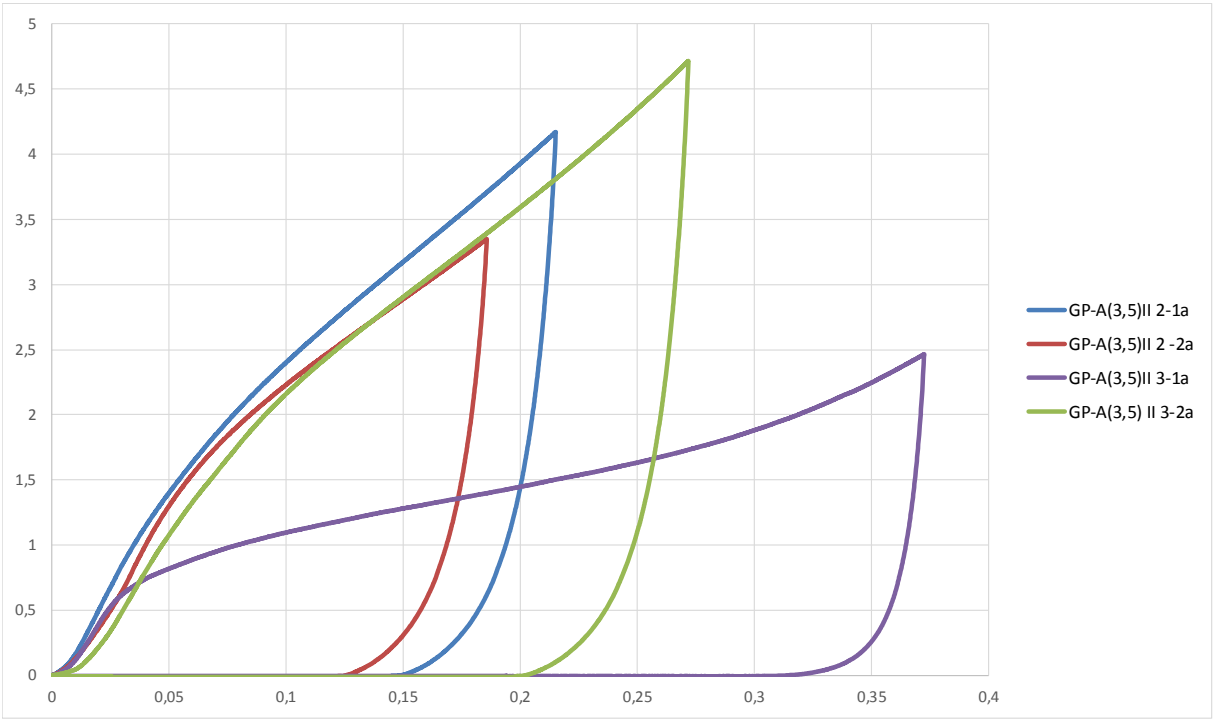
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(4)I



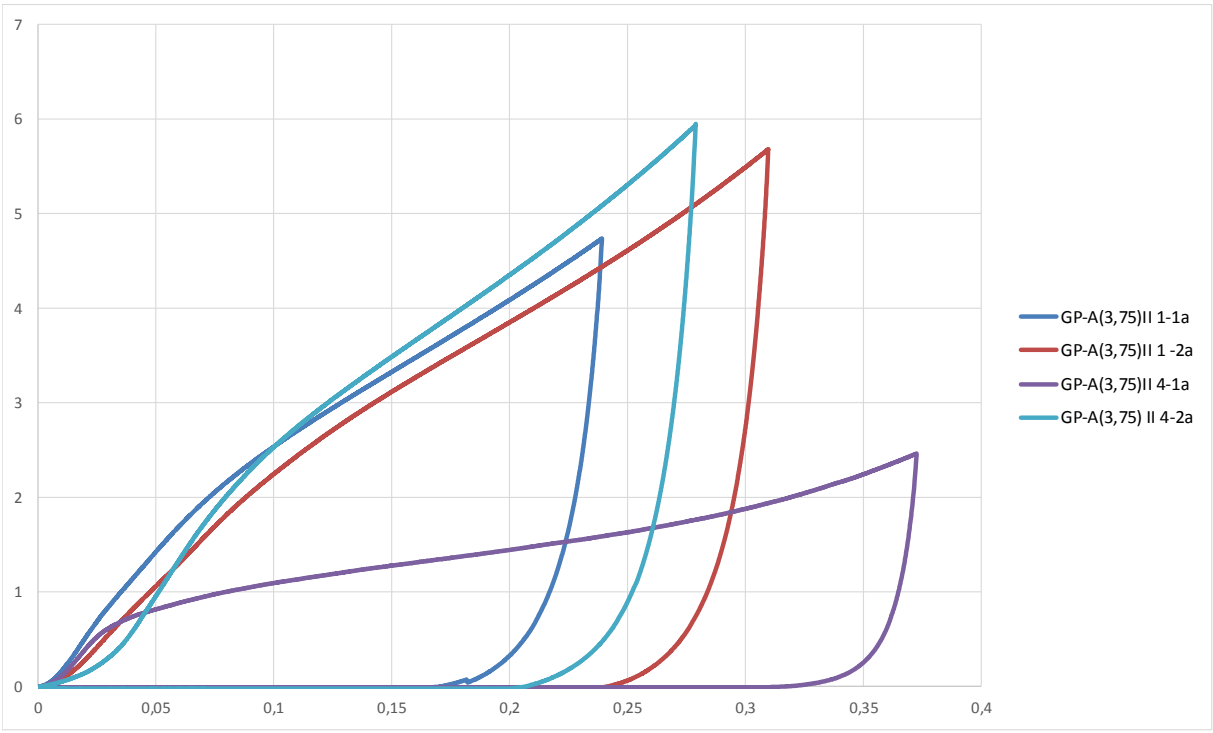
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(3)II



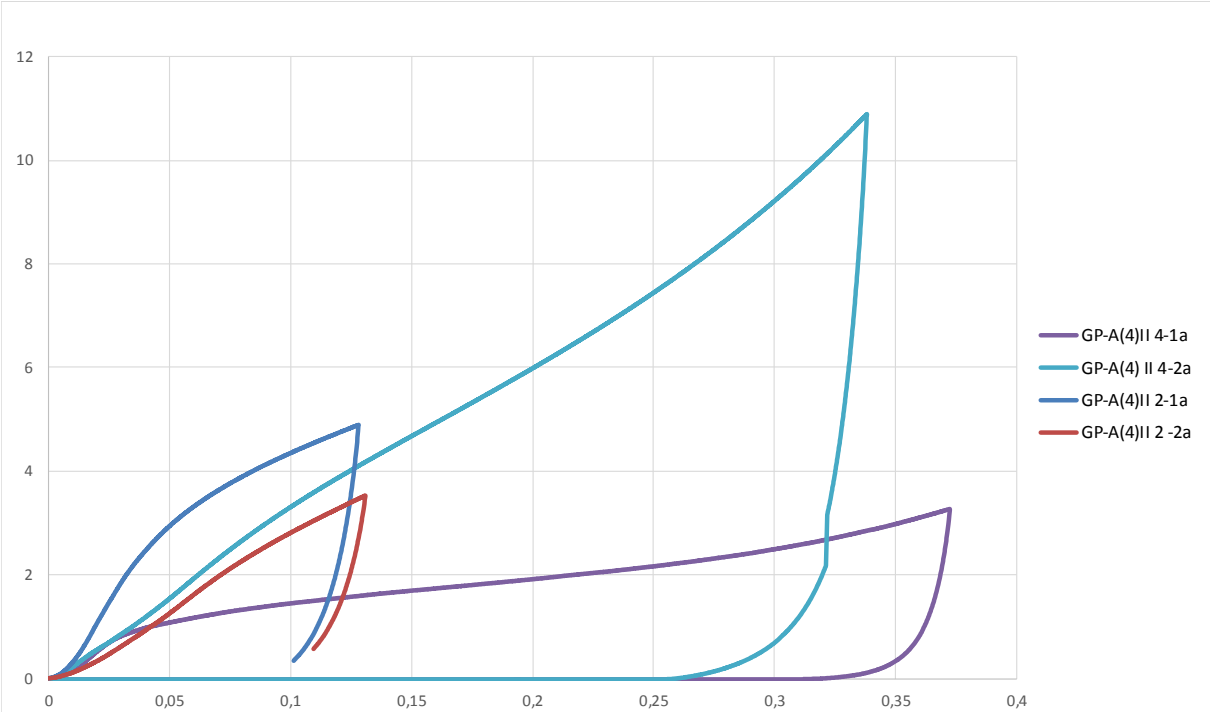
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(3,25)II



Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(3,5)II



Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(3,75)II



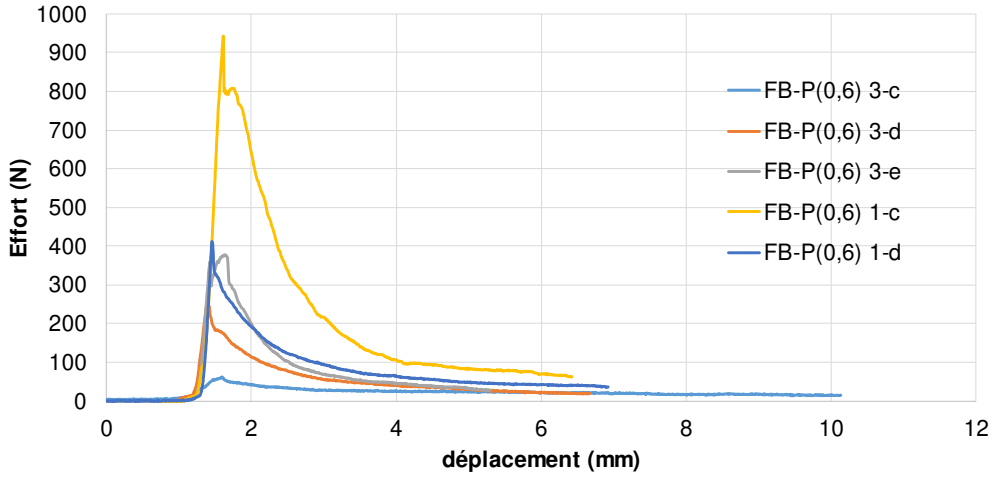
Courbes déformation (m/m) – contrainte (MPa) correspondant aux échantillons GP-A(4)II

I.2 Essais de flexion

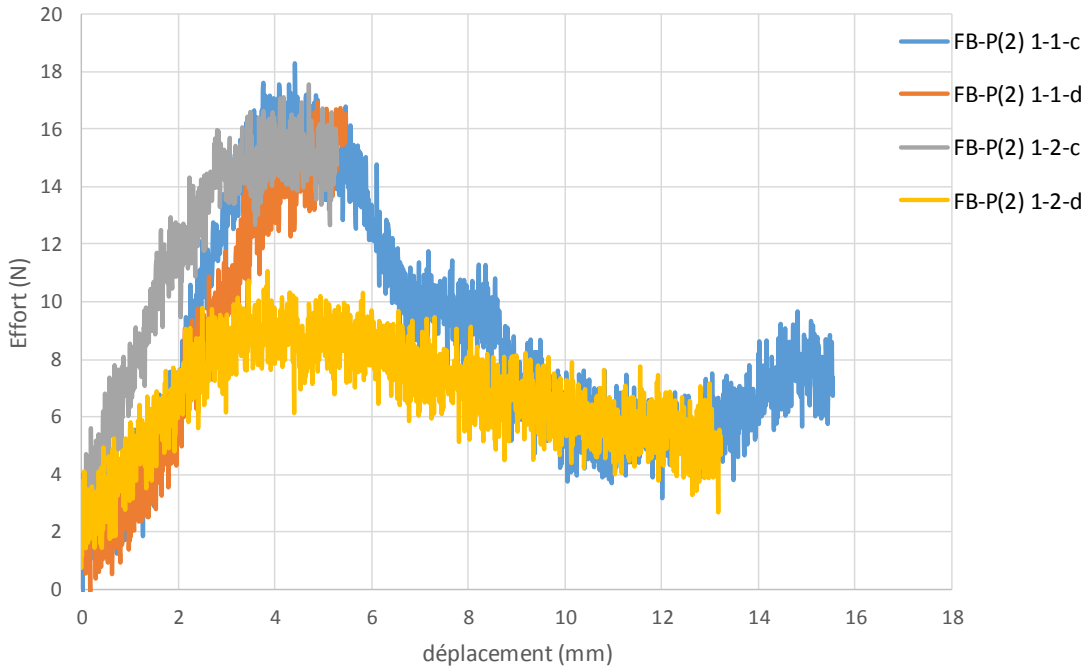
I.2.1 Liant plâtre

Résistance en traction par flexion – Liant plâtre

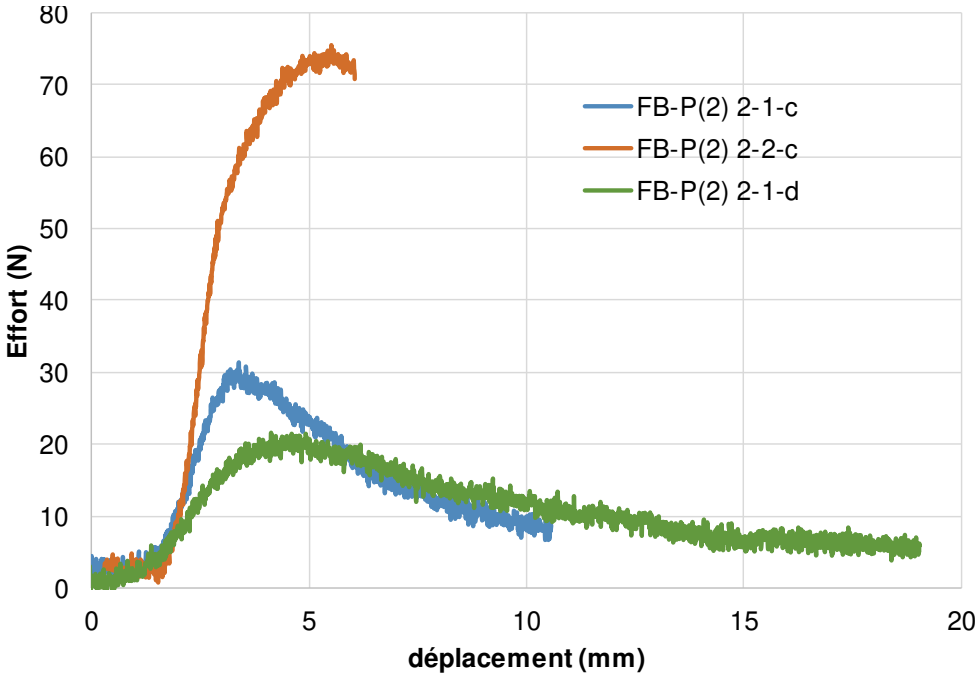
		ρ (kg/m^3)	Rt (MPa)
FB-P(0,6)	moyenne	1026,80	1,51
	Ecart type	52,96	0,80
	Coeff Var	0,05	0,53
FB-P(2)1	moyenne	442,00	0,07
	Ecart type	22,11	0,02
	Coeff Var	0,05	0,27
FB-P(2)2	moyenne	507,33	0,16
	Ecart type	14,74	0,07
	Coeff Var	0,03	0,43
FB-P(2,5)	moyenne	441,67	0,11
	Ecart type	14,57	0,02
	Coeff Var	0,03	0,20
OC-P(0,6)	moyenne	1184,20	4,88
	ecart type	11,14	0,90
	Coeff Var	0,01	0,18
OC-P(2)	moyenne	615,80	0,56
	ecart type	16,12	0,19
	Coeff Var	0,03	0,33
OC-P(2,5)	moyenne	569,25	0,58
	ecart type	20,53	0,08
	Coeff Var	0,04	0,13
GP-P(0,6)	moyenne	1157,80	3,58
	ecart type	6,00	0,71
	coeff var	0,01	0,20
GP-P(1)	moyenne	901,67	2,79
	ecart type	25,01	0,62
	coeff var	0,03	0,22
GP-P(2)	moyenne	568,33	0,73
	ecart type	23,59	0,22
	coeff var	0,04	0,30
GP-P(2,5)	moyenne	597,00	1,08
	ecart type	17,61	0,09
	coeff var	0,03	0,08



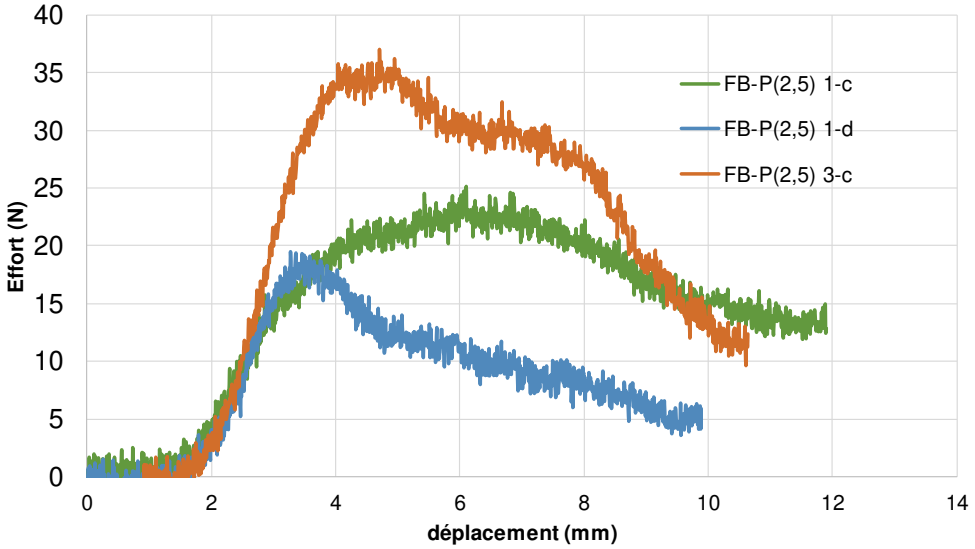
Essais de flexion sur les échantillons FB-P(0,6)



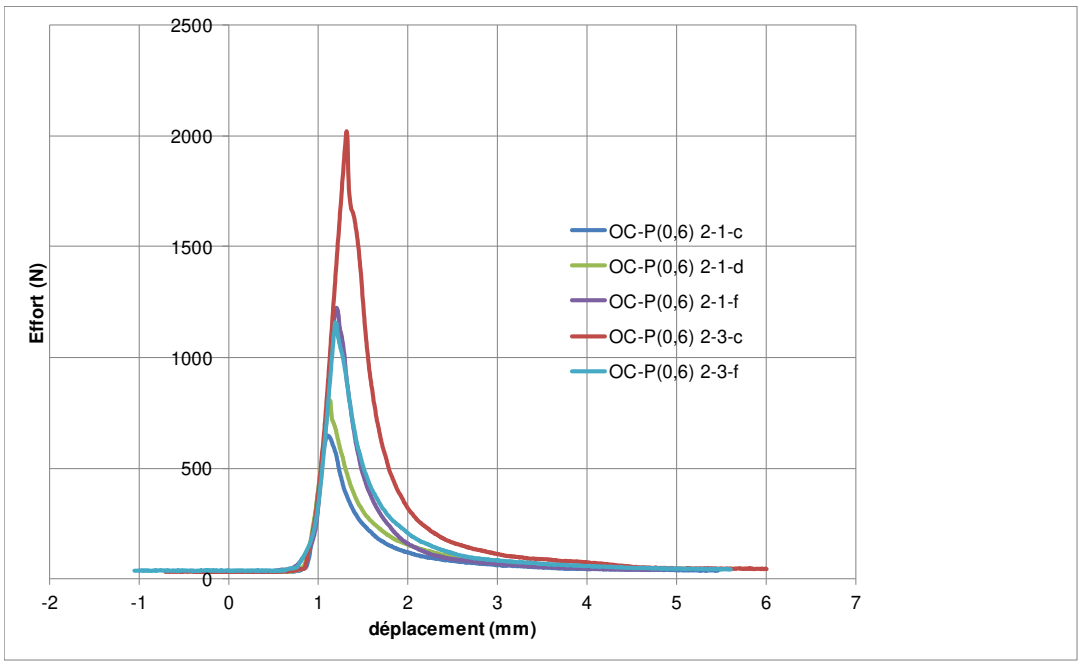
Essais de flexion sur les échantillons FB-P(2)1



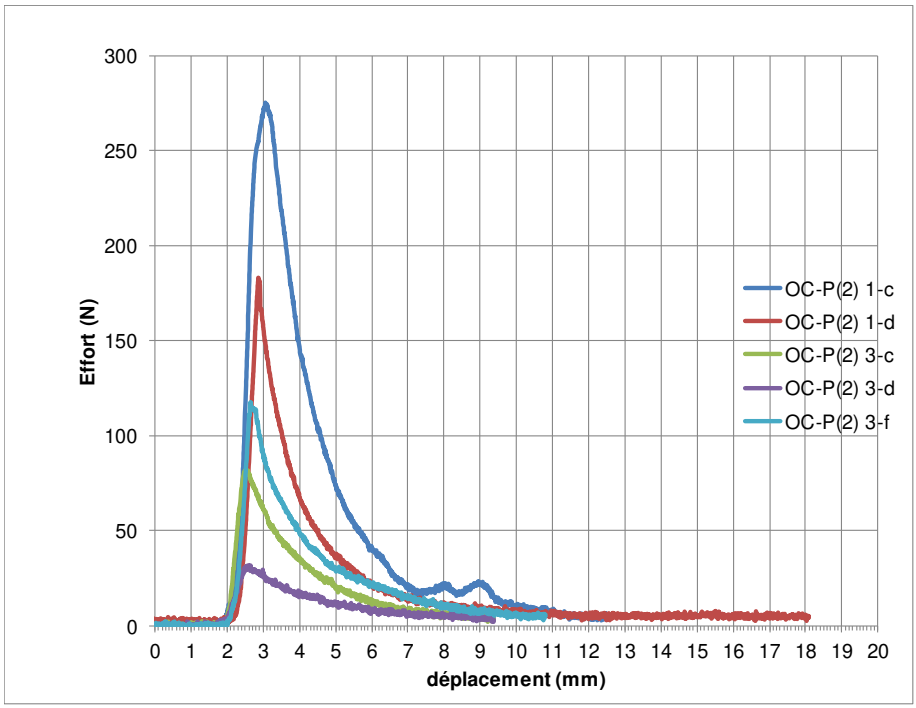
Essais de flexion sur les échantillons FB-P(2)2



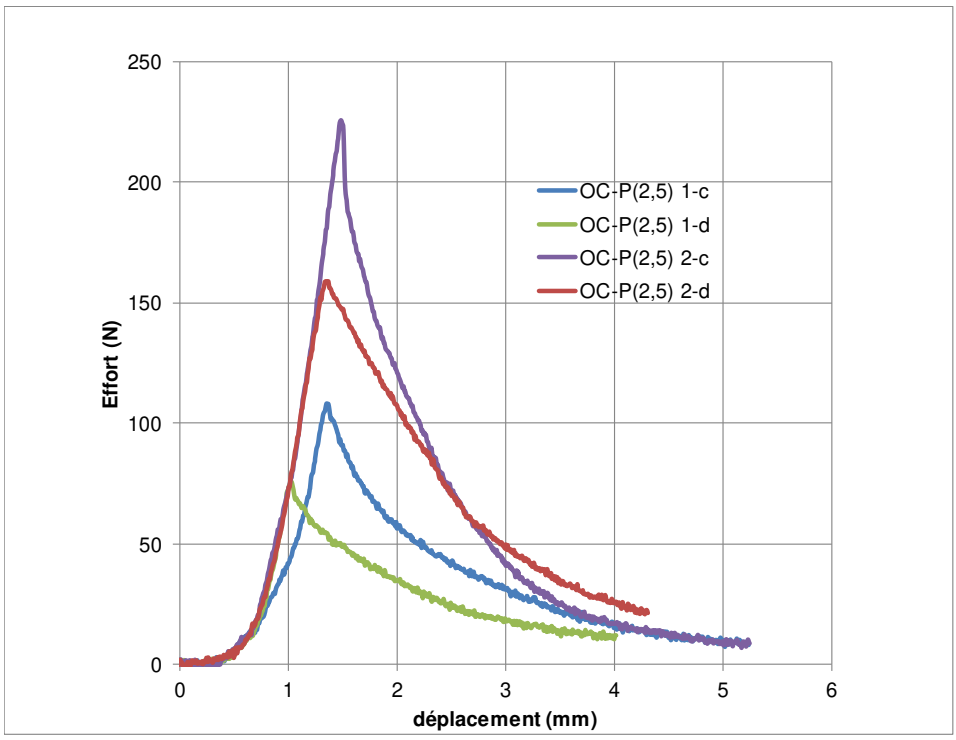
Essais de flexion sur les échantillons FB-P(2,5)



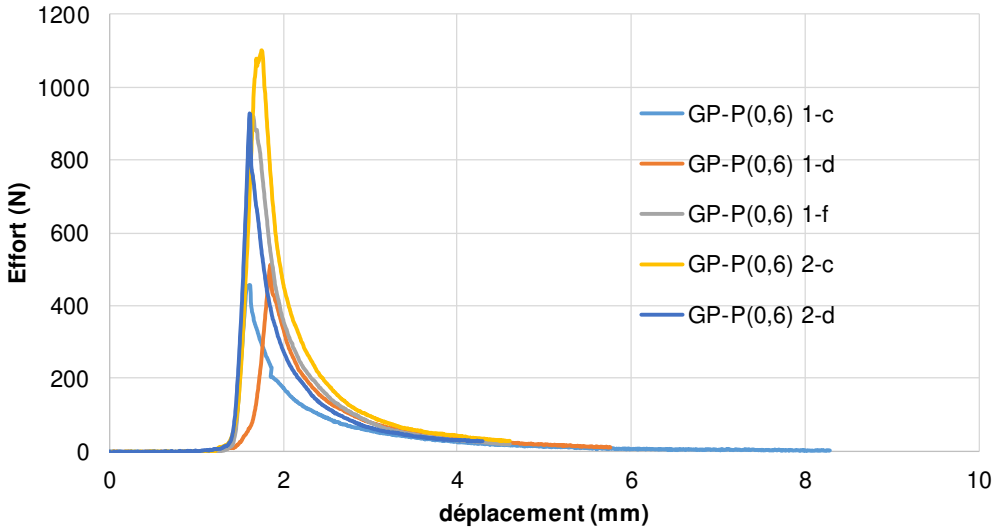
Essais de flexion sur les échantillons OC-P(0,6)



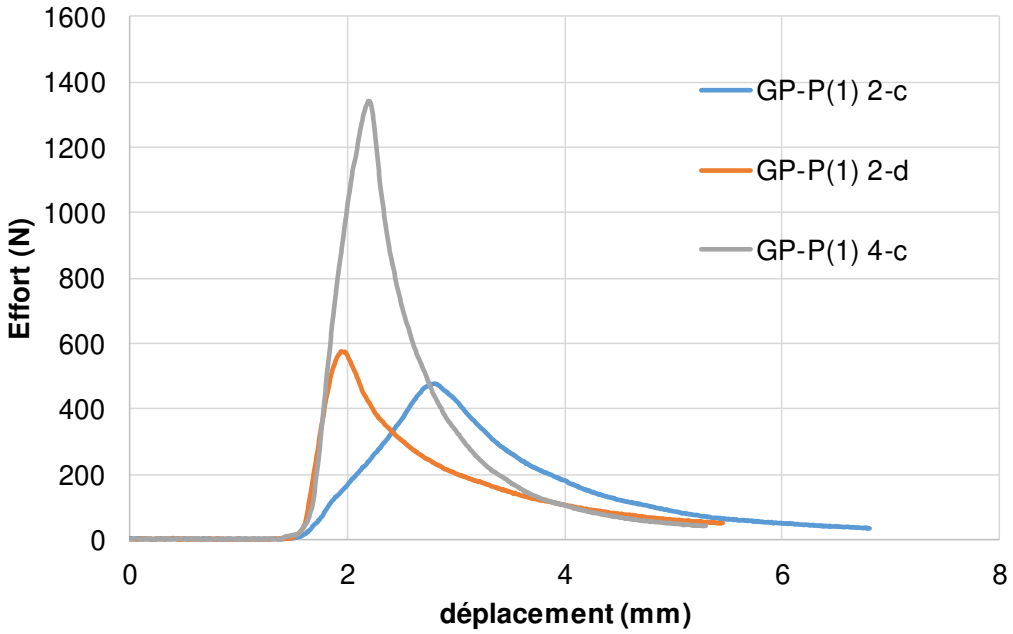
Essais de flexion sur les échantillons OC-P(2)



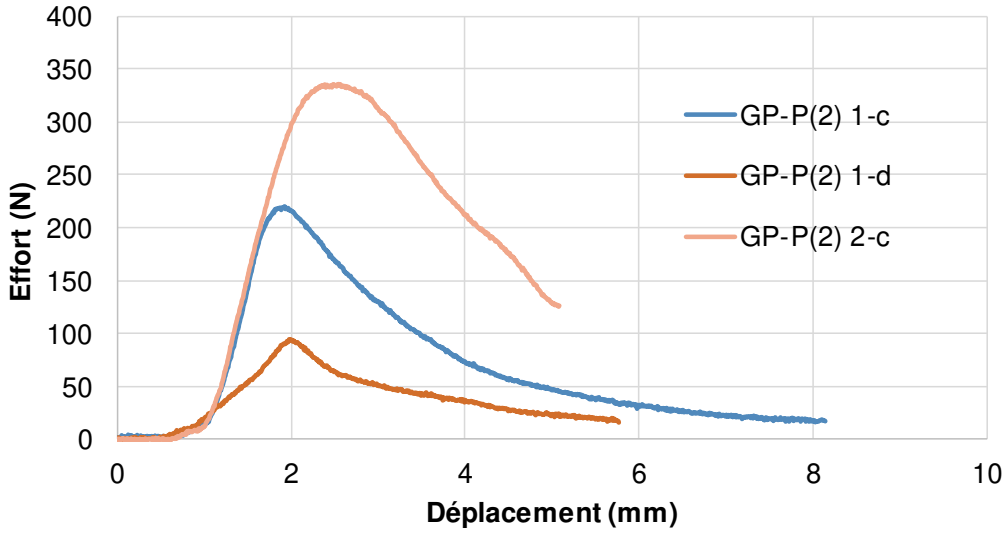
Essais de flexion sur les échantillons OC-P(2,5)



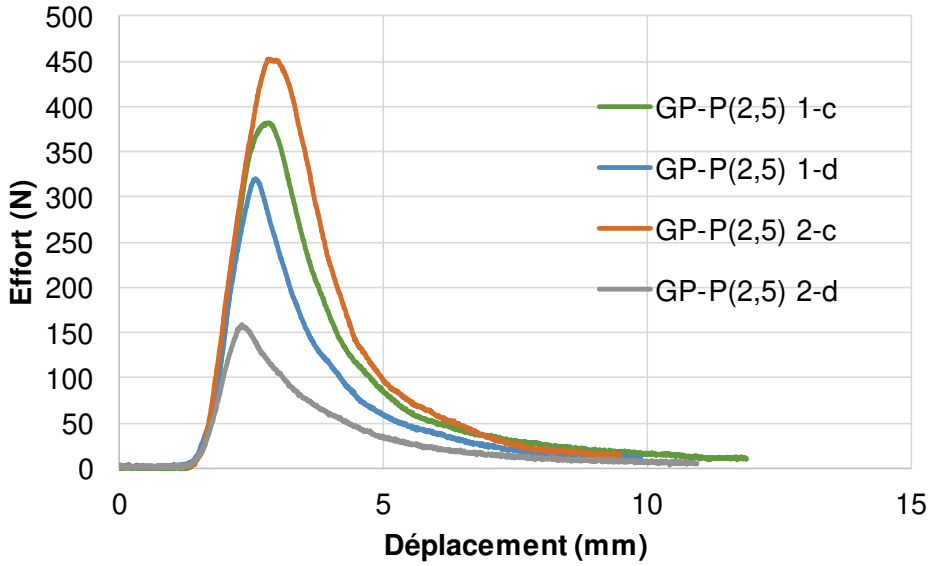
Essais de flexion sur les échantillons GP-P(0,6)



Essais de flexion sur les échantillons GP-P(1)



Essais de flexion sur les échantillons GP-P(2)

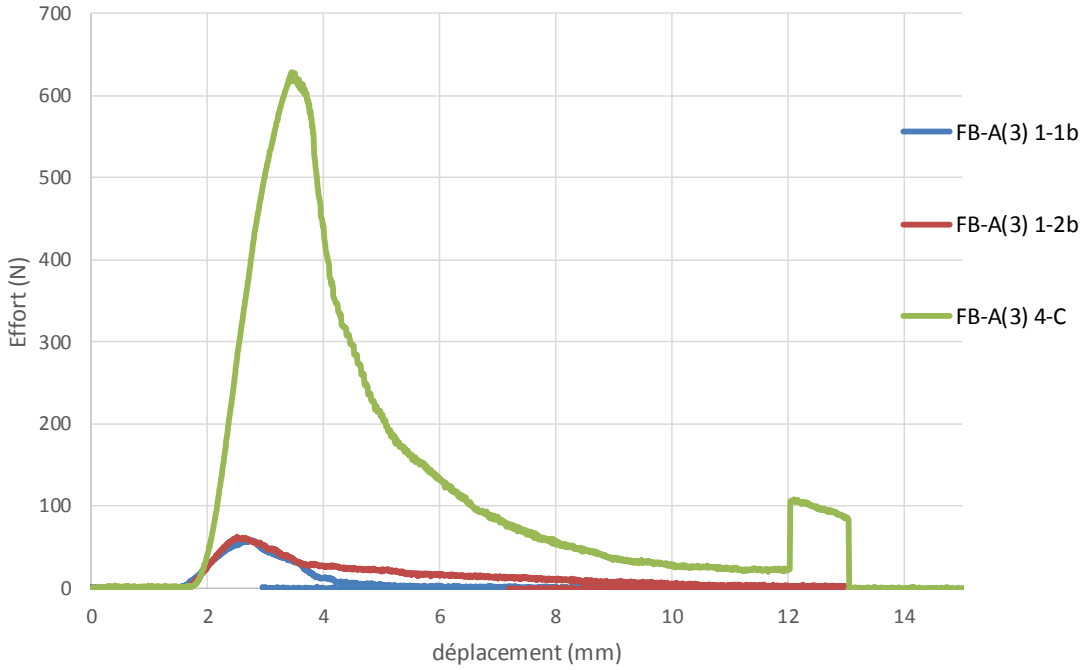


Essais de flexion sur les échantillons GP-P(2,5)

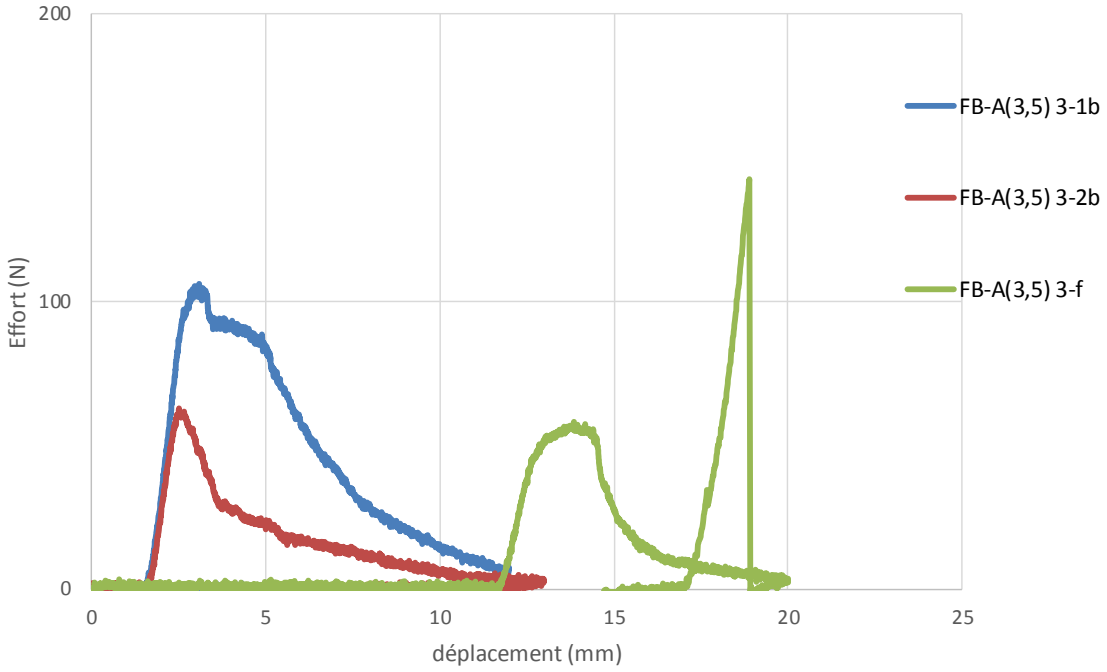
I.2.1 Liant amidon

Résistance en traction par flexion – Liant amidon

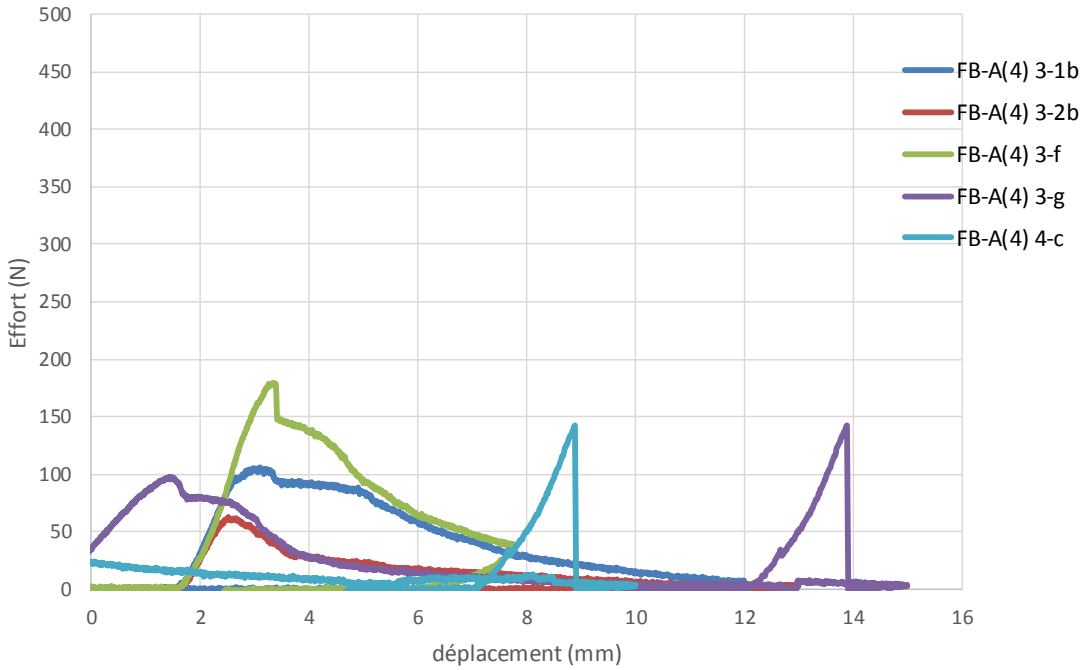
		ρ (kg/m^3)	Rt(MPa)
FB-A(3)	moyenne	387,23	0,78
	Ecart type	10,07	0,37
	Coeff Var	0,03	0,48
FB-A(3,5)	moyenne	387,21	1,08
	Ecart type	30,22	0,47
	Coeff Var	0,08	0,43
FB-A(4)	moyenne	349,31	1,62
	Ecart type	26,79	1,22
	Coeff Var	0,08	0,76
OC-A(3)	moyenne	511,28	3,12
	Ecart type	3,82	0,39
	Coeff Var	0,01	0,13
OC-A(3,5)	moyenne	482,85	4,11
	Ecart type	28,06	0,77
	Coeff Var	0,06	0,19
OC-A(4)	moyenne	493,59	4,71
	Ecart type	39,60	1,58
	Coeff Var	0,08	0,34
GP-A (2,86)	moyenne	575,60	3,28
	ecart type	31,94	1,75
	coeff var	0,06	0,53
GP-A(3)I	moyenne	503,36	1,43
	Ecart type	27,74	0,60
	Coeff Var	0,06	0,42
GP-A(3,5)I	moyenne	440,90	0,87
	Ecart type	70,17	0,33
	Coeff Var	0,16	0,38
GP-A(4)I	moyenne	436,42	1,22
	Ecart type	7,24	0,05
	Coeff Var	0,02	0,04
GP-A(3)II	moyenne	562,78	3,39
	Ecart type	17,15	0,61
	Coeff Var	0,03	0,18
GP-A(3,25)II	moyenne	553,92	2,66
	Ecart type	10,12	0,39
	Coeff Var	0,02	0,15
GP-A(3,5)II	moyenne	565,51	4,15
	Ecart type	11,81	0,42
	Coeff Var	0,02	0,10
GP-A(3,75)II	moyenne	539,98	3,28
	Ecart type	11,79	0,41
	Coeff Var	0,02	0,13
GP-A(4)II	moyenne	616,80	3,60
	Ecart type	11,08	0,70
	Coeff Var	0,02	0,20



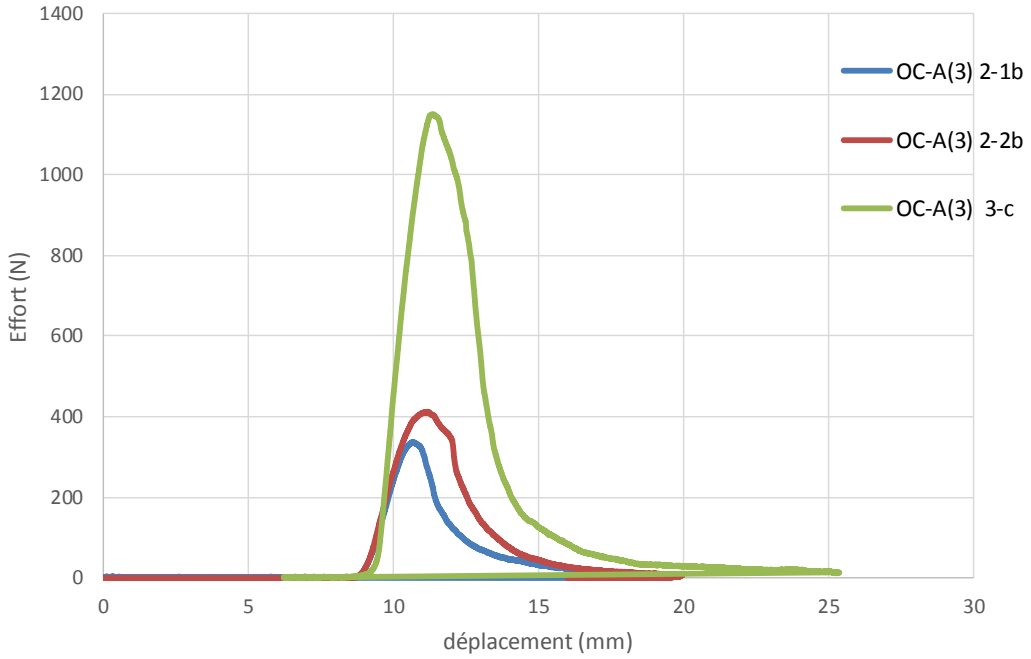
Essais de flexion sur les échantillons FB-A(3)



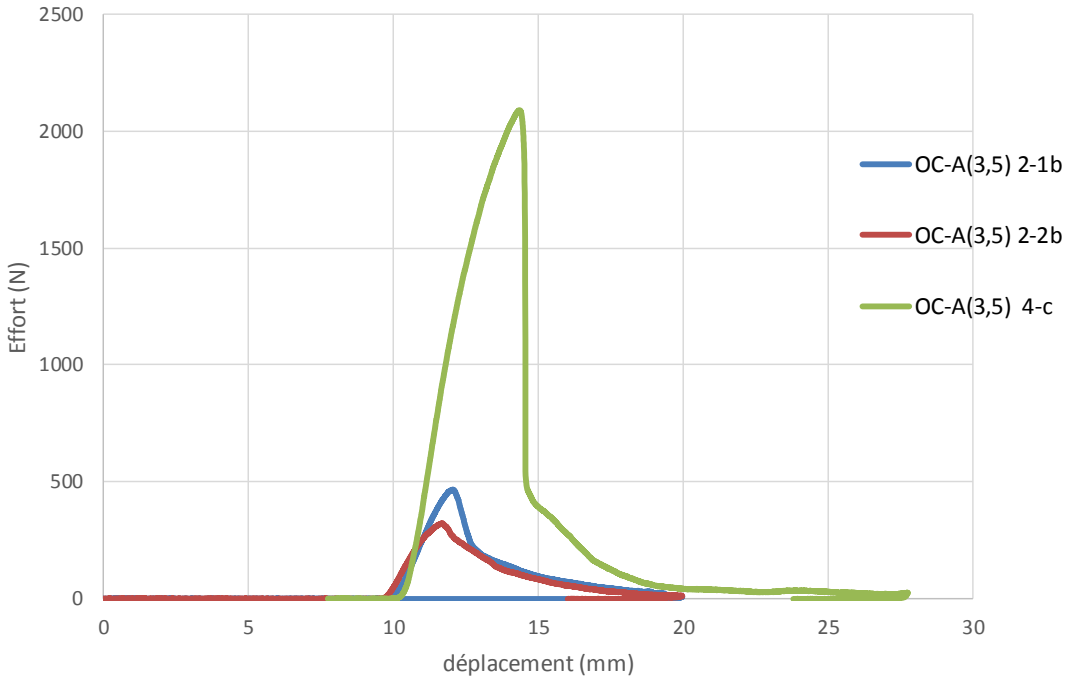
Essais de flexion sur les échantillons FB-A(3,5)



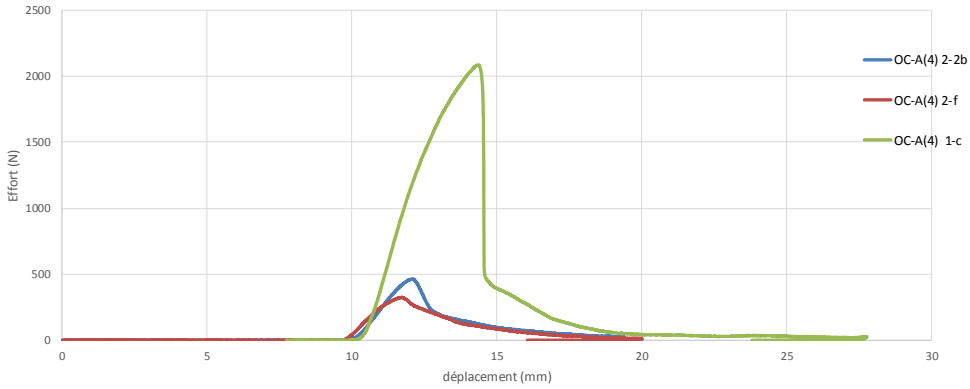
Essais de flexion sur les échantillons FB-A(4)



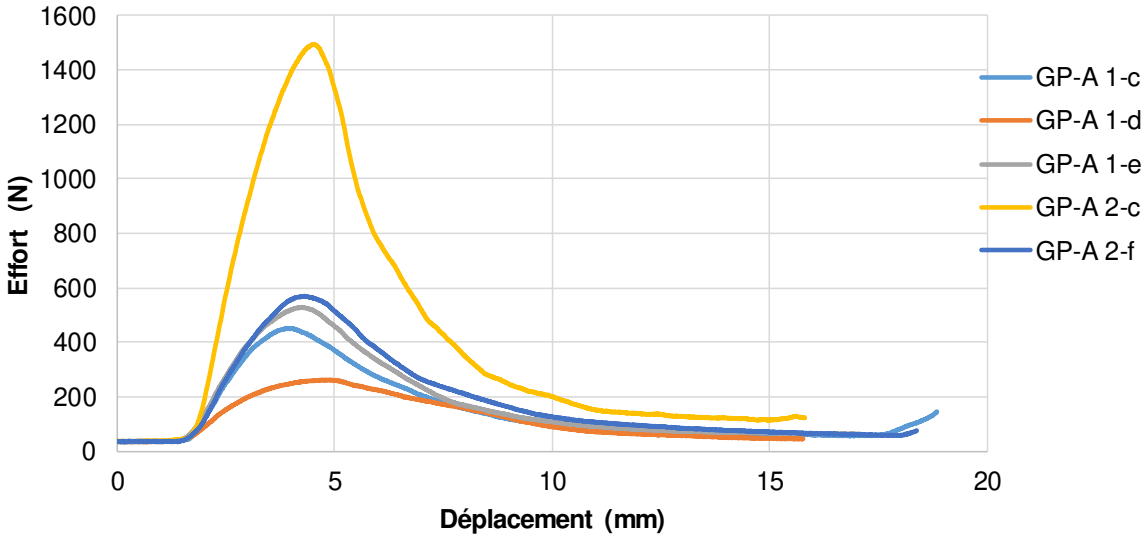
Essais de flexion sur les échantillons OC-A(3)



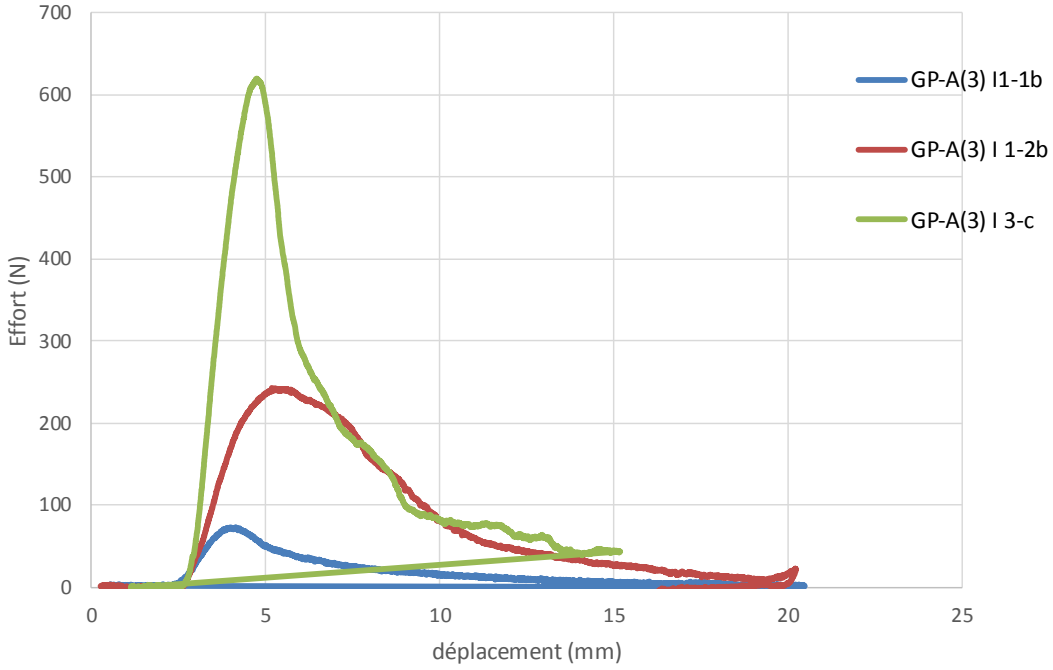
Essais de flexion sur les échantillons OC-A(3,5)



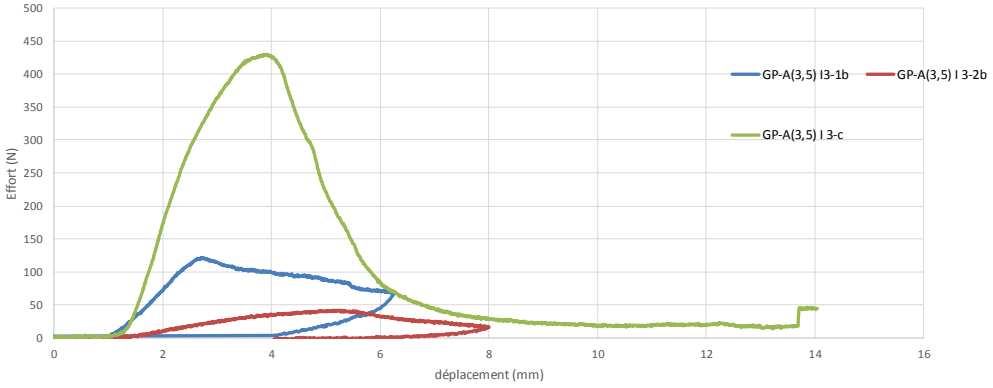
Essais de flexion sur les échantillons OC-A(4)



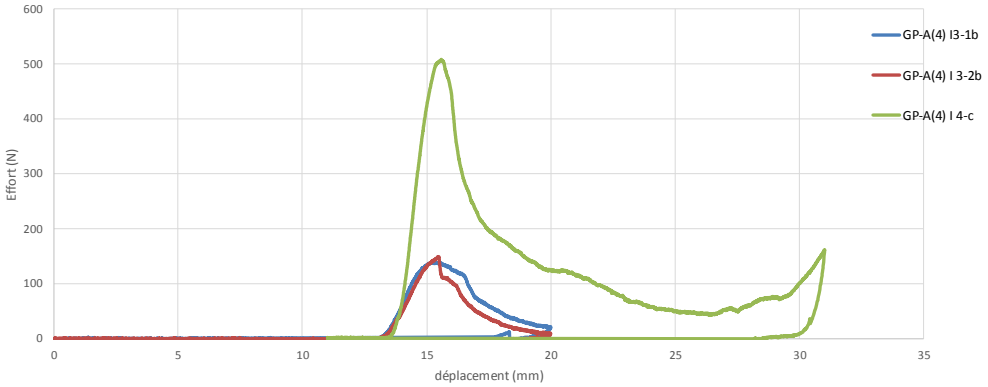
Essais de flexion sur les échantillons GP-A (2,86)



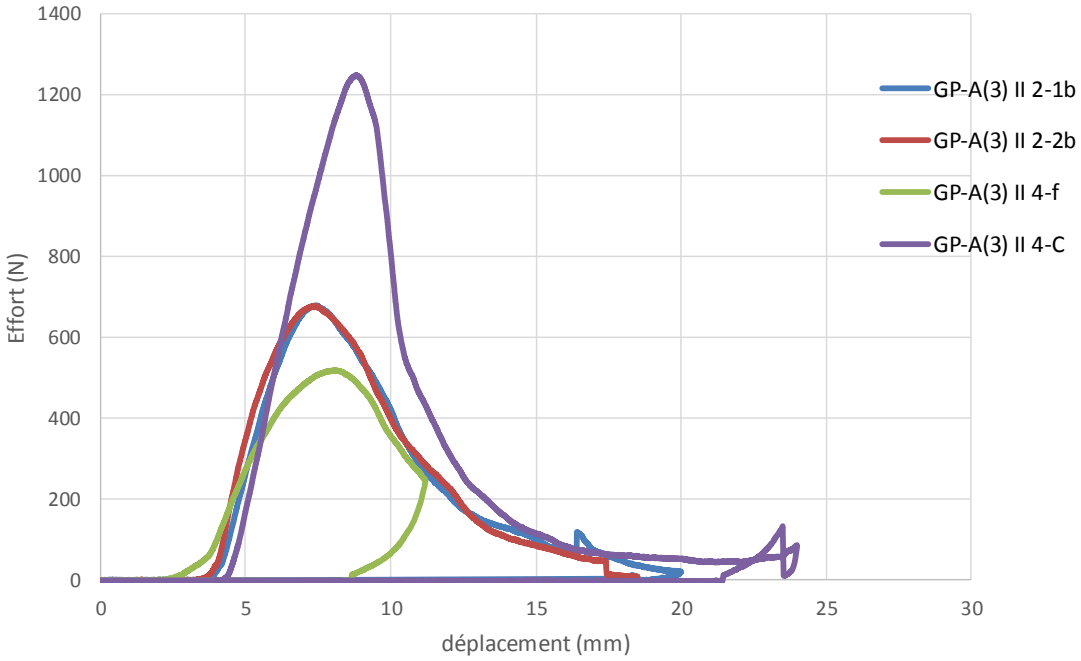
Essais de flexion sur les échantillons GP-A(3)I



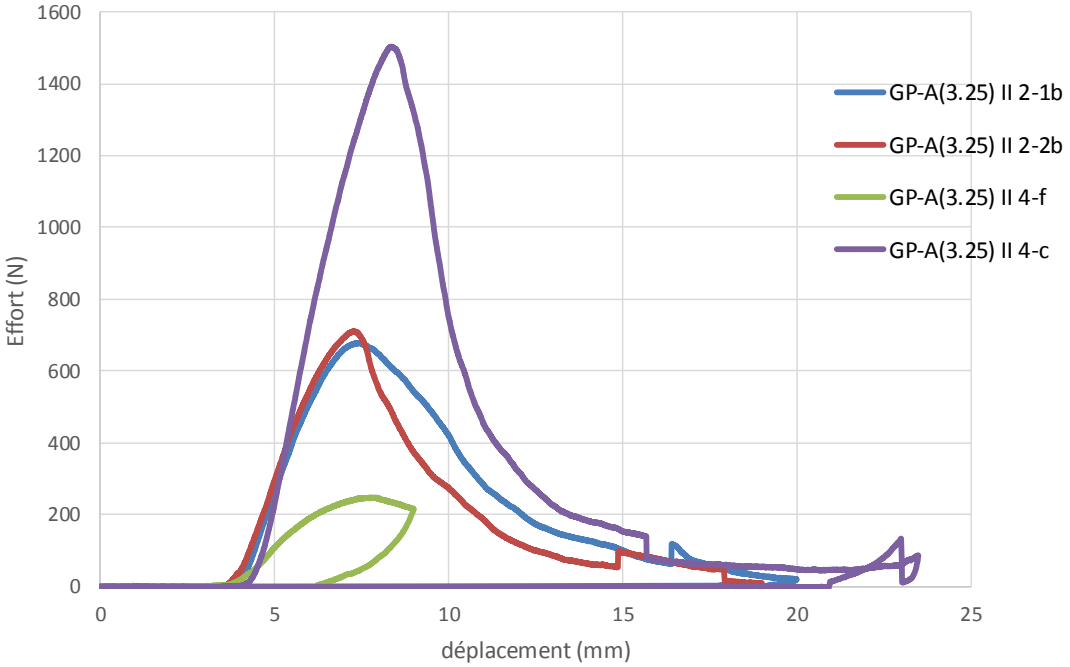
Essais de flexion sur les échantillons GP-A(3,5)I



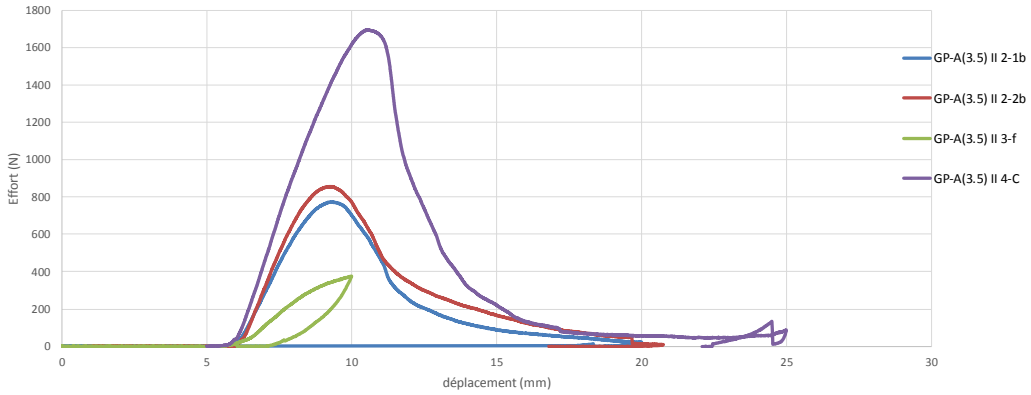
Essais de flexion sur les échantillons GP-A(4)I



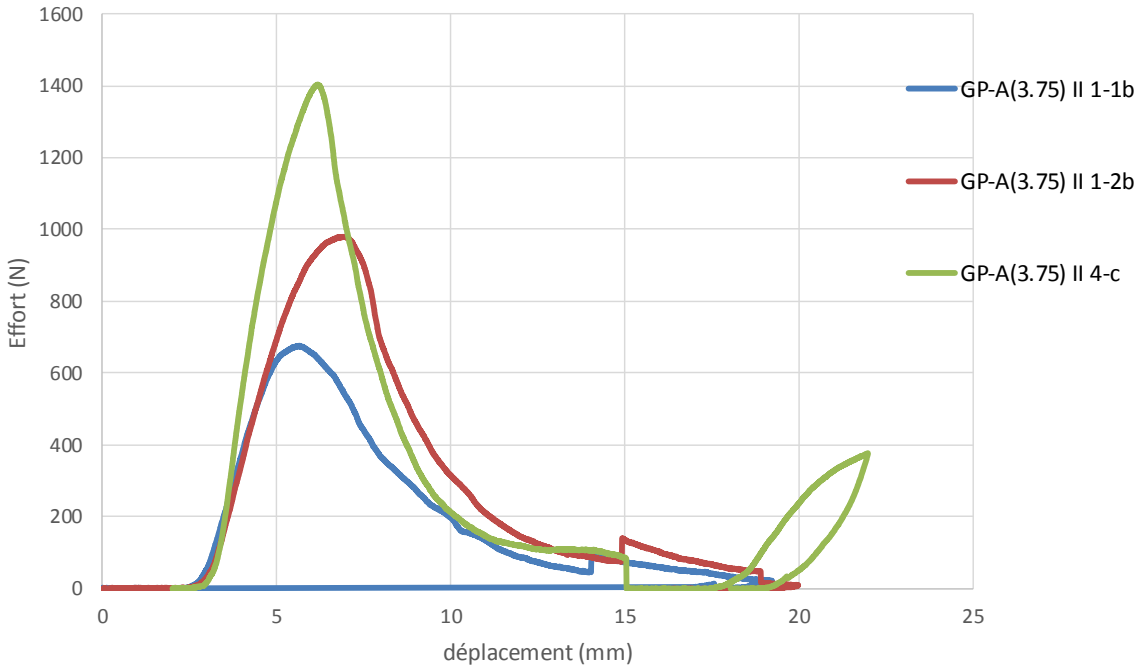
Essais de flexion sur les échantillons GP-A(3)II



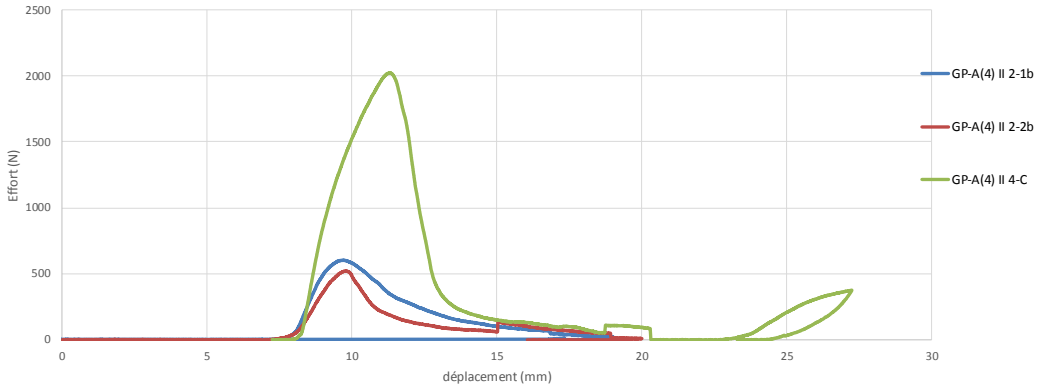
Essais de flexion sur les échantillons GP-A(3,25)II



Essais de flexion sur les échantillons GP-A(3,5)II



Essais de flexion sur les échantillons GP-A(3,75)II



Essais de flexion sur les échantillons GP-A(4)II

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Energy Procedia 139 (2017) 468–474

Energy Procedia

www.elsevier.com/locate/procedia

International Conference On Materials And Energy 2015, ICOME 15, 19-22 May 2015, Tetouan, Morocco, and the International Conference On Materials And Energy 2016, ICOME 16, 17-20 May 2016, La Rochelle, France

Elaboration and Characterization Of Eco-Materials Made From Recycled Or Bio-Based Raw Materials

L. M. Thieblesson [a, b]*, F. Collet [a], S. Prétot [a], C. Lanos [a], H. Kouakou [b],O. Boffoue [b]

[a] *Laboratory of civil engineering and mechanical engineering, University of Rennes1, 3 rue du clos courtel-BP 90422-35704 Rennes cedex 7 France*

[b] *STRM, Laboratory of Geomaterials, University of Félix Houphouët Boigny of Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire*

Abstract

This work test the feasibility and characterize the thermohygric properties of composite materials, realized with eco-friendly raw materials and designed to make suspended ceilings or interior partition walls. Several raw materials are considered: recycled paper (granules or cellulose wadding) and wood fibers. Aggregates or fibers are bonded with organic or mineral binder. One of the binder considered is starch, due to its availability in Ivory Coast (cassava flour). The calcium sulfate hemihydrate is also used for comparison.

The density of the produced composites ranges from 400 to 1200 kg/m^3 depending on formulation. The thermal conductivity increases proportionally with the density and ranges from 0.09 to 0.5 W/(m.K). The characterization of hygric behavior is based on the measurement of moisture buffer value (MBV) [1]. The hydric performances of the composites made of mineral binder goes from moderate (MBV around 1 g/(m².%RH)) to excellent (MBV > 2 g/(m².%RH)). The moisture buffer value of the paper granules -starch composite is also excellent (MBV > 2 g/(m².%RH))

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Peer-review under responsibility of the scientific committee of ICOME 2015 and ICOME 2016.

Keywords: Granule paper; Wood fiber; Cellulose wadding; Thermal conductivity; Moisture buffer value

* Corresponding author.
E-mail address: thieblessonlydiemarcelle@yahoo.fr

1876-6102 © 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.
Peer-review under responsibility of the scientific committee of ICOME 2015 and ICOME 2016
10.1016/j.egypro.2017.11.239

1. Introduction

In a context of sustainable development, green buildings aim at reducing the environmental impacts of buildings while also ensuring high indoor quality (comfortable and healthy). Bio-based or recycled raw materials can be used to reach this objective. The objectives of this work, in partnership between the Laboratory of civil engineering and mechanical engineering (Rennes, France) and the Laboratory of Geomaterials (Abidjan, Ivory Coast), are to test the feasibility and characterize composites, realized with eco-friendly raw materials and designed to make suspended ceilings or interior partition walls. The considered raw materials are issued from local recycled or bio-based materials. Thus, the binders considered are plaster, which is widely used in France, and starch, for its availability in Ivory Coast and its lower cost. The developed loads are made from paper waste, as this is widely available in Ivory Coast. Other cellulosic loads are also considered for comparison. Some products made of mineral binder with recycled paper already exist [2, 3]. They are often studied on acoustical and fireproofing point of view. Yeon et al. analyzed physical properties of cellulose sound absorbers produced from recycled paper [4]. Mortar with recycled paper are also developed [5]. Paper granules are currently industrially produced and are available in bags for animal's bedding [6]. Cellulose wadding is obtained from newspaper's recycling and is mainly used in bulk. Hurtado et al. investigate the properties of cellulose fiber insulation [7]. Wood fiber is a bio based material available on the market as insulation panels of conductivity around 0.04 W/(m.K) and apparent density of 110 kg/m^3. Among various binders, cassava starch is well adapted to the local context in Africa where plaster is a scarce resource. Starch is considered as one of the most promising materials for biodegradable plastics, because of its natural abundance and low cost. It can also be used as binder. As example, wholly bio-based insulation products made of hemp and starch is currently studied by Tran Le [8]. Thus, this study focuses, on the one hand, on the formulation of composites made of bio-based or recycled local resources and, on the other hand, on their hygrothermal characterization.

2. Materials

2.1. Loads

Wood fiber and recycled paper (granules and cellulose wadding) are considered in this study. Wood fibers (quoted WF) are commonly used for thermal insulation. Fibers are fireproofed with ammonium phosphate. Commercial fibers are used in this study. They are manually carded before use. SEM examination of the fibers shows hollow fibers of 20 to 50 µm in diameter (Fig 1 a,b,c).

The cellulose wadding (quoted CW) is also an industrial product stemming from the recycling of newspapers. The cellulose wadding is fireproofed with boron salts. SEM examination shows a loose tangle of the cellulose wadding fibers (Fig 1 d,e).

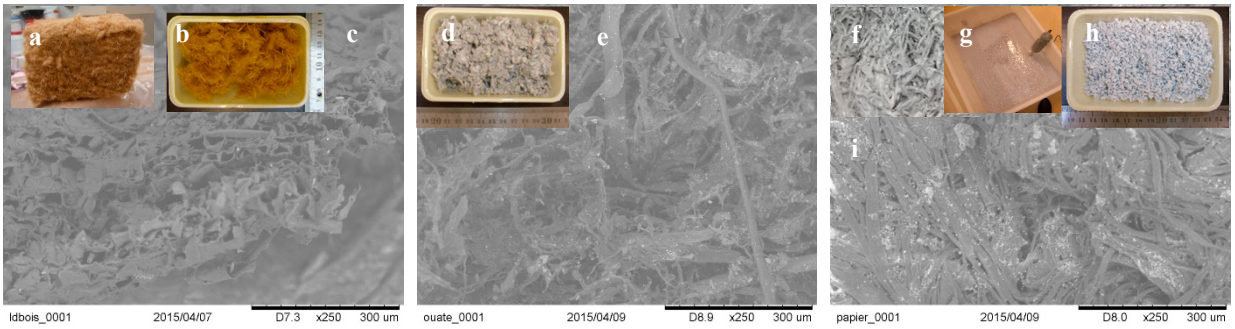


Fig. 1: (a) WF panel (b) Carded WF (c) WF SEM view. (d) CW (e) CW SEM view (f) PG strips of paper; (g) mixing; (h) PG (i) PG SEM view.

The paper granules (quoted PG) are made of waste paper recovered after use in offices. This paper is subject to various process of transformation in the laboratory to obtain paper granules. Firstly, strips of paper are soaked in

water for a few hours. Then, the wet paper is transformed in soup and after that it is wrung out to remove water before being pushed across a metal grid of small mesh in order to obtain almost spherical granules of millimeter size (Fig 1 f,g,h). SEM examination of the granules shows a compact tangle of 15 µm width fibers (Fig 1 i).

2.2. Binders

Aggregates or fibers are bonded with mineral or organic binder. The calcium sulfate plaster (quoted P) is selected to allow comparisons with organic binder. The used plaster is Molda 3 Normal calcium sulfate hemihydrate from St Gobain-France. Tests are also made with commercial potatoes starch (from Roquette-France, quoted S). In hot water (>70°C), the grains of starch inflate under a process of irreversible gelatinization (Fig 2).

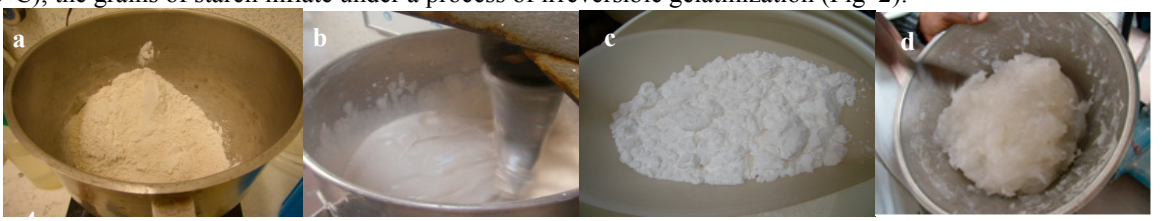


Fig. 2: Binders: (a) plaster powder; (b) plaster binder; (c) starch powder; (d) starch binder.

2.3. Formulation and composite production

Various kinds of composite materials with different loads to binder ratios are produced. The identification of composite includes the type of load (WF, CW or GP), the type of binder (P or S) and finally the water to binder mass ratio that appears in brackets.

For composites production, binders are firstly prepared: plaster powder is mixed with water or starch is prepared by adding hot water to the powder. Then, in both cases, loads are gradually added in the binder. The quantity of loads is adjusted to obtain good workability (Fig 3). After mixing, the specimens are produced by molding. The size of the molds is 28×23×7cm^3. The molds are filled with the mixture and the specimens are compacted under a pressure of 0,03 MPa with a manual press (Fig 3d). After compaction, the starch specimens are demolded immediately and placed in the ambient temperature of the laboratory (Fig 4). For plaster specimens, the mold removal is applied after setting.

For plaster, the influence of water to binder ratio is investigated. In this study, this ratio ranges from 0.4 to 2.5. The load to binder mass ratios ranges from 0.07 to 1.41.

First trial with starch is made with water to starch ratio of 0.83 and a paper granules to starch mass ratio of 4.17.

Fig. 3: Production process: (a) Binder mixing; (b) Addition of the load; (c) Mixing; (d) Compaction.

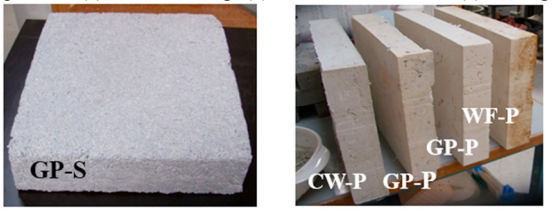


Fig. 4: Produced specimens.

3. Methods of characterization

3.1. Hot wire method

A commercial CT-meter with a five-centimeter-long hot wire is used to measure the thermal conductivity λ (W/(m.K)) after stabilization of the specimens at 23°C and 50%RH. This device is well adapted for the measurement of thermal conductivities ranging from 0.02 to 5 W/(m.K) with an accuracy of 5%. (Fig 5).This transient state method avoid water migration during the measurement. The measurement is based on the analysis of the temperature rise (ΔT) versus heating time (t). The heat flow per meter (q) and heating time are chosen to reach high enough temperature rise (>10 °C) and high correlation coefficient (R^2) between experimental data and theoretical curve where K is a constant including the thermal diffusivity of the material (1). In this study, the heating time is 120 s and the heat flow ranges from 4.1 to 11.4 W/m.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda}(\ln(t) + K) \tag{1}$$

Fig. 5: CT meter.

3.2. Moisture buffer value

The moisture buffer value MBV quantifies the moisture buffering ability of a material. It is measured under dynamic conditions according to the method defined in the NORDTEST project [1]. This value relates the amount of moisture uptake (and release), per open surface area, under daily cyclic variation of relative humidity

$$MBV = \frac{\Delta m}{A.\left(RH_{high} - RH_{low}\right)} \tag{2}$$

with MBV: moisture buffer value (kg/(m^2 %RH)), Δm: moisture uptake/release during the period (g), A: open surface area (m^2), $RH_{high/low}$: high/low relative humidity level (%).

The test method requires prismatic specimens to be sealed on five out of six sides. After stabilization at (23°C; 50%RH), specimens are exposed to daily cyclic variations: 8 h at high relative humidity (75%) followed by 16 h at low relative humidity (33%). Stability is reached when the change in mass is the same between the last three cycles with a discrepancy lower than 5%.

The device consists in a climate chamber (Vötsch VC4060) which can be controlled in the ranges +10 to +95°C and 10 to 98%RH. The study is performed at 23°C. The relative humidity in the chamber is manually switched (75%RH; 33%RH). Temperature and relative humidity are continuously measured with Sensirion SHT75 sensors and with the sensor of the climate chamber. The air velocity is measured in the surroundings of the specimens: the vertical velocity is in the range 0.07–0.14 m/s and the horizontal one is 0.1–0.4 m/s. The specimens are weighed out of the climatic chamber five times during the adsorption period and two times during the desorption one. The weighing instrument reading is 0.01 g, and its linearity is 0.01 g. The accuracy of the moisture buffer value is thus about 5%.

4. Results and discussion

4.1. Physical characterization

To ensure good workability, the quantity of water used in the mix increases with the mass of loads (fig 6). After production, the specimens are naturally dried at 23°C 50%RH. They are regularly weighed until stabilization. The typical drying time is about 15 days whatever the composite formulation. Then, the apparent density is calculated from measuring and weighing the specimens. The densities range from 400 to 1200 kg/m^3 for the composites made with plaster binder, depending on the formulation and particularly on the water to binder mass ratio. For the composites made of paper granules and starch, the density is about 500 kg/m^3 (fig 6). It is shown that the apparent density decreases as the amount of water or loads is increasing.

For equivalent water to binder and load to binder mass ratios, the apparent density is the lowest for the composites with wood fibers and similar for the composites with cellulose wadding or paper granules. It may be linked with a highest rate of trapped air during mixing of wood fibers composites and fibers arrangements.

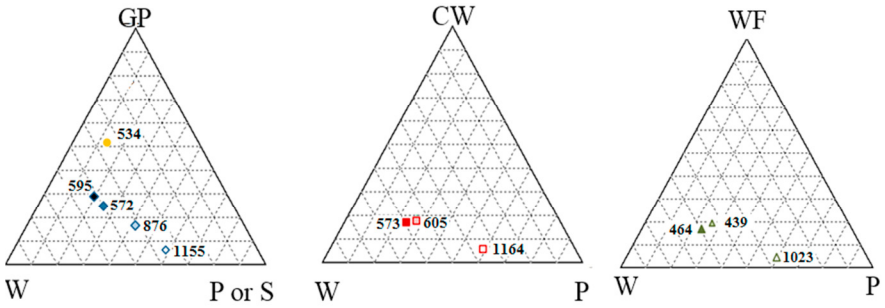


Fig. 6: Mass ratios of the components and apparent densities (kg/m^3) of composites

4.2. Thermal characterization

Thermal conductivity increases proportionally with the density (fig 7). Indeed, for the water to plaster ratio equal to 0.6 and paper granules or cellulose wadding composites, the specimens densities range between 1000 and 1200 kg/m^3 and the conductivity is about 0.45 W/(m.K). When the plaster content in the composite is high, the kind of load do not affect the conductivity. The measured value is slightly lower than the values commonly used for plaster only (about 0.48 W/(m.K) for 1100 kg.m^3 in the French standard). For densities between 550 and 610 kg/m^3, the thermal conductivity ranges from 0.16 to 0.19 W/(m.K) as expected for this range of densities. Finally, the conductivity of wood fibers composites whose density is around 450 kg/m^3 is about 0.09 W/(m.K). This may also be linked with a higher rate of trapped air during mixing. The composite made of starch and paper granules has a thermal conductivity of 0.18 W/(m.K). This value is in the range of thermal conductivity obtained for composites made with plaster, with the same range of density. The composites showing the lowest densities can thus be used for distributed insulation.

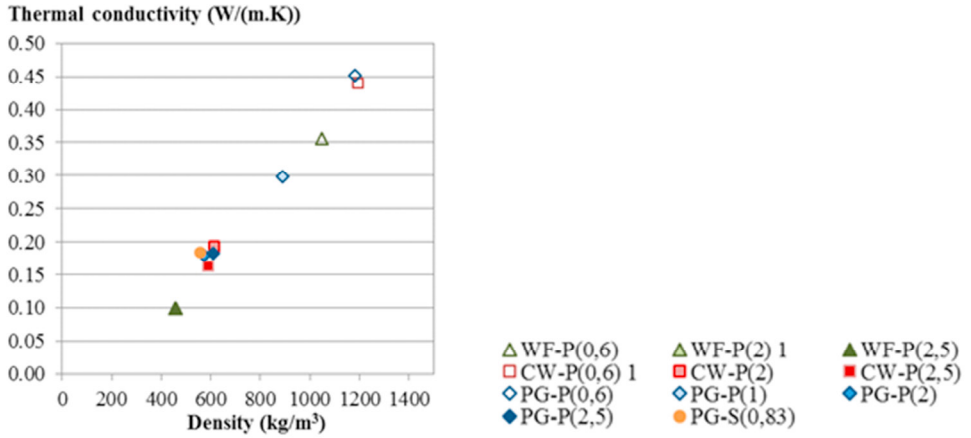


Fig. 7: Thermal conductivity of materials versus density at (23°C; 50%RH)

4.3. Hydric characterization

Plaster and starch specimens, initially at 23°C 50 %HR, are first submitted to absorption phase. The discrepancy between mass variations during the cycles becomes lower than 5 % between the second and the third cycles (figure 8a). The MBV is thus calculated with cycles 3 to 5. Fig 8b gives the Moisture Buffer Value in absorption, desorption and average for all kinds of composites. For all composites, the desorption value is greater than the absorption one. This can be explained by a decreasing trend of the mass uptake/ release curve before stabilization (Fig 8a).

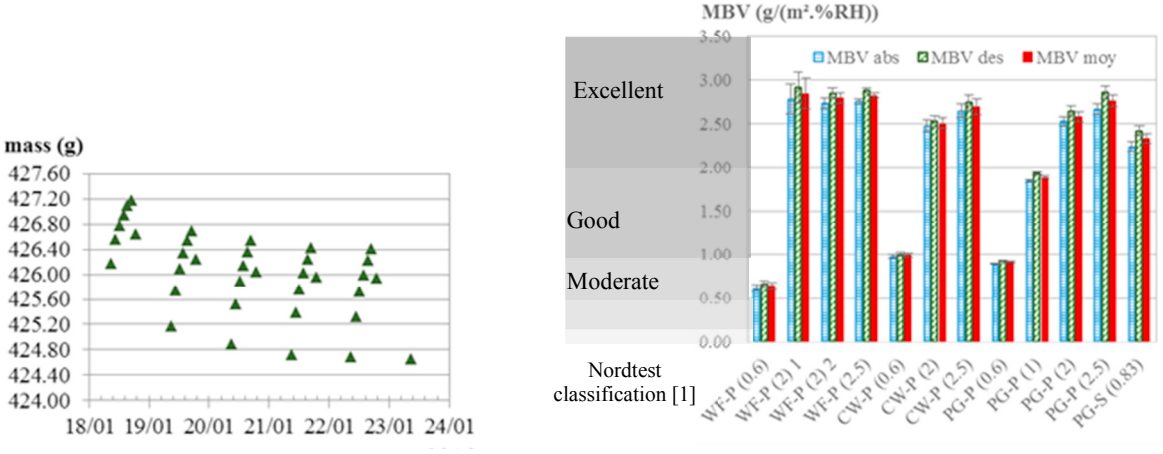


Fig. 8: (a) Moisture uptake and release: example of WF-P (2.5), specimen 3 (b) Moisture Buffer Value (MBV)

For specimen with plaster binder, when the water to plaster mass ratio is 0.6, the MBV ranges from 0.61 to 0.97 g/(m².%RH) with the three kinds of loads. These composites have moderate ability to damp ambient relative humidity variations. This is probably due to their low porosity. They are slightly better hygric regulators than gypsum with MBV about 0.60 g/(m².%RH) [1]. When the water to binder mass ratio is 1, with paper granules, the MBV is 1.89 g/(m².%RH)). This composite is a good hygric regulator.

Finally, when water to binder mass ratio is higher than 2, the MBV is higher than 2.50 g/(m².%RH)) for all kinds of loads. All these composites are excellent hygric regulators. For water to plaster mass ratio of 2, the load to binder ratio is similar for the three kinds of loads. For these composites, wood fiber composites are the best ones, probably due to a different porosity network. Paper granules - starch composites are also excellent hydric regulators, their

MBV is 2.33 g/(m².%RH)).

5. Conclusion

This study investigates the feasibility of composites made from paper and bio-based materials bonded with plaster or starch. It is shown that to ensure good workability, the water content increases with load content. Whatever the kind of loads, the density of composites decreases when water ratio increases. The density obtained with wood fiber is lower, probably in link with higher entrapped air. The thermal conductivity of composites ranges from 0.09 to 0.45 W/(m.K). The lightest composites can be used as distributed insulation. The developed composites (with starch and with plaster) are excellent hygric regulators when the water to plaster ratio is higher than 2.

Finally, these study will be completed with mechanical characterization. The great interest of such composites is encouraging to go on with the development of starch composites.

References

[1].Rode, C., 2005, Moisture buffering of Building Materials, Report BYG·DTU R-126, ISSN 1601 – 2917, ISBN 87-7877-195.
[2].European technical advice, fermacel greenline, ATE-03/0050
[3]. www.armstrong.fr/plafonds
[4]. Yeon Jun-Oh et al.,2014 , Physical properties of cellulose sound absorbers produced using recycled paper, Constr. Build. Mater., 70, pp. 494–500
[5]. Aciu et al., 2014, Recycling of Paper Waste in the Composition of Plastering Mortars, Procedia Technology, Volume 12, Pages 295-300
[6]. http://www.pettex.co.uk/
[7]. Hurtado PL and al., 2016, A review on the properties of cellulose fiber insulation, building and environment, v96, pp170-177.
[8]. Tran Le A.D. et al., Experimental investigation on the mechanical performance of starch–hemp composite materials, Construction and Building Materials 61, 2014, p106–113

Titre : Elaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées

Mots clés : fibre de bois, ouate de cellulose, granules de papier, amidon, plâtre, matériau de partition

Résumé : En réponse à une forte croissance démographique mondiale, et notamment africaine, il est nécessaire d'anticiper les besoins de la population en terme de bâtiment. Il s'agit alors de développer des matériaux alternatifs présentant des performances multi-physiques adéquates tout en ayant un faible impact sur l'environnement.
Ce travail porte sur l'élaboration et la caractérisation de composites utilisables comme produits constructifs de partition (cloison, faux plafonds).
La sélection des matières premières intègre des critères de développement durable, en considérant leur disponibilité locale mais également leur empreinte en terme d'épuisement des ressources (matériaux recyclés ou bio-sourcés).
Les liants utilisés sont le plâtre, l'amidon de pomme de terre et l'amidon de manioc. Les charges sont la fibre de bois, la ouate de cellulose et les granules de papiers, pour une valorisation originale en matériau de construction.
Les performances des composites développés sont évaluées d'un point de vue mécanique, hygrique, thermique et en terme de résistance au feu.
Ces travaux ont montré la faisabilité et l'intérêt de tels composites. Ceux-ci peuvent notamment être utilisés pour leur qualité de régulateur hygrique et de correcteur thermique.

Title : Elaboration and characterisation of materials made of biobased and/or recycled local ressources

Keywords : wood fiber, cellulose wadding, paper granules, starch, gypsum, partition material.

Abstract : Due to strong global population growth, and particularly African, the population's needs in terms of building have to be anticipated. The aim is to develop alternative materials with adequate multi-physical performances and low impact on the environment.
This work investigates the elaboration and characterization of composites to be used as constructive partition products (partitions, false ceilings).
The selection of raw materials takes into account sustainable development criteria, considering both the local availability of materials and their footprint in terms of resource depletion (recycled or bio-sourced materials). The binders used are plaster, potato starch and cassava starch. The loads are wood fiber, cellulose wadding and paper granules, for an original valorisation in building material.
The performances of the developed composites are evaluated from a mechanical, hygric, thermal and fire resistance point of view.
This work has shown the feasibility and the interest of such composites. These can in particular be used for their quality of hygric regulator and thermal corrector.

Titre : Elaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées

Mots clés : fibre de bois, ouate de cellulose, granules de papier, amidon, plâtre, matériau de partition

Résumé : En réponse à une forte croissance démographique mondiale, et notamment africaine, il est nécessaire d'anticiper les besoins de la population en terme de bâtiment. Il s'agit alors de développer des matériaux alternatifs présentant des performances multi-physiques adéquates tout en ayant un faible impact sur l'environnement.

Ce travail porte sur l'élaboration et la caractérisation de composites utilisables comme produits constructifs de partition (cloison, faux plafonds).

La sélection des matières premières intègre des critères de développement durable, en considérant leur disponibilité locale mais également leur empreinte en terme d'épuisement des ressources (matériaux recyclés ou bio-sourcés).

Les liants utilisés sont le plâtre, l'amidon de pomme de terre et l'amidon de manioc. Les charges sont la fibre de bois, la ouate de cellulose et les granules de papiers, pour une valorisation originale en matériau de construction.

Les performances des composites développés sont évaluées d'un point de vue mécanique, hygrique, thermique et en terme de résistance au feu.

Ces travaux ont montré la faisabilité et l'intérêt de tels composites. Ceux-ci peuvent notamment être utilisés pour leur qualité de régulateur hygrique et de correcteur thermique.

Title : Elaboration and characterisation of materials made of biobased and/or recycled local ressources

Keywords : wood fiber, cellulose wadding, paper granules, starch, gypsum, partition material.

Abstract : Due to strong global population growth, and particularly African, the population's needs in terms of building have to be anticipated. The aim is to develop alternative materials with adequate multi-physical performances and low impact on the environment.

This work investigates the elaboration and characterization of composites to be used as constructive partition products (partitions, false ceilings).

The selection of raw materials takes into account sustainable development criteria, considering both the local availability of materials and their footprint in terms of resource depletion (recycled or bio-sourced materials).

The binders used are plaster, potato starch and cassava starch. The loads are wood fiber, cellulose wadding and paper granules, for an original valorisation in building material.

The performances of the developed composites are evaluated from a mechanical, hygric, thermal and fire resistance point of view.

This work has shown the feasibility and the interest of such composites. These can in particular be used for their quality of hygric regulator and thermal corrector.