



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement  
International Institute for Water and Environmental Engineering



**HELNETAS**  
Agir pour un monde meilleur

**MALI**

**CONTRIBUTION A LA MISE EN VALEUR DES ORDURES  
MENAGERES PAR LA PRODUCTION ET LA VENTE DE PAVES**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER SPECIALISE EN ENERGIE RENOUVELABLE**

Présenté et soutenu publiquement le 23 Septembre 2011 par

**Mariam BAGAYOKO**

**Encadreur principal : Monsieur Didier LECOMTE**

Directeur du LEDES, Fondation 2iE

**Maitres de stages :**

**Monsieur KONE Koussé:** Coordinateur de projet Eau Assainissement Bamako

**Monsieur Jacques LOUVAT:** Conseiller technique régionale à Bamako

**Monsieur Abdoulaye DIALLO:** Conseiller technique Nationale à Bougouni

*Jury d'évaluation du stage:*

**Président :**

**Dr Joël BLIN**

**Membres et correcteurs :**

**Mr Didier LECOMTE**

**Mr Yohan RICHARDSON**

---

## DEDICACES

Je dédie ce projet de fin d'étude qui constitue sans doute le fruit d'énormes sacrifices consentis sur tous les plans à :

Ma maman pour son amour à mon égard ; amour qui m'a permis de continuer mes études sans arrière pensée.

## *REMERCIEMENTS*

Avec ce mémoire, quelques fois dans la douleur, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail et qui ont marqué par leur présence une étape essentielle dans ma vie.

Je pense tout d'abord à magnifier et à louer **l'Éternel, le miséricordieux et le Dieu des orphelins** qui nous a accordé santé, courage et patience durant notre séjour en terre burkinabé pour mener à terme nos études.

Grande reconnaissance à mes encadreurs : Mr **Didier LECOMTE** A travers vous je voudrais présenter ma profonde gratitude à tout le corps professoral du 2IE pour la qualité de l'enseignement reçu. En particulier je voudrais exprimer à juste titre ma reconnaissance à Mr Jacques **Remy NINAME** et Madame **Salimata SPINATO** pour leurs précieux et judicieux conseils durant tout le stage.

Je voudrais remercier mes encadreurs Mr **Koné Kousé**, Mr **Jacque Louvat** et Mr **Diallo Abdoulaye** pour leurs bons conseils. A travers vous je remercie tout le personnel de l'ONG Helvetas Mali pour leurs bonnes collaborations durant tout mon séjour en son sein.

Aux parents et je pense en particulier aux familles **BAGAYOKO, KEITA, TRAORE DIARRA Dombia** pour votre encouragement et soutien moral dans des moments difficiles.

Aux amis, je pense en particulier à **Simplice, Calvin thiam, Tonton, Naba, Sana, Mamadou Dabo, Zenabou** j'exprime là ma très grande reconnaissance pour le fait d'être à nos côtés d'une manière ou d'une autre au cours de ces derniers temps. Et à la petite communauté Malienne de Ouagadougou je dis un grand merci et mes attentions particulières à **Tonton**.

A tout le peuple Burkinabé, je dis un grand **MERCI** et je reconnais que le Burkina est le pays des hommes intègres.

## RESUME

Les problèmes environnementaux que posent les déchets plastiques imposent de chercher une solution rapide et durable. Le thème de ce Projet de fin d'étude porte sur la valorisation de ces déchets par la production et la vente des pavés. En effet le recyclage permet non seulement de mieux protéger l'environnement mais de résoudre le problème d'épuisement de ressources naturelles, de créer des emplois et des revenus. Dans le cadre de cette étude le recyclage du plastique a consisté à les utiliser comme liant de sables rivières tamisées pour la fabrication des pavés de 5, et 3,5 cm d'épaisseurs. On a fait une série d'expérimentation en utilisant 10kg de sable fixe pour chaque essai et varié les ratios sable/plastique comme suit : (50/50, 60/40, 80/20, et 60/40 PE uniquement) le temps de malaxage obtenu est de 52 mn maximale avec un refroidissement à air. Le coefficient de dilatation thermique obtenu est comprise entre  $0,5E-4$  et  $4,125E-4$  m/m<sup>°c</sup> obtenu sous 80<sup>°c</sup>. Les résultats des essais de qualité de ces pavés montrent qu'ils n'absorbent pas d'eau Les résultats optimaux du stage sont obtenus avec des essais dont le ratio est incluse dans l'intervalle [60% 80%] de sable.

**Mots Clés :** Environnementaux, Valorisation, Plastiques, Pavés, ratio.

## ABSTRACT

The environmental problems posed by plastic wastes require seeking for a suitable solution. The theme of this Final Project study focuses on the recovery of such wastes by the production and sale of the pavers .In fact recycling does not only helps to better protect the environment but also to solve the problem of depletion of natural resources, create jobs and income. In The scope of this study recycling of plastics is to use than as a binder for river sifted through for the manufacture of blocks of 5 and 3,5 cm. It was a series of experiments using 10 kg of sand fixed for each test and varied ratios sand / plastic as follows: (50/50, 60/40, 80/20, 60/40 and PE only) time mixing obtained is 52 minutes with a maximum air cooling. The coefficient of thermal expansion obtained is between  $0.5E-4$  and  $4.125 E-4$  m / m ° C obtained under 80 ° c. The results of quality tests show that these stones do not absorb water the best results are obtained with the placement tests where the ratio is included in the interval [60% 80%] of sand.

**Key words:** Environmental, Valorization, plastics, pavers, ratio

*LISTE DES ABREVIATIONS*

AEPHA : Accès à l'eau potable et assainissement

ASP-eau : Appui au Secteur Privé eau

CERVALD : Centre municipal d'Etudes et de Recherches pour la valorisation des Déchets de N'djamena

CREPA : Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement à faible coût

GDEA-CT : Gestion Durable de l'Eau et de l'Assainissement au niveau des Collectivités Territoriales

GIE : Groupement d'Intérêt Economique

H&A : Hygiène et Assainissement

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

**PE** : Polyéthylène

PET : Polyéthylène téréphtalate

Mdf: Module de finesse

Mh: masse humide

Ms: masse sèche

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PCI : Pouvoir Calorifique Inferieur

PEbd : Polyéthylène basse densité

PEhd : Polyéthylène haute densité

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PVC : Polychlorure de vinyle

**SOMMAIRE**

<i>Dédicaces</i> .....	<i>ii</i>
<i>Remerciements</i> .....	<i>iii</i>
<i>Liste des abréviations</i> .....	<i>v</i>
<i>Sommaire</i> .....	<i>vi</i>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<i>I. Hypothèse de travail</i> .....	<i>5</i>
<i>I. 1 Programme de Gestion Durable de l'Eau et de l'Assainissement au niveau des Collectivités Territoriales (GDEA-CT) 2011-2013 de Helvetas</i> .....	<i>5</i>
<i>I.2 Action HELVETAS cas de Bougouni</i> .....	<i>5</i>
<i>I.3 Objectifs principaux</i> .....	<i>6</i>
<i>I.4 Objectifs spécifiques</i> .....	<i>6</i>
<i>I.5 Hypothèse de recherche</i> .....	<i>6</i>
<i>I.6 Justification</i> .....	<i>7</i>
<b>II. MATERIAUX MATERIELS ET METHODES UTILISES</b> .....	<b>8</b>
<i>II.1 MATERIELS UTILISES</i> .....	<i>8</i>
<i>II.2 MATERIAUX</i> .....	<i>9</i>
<i>II.2.1 SABLE</i> .....	<i>9</i>
<i>II.2.2 PLASTIQUES</i> .....	<i>10</i>
<i>II.2.3 SOURCE D'ENERGIE</i> .....	<i>12</i>
<i>II.2.4 PAVE</i> .....	<i>12</i>
<i>II.3 METHODES UTILISES</i> .....	<i>14</i>
<i>II.3.1 Comportement thermique du sable et plastique</i> .....	<i>14</i>
<i>II.3.2 Description du procédé</i> .....	<i>14</i>
<i>II.3.3 Données spécifiques à chaque expérimentation</i> .....	<i>15</i>
<i>II.3.4 Temps de Fabrication des pavés</i> .....	<i>16</i>
<i>II.3.5 Retrait</i> .....	<i>16</i>
<i>II.3.6 Taux d'absorption d'eau</i> .....	<i>16</i>
<i>II.3.7 Bilan de matière</i> .....	<i>16</i>
<i>II.3.8 Bilan énergétique</i> .....	<i>16</i>
<i>II.3.10 Consommation d'énergie par m2 de pavage</i> .....	<i>17</i>
<i>II.3.11 Essai de résistance mécanique des pavés</i> .....	<i>17</i>
<b>III .RESULTATS-DISCUSSION- ANALYSE</b> .....	<b>19</b>

<i>III.1 RESULTATS</i> .....	19
<i>III.2 DISCUSSION ET ANALYSE</i> .....	31
<i>IV. CONCLUSION- PERSPECTIVE- RECOMMANDATION</i> .....	33
<i>IV.1 CONCLUSION</i> .....	33
<i>IV.2 RECOMMANDATION ET PESPECTIVE</i> .....	34
<i>BIBLIOGRAPHIE</i> .....	36

**LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau 1 : propriétés mécaniques et thermiques des plastiques utilisés.....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 2 : Plan d'expérimentation des échantillons reçus .....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 3 : Donnée spécifique à chaque essai .....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 4 : Analyse granulométrique de sable : NF P 18-560 .....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 5: Temps de fabrication des différents essais .....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 6: Résultat du taux d'absorption des différents types de pavés. ....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 7: Résultat de l'essai de retrait .....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 8: Bilan de masse de chaque essai.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 9: Bilan énergétique de l'essai 1.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 10: Bilan énergétique de l'essai 2.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 11: Bilan énergétique de l'essai 3.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 12: Bilan énergétique de l'essai 4.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 13 : consommation par m2 de pavage .....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 14 :Variation de dimension des pavés après chauffage à 80°C : type de moule étoile .....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 15 : Variation de dimension des pavés après chauffage à 80°C : type de moule octogonale .....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 16 :Variation de dimension des pavés après chauffage à 80°C : type de moule polygonale .....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 17 : Coefficients de dilatation thermique superficielle et linéaire calculés.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 18 dimensions réelles des pavés.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 19 : Calcule économique.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 20 :Coefficients de dilatation thermique linéaire de quelque matériau de référence</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 21 : Produit obtenu lors de la pyrolyse ou la combustion des plastiques.....</i>	<i>42</i>

## **LISTE DES FIGURES**

<i>Figure 1 : La pollution environnementale par les déchets plastiques .....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2 : Prototype utilisé .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 3: Tamiseur.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 4 : Pavés produits.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 5 différents points de mesure des pavés testés.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 6 : Courbe granulométrique du sable .....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 7 : Variation du temps de travail en fonction des essais.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 8 : Variation du retrait en fonction des essais .....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 9: Variation de l'énergie en fonction des essais .....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 10: variation de la CE/m2 de pavage.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 11 :différent type de moule .....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 12 : système de presse .....</i>	<i>40</i>

## *INTRODUCTION*

Selon les statistiques officielles, les plastiques représentent 3% à 7% [Maliweb. (2010), Environnement Sachets plastiques : Bientôt interdits dans notre pays Klaxon] du poids des déchets municipaux du Mali. Cela est dû au fait que dans tout le pays les populations n'utilisent presque plus des ustensiles comme les cuvettes métalliques, lesalebasses, les paniers et autres récipients pour des achats divers. Presque tous les produits achetés sont emballés dans des sachets plastiques, lesquels sont jetés au quotidien dans la nature après usage. On les voit partout dans les villes et villages, dans les rues et caniveaux. Ils submergent les zones agricoles, obstruent les cours d'eau, polluent l'environnement visuel et dégagent aussi des odeurs nauséabondes. Les déchets plastiques constituent un vrai problème de développement et de gestion de notre environnement.

La solution pour réduire cette pollution serait d'interdire leur usage. C'est ainsi que le ministère de l'environnement et de l'assainissement Malien a donc décidé de réagir par l'initiation d'une loi d'interdiction afin de lutter énergiquement contre ce fléau. Il s'est inspiré sur des exemples du Rwanda, du Kenya, de l'Erythrée, de l'Afrique du sud et du Gabon en Afrique et de la France et l'Irlande, en Europe qui ont procédé à la même interdiction.

La stratégie proposée est d'inviter les utilisateurs à ne plus jeter ces déchets dans la nature. Cela passe par une sensibilisation au respect de leur environnement, mais plus sûrement en donnant à ces sacs une valeur marchande en les valorisant en produits utiles. Les études entreprises ont permis de démontrer qu'il était possible de les transformer, par fusion, avec adjonction de sable ou non, en divers produits d'excellente qualité, comme des panneaux de signalisation, des pavés de sol, des dalles de caniveaux et de latrines.

La valorisation des plastiques souples n'est pas encore très développée dans les pays industrialisés, où la priorité a porté jusqu'à présent sur les flacons en plastique rigide, plus faciles à collecter et traiter. Mais les objectifs d'amélioration des taux de recyclages commencent à ouvrir des possibilités pour ces nouveaux gisements non valorisés sous forme matière.

Dans certains pays africains, un procédé intéressant est testé pour mettre en place des structures de fabrication des pavés en plastiques, mais avec d'importantes difficultés techniques et financières. Il s'agit de fabriquer des matériaux de construction à partir d'un mélange à chaud de sable et de sachets plastiques. Des essais à l'échelle artisanale se sont déroulés au Tchad (le procédé CERVALD, initié en 1998, au TCHAD, au Niger, au

Cameroun, au Mali,), mais sans pour la plupart arriver à perdurer [(Gilles D. et Ousmane S. 2009)].

Il est donc indispensable d'aller plus loin en la matière pour permettre à ce procédé de trouver des conditions satisfaisantes pour assurer sa pérennité. L'ONG Helvetas dans sa politique d'appui au secteur privé et de l'assainissement souhaite travailler à l'amélioration de ce procédé. Ce fût le cas de Bougouni une ville du Mali dont le projet a fortement travaillé dans l'appui des GIE (Groupement d'Intérêt Economique).

### Problématique

La plupart des plastiques sont à base de pétrole une ressource non renouvelable et pour la plupart sont importés. Dans les milieux scientifiques, économiques ou politiques, tout le monde s'accorde à reconnaître que les modes de consommation et les modèles de développement nous amènent vers l'épuisement des ressources naturelles. La croissance de la population mondiale, suivi du taux d'urbanisation 4,9 % pour l'Afrique entre 1990 et 1992 (Adepoju G. et al2002) ainsi que la diminution des ressources fossiles sont les facteurs importants qui doivent amener les hommes à réfléchir sur les moyens permettant de contrecarrer l'épuisement des ressources fossiles. Une des solutions serait d'assurer la gestion durable des déchets. Par conséquent, les hommes vont devoir collecter, trier, mais aussi valoriser ou recycler plus et mieux, pour boucler le cycle de la matière extraite de sous sols.

Les villes du sud qui connaissent actuellement un accroissement important, ont une production croissante de déchets. Au niveau des communes, seul, un faible volume de déchets est évacué vers des centres de stockage mais le système est encor mieux organisé.

La valorisation des déchets organiques et le recyclage des ordures sont des activités très peu développées au Mali. Il n'existe pour le moment qu'un seul centre d'enfouissement technique fonctionnel au Mali (dans la ville de Sikasso), celle de Bamako est en début de réalisation. Quelque soit leur provenance la moitié des déchets n'est ni ramassée ni traitée. Il n'existe de dépôts de transit autorisés que dans quelques grandes villes mais la majorité des ordures pré-collectés par les GIE (groupement d'intérêt économique) ou les ménages finissent dans des dépôts anarchiques, dans les caniveaux à ciel ouvert ou les cours d'eau. En milieu rural, elles s'entassent aux abords des concessions dans des terrains vagues avant d'être répandues sur les champs à l'approche de l'hivernage. Ce qui est à l'origine d'une dispersion dans la nature de très nombreux plastiques souples, principalement des sachets plastiques, utilisés comme emballages.

Ces plastiques qui sont rejetés dans la nature font l'objet d'une "décoration" alarmante des arbres. Ils rendent les sols infertiles car chez les plantes vertes, ces déchets peuvent inhiber la photosynthèse. Les mêmes déchets plastiques empêchent le drainage des eaux usées et pluviales dans les caniveaux existant, favorisant aussi la stagnation des eaux et la propagation de maladies hydriques (choléra, typhoïde) et du paludisme. La consommation des sachets plastiques par les animaux domestiques constitue actuellement un véritable fléau pour l'élevage en terme de mortalité et de morbidité des cheptels. Le brûlage des sachets plastiques est une pratique qui engendre la production de polluants organiques persistants (dioxine et furanes) nocifs pour la santé et l'environnement. Ces nuisances qui ont une durée de vie très longue ( $\approx 4$  à 500 ans), s'accumulent de manière régulière dans la nature, malheureusement parmi ces plastiques rejetés on trouve de très nombreux emballages ayant contenu des produits dangereux et toxiques.

Ainsi en Afrique Subsaharienne la pollution causée par les plastiques est un réel problème de salubrité et de santé publique. Elle est parfois source de mécontentement des citoyens et remet en question la capacité de gouvernance des pays africains, ces citoyens refusent souvent d'adhérer à la filière de collecte et de payer leur redevance. Ce qui fragilise le système de gestion durable de déchets. De tout ce qui précède, il est nécessaire de fédérer les actions de l'ensemble des acteurs de la filière déchets (administration, opérateurs de collecte, acteurs informels), autour de la population, notamment dans les quartiers les moins favorisés.

La mise en décharge est source de problèmes très importants. Les déchets verts et fermentescibles stockés produisent beaucoup de méthane. Les gestionnaires de ces centres s'inquiètent car ce gaz peut s'enflammer et provoquer des incendies en présence d'importante masse de sachets plastiques et les pneus qui n'ont pas été préalablement triés. Ces incendies peuvent produire des fumées toxiques, difficiles à maîtriser et pouvant entraîner des conséquences extrêmement graves pour la santé des habitants et l'environnement urbain.



Figure 1 : La pollution environnementale par les déchets plastiques

**Source :** *Maliweb (2010) Environnement Sachets plastiques : Bientôt interdits dans notre pays Klaxon*

## *I. Hypothèse de travail*

### *I. 1 Programme de Gestion Durable de l'Eau et de l'Assainissement au niveau des Collectivités Territoriales (GDEA-CT) 2011-2013 de Helvetas*

Depuis 2002, Helvetas a ouvert son domaine d'intervention à l'assainissement. Un premier programme dénommé «Appui au Secteur Privé de l'Eau et de l'Assainissement (ASP-Eau)» avait pour objectif principal de promouvoir l'émergence et le développement d'un secteur privé capable d'offrir des services d'assainissements de qualité aux collectivités locales et aux ménages des villes rurales d'interventions. Durant la première phase du projet (2002-2006), au delà de la mise en place d'un dispositif de renforcement des acteurs privés, un dispositif de sensibilisation information destiné aux communautés et aux scolaires pour le changement de comportement a été également conçu et exécuté par des animateurs sur le terrain. Cela a permis d'accroître de façon sensible l'abonnement des ménages aux services des Groupements d'Intérêts Economiques (GIE) de ramassage d'ordures et la demande d'infrastructures d'assainissement auprès des entreprises par les ménages.

Quant à la deuxième phase du programme (2007-2010), elle s'est essentiellement focalisée sur les activités d'accroissements de la demande d'infrastructures d'H&A auprès des acteurs privés par les ménages et le soutien à la création d'entreprises dans le domaine à travers la revalorisation des déchets solides.

Le présent programme a pour vision que l'ensemble des collectivités locales du Mali soient capables de gérer de manière efficace, durable, transparente et coordonnée avec l'ensemble des acteurs locaux, les ouvrages d'AEPHA et de mobiliser les fonds nécessaires à augmenter de manière conséquente l'accès à l'eau potable et à l'assainissement de leurs populations.

Helvetas a comme partenaire principal les communes qui sont, en tant que maître d'ouvrage, au centre de la gestion du secteur de l'eau et de l'assainissement. Afin de renforcer le plaidoyer, un rapprochement avec d'autres organisations partageant la vision et les principes de Helvetas comme Water-Aid ou le CREPA et la SNV-Mali, la coopération Sud Sud sera recherché. [Résumé-proDoc-GDAE-CT]

### **I.2 Action HELVETAS cas de Bougouni**

Pour appuyer le processus de décentralisation, Helvetas a opté de travailler en étroite collaboration avec les autorités communales d'une part et en soutien au secteur privé local. Au plan de la revalorisation des déchets solides, des initiatives fructueuses ont été enclenchées par le programme ASP-Eau en partenariat avec les collectivités de Bougouni et Yanfolila. Des efforts doivent être déployés pour améliorer la qualité biologique du compost

produit pour que celui-ci soit accepté sans réserve dans l'agriculture biologique (tri à la source des ordures destinés à être transformés en compost).

L'augmentation de la consommation de plastique a contribué à l'accroissement de sa présence dans la nature, Ainsi, Helvetas a accompagné les autorités locales de Bougouni à organiser l'évacuation et la valorisation des déchets par l'accompagnement à la mise en place d'une filière de valorisation des plastiques souples en pavés, d'une part du point de vue technique (les techniques de fusion sable/plastique, mélange et moulage, construction d'un prototype, etc.) en partenariat avec le laboratoire mécanique solide du 2IE (Institut de l'Environnement et de l'Eau), et d'autre part environnementale.

### **I.3.Objectifs principaux**

Les objectifs principaux du stage consistent à proposer les formulations et paramètres de fonctionnement de fabrication des pavés qui donnent les résultats les plus intéressants au niveau technique et environnemental.

### **I.4. Objectifs spécifiques**

Les objectifs spécifiques qui en découlent sont les suivants :

- Faire la typologie et la caractérisation des sables disponibles : sable de rivière ou sable de fonderie et voir son comportement sous l'action de la chaleur;
- Faire la typologie des plastiques disponibles et leurs comportements sous l'action de la chaleur ;
- Élaborer une série d'expérimentation en tenant compte des études antérieures et fabriquer ainsi des pavés en tenant compte des conditions et des paramètres (ratio sable/plastique, qualité de sable, température, temps de malaxage et épaisseur des pavés, type de refroidissement) ;
- Faire des tests de résistances mécaniques des pavés fabriqués (résistance à la compression, charge de rupture, poinçonnement etc)

### **I.5 Hypothèse de recherche**

Ce travail a reposé sur trois hypothèses principales à savoir :

- La valorisation des plastiques est une solution à la pollution environnementale ;
- Les plastiques peuvent être de bons liants pour la fabrication des matériaux de construction ;
- La production des pavés de qualités à partir de mélange du sable et des plastiques fondus, peuvent concurrencer les pavés en bétons.

## **I.6 Justification**

L'objectif est de réduire la pollution occasionnée par le rejet des sachets plastiques dans la nature, en les considérant, moins comme une nuisance et plus comme une ressource génératrice d'emplois et de revenus. En effet le recyclage est la clé de l'économie circulaire Cette façon de faire n'est pas seulement le changement de regard, mais un changement de logique et de modèle économique. Une des pistes proposées est l'utilisation de ces plastiques comme liant dans la fabrication des pavés, ainsi ils pourront se substituer au ciment, pour la fabrication de matériaux de construction car ils sont moins chers et leur recyclage améliore l'environnement.

## II. MATERIAUX MATERIELS ET METHODES UTILISES

### II.1 MATERIELS UTILISES

La valorisation des déchets plastiques en pavés au niveau d'Helvetas est faite au moyen d'un malaxeur (voir photo). Toute les expérimentations ont été réalisés à l'aide de ce prototype, en plus les matériels suivants ont été utilisés.

- Une balance,
- Un chronomètre,
- Un moitié de fût, une pelle un moule une truelle une presse (voir figure 12 annexe)
- Equipements de protections individuels : gants, chaussures fermées, lunettes etc.

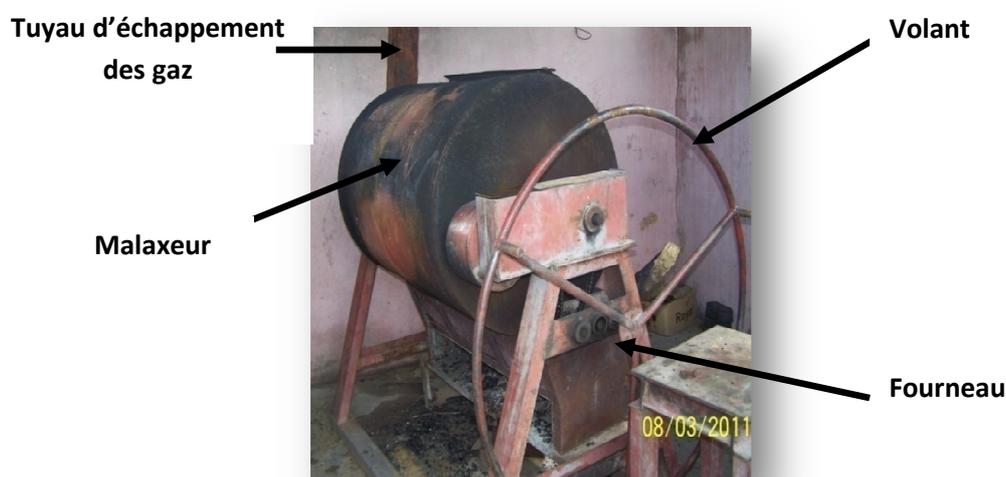


Figure 2 : Prototype utilisé

#### Description du prototype

Le prototype utilisé à Helvetas est un tube dans lequel sont soudés des petits pikets (malaxeur) entraîné par un volant et une chaîne posé sur un fourneau qui nous sert de foyer de combustion, le combustible utilisé est du bois ; une tuyauterie serve d'assurer l'échappement des gaz de combustion.

Pour l'essai de dilatation thermique :

- Les dimensions des pavés ont été mesurés à l'aide de trois pieds à coulisse à lecture digitale avec résolution 0.01 mm et capacité respectivement 200mm, 300mm et 1000mm.
- Le chauffage des échantillons a été produit à travers un four de laboratoire conventionnel avec lecture visuelle de la température de travail.
- La température du laboratoire a été vérifiée avec un thermomètre à mercure conventionnel.

## II.2 MATERIAUX

### II.2.1 SABLE

Le sable de rivière est le seule type de sable disponible sur le site, donc toutes nos expérimentations sont faites avec celui-ci.

#### Caractérisation des sables

##### a) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la granularité (répartition dimensionnelle des grains) et la granulométrie (dimension des grains) d'un granulat.

La norme française XP P 18-540 définit le granulat comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, destiné notamment à la confection des mortiers et des bétons ainsi qu'à celle des couches de roulement, de base et de fondation des chaussées et aux voies ferrées.

L'essai consiste à séparer au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimension décroissantes. Les dimensions des mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction du grain maximal de l'échantillon et de la précision requise. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale de matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme XP P18-540 sont les suivantes :

- ✓ fillers 0/D ou  $D < 2$  mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- ✓ sablons 0/D ou  $D \leq 1$  mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- ✓ sables 0/D ou  $1 < D \leq 6,3$  mm ;
- ✓ graves 0/D ou  $D > 6,3$  mm ;
- ✓ gravillons d/D ou  $d \geq 1$  et  $D \leq 125$  mm ;
- ✓ ballasts d/D ou  $d \geq 25$  mm et  $D \leq 50$  mm.

La granularité du granulat, est définie par sa courbe granulométrique, déterminée par analyse au moyen de tamisages successifs, cette courbe doit être intérieure à un fuseau fixé a priori et définissant la granularité admissible du granulat.

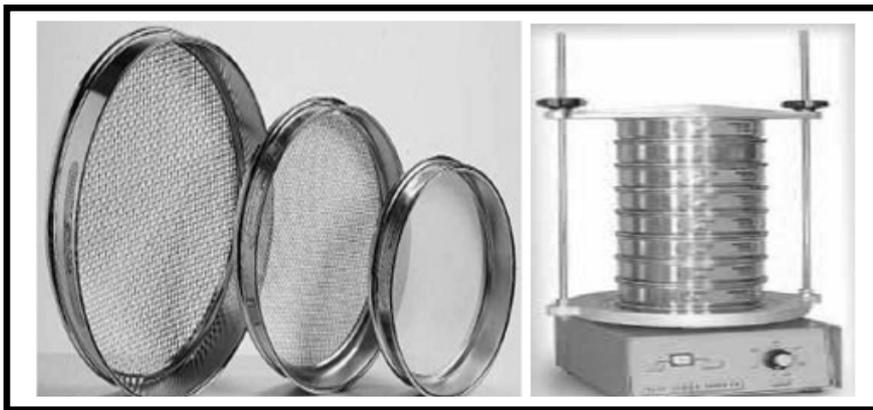
Le module de finesse ( $M_F$ ) est défini comme le caractère plus ou moins fin d'un sable, il est égal au  $1/100^e$  de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivante: 016-0,315-0,63-1,25-2,5-5mm. Nf18-540

$$M_dF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$$

[Source : science des matériaux de construction : présenté par M. CROMARI F ET Mme BENDIS OUIS A 2007-2008 UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID]

Lorsque le module de finesse ( $M_dF$ ) est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier.



**Figure 3: Tamiseur**

*Source:* [Source : science des matériaux de construction : présenté par M. CROMARI F ET Mme BENDIS OUIS A 2007-2008 UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID]

## II.2.2 PLASTIQUES

Les matières plastiques sont des matériaux organiques de synthèses fondés sur l'emploi des macromolécules (polymères). Il est fabriqué à partir de pétrole ou de gaz naturel. Ces deux matières premières sont chauffées et raffinées. Ensuite, leurs monomères sont extraits, puis liés pour créer des polymères.

Les six principales résines comptent pour plus de 90 % de la production totale des emballages domestiques. Il s'agit du polyéthylène téréphtalate ( PET ), du polyéthylène haute densité ( PEhd ), du polychlorure de vinyle ( PVC ), du polyéthylène basse densité ( PEbd ), du polypropylène ( PP ) et du polystyrène ( PS )

Il existe trois grandes catégories de matières plastiques synthétiques : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

- **Thermoplastique**

Les matériaux plastiques composés de polymères à chaîne linéaire ou ramifiée sont en principe fusibles. Les polymères thermoplastiques (ou polyplastés) se déforment et sont façonnables sous l'effet de la chaleur, gardant cette forme en refroidissant (analogie avec la cire des bougies). Ce phénomène réversible permet leur recyclage : les objets sont broyés et « refondus » pour en élaborer d'autres.

Les thermoplastiques sont par ailleurs solubles dans des solvants spécifiques, ce qui permet leur utilisation comme revêtements et colles.

Les thermoplastiques représentent 80% du tonnage des déchets plastique (*fiche informative des plastiques*)

- **Thermodurcissable**

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Ils sont infusibles et ne peuvent pas être recyclés sous forme de matière première. Leur valorisation se limite à l'incinération et, de façon très ponctuelle, à une utilisation comme charges dans les résines vierge. Ils sont des polyesters insaturés, du polyuréthane réticulé et de la bakélite. Les thermodurcissables représentent 20% du tonnage des déchets plastiques (*fiche informative plastique*)

- **Elastomères**

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. Ils sont utilisés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des semelles de chaussures ou pneus.

Dans le cadre de nos expérimentations nous allons utiliser les plastiques souples d'emballage ménagers de toute sorte (PE), et les plastiques un peu rigides tels que les bidons, et les récipients usés (PP). Les caractéristiques des plastiques utilisés sont dans le tableau qui suit.

Tableau1 : propriétés mécaniques et thermiques des plastiques utilisés

Nature des plastiques	Propriétés mécaniques			Propriété thermiques			
	Densité g/cm <sup>3</sup>	Module d'élasticité par traction da N/mm <sup>2</sup>	Module d'élasticité par traction da N/mm <sup>2</sup>	Point de fusion en °c	Température de résistance à la chaleur en continu °c (Point éclairé)	Coefficient de dilatation thermique 1 °c *10 <sup>-5</sup>	Conductivité thermique Kcal/mh°c
<b>PE</b>	1,39	980	1050	170	120	7	7
<b>PP</b>	0,92	140	130	140	100	11	4

Source : Vacour ZI des "Amandiers"

### II.2.3 SOURCE D'ENERGIE

La principale source d'énergie disponible est le bois. La combustion se fait dans un fourneau ordinaire. Le pouvoir calorifique du bois dépend de sa teneur en eau. Le Pouvoir calorifique inférieur du bois (PCI) est

- 1,7 kWh/kg à 60% d'humidité ;
- 4k Wh/kg à 20% d'humidité ;
- 4,4 kWh/kg à 11% d'humidité.

### II.2.4 PAVE

Les pavés sont en général des blocs en béton de forme carrée, rectangulaire ou autobloquant, en fonction des moules on obtient divers types de pavés. Ainsi, les pavés fabriqués au sein d'Helvetas et lors de nos expérimentations sont à base de plastiques, de formes étoiles octogonales, polygonales (voir photo), de 5cm et 3,5 cm d'épaisseur, de coloration noire.

Pour les essais de dilatation thermique les échantillons de pavés retenus sont :(a) 60% de sable et 40% de plastique (Polyéthylène PE, PE-bD, Polypropylène PP, sans distinctions ultérieures) ; (b) 50% de sable et 50% de plastique (PE, PP, PE-bD sans distinctions ultérieures) ; (c) 60% de sable et 40% de plastique PP ; (d) 80% de sable et 20% de plastique.

Un nombre total de 11 échantillons de formes octogonales étoiles et polygonales ont pu être testés selon le plan d'expérience présentée dans le tableau qui suit.

Tableau 2 : Plan d'expérimentation des échantillons reçus

Matériau	$t_{\text{ambiance}}=33^{\circ}\text{c}$	$t = 80^{\circ}\text{C}$
60%/40%	3	3
50%/50% plastique mixte	3	3
60%/40% plastique PP	2	2
80%/20%	3	3

Les nombres indiquent la quantité de pavés testés pour chaque combinaison.



Figure 4 : Pavés produits

## **II.3 METHODESUTILISES**

### **II.3.1 Comportement thermique du sable et plastique**

#### **Procédure**

Un fagot de bois pré-pesé sera utilisé pour amener 1kg de plastiques à la température du point éclair<sup>1</sup> puis au point d'inflammation. Une fois de plus un fagot de bois pré-pesé sera utilisé pour amener 1kg de sable à une température égale à celle du point éclair des plastiques de l'autre foyer.

A l'issu de ces deux essais, nous déterminerons :

- l'intervalle de température de travail pour éviter les possibilités d'inflammation lors des essais ;
- le temps nécessaire dans chaque cas ;
- la quantité de combustibles nécessaires ;

Suite à des difficultés d'avoir le thermomètre ce test n'a pas pu être effectué.

### **II.3.2 Description du procédé**

#### **Phase 1 : préparation du mélange**

Elle commence par le triage des déchets. Ce triage s'effectue en écartant d'abord les déchets plastiques d'une manière générale des autres déchets à savoir les papiers, les fers, les bois et autres. Ensuite au sein des déchets plastiques il est effectué un triage entre les différents types de plastiques à savoir PP, PE, PVC, PS, plastiques durs ou souples. Après le triage ceux qui sont un peu durs sont coupés en petit morceau.

Ensuite peser le sable et les plastiques.

#### **Phase 2 : chauffage**

- Faire le feu de chauffage dans le fourneau; avec du bois coupé en morceau ;
- Mettre les plastiques PP (polypropylène) dans le malaxeur;
- Après fusion totale des PP, mettre du PE (polyéthylène);
- Préchauffer légèrement le sable dans un moitié de fût, la chaleur pour celui-ci provient d'un foyer amélioré à charbon de bois;

---

<sup>1</sup>Point éclair T° minima

le pour laquelle la concentration des vapeurs émises lors de la combustion est suffisante pour produire une déflagration au contact d'une flamme ou d'un point chaud dans les conditions normalisées, mais insuffisante pour produire la propagation de la combustion en l'absence de la flamme "pilote" (source : article 1\_www.pointclair.fr)

- Après fusion total des plastiques, nous mettons le sable tamisé puis nous fermons le malaxeur ;
- Tourner le malaxeur à l'aide du volant jusqu'à l'apparition de fumée blanche à la sortie de la tuyauterie et cela indique que le mélange est bien homogène.

### Phase 3 : Malaxage et de moulage

La pate ainsi obtenu est enlevée à l'aide d'une pèle puis versée dans des moules déposés sur une plaque métallique;

Ces moules sont ensuite misent sous la presse puis pressés.

### Phase 4 : refroidissement et démoulage

- Les pavés dans les moules sont ensuite laissés refroidir à l'air libre après quelque minute puis démoulés et ébarbés.

### II.3.3 Données spécifiques à chaque expérimentation

Au sein d'Helvetas ils utilisaient un ratio de 50% de sable et 50% de plastique avec tout genre de plastiques (PP et PE) mélangés. Pour nos expérimentations nous avons jugés nécessaire de faire des essais non seulement avec le ratio qu'auparavant utilisé à Helvetas mais aussi utilisé des ratios de plastique en dessus et en dessous de leur ratio d'habituel.

En fonction du ratio sable/plastique, de la nature des plastiques (PE, PP), et de l'épaisseur on obtient des pavés de caractéristiques différentes.

Tableau 3 : Donné spécifique à chaque essai

Nom	Donnés			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
<b>Composition des plastiques</b>	2kg de PP et 4,6 kg de PE	6,67kg de PE	4 kg de PP et 6 kg de PE	1 kg de PP et 1,5 kg de PE
<b>Masse de sable</b>	10 kg sable rivière tamisé			
<b>Quantité totale</b>	16,67 kg	16,67 kg	20 kg	12,5 kg
<b>Ratio sable / plastique</b>	60/40	60/40	50/50	80/20
<b>Nombre de pavés obtenus</b>	10	8	12	6

Pendant les essais et pour les besoins de mesures les moules de 5cm et 3,5 cm d'épaisseur ont été utilisées. La quantité de PE et de PP, utilisée respecte le rapport suivant : Masse de PE = 1,5\*Masse de PP.

### **II.3.4 Temps de Fabrication des pavés**

Le temps de fabrication est déterminé à l'aide d'un chronomètre. Les heures de début et fin de l'expérience ainsi que les différentes phases de fabrications des pavés ont été notés.

### **II.3.5 Retrait**

Le retrait est la perte du volume du produit fini (pavé) après refroidissement par effondrement de la structure. Il est principalement dû à la contraction du plastique au refroidissement. La méthode pour mesurer le retrait est la suivante :

On mesure le volume final du produit par la méthode de déplacement de fluide : on met dans un récipient un volume d'eau connu  $V_c$ , puis on plonge le pavé et on note le nouveau volume  $V_i$  (hauteur d'eau si la section récipient est constante). Le volume de pavé  $V_p$  est égal à la différence de volume ( $V_p = V_i - V_c$ ). Le retrait exprimé (en %) est la contraction de volume :  $r = (V_{\text{moule}} - V_{\text{pavé}}) / V_{\text{moule}}$

### **II.3.6 Taux d'absorption d'eau**

Elle consiste à peser la masse du pavé, suivi d'un trempage dans l'eau pendant une durée de 24h. On reprend ensuite la mesure de la masse du pavé après cette opération. Le taux d'absorption se calcule par la formule suivante :  $\alpha = (m_h - m_s / m_h) * 100$ . Le taux normal d'absorption d'eau  $\leq 6$  % en masse.

### **II.3.7 Bilan de matière**

Le bilan de matière est fait pour déterminer la quantité de plastique qui a brûlé pendant la fabrication. Pour cela, on pèse la quantité de matière entrant (poids des plastiques + poids du sable) et quantité de matière sortant (poids total des pavés obtenus).

Quantité de plastique brûlés = quantité de matière entrant – quantité de matière sortant – matière accumulée dans le système.

### **II.3.8 Bilan énergétique**

Elle prend en compte la quantité de chaleur dégagée par les sources d'énergies utilisées et par la combustion des plastiques. On peut déterminer la quantité d'énergie consommée pour chaque expérience à l'aide de la formule suivante connaissant le PCI du combustible utilisé et du plastique.

**Energie dégagée= PCI\* Masse de combustible**

Dans notre étude, le bois est la seule source d'énergie utilisée.

- Le PCI des plastiques est de 33950 kJ/kg
- Le PCI du bois est de 15840 kJ/kg

### II.3.10 Consommation d'énergie par m<sup>2</sup> de pavage

La consommation d'énergie par m<sup>2</sup> de pavage d'un essai = (bilan énergétique de l'essai)/ (nombre de pavé par m<sup>2</sup>)\* nombre de pavés obtenu au cours de l'essai. Vue la forme de nos pavés nous avons 42 à 52 pavés par m<sup>2</sup>.

### II.3.11 Essai de résistance mécanique des pavés

La non disponibilité d'échantillons de formes et dimensions régulières n'a pas permis d'étudier certaines caractéristiques mécaniques, à savoir la résistance à compression, au fendage la charge de rupture transversale. Les différentes formes d'échantillons de pavés produisent ont souffert du même problème (déformations élevées pour le retrait) donc il n'été pas possible de conduire les essais susmentionnés. Par conséquence, seulement les essais de dilatation thermique ont été retenus pour la caractérisation mécanique du pavé.

Des points de mesure identifiants ont été matérialisés sur chaque pavé (voir figure 5) et les distances correspondantes ont été mesurées à l'aide des pieds à coulisse à température ambiante. L'épaisseur a été aussi mesurée en tenant en compte la grande variabilité due aux phénomènes de retraits et aux défauts de production, ainsi que la déformation sur la face arrière. L'inspection visuelle a permis d'observer la finition en fonction de la composition, les éventuelles inclusions de matériau non brûlé ou de matériau étranger. Les échantillons qui devaient être chauffés ont été mis dans l'étuve à la température souhaitée (80°C) pendant 24h, puis mesurés pour apprécier les phénomènes de dilatation thermique.

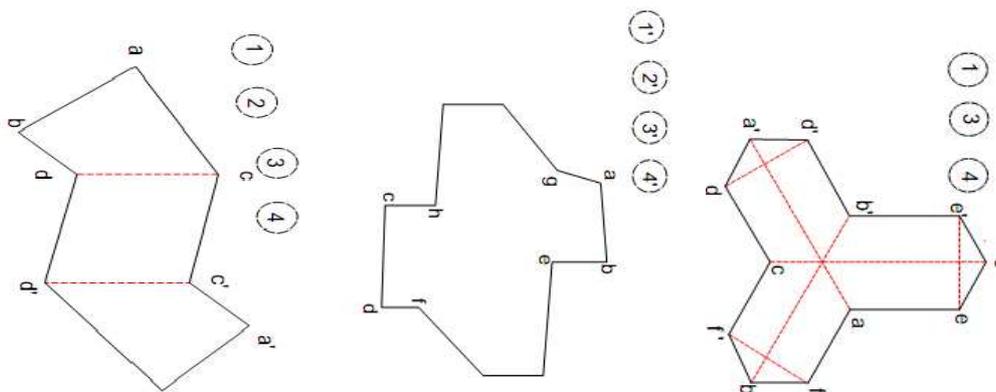


Figure 5 différents points de mesure des pavés testés

L'analyse des mesures dimensionnelles sur les échantillons avant et après chauffage a permis de déterminer les paramètres de dilatation thermique des pavés.

Premièrement, il faut observer que la forme géométrique du pavé privilégie deux directions de dimension comparable (largeur et longueur) par rapport à l'épaisseur. D'ici on peut conclure que le coefficient de dilatation thermique linéaire ne peut pas décrire correctement le phénomène simulé au laboratoire, et donc il faut adopter le modèle de dilatation thermique superficielle. La dilatation thermique superficielle est décrite par l'équation suivante :

$$\Delta S = \sigma S_1 \Delta T$$

Où  $\Delta S$  est la variation de surface,  $\sigma$  est le coefficient de dilatation superficielle,  $S_1$  est la surface initiale et  $\Delta T$  est la variation de température.

En développant l'équation précédente, on obtient la formulation du coefficient de dilatation superficielle  $\sigma$  [ $m^2/m^2 \cdot ^\circ C$ ] :

$$\sigma = \frac{S_2 - S_1}{S_1 \cdot (T_2 - T_1)}$$

Où  $S_1$  est la surface initiale,  $T_1$  est la température initiale,  $S_2$  est la surface finale et  $T_2$  est la température finale. Dans le cas où le matériau est isotrope, la relation suivante existe entre le coefficient de dilatation superficielle  $\sigma$  et le coefficient de dilatation linéaire  $\lambda$  [ $m/m \cdot ^\circ C$ ] :

$$\sigma = 2 \lambda$$

Pour vérifier le degré d'isotropie du matériau (et donc pour pouvoir appliquer la relation évoquée), les variations de dimensions pour chaque longueur mesurée ont été considérées singulièrement pour le calcul d'un coefficient de dilatation thermique linéaire fictive, qui n'as pas une signification physique mais qui sert pour comparer les dilatations dans chaque direction.

### **Aspect économique du projet**

Les coûts d'achat des matériaux, du combustible utilisé ont été estimés. Les coûts de production d'un pavé puis celui du  $m^2$  de pavage ont été ensuite évalués. Suite à cela est déduit le bénéfice acquis.

### III .RESULTATS-DISCUSSION- ANALYSE

#### III.1 RESULTATS

Le tableau ci-dessous donne les résultats de l'analyse granulométrique de sable

Tableau 4 : Analyse granulométrique de sable : NF P 18-560

Modules AFNOR	Tamis mm	Poids initial sec Ms: 2000,09 g			
		Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
50	80				
49	63				
48	50				
47	40		0,00		
46	31,5		0,00		
45	25		0,00		
44	20		0,00		
43	16		0,00		
42	12,5		0,00		
41	10		0,00		
40	8		0,00		
39	6,3		0,00		
38	5		0,00		
37	4		0,00		
36	3,15		0,00		
35	2,5		0,00		
34	2		0,00		
33	1,6	0,00	0,00		100%
32	1,25	4,05	4,05	0,20%	99,80%
31	1	82,37	86,42	4,32%	95,68%
30	0,8	143,05	229,47	11,47%	88,53%
29	0,63	186,52	415,99	20,80%	79,20%
28	0,5	329,26	745,25	37,26%	62,74%
27	0,4	285,72	1030,97	51,55%	48,45%
26	0,315	387,79	1418,76	70,93%	29,07%
25	0,25	282,33	1701,09	85,05%	14,95%
24	0,2	137,85	1838,94	91,94%	8,06%
23	0,16	77,56	1916,50	95,82%	4,18%
22	0,125		1916,50	95,82%	
21	0,1		1916,50	95,82%	
20	0,08	65,62	1982,12	99,10%	0,90%
19	0,063				
18	0,050				
17	0,040				

Module de finesse Mdf = 2,96  
 Coefficient de HAZEN Cu = 3 ; Coefficient de courbure Cc =1,14



La figure suivante donne l'évolution des temps de travail en fonction des essais :

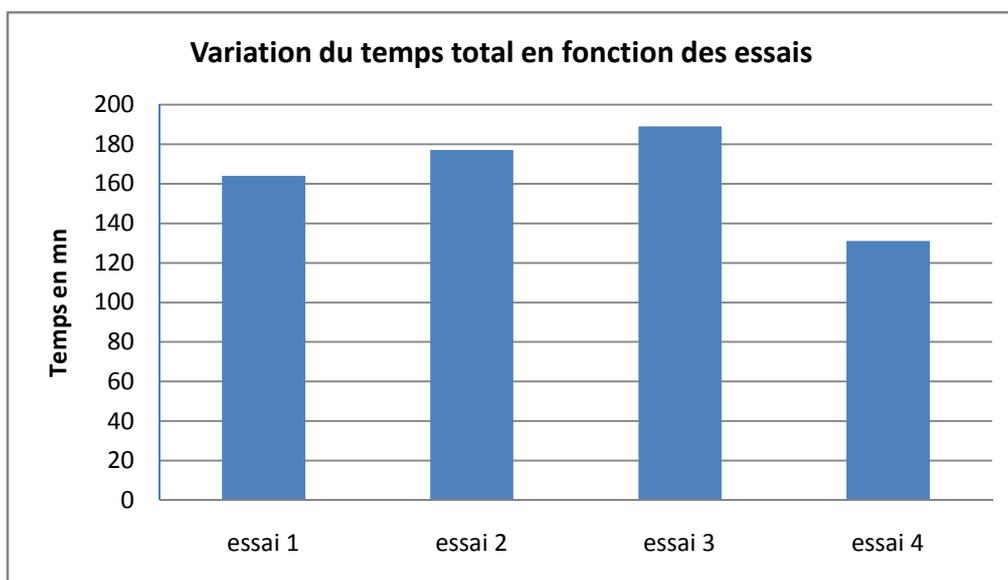


Figure 7 : Variation du temps de travail en fonction des essais

Le retrait des différents essais sont mentionnés dans le tableau qui suit.

Tableau 6: Résultat du taux d'absorption des différents types de pavés

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Epaisseur
<b>Masse sèche (kg)</b>	1,7	1,5	1,5	1,7	5 cm
	1,6	1,7	1,8	2	3,5 cm
<b>Masse humide (kg)</b>	1,7	1,5	1,5	1,5	5 cm
	1,6	1,7	1,8	1,7	3,5 cm
<b>Taux d'absorption (%)</b>	0	0	0	0	5 cm
	0	0	0	0	3,5 cm

Tableau 7: Résultat de l'essai de retrait

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Epaisseur de moule
Volume moule (l)	0,997	0,997	0,997	0,997	5 cm
	1,435	1,435	1,435	1,435	3,5 cm
Volume pavé (m <sup>3</sup> )	0,977	0,981	0,837	0,987	5 cm
	1,394	1,403	1,353	1,415	3,5 cm
Volume retrait (m <sup>3</sup> )	0,0199	0,016	0,16	0,01	5 cm
	0,041	0,032	0,082	0,02	3,5 cm
Retrait (en %)	2%	1,6%	16%	1%	5 cm
	2,8%	2,2%	8,2	1,4%	3,5 cm

La figure qui suivante nous montre l'évolution du dis retrait

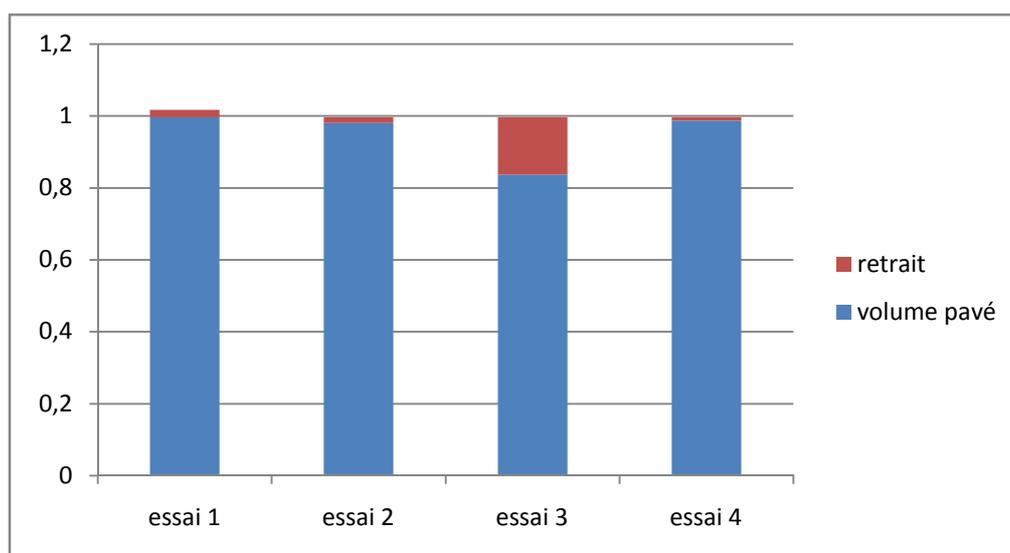


Figure 8 : Variation du retrait en fonction des essais

Le bilan de masse de chaque expérimentation est donné dans le tableau 6

Tableau 8: Bilan de masse de chaque essai

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
<b>Quantité de matière entrant</b>	16,67 kg	16,67 kg	20 kg	12,5 kg
<b>Quantité de matière sortant</b>	15,4 kg	12,6 kg	14,2 kg	10,8 kg
<b>Quantité de matière cumulée</b>	1,2 kg	2,5 kg	3 kg	1,2 kg
<b>Quantité de matière brûlée</b>	0,07 kg	1,57 kg	2 kg	0,5 kg

Les tableaux 9, 10, 11 12 donne respectivement les bilans énergétiques de l'essai 1, 2, 3, 4.

Tableau 9: Bilan énergétique de l'essai 1

<b>Essai 1</b>			
	Quantité (kg)	PCI (KJ/kg)	Energie utile (MJ)
<b>Plastique brûlé</b>	0,07	33950	2,37
<b>Quantité de bois brûlé</b>	12	15840	190,08
<b>Charbon de bois</b>	0,4	30000	12
<b>Totale énergie (hors plastique)</b>			202

Tableau 10: Bilan énergétique de l'essai 2

<b>Essai 2</b>			
	Quantité (kg)	PCI (kJ/kg)	Energie utile(MJ)
<b>Plastique brûlé</b>	1,57	33950	53,301
<b>Quantité de bois brûlé</b>	13	15840	205,920
<b>Charbon de bois</b>	0,4	30000	12
<b>Totale énergie (hors plastique)</b>			217,920

Tableau 11: Bilan énergétique de l'essai 3

<b>Essai 3</b>			
	Quantité (kg)	PCI (KJ /kg)	Energie utile(MJ)
<b>Plastique brûlé</b>	3	33950	101,850
<b>Quantité de bois brûlé</b>	16	15840	253,44
<b>Charbon de bois</b>	0,4	30000	12
<b>Totale énergie (hors plastique)</b>			265,44

Tableau 12: Bilan énergétique de l'essai 4

<b>Essai 4</b>			
	Quantité	PCI	Energie utile
<b>Plastique brûlé</b>	0,5	33950	16,975
<b>Quantité de bois brûlé</b>	9,7	15840	153,64
<b>Charbon de bois</b>	0,4	30000	12
<b>Totale énergie (hors plastique)</b>			165,64

La figure suivante donne la variation d'énergie de chaque expérimentation

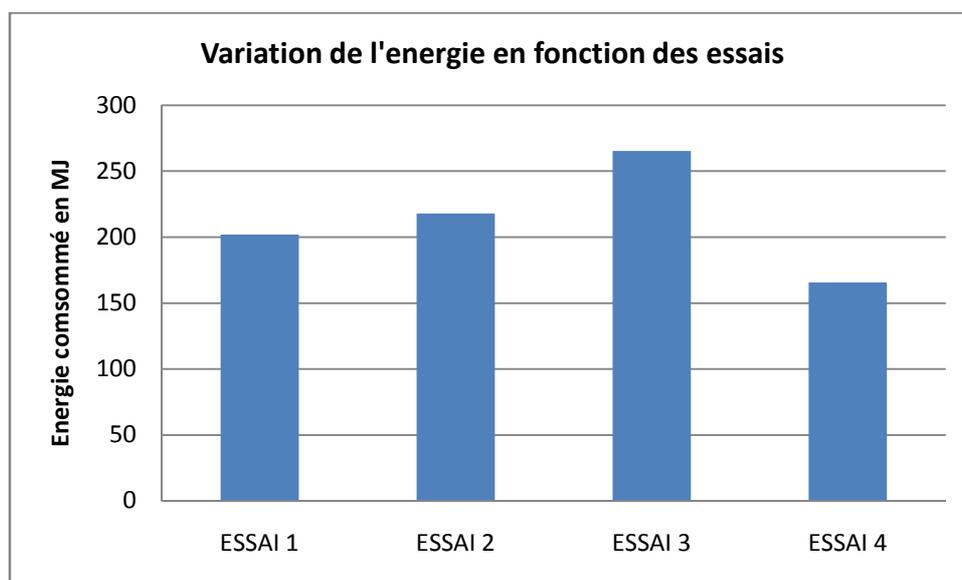


Figure 9: Variation de l'énergie en fonction des essais

Tableau 13 : consommation par m<sup>2</sup> de pavage

	<b>Essai 1</b>	<b>Essai 2</b>	<b>Essai 3</b>	<b>Essai 4</b>
<b>CE/m<sup>2</sup> de pavage</b>	4,39	4,73	13,57	8,58

La consommation d'énergie par m<sup>2</sup> de pavage de chaque essai est illustrée sur la figure qui suit.

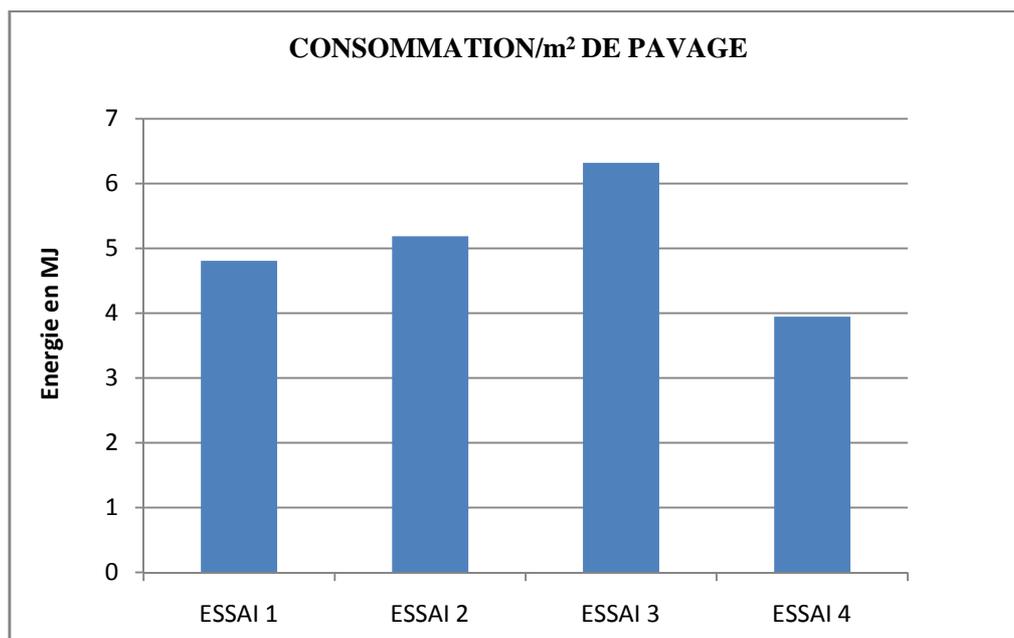


Figure 10: variation de la CE/m<sup>2</sup> de pavage

#### Résultats du test de dilatation thermique

Tableau 14 : Variation de dimension des pavés après chauffage à 80°C : type de moule étoile

	Avant chauffage			Après chauffage		
	Essai 1	Essai 3	Essai 4	Essai 1	Essai 3	Essai 4
aa	144,14	149,08	148,46	145,54	150,05	146,73
bb	147,05	149,74	143,61	148,12	147,03	145,75
cc	145,75	151,82	147,22	146,35	152,71	148,83
ee	78,03	86,88	75,72	77,83	87,85	83,21
ff	76,82	80,23	76	77,15	80,10	76,40
dd	77,29	75,19	75,25	77,15	75,35	77,59
épaisseur	53,57	52,5	53,35	54,26	53,73	53,13

aa, bb, cc, ee, ff, dd, sont les distance mesurées (voir figure 5).

Tableau 15 : Variation de dimension des pavés après chauffage à 80°C : type de moule octogonale

	Avant chauffage				Après chauffage			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
<b>ab</b>	90,23	90,92	92,98	86,34	90,60	92,44	93,5	86,35
<b>a'b'</b>	92,25	87,06	88,20	87,5	92,13	88,92	89	88,21
<b>cd</b>	100,70	98,80	98,92	96,20	100,99	98,92	99,64	97,18
<b>c'd'</b>	106,34	97,05	98,94	93,72	106,61	97,08	98,44	94,61
<b>épaisseur</b>	54,09	54,67	54,22	56,39	54,95	55,10	55,67	56,19

ab, a'b', cd, c'd' sont les distance mesurées (Voir figure 5).

Tableau 16 : Variation de dimension des pavés après chauffage à 80°C : type de moule polygonale

	Avant chauffage				Après chauffage			
	Essai 1'	Essai 2'	Essai 3'	Essai 4'	Essai 1'	Essai 2'	Essai 3'	Essai 4'
<b>ab</b>	85,43	84,63	85,12	86,81	86,85	85,22	85,72	87,05
<b>cd</b>	84,54	86,9	85,09	86,67	84,67	87,69	85,34	86,40
<b>ef</b>	128,17	129,5	127,57	127,02	128,42	131,47	130,60	127,14
<b>gh</b>	129,78	129,97	137,78	127,62	133,04	131,88	139,43	131,99
<b>épaisseur</b>	32,2	31,2	32,05	32,8	32,4	31,7	32,18	33,5

ab, cd, ef, gh, sont les distances mesuré (Voir figure 5).

La variabilité des résultats dans une bande relativement étroite de valeur permet de valider l'hypothèse de isotropie du matériau et par conséquence d'appliquer l'équation susmentionnée pour le calcul de  $\lambda$  (Tableau 17).

Tableau 17 : Coefficients de dilatation thermique superficielle et linéaire calculés

Échantillon	$\Delta S$ [mm <sup>2</sup> ]	$\Delta t$ [°]	$\delta$ [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> °C]	$\lambda$ [m/m°C]
<b>N1 60/40</b>	104,5	47	1,01E-4	0,5 E-4
<b>N1-1 60/40</b>	139	47	3,98E-4	1,99 E-4
<b>N1' 60/40</b>	551,1	47	3,09 E-4	1,545 E-4
<b>N2 60/40</b>	296	47	2,92 E-4	1,46 E-4
<b>PP</b>				
<b>N2' 60/40</b>	410	47	2,56 E-4	1,28 E-4
<b>PP</b>				
<b>N3 50/50</b>	196	47	1,93 E-4	0,965 E-4
<b>N3-1 50/50</b>	332	47	4,06 E-4	2,03 E-4
<b>N3' 50/50</b>	570,2	47	3,14 E-4	1,57 E-4
<b>N4 80/20</b>	258	47	2,6 E-4	1,3 E-4
<b>N4-1 80/20</b>	272	47	8,25 E-4	4,125 E-4
<b>N4' 80/20</b>	435	47	2,43 E-4	1,215 E-4

N1, N2, N3, N4 indiquent l'échantillon pour le type de moule octogonale. N1-1, N3-1 et N4-1 indiquent les échantillons pour le type de moule étoile. Les échantillons du moule de 3,5 cm d'épaisseur sont représentés par N1', N2', N3', N4'.

La norme européenne EN 1338 – Pavés en béton a été analysée pour en vérifier les requis.

Vue la contrainte déjà mentionnée, il est impossible de procéder aux essais mécaniques classiques, l'analyse a été conduite en ce qui concerne la vérification dimensionnelle des blocs. En fonction de l'épaisseur des éléments, un écart bien déterminé par rapport aux dimensions de fabrication est autorisé. Pour les pavés plus gros, des limites sont également fixées pour la différence des diagonales ainsi que des exigences pour la planéité de la surface supérieure (surface visible) :

- Rapport longueur/épaisseur  $\leq 4$
- Principales tolérances dimensionnelles
- Longueur et largeur < 100 mm :  $\pm 2$  mm ;  $\geq 100$  mm :  $\pm 3$  mm
- Epaisseur < 100 mm :  $\pm 3$  mm
- Avec aucune mesure < 77 mm pour T 3-4
- Avec aucune mesure < 57 mm pour T 5
- Epaisseur  $\geq 100$  mm :  $\pm 4$  mm

Tableau 18 dimensions réelles des pavés

	N 1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
L	220	145,6	250	230	251	225	297	149,88	225	257	146,43
l	99	145,6	190	90	200	95	250	149,88	90	193	146,43
e	54,22	53,57	32,2	54,67	31,2	54,22	32,05	52,5	56,39	32,8	53,35
L/e	4,05	2,7	7,7	4,2	8,04	4,1	9,2	2,8	3,9	7,8	2,7

L: longueur, l: largeur, e : épaisseur, N 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 indiquent la numérotation des pavés mesurés

### Evaluation du coût de production

Pour une production de ratio 50/50 on obtient 12 pavés.

Le m<sup>2</sup> de pavés plastique coûte 6000FCFA à Bamako par contre à Bougouni il ne coûte que 3500FCFA. Le prix du sable est de 27500FCFA le 7 m<sup>3</sup> de benne (correspondant à 10500 kg à peu près) soit 3FCFA/kg. Un chargement de bois coûte 3000FCFA (estimons à 210 kg) soit 14 FCFA/kg.

Le tableau suivant donne les résultats de l'évaluation économique de la production de pavé.

Tableau 19 Calcule économique

	Quantité (kg)	Prix/kg (FCFA)	Prix total/matériaux (FCFA)	Coût total (FCFA)	Coût d'un pavé (FCFA)	Coût du m2 de pavage (FCFA)
Sables	10	3	30	764	63,67	2674
Plastiques	10	50	500			
Charbon de bois	0,4	25	10			
Bois	16	14	224			

### III.2 DISCUSSION ET ANALYSE

L'analyse granulométrique du sable montre qu'il contient très peu d'argile. Le module de finesse 2,96 (tableau 4) montre que le sable est peu grossier, et non uniforme.

Le temps de malaxage est large d'une manière globale et diffère d'un essai à l'autre (Voir tableau 5). Cela est dû au système de malaxage qui n'est pas efficace et au dynamisme du personnel qui diffère du jour au lendemain.

La durée de fusion des plastiques est autant plus élevée que la quantité de plastique est grande (tableau 5) ce qui explique le temps de fusion des plastiques de l'essai 3 plus élevé par rapport à l'essai 1 qui, à son tour est plus élevé que l'essai 2. La durée de l'essai 2 est plus longue que l'essai 1 car les PE sont moins faciles à fondre que les PP. En effet, le PE a un point éclair de 120°C contre 100°C pour les PP [Vacour - Z.I des "Amandiers" extrait du rapport 2iE, Valorisation des plastiques souples issus des déchets ménagers et assimilés, juin 2011].

Suite aux modifications faites aux moules utilisées pour notre processus (diminution de l'épaisseur des moules. suppression de la bordure de moule qui servait d'esthétique mais qui à cause, le pavé est déformé au démoulage) nos temps de refroidissement ont été de 52 minutes maximal en moyenne. Ce temps de refroidissement variait aussi en fonction des ratios sable/plastique plus il y a de plastiques plus le refroidissement est lent.

Il n'y a pratiquement pas d'absorption d'eau quelque soit le type de ratio (voir tableau 6). Cela est normal étant donné que le taux d'absorption doit être inférieur à 6%.

Au regard du tableau 8, il est remarquable que la quantité de matière brûlée dépend de chaque expérimentation. En ce qui concerne l'essai 1, elle est moins de celle de l'essai 2, cela est due au fait qu'en brûlant, les PE perdent plus de matière par rapport aux PP.

Dans notre cas les pertes surviennent également au niveau de la fermeture du malaxeur et ces pertes sont autant inférieures que la manœuvre est dynamique. Ils y a également des pertes de matières dues à la viscosité de la pâte, plus celle-ci est visqueuse plus on a des stocks irrécupérables dans le malaxeur. Il faut reconnaître que souvent le feu utilisé est souvent plus grand qui a entraîné la combustion des plastiques.

Plus la quantité de matière est grande plus l'énergie utilisée est élevée (figure 9). La quantité d'énergie de l'essai 1 est inférieure à celle de l'essai 2, due au fait que les PE sont plus difficiles à fondre que les PP comme mentionné plus haut. En effet, en premier lieu, nous assistons à une coagulation des PP avant de devenir liquide.

Plus le ratio contient beaucoup de plastique plus le retrait est important. Ce qui explique le retrait important constaté à l'essai 3(ratio 50/50). (Voir figure 8)

Les conclusions suivantes pour le test de dilatation thermique peuvent être tirées:

La variabilité des dimensions des pavés est vraiment remarquable sous l'effet de la chaleur. Le coefficient de dilatation thermique linéaire des pavés testés varie entre  $0,5E-4$  et  $4,125E-4$   $m/m^{\circ}c$ . A titre d'exemple et pour comparaison, le coefficient de dilatation thermique linéaire de certains matériaux sont résumés dans le Tableau 20 en annexe.

Le résultat se justifie si on considère les coefficients de dilatation thermique linéaire du PP et celui du PE, qui sont du même ordre de grandeur malgré les erreurs de lecture qui ne manquent pas. En conclusion, les caractéristiques de dilatation thermique des pavés sont gouvernées par la fraction de plastique ajoutée.

Du fait que les plastiques utilisés montrent presque les mêmes valeurs de coefficient de dilatation, il n'existe pas des différences entre les trois mélanges étudiés.

En fonction des dimensions caractéristiques identifiées sur les blocs, les écarts entre valeur nominale et valeur réelle ont été calculés (voir tableau 18). Les pavés en plastique, sans distinction entre les différents ratios montrent une dispersion de résultats très accentuée et des écarts non admissibles selon la norme EN 1338, et une variabilité dimensionnelle élevée. Les écarts sur l'épaisseur sont exacerbés par le phénomène de retrait déjà analysé. Les pavés en béton par contre montrent une uniformité des dimensions remarquable ainsi qu'un écart très petit par rapport aux dimensions nominales.

Le coût de production du  $m^2$  de pavage dans notre cas est de 2674 FCFA hors main d'œuvres et il est vendu à 3500 FCFA. Vue le prix de vente des pavés on a un gain de 826 FCFA/ $m^2$  de pavage. Ce gain est minime quand on inclut le coût de main d'œuvre, cette situation est due au fait que la production se fait dans une ville où le prix du  $m^2$  de pavage en béton varie entre 3500FCFA à 4000 FCFA.

#### IV. CONCLUSION- PERSPECTIVE- RECOMMANDATION

##### IV.1 CONCLUSION

La collecte des déchets à Bougouni est aujourd'hui loin d'être optimale mais il faut rappeler que c'est une filière très récente et encore peu structurée qui doit faire face à des défis spécifiques. Ce qui en est de même pour sa valorisation car la valorisation des plastiques souples nécessite de maîtriser pleinement les étapes techniques, les coûts et les impacts environnementaux de la filière.

Or notre procédé présente de nombreuses lacunes techniques. Son principal handicap est le manque de contrôle des paramètres techniques utilisés. Par contre avec le type de prototype le personnel n'est pas en contact direct avec le dégagement dû aux plastiques brûlés, même si ces fumées ne sont pas finalement traitées pour protéger la nature.

Après examen des résultats obtenus des retraits, de la dilatation thermique, de l'absorption d'eau des pavés fabriqués à partir des déchets plastiques et des sables disponibles à savoir sable de rivière on peut déduire les constatations suivantes :

- ✓ les valeurs optimales des retraits dans nos conditions et les matériaux utilisés se situent dans l'intervalle [60% ,80%] de sable ;
- ✓ pour le coefficient de dilatation thermique, les valeurs optimales se situent dans l'intervalle [60% 80%] de sable aussi.
- ✓ la combustion partielle des plastiques dans le four est à éviter : elle produit des particules d'imbrulés qui peuvent constituer des aérosols dangereux. Une fraction de ces particules est incorporée dans le plastique, lui conférant sa couleur noire au produit fini. Deux mesures sont à prendre:
  - le contrôle de la température du four, dans des limites compatibles avec les températures de fusion et le point éclair,
  - et sa mise en pression donc son étanchéisation pour éviter les entrées d'air.
- ✓ le refroidissement à l'air libre recommandé car avec l'eau, on constate une fissuration souvent immédiate du pavé.
- ✓ cependant, le non-respect des tolérances géométriques déqualifie le produit quand on fait une comparaison aux blocs en béton, les moules sont conçus sans respect de la norme EN 1338.

Il convient de garder à l'esprit que le recyclage des plastiques doit avant tout permettre de produire à faible coût des biens dont un besoin a été clairement identifié par les populations locales.

Le pavé en plastique peut concurrencer face à celui du béton du point de vue supériorité technique qu'en termes de coût. D'autres domaines sont à explorer comme la production de tuyaux par extrusion ou d'éléments imputrescibles en assainissement rural.

## **IV.2 RECOMMANDATION ET PERSPECTIVE**

En perspectives nous pensons qu'il faudra :

### **Du point de vue procédé**

- ✓ un prototype de fabrication permettant de maîtriser et fixer les valeurs de température, surtout il faut une modification du malaxeur pour permettre le bon malaxage de la pâte afin de réduire le temps de travail et augmenterai la qualité du produit fini;
- ✓ mener un plan d'expérience plus détaillé tenant compte de tous les paramètres ;
- ✓ installer un système de captage de fumée dégagée lors de la combustion des plastiques et traiter les polluants suivants : CO, NOx, SOx etc;
- ✓ mener des tests ultra violets pour le contrôle de qualité : la destruction des pavés sous les rayons solaires ;
- ✓ mener les tests de poinçonnements ;

### **Du point de vue sécurité du personnel :**

- ✓ le port des matériels de protection doit être exigé à tous les personnels de travail ;
- ✓ la mise en place d'un système de contrôle de température de l'unité ;
- ✓ l'adoption d'un système de prévention d'éventuel incendie ;
- ✓ le contrôle des accès et l'interdiction à toute personne non autorisée comme les enfants ;

On a constaté que sous une température élevée (non identifiée car le personnel de travail ne possède pas de thermomètre) il se passe une combustion des plastiques dans le malaxeur qui entraîne un éclatement soudaine et dangereux de celui-ci. Donc nous recommandons à la structure la mise en place de ses mesures de sécurité pour la protection du personnel.

**Du point de vue social :**

La valorisation des ordures en pavés est ouverte à toutes les classes sociales. Donc l'implication forte des femmes dans le domaine serait un atout non négligeable étant donné qu'elles jouent un rôle important dans l'assainissement. Le système d'achat des plastiques n'est pas du tout organisé.

Nous suggérons d'entreprendre en perspective un système d'encouragement par exemple où les femmes seront au cœur de la vente de ces déchets plastiques.

Adopter une politique de vulgarisation du produit car les gens ne le connaissent pas jusqu'à présent.

**BIBLIOGRAPHIE**

- Adepoju G. O. et A.J Kumuyi (2002), La gouvernance et la gestion des déchets en Afrique
- Amfouchet (2010) Recyclage Et Valorisation, Le Monde du Travail P3
- Expérience de l'unité de fabrication de pavés plastiques par Cascade Fonderie à travers le PSRDO/CER ; **Séminaire CIFAL, du 21 au 25 février 2011**
  - Ghomari f. & bendi-ouis a. (2007 – 2008) science des matériaux de construction travaux pratiques
  - Gilles D et Ousmane S. (2009), Valorisation Des Déchets De Sachets Plastiques: Application Dans Les Villes Subsahariennes Enviro-BF:Environnement au burkina faso
  - Hélène Gervais (2010), Les plastiques Fiches informatives RECYC-QUÉBEC
  - Institut des plastiques et de l'environnement du Canada : [www.cpia.ca/epic](http://www.cpia.ca/epic)
  - Karine sperando (2001) identification des facteurs mobilisants des stratégies de gestion des ordures ménagères mises en œuvre par les collectivités locales
  - Le recyclage nous concerne tous/ [www.valorlux.lu](http://www.valorlux.lu)
  - RECYCLAGE DES SACHETS PLASTIQUES A KINSHASA UN PROJET D'INGENIEUR (ISF) Belgique ; jean-christophe MAISIN, coopérant ISF, Kinshasa, RD ; Congo Danien JEANNIOT , responsable opérationnel ISF, Bruxelles, Belgique Auteur
  - Maliweb. (2010), Environnement Sachets plastiques : Bientôt interdits dans notre pays [Klaxon](#)
  - rapport 2iE, Valorisation des plastiques souples issus des déchets ménagers et assimilés, juin 2011
  - Résumé-proDoc-GDAE-CT Helvetas Mali
  - [Theodino (2009) Les Matières Plastiques Sciences P 5
  - GUIDE DES DÉCHETS AGRICOLES NON ORGANIQUES DES PYRÉNÉES-ORIENTALES-Chambred' Agriculture Roussillon
  - Valorisation des plastiques souples en pavés/ MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER SPECIALISE EN GENIE SANITAIRE ET ENVIRONNEMENT Présenté et soutenu publiquement le 01/10/2010 par **SODJE Danserbe**

**Sites :**

- David Naulin (2009):[http://www.cdurable.info/Les-dechets-plastiques-mortels-envahissent-nos-oceans-Trash-Vortex, 2104.html](http://www.cdurable.info/Les-dechets-plastiques-mortels-envahissent-nos-oceans-Trash-Vortex,2104.html)
- <http://www.prefabeton.com/plugins/fckeditor/UserFiles/File/ENVIRONNEMENT/PAVES/norme2010-2011-paves.pdf> (23 05 2011)
  - <http://www.plastiques-agriculture.com>

*ANNEXES 1 : procédés (moule, presse, flux de plastique pavés) et résultats ..... 39*  
*ANNEXES 2 : généralité sur les ordures ménagères ..... 40*  
*ANNEXES 3 : Risques de combustion des matières plastiques ..... 41*

**ANNEXES 1 : procédés (moule, presse, flux de plastique pavés) et résultats**

Tableau 20 : Coefficients de dilatation thermique linéaire de quelque matériau de référence

Matériau	$\alpha$ [m/m°C]
Béton	1.00E-5
Acier	1.15E-5
Pierre Naturelle	5 à 13E-6
Polystyrène	8E-3
Polypropylène	1.50 à 1.80E-4
Polyéthylène	1.03 à 2.00E-4

Les différentes types de moules utilisés par Helvetas



Figure 11 : Différent types des moules



Figure 12 : système de presse

## **ANNEXES 2 : généralité sur les ordures ménagères**

### **1) Production et Composition des ordures ménagères**

Les **ordures ménagères** (OM), ou **déchets ménagers** sont les déchets issus de l'activité quotidienne des ménages. Elles incluent également, en général, les déchets des commerçants et artisans, qui suivent les mêmes circuits de traitement. La composition des ordures ménagères est très variée. On y trouve notamment des matières organiques putrescibles (éventuellement compostables dans les jardins en amont des circuits de collecte) et de nombreux matériaux recyclables issus des emballages : verre, métal, matière plastique, carton et papier de déchet spéciaux, de combustibles divers et d'incombustibles divers.

### **2) Différent type de valorisation**

Il existe plusieurs filières de valorisations des ordures ménagères :

- ✓ Filière de valorisation énergétique, il s'agit de :
  - L'incinération avec valorisation énergétique ;
  - Elaboration de combustibles dérivés par des procédés mécanique (tri, broyage, séchage etc) ;
  - Elaboration de combustibles dérivés par des procédés thermiques (thermolyse, gazéification) ;
  - Elaboration de combustibles dérivés par des procédés biologique (méthanisation) ;
- ✓ Filière de valorisation des matières premières minérales :

- Valorisation des inertes, des métaux ;
- ✓ Filière de valorisation en science des matériaux :
- Valorisation des plastiques ; des papiers et cartons, etc...)
- ✓ Filière de valorisation agricole :
- Compostage, etc....)
- ✓ Filière d'élimination :
- Incinération sans valorisation ;
- Décharge contrôlée ou enfouissement.

### ***ANNEXES 3 : Risques de combustion des matières plastiques***

Les matières plastiques sont presque toujours fabriquées à partir d'une matière première : le pétrole. Celui-ci provient de la décomposition lente de végétaux qui contiennent de la cellulose. De ce fait, les matières plastiques contiennent toutes des atomes de carbone et d'hydrogène.

Outre les dangers physiques que peut présenter le contact avec une flamme ou un produit en fusion, la combustion de matière plastique présente également des dangers chimiques. Lors de leur combustion dans l'air, les plastiques ne contenant que des atomes de carbone et d'hydrogène réagissent pour donner du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Or l'augmentation du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère entraîne une élévation de température moyenne de notre planète- l'effet de serre- et peut entraîner une modification du climat. Etant donné que les gaz responsable de l'effet de serre sur la terre sont : la vapeur d'eau (50%), le dioxyde de carbone (25%) et d'autres gaz comme le méthane, le dioxyde d'azote et les composés CFC (chlorofluorocarbures).

Si le dioxyde est en quantité insuffisante, la combustion est incomplète ; il se forme alors de l'eau et du monoxyde de carbone qui est un gaz inodore et mortel.

Certaines matières plastiques peuvent contenir d'autres atomes comme le chlore et l'azote, lors de la combustion de celles - ci des gaz toxiques se forment comme le chlorure

d'hydrogène (gaz irritant, dangereux pour les voies respiratoires et qui augmente l'acidité des pluies) ou le cyanure d'hydrogène (gaz mortel).

Il est donc très dangereux pour l'homme et pour son environnement de réaliser la combustion de ces matières plastiques hors d'usines d'incinération équipées pour récupérer ces gaz toxiques qui se dégagent.

Tableau 21 : Produit obtenu lors de la pyrolyse ou la combustion des plastiques

substance	produits
polyamide 6-6	CO <sub>2</sub> , CO, NH <sub>3</sub> , HCN
polychlorure de vinyle	HCl, CO <sub>2</sub> , CO
polyéthylène téréphtalate	oléfines, acide benzoïque, CO, CO <sub>2</sub>
polystyrène	styrène, CO, CO <sub>2</sub>
polyuréthane	CO <sub>2</sub> , CO, HCN, benzonitrile, acétonitrile, NH <sub>3</sub>
polyoléfine (polyéthylène, polypropylène)	CO <sub>2</sub> , CO, alcanes, alcènes, hydrocarbures cycliques

Source : [Physique chimie 3<sup>ème</sup> chapitre 6 : La combustion des matériaux organiques]