



**UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (U.A.C)**

\*\*\*\*\*

**Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)**

\*\*\*\*\*

**Master de Recherche en Génie des Matériaux et Structures**

\*\*\*\*\*

**Rapport de stage**

**Thème**

**Etude comparative des propriétés physico-mécaniques des matériaux légers à base de gosses de mil-polystyrène et balles de riz-polystyrène.**

**Présenté par :**

SACCA Abdou Malick

**Sous la direction de :**

**Dr DOKO Kouandété Valéry**

Maitre de Conférences des Universités du CAMES,

Enseignant chercheur à l'EPAC/UAC

**Laboratoire : Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA)**

**DEDICACES**

*A mon père*

*A ma mère*

*A mes frères et sœurs*

### REMERCIEMENTS

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été réalisé grâce à la collaboration et au soutien indéfectible de plusieurs personnes. Nous tenons donc à leur exprimer notre profonde reconnaissance :

- Nous tenons à remercier notre maître de mémoire Dr **Valéry DOKO**, Maître de Conférence des Universités du CAMES, Enseignant Chercheur à l'Ecole Polytechnique d'Abomey- Calavi (EPAC), Chef du Département de Génie Civil à l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi qui nonobstant ses multiples occupations professionnelles et académiques, s'est malgré tout engagé à nous diriger durant ce travail. Nous lui sommes reconnaissants pour ses encouragements et sa confiance. Merci à vous et que Dieu bénisse vous et votre famille.

Nous sommes reconnaissants envers l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), pour la qualité de la formation donnée. Nos remerciements vont à l'endroit du :

- Pr **Guy Alain ALITONOU**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Directeur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, pour le cadre et les moyens mobilisés pour notre formation ;
- Dr **Vincent PRODJINONTHO**, Maître de Conférences des Universités CAMES, Directeur Adjoint de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi ;
- Dr **Valéry DOKO**, Maître De Conférence des Universités du CAMES, Enseignant Chercheur à l'Ecole Polytechnique d'Abomey- Calavi (EPAC), Chef du Département de Génie Civil à l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, pour vos apports, conseils et soutiens ;

Nos remerciements vont également à l'endroit de tous les professeurs du département de Génie civil :

- Pr **Edmond ADJOVI**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- Pr **Gérard GUAGUIDI-AISSE**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- Pr **Emmanuel OLODO**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- Pr **François de Paule CODO**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;

## Remerciements

---

- Pr **Mohamed GIBIGAYE**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- Pr **Victor GBAGUIDI**, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- Dr **Adolphe TCHEHOUALI**, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- Dr **Kocouvi Agapi HOUANOU**, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- A Monsieur **Olivier TCHEDE**, opérateur du laboratoire de génie civil, qui à travers ses remarques nous ont aidé dans ce travail.

## RESUME

Les déchets provenant de l'agriculture et de l'industrie du plastique contribuent à la pollution de l'environnement. La réduction des effets desdits déchets sur l'environnement passe par la confection de matériaux composites.

Le présent travail est dédié à l'étude comparative des propriétés physico-mécaniques des composites balles de riz-polystyrène et gousses de mil-polystyrène. Ainsi, des plaques ont été fabriquées et usinées suivant les dimensions de la norme ASTM D1037-89 pour étudier d'une part les propriétés physiques à savoir : la densité, l'absorption et le gonflement volumique et d'autre part les propriétés mécaniques que sont : les modules d'élasticité et de résistance en flexion. Les résultats obtenus permettent de classer ces matériaux dans la classe des matériaux légers et donc de les utiliser dans la construction des bâtiments.

**Mots clés :** eco-matériau, composite, densité, absorption, propriétés physico-mécaniques.

## ABSTRACT

Waste from agriculture and the plastics industry contributes to environmental pollution. A Reduction of their effects on the environment requires the manufacture of composite materials.

This work is dedicated to the comparative study of the physical and mechanical properties of rice husk-polystyrene and millet-polystyrene pods composites. Thus, plates were manufactured and machined according to the dimensions of the ASTM D1037-89 standard first to study the physical properties: density, absorption and swelling and secondly the mechanical properties that are: the module of elasticity and resistance in bending. With the results these materials can be classified as in the class of light materials and therefore can be used in the construction of buildings.

**Keywords:** eco-material, composite, density, absorption, physical properties, mechanical properties.

**SOMMAIRE**

DEDICACES.....ii

REMERCIEMENTS ..... iii

RESUME..... v

ABSTRACT ..... vi

SOMMAIRE ..... vii

LISTE DES FIGURES ..... viii

LISTE DES TABLEAUX ..... ix

LISTE DES PHOTOS ..... x

LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES ..... xi

INTRODUCTION GENERALE..... 1

1.CHAPITRE I : GENERALITES ET REVUE DE LITTERATURE..... 5

1.1.GENERALITES ..... 5

2.1. MATERIAUX ..... 31

2.2. MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES ..... 32

3.CHAPITRE III : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS ..... 54

3.1.RESULTATS DES ESSAIS SUR LES MATERIAUX..... 54

3.2.CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES COMPOSITES ..... 57

4.CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES ..... 74

5.REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 76

6.ANNEXES ..... 79

TABLE DES MATIERES..... 91

**LISTE DES FIGURES**

Figure 1-1 : esquisse d'un matériau composite ..... 7

Figure 1-2: Les liaisons uréthanes dans un polyuréthane..... 12

Figure 1-3 : Polymérisation du styrène ..... 17

Figure 1-4 : Comportement mécanique d'un matériau composite fibré (Sedan, 2007) ..... 25

Figure 2-1 : Schéma statique du système ..... 51

Figure 3-1 : Courbe de l'analyse granulométrique des gousses de mil..... 55

Figure 3-2 : Courbe de l'analyse granulométrique des balles de riz..... 56

Figure 3-3: Mesure du gonflement dans les trois directions du composite balles de riz-polystyrène.... 57

Figure 3-4: Mesure du gonflement dans les trois directions du composite gousses de mil-polystyrène57

Figure 3-5: Absorption d'eau en % du composite balles de riz-polystyrène ..... 58

Figure 3-6: Absorption d'eau en % du composite gousses de mil-polystyrène ..... 58

Figure 3-7: Densité humide sur les différents composites ..... 59

Figure 3-8 : Densité de différents bois ..... 60

Figure 3-9 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MG_{0,8}$  ..... 62

Figure 3-10 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MF_{0,8}$ ..... 63

Figure 3-11 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MG_1$  ..... 63

Figure 3-12 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MF_1$ ..... 64

Figure 3-13 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MG_{0,8}$  ..... 64

Figure 3-14 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MF_{0,8}$ ..... 65

Figure 3-15 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MG_1$  ..... 65

Figure 3-16 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MF_1$ ..... 66

Figure 3-17 : Comportement de l'éprouvette  $MG_{0,8}$ ..... 67

Figure 3-18 : Comportement de l'éprouvette  $MF_{0,8}$  ..... 67

Figure 3-19 : Comportement de l'éprouvette  $MG_1$  ..... 68

Figure 3-20 : Comportement de l'éprouvette  $MF_1$  ..... 68

Figure 3-21 : Comportement de l'éprouvette  $MF_{0,8}$  ..... 68

Figure 3-22 : Comportement de l'éprouvette  $MG_1$  ..... 69

Figure 3-23 : Comportement de l'éprouvette  $MF_1$  ..... 69

Figure 3-24 : Comportement mécanique de l'éprouvette  $MG_{0,8}$  jusqu'à la rupture ..... 70

Figure 3-25 : Comportement mécanique de l'éprouvette  $MF_{0,8}$  jusqu'à la rupture ..... 70

Figure 3-26 : Comportement mécanique de l'éprouvette  $MG_1$  jusqu'à la rupture ..... 70

Figure 3-27 : Comportement mécanique de l'éprouvette  $MF_1$  jusqu'à la rupture..... 71

Figure 3-28 : Comportement mécanique de l'éprouvette  $MG_1$  jusqu'à la rupture ..... 71

Figure 3-29 : Comportement mécanique de l'éprouvette  $MF_1$  jusqu'à la rupture..... 72

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	14
Tableau 1-2 : Caractéristiques de quelques thermoplastiques.....	15
Tableau 1-3 : Caractéristiques physiques des composites a 7jours d'âges.....	26
Tableau 1-4 : Caractéristique physique des composites a 14 jours d'âges.....	27
Tableau 1-5 : Caractéristique physique des composites a 28 jours d'âges.....	27
Tableau 1-6 : Caractéristiques mécanique des composites a 14 jours d'âge.....	27
Tableau 1-7 : Caractéristiques mécanique des composites a 28 jours d'âge.....	27
Tableau 2-1 : Proportions utilisées pour la constitution du mélange -balles de riz-polystyrène.....	38
Tableau 2-2 : Proportions utilisées pour la constitution du mélange gousses de mil-polystyrène.....	38
Tableau 2-3 : Caractéristiques de la colle.....	41
Tableau 2-4 : Désignation des différents composites du mélange balles de riz-polystyrène.....	41
Tableau 2-5 : Formules de détermination des masses des différents constituants pour la confection des plaques.....	42
Tableau 2-6 : Masse des différents constituants pour la confection des plaques balles de riz-polystyrène.....	42
Tableau 2-7 : Masse des différents constituants pour la confection des plaques gousses de mil-polystyrène.....	43
Tableau 2-8 : Dimensions des plaques.....	47
Tableau 3-1 : Résultats de l'analyse granulométrique sur les gousses de mil.....	54
Tableau 3-2 : Résultats de l'analyse granulométrique sur les balles de riz.....	55
Tableau 3-3 : Masse volumique du polystyrène et de l'essence.....	56
Tableau 3-4 : Module d'élasticité et de rupture en flexion des plaques balles de riz-polystyrène.....	61
Tableau 3-5 : Module d'élasticité et de rupture en flexion des plaques gousses de mil-polystyrène....	61

**LISTE DES PHOTOS**

Photo 1-1 : Polyester insaturé.....	13
Photo 1-2: Panneau d'isolant électrique en Bakélite .....	13
Photo 1-3 ; Exemple de polyéthylène.....	16
Photo 1-4: Exemple de propylène .....	17
Photo 1-5 : Différents types de polystyrène .....	18
Photo 1-6 : Plaque Polycarbonate UV tansparente.....	19
Photo 1-7: Polyester plastique .....	20
Photo 1-8 : Engrenage en Polyacétal.....	20
Photo 1-9:Tuyaux en Polychlorure de vinyle.....	21
Photo 1-10 : Polyamide .....	22
Photo 2-1 : Gousses de mil écrasées.....	31
Photo 2-2 : Balles de riz écrasé .....	31
Photo 2-3 : Le polystyrène expansé.....	31
Photo 2-4 : Le polystyrène coupé en de petits morceaux .....	31
Photo 2-5 : Essence .....	32
Photo 2-6 : Aspect de la colle.....	39
Photo 2-7 : Essai de viscosité sur la colle.....	40
Photo 2-8 : Séparation des grains de balles de riz par classes granulaires .....	43
Photo 2-9 : Mélange Balle de riz-colle.....	44
Photo 2-10 : Malaxage .....	44
Photo 2-11 : Mélange obtenu après malaxage.....	44
Photo 2-12 : Ajout d'une masse $m_c$ colle .....	44
Photo 2-13 : Malaxage .....	44
Photo 2-14 : Masse $m_g$ de gousses de mil.....	44
Photo 2-15 : Le moule et ses accessoires .....	45
Photo 2-16 : Moule rempli du mélange gousses de mil-polystyrène .....	45
Photo 2-17 : Moule rempli du mélange balles de riz-polystyrène.....	45
Photo 2-18 : Presse mécanique pour le compactage du mélange .....	46
Photo 2-19 : Composites obtenus.....	46
Photo 2-20 : Usinage des plaques.....	47
Photo 2-21 : Mesure du gonflement .....	49
Photo 2-22 : Dispositif d'essai de flexion .....	51

## LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES

<b>AFNOR</b>	:	Association Française de Normalisation
<b>ASTM</b>	:	American Standards of Technical Material
<b>CBP</b>	:	Composites bois Polymères
<b>EPAC</b>	:	Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi
<b>GES</b>	:	Gaz à Effet de Serre
<b>HIPS</b>	:	High-Impact Polystyrène
<b>LMDPE</b>	:	Polyéthylène linéaire de moyenne densité
<b>LVL</b>	:	Laminated Veneer Lumber (Panneaux de fibres lamellées et collées)
<b>MDF</b>	:	Medium Density Fiberboard (Panneaux de fibres agglomérées)
<b>MF</b>	:	Aminoplastes
<b>MF<sub>0,8</sub></b>	:	Mélange fin de dosage D=0,8
<b>MF<sub>1</sub></b>	:	Mélange fin de dosage D=1
<b>MG<sub>0,8</sub></b>	:	Mélange grossier de dosage D=0,8
<b>MG<sub>1</sub></b>	:	Mélange fin de dosage D=1
<b>MOE</b>	:	Module d'Elasticité
<b>MOR</b>	:	Module de Rupture
<b>ONU</b>	:	Organisation des Nations Unies
<b>OSB</b>	:	Oriented Strand Board (Panneaux à particules orientées)
<b>PA</b>	:	Polyamides
<b>PE</b>	:	Polypropylène
<b>PEBD</b>	:	Polyéthylène Basse Densité
<b>PEHD</b>	:	Polyéthylène Haute Densité
<b>PEN</b>	:	Polyéthylène Naphtalate
<b>PET</b>	:	Polyéthylène Téréphtalate
<b>PF</b>	:	Phénolplastés

## Liste des sigles et symboles

---

<b>POM</b>	:	Polyoxy-Méthylène
<b>PP</b>	:	Polypropylène
<b>PS</b>	:	Polystyrène
<b>PSE</b>	:	Polystyrène Expansé
<b>PSE-E</b>	:	Polystyrène Expansé Extrudé
<b>PSE-M</b>	:	Polystyrène Expansé Moulé
<b>PUR</b>	:	Polyuréthane
<b>PVC</b>	:	Chlorure de Polyvinyle
<b>WPC</b>	:	Wood Plastics Composites

**INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

#### A. Contexte et justification

Les questions d'environnement envahissent depuis quelques années les préoccupations et le champ médiatique de nos sociétés. Des pays émergents comme le Bénin prennent à bras le corps les problématiques environnementales liées à leur développement économique, tandis que d'autres pays, comme le Japon (**MESMER, 2009**), ont déjà des années de réflexion en la matière.

L'atteinte des objectifs du développement durable n'est possible que s'il y a prise en compte de la protection de l'environnement : C'est le troisième principe de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement (**Nations-Unies, 1992**), qui attire l'attention de ses membres à travers le monde à faire front commun face aux problèmes environnementaux qui menacent l'existence de la planète Terre.

Le Dr Corinne Gendron a proposé une vision du développement sous trois angles: le premier étant l'amélioration de la qualité de vie des populations (aspect social) ; le deuxième est axé sur la préservation de la planète terre (aspect environnemental) et le troisième étant la rentabilité des méthodes utilisées (aspect économique). (**GENDRON, 2006**)

Il faut donc à tout prix lier développement et environnement, ou mieux, à la situation actuelle de la planète, vers des objectifs de développement incluant les aspects suivants : environnemental, social et économique. Par conséquent, les différents acteurs du développement doivent trouver des moyens de réduire les polluants environnementaux, en particulier les émissions de gaz à effet de serre. Celui dont il faut faire plus attention est le dioxyde de carbone car il est le plus produit.

Compte tenu de ce besoin, on se rend compte qu'il est impératif de trouver des solutions pour réduire ces émissions de gaz à effet de serre. C'est dans cette logique, que les matériaux écologiques comme la latérite, la chaux, la pierre, les végétaux, les nouveaux matériaux de construction à base de plastique recyclé ou de déchets miniers, pour ne citer que ceux-ci, représentent l'un des meilleurs vecteurs pour ces défis selon la logique du développement durable.

Ils contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à limiter la consommation d'énergie et à optimiser les ressources naturelles non renouvelables. De plus, en offrant aux professionnels des solutions techniques et économiquement viables, les éco-matériaux représentent un véritable potentiel exploité pour l'essor de la croissance verte sur le continent. **(Internationale, 2013)**

Tous les regards sont donc tournés vers l'utilisation et la valorisation des déchets agricoles.

En effet, la motivation qui sous-tend le choix desdits déchets, c'est qu'ils sont largement disponibles et leur utilisation dans la construction constitue un nouveau matériau.

Au Bénin, l'agriculture contribue fortement au PIB ; donc l'approvisionnement en déchets agricoles se fera sans grande difficulté.

### **B- Pertinence de l'étude**

Une prise de conscience environnementale soutenue par une réglementation de plus en plus stricte conduit chercheurs et industriels à la mise au point de nouveaux matériaux permettant à la fois de relever le défi d'un développement durable et d'entrevoir de nouveaux matériaux. Les composites font partis de ces matériaux qui ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit le moins coûteux possible, soit le plus performant, ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique (ex : matières recyclées ou biodégradables).

Pour cela, en quelques années, le recyclage est devenu partie intégrante de notre société et de notre mode de vie. Tout d'abord, nous recyclons des matériaux comme le papier, le plastique et le verre, puis nous avons commencé à recycler de nouveaux matériaux comme les déchets agricoles dont l'environnement immédiat des pays en développement utilise comme combustible domestique. Dans ce contexte, en Afrique, des recherches de Génie Civil se poursuivent sur le recyclage des déchets agricoles et plastiques de toutes sortes à les recycler en des matériaux composites nouveaux.

Cette étude prendra en compte les déchets de mil (gousses de mil), riz (balles de riz) et les déchets de polystyrène expansé.

### **C- Objectif général**

L'objectif général visé à travers cette étude est de valoriser les gousses de mil, les balles de riz et les déchets de polystyrène en vue de réaliser des matériaux de construction légers.

### **D- Objectifs spécifiques**

Spécifiquement cette étude a pour objectifs :

- ✚ de formuler les mélanges balles de riz-polystyrène et gousses de mil-polystyrène ;

- ✚ d'étudier l'influence de la granulométrie et du dosage en colle sur les caractéristiques physiques et mécaniques des composites.

### **E-Résultats attendus**

- ✚ les formulations des mélanges (balles de riz-polystyrène et gousses de mil-polystyrène) sont faites ;
- ✚ l'étude de l'influence de la granulométrie et du dosage en colle sur les caractéristiques physiques et mécaniques des composites est faite;

### **F- Méthodologie**

La démarche à suivre est la suivante :

- faire une revue des travaux publiés (articles, thèses, livres, etc.) sur les matériaux composites à base de biomasse végétale traitant des études de formulations, des caractérisations physiques et mécaniques ;
- recycler les gousses de mil, les balles de riz et les polystyrènes;
- formuler les mélanges ;
- étudier les caractéristiques physiques et mécaniques des composites ;
- étudier l'influence de la granulométrie des gousses de mil et des balles de riz sur les caractéristiques physiques et mécaniques des composites.

**CHAPITRE I :  
GENERALITES ET REVUE DE  
LITTERATURE**

## CHAPITRE I : GENERALITES ET REVUE DE LITTÉRATURE

### 1.1. GENERALITES

#### 1.1.1. La notion d'écoconception

Selon une définition de l'AFNOR datant de 2004, l'écoconception consiste à intégrer l'environnement dès la conception d'un produit ou service, et lors de toutes les étapes de son cycle de vie. Il s'agit d'intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits, en s'appuyant sur une approche globale et multicritère des impacts sur l'environnement, ainsi que sur la prise en compte de toutes les étapes de vie des produits. Cette démarche peut s'accompagner d'un système de management environnemental (SME) au sein de l'entreprise.

L'écoconception intègre dans sa démarche l'analyse du cycle de vie (ACV), même s'il est difficile d'estimer l'impact environnemental du produit à certaines phases de sa vie.

Pour un produit standard, il est nécessaire d'établir, pour chaque phase de sa vie, le coût en termes de ressources (matières premières, énergie), l'inventaire des émissions et l'estimation de l'impact sur l'environnement. Cela requiert des bases de données sur les matériaux et les procédés de fabrication, autrement dit des données nombreuses, parfois difficiles à obtenir. De plus la démarche d'écoconception est onéreuse et chronophage, d'où la nécessité de mettre au point des éco-indicateurs pertinents et utilisables dans la pratique (Rydh C.J. et al., 2005 ; Tiruta-Barna L. et al., 2007). L'ACV est surtout utilisé pour comparer des solutions technologiques entre elles. Elle est seulement appliquée à quelques composants du produit complet et se limite le plus souvent à quelques critères environnementaux et/ou à certaines phases de vie du produit.

#### 1.1.2. Matériaux écologiques (Eco-matériau)

Les problématiques liées aux éco-matériaux sont multi-physiques et multicritères, par essence pluridisciplinaires. Les matériaux à base de ressources végétales et les nanotechnologies sont les exemples les plus évidents de la nécessité d'une collaboration pluridisciplinaire, de la conception jusqu'à la fin de vie des produits. (Bretagne, 2009)

D'une manière générale, un éco-matériau est un matériau qui contribue à la réduction de l'impact environnemental liés aux activités humaines. (Halada, 1992)

Halada a classé les éco-matériaux en 4 grandes catégories (Halada K., 2003, p. 209-216) :

➤ **Les matériaux contenant moins de substances dangereuses**

Il va s'agir par exemple de matériaux sans plomb, sans gaz halogènes (retardateur de feu, substitut du PVC...), sans mercure, de matériaux semi-conducteurs moins dangereux pour l'environnement...

### ➤ **Les matériaux avec un meilleur profil environnemental**

Cette catégorie inclut :

- des matériaux issus de ressources renouvelables (**Baley C., 2002 ; Bodros E. et al., 2007 ; Dupré B., 2005**) : matériaux à base de plantes, de bois, tels les bioplastiques (bio-polymères)...
- des matériaux obtenus à partir de déchets : ciments obtenus à partir de déchets municipaux ou de cendres (résidus de combustion), bétons légers contenant des granulats de caoutchouc (granulation de pneus usés (**Benazzouk A. et al., 2003, 2006 ; Bonnet S., 2003 ; Turki M., 2007**), bétons légers contenant des granulats de plastique (broyats de PET et PEHD obtenus mécaniquement à partir de bouteilles plastiques (**Yazoghli O., 2005**)...
- des matériaux issus de procédés de fabrication ayant moins d'impacts sur l'environnement...

### ➤ **Les matériaux avec un potentiel de recyclage plus important**

On peut citer les aciers recyclables, des matériaux composites recyclables (composites décomposables, composites de la même famille de matériaux), des aciers avec peu d'impuretés...

Les matériaux présentant un rendement supérieur par rapport aux ressources utilisées.

Les produits d'origine végétale sont très présents : Il s'agit de valoriser des agro- ressources non alimentaires parmi lesquels des déchets agricoles et agro-alimentaires. La définition des éco-matériaux peut encore être étendue aux matériaux qui entrent dans la fabrication de systèmes de contrôle et/ou de traitement de la pollution, de procédés de traitement et/ou de recyclage et de procédés de fabrication plus respectueux de l'environnement. L'amélioration du taux de recyclage des gisements de matières plastiques, pour lesquelles le tri automatique est difficile, peut entrer dans cette catégorie.

Enfin, comme le soulignent (**Yagi & Halada, 2001**), nous allons utiliser les matériaux mieux et plus longtemps, ce qui implique de repenser la « science des matériaux » dans le cadre de l'eco-conception et des éco-matériaux, l'approche de ces auteurs est par ailleurs intéressante puisqu'ils lient les notions d'environnement et de gestion des risques, un paramètre qui n'est souvent pas pris en compte en parlant de développement durable.

Nos travaux qui portent sur la revalorisation des déchets agricoles polluants et le recyclage de déchets plastiques sont en adéquation avec cette approche.

### 1.1.3. Les matériaux composites

Un matériau composite est une association ou un mélange hétérogène d'au moins deux composants, non miscibles mais ayant une forte capacité d'interpénétration et d'adhésion, dont les propriétés mécaniques se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés avantageuses que les composants seuls ne possèdent pas. Bien que le terme composite soit moderne, de tels matériaux ont été inventés et abondamment utilisés bien avant l'Antiquité, comme les torchis pour la construction de bâtiments. Il existe aussi des composites naturels tels que l'os et le bois. **(Bensaude-Vincent & Laszlo, 1998)**

Un matériau composite est, par définition, tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme de poudre, fibres, granules et même de fibres tissées (longues). Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface. **(EGANA, 4<sup>ème</sup> année GM).**

Un matériau composite est constitué d'une :

- ossature appelée renfort, présentant diverses architectures, qui assure la tenue mécanique ;
- protection appelée matrice, assurant la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort, qui est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) (EGANA, 4<sup>ème</sup> année GM).

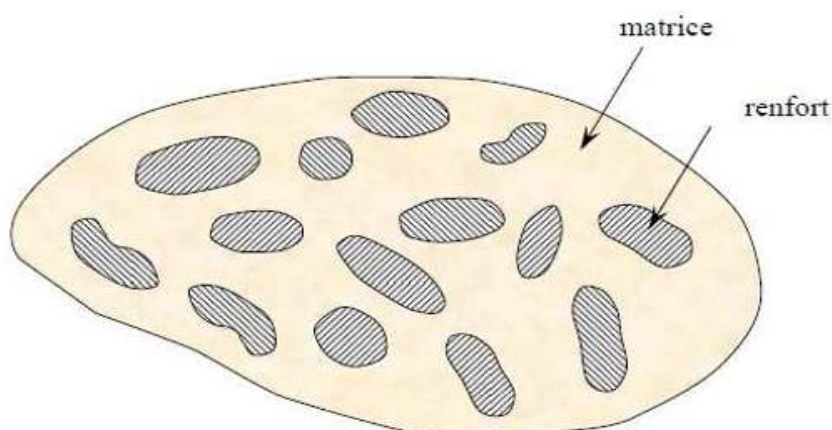


Figure 1-1 : esquisse d'un matériau composite

Source : CHOWDHURY, 2010

Ces deux constituants principaux reçoivent des additifs ou charges nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort et la matrice. Ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés : pigments de coloration, agents anti-UV, charges ignifugeantes, isolation thermique ou acoustique. Les charges et additifs sont incorporés dans un matériau composite pour :

- Modifier la couleur ;
- Modifier sensiblement les propriétés mécanique, électrique ou thermique ;
- Réduire le coût ;
- Résister au feu ;
- Diminuer le retrait ;
- Faciliter le démoulage ;
- Améliorer la résistance au vieillissement ;
- Modifier la densité du matériau (EGANA, 4<sup>ème</sup> année GM).

### 1.1.4. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant leur nature.

#### 1.1.4.1. Classification suivant la forme des renforts

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à fibres et les matériaux composites à particules

- **Composites à particules**

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tel le tungstène, le chrome et les molybdènes, incorporés dans des métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.

Également, des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration. Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse.

- **Composites à fibres**

Un composite fibré est un matériau constitué d'un ensemble de fibres résistantes noyées dans une matrice dont les propriétés mécaniques sont nettement plus faibles. Les fibres jouent le rôle de renfort tandis que la matrice assure la cohésion du composite et le transfert des efforts aux fibres (**Camille, 2010**). Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- La nature des constituants ;
- La proportion des constituants ;
- L'orientation des fibres.

### 1.1.4.2. Classification suivant la nature de la matrice

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on identifie généralement par trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- les Composites à Matrices Organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;
- les Composites à Matrices Céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire, le militaire, et le freinage (freins carbone) ;
- les Composites à Matrices Métalliques (CMM).

Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer :

- Composites à matrice organique (résine, charges)
  - Des fibres minérales : verre, carbone, etc.

- Des fibres organiques : Kevlar, polyamide, etc.
- Des fibres métalliques : Bore, aluminium, etc.
- Composites à matrice métallique (alliages légers et ultra légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :
  - Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
  - De fibres métalliques : Bore,
  - Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC)

Un avantage de ces composites est que la matrice étant métallique, ses caractéristiques mécaniques intrinsèques sont généralement bonnes. Il est donc possible de s'appuyer sur le comportement matriciel et de ne renforcer que certaines zones, ou encore de se contenter de renforts unidirectionnels ; cela est généralement impossible avec les matrices polymères (en raison de leur faible résistance) ou céramiques (en raison de leur fragilité). Un inconvénient est la grande réactivité chimique des métaux : lors de la mise au point du composite, il faut s'assurer que la matrice et le renfort ne peuvent pas réagir entre eux, faute de quoi les conséquences sur les propriétés mécaniques peuvent être catastrophiques. **(GENDRE, 2011)**

- Composites à matrice minérale (céramique), avec
  - Des fibres métalliques : Bore,
  - Des particules métalliques : cermets,
  - Des particules minérales : carbure, nitrures, etc.

Les céramiques possèdent de nombreux atouts pour de telles applications : elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que de nombreux métaux, et présentent une bonne stabilité chimique. Malheureusement, leur grande fragilité limite fortement leur domaine d'utilisation. Le principe des CMC est donc de rendre les céramiques moins cassantes en leur donnant une structure composite, c'est-à-dire en les façonnant sous forme de renforts et d'une matrice. **(GENDRE, 2011)**

### 1.1.5. Le polystyrène

#### 1.1.5.1. Les polymères synthétiques

Selon le site (Techniques de l'ingénieur, 2022) , un polymère est un composé organique ou inorganique, de grande dimension, de masse molaire élevée pouvant atteindre plusieurs milliers de grammes par mole. Un polymère est formé de chaînes macromoléculaires, elles-mêmes issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre de motifs monomères.

Les polymères de synthèse sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets de la vie courante, dans lesquels ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Ils sont présents dans de nombreux domaines industriels. Un domaine émergent important se concentre désormais sur les polymères supramoléculaires formés par des liaisons non-covalentes.

Il existe une corrélation étroite entre le produit national brut (PNB) d'un pays et sa consommation de polymères. **(Jean-Pierre Mercier, 1999)**

#### 1.1.5.2. Les thermodurcissables

Les résines thermodurcissables représentent la grande majorité des résines adhésives. Les colles, ou polymères thermodurcissables, sont largement utilisées pour le collage du bois ou dans les composites à base de bois, en particulier ceux à base de fibres cellulosiques.

Une fois qu'il ait reçu une forme définitive, ordinairement sous l'action de la chaleur et de la pression, un plastique thermodurcissable ne peut plus être fondu ou moulé, parce que le constituant polymère a subi une modification chimique irréversible. L'opération par laquelle la matière première est transformée en produit rigide, insoluble et infusible, est appelée réticulation ou pontage et correspond à l'étape finale de la polymérisation.

La réticulation d'une résine thermodurcissable peut être amorcée à l'aide de la chaleur, de l'irradiation, des catalyseurs ou par leur action conjuguée. Le composant polymère consiste en molécules ayant des liaisons chimiques transversales permanentes ou ponts, formant une structure tridimensionnelle qui ne peut s'écouler. La structure fortement réticulée des polymères thermodurcissables immobilise les molécules et cela confère au matériau une dureté élevée, une résistance mécanique aux températures relativement élevées, une insolubilité, une tenue adéquate à la chaleur, ainsi qu'une bonne résistance aux agents chimiques et au fluage. **(BLAGA, 1975)**

### 1.1.5.3. Les polyuréthanes (PUR)

Les résines polyuréthane sont constituées d'une molécule organique appelée encore polymère uréthane. On nomme ainsi uréthane tout composé produit par une réaction avec un alcool ou un isocyanate. Les polyuréthanes (PUR) sont des matériaux dont les caractéristiques sont très variées avec une grande diversité de textures et de duretés. Les polyuréthanes sont les polymères les plus utilisés pour faire les mousses. Ils sont formés par l'association d'un isocyanate (composé organique comprenant la séquence :  $-N=C=O$ ) et par un alcool (composé organique dont l'un des carbones est lié à un ou plusieurs groupements hydroxyle  $-OH$ ). En fonction des associations chimiques réalisées avec différents monomères on peut obtenir des colles, des élastomères, des fibres (Licra) des mousses souples ou rigides grâce à des agents d'expansion, des polyuréthanes solides et compacts que l'on peut renforcer par de la fibre de verre. On les utilise pour fabriquer des matelas, des sièges de voiture, des tableaux de bord, des roues de patins à roulettes ou des chaussures de ski...

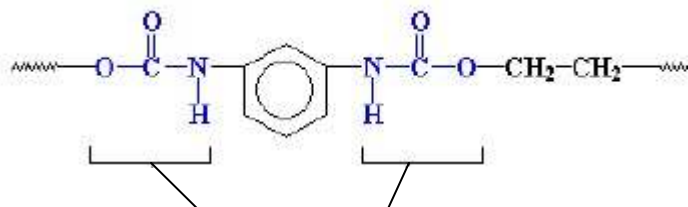


Figure 1-2: Les liaisons uréthanes dans un polyuréthane

### 1.1.5.4. Les polyesters insaturés

Les polyesters insaturés sont obtenus par réaction de condensation entre différents polyacides et des glycols (éthylène glycol, propylène glycol). Ces produits appelés époxydes sont des substances chimiques comportant un oxygène ponté sur une liaison carbone-carbone. Ils sont dilués ultérieurement dans un monomère non saturé comme le styrène.

Quand un catalyseur est introduit dans cette résine, les produits se combinent provoquant un durcissement irréversible appelé la réticulation qui correspond à l'apparition de liaisons chimiques formant un réseau macromoléculaire tridimensionnel.

Le polyester sert surtout à fabriquer des fibres textiles artificielles, Les tissus produits sont brevetés sous les noms de Dacron, de Tergal ou de Térylène. La fibre polyester est la plus produite dans le monde car son utilisation très répandue dans l'habillement.

Ses applications se sont aussi diversifiées dans l'industrie, notamment sous forme de films destinés à l'agriculture, aux travaux publics, aux coques et cabines de bateaux, aux carrosseries d'automobiles, aux piscines.



Photo 1-1 : Polyester insaturé

#### 1.1.5.5. Les phénoplastes (PF)

Les phénoplastes ou « résines phénol-formaldéhyde » (sigle PF) sont issus du formaldéhyde et du phénol. Ils font partie de la famille des polymères thermodurcissables. Le phénol étant un monomère trifonctionnel (la molécule monomère possède trois sites actifs), il se forme finalement un réseau tridimensionnel.

Un exemple bien connu est celui de la « bakélite » (marque déposée), le plus ancien matériau polymère synthétique industriel. (TROTIGNON, 1996)



Photo 1-2: Panneau d'isolant électrique en Bakélite

### 1.1.5.6. Les aminoplastes (MF)

Les « résines mélamine-formaldéhyde » ou « mélamine-formol » (MF) sont issues de la mélamine. L'hexavalence de ce composé peut permettre la formation de réseaux denses. Elles sont surtout connues sous le nom commercial Formica. Elles représentent environ 17 % du tonnage des aminoplastes et sont plus chères que les précédentes.

La synthèse peut s'opérer à partir des solutions aqueuses des comonomères. Le formaldéhyde possédant de fortes propriétés sensibilisantes et irritantes, il est nécessaire de se protéger de ces effets.

Ces produits résineux sont essentiellement utilisés en stratification sur des textiles plastifiés, les panneaux de bois agglomérés pour le mobilier de cuisine et les plans de travail.

Le Tableau 1.1 montre les principales caractéristiques des résines thermodurcissables

Tableau 1-1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables

Résine	P	$\rho_{\text{traction}}$ (GPa)	MOE GPa( )	T <sub>c</sub> (° C)
<b>Polyester</b>	1,2	50-65	3	120
<b>Phénol</b>	1,2	40-50	3	120-150
<b>Formaldéhyde</b>	1,1-1,4	50-90	3	120-200
<b>Epoxyde</b>	1,1-1,5	20-50	1	100-120
<b>Polyuréthane</b>	1,15	70-80	3,5	140
<b>Vinyl-ester</b>				

$\rho$ : densité ; MOE : Module d'élasticité (en flexion);  $\rho_{\text{traction}}$  : Résistance à la traction ; T<sub>c</sub> : Tenue à la chaleur continue.

### 1.1.6. Les thermoplastiques

Ce sont des matériaux synthétiques constitués de polymères linéaires ou ramifiés. Le Tableau 1-2 montre quelques caractéristiques des polymères thermoplastiques les plus utilisés.

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes. Elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leur nouvelle forme.

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit plus de 35 millions de tonnes ! Avant transformation, ils sont sous forme de granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable.

Tableau 1-2 : Caractéristiques de quelques thermoplastiques

Polymère	Densité	$\rho_{\text{traction}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	A	R <sub>(IZOD)</sub> KJ/m <sup>2</sup>	T <sub>fle</sub> (°C)
<b>PVC</b>	1,5	50	2400	10-50	-	60
<b>PS</b>	1,05	40	2800-3500	4	- 5	90
<b>HDPE</b>	0,95	30-35	1000	700-1000	3	77
<b>PET</b>	1,39	2,5	3400	90	15	80
<b>PMMA</b>	1,19	65	3300	4	-	95
<b>PP</b>	0,91	20-4	1100-1600	200-1000	-	100

$\rho_{\text{traction}}$  : Résistance à la traction ; MOE : Module d'élasticité en flexion; A : Allongement à la rupture ; R(IZOD) : Résistance au choc (IZOD) ; T<sub>fle</sub> : Température de fléchissement sous charge (1,8 N/mm<sup>2</sup>) ; PVC : Chlorure de polyvinyle rigide ; PS : Polystyrène à l'état cristal HDPE : Polyéthylène à haute densité ; PET : Polyéthylène Téréphtalate cristallin ; PMMA : Poly méthacrylate de méthyle à l'état amorphe ; PP : Polypropylène à l'état semi cristallin.

Les thermoplastiques sont utilisés comme éléments structuraux et décoratifs dans diverses applications (le bâtiment, la construction, etc.). Dans l'industrie, ces matières sont transformées essentiellement par extrusion en matériaux fonctionnels. Elles peuvent être recyclées après utilisation. Les thermoplastiques sont généralement des matériaux ductiles.

Les principales familles de thermoplastiques sont les polyoléfines (les polyéthylènes, les polypropylènes), les plastiques à base de polychlorure de vinyle, les acryliques et les polystyrènes. Certains polymères celluloses ayant fait l'objet de modification chimique se retrouvent parmi les thermoplastiques comme les acétates de cellulose. La chaîne élémentaire de l'essentiel des thermoplastiques vinyliques est constituée d'un axe carbone-carbone (polymère vinylique) dont les radicaux changent en fonction des différentes familles. Cette structure conduit à différentes propriétés notamment en ce qui concerne le polypropylène. Ce dernier est, de par sa composition et sa structure, chimiquement inerte, résistant à l'humidité (hydrophobe) et à la putréfaction. Il possède aussi une bonne résistance à la fissuration ou aux chocs. Sa plage de thermoformage, située entre 110-130°C est assez élevée pour une polyoléfine mais elle convient toutefois aux fibres celluloses qui se dégradent réellement à partir d'une température supérieure à 200°C.

### 1.1.6.1. Le polyéthylène (PE)

Le **polyéthylène** ou **polyéthène** est un plastique issu de la transformation du pétrole. Il fait partie de la famille des polyofélines. Il est obtenu par polymérisation.

Il est le plus souvent désigné comme le PEHD, le PE ou encore le PEBD. Toutes ces abréviations et caractéristiques associées sont normalisées dans la norme NF EN ISO 1043-1.

Cela s'explique parce qu'il existe différents types de polyéthylène dont le procédé de fabrication diffère.

Dans l'industrie, notamment de la tuyauterie industrielle, c'est le **polyéthylène haute densité (PEHD)** ou le polyéthylène basse densité (PEBD) qui sont les plus utilisés.

Le polyéthylène est en effet exploité pour la fabrication d'un grand nombre d'ouvrages (tuyauteries, tubes). (Artis Groupe, 2022)



Photo 1-3 ; Exemple de polyéthylène

### 1.1.6.2 Le polypropylène (PP)

Le polypropylène, également appelé polypropène, est une résine **obtenue par polymérisation de monomère du propylène grâce à des catalyseurs**. Le système catalytique de Ziegler-Natta est le plus connu.

Abrégé PP ou PPI, la formule chimique de cette matière plastique isotactique (structure géométrique régulière) est la suivante :  $(-CH_2-CH[CH_3]-)$ .

Pour les besoins de l'industrie, le PP est souvent polymérisé avec des matières comme le carbonate de calcium ou la fibre de verre. **Des matériaux aussi résistants que l'acier sont alors obtenus**, tout en conservant la qualité élastique du PP.



Photo 1-4: Exemple de propylène

### 1.1.6.3. Le polystyrène (PS)

Le polystyrène a été découvert en 1930 et le polystyrène expansible en 1951. C'est un thermoplastique très utilisé dans beaucoup de domaines de la vie de tous les jours. Le polystyrène est obtenu par polymérisation du styrène. Le styrène est obtenu de l'action du benzène sur l'éthylène.

Le polystyrène est un plastique dur, cassant et transparent. C'est un produit industriel courant largement diffusé, offrant de très nombreux usages. On le reconnaît facilement à un blanchissement sur les zones de contraintes avant la rupture ou à sa fumée noire et à son odeur caractéristique lors de sa combustion. On l'utilise pour fabriquer du mobilier, des emballages, des grilles de ventilation, des jouets, des verres plastiques...

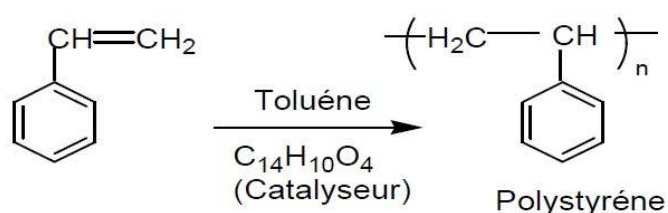


Figure 1-3 : Polymérisation du styrène

On distingue trois types de polystyrènes:

- **le polystyrène "cristal"** n'a pas une structure cristalline mais porte ce nom en raison de son aspect transparent. Il polymérise sous forme de perles à haute température en présence d'un adjuvant plastifiant. C'est un plastique dur et cassant utilisé pour de nombreux types de boîtes, les boîtiers CD notamment.

- **le polystyrène "choc"** ou HIPS (high-impact polystyrène) ou acrylonitrile butadiène styène est un copolymère formé par du styrène et du polybutadiène. C'est le plus commun de la famille des plastiques styréniques car il est résistant, capable de supporter des impacts plus forts que le polystyrène normal. Le polybutadiène a été un des premiers élastomères synthétiques à être inventé car il est très similaire au caoutchouc naturel.
- Le matériau le plus connu de la gamme est **le polystyrène expansé** (PSE.) Ce polystyrène est solide à 20°C, pâteux à 120°C et fondant à 160°C. C'est sorte de mousse blanche compacte inflammable et combustible. Il existe deux types de PSE : le polystyrène expansé moulé (PSE-M) obtenu à partir d'un polystyrène "expansible" et le polystyrène expansé extrudé (PSE-E). Une première expansion est opérée à la vapeur d'eau puis une période de repos permet aux perles de PS pré-expansées de perdre leur excédent d'eau. Enfin, on les expande et on les moule à la vapeur dans la forme voulue. C'est un matériau qui sert à emballer les appareils sensibles aux chocs et qui est un très bon isolant thermique pour les plaques de doublage des murs.



a. Polystyrène cristal



b. Polystyrène choc



c. Polystyrène expansé

Photo 1-5 : Différents types de polystyrène

Dans notre étude, le polymère utilisé pour la matrice des matériaux composites est un Polystyrène recyclé. Il est issu de la récupération de matériel d'emballage et autres produits plastiques collectés dans la ville de Cotonou. Il représente une quantité importante délaissée dans la nature. Sa masse volumique est de 0.80 g/cm<sup>3</sup>, son module d'élasticité (E) est de 800 MPa et son élongation à la rupture est de 25.52% selon la procédure ASTM D638. Il a une température de fusion de l'ordre de 240°C.

### 1.1.6.4. Le polycarbonate (PC)

Le polycarbonate est une matière plastique disposant d'excellentes propriétés mécaniques et d'une résistance thermique permettant une utilisation entre  $-100\text{ °C}$  et  $120\text{ °C}$ . Ce polymère est issu de la polycondensation du bisphénol A (BPA) et d'un carbonate ou du phosgène. La très grande transparence de cette matière est exploitée pour la fabrication de verres optiques, des CD et DVD, des lentilles de caméras thermiques (caméras infrarouge) ou encore de vitres de phares automobiles. En forte épaisseur, il possède une légère teinte jaune.

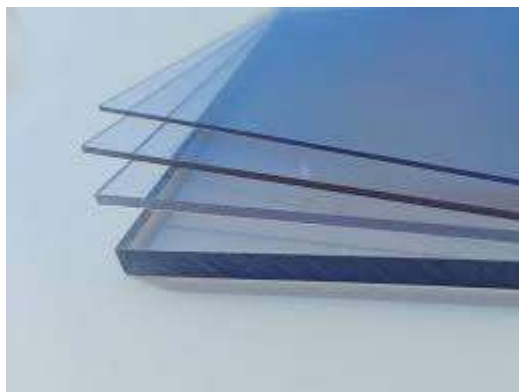


Photo 1-6 : Plaque Polycarbonate UV transparente

### 1.1.6.5. Les polyesters et le polyéthylène téréphtalate (PET)

C'est un polymère obtenu par la polycondensation de deux composants : le diméthyltéréphtalate et l'éthylène glycol. Les chaînes vont s'arranger et former des fibres résistantes. Le PET est surtout employé pour la fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles. L'inventeur des bouteilles en PET, Nathaniel Wyeth voulait faire une bouteille incassable. Cependant, ce plastique devient mou à moyenne température. Cette propriété empêche de consigner les bouteilles en PET car il faut les laver à une température trop haute.

Pour cette même raison, on ne peut pas l'utiliser pour les confitures qui sont coulées chaudes dans les pots. Il existe aujourd'hui un nouveau type de polyester plus résistant à la chaleur qui correspond à ce que l'on recherche pour les pots de confiture et les bouteilles consignées. C'est le polyéthylène naphthalate ou PEN.



Photo 1-7: Polyester plastique

#### 1.1.6.7. Les polyacétals ou polyoxyméthylène (POM)

Les polyacétals ont des propriétés qui les rendent irremplaçables pour des pièces à fortes exigences mécaniques comme les engrenages et les poulies. Ils sont solides, présentent les qualités de métaux tels que l'acier, l'aluminium ou le zinc. Ils résistent à la plupart des agents chimiques et ont un faible coefficient de frottement. Par contre, ils ont une densité élevée et une assez faible résistance à la température. La recherche vise à augmenter leur résistance au choc pour permettre la réalisation de plus grosses pièces.



Photo 1-8 : Engrenage en Polyacétal

### 1.1.6.8. Le polychlorure de vinyle PCV

Il est obtenu par la polymérisation des monomères de chlorure de vinyle  $CH=CH-Cl_2$ . Ce polymère de formule  $-(CH-CH-Cl)_{-2n}$  est issu d'une réaction chimique entre de l'éthylène et de l'acide chlorhydrique, en présence d'oxygène, Il peut être soit rigide soit souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore. Le PVC rigide qui a un aspect lisse et dur est utilisé pour les tuyaux de canalisation. Le PVC souple qui recouvre certaines pièces comme les manches de pinces a un aspect brillant. C'est après le PE, le plastique le plus utilisé au monde. Il est largement employé dans l'industrie de l'ameublement et dans le bâtiment ou le génie civil.



Photo 1-9:Tuyaux en Polychlorure de vinyle

### 1.1.6.9. Les polyamides (PA)

C'est la première matière plastique à avoir été découverte en 1938. Selon la longueur des chaînes, on obtient différents types de PA que l'on distingue par des chiffres : par exemple le PA 6.6 est le nylon. Ce sont des polymères qui offrent un bon compromis entre des qualités mécaniques, thermiques et chimiques. Les polyamides sont utilisés pour réaliser des pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, des tapis et des moquettes, de la robinetterie, de la serrurerie, des engrenages, des textiles (lingerie et voilages)... L'inconvénient principal de tous les polyamides est qu'ils sont hydrophiles ce qui limite leur usage pour certaines pièces mécaniques.



Photo 1-10 : Polyamide

### 1.2. TRAVAUX EFFECTUES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Dans l'optique de mettre en œuvre des écoconceptions, un bon nombre de chercheurs ont réalisés plusieurs études sur la mise au point de matériaux composites ayant pour renfort des biomasses végétales. Parmi, ceux-ci nous pouvons citer en autre :

**CHABANNES Morgane** a mené une caractérisation des balles de riz de Camargue (Biosud, Arles). Leurs propriétés physiques et morphologiques ainsi que leur capacité d'absorption d'eau ont été comparées avec celles d'une chènevotte commerciale (FRD, Troyes). Les balles de riz se caractérisent par une géométrie assez particulière. Elles se présentent sous la forme de demi-coques flexibles et de faible épaisseur (quelques micromètres) ce qui les différencie grandement des particules parallélépipédiques de chènevotte. La régularité dimensionnelle des grains de riz implique une étendue granulométrique des balles très resserrée tandis que le processus de broyage du chanvre entraîne une hétérogénéité plus grande sur le granulat de chènevotte, en particulier sur la longueur des particules. Par ailleurs, on a pu noter que la masse volumique apparente d'une particule végétale est plus élevée dans le cas de la balle de riz malgré que la masse volumique en vrac du granulat (avec les vides inter-granulaires) soit identique ( $\sim 100 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Les balles de riz ont montré ensuite une capacité d'absorption d'eau plus faible que celle de la chènevotte en lien avec une porosité intra-granulaire moins développée et plus fermée. **(CHABANNES, 2015)**

**Le docteur DOKO Kouandété Valéry** a fait la formulation et l'étude comparative des propriétés physiques, mécaniques et thermiques de composites à matrice cimentaire renforcée par des biomasses végétales : cas des fibres de borassus aethopium mart et des balles de riz. A cet effet, des études de compatibilité du ciment avec les biomasses, de comportement physique, mécanique et thermique des gâchées formulées ont été réalisées pour deux compositions granulaires. L'étude de compatibilité a révélé que les biomasses végétales bien que n'ayant pas subi un traitement préalable sont compatibles avec le ciment CPJ 35. Les essais de caractérisation ont porté d'abord sur les propriétés physiques notamment la masse volumique et l'absorption, ensuite sur les propriétés mécaniques que sont les résistances en traction par flexion trois points et en compression et enfin sur les propriétés thermiques comme l'effusivité, la conductivité et la diffusivité. Les résultats obtenus sont prometteurs : du point de vue physique, les composites confectionnés peuvent être classés dans la catégorie des bétons légers ; ensuite, ils présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques. Enfin, une étude comparative des deux matériaux formulés a révélé que le béton de fibres de rônier est meilleur en terme de performances mécaniques ; alors que dans des conditions où les propriétés thermiques sont plus recherchées, le béton de balles de riz est plus recommandé.

Par ailleurs l'ajout de sable aux fibres de rônier dans des proportions bien étudiées, permettra l'utilisation des composites fibres de rônier-ciment dans la fabrication de tuiles pour la réalisation des toitures. Quant aux composites balles de riz-ciment, ils peuvent servir à la fabrication de parpaings et d'entrevous entrant dans la réalisation des cloisons et de dalles à corps creux. **(DOKO, 2013)**

En ce qui concerne la formulation de ces matériaux composite ; **Tamba S.** a étudié la formulation des bétons légers à base des déchets cellulosiques notamment les balles de riz et les copeaux de bois. Il a examiné le comportement de plusieurs bétons obtenus à base de ces granulats afin de ressortir une composition satisfaisante en matière de comportement physique et mécanique. De son étude, il ressort que les balles de riz et les copeaux de bois sont hygroscopiques d'où la nécessité d'un pré mouillage. Les bétons de déchets cellulosiques n'obéissent pas aux règles de formulations existantes : leur formulation doit se faire expérimentalement. Pour obtenir un béton porteur (résistance à la compression supérieure à 10MPa) avec les balles de riz, un rapport Ciment/Déchets égal à 3 est recommandé par l'auteur. Mais dans ses travaux, il n'a pas fait cas du dosage en eau. Or la résistance des bétons est inversement proportionnelle à la quantité d'eau de gâchage. **(Tamba, 2001)**

Le granulat utilisé par Nguyen TT. et al pour confectionner ses éprouvettes est de la chènevotte pure. Il est obtenu par défibrage total et broyage de la tige du chanvre. Selon leurs études la masse volumique de la chènevotte est de  $103 \text{ kg/m}^3$  et peut absorber jusqu'à 406% de sa masse en eau après 48h d'immersion dans l'eau. Dans leur formulation ce sont les rapports massiques Liant/Granulat (L/G) suivi du rapport Eau/Liant (E/L) qui ont été utilisés. Ils ont soumis les éprouvettes aux essais de caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques. **(Nguyen T.-T., 2008)**

**Quant à K. Christian**, il s'est basé sur la méthode des volumes absolus pour la formulation de son matériau composite ; mortier de sable ciment incorporé de gousse de mil. il utilise le rapport massique sable/gousse de mil égal à 4 et varie le rapport eau/ciment pour un dosage en ciment de  $400 \text{ kg/m}^3$  **(KOUKOUBOU, 2015)**

**Fabrice Abdou-Raman BANI**, utilise les fibres de gousse de mil, qu'il incorpore au mortier de ciment (ciment dosé à 350) dans un premier temps et ensuite au mortier de sable ciment (ciment dosé à 250) Il a fixé son rapport sable/ gousse de mil à 2,5. BANI pour son premier mélange il prend le rapport eau/ciment égal à : 0,25 et pour le second égal à 0,43. Avec ces rapports fixés, il a un rapport maximum ciment/ déchets égal à 4,6 **(BANI, 2016)**

L'utilisation de ces matériaux nécessite une connaissance de leurs caractéristiques. Ainsi, du point de vue des caractéristiques physiques et mécaniques et thermiques ; Les études réalisées sur les matériaux à base de fibres végétales montrent une modification du comportement mécanique du composite. Alors que la matrice cimentaire pure présente un comportement linéaire fragile, le composite conserve son intégrité même au-delà de la charge maximale.

Ce phénomène est mis en évidence par des études menées par Sedan sur le béton de chanvre **(Sedan, 2007)**. La figure 1.4 ci-dessous illustre ce phénomène à travers une comparaison des comportements d'une pâte de ciment pure et d'un composite ciment-fibres de chanvre soumis tous deux à un essai de flexion trois points.

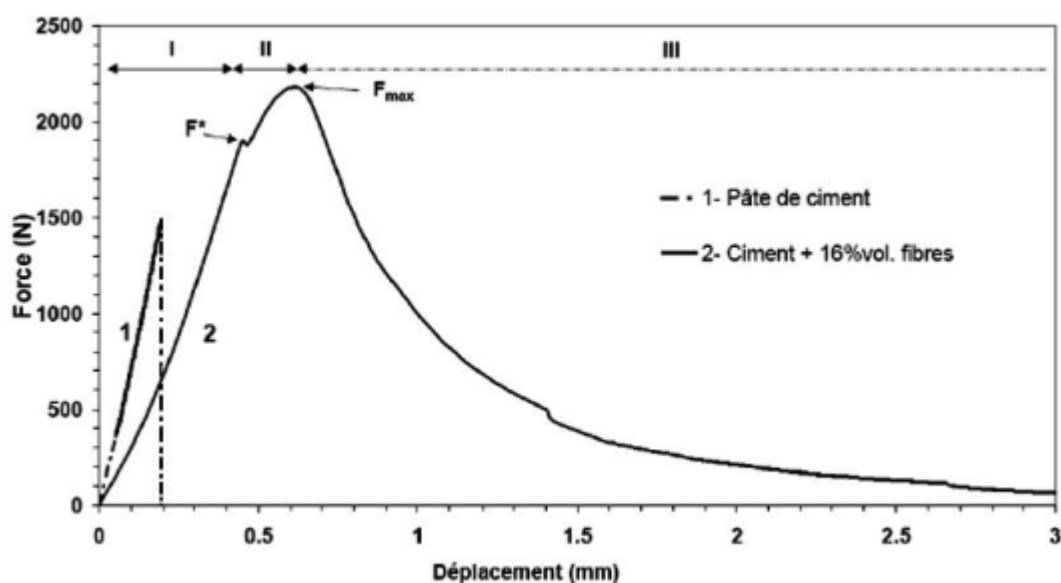


Figure 1-4 : Comportement mécanique d'un matériau composite fibré (Sedan, 2007)

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

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

L'auteur associe cette phase à une rupture progressive des interfaces fibres/matrice suivie d'un déchaussement des fibres  $F_{max}$ .

Le passage d'une matrice fragile à un composite ductile est souligné pratiquement par tous les auteurs. Mais il ne va pas forcément de pair avec l'amélioration des résistances à la flexion, à la traction ou à la compression : celles-ci dépendent de plusieurs paramètres notamment le dosage et la longueur des fibres. Abdullah et al. , ont observé l'évolution de quelques caractéristiques physiques du mortier renforcé de fibres de coco en fonction de la

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

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

Dans ce même contexte, Taoukil et al, ont suivi l'évolution de la masse volumique et de l'absorption sur des bétons allégés de copeaux de bois et de sciure de bois (Taoukil et al, 2011). Ils en arrivent à établir que pour l'un ou l'autre des allègements utilisés, l'augmentation de la fraction de fibres fait chuter les densités et favorise la capacité de captation et de fixation de l'eau par le composite.

**BANI**, en faisant l'étude des caractéristiques physiques de ces matériaux laisse entrevoir une nette variation du taux d'humidité, de la masse volumique et du taux d'absorption à différent âge. On remarque une diminution du taux d'humidité et de la masse volumique de 7jours à 28jours d'âges. Cette recherche montre que le composite gousse de mil-ciment reste le moins absorbant et plus dense. Ce qui montre que la présence des fibres et du sable a permis d'avoir plus de vide dans le matériau ce qui le rend moins dense et très absorbant. Les tableaux suivants présentent ces résultats.

Tableau 1-3 : Caractéristiques physiques des composites a 7jours d'âges.

Nomenclature	FORMULATION				RESULTATS PHYSIQUES		
	DOSAGE (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{C}{G}$	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{G}$	Taux d'humidité (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
<b>MGC-D350-E0, 25</b>	350	4,6	0,25		15,16±0,51	1,457±0,14	33,40±1,24
<b>MGCS-D250-E0, 43</b>	250	1,6	0,43	2,5	7,29±0,26	1,340±0,08	37,98±1,32

Tableau 1-4 : Caractéristique physique des composites a 14 jours d'âges.

Nomenclature	FORMULATION				RESULTATS PHYSIQUES		
	DOSAGE (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{C}{G}$	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{G}$	Taux d'humidité (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
<b>MGC-D350-E0,25</b>	350	4,6	0,25		12,74±0,58	1,426±0,08	37,69±0,61
<b>MGCS-D250-E0,43</b>	250	1,6	0,43	2,5	6,56±0,24	1,324±0,04	41,46±0,72

Tableau 1-5 : Caractéristique physique des composites a 28 jours d'âges.

Nomenclature	FORMULATION				RESULTATS PHYSIQUES		
	DOSAGE (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{C}{G}$	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{G}$	Taux d'humidité (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
<b>MGC-D350-E0,25</b>	350	4,6	0,25		10,32±0,34	1,406±0,06	39,78±0,60
<b>MGCS-D250-E0,43</b>	250	1,6	0,43	2,5	7,40±0,27	1,316±0,04	42,86±0,62

L'auteur montre également que la résistance des mélanges en fonctions de l'âge et de la sollicitation. A 14 jours le composite ciment sable-gousse de mil offre une résistance en traction élevée qui chute considérable à 28jours d'âge et une faible résistance en compression qui dégringole en fonction de l'âge. Par contre, le mélange ciment-gousse de mil offre une faible résistance en traction et une bonne résistance en compression qui s'accroît avec l'âge. (BANI, 2016) C'est ce que présentent les tableaux ci-après.

Tableau 1-6 : Caractéristiques mécanique des composites a 14 jours d'âge

Nomenclature	FORMULATION				Caractéristiques mécaniques		
	DOSAGE (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{C}{G}$	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{G}$	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance en traction (Mpa)	Résistance en compression (Mpa)
<b>MGC-D350-E0,25</b>	350	4,6	0,25		1,426±0,08	3,13±0.78	2,33±0.22
<b>MGCS-D250-E0,43</b>	250	1,6	0,43	2,5	1,324±0,04	6.18±0.82	2,16±0.14

Tableau 1-7 : Caractéristiques mécanique des composites a 28 jours d'âge

Nomenclature	FORMULATION				Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Caractéristiques mécaniques	
	DOSAGE (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{C}{G}$	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{G}$		Résistance en traction (Mpa)	Résistance en compression (Mpa)
<b>MGC-D350-E0,25</b>	350	4,6	0,25		1,406±0,06	3,75±0.53	3,06±0.43
<b>MGCS-D250-E0,43</b>	250	1,6	0,43	2,5	1,316±0,04	4,5±0.26	1,625±0.23

Les résultats obtenus avec le mélange de ciment sable – gousse de mil confirme ceux de Mougel et Neville. Selon, Mougel et al., l’incorporation de sable pouvait réduire le nombre de microfissures engendrées lors du retrait, tout en améliorant les performances mécaniques des composites. En fait, l’incorporation de granulats possédant un module d’élasticité supérieur à celui de la pâte de ciment, limite la propagation des microfissures et améliore la stabilité dimensionnelle (Mougel & Neville, 1981) .

**Geoffrey Haddou** ayant travaillé sur la structure et les propriétés physiques de composites à matrice biosourcée/fibres continues naturelles pour applications aéronautiques, a démontré que l’utilisation de fibres végétales comme renforts de matrices polymères est une voie prometteuse qui permet de réduire l’impact environnemental, tout en diminuant la masse. Une nouvelle matrice polyamide biosourcée synthétisée par Arkema – Polyamide méta-xylylène diamine 10 – a été utilisée pour cette étude. Une étude préliminaire de composites Polyamide 11/poudre de bambou a montré que l’introduction du renfort ne perturbait pas la structure physique de la matrice. De plus, l’optimisation des propriétés mécaniques s’effectue en l’absence d’agent de couplage.

Il a également fait une approximation des modules élastiques des composite à renfort continu et à renfort poudre, ce qui mis en évidence une rigidité 6,5 fois plus importante dans le cas du renfort continu. Cette augmentation significative du module élastique montre l’intérêt de renforcer le composite avec un renfort continu dans la direction de sollicitation. (Haddou, 2018)

**ALLEGUE et al.**, ont fait une caractérisation mécanique des composites polypropylènes renforcés de fibres de Posidonie à travers des essais de flexion 3 points. Ces composites ont été fabriqués en utilisant la méthode de moulage par injection. L'influence du taux de fibres sur les propriétés mécaniques du composite PP/Posidonie a été évalué et a montré que pour les différentes vitesses utilisées lors de l'essai de flexion (2, 10, 20 et 50mm/min), la contrainte maximale et l'allongement décroît avec l'augmentation du taux de fibres par contre ils ont observé une augmentation du module en flexion des composites. **(ALLEGUE, 2012)**

**Brian VEZEAU**, a caractérisé les propriétés mécaniques en flexion, en torsion, en traction et en résilience, en plus des propriétés physiques en vieillissement accéléré, en sollicitation thermique et les dimensions structurales. Les résultats montrent qu'indépendamment du type de sollicitation (traction, flexion ou torsion dynamique) la rigidité et la résistance des échantillons composites rotomoulés est moindre que ceux obtenus en moulage par compression. Néanmoins, la résistance à l'impact des échantillons rotomoulés est comparable à celle obtenue en moulage compression. En vieillissement accéléré, les échantillons composites ont subi un changement de couleur qui dépend de la teneur en bois et de la qualité de la surface. La clarté augmente avec le temps de vieillissement et les échantillons jaunissent dans les premières heures, puis évoluent vers le bleu. **(VEZEAU, 2010)**

**CHAPITRE II :  
MATERIAUX, MATERIEL ET  
METHODES EXPERIMENTALES**

## CHAPITRE II : MATERIAUX, MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES

### 2.1. MATERIAUX

#### 2.1.1. Les gousses de mil et les balles de riz

Les gousses de mil utilisées dans notre étude proviennent des champs de la commune de Sinendé située au Nord du Bénin (Photo 2.1). Les balles de riz quant à eux proviennent de N'dali toujours dans le nord du Benin (Photo 2.2). Ces matériaux sont tamisés dans le but de procéder à une séparation en plusieurs classes granulaires.



Photo 2-1 : Gousses de mil écrasées



Photo 2-2 : Balles de riz écrasé

#### 2.1.2. Le polystyrène expansé

Le polystyrène expansé est un polymère très utilisé essentiellement dans l'emballage d'objet fragile, et dont la masse volumique est variable.



Photo 2-3 : Le polystyrène expansé



Photo 2-4 : Le polystyrène coupé en de petits morceaux

### Points d'approvisionnement du polystyrène

Les polystyrènes utilisés pour nos travaux sont collectés :

- Près des vendeurs grossistes des appareils électroménagers à Calavi,

Cotonou et environs ;

- Dans les magasins des motos ;

Pour être utilisé, ils doivent être nettoyés pour éviter l'insertion d'autres matières inconnues et non maîtrisées.

#### 2.1.3. Le solvant

En ce qui concerne le solvant utilisé, il s'agit de l'hydrocarbure (essence) dans lequel se dissout le polystyrène expansé. Il est disponible en bonne qualité dans presque toutes les stations du pays et au bord des voies.



Photo 2-5 : Essence

## 2.2. MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES

Cette partie a pour but de définir la démarche expérimentale et les caractéristiques des matériaux employés dans notre étude. Pour cela, on définira les caractéristiques des différents produits (fibre, polystyrène) afin d'étudier leurs effets sur les propriétés des produits obtenus.

### 2.2.1. Caractérisation des différents constituants du composite : les gousses de mil et les balles de riz

Les matériaux (gousse de mil et balle de riz) ont été soumis aux différents essais suivants :

### 2.2.1.1. Analyse granulométrique sur les gousses de mil et balles de riz

L'analyse granulométrique conformément à la norme « (NF P 94-056) » permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm et supérieure à 0,08 mm à l'exclusion des fillers. Le matériau doit être séché à l'étuve jusqu'à masse constante avec une température maximale de 105°C.

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

- **Appareillage**
  - une série normalisée de tamis du Système International. La série comprend les modules suivants : 38 – 35 – 32 – 29 – 26 – 23 – 20 correspondants respectivement aux tamis de diamètres en millimètres : 5 – 2,5 – 1,25 – 0,63 – 0,315 – 0,160 – 0,08.
  - une étuve avec thermostat ;
  - des balances de portées allant jusqu'à 30 kg ;
  - des plateaux ;
  - des brosses métalliques ;
  - un fond de tamis
- **Mode opératoire**
  - déterminer le diamètre D du plus gros élément ;
  - prélever une masse M d'échantillon telle que  $M=0,2D$  (M en kg et D en mm) ; en pratique on choisit M telle que  $0,2D \leq M \leq 0,6D$  ;
  - sécher le matériau à l'étuve avec une température maximale de 105°C ;
  - placer l'échantillon sur la passoire de plus grand diamètre ;
  - tenir le tamis d'une main, légèrement inclinée, et l'agiter de long en large en la frappant à chaque oscillation contre l'autre main à la cadence de 125 coups environ par minute.

- Tous les 25 coups environ tourner le tamis horizontalement d'un angle de  $90^\circ$  ; frapper quelques coups secs contre la monture au besoin pour faire sauter 2 ou 3 fois les gravillons avant de continuer l'agitation horizontal ;
- arrêter le tamisage lorsqu'aucun grain ne traverse plus le tamis pendant une période de 25 secousses ;
- recueillir le tamisât sur la passoire immédiatement inférieure et recommencer l'opération et ainsi de suite...
- peser les refus sur chaque tamis et le tamisât sur le fond ; on appelle refus sur un tamis le poids de matériau retenu sur ce tamis et tamisât le poids de matériau passant à travers le même tamis ; vérifier que la somme des poids obtenus (refus cumulés plus dernier tamisât) ne diffère de plus de 2% du poids initial de l'échantillon ;

#### 2.2.1.2. Détermination de la densité absolue (ou poids spécifique) des gousses de mil et balles de riz

L'essai permet de déterminer la densité absolue du matériau qui est le poids par unité de volume sans tenir compte des vides entre les granulats.

##### ▪ Matériels utilisés

- Une balance de précision 1 g ;
- une étuve ;
- un bocal.

##### ▪ Mode opératoire

- Sécher les fibres à l'étuve à une température de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante et les laisser refroidir à l'air libre ;
- peser le bocal vide. Soit  $m_1$  sa masse ;
- remplir ensuite le bocal d'eau et peser et ensuite vider. Soit  $m_2$  cette masse ;
- prélever une masse sèche  $m$  ( $m=70$  g) de fibres sèches et l'introduire dans le bocal ;
- compléter de l'eau jusqu'au remplissage du bocal et secouer suffisamment afin que l'eau puisse remplir toutes les pores de l'échantillon ;

- peser l'ensemble bocal + eau + échantillon ; soit  $m_3$  cette masse.

- **Résultat attendu**

La masse volumique pour une prise d'essai est donnée par la formule :

$$\rho_R = \frac{m}{m_2 - m_3 + m}$$

### 2.2.1.3. Détermination de la densité apparente

Le but est de déterminer le poids par unité de volume du matériau non tassé c'est-à-dire y compris les vides entre les grains.

- **Principe**

L'essai consiste à peser la masse de matériau pouvant occuper un volume connu.

- **Matériels utilisés**

- un container ;
- une plaque de verre ;
- une balance ;
- une règle.
- 

- **Mode opératoire**

- remplir le container de matériau ;
- araser avec une règle et couvrir avec une plaque de verre ; · déterminer le poids  $P_1$  de matériau + plaque + container ;
- remplir ensuite le container d'eau et peser avec la plaque, soit  $P_2$  ;
- peser le container vide + plaque, soit  $P_0$ .

- **Résultat attendu**

La densité apparente est déterminée par la relation :

$$\text{Densité apparente} = \frac{\text{Masse d'agrégat}}{\text{Masse d'eau}} = \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0}$$

#### 2.2.1.4. Détermination de la teneur en eau

L'essai consiste à déterminer la quantité d'eau que ce matériau contient par unité de volume.

- **Matériels utilisés**

- Des bocaux ;
- une étuve ;
- une balance électronique.

- **Mode opératoire**

- deux échantillons de particules de gousses de mil et de balle de riz de chaque composition granulométrique seront prélevées puis pesées ; soit  $m_1$  cette masse ;
- les échantillons seront ensuite mis à l'étuve à une température de 105°C et pendant une durée de 24h puis pesés à nouveau; soit  $m_2$  cette masse ;

- **Résultat attendu**

La teneur en eau est calculée par la relation :

$$T = \frac{m_1 - m_2}{m_2}$$

#### 2.2.2. Caractérisation des différents constituants du composite : Le polystyrène recyclé

##### 2.2.2.1. Détermination de la masse volumique

- **Matériel utilisé**

- Balance électronique

- **Mode opératoire**

- Peser le polystyrène à l'aide de la balance électronique. Soit  $m$
- Connaissant le volume  $V$  du polystyrène, la masse volumique est obtenue par la formule suivante :  $\rho = \frac{m}{V}$
-

### 2.2.2.2. Caractérisation de l'hydrocarbure (essence) : Détermination de la masse volumique

- **Principe**

L'essai consiste à remplir un bocal dont on connaît le volume, de l'eau et à déterminer la masse du contenu. Connaissant la masse et le volume, nous pouvons alors déterminer la masse volumique.

- **Matériels utilisés**

- des bocaux ;
- une balance électronique.

- **Mode opératoire**

- tarer un bocal de masse T ;
- remplir ce bocal d'eau à ras bord et on pèse l'ensemble. Soit  $m_{be}$  cette masse ;
- vider le bocal de son contenu ; remplir ce bocal vidé par l'essence puis peser l'ensemble. Soit  $m_{bc}$  cette masse ;

Le volume du bocal est :

$$V_b = \frac{m_{be} - T}{\rho_e}$$

la masse de l'essence est :

$$m = m_{bc} - T$$

La masse volumique de l'essence est donnée par :  $\rho = \frac{m}{V_b}$

### 2.2.3. Choix des compositions granulaires des mélanges

Nous avons choisi (04) classes granulaires à savoir les refus sur les tamis 1,25mm-0,630mm-0,315mm et 0,160mm pour reconstituer le mélange balles de riz-polystyrène.

Quant au mélange gousses de mil-polystyrène, (05) classes granulaires à savoir les refus sur les tamis 0,160mm-0,315mm-0,630mm-1,250mm-2,5mm ont été utilisés.

Les différents mélanges sont obtenus par reconstitution des fibres à partir des refus obtenus sur les différents tamis. Les pourcentages des différents refus dans un mélange sont choisis de manière à obtenir un type de mélange visé. Les différentes proportions sont présentées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2-1 : Proportions utilisées pour la constitution du mélange -balles de riz-polystyrène

	Mélange grossier	Mélange fin
Refus sur tamis 1,250mm	40%	10%
Refus sur tamis 0,630mm	30%	20%
Refus sur tamis 0,315mm	20%	30%
Refus sur tamis 0,160mm	10%	40%

Tableau 2-2 : Proportions utilisées pour la constitution du mélange gousses de mil-polystyrène

	Mélange grossier	Mélange fin
Refus sur tamis 2,50mm	35%	5%
Refus sur tamis 1,250mm	30%	10%
Refus sur tamis 0,630mm	20%	20%
Refus sur tamis 0,315mm	10%	30%
Refus sur tamis 0,160mm	5%	35%

#### 2.2.4. Formulation de la colle

La colle est le produit de la dissolution du polystyrène expansé dans l'essence. Après sa préparation, nous avons déterminé sa masse volumique.

##### 2.2.4.1. Préparation de la colle

La préparation consistera à faire dissoudre le polystyrène dans l'essence ; c'est-à-dire mettre le polystyrène dans l'essence puis malaxer jusqu'à obtenir la colle dans la proportion :

$$K = \frac{m_{essence}}{m_{polystyrène}}$$

Le rapport a été déterminé suite à plusieurs essais ; en effet, on a pesé une masse  $m$  d'essence donnée et fondu le polystyrène jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'essence tout en connaissant la masse de polystyrène fondu ; le rapport  $K$  trouvé est égal à **1,4**.

Par conséquent, lorsque le rapport est inférieur à 1,4 il y a manque d'essence pour pouvoir fondre le polystyrène et quand c'est supérieur à 1,4 il y a surplus d'essence.



Photo 2-6 : Aspect de la colle

#### 2.2.4.2. Détermination de la masse volumique

- **Principe**

Le principe de sa détermination consiste à remplir un bocal dont on connaît le volume de l'eau et à déterminer la masse du contenu. Connaissant la masse et le volume, nous pouvons alors déterminer la masse volumique.

- **Matériels utilisés**

- des bocaux ;
- une balance électronique.

- **Méthodologie**

- tarer un bocal de masse T ;
- remplir ce bocal d'eau à ras bord et on pèse l'ensemble. Soit  $M_{be}$  cette masse ;
- vider le bocal de son contenu ;
- remplir ce bocal vidé par la colle puis peser l'ensemble. Soit  $M_{bc}$  cette masse ;

le volume du bocal est :

$$V_{be} = \frac{M_{be} - T}{\rho_e}$$

la masse de la colle est :

$$M_c = M_{bc} - T$$

La masse volumique de la colle sera déterminée par l'expression :  $\rho_c = \frac{M_c}{V_c}$

### 2.2.4.3. Mesure de la viscosité dynamique

- **Matériels**

- Eprouvette graduée ;
- billes ;
- pieds à coulisses ; · chronomètre.

- **Méthodologie**

- Mettre la colle dans l'éprouvette graduée ;
- laisser tomber la bille dans l'éprouvette ;
- mesurer la durée  $\Delta t$  que la bille met pour parcourir une certaine distance connue

La viscosité dynamique  $\eta$  est proportionnelle à la durée du trajet soit :

$$\eta = C \cdot \Delta t$$

Où C est une constante qui dépend des propriétés de la bille :

$$C = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2}{L} (\rho_{bille} - \rho_{colle}) \cdot g$$

Où r est le rayon de la bille.



Photo 2-7 : Essai de viscosité sur la colle

La colle utilisée pour la confection des éprouvettes présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 2-3 : Caractéristiques de la colle

	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosité (Pa.s)
Colle	0,905	0,768

## 2.2.5. Formulation des mélanges balle de riz-Polystyrène et gousses de mil-polystyrène

### 2.2.5.1. Choix du dosage

Dans un premier temps, le dosage  $D=0,5$  a été utilisé mais nous avons remarqué que le matériau s'effrite. Puis après, nous avons augmenté le dosage  $D$  à  $0,8$  et à  $1$ . Les composites obtenus avec ces dosages ne s'effritent pas. Ce sont donc ces dosages qui ont été utilisés.

Dans la suite nous désignerons les différents composites par rapport au dosage avec la codification suivante :

Tableau 2-4 : Désignation des différents composites du mélange balles de riz-polystyrène

Code	Type de mélange	Dosage en colle $D$
<b>MG<sub>0,8</sub></b>	Grossier	0.8
<b>MF<sub>0,8</sub></b>	Fin	0.8
<b>MG<sub>1</sub></b>	Grossier	1
<b>MF<sub>1</sub></b>	Fin	1

### 2.2.5.2. Détermination des masses des différents constituants pour la confection des éprouvettes

Connaissant le poids spécifique des différents constituants du composite et le dosage, nous pouvons déterminer la masse nécessaire de chaque constituant pour avoir un volume donné du mélange.

Soit :

- $\rho_r$  : le poids spécifique du renfort ;
- $\rho_c$  : le poids spécifique de la colle ;
- $m_c$  : la masse de la colle ;

- $m_p$  : la masse de polystyrène ;
- $m_{es}$  : la masse d'essence ;
- $m_r$  : la masse du renfort ;
- $D$  : le dosage en colle de polystyrène.

Le volume absolu du mélange est :

$$V_{\text{abs mél}} = V_{\text{abs renfort}} + V_{\text{abs colle}}$$

$$V_{\text{abs mél}} = \frac{m_r}{\rho_r} + \frac{m_c}{\rho_c}$$

$$\text{Or } D = \frac{m_c}{m_r} \Rightarrow m_c = D \cdot m_r$$

$$V_{\text{abs mél}} = \frac{m_r}{\rho_r} + \frac{D \cdot m_r}{\rho_c}$$

$$\Rightarrow m_r = \frac{\rho_c \cdot \rho_r \cdot V_{\text{abs mél}}}{\rho_c + D \rho_r}$$

En connaissant la masse de la colle, on peut facilement déterminer les masses de polystyrène et d'essence :

$$m_c = m_p + m_{es}$$

$$\text{Or } K = \frac{m_{es}}{m_p} = 1,4 \Rightarrow m_{es} = 1,4 m_p$$

Ainsi  $m_c = 2,4 m_p$

$$m_p = \frac{D \cdot m_r}{2,4}$$

$$m_{es} = \frac{1,4}{2,4} \cdot D \cdot m_r$$

Le tableau 2.4 récapitule les formules permettant de déterminer les masses des différents constituants à utiliser pour pouvoir confectionner une plaque dont on connaît préalablement le volume.

Tableau 2-5 : Formules de détermination des masses des différents constituants pour la confection des plaques

Masse du renfort	Masse de polystyrène	Masse d'essence
$m_r = \frac{\rho_c \cdot \rho_r \cdot V_{\text{abs mél}}}{\rho_c + D \rho_r}$	$m_p = \frac{D \cdot m_r}{2,4}$	$m_{es} = \frac{1,4}{2,4} \cdot D \cdot m_r$

Tableau 2-6 : Masse des différents constituants pour la confection des plaques balles de riz-polystyrène

Mélanges	Masse du renfort (g)	Masse de l'essence (g)	Masse de polystyrène (g)
<b>MG<sub>0,8</sub></b>	1323.4	617.6	441.1
<b>MF<sub>0,8</sub></b>	1648.18	769.2	549.4
<b>MG<sub>1</sub></b>	1494.6	871.9	622.7
<b>MF<sub>1</sub></b>	1222.6	713.2	509.4

Tableau 2-7 : Masse des différents constituants pour la confection des plaques gosses de mil-polystyrène

Mélanges	Masse du renfort (g)	Masse d'essence (g)	Masse de polystyrène (g)
<b>MG<sub>0,8</sub></b>	1358	634	453
<b>MF<sub>0,8</sub></b>	1899	886	633
<b>MG<sub>1</sub></b>	1252	730	522
<b>MF<sub>1</sub></b>	1698	991	708

## 2.2.6. Confection des éprouvettes

### 2.2.6.1. Préparation des balles de riz

Après tamisage, les refus des différentes classes granulaires sont recueillis dans des sachets étiquetés comme le montre la photo 2.8 :



Photo 2-8 : Séparation des grains de balles de riz par classes granulaires

### 2.2.6.2. Malaxage

La procédure de malaxage est la suivante :

- Prélever une masse de gosses de mil et une masse de balles de riz dans un plateau ;
- Ajouter une masse de colle et malaxer les mélanges ;

- Continuer le malaxage jusqu'à ce que les gousses de mil et les balles de riz soient complètement imprégnés de la colle ;



Photo 2-9 : Mélange Balle de riz-colle



Photo 2-10 : Malaxage



Photo 2-11 : Mélange obtenu après malaxage



Photo 2-12 : Ajout d'une masse  $m_c$  colle



Photo 2-13 : Malaxage



Photo 2-14 : Masse  $m_g$  de gousses de mil

### 2.2.6.3. Fabrication des plaques

Les mélanges obtenus après malaxage sont étalés à l'air ambiant pour une consistance des matériaux. Ensuite on procède au moulage des composites. Le moule utilisé pour la confection des plaques a les dimensions suivantes : 571 mm de long, 138 mm de large et 45 mm de haut.

- l'intérieur des moules est d'abord enduit d'une couche d'huile pour faciliter le démoulage ;
- introduire le mélange dans le moule et s'assurer de l'uniformité de l'épaisseur initiale ;
- disposer le moule sur la presse manuelle pour compactage;

## Chapitre 2 : Matériaux, matériel et méthodes expérimentales

---

- exercer sur le moule à l'aide de la presse manuelle une force de valeur croissante jusqu'à ce qu'il ait des fuites de part et d'autres de la moule traduisant une compression maximale du matériau ;
- faire un maintien de chargement sous la presse pendant 10min avant de démouler ;



Photo 2-15 : Le moule et ses accessoires



Photo 2-16 : Moule rempli du mélange gosses de mil-polystyrène



Photo 2-17 : Moule rempli du mélange balles de riz-polystyrène



Photo 2-18 : Presse mécanique pour le compactage du mélange

#### 2.2.6.4. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont laissées dans la presse pendant 10min et ensuite démoulées et laissées à l'air ambiant du laboratoire. Elles sont pesées chaque 8h jusqu'à masse constante traduisant sa « maturation ».



Photo 2-19 : Composites obtenus

### 2.2.6.5. Usinage des plaques

Selon la norme ASTM D1037- 89 les plaques ont pour l'essai de flexion 3 points, les dimensions suivantes : épaisseur 11 mm, largeur 76 mm et longueur 314 mm. C'est pour cela que les plaques fabriquées sont usinées.



Photo 2-20 : Usinage des plaques

Après usinage, les dimensions réelles des plaques mesurées avec le pied à coulisse sont présentées dans le tableau 2.6.

Tableau 2-8 : Dimensions des plaques

	Composite balles de riz-polystyrène			Composite gousses de mil-polystyrène		
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
<b>MG<sub>0,8</sub></b>	314	76	12,5	314	76	11
<b>MF<sub>0,8</sub></b>	314	76	11	314	76	11
<b>MG<sub>1</sub></b>	314	76	10	314	76	11
<b>MF<sub>1</sub></b>	314	76	10,5	314	76	11

### 2.2.7. Essais de caractérisation physiques et mécaniques du composite

Les tests physiques et mécaniques seront réalisés selon la norme ASTM en vigueur. Les échantillons seront entreposés dans une chambre à environnement contrôlé à  $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et une humidité relative de  $50 \pm 5\%$ , au moins 40 heures avant les essais.

### 2.2.7.1. Essais physiques

#### - Stabilité dimensionnelle (absorption, gonflement dans les trois directions)

Le but est de déterminer la teneur en humidité, le gonflement dans les trois directions, le gonflement volumique et l'absorption d'eau du composite.

#### ▪ Principe

Selon la norme, le test consiste à submerger les échantillons dans de l'eau à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . À la fin du test, on attend 10 minutes pour le séchage de ces derniers. Puis, on les pèse et on mesure leurs longueurs, leurs largeurs et leurs hauteurs.

#### ▪ Matériels

- Bac d'eau ;
- Balance électronique ;
- Pied à coulisse ;
- Etuve.

#### ▪ Méthodologie

- Mettre les éprouvettes dans l'eau ; nous mesurerons les propriétés suite à un temps d'immersion de 24h;
- laisser sécher pendant 10 minutes et peser ;
- mesurer la largeur (l) et l'épaisseur (e) à cinq différents points (notés de 1 à 5) et la longueur (L) à deux différents points (notés A et B) en respectant un même espacement entre les points (Photo 2.17).



Photo 2-21 : Mesure du gonflement

A partir de ces données, on peut déterminer la teneur en humidité, le gonflement dans les trois directions, le gonflement volumique, l'absorption d'eau et la densité.

- **Teneur en eau**

La teneur en eau d'un composite est la quantité d'eau contenue dans celui-ci. Elle est généralement exprimée selon la formule :

$$W\% = \frac{M_{eau}}{M_i} * 100$$

$$W\% = \frac{M_i - M_0}{M_0} * 100$$

W% : Teneur en eau

M<sub>0</sub> : Masse de l'éprouvette anhydre (obtenue après 24h de séchage dans l'étuve à 105°C)

M<sub>i</sub> : Masse de l'éprouvette due à la teneur en humidité.

- **Gonflement**

Le gonflement dû à l'humidité est obtenu par la relation suivante :

$$\text{Gonflement (\%)} = \frac{\text{Augmentation de dimension}}{\text{Dimension initiale}} * 100$$

Le gonflement de nos composites sera calculé en longueur, en largeur et en épaisseur, ainsi que le gonflement volumique.

- **L'absorption d'eau**

L'absorption d'eau à une teneur en humidité est donnée par la formule suivante :

$$A(\%) = \frac{M_{eau}}{M_i} * 100$$

$$A(\%) = \frac{M_h - M_i}{M_i} * 100$$

A : Absorption

M<sub>eau</sub> : Masse de l'eau

M<sub>i</sub> : Masse du composite à l'état initial

M<sub>h</sub> : Masse du composite dû à la teneur en humidité

- **Densité**

La densité est une propriété physique très importante pour les matériaux composites. Il existe en effet, une étroite corrélation entre la majorité des propriétés physico-mécaniques, d'une part et la densité et la masse volumique d'autre part. La résistance et la rigidité du matériau composite augmentent généralement en fonction de la densité. Elle est définie comme le rapport de la masse d'un corps à la masse d'un même volume d'eau.

$$D_0 = \frac{M_0}{V_0 * m_e}$$

D<sub>0</sub> : Densité anhydre

M<sub>0</sub> : Masse du composite à l'état anhydre obtenue en séchant l'échantillon à 105°C pendant 24 heures.

V<sub>0</sub> : Volume du composite à l'état anhydre m<sub>e</sub> : Masse volumique de l'eau = 1g/ cm<sup>3</sup> à 4°C

$$D_h = \frac{M_0}{V_h * m_e}$$

D<sub>h</sub> : Densité humide

M<sub>0</sub> : Masse du composite à l'état anhydre

V<sub>h</sub> : Volume du composite à une teneur en humidité

m<sub>e</sub> : Masse volumique de l'eau = 1g/ cm<sup>3</sup> à 4°C

**2.2.7.2. Essais mécaniques**

- **Essai de flexion trois points sur les plaques**

L'essai de flexion trois points, selon la norme ASTM D1037-89, sert à déterminer le module d'élasticité (MOE) et la contrainte à la rupture (MOR) en flexion statique d'un panneau composite.

Les échantillons sont conditionnés et leurs dimensions sont les suivantes : épaisseur 11 mm, largeur 76 mm et longueur 314 mm.

▪ **Matériels utilisés**

- Dispositif d'essai de flexion ;
- masses ;

- comparateur de déplacement.
- **Mode opératoire**
  - Après démoulage, les échantillons seront entreposés dans une chambre à environnement contrôlé à  $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et une humidité relative de  $50 \pm 5\%$ , au moins 40 heures avant les essais ;
  - au jour prévu, soumettre les éprouvettes à la flexion en prenant 264mm comme distance entre les appuis selon la norme ASTM D1037-89 ;
  - lire le comparateur de déplacement avant l'application de la charge et le lire après application de la charge ; · répéter le cycle trois (3) fois.

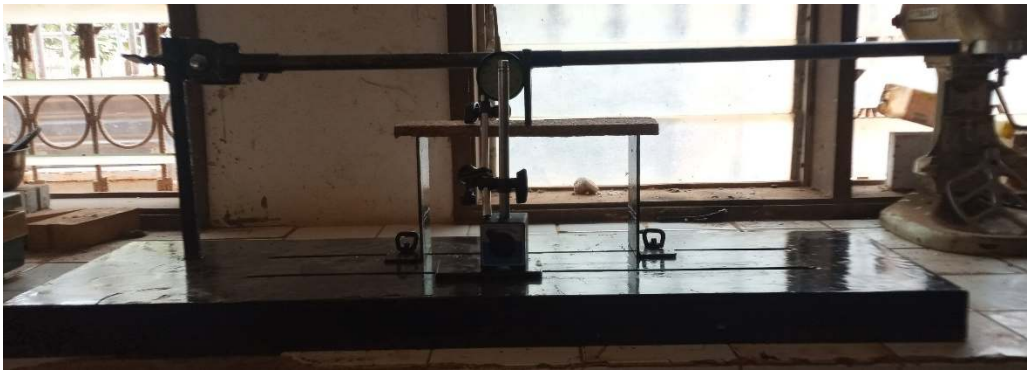


Photo 2-22 : Dispositif d'essai de flexion

▪ **Schéma statique du dispositif**

Le schéma statique du système se présente comme suit :

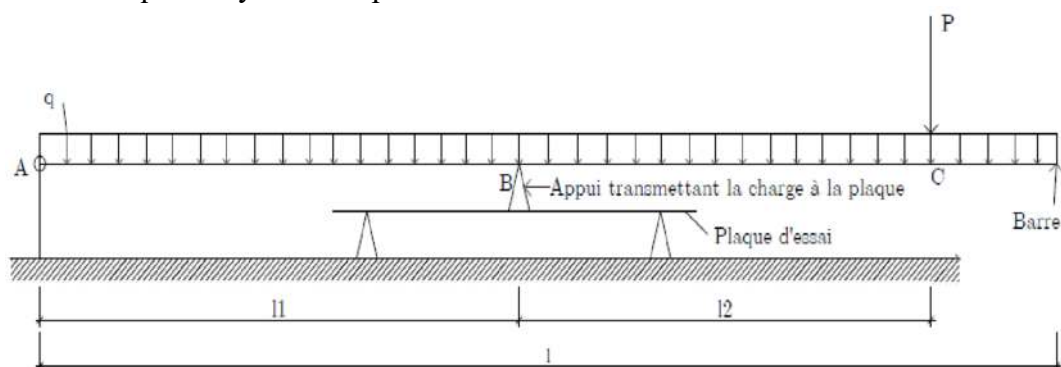


Figure 2-1 : Schéma statique du système

$q$  : est le poids linéaire de la barre ;

$l$  : est la longueur de la barre ;

$l_1$  : est la position de l'appui par rapport au point A ;

$l_2$  : la position du point d'application de la charge par rapport à l'appui ;

$l_1$  et  $l_2$  : sont toutes variables ;

Notons par  $C_M$  la charge morte ; c'est-à-dire la charge que le système transmet à la plaque sans aucune charge extérieure ;  $F$  la charge totale transmise à la plaque ;

La force  $F$  qui s'applique sur la plaque est égale à la somme de la réaction en B et du poids de l'appui.

- Détermination de la réaction  $R_B$  en B et de la force  $F$

$$\begin{aligned}\sum Fy &= 0 \Rightarrow RA + RB = q.l + P \\ \sum AM &= 0 \Rightarrow RB.l_1 - P(l_1 + l_2) - \frac{ql^2}{2} = 0 \\ \Rightarrow RB &= \frac{ql^2}{2l_1} + P\left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)\end{aligned}$$

La charge morte est :  $CM = \frac{ql^2}{2l_1}$

Soit  $P_a$  le poids de l'appui en B :

$$F = RB + Pa$$

- Détermination de la rigidité à la flexion  $K$

$$K = \frac{F}{\Delta f} \text{ avec } \Delta f = |Y_{mi} - Y_0|$$

$F$  : Charge quelconque

$\Delta f$  : Variation de la flèche du fait de l'application de la charge  $F$

$Y_0$  : lecture du comparateur avant la charge.

$Y_{mi}$  : lecture du comparateur sous la charge  $F$

- Calcul du module d'élasticité  $E$

$$E = \frac{1}{4b} \cdot \left(\frac{L}{e}\right)^3 \cdot \frac{F}{\Delta f} = \frac{1}{4b} \cdot \left(\frac{L}{e}\right)^3 \cdot K$$

- Calcul du module de rupture

$$MOR = \frac{3L}{2be^2} \cdot F_R \quad (*)$$

$F$  : Charge quelconque

$F_R$  : Charge à la rupture

$L$  : Distance entre appuis ;

$b$  : Largeur de l'échantillon ;

$e$  : Épaisseur de l'échantillon

**CHAPITRE III :  
RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### CHAPITRE III : ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus suite aux essais réalisés sur les matériaux et les composites.

#### 3.1. RESULTATS DES ESSAIS SUR LES MATERIAUX

##### 3.1.1. Analyse granulométrique sur les gousses de mil :

Détermination de la masse à prendre après passage à l'étuve

Matériau : gousses de mil

Température : ambiante

Diamètre maximale :  $D_{max} = 5 \text{ mm}$

$200D < M < 600D$  donc  $200 \times 5 < M < 600 \times 5$  ;

Soit  $1000g < M < 3000g$

Retenons  $M = 1300g$

Masse initiale sèche : 1300g

Les résultats sont consignés dans le tableau 3.1 ci-après :

Tableau 3-1 : Résultats de l'analyse granulométrique sur les gousses de mil

Modules	Ouverture des tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	%refus cumulés	%passant cumulés
<b>38</b>	5	0	0	0	100
<b>35</b>	2.5	181	181	13.92	86.08
<b>32</b>	1.25	630	811	62.38	37.62
<b>29</b>	0.63	312	1123	86.38	13.62
<b>26</b>	0.315	108	1231	94.69	5.31
<b>23</b>	0.160	50	1281	98.54	1.46
<b>20</b>	0.080	10	1291	99.31	0.69
<b>Fond tamis</b>	Plat	06	1297	99.77	0.23

**Perte = 0,23 % < 2 %** donc l'essai est acceptable

- **Courbe granulométrique**

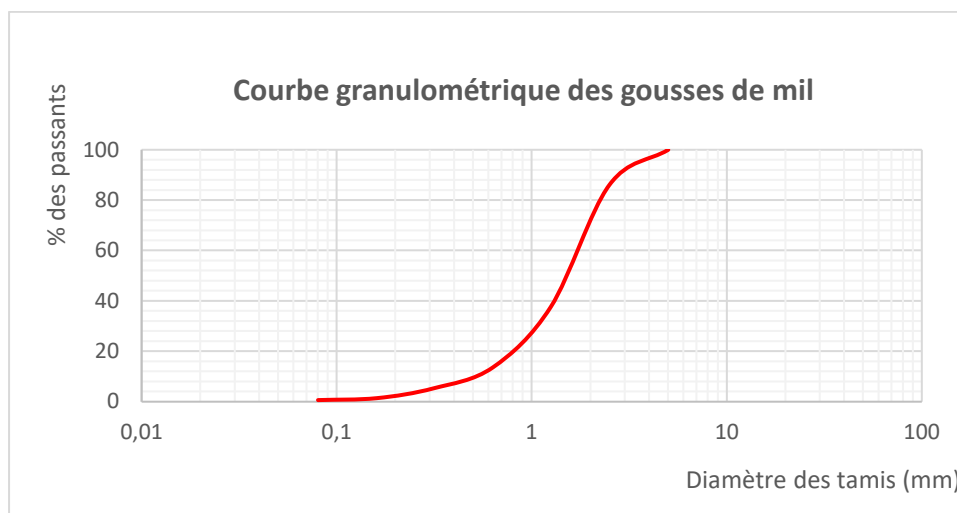


Figure 3-1 : Courbe de l'analyse granulométrique des gousses de mil

**3.1.2. Analyse granulométrique sur les balles de riz**

Détermination de la masse à prendre après passage à l'étuve

Matériau : Balle de riz

Température : ambiante

Diamètre maximale :  $D_{max} = 2,5$  mm

$200D < M < 600D$  donc  $200 \times 2,5 < M < 600 \times 2,5$  ;

Soit  $500g < M < 1500g$

Retenons  $M=850g$

Masse initiale sèche :  $M=850g$

Les résultats sont consignés dans le tableau 3.2 ci-après :

Tableau 3-2 : Résultats de l'analyse granulométrique sur les balles de riz

Modules	Ouverture des tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	%refus cumulés	%passant cumulés
<b>38</b>	5	0	0	0	100
<b>35</b>	2.5	0	0	0	100
<b>32</b>	1.25	40	40	4,71	95,29
<b>29</b>	0.63	369	409	48,12	51,88
<b>26</b>	0.315	223	632	74,35	25,65
<b>23</b>	0.160	114	746	87,76	12,24
<b>0</b>	0.080	51	797	93,76	6,24
<b>Fond tamis</b>	Plat	50	847	99,65	0,35

- **Courbe granulométrique**

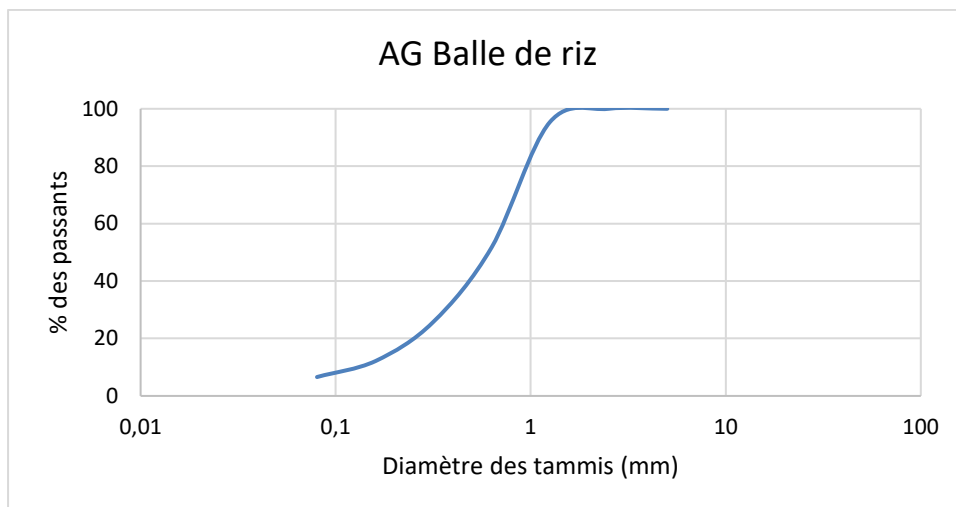


Figure 3-2 : Courbe de l'analyse granulométrique des balles de riz

**3.1.3. Masse volumique du polystyrène et de l'essence :**

Les masses volumiques du polystyrène et de l'essence utilisées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3-3 : Masse volumique du polystyrène et de l'essence

Matériaux	Polystyrène	Essence
<b>Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,015 – 0,023	0,905

**3.2. CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES COMPOSITES**

**3.2.1. Gonflements dans les trois directions**

Les figures 3.3 et 3.4 présentent les résultats du gonflement des différentes plaques après immersion dans l'eau pendant 24h.

**Composite balles de riz-polystyrène**

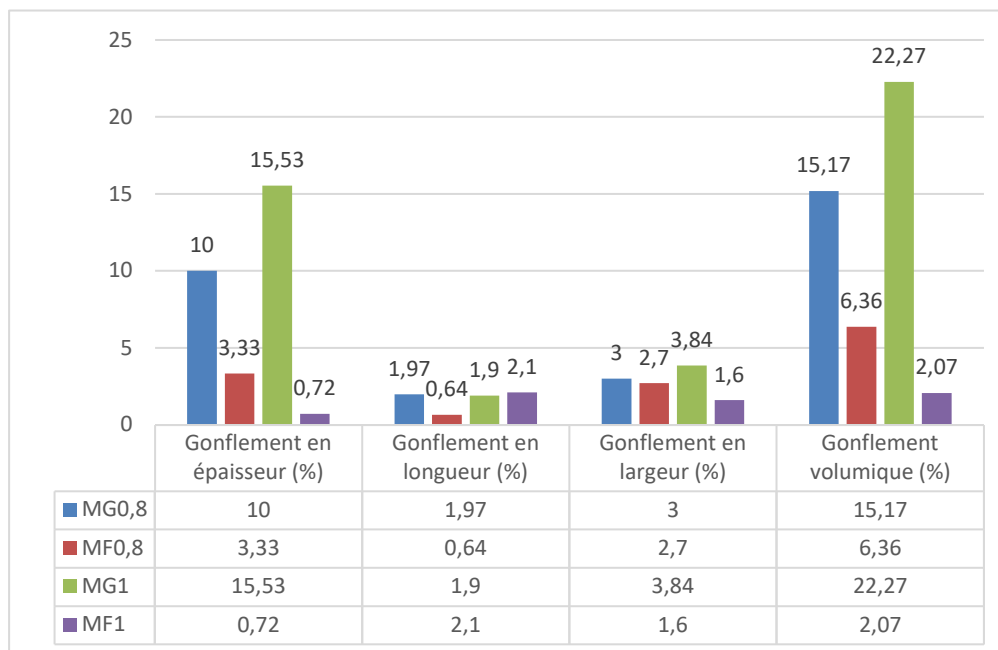


Figure 3-3: Mesure du gonflement dans les trois directions du composite balles de riz-polystyrène

**Composite gousses de mil-polystyrène**

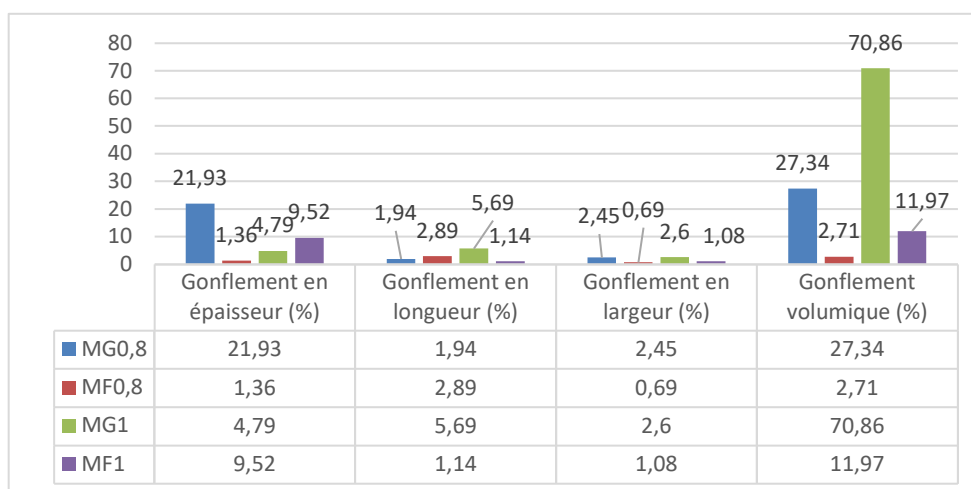


Figure 3-4: Mesure du gonflement dans les trois directions du composite gousses de mil-polystyrène

### 3.2.2. Absorption d'eau

Les résultats obtenus après les essais d'absorption d'eau sont présentés sur les figures 3.5 et 3.6

#### Composite balles de riz-polystyrène

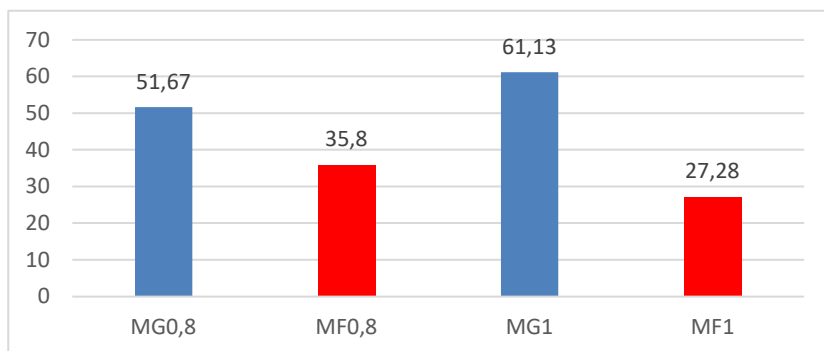


Figure 3-5: Absorption d'eau en % du composite balles de riz-

#### Composite gousses de mil-polystyrène

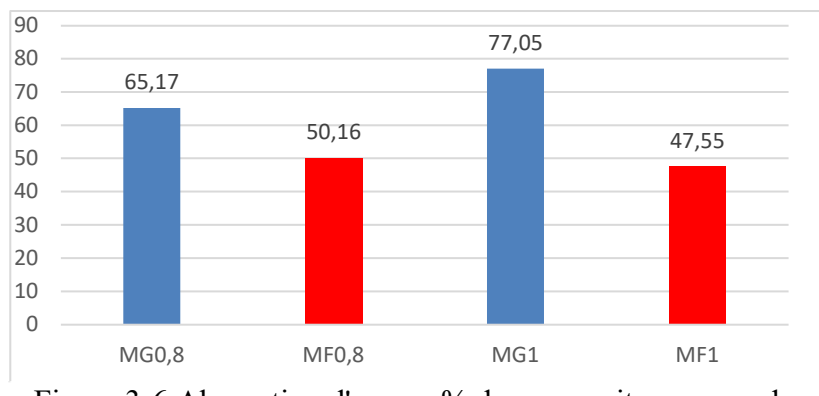


Figure 3-6: Absorption d'eau en % du composite gousses de mil-polystyrène

**3.2.3. Densité**

$$D = \frac{m_0}{V_h * m_e}$$

**m<sub>0</sub>** : masse anhydre obtenu après 24h à l'étuve (en g)

**V<sub>h</sub>**: volume du composite a une teneur en eau humide (en cm<sup>3</sup>)

**m<sub>e</sub>** : masse volumique de l'eau = 1g/cm<sup>3</sup> a 4 degré C

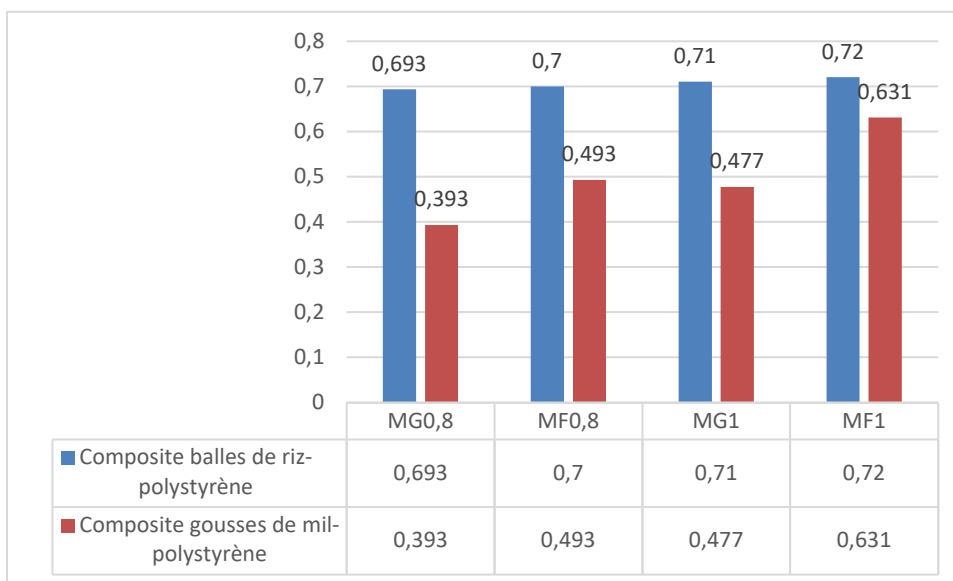


Figure 3-7:Densité humide sur les différents composites

**3.2.4. Comparaison des propriétés physiques des deux composites**

▪ **Gonflement dans les trois directions**

De l'analyse des résultats des mélanges fins des différents composites, on constate que le gonflement des composites balles de riz-polystyrène de dosage 0,8 est supérieur à celui des composites gousses de mil-polystyrène de dosage 0,8. Par contre les composites gousses de mil-polystyrène de dosage 1 ont un gonflement volumique supérieur aux composites balles de riz-polystyrène de dosage 1. Pour les mélanges grossiers, les composites gousses de mil-polystyrène présentent un gonflement supérieur aux composites balles de riz-polystyrène. Ces constatations sont dues à la teneur en renfort entrant dans la réalisation des composites.

▪ **Absorption d'eau**

De l'analyse des résultats d'absorption d'eau, il ressort que les composites gosses de mil-polystyrène ont un pouvoir hydrophile plus important que les composites balles de riz-polystyrène. Cela s'explique par le fait que la capacité d'absorption d'un composite dépend fondamentalement de celle de ses composants, ce qui confirme le caractère très hygroscopique des gosses de mil.

▪ **Densité**

Les composites balles de riz-polystyrène sont plus denses que les composites gosses de mil-polystyrène. Ces constatations sont dues à la teneur en colle entrant dans la réalisation des composites.

▪ **Caractère léger des composites gosses de mille- polystyrène et balles de riz polystyrène**

	masse volumique (en kg.m <sup>-3</sup> )	densité	caractère des bois		masse volumique (en kg.m <sup>-3</sup> )	densité	caractère des bois
feuillus				résineux			
peuplier tremble okoumé cèdre	~ 400 ~ 500	0,4 0,5	très légers	balsa pin Weymouth	~ 100 < 400	0,1 0,4	très légers
bouleau orme frêne noyer châtaignier	~ 600 ~ 650	0,6 0,65	légers	sapin épicéa pin	~ 500	0,5	légers
acajou	~ 750	0,75	mi-lourd	pin sylvestre pin maritime pin du Nord	~ 600	0,6	mi-lourds
chêne hêtre frêne fruitiers teck	~ 850	0,85	mi-lourds	pin laricio cèdre rouge cyprés	~ 800	0,8	lourds
charme buis olivier	~ 1 000	1	lourds	pitchpin if	~ 1 000	1	très lourds
palissandre azobé ébènes	~ 1 100 ~ 1 200 ~ 1 400	1,1 1,2 1,4	très lourds				

Figure 3-8 : Densité de différents bois

**Source :** Encyclopedia Universalis France

Les matériaux de notre étude s'apparentent au matériau bois. Une comparaison de leurs densités, nous permet de constater qu'on peut classer les composites balles de riz-Polystyrène et gousses de mil-polystyrène dans la catégorie des matériaux légers.

### 3.2.5. Caractérisation des propriétés mécaniques des composites

#### 3.2.5.1. Détermination du module d'élasticité et de rupture des plaques

La détermination du module d'élasticité  $E$ , la rigidité  $K$ , s'est faite à l'aide des courbes des forces en fonction des flèches (Fig 3.8 à Fig 3.15). De ces courbes nous avons identifiés les zones élastiques et avons calculés les modules de Young et les rigidités dans ces zones à l'aide des formules de la norme ASTM D1037-89.

Pour la détermination du module de rupture, nous avons utilisés la formule (\*) de Andréa Stanojlovic Davidovic (2006).

Le tableau suivant présente les modules d'élasticité et de rupture des différentes éprouvettes :

Tableau 3-4 : Module d'élasticité et de rupture en flexion des plaques balles de riz-polystyrène

Eprouvette	F(N)	l(mm)	b(mm)	e(mm)	MOR(MPa)	K	MOE(MPa)
MF1	71,28	264	76	11	3.06	5.04±1	223.41±20
MG1	66,76	264	74	12	2.41	21.73±2	942.01±10
MG2	84,84	264	78	13	2.61	33.96±4	1497.92±30
MF2	66,76	264	76	10	3.47	13.63±3	529.14±15

$\Delta f$ : la flèche ; F : la charge ; K: la rigidité ; MOE : module d'élasticité ; MOR : module de rupture ;

Tableau 3-5 : Module d'élasticité et de rupture en flexion des plaques gousses de mil-polystyrène

Composites	K (N/mm)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
<b>MG<sub>0,8</sub></b>	-	-	0,84
<b>MF<sub>0,8</sub></b>	22,79±3,12	1019±177,13	1,23
<b>MG<sub>1</sub></b>	14,05±1,53	623±67,18	2,01
<b>MF<sub>1</sub></b>	29,62±2,91	1313±183,14	3,85

### 3.2.5.2. Comparaison des propriétés mécaniques des deux composites

L'analyse des résistances mécaniques montre que les résistances en flexion trois points enregistrées sur les composites balles de riz-polystyrène sont supérieures à celles enregistrées sur les composites gousses de mil-polystyrène. On peut donc retenir que comparativement aux composites gousses de mil-polystyrène, les composites balles de riz-polystyrène résistent mieux en flexion trois points.

### 3.2.6. Déformation des plaques sous une charge constante en fonction du temps

Une fois la charge appliquée, nous remarquons que le composite se déforme continuellement et se stabilise à la fin. Dans le but de relever la déformation à un instant  $t$  quelconque, nous avons fait un enregistrement vidéo de la variation de la flèche en fonction. Une fois la vidéo terminée, on la déroule en appuyant à chaque fois sur pause pour lire la flèche à cet instant  $t$ .

→ Composite balles de riz-polystyrène

Les courbes ci-après montrent la variation de la flèche en fonction du temps des différents composites :

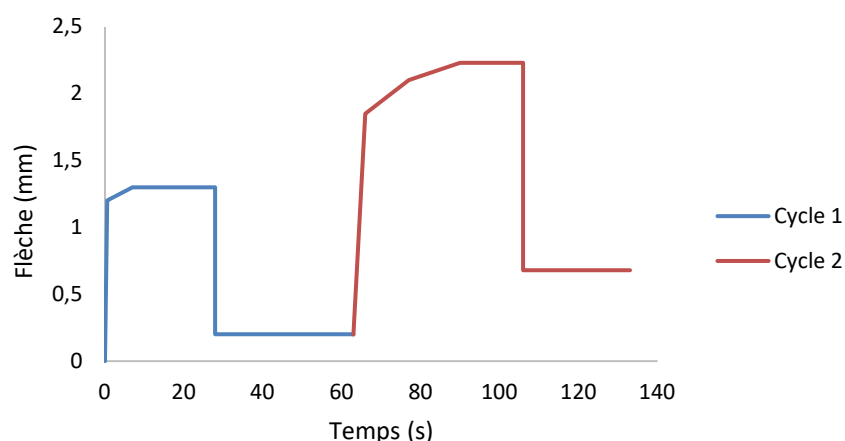


Figure 3-9 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette  $MG_{0,8}$

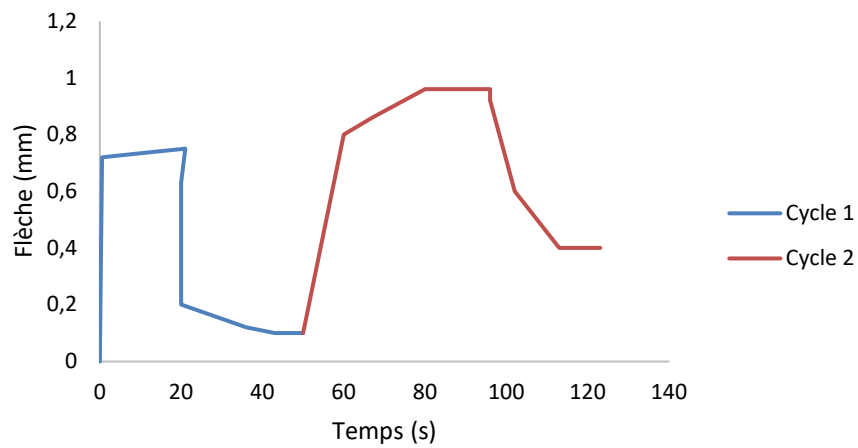


Figure 3-10 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette MF<sub>0,8</sub>

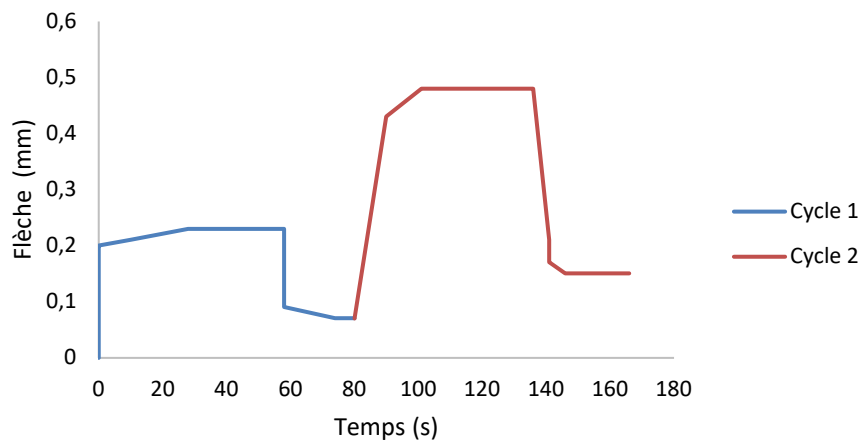


Figure 3-11 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette MG<sub>1</sub>

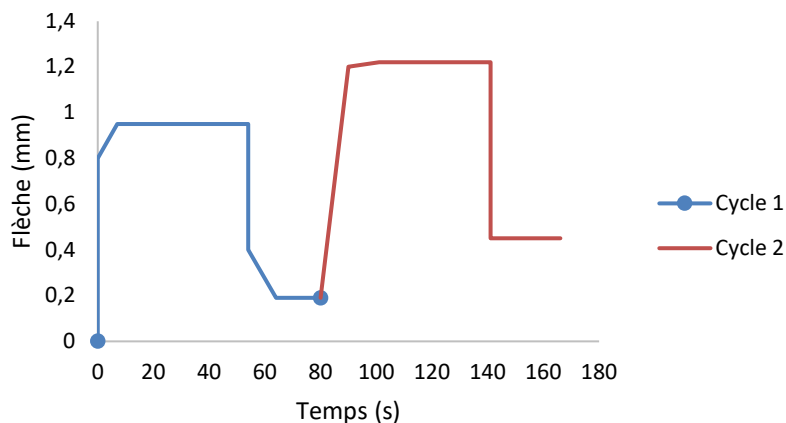


Figure 3-12 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette MF<sub>1</sub>

→ Composite gousses de mil-polystyrène

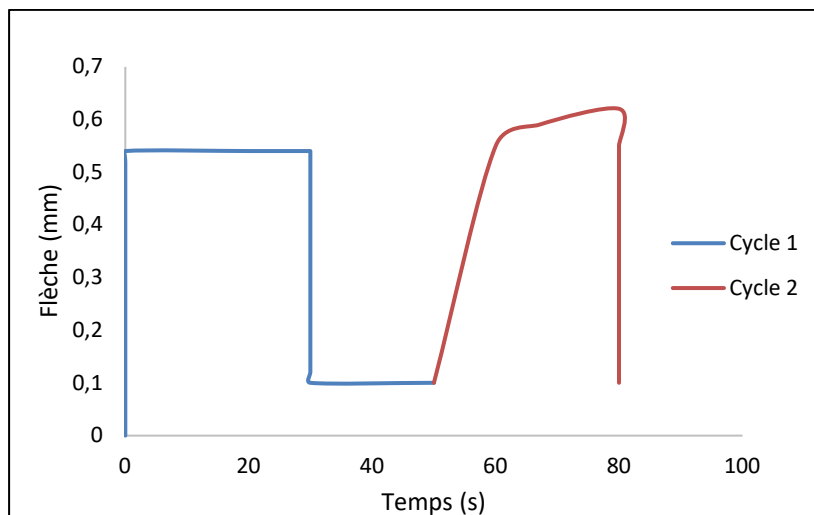


Figure 3-13 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette MG<sub>0,8</sub>

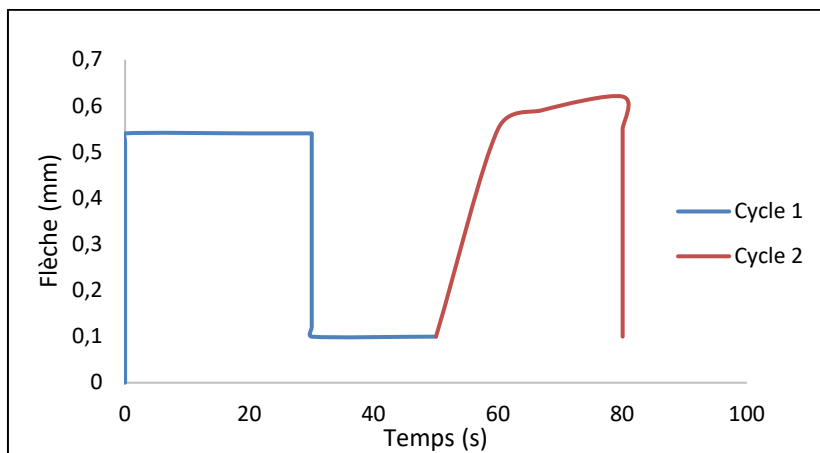


Figure 3-14 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette MF<sub>0,8</sub>

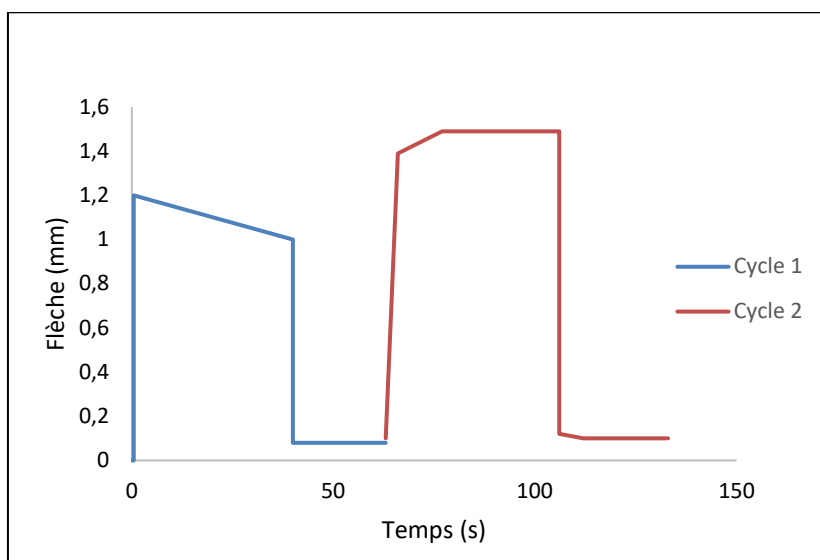


Figure 3-15 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette MG<sub>1</sub>

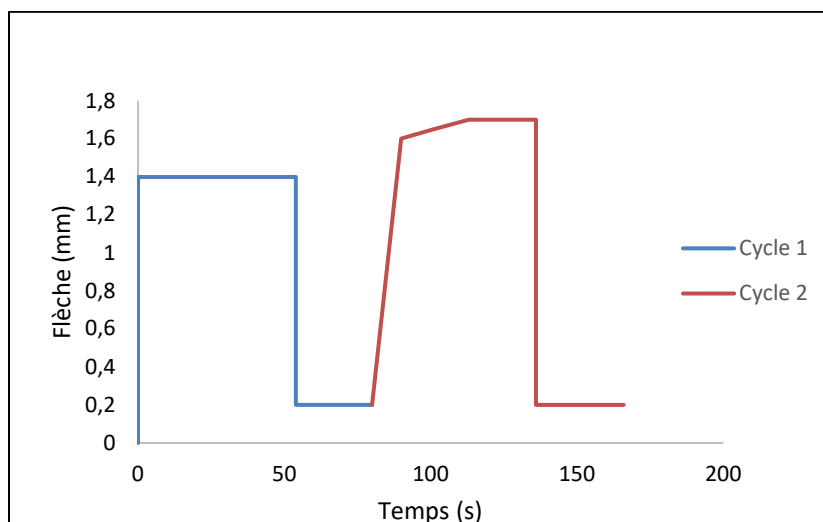


Figure 3-16 : Courbe de variation de la flèche en fonction du temps sous l'action d'une charge constante de l'éprouvette MF<sub>1</sub>

Les figures (Fig 3.8 à Fig 3.15) nous montrent que l'allure est pratiquement la même pour les différents composites. La granulométrie n'a donc pas d'influence sur la déformation des plaques en fonction du temps. On remarque néanmoins deux parties pour chaque chargement-déchargement :

- Une première partie quasiment verticale due au fait qu'au début du chargement, on observe une brusque variation de la flèche en une fraction de secondes ;
- Une deuxième partie de la courbe où la flèche tend vers sa valeur limite donc à se stabiliser. Ce qui se traduit par une très faible variation de la flèche dans cette zone.

### 3.2.7. Comportement mécanique des plaques sous l'effet de la variation de la charge (Deux cycles de chargement-déchargement sans rupture)

La méthode utilisée consiste à augmenter la charge s'appliquant sur la plaque en déplaçant la masse suivant les différents points de la barre jusqu'au dernier point. Ensuite, il faut décharger progressivement la plaque en déplaçant la masse dans le sens inverse suivant les mêmes points. Le cycle est répété deux (02) fois.

Aucun comportement n'a été effectif au niveau des composites goussets de mil-polystyrène grossier dosage  $D=0,8$  en raison de sa rupture avec la toute petite masse au cours du premier essai.

Les courbes suivantes montrent le comportement des différents types de plaques :

➤ Composite balles de riz-polystyrène

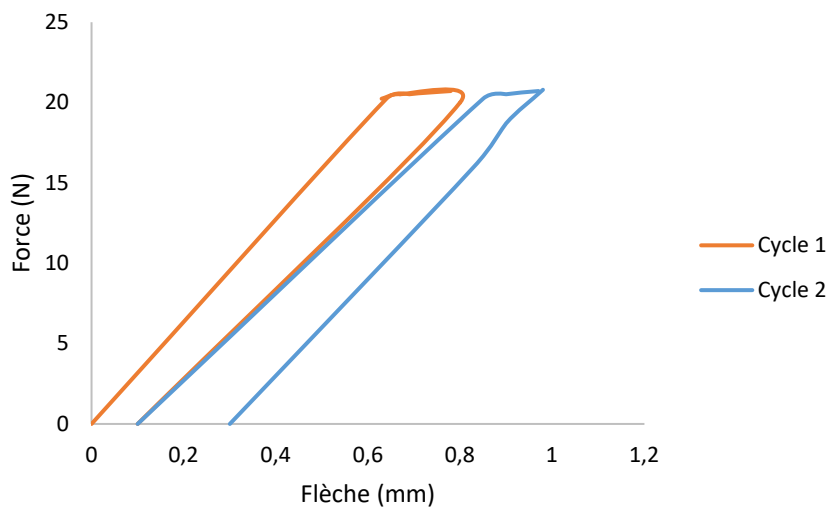


Figure 3-17 : Comportement de l'éprouvette MG<sub>0,8</sub>

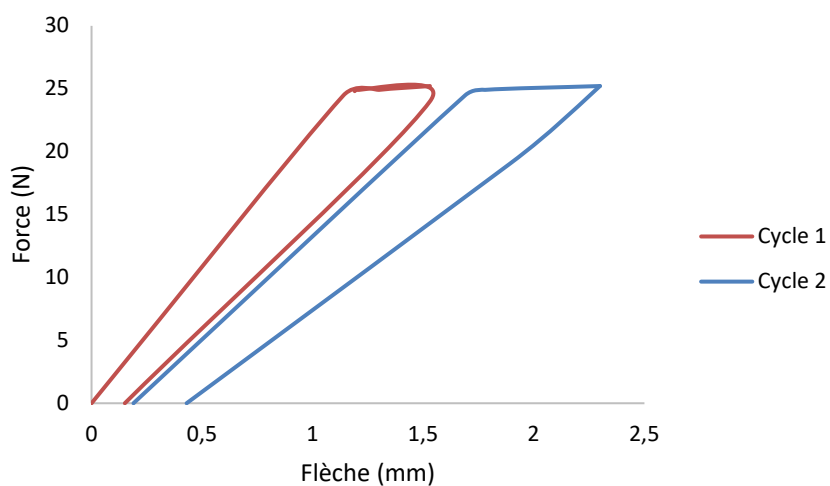


Figure 3-18 : Comportement de l'éprouvette MF<sub>0,8</sub>

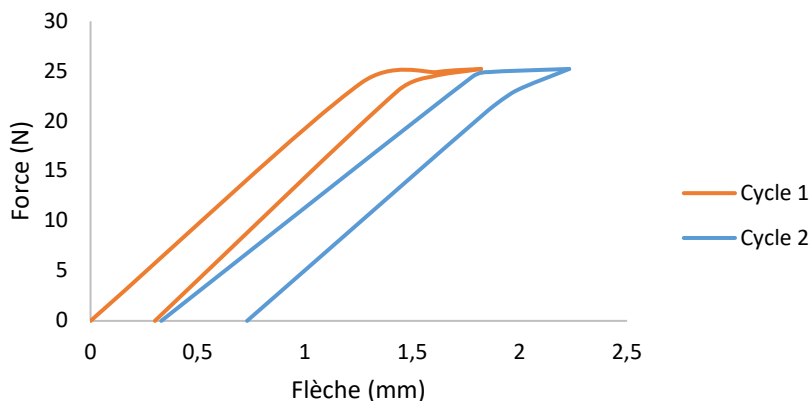


Figure 3-19 : Comportement de l'éprouvette MG<sub>1</sub>

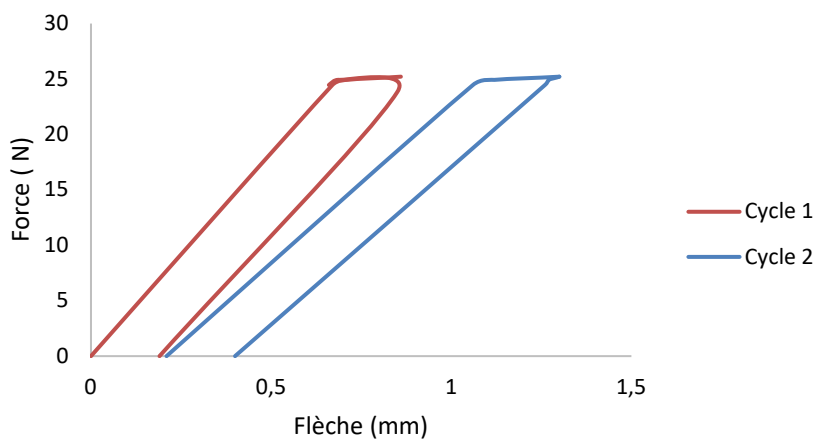


Figure 3-20 : Comportement de l'éprouvette MF<sub>1</sub>

➤ Composite gousses de mil-polystyrène

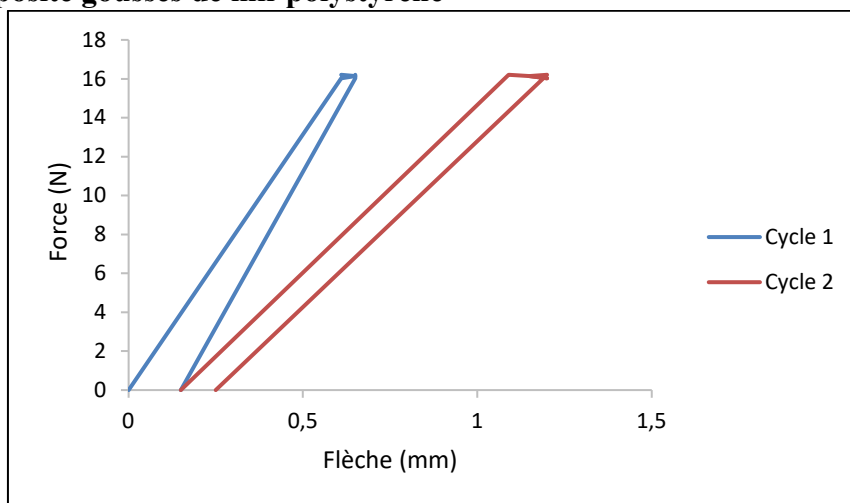


Figure 3-21 : Comportement de l'éprouvette MF<sub>0,8</sub>

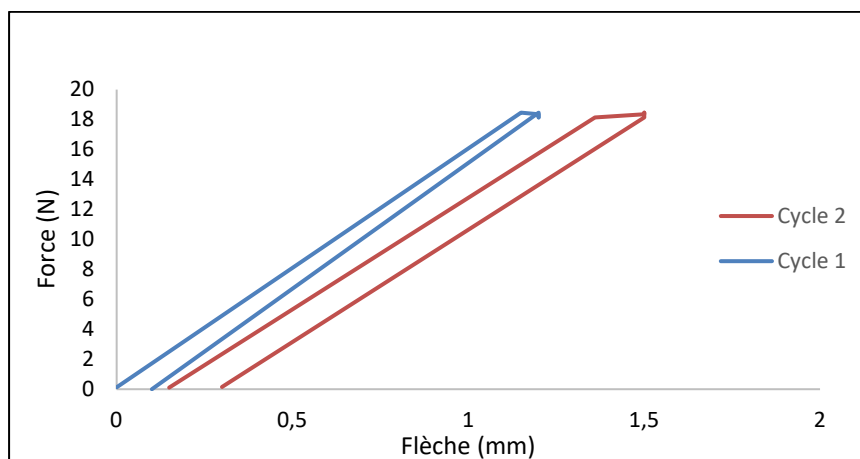


Figure 3-22 : Comportement de l'éprouvette MG<sub>1</sub>

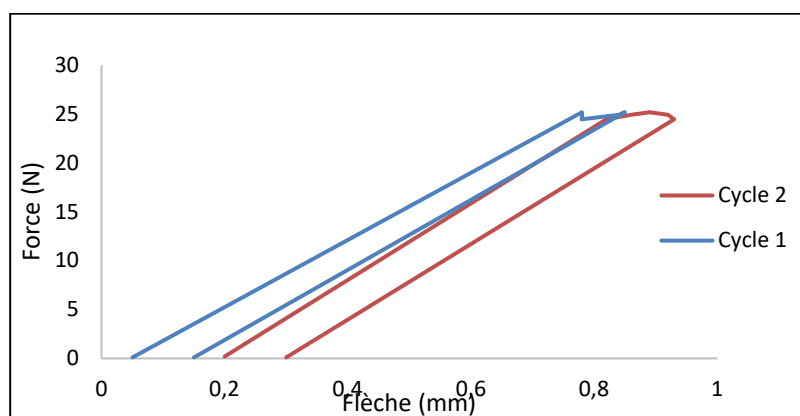


Figure 3-23 : Comportement de l'éprouvette MF<sub>1</sub>

L'allure des courbes 3.16 à 3.22 est pratiquement la même pour les différents composites. La granulométrie n'influence donc pas le comportement du composite sous une charge variable. En effet pour chaque courbe on observe deux parties :

- Une première partie linéaire où l'on remarque que la flèche semble être proportionnelle à la force ;
- Une deuxième partie pratiquement parallèle à l'axe des abscisses. A la fin de chaque cycle on note une déformation résiduelle c'est-à-dire que le matériau ne reprend pas totalement sa forme initiale.

### 3.2.8. Comportement mécanique des éprouvettes sous l'effet de la variation de la charge jusqu'à la rupture

Pour étudier le comportement mécanique des plaques sous l'effet de la variation de la charge jusqu'à la rupture, les plaques composite balles de riz-polystyrène grossier dosage D=1 et composite gousses de mil-polystyrène fin dosage D=1 sont utilisés.

Les courbes obtenues pour chaque type d'éprouvette sont présentés ci-après :

- **Composites balles de riz-polystyrène**

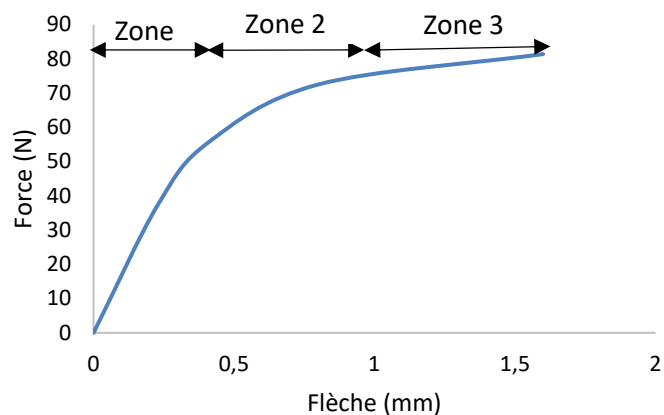


Figure 3-24 : Comportement mécanique de l'éprouvette MG<sub>0,8</sub> jusqu'à la rupture

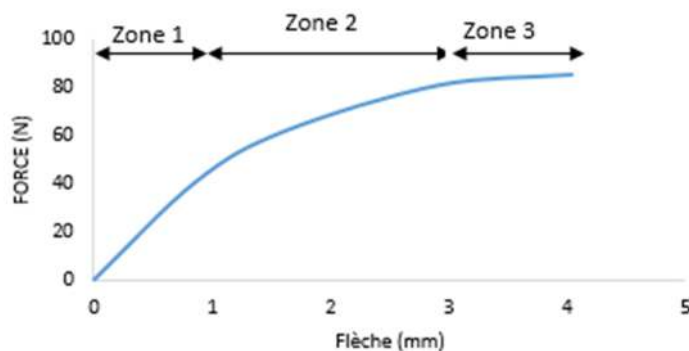


Figure 3-25 : Comportement mécanique de l'éprouvette MF<sub>0,8</sub> jusqu'à la rupture

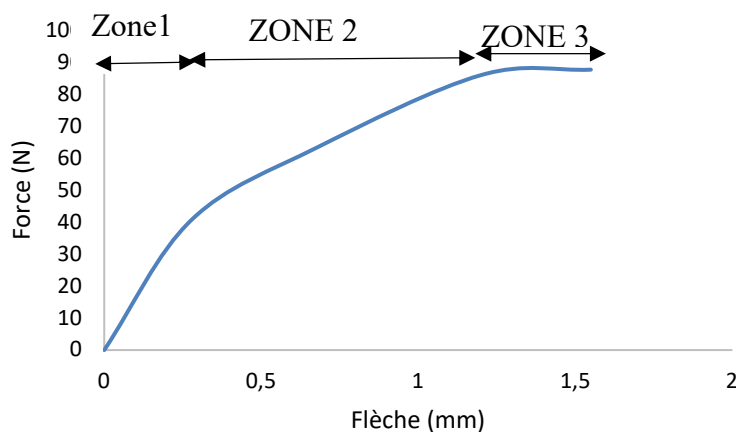


Figure 3-26 : Comportement mécanique de l'éprouvette MG<sub>1</sub> jusqu'à la rupture

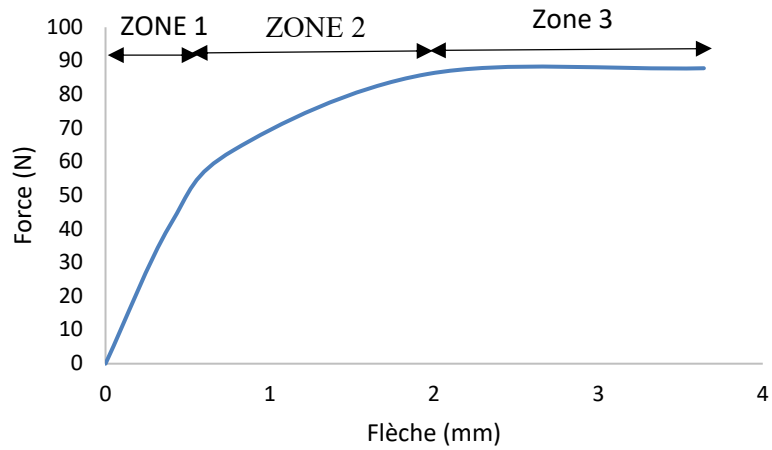


Figure 3-27 : Comportement mécanique de l'éprouvette MF<sub>1</sub> jusqu'à la rupture

○ Composite gousses de mil-polystyrène

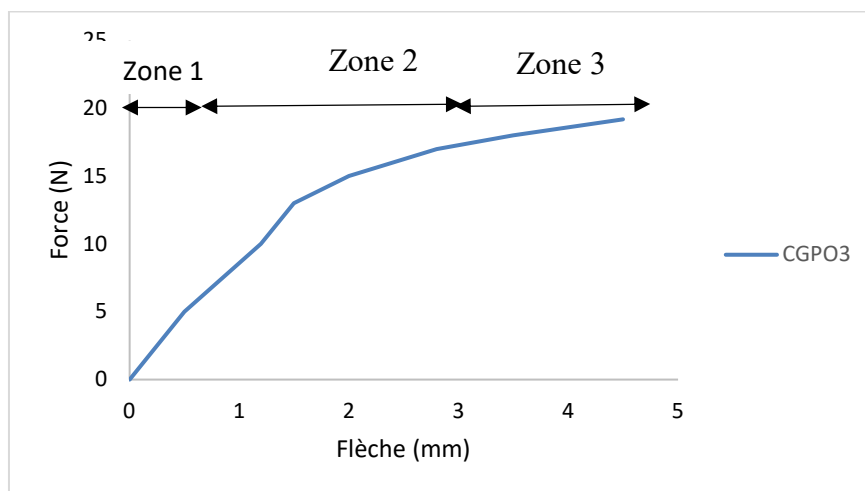


Figure 3-28 : Comportement mécanique de l'éprouvette MG<sub>1</sub> jusqu'à la rupture

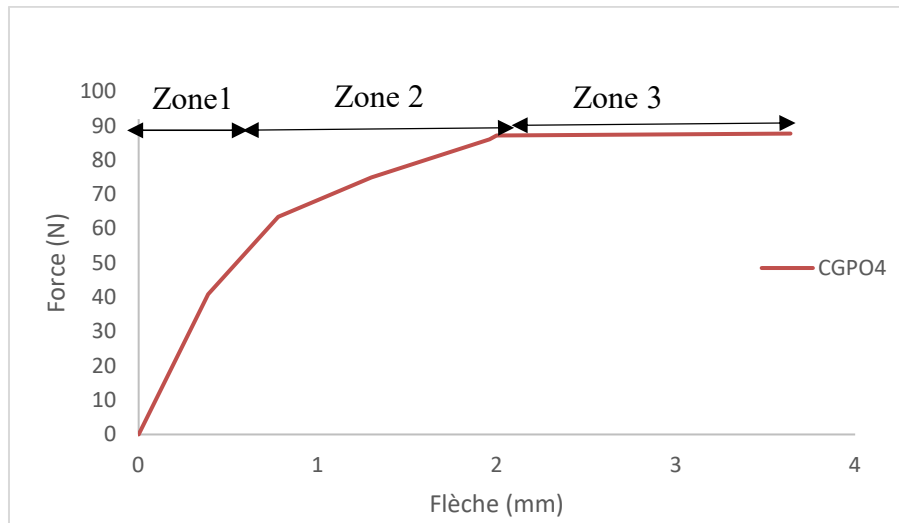


Figure 3-29 : Comportement mécanique de l'éprouvette MF<sub>1</sub> jusqu'à la rupture

Les figures ci-dessus présentent des courbes qui ont pratiquement les mêmes allures. Nous pouvons néanmoins distinguer trois zones majeures :

- La zone 1 où la courbe est linéaire c'est-à-dire que les forces sont proportionnelles aux déformations ;
- La zone 2 où la courbe tend à être parallèle à l'axe des abscisses. Autrement dit, sous l'effet d'une faible variation de la force, les déformations deviennent plus grandes.
- La zone 3 qui est la zone de rupture du composite ; la plaque ne se rompt pas immédiatement sous la charge de rupture, il se produit une certaine déformation de la plaque avant la rupture.

**CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Ce travail s'inscrit dans la même logique que d'autres études déjà réalisées dans le but de valoriser les déchets agricoles.

Au début de notre étude, le but visé était de comparer de manière physique et mécanique des matériaux légers à base de gousses de mil, balles de riz et de polystyrène recyclés.

En considérant pour critères de comparaison les propriétés physico-mécaniques, le composite balles de riz-polystyrène est le plus recommandable car il possède une densité faible permettant de le classer dans la catégorie des matériaux légers et présente également de bonnes performances mécaniques en flexion trois points.

Bien que les aspects étudiés soient nombreux et variés, cette étude n'est qu'une phase exploratoire dans la caractérisation et la maîtrise complète des composites à base de gousses de mil, balles de riz et de polystyrène.

Elle ouvre la porte pour des travaux ultérieurs en vue d'approfondir les notions déjà abordées et de parcourir les axes non encore explorés tels que :

- la variation des caractéristiques mécaniques du composite après immersion dans l'eau;
- La conductivité et la diffusivité thermique ;
- la résistance au feu.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdullah A., J. S. (2011). *Composite Cement Reinforced Cocount Fiber: physical and mechanical properties and fracture behavior*.
- ALLEGUE, L. (2012). *Propriétés mécaniques des composites polypropylènes renforcées de fibres de posidonie*.
- Artis Groupe. (2022, Octobre 2). Récupéré sur Artis Groupe: <https://www.artis-groupe.fr/blog/polyethylene-inconvenients#:~:text=D%C3%A9finition%20du%20poly%C3%A9thyl%C3%A8ne,PE%20ou%20encore%20le%20PEBD>.
- BANI, F. A.-R. (2016). *Mise en oeuvre d'un béton de gousse mil pour la production des entrevous: étude des caractéristiques physiques et mécaniques*. VERECHAGUINE A.K. Ecole Supérieur de Génie Civil.
- Bensaude-Vincent, B., & Laszlo, P. (1998). *Éloge du mixte : Matériaux nouveaux et philosophie ancienne*. Hachette Littératures.
- BLAGA, A. (1975). *Les plastiques thermodurcissable*.
- Bretagne, E. (2009). *Eco-matériaux: les enjeux et les problématiques pour la mécanique*. . Marseille, France.
- Camille, M. (2010, juin 8). contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources.
- CHABANES, M. (2015). *Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction*. Paris: Université Montpellier.
- Djouti A., Khenfer M., Bali A. (2009). *Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier*. In First International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. Oran (Algérie).
- DOKO, K. V. (2013). *Formulation et étude comparative des propriétés physiques et mécaniques et thermiques des composites à matrice cimentaire renforcée par des*

- biomasses végétales: cas des fibres de bosarus aethopium et des balles de riz.* Université d'Abomey Calavi.
- EGANA, M. (4ème année GM). «Introduction aux matériaux composites sur Abaqus Analyse d'une planche de Kitesurf» 4ème année GM.
- GENDRE, L. (2011). *Les grandes familles des matériaux composites.* Paris: Université Paris-Saclay.
- GENDRON, C. (2006). Le développement durable comme compromis. La modernisation écologique de l'économie à l'ère de la mondialisation. *Quebec Presse.*
- Haddou, G. (2018). *Structure et propriétés physiques de composites à matrice biosourcée/fibres naturelles continues pour applications aéronautiques.*
- Halada, K. (1992). *Ecomaterials, Bull Jpn Inst Metals.*
- Internationale, C. (2013). ÉCOMATERIAUX DE CONSTRUCTION : PILIER DE LA CROISSANCE VERTE EN AFRIQUE ? Ouagadougou.
- Jean-Pierre Mercier, G. Z. (1999). *Introduction à la science des matériaux.* PPR 3ème Edition.
- KOUKOUBOU, C. (2015). *Le développement d'un matériau composite par incorporation de gousse de mil dans le mortier de sable ciment.* université d'Abomey-Calavi/ Ecole Polytechnique d'Abomey- Calavi.
- MESMER, P. (2009). Sortie de crise : le Japon mise sur l'environnement. *Le Monde.*
- Mougel, & Neville. (1981). *Properties of concrete.* London: Pitman Publishing inc.
- Nations-Unies. (1992). Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement.
- Nguyen T.-T., Picandet V., Amziane S., Baley C.,. (2008.). Optimisation de l'usage du béton de chanvre dans la conception d'un éco-matériau pour la génie civil. (r. d. avancés, Éd.) *Vol. 18/12, pp .*
- Nguyen T.-T., P. V. (2008). *Optimisation de l'usage du béton de chanvre dans la conception d'un éco\_ matériau pour le Génie Civil* (Vol. 18/12). *Revue des composites et des matériaux avancés.*

- Sedan, D. (2007). *Comportement mécanique d'un matériau*.
- Tamba, S. (2001). *Bétons légers à base des déchets cellulosiques. thèse de doctorat*. Rennes-France: INSA de Rennes.
- Techniques de l'ingénieur*. (2022, Octobre 2). Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/>: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/cosmetiques-ingredients-42664210/formulation-des-polymeres-synthetiques-en-cosmetique-j2190/polymeres-synthetiques-j2190niv10001.html#:~:text=Les%20polym%C3%A8res%20synth%C>
- TROTIGNON, J. (1996). *Matières plastiques structures-propriétés, mise en œuvre, normalisation*. Paris: AFNOR Nathan.
- V, C. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse de Doctorat. Université de Lyon, Lyon.
- VEZEAU, B. (2010). *Caractérisation mécanique de composites LMDPE/bois en vue d'une application en rotomoulage*.
- Yagi, K., & Halada, K. (2001). *Materials development for a sustainable society*.

**ANNEXES**

**Annexe 1** : Fiche de variation de la flèche en fonction du temps (balle de riz)

- MG<sub>0,8</sub>

Cycle 1		Cycle 2	
Temps(s)	Fleche(mm)	Temps(s)	Fleche(mm)
0	0	63	0,2
0,6	1,2	66	1,85
7	1,3	77	2,1
28	1,3	90	2,23
28	0,45	96	2,23
28	0,4	106	2,23
28	0,2	106	0,68
36	0,2	112	0,68
50	0,2	123	0,68
63	0,2	133	0,68

- MF<sub>0,8</sub>

Cycle 1		Cycle 2	
Temps (s)	Fleche (mm)	Temps (s)	Fleche (mm)
0	0	50	0,1
0,6	0,72	60	0,8
14	0,74	67	0,86
21	0,75	80	0,96
21	0,75	86	0,96
20	0,63	96	0,96
20	0,2	96	0,92
36	0,12	102	0,6
43	0,1	113	0,4
50	0,1	123	0,4

- MG<sub>1</sub>

Cycle 1		Cycle 2	
Temps(s)	Flèche (mm)	Temps(s)	Flèche (mm)
0	0	80	0,07
0	0,2	90	0,43
10	0,21	101	0,48
28	0,23	113	0,48
38	0,23	136	0,48
58	0,23	141	0,21
58	0,15	141	0,17
58	0,09	146	0,15
74	0,07	160	0,15
80	0,07	166	0,15

- MF<sub>1</sub>

Cycle 1		Cycle 2	
Temps(s)	Flèche (mm)	Temps(s)	Flèche (mm)
0	0	80	0,19
0	0,8	90	1,2
7	0,95	101	1,22
28	0,95	113	1,22
36	0,95	136	1,22
54	0,95	141	1,22
54	0,4	141	0,45
64	0,19	146	0,45
74	0,19	160	0,45
80	0,19	166	0,45

**Annexe 2 :** Fiche de variation de la flèche en fonction du temps (gousses de mil)

- MF<sub>0,8</sub>

Cycle 1				Cycle 2			
Yo	Ymi	Fleche	Temps	Yo	Ymi	Fleche	Temps
-	-	-	0	-	-	0.1	50
7,34	7,86	0,52	0.6	7,44	8,62	1,18	60
7,34	7,88	0,54	14	7,44	0,88	1,44	67
7,34	7,88	0,54	21	7,44	8,88	1,44	80
7,34	7,74	0,4	21	7,44	9,12	1,68	86
7,34	7,64	0,3	24	7,44	9,12	1,68	96
7,34	7,54	0,2	28	7,44	8,04	0,92	96
7,34	7,46	0,12	36	7,44	8,04	0,8	102
7,34	7,44	0,1	43	7,44	7,84	0,8	113
7,34	7,44	0,1	50	7,44	7,84	0,8	123

- MG<sub>1</sub>

Cycle1				Cycle2			
Yo	Ymi	Fleche	Temps	Yo	Ymi	Fleche	Temps
-	-	0	0	-	-	63	0,1
<b>2,56</b>	3,76	0,52	0	2,64	4,03	66	1,39
<b>2,56</b>	3,76	0,54	1,2	2,64	4,13	77	1,49
<b>2,56</b>	3,76	0,54	1,2	2,64	4,13	90	1,49
<b>2,56</b>	2,71	40	1	2,64	4,13	96	1,49
<b>2,56</b>	2,66	40	1	2,64	4,13	106	1,49
<b>2,56</b>	2,64	40	0,54	2,64	2,76	106	0,12
<b>2,56</b>	2,64	40	0,08	2,64	2,74	112	0,1
<b>2,56</b>	2,64	50	0,08	2,64	2,74	123	0,1
<b>2,56</b>	2,64	63	0,08	2,64	2,74	133	0,1

- MF<sub>1</sub>

Cycle 1				Cycle 2			
Yo	Ymi	Fleche	Temps	Yo	Ymi	Fleche	Temps
-	-	0	0	-	-	80	0,2
<b>0,88</b>	2,36	0	1,4	0,9	2,44	90	1,6
<b>0,88</b>	2,41	7	1,4	0,9	2,49	101	1,65
<b>0,88</b>	2,44	28	1,4	0,9	2,6	113	1,7
<b>0,88</b>	2,46	36	1,4	0,9	2,6	136	1,7
<b>0,88</b>	2,46	54	1,4	0,9	2,6	136	1,7
<b>0,88</b>	1,04	54	0,2	0,9	1,13	136	0,23
<b>0,88</b>	0,92	64	0,2	0,9	1,1	136	0,2
<b>0,88</b>	0,9	74	0,2	0,9	1,1	160	0,2
<b>0,88</b>	0,9	80	0,2	0,9	1,1	166	0,2

**Annexe 3 :** Fiche de variation de la flèche en fonction de la force sans rupture suivant deux cycles de chargement-déchargement (gousse de mil)

- MF<sub>0,8</sub>

Cycle 1								Cycle 2							
Chargement				Déchargement				Chargement				Déchargement			
$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)
16,03	0,64	25,03	1109,02	16,22	0,82	19,54	865,77	16,22	0,61	26,28	1164,41	16,03	1,2	13,36	591,06
16,14	0,69	23,39	1036,36	16,14	0,78	20,69	916,73	16,14	0,66	24,45	1083,32	16,14	1,15	14,03	621,64
16,22	0,9	18,02	798,42	16,03	0,61	26,59	1178,14	16,03	0,84	19,31	855,58	16,22	1,09	14,88	659,3

Annexes

- MG<sub>1</sub>

Cycle 1								Cycle 2							
Chargement				Déchargement				Chargement				Déchargement			
$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/m m)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/m m)	E (MPa)
18,1 4	1,36	13,34	591,06	18,47	1,56	11,84	524,6	18,47	1,21	15,26	676,14	18,1 4	1,31	14,99	664,17
18,3 4	1,5	12,23	541,88	18,34	1,46	12,56	556,5	18,34	1,32	13,89	615,43	18,3 4	1,25	13,89	615,43
18,4 7	1,78	10,38	459,91	18,14	1,44	12,6	558,2 8	18,14	1,42	12,77	565,81	18,4 7	1,23	12,77	565,81

- MF<sub>1</sub>

Cycle 1								Cycle 2							
Chargement				Déchargement				Chargement				Déchargement			
$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)	$\Delta F$ (N)	$\Delta f$ (mm)	K (N/mm)	E (MPa)
24,46	0,93	26,3	1165,29	25,21	0,89	27,11	1201,18	25,21	0,77	32,74	1450,63	24,46	0,85	28,78	1275,18
24,91	1,03	24,18	1071,36	24,91	0,86	24,18	1071,36	24,91	0,83	30,01	1329,67	24,91	0,8	31,14	1379,74
25,21	1,1	22,92	1015,53	24,46	0,82	22,24	985,4	24,46	0,86	28,44	1260,11	25,21	0,78	32,32	1432,03

**Annexe 4 :** Fiche de variation de la flèche en fonction de la force sans rupture suivant deux cycles de chargement-déchargement (balles de riz)

- MG<sub>0,8</sub>

Cycle 1								Cycle 2							
Chargement				Déchargement				Chargement				Déchargement			
Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>20,24</b>	0,64	31,63	1401,45	20,72	0,71	29,18	1292,9	20,24	0,69	29,33	1299,54	20,72	0,73	28,38	1257,45
<b>20,53</b>	0,69	29,75	1318,15	20,53	0,67	30,64	1357,59	20,53	0,73	28,13	1246,38	20,53	0,7	29,33	1299,54
<b>20,72</b>	0,78	26,56	1176,81	20,24	0,59	34,3	1519,75	20,72	0,8	25,9	1147,57	20,24	0,68	29,76	1318,59

• MF<sub>0,8</sub>

Cycle 1								Cycle 2							
Chargement				Déchargement				Chargement				Déchargement			
Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24,46	1,14	21,46	950,84	25,21	1,19	21,18	938,44	24,46	1,01	24,21	1072,69	25,21	1,17	21,55	954,83
24,91	1,3	19,16	848,94	24,91	1,1	22,64	1003,13	24,91	1,16	21,47	951,29	24,91	1,14	21,85	968,12
25,21	1,53	16,48	730,19	24,46	1,06	23,07	1022,18	25,21	1,26	20	886,15	24,46	1,02	23,98	1062,5

• MG<sub>1</sub>

Cycle 1								Cycle 2							
Chargement				Déchargement				Chargement				Déchargement			
Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24,46	1,26	19,41	860,01	25,21	1,33	18,95	839,63	24,46	1,13	21,65	959,26	25,21	1,45	17,39	770,51
24,91	1,61	15,47	685,44	24,91	1,29	19,31	855,58	24,91	1,36	18,32	811,72	24,91	1,35	18,45	817,48
25,21	1,82	13,85	613,66	24,46	1,16	21,09	934,45	25,21	1,56	16,16	716,01	24,46	1,2	20,38	902,99

- MF<sub>1</sub>

Cycle 1								Cycle 2							
Chargement				Déchargement				Chargement				Déchargement			
Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E	Force	Fleche	K	E
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>24,46</b>	0,67	36,5	1617,23	25,21	0,75	33,61	1489,18	24,46	0,35	69,88	3096,22	25,21	0,57	44,23	1959,73
<b>24,91</b>	1,07	23,28	1031,48	24,91	0,63	39,54	1751,93	24,91	0,5	49,82	2207,4	24,91	0,46	54,15	2399,26
<b>25,21</b>	1,32	19,09	845,83	24,46	0,5	48,92	2167,53	25,21	0,66	38,2	1692,55	24,46	0,26	94,07	4168,02

**TABLE DES MATIERES**

## TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
RESUME.....	v
ABSTRACT .....	vi
SOMMAIRE .....	vii
LISTE DES FIGURES .....	viii
LISTE DES TABLEAUX .....	ix
LISTE DES PHOTOS .....	x
LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES.....	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. CHAPITRE I : GENERALITES ET REVUE DE LITTERATURE .....	5
1.1. GENERALITES.....	5
1.1.1. La notion d'écoconception.....	5
1.1.2. Matériaux écologiques (Eco-matériau).....	5
1.1.3. Les matériaux composites.....	7
1.1.4. Classification des matériaux composites .....	8
1.1.4.1. Classification suivant la forme des renforts.....	8
1.1.4.2. Classification suivant la nature de la matrice.....	9
1.1.5. Le polystyrène .....	11
1.1.5.1. Les polymères synthétiques.....	11
1.1.5.2. Les thermodurcissables.....	11
1.1.5.3. Les polyuréthanes (PUR) .....	12
1.1.5.4. Les polyesters insaturés .....	12
1.1.5.5. Les phénoplastes (PF).....	13
1.1.5.6. Les aminoplastes (MF).....	14
1.1.6. Les thermoplastiques .....	14
1.1.6.1. Le polyéthylène (PE).....	16
1.1.6.2 Le polypropylène (PP) .....	16
1.1.6.3. Le polystyrène (PS) .....	17
1.1.6.4. Le polycarbonate (PC) .....	19
1.1.6.5. Les polyesters et le polyéthylène téréphtalate (PET).....	19
1.1.6.7. Les polyacétals ou polyoxyméthylène (POM) .....	20

## Table des matières

1.1.6.8. Le polychlorure de vinyle PCV .....	21
1.1.6.9. Les polyamides (PA) .....	21
1.2. TRAVAUX EFFECTUES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES .....	22
2. CHAPITRE II : MATERIAUX, MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES .....	31
2.1. MATERIAUX .....	31
2.1.1. Les gousses de mil et les balles de riz .....	31
2.1.2. Le polystyrène expansé .....	31
2.1.3. Le solvant.....	32
2.2. MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES .....	32
2.2.1. Caractérisation des différents constituants du composite : les gousses de mil et les balles de riz .....	32
2.2.1.1. Analyse granulométrique sur les gousses de mil et balles de riz.....	33
2.2.1.2. Détermination de la densité absolue (ou poids spécifique) des gousses de mil et balles de riz .....	34
2.2.1.3. Détermination de la densité apparente.....	35
2.2.1.4. Détermination de la teneur en eau.....	36
2.2.2. Caractérisation des différents constituants du composite : Le polystyrène recyclé .....	36
2.2.2.1. Détermination de la masse volumique .....	36
2.2.2.2. Caractérisation de l'hydrocarbure (essence) :Détermination de la masse volumique.....	37
2.2.3. Choix des compositions granulaires des mélanges.....	37
2.2.4. Formulation de la colle.....	38
2.2.4.1. Préparation de la colle.....	38
2.2.4.2. Détermination de la masse volumique .....	39
2.2.4.3. Mesure de la viscosité dynamique .....	40
2.2.5. Formulation des mélanges balle de riz-Polystyrène et gousses de mil-polystyrène .....	41
2.2.5.1. Choix du dosage .....	41
2.2.5.2. Détermination des masses des différents constituants pour la confection des éprouvettes .....	41
2.2.6. Confection des éprouvettes .....	43
2.2.6.1. Préparation des balles de riz .....	43
2.2.6.2. Malaxage .....	43
2.2.6.3. Fabrication des plaques.....	44
2.2.6.4. Conservation des éprouvettes .....	46
2.2.6.5. Usinage des plaques.....	47

## Table des matières

2.2.7.	Essais de caractérisation physiques et mécaniques du composite.....	47
2.2.7.1.	Essais physiques .....	48
2.2.7.2.	Essais mécaniques .....	50
3.	CHAPITRE III : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	54
3.1.	RESULTATS DES ESSAIS SUR LES MATERIAUX.....	54
3.1.1.	Analyse granulométrique sur les gousses de mil : .....	54
3.1.2.	Analyse granulométrique sur les balles de riz.....	55
3.1.3.	Masse volumique du polystyrène et de l'essence : .....	56
3.2.	CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES COMPOSITES .....	57
3.2.1.	Gonflements dans les trois directions.....	57
3.2.2.	Absorption d'eau .....	58
3.2.3.	Densité.....	59
3.2.4.	Comparaison des propriétés physiques des deux composites .....	59
3.2.5.	Caractérisation des propriétés mécaniques des composites.....	61
3.2.5.1.	Détermination du module d'élasticité et de rupture des plaques.....	61
3.2.5.2.	Comparaison des propriétés mécaniques des deux composites .....	62
3.2.6.	Déformation des plaques sous une charge constante en fonction du temps .....	62
3.2.7.	Comportement mécanique des plaques sous l'effet de la variation de la charge (Deux cycles de chargement-déchargement sans rupture).....	66
3.2.8.	Comportement mécanique des éprouvettes sous l'effet de la variation de la charge jusqu'à la rupture .....	69
4.	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	74
5.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	76
6.	ANNEXES .....	79
	TABLE DES MATIERES.....	91

## RESUME

---

Les déchets provenant de l'agriculture et de l'industrie du plastique contribuent à la pollution de l'environnement. La réduction des effets desdits déchets sur l'environnement passe par la confection de matériaux composites.

Le présent travail est dédié à l'étude comparative des propriétés physico-mécaniques des composites balles de riz-polystyrène et gousses de mil-polystyrène. Ainsi, des plaques ont été fabriquées et usinées suivant les dimensions de la norme ASTM D1037-89 pour étudier d'une part les propriétés physiques à savoir : la densité, l'absorption et le gonflement volumique et d'autre part les propriétés mécaniques que sont : les modules d'élasticité et de résistance en flexion. Les résultats obtenus permettent de classer ces matériaux dans la classe des matériaux légers et donc de les utiliser dans la construction des bâtiments.

**Mots clés :** eco-matériau, composite, densité, absorption, propriétés physico-mécaniques.

---

## ABSTRACT

Waste from agriculture and the plastics industry contributes to environmental pollution. A Reduction of their effects on the environment requires the manufacture of composite materials.

This work is dedicated to the comparative study of the physical and mechanical properties of rice husk-polystyrene and millet-polystyrene pods composites. Thus, plates were manufactured and machined according to the dimensions of the ASTM D1037-89 standard first to study the physical properties: density, absorption and swelling and secondly the mechanical properties that are: the module of elasticity and resistance in bending. With the results these materials can be classify as in the class of light materials and therefore can be used in the construction of buildings.

**Keywords:** eco-material, composite, density, absorption, physical properties, mechanical properties.