



ZiE
Fondation ZIE

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

***ETUDE TECHNIQUE DE PRODUCTION D'ISOLANTS
PERFORMANTS SAINS ET DURABLES A PARTIR DE
DECHETS DE COTON***

Mémoire pour l'obtention du
Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
Option : **GENIE CIVIL**

Présenté et soutenu publiquement le [Date] Juin 2012 par :

Daouda Tanga YAMEOGO

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM

Prénom NOM

Prénom NOM

Travaux dirigés par :

Dr. Adamah MESSAN

Prof. François TSOBNANG

Mme NIKIEMA

(Directrice Général de CC3D)

Promotion [2011/2012]

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire,

*A Jésus Christ le sauveur qui n'a cessé de présenter
mes vœux à Dieu le Père,*

*A mon père qui a cru à ma bonne volonté en
m'offrant cette formation de master à ZiE,*

*A ma mère qui n'a cessé de me soutenir par ses
prières et ses conseils,*

*A mes frères et sœurs pour leurs prières à mon
égard.*

REMERCIEMENT

Je voudrais très chaleureusement remercier tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réussite de ce travail.

Je remercie particulièrement mon encadreur principal Dr. MESSAN pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à M. TSOBNANG, Responsable de l'UTR Génie Civil pour son encadrement, sa disponibilité; Je tiens également à remercier M. Ismaila GUEYE, Enseignant Chercheur à 2iE pour son encadrement et ses conseils;

Je remercie aussi Mme Elodie HANFF pour son encadrement et ses conseils

Je remercie également M. Koffi KOKOLE, Enseignant à 2iE et Responsable du laboratoire Eco-Matériau.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à la Directrice Générale de CC3D pour avoir initié ce stage et pour ses multiples conseils.

Je remercie tous mes promotionnaires étudiants en master 2 à 2iE, plus particulièrement mes camarades de master 2 en Génie Civil pour leur esprit de fraternité et de collaboration qu'ils m'ont témoigné durant notre formation.

Je tiens enfin à exprimer ma profonde reconnaissance, à tous ceux qui, de prêt ou de loin, m'ont encouragée et soutenue durant ces années de formation.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de recherche porte sur l'étude technique de mise en œuvre, de caractérisation des propriétés thermiques d'isolants thermiques faits à base de déchets de coton.

La mise en œuvre a été de rechercher trouver les proportions de déchets de coton et de liants qui donnerait la meilleur conductivité thermique λ . Les compositions prenant en compte le déchet de coton et la chaux vive donne des résultats moins bons thermiquement et mécaniquement que les compositions déchet de coton et ciment. Aussi une troisième composition qui est : déchet de coton, chaux vive et ciment a été faite mais les résultats n'étaient pas aussi bons que ceux de déchet de coton et ciment.

Une étude théorique de la conductivité avec le modèle de Voigt Reuss et celui de l'Homogénéisation Autocohérente a été faite pour la prédiction des conductivités thermiques des panneaux et des rouleaux d'isolants. Ces valeurs sont vérifiées par une étude expérimentale qui a été fait par l'analyseur KD2 Pro qui donne toutes les propriétés thermiques des matériaux. Ainsi la meilleur conductivité thermique de tous les essais a été donnée par les isolants en rouleau : $\lambda=0.094$ w/(m.K), et la valeur a été bien approché par l'Homogénéisation Autocohérente avec $\lambda=0.063$ w/(m.K).

Les valeurs des conductivités thermiques ayant montré que seuls les isolants en rouleau peuvent donner un meilleur confort thermique dans le bâtiment, nous développeront cette idée pour réduire considérablement la consommation d'énergie.

Mots Clés :

- 1. Déchet de coton**
- 2. Isolant thermique**
- 3. Propriétés thermiques**
- 4. Confort thermique**

ABSTRACT

This research statement focuses on the study of technical implementation, characterization of thermal properties of thermal insulation made from waste cotton.

The implementation has been to seek to find the proportions of cotton waste and binders that would give the best thermal conductivity λ . The compositions taking into account the waste cotton and lime gives poorer results thermally and mechanically that the compositions of cotton waste and cement. Also a third composition which is: cotton waste, lime and cement, has been made but the results were not as good as those of cotton waste and cement.

A theoretical study of the conductivity with Voigt and Reuss model of Homogénéisation Autocohérente was made for the prediction of thermal conductivities panels and rolls of insulation. These values are verified by an experimental study was done by the KD2 Pro analyzer that gives all the thermal properties of materials. And the best thermal conductivity of all the tests was given by the insulation roll: $\lambda=0,094$ W/(mK), and the value was well approximated by Homogénéisation Autocohérente with $\lambda=0.063$ W/(m.K).

The values of thermal conductivities have shown that only roll insulation can provide greater thermal comfort in buildings, we develop this idea to dramatically reduce energy consumption.

Key words

- 1. Cotton waste**
- 2. Thermal insulation**
- 3. Thermal properties**
- 4. Thermal comfort**

Table des matières

DÉDICACE	ii
REMERCIEMENT	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
CHAPITRE I : INTRODUCTION	4
I. Généralités	4
II. Contexte et objectifs du travail	4
II.1. Contexte.....	4
II.2. Objectifs du travail	5
CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	6
I. Le génie civil et le développement durable	6
II. Les éco-matériaux à vocation d'isolant thermique	7
II.1. Eco-matériaux.....	7
II.2. Isolation thermique des bâtiments	14
III. Approche théorique.....	17
III.1. Paramètres influençant les propriétés thermiques et mécaniques d'un éco- matériau Isolant	17
CHAPITRE III : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES CONSTITUANTS ..	19
I. Descriptions des liants	19
I.1. La chaux.....	19
I.2. Propriétés de la chaux	20
I.3. Le ciment	20
I.3. Le Plâtre	21
I.4. Choix du liant.....	22
CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES	23
I. Détermination des caractérisations thermiques des isolants	23
III. Protocole expérimental.....	24
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION	27
I. Evolution des panneaux après démoulage.....	27
I.1. Présentation des essais	27
I.2. Cinétique de séchage.....	27

II. Etude de conductivité thermique	28
II.1. Conductivité thermique en milieu sec	28
II.2. Discussion.....	40
II.3. Détermination du gain thermique	40
CHAPITRE V : CONCLUSION-PERSPECTIVES-RECOMMANDATIONS.....	41
I. Perspectives et recommandations	41
II. Conclusion.....	42
BIBLIOGRAPHIE	43
ANNEXES	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2: Propriétés des matériaux [4]	14
Tableau 3: Propriétés mécaniques [5]	21
Tableau 4: Variation de la résistance en fonction du temps	21
Tableau 5: Propriétés thermiques	21
Tableau 6: Présentation des compositions.....	26
Tableau 7: Résultat de la méthode de Voigt et Reuss	36
Tableau 8: Conductivité thermique donnée le modèle HAC.....	39
Tableau 9: Résultats expérimentaux des panneaux	39
Tableau 10: Caractéristique de KD2 Pro	46
Tableau 11: Composition 1	49
Tableau 12: Composition 2	49
Tableau 13: Composition 3	50
Tableau 14: Données du séchage.....	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Déchet de coton.....	8
Figure 2: Déperditions dans le bâtiment.....	15
Figure 3:Dispositif du Plan chauffant.....	23
Figure 4: Modèle en série	29
Figure 5: Modèle en parallèle.....	29
Figure 6: Inclusion sphérique simple soumis à un gradient G unitaire	31
Figure 7: Equivalence entre milieu bicomposite à inclusions sphériques et milieu homogène	33
Figure 8: Inclusion sphérique tricomposite	34
Figure 9: Inclusion sphérique tricomposite représentant les panneaux.....	38

CHAPITRE I : INTRODUCTION

I. Généralités

Depuis les années 1960 on a constaté qu'un jour on épuiserait nos ressources naturelles. Cela s'est fait sentir lors de la première conférence internationale sur l'environnement de Stockholm en 1972. D'où l'idée de mettre en place un processus de gestion intégrale de la planète et de tout son écosystème.

Des années plus tard, l'ONU s'est vu obligé d'instaurer ce qu'on appelle le développement durable dans tout organisme, ce qui permet aux générations présentes de connaître le développement sans compromettre celui des générations futures.

Dans ce cadre, le secteur du bâtiment doit œuvrer à une conversion de ses pratiques constructives pour améliorer la performance énergétique des bâtiments neufs ou anciens mais également pour proposer des matériaux innovants qui répondent aux nouvelles exigences des utilisateurs et des législations en termes d'impact environnemental, sanitaire, et de confort.

Le facteur déterminant en matière d'efficacité énergétique d'un bâtiment est sans aucun doute la conception et la qualité de la fabrication de l'enveloppe. L'isolation est une des composantes qui a le plus d'impact sur l'efficacité énergétique. Par souci pour l'environnement, on se tourne de plus en plus vers les isolants naturels qui peuvent s'avérer une alternative intéressante. Au moment de choisir un matériau isolant naturel, il est fréquent qu'en plus des critères thermiques, on veuille considérer les critères environnementaux. L'isolation a pour objectif premier la réduction de la consommation d'énergie, mais qu'en est-il du bilan énergétique de ce même isolant? Le bâtiment doit être vu comme un ensemble liant matériaux efficaces et techniques de construction performantes.

II. Contexte et objectifs du travail

II.1. Contexte

Les solutions du bâtiment offrent un confort peu optimisé, alors qu'en Afrique subsaharienne les températures peuvent monter jusqu'à 45°. Les isolants trouvés au Burkina Faso sont chers, importés et peu utilisés. Or, le pays a beaucoup de déchets coton qui pourraient être utilisés comme matière première pour la production d'isolants thermiques. Des entreprises au Nord recyclent déjà les vêtements usagés pour produire des isolants thermiques et acoustiques, reconnus très performants. Ce qui nous fait poser des

questions sur la faisabilité technique et économique d'isolants thermiques à partir des déchets de coton.

II.2. Objectifs du travail

C'est dans une optique d'innover à partir des potentialités et des besoins locaux de préservation de l'environnement et de création de valeur ajoutée et d'emplois pour la population locale que cette idée d'isolant thermique et acoustique a vu le jour. Ainsi donc à la fin des travaux nous devons :

- Vérifier la faisabilité technique de la production d'isolants à partir de déchets de coton.
- Acquérir un esprit de recherche et d'innovation.
- Acquérir des compétences techniques

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Le génie civil et le développement durable

Nous assistons depuis quelques dizaines d'années à une prise de conscience de la part des pouvoirs publics, des acteurs économiques et de la société civile, sur les conséquences défavorables des activités humaines sur l'environnement. L'heure est venue de trouver des moyens pour réduire de manière considérable, ces impacts. C'est pourquoi, aujourd'hui, à l'échelle internationale, dans les domaines de l'industrie, de l'énergie, des transports et de la construction les incitations et les contraintes sont de plus en plus fortes pour intégrer les projets à une démarche de développement durable. La définition la plus répandue du développement durable est celle donnée en 1987 dans le rapport Brundtland [1] selon laquelle «le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Cependant, aujourd'hui, la capacité des générations futures à subvenir à leurs besoins est menacée par :

- ✚ Le réchauffement climatique, identifié par la majorité des scientifiques, comme une conséquence du rejet en quantité importante de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ etc.).
- ✚ L'épuisement des ressources naturelles dont certaines apparaissent pourtant à l'heure actuelle indispensables au fonctionnement de nos sociétés (pétrole, gaz etc.).

Cette prise de conscience au niveau international a conduit à l'organisation en juin 1992 de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED) à Rio de Janeiro (Brésil) puis, à l'adoption, cinq ans plus tard, du protocole de Kyoto par les représentants de 160 pays. Trente-huit pays industrialisés se sont ainsi engagés à réduire globalement entre 2008 et 2012 leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 5.2% par rapport au niveau de 1990. [2]

II. Les éco-matériaux à vocation d'isolant thermique

II.1. Eco-matériaux

II.1.1. Définition d'un éco-matériau

Il n'y a pas encore de définition officielle de l'éco-matériau, mais on admet généralement qu'il doit répondre aux critères et principes du développement durable et donc :

- ❖ Provenir pour ses matières premières, de ressources durablement renouvelables et réellement renouvelées, sans que cela se fasse au détriment d'autres milieux naturels ou espèces ;
- ❖ Présenter des qualités techniques et performances durables dans le temps ;
- ❖ Etre sain, c'est-à-dire ne pas générer d'impacts négatifs sur la santé, tant lors de sa production que de sa « Mise en œuvre » et tout au cours de sa vie, y compris durant sa phase d'élimination;
- ❖ Favoriser le confort de l'habitant et de celui qui le met en œuvre (artisan, ouvrier, habitant),
- ❖ Etre aussi sûr qu'un matériau « classique » ;
- ❖ Avoir un impact (coût) environnemental et énergétique faible ou neutre. En particulier le matériau de base ne devrait pas être rare, et il doit induire une consommation d'énergie la plus faible possible sur l'ensemble de son cycle de vie, cette consommation devant être en quelque sorte largement compensée par le fait que son usage permette d'importantes économies d'énergie durant toute la durée de vie du bâtiment grâce à ses performances d'isolant. Souvent ces matériaux sont totalement biodégradables et ne consomment donc pas d'énergie en fin de vie ;
- ❖ Présenter à long terme, des coûts d'investissement (conception-fabrication) et de différés (entretien, remplacement, recyclage) connus, et les plus bas possibles. L'éco-matériau mobilise des ressources et filières locales (boucles courtes) et crée de l'emploi; il est accessible à tous (tant en termes de coût que d'informations fournies et garanties par l'autorité publique ; son écobilan doit en particulier, comme celui des autres matériaux prendre en compte l'« énergie grise » dépensée pour l'extraction, le transport et la transformation des matières premières, la fabrication, le stockage, la distribution et la fin de vie du matériau).



Figure 1: Déchet de coton

Les différents points qui montrent les conditions à remplir par les matériaux classiques pour rentrer dans la gamme des éco-matériaux seront bien respectés par les isolants thermiques à base de déchets de coton. En effet, le coton ordinaire est déjà utilisé au Nord pour la fabrication d'isolants thermique, mais la seule condition qui l'éloigne des éco-matériau serait la phase culture du coton qui nécessite l'emploi de pesticides qui sont nocifs à l'environnement et l'énergie consommé par les machines pendant le processus de fabrication.

II.1.2. Caractéristique d'un éco-matériaux

a) Propriétés thermiques

La conductivité thermique λ est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température. [3]

$$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}(T) \quad \text{Equation 1}$$

$$\varphi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial X} \quad (\text{w}) \text{ formule algébrique.} \quad \text{Equation 2}$$

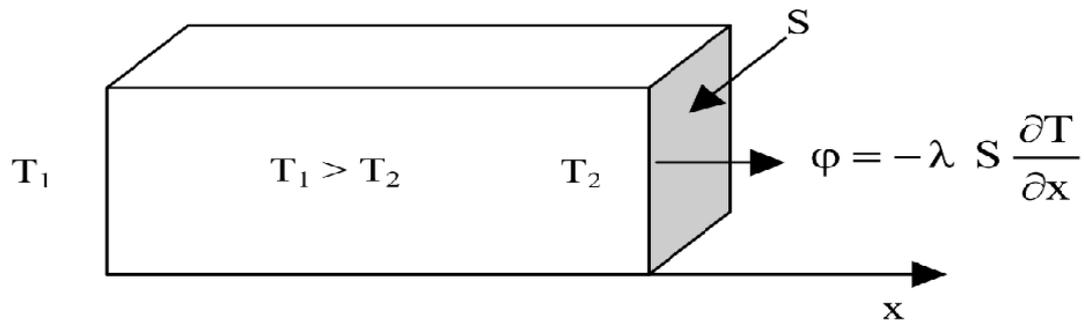
Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par conduction (w)

λ : Conductivité thermique du milieu (w/m.°C)

X : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S : Aire de section de passage du flux de chaleur (m²)



La chaleur massique ou chaleur spécifique C exprimée en J/kg.K est une grandeur permettant de caractériser d'autres propriétés thermiques des matériaux. En effet elle permet de déterminer la quantité d'énergie nécessaire à apporter pour élever d'un Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance par échange thermique. C'est donc une grandeur intensive égale à la capacité thermique rapportée à la masse du corps étudié. Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure.

A partir de la conductivité thermique λ et de la chaleur spécifique C, on définit la diffusivité **a** exprimée en (J/(m.K)). Cette grandeur caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times C} \text{ (J/(m.K))} \quad \text{équation 3}$$

Ainsi, le pouvoir isolant du matériau dépend non seulement de la valeur de λ mais également de la vitesse de transfert thermique traduite par **a**.

La résistance thermique se déduit de la conductivité thermique et de l'épaisseur du matériau considéré.

$$R = \frac{e}{\lambda} \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/w)} \quad \text{équation 4}$$

Les propriétés thermiques ci-dessus (conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique et la résistivité thermique) seront caractérisées sur l'isolant que nous cherchons à mettre en place pour ensuite comparer les résultats à ceux des isolants disponible sur le marché. La pénétration du marché sera déterminée par ces propriétés thermiques car elles définissent les performances thermiques des isolants thermiques.

b) Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques d'un matériau décrivent sa réponse aux charges appliquées. Pour de nombreuses applications, il est essentiel de supporter une charge ou de résister à un impact sans fléchir excessivement ou sans subir de rupture. De ce fait, les propriétés mécaniques représentent souvent un coefficient critique dans le choix de matériaux. La résistance des isolants à la compression est mesurée par la contrainte nécessaire pour diminuer l'épaisseur d'un échantillon de 10%. La résistance à la compression doit être d'au moins 110 kPa pour l'utilisation en toiture plate.

En isolation extérieur, la résistance en traction doit être de sorte à éviter que les différentes couches d'isolants ne séparent sous l'effet du vent. La résistance à la traction est donc mesurée dans le sens de l'épaisseur des panneaux. C'est la contrainte nécessaire pour séparer le panneau en deux ou plusieurs parties. La résistance à la traction des isolants extérieurs selon la norme doit être d'au moins 6 kPa.

Il est nécessaire d'utiliser un liant qui pourra procurer aux déchets de coton une résistance mécanique satisfaisante à cause du fait que les isolants seront utilisés sous toiture. En effet la résistance mécanique permettra d'économiser les supports à utiliser pour la fixation et de réduire en même temps les ponts thermiques pour augmenter les performances de l'isolation.

c) Propriétés physiques

❖ Etanchéité à l'air

L'étanchéité à l'air n'est pas forcément une propriété attendue d'un matériau isolant, car cette fonction est généralement assurée par une autre couche de l'enveloppe, à savoir la structure porteuse de la paroi (béton, maçonnerie), une feuille d'étanchéité ou un revêtement intérieur (crépissage ou enduit par ex.). Même si le matériau isolant est étanche à l'air, les joints entre les panneaux sont perméables à l'air, à moins d'être jointoyés (cas de la mousse de verre collée au bitume).

❖ Résistance à la diffusion de vapeur d'eau

La vapeur d'eau diffuse au travers des matériaux, surtout s'ils sont poreux, et tend à se condenser dans les zones froides, donc notamment du côté froid de la couche isolante. Pour limiter les risques de dégâts dus à la condensation, on peut réduire le flux de vapeur d'eau en plaçant des matériaux qui offrent une forte résistance à la diffusion de vapeur d'eau. L'étanchéité à l'air sera conjointement assurée.

❖ Absorption d'eau

L'absorption est la capacité de conserver des échantillons quand ils sont immergés au sein de l'eau à température de 20,5 °C et à la pression atmosphérique. A cette condition l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides interstitiels du matériau. Si la porosité du matériau est importante, l'absorption de l'eau est plus grande, mais l'absorption est toujours inférieure à la porosité du matériau.

Les matériaux humides perdent leur pouvoir isolant. Il est donc nécessaire d'éviter que les matériaux isolants ne soient engorgés d'eau même en contact de celle-ci. Le pouvoir absorbant des matériaux isolants est mesuré soit par immersion d'échantillons dans l'eau, par flottation d'échantillons sur un bac d'eau ou enfin par diffusion de vapeur d'eau dans un gradient de température.

$$H_v = \frac{G_{ab} - G_s}{V_o} \quad \text{équation 5}$$

Où

G_{ab} est la masse absorbante.

G_s est la masse sèche d'échantillon.

V_0 est le volume apparent du matériau.

Une fois les isolants élaborés des dispositions devraient être prises pour éviter qu'ils ne soient animés par de courants d'airs. Aussi on doit protéger les isolants contre la condensation de vapeur d'eau au niveau des leurs pores. Le déchet de coton est un matériau très absorbant, l'isolation doit donc être protégé par un film étanche dans le cas où il serait utilisé comme isolant extérieur pour éviter l'absorption d'eau.

d) Propriété acoustique

Le son est une onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales. Par extension physiologique, le son désigne la sensation auditive à laquelle cette vibration est susceptible de donner naissance.

Certains matériaux isolants sont utilisés soit pour atténuer les bruits de chocs, soit pour absorber les bruits aériens. Dans le premier cas, ils doivent être mous tout en présentant une certaine résistance à la compression. Dans le second cas, ils doivent être perméables à l'air tout en offrant une certaine résistance, ce qui permet d'absorber les ondes acoustiques par frottement de l'air contre les composants (fibres) du matériau.

Les propriétés essentiels recherchées dans ce travail sont les propriétés thermiques mais d'autres propriétés comme les propriétés acoustiques sont un plus. Par rapport au bruit de de chocs on a vu qu'on a besoin d'un matériau mou pour son atténuation. L'isolant à base de déchets de coton satisferait cette condition car naturellement le déchet de coton est mou et même avec les liants, il pourra garder un peu cette qualité et ainsi satisfaire la fonction « isolant acoustique ».

II.1.3. Exemples d'éco-matériaux isolants

Les éco-matériaux d'isolation thermique sont généralement des matériaux qui proviennent de fibres végétaux. En effet quelques éco-matériaux d'isolant thermique se trouvent sur le marché de consommation. On peut citer :

➤ **Le liège**

Le liège renferme une résine, la subérine, qui sous l'effet de la chaleur agglomère les granules entre eux. Le liège se présente sous forme de vrac pour l'isolation par déversement ou insufflation, en granules pour les bétons allégés, en panneaux et en éléments composites préfabriqués. C'est un matériau ininflammable, inaltérable mais faiblement perméable à l'eau et attaqué par les rongeurs. Le liège est une ressource renouvelable mais faiblement disponible. Sa fabrication nécessite peu d'énergie, environ 90 kWh/m³. Il est réutilisable. Le liège en tant que tel ne présente aucun effet nocif connu pour la santé. Par contre, les colles et vernis utilisés pour les panneaux composites peuvent renfermer des substances toxiques. En raison de sa disponibilité réduite et de son coût, le liège est réservé à des usages ponctuels pour lesquels les autres isolants écologiques ne sont pas adaptés.

➤ **La Ouate de cellulose**

Fabriquée à partir de papier, et comme tous les matériaux organiques, la ouate de cellulose craint le feu, la pourriture et les insectes, rongeurs et autres animaux qui peuvent s'en nourrir. Pour la rendre plus résistante à ces agressions, on traite chimiquement la ouate de cellulose en ajoutant du sel de bore ainsi que différents sulfates comme adjuvant pour améliorer la résistance au feu et la capacité à repousser les rongeurs et les vermines. La ouate de cellulose peut être trouvée en plaque ou en vrac. Elle est idéale pour une pose en toiture, combles, sous-pentes, murs. Elle nécessite peu d'énergie son énergie grise est de 6 kWh/m³ et n'engendre aucune pollution environnementale.

➤ **Le chanvre**

Les présentations sont très nombreuses pour des utilisations différentes. Les granules de chènevotte non traités sont incorporés dans les bétons allégés. Les granules de chènevotte stabilisés sont utilisés en vrac pour isolation par déversement ou insufflation. La laine de chanvre (fibres longues seules), se présente en vrac, rouleaux ou en panneaux pour des utilisations traditionnelles.

Le chanvre est difficilement inflammable et perméable à l'eau. Il est imputrescible et présente une grande résistance mécanique. Il a l'avantage de ne pas attirer les insectes et les nuisibles en raison de l'absence d'albumine dans ses fibres. Il s'agit d'une ressource

renouvelable et potentiellement abondante. De plus, il est réutilisable et compostable. Il ne présente aucun effet nocif sur la santé et il ne dégage aucun gaz toxique en cas d'incendie.

Tableau 1: Propriétés des matériaux [4]

Isolant	Densité (Kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Résistance thermique R pour une épaisseur de 100 mm
Liège	80 à 120	0.044 à 0.049	2.04 à 2.27
Ouate de cellulose	35 à 45	0.035 à 0.04	2.5 à 2.86
Chanvre	20 à 35	0.037 à 0.039	2.56 à 2.7

Les isolants thermiques à base de déchets de coton pourraient faire partir des éco-matériaux si le processus de fabrication qui suivra est bien énoncé et respecté expérimentalement. La suite du travail serait de trouver une formule pour fabriquer des isolants thermique à base de déchets de coton dont les propriétés thermiques seront proches de celles consignées dans le tableau ci-dessus. La conductivité thermique du coton ordinaire est de 0.059 W/m.K, une valeur non loin de celle-ci sera visée pendant le processus de fabrication du produit. Pour la résistance thermique une valeur de 1.7 pour une épaisseur d'isolation de 100 mm sera l'idéale.

II.2. Isolation thermique des bâtiments

II.2.1 définition de l'isolation thermique

L'isolation thermique est l'ensemble des techniques qui visent à diminuer les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. L'isolation d'un bâtiment présente beaucoup d'avantage parmi lesquelles : l'économie d'énergie, la réduction des émanations toxiques (gaz à effet de serre).

II.2.2. les différentes formes d'isolation d'un bâtiment

Le maintien d'une température adéquate sans apport d'énergie extérieure (chauffage, ventilation ou climatisation) représente l'un des défis de la construction des bâtiments. Les déperditions thermiques en sont la principale cause. Ces pertes de chaleur sont notables à plusieurs endroits des bâtiments notamment au niveau de la toiture, des fenêtres, des portes, des murs et du sol. En période hivernale, les pertes de chaleur causées

par les toitures résultent souvent d'une fuite de l'air plus chaud des bâtiments vers l'extérieur par convection. Par ailleurs, ces dernières ainsi que, les portes et fenêtres et les murs peuvent causer des déperditions thermiques par conduction. Causant respectivement 10%, 15% et 20% de la moyenne des déperditions thermiques d'une maison individuelle neuve selon la réglementation thermique 2005, ceux-ci ont tendance à favoriser une transmission de la chaleur interne des bâtiments vers l'extérieur.

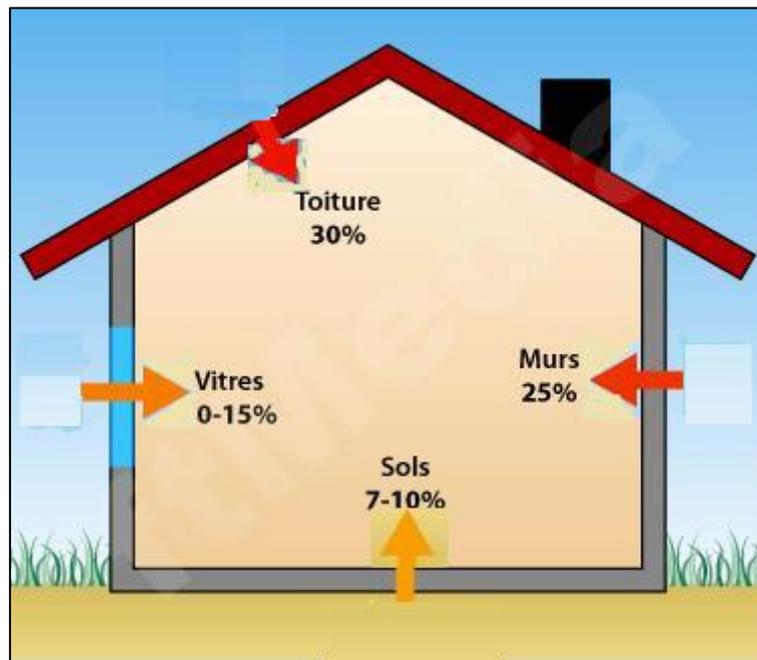


Figure 2: Déperditions dans le bâtiment

Pour ce qui est des toitures, les combles vides pourraient être isolés à l'aide d'isolants en vrac (billes, granulats, paillettes, flocons, laines.) tandis que les isolants en rouleaux ou en panneaux semi-rigides seraient parfaitement recommandés pour leurs charpentes. Quant aux portes et fenêtres, la meilleure solution pour améliorer leur isolation thermique serait d'opter pour des vitrages isolants double ou triple dont le coefficient de transmission thermique U_w (vitrage + menuiserie) doit être inférieure ou égale à $2,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. En outre, en vue de limiter les déperditions surfaciques et par ponts thermiques des murs, il serait judicieux de revêtir leur extérieur de laine de bois et de briques chaux-chanvre enduits de chaux ou de bardages bois. Néanmoins, une isolation de leur face interne à l'aide de panneaux ou rouleaux en vrac dont la densité doit être supérieure à 40 kg/m^3 peut être envisagée si elle respecte les caractéristiques hygrométriques dudit mur. Enfin, il ne faudrait pas négliger l'isolation des sols qui causent 20% des déperditions thermiques selon la réglementation thermique 2005.

Une isolation par l'intérieur:

- **Principe:**

L'isolation intérieure consiste en la pose de la couche d'isolant du côté intérieur de la maison.

- ✓ Nécessite la reprise des réseaux électriques, des encadrements de fenêtres...
- ✓ Ne permet pas de bénéficier de l'inertie thermique de la paroi
- ✓ Implique la présence de ponts thermiques (jonction de parois, nez de dalle ...),
- ✓ Diminue la surface habitable,
- ✓ Mais ne change pas l'aspect extérieur du bâtiment.

Une isolation par l'extérieur :

- **Principe :**

L'isolation extérieure consiste en la pose d'isolant sur les faces extérieures de la maison.

- ✓ Ne nécessite pas un bâtiment vide pour la mise en œuvre,
- ✓ Permet de bénéficier de l'inertie thermique de la paroi,
- ✓ Limite fortement les ponts thermiques,
- ✓ Ne diminue pas la surface habitable,
- ✓ Mais modifie l'aspect extérieur du bâtiment

Une Isolation répartie, intégrée au mur :

- **Principe**

L'isolation répartie consiste à construire des murs avec des matériaux épais qui sont à la fois isolants et porteurs. On trouve principalement deux familles de matériaux : les blocs en béton cellulaire et les briques alvéolées en terre cuite

III. Approche théorique

III.1. Paramètres influençant les propriétés thermiques et mécaniques d'un éco-matériau Isolant

Il existe plusieurs paramètres qui influencent les propriétés thermiques d'un matériau. Il y'a par exemple la porosité apparente du matériau, sa teneur en eau, son pouvoir absorbant, sa masse volumique etc. Dans la suite il sera présenté une corrélation entre porosité et conductivité thermique ; masse volumique (ou densité) et conductivité thermique.

III.1.1 relation entre porosité apparente et conductivité thermique

Des études ont montré qu'un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau (i.e. la porosité), en ajoutant l'air intra-particule (i.e. granulat). A titre comparatif, un béton hydraulique ($\rho=2300 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $2,0 \text{ W/(m.K)}$ tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho= 1600\text{kg/m}^3$) a une conductivité de $0,60 \text{ W/(m.K)}$.

Cependant, cette relation entre porosité et faible conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte d'autre mode de transfert de la chaleur, la convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement. Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ($\phi= 80\%$) ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible.

III.1.2. Masse volumique et conductivité thermique

Les premières études de ce phénomène considèrent qu'il existait une dépendance quasi-linéaire entre la conductivité et la masse volumique. Cependant, ces conclusions ont été obtenues en couvrant une gamme restreinte de teneurs en eau. Plus tard, on a pu montrer par homogénéisation que la dépendance entre λ et ρ n'est pas linéaire mais curviligne. Ceci se constate à travers une étude menée sur le matériau terre-paille.

Il faut noter que quelle que soit la forme mathématique de la relation entre teneur en eau ω et conductivité λ , il est important de retenir que la présence d'eau diminue le pouvoir isolant des matériaux dans des proportions non négligeables.

L'air est le meilleur isolant thermique parmi tous les matériaux. Le coton qui a une masse volumique qui oscille entre 20 et 60Kg/m³ témoigne que ce matériau engorge beaucoup d'air ce qui est la principale condition pour le rendre isolant. Une confirmation de sa capacité d'isolant est donnée par certaines entreprises qui utilisent déjà les habits usagés issus de coton pour la fabrication d'isolants thermiques. Le déchet de coton ayant à peu près les mêmes caractéristiques que le coton ordinaire déjà utilisé pour la fabrication d'isolants thermiques peut être utilisé pour le confort thermique.

CHAPITRE III : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES CONSTITUANTS

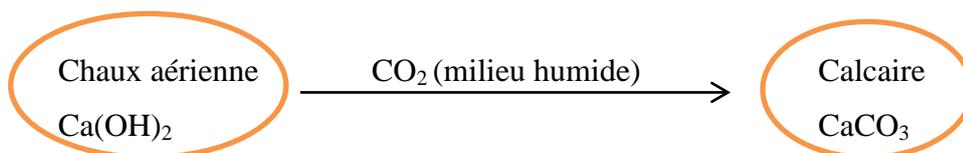
La caractérisation expérimentale exige l'étude des liants disponibles pour la transformation de déchet de coton en panneaux ou en rouleau d'isolant. En effet le matériel à utilisés ainsi que les conditions dans lesquelles les expériences seront menées sont indispensables dans cette partie d'étude.

I. Descriptions des liants

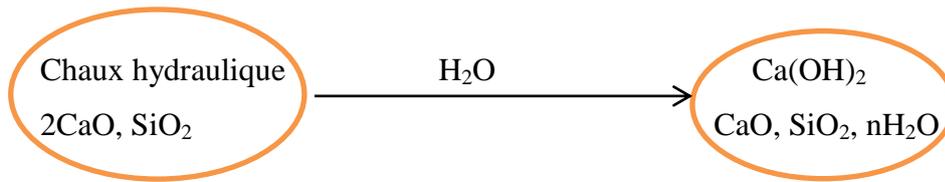
I.1. La chaux

La chaux est obtenue par décomposition du calcaire sous l'effet de la chaleur. Ce processus de décomposition permet d'obtenir les deux formes de chaux (aérienne et hydraulique) présentes dans les liants.

La chaux aérienne $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtenue par calcination du calcaire pur à plus de 900°C , effectue sa prise (dite « prise aérienne ») par carbonatation de la chaux vive (CaO) avec le CO_2 de l'air en milieu humide. En effet, la vapeur d'eau et le CO_2 forment de l'acide carbonique. La chaux fixe ensuite le CO_2 contenu dans cet acide pour permettre l'apparition du calcaire. Cette prise démarre rapidement mais le phénomène ralentit par la suite et s'étend sur plusieurs années.



La chaux hydraulique est obtenue par calcination d'un calcaire riche en silice et oxyde de fer. Cette chaux présente un phénomène de double prise. Dans un premier temps, il se produit un durcissement à l'eau, relativement rapide (1 mois environ). Puis, dans un second temps, un durcissement à l'air (dû au CO_2), beaucoup plus lent, s'étend sur plusieurs années.



I.2. Propriétés de la chaux

Aérienne ou hydraulique, la chaux laisse respirer les murs des bâtis anciens et nouveaux en favorisant les échanges hygrométriques. Elle capte et rejette la vapeur d'eau permettant ainsi d'éviter les remontées d'humidité. La chaux s'oppose à la pénétration des eaux, car elle leur est imperméable. Elle a également des vertus isolantes, phoniques et thermiques. La chaux s'adapte très facilement aux différents supports. Elle tolère les mouvements du bâti, inhérente à toute construction, ancienne ou moderne, grâce à sa souplesse et à son élasticité, ce qui limite les fissures dans les enduits. La chaux hydraulique, et encore plus l'aérienne, résiste particulièrement bien au feu.

I.3. Le ciment

I.2.1. Définition

Le ciment est un liant à base de silicate de chaux, une forme de chaux maigre, hydraulique, ou plus précisément un mélange constitué de calcaire (80%) et d'argile (20%), parfois adjoint d'alumine sous forme de bauxite, chauffé à haute température (1450°C) dans un four en forme de tube où il circule à proximité d'une flamme de 2000°C , avant d'être refroidi brutalement.

C'est donc un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre très fine, composée d'oxydes minéraux dont les deux principaux sont la chaux (CaO) et la silice (SiO_2). Il réagit avec l'eau en donnant les hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant et progressivement à l'air ou dans l'eau.

Le ciment est un liant qui permet d'avoir une bonne résistance mécanique à l'ordre de 35MPa en compression et de 2MPa en traction à 28 jours d'âge.

I.3. Le Plâtre

Le plâtre est un matériau de construction ignifuge. Il est utilisé sous forme de pâte constituée d'un mélange de poudre et d'eau, ou préparé sous forme de plaques. La matière première est, à l'origine, un sulfate de calcium semi hydraté. Aujourd'hui, de nombreux adjuvants entrent dans la composition du plâtre.

Le plâtre est réalisé à partir du gypse, roche sédimentaire appelée pierre à plâtre que l'on retrouve sous forme d'albâtre (variété naturelle de gypse blanc) ou de cristaux de sélénite. La pierre est généralement extraite de mines ou de carrières souterraines puis cuite et ensuite cassée, broyée et moulue pour donner la poudre blanche du plâtre.

Tableau 2: Propriétés mécaniques [5]

Contrainte de traction (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Module de Poisson (MPa)	Contrainte de compression (MPa)	Contrainte de flexion (MPa)
1 à 3	1 450	0.7	12	5

Tableau 3: Variation de la résistance en fonction du temps

Durée [jours]	Traction [MPa]	Compression [MPa]
1	4	5
2	7	12
4	8	28

Tableau 4: Propriétés thermiques

Dilatation thermique (m/m.°C)	Conductivité thermique (W/m.°C)	Perméabilité à la vapeur d'eau (g/m.h.mmHg)	Résistance à la diffusion de vapeur	Chaleur spécifique (kcal/°C.kg)	Température de fusion	Masse volumique (kg/m ³)	Pouvoir Calorifique (MJ/kg)
18. 10 ⁶	0.48	1 300.10 ⁵	10	0.19	1 250	1 000	0

I.4. Choix du liant

L'observation des différents matériaux cités qui pourront servir de liant laisse percevoir la chaux comme le liant adéquat pour la fabrication des isolants à base de déchets de coton. En effet, la chaux en elle-même est un isolant thermique et acoustique, qualités essentiels les plus recherchées dans cette étude. En outre les propriétés de la chaux données un peu plus haut montrent que le matériau résiste à certains phénomènes qui pourraient dégrader la qualité des isolants. Sur le marché le prix du kilogramme de chaux n'excède pas 250 F CFA ce qui rend son acquisition beaucoup plus facile dans n'importe quel point de vente. Le choix de ce type de liant pourrait donc permettre de minimiser le coût de revient du produit et servir de stratégie de pénétration du marché.

Il faut rappeler que le but du projet est d'arriver à sortir des isolants thermiques sains et durables en d'autres termes, le processus de fabrication ne doit pas d'une façon ou d'une autre offenser les règles de l'environnement. C'est une raison de plus pour justifier le choix de la chaux comme l'un des liants dans le processus de fabrication du produit car l'équation chimique vue un peu plus haut démontre que la chaux arrive à fixer le dioxyde de carbone (CO_2) de l'environnement.

Pour augmenter la résistance mécanique des isolants, le liant ciment sera utilisé en complément de la chaux. Cela est aussi une astuce pour accélérer la vitesse de prise car la chaux à elle seule peut prendre facilement trois à quatre semaines pour son séchage.

CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES

I. Détermination des caractérisations thermiques des isolants.

I.1. Le plan chauffant

La technique généralement utilisée est celle du plan chauffant. Le plan chauffant est constitué d'un générateur de courant, d'un ampèremètre, d'un rhéostat, d'une caisse en bois dans laquelle est inséré une plaque de cuivre et des thermocouples et d'un ordinateur muni du programme TESPOINT pour l'acquisition des données.

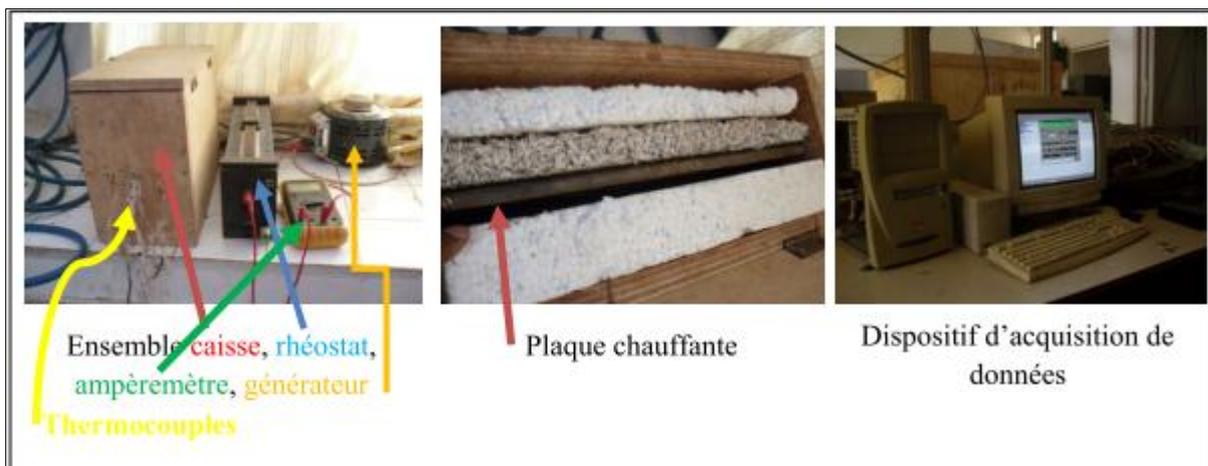


Figure 3: Dispositif du Plan chauffant

Le principe consiste à faire passer un courant d'intensité fixé à travers la plaque d'acier du dispositif de résistance connue. La plaque chauffe et diffuse de la chaleur à l'échantillon d'isolant. Un thermocouple mesure la température de la résistance et deux autres sont installés de part et d'autre de l'échantillon dont on veut déterminer la conductivité thermique. Sur l'écran de l'ordinateur d'acquisition de donnée, il est observé la variation des températures données par les thermocouples jusqu'à obtention du régime permanent. Ainsi, la différence de température est relevée à ce stade et par la relation:

$$P = R \cdot i^2 = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{e} \quad \text{Equation 6}$$

Cela permet d'avoir :

$$\lambda = \frac{R \cdot i^2 \cdot e}{\Delta T} \quad \text{Equation 7}$$

1.2. L'analyseur de propriétés thermiques KD2 Pro

Le KD2 Pro est un appareil portable utilisé pour la mesure des propriétés thermiques. Il se compose de contrôleur et de capteurs qui permettent de mesurer les propriétés thermiques dans n'importe quelle partie d'un matériau.

Cet appareil est muni de capteurs qui sont constitués de une à deux aiguilles adaptés à des types de mesures bien précises. Ainsi Les capteurs à une aiguille mesurent la conductivité thermique et la résistivité thermique, tandis que les capteurs à double aiguilles mesurent en plus la chaleur spécifique et la diffusivité thermique. Ces capteurs sont aussi fonction du type de matériau sur lequel on souhaite mener la caractérisation.

Les paramètres de l'appareil sont placés en annexe I

III. Protocole expérimental

Le déchet de coton et la chaux mélangé à du ciment seront utilisés à différentes proportions pour la réalisation du prototype, cela dans le but de déterminer les meilleurs ratios pour l'obtention des caractéristiques mécaniques et thermiques optimales. Nous aurons à réaliser tout d'abord des isolants en panneaux et au besoin utiliser de la colle pour mettre en place les isolants en rouleaux qui seront utilisés essentiellement au niveau des toitures. Les isolants en rouleau présentent l'avantage de ne pas laisser présenter beaucoup de ponts thermiques.

Des isolants en panneaux seront fabriqués et utiliser de du tissu sur lequel on appliquera de la colle liquide et agencer maintenant les panneaux d'isolants pour en faire des rouleaux.

III.1. Matériels

III.1.1. Réalisation des panneaux

Pour la réalisation des isolants thermiques en panneaux, le matériel suivant sera utilisé :

- Une (1) bassine
- Une (1) balance Roberval de précision 1g
- Quatre (4) moules de dimensions 10cmx40cmx10cm
- Un (1) sceau
- Deux (2) paires de gants
- Une (1) éprouvette graduée

III.1.2. Réalisation des rouleaux

La réalisation des rouleaux nécessite le matériel suivant :

- Une (1) paire de ciseau
- Un (1) pinceau
- Une (1) table

III.2. Etude expérimentale

III.2.1. Mise en œuvre des panneaux

a. Pesage des matériaux

Tous les matériaux qui entrent dans la composition des panneaux passeront d'abord dans une balance Roberval de précision 1g pour la détermination des quantités nécessaires. Ces matériaux sont : le déchet de coton, la chaux, le ciment et l'eau.

b. Extinction de la chaux

Le procédé d'extinction de la chaux se fait comme suit: dans une bassine il est introduit de l'eau en grande quantité, puis l'on a ajouté la chaux vive. Il faut noter que compte tenue du fort dégagement de chaleur il faut utiliser des gants de protection. Cette forme de procéder (eau d'abord + chaux ensuite) pour éteindre la chaux permet d'éviter les éclats de chaux vive qui provoque des lésions au contact avec la peau ou les yeux.

c. Malaxage et moulage

Dans une bassine, on introduit le déchet de coton et on malaxe avec de l'eau pendant environ 2 à 3 minutes avant d'y ajouter le liant et mélanger l'ensemble pendant 3 minutes et ensuite procéder au moulage.

- ✓ Introduire le déchet de coton dans une bassine
- ✓ Ajouter la moitié de la quantité d'eau
- ✓ Malaxer l'ensemble pendant 2 à 3 minutes
- ✓ Ajouter petit à petit le liant et continuer le malaxage.
- ✓ Pulvériser à nouveau la quantité restante d'eau
- ✓ Malaxage pendant 3 minutes
- ✓ Moulage

Tableau 5: Présentation des compositions

Libellé	Matériaux de la composition	Echantillons	Déchet de coton (%)	Chaux vive (%)	Ciment (%)	Eau (%)
Composition 1	Déchet de coton + chaux	E1	13.79	13.61	0	72.6
		E2	16.85	16.63	0	66.52
		E3	17.85	11.74	0	70.42
		E4	22.54	7.04	0	70.42
Composition 2	Déchet de coton + ciment	F1	24.24	0	15.15	60.61
		F2	18.18	0	13.64	68.18
		F3	22.22	0	8.33	69.44
		F4	21.62	0	10.81	67.57
Composition 3	Déchet de coton + chaux + ciment	G1	21.62	5.41	5.41	67.57
		G2	25	9.38	3.13	62.5
		G3	25	3.13	9.38	62.5
		G4	25.81	3.21	6.45	64.52

Une fois les échantillons réalisés, les conductivités thermiques expérimentales seront comparés à celle de la **laine de verre qui est de 0.036 w/(m.K)**, valeur obtenue dans les mêmes conditions de température que les échantillons testés.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

I. Evolution des panneaux après démoulage.

I.1. Présentation des essais

L'évolution des différents panneaux a été suivie afin de pouvoir dresser les tableaux suivants qui traduisent le comportement des panneaux durant le séchage. Un petit commentaire est accompagné à chaque fois. Ainsi pour chaque composition, quatre essais ont été réalisés avec des proportions de matière premières différentes afin de déterminer l'essai qui donnera les meilleurs résultats thermiques.

Les tableaux de commentaire sont en **annexe II**

I.2. Cinétique de séchage

Le suivi de séchage des panneaux a permis d'obtenir une première courbe qui donne la masse en fonction du temps : $M=f(t)$. Pour la comparaison des échantillons entre eux, on utilise le pourcentage massique de perte qui est :

$$\% \text{ perte} = \frac{\Delta M}{M_0} * 100 = \frac{M_0 - M(t)}{M_0} \quad \text{Equation 8}$$

Avec

M_0 : masse initiale de l'échantillon en (g)

$M(t)$: masse de l'échantillon à l'instant t en (g)

On peut ainsi déterminer aussi la vitesse d'évaporation $V_{\text{évap}}$ qui est définie comme la quantité d'eau évaporée rapportée à la surface de séchage et au temps écoulé.

$$V_{\text{évap}} = \frac{\Delta M}{\Delta t * S_{\text{séchage}}} \text{ en kg/j/m}^2 \quad \text{Equation 9}$$

Avec :

ΔM : masse d'eau évaporée entre t_1 et t_2 en kg

$\Delta t = t_2 - t_1$: temps entre deux pesées en jours (j)

$S_{\text{séchage}}$: surface de séchage en (m^2)

Les résultats de la cinétique de séchage et les courbes qui accompagnent sont consignés en **annexe III**

II. Etude de conductivité thermique

II.1. Conductivité thermique en milieu sec

La conductivité thermique λ des matériaux est la propriété le plus couramment étudiée car elle dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants, contrairement à la convection qui intègre l'environnement immédiat du matériau. En effet, la convection dépend de la façon dont l'air peut se déplacer à l'intérieur du matériau. Ainsi, un matériau dans lequel les déplacements d'air seront favorisés en créant une différence de température ou de pression entre ces deux faces par exemple, présentera un niveau de convection plus important qu'un matériau placé entre deux parois imperméables qui empêchent les déplacements d'air. Cette partie est consacrée à l'étude du phénomène de conduction en milieu sec de manière théorique et expérimentale. Dans un premier temps, les principaux résultats théoriques au sujet de la conductivité thermique seront exposés. Dans un second temps, ceux de la méthode de mesure expérimentale seront exposée et les résultats obtenus sur les isolants à base de déchets de coton seront comparés aux modèles issus de l'homogénéisation autocohérente.

II.1.1. Bornes de Voigt et Reuss

Les Bornes Voigt et de Reuss présentent deux (2) modèles simples, l'un en série et l'autre en parallèle donnant un intervalle à l'intérieur duquel se situerait la conductivité thermique déterminé expérimentalement.

II.1.1.1. Notation

Notons θ_i la concentration volumique de la phase i , occupant un volume V_i dans un matériau de volume total V .

$$\theta_i = \frac{V_i}{V} \quad \text{Equation 10}$$

Soit un matériau poreux composé d'une phase solide et d'une phase fluide. La phase solide de conductivité λ_s et de taux volumique θ_s correspond à la matrice solide sans air (particules, liant). La phase fluide contient la totalité de l'air du matériau. Elle a une conductivité λ_f et un taux volumique θ_f . On a par définition $\theta_f = 1 - \theta_s$.

II.1.1.2. Modèle en série

Le modèle en série correspond au cas de figure où le flux de chaleur traverse les deux phases de manière parallèle à la normale n à leur surface de contact.

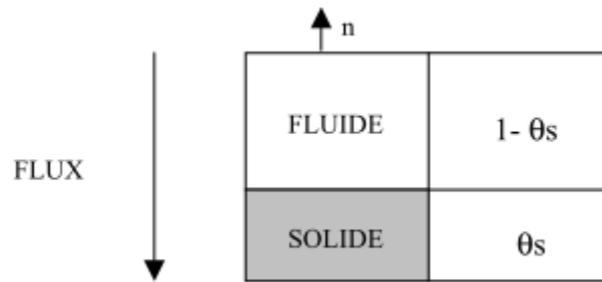


Figure 4: Modèle en série

La conductivité thermique en série $\lambda_{série}$ correspondant est :

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\theta_s}{\lambda_s} + \frac{1-\theta_s}{\lambda_f}} \quad \text{Equation 11}$$

Dans le cas où la conductivité du fluide λ_f tend vers 0, la conductivité totale λ tend aussi vers 0. La couche de fluide isole le matériau global et crée une rupture dans le chemin de propagation de la chaleur. Ce schéma fait jouer un rôle prépondérant à l'air qui va imposer la conductivité globale du matériau.

II.1.1.3. Modèle en parallèle

Le modèle parallèle correspond au cas de figure où le flux de chaleur traverse les deux faces de manière perpendiculaire à la normale n à leur surface de contact.

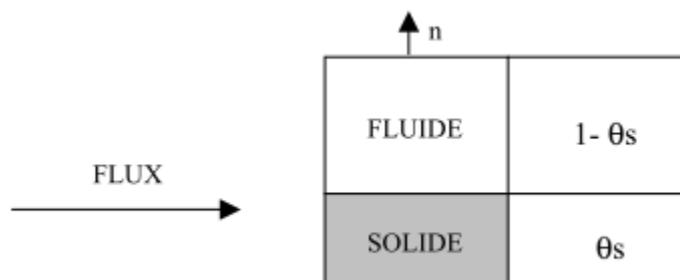


Figure 5: Modèle en parallèle

La conductivité thermique parallèle $\lambda_{parallèle}$ correspondant est :

$$\lambda_{parallèle} = \theta_s \lambda_s + (1 - \theta_s) \lambda_f \quad \text{Equation 12}$$

Lorsque la conductivité du fluide devient négligeable devant celle du solide ($\lambda_f \ll \lambda_s$), la phase solide impose la conductivité totale et λ tend vers $\theta_s \lambda_s$. Il en est de même lorsque la

phase fluide a une conductivité très faible comme c'est le cas pour l'air. Dans ce type de configuration, on néglige le rôle de l'air sur la conductivité. La conductivité thermique λ réelle du milieu est bornée par ces deux modèles. Ceux-ci permettent donc de déterminer une zone dans laquelle la conductivité se situe obligatoirement quel que soit le matériau considéré :

$$\lambda_{série} < \lambda < \lambda_{parallèle}$$

II.1.2. Homogénéisation Autocohérente (HAC).

La mise en œuvre de la HAC nécessite deux conditions, la séparation d'échelle et l'existence d'un motif générique. A ces deux conditions s'ajoute la conservation de l'énergie entre le milieu hétérogène réel et le milieu homogène fictif, dont les propriétés sont à définir. Dans le cadre de cette étude, le motif générique est constitué d'inclusions sphériques simples ou composites [6], qui permettent de simplifier les calculs par des effets de symétrie. La modélisation peut se faire en une seule homogénéisation ou faire appel à une double homogénéisation [7]. Ces deux approches sont détaillées ci-après.

II.1.2.1. HAC avec des inclusions simples

Dans le cas d'un milieu constitué d'inclusions simples, le problème se traite en deux étapes. Tout d'abord, le champ des températures dans le milieu constitué d'une inclusion sphérique de rayon R_1 et du milieu homogène soumis à un gradient G unitaire à l'infini est déterminé.

$$T_i = (A_i r + \frac{B_i}{r^2}) \cos \theta \quad (i=1, eq) \quad \text{Equation 13}$$

Les conditions aux limites imposent que :

- ❖ En $r=0$ T_1 est finie donc $B_1=0$
- ❖ En $r=\infty$ $(gradT)_{eq}$ tend vers G donc $A_{eq}=1$
- ❖ En $r=R_1$ T est continue donc $\frac{B_{eq}}{R_1^2} + R_1 = A_1 R_1$
- ❖ En $r=R_1$ le flux Φ_i est continu donc $\lambda_{eq} (1 - \frac{2B_{eq}}{R_1^3}) = \lambda_1 A_1$

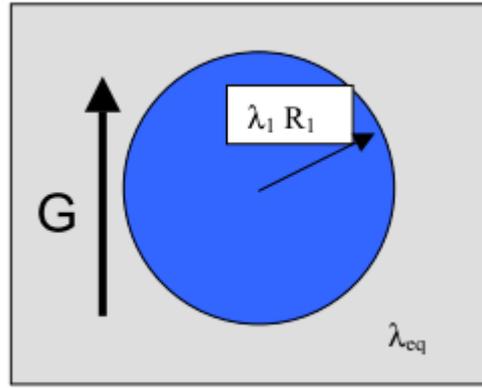


Figure 6: Inclusion sphérique simple soumis à un gradient G unitaire

On se ramène donc à un système de deux équations à deux inconnues A_1 et B_1 , dont la solution est :

$$A_1 = \frac{3\lambda_{eq}}{\lambda_1 + 2\lambda_{eq}} \quad \text{Equation 14}$$

$$\frac{B_1}{R_1^3} = \frac{\lambda_{eq} - \lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_{eq}} \quad \text{Equation 15}$$

Supposons ensuite que le milieu est constitué de deux types d'inclusions simples 1 et 2 de concentrations volumiques θ_1 et θ_2 telles que $\theta_1 + \theta_2 = 1$. La conservation du flux dans l'ensemble du matériau s'écrit :

$$\lambda_{eq}(\text{grad}T)_{eq} = \theta_1\lambda_1(\text{grad}T)_1 + \theta_2\lambda_2(\text{grad}T)_2 \quad \text{Equation 16}$$

La dernière équation est obtenue en considérant que les deux inclusions sont soumises au même gradient de température à l'infini :

$$(\text{grad}T)_{eq} = \theta_1(\text{grad}T)_1 + \theta_2(\text{grad}T)_2 \quad \text{Equation 17}$$

On en déduit finalement:

$$\lambda_{eq}(\theta_1(\text{grad}T)_1 + \theta_2(\text{grad}T)_2) = \theta_1\lambda_1(\text{grad}T)_1 + \theta_2\lambda_2(\text{grad}T)_2 \quad \text{Equation 18}$$

$$\text{Soit } \lambda_{eq}(\theta_1 A_1 + \theta_2 A_2) = \theta_1 \lambda_1 A_1 + \theta_2 \lambda_2 A_2 \quad \text{Equation 19}$$

$$\text{D'où } \theta_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{eq}}{\lambda_1 + 2\lambda_{eq}} + (1 - \theta_1) \frac{\lambda_2 - \lambda_{eq}}{\lambda_2 + 2\lambda_{eq}} = 0 \quad \text{Equation 20}$$

On pose les paramètres suivants :

$$X = \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_2} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

et on obtient l'équation du second ordre en λ :

$$2X + X [3\theta_1 - 2 + \beta(1 - 3\theta_1)] - \beta = 0 \quad \text{Equation 21}$$

La résolution de ce système permet d'obtenir les valeurs de X et d'en déduire λ_{eq} . Dans le cas où λ_1 est très faible devant λ_2 (air par exemple), l'équation précédente se simplifie avec $\beta=0$:

$$2X^2 + X [3\theta_1 - 2] = 0 \quad \text{Equation 22}$$

$$\text{Soit} \quad \lambda_{eq} = \left(1 - \frac{3}{2}\theta_1\right)\lambda_2 \quad \text{Equation 23}$$

On obtient une dépendance linéaire entre la conductivité du milieu équivalent et la conductivité du milieu 2. On retrouve la valeur limite de 2/3 pour la concentration θ_1 qui définit le domaine de connexité de la phase 1.

II.1.2.2. HAC avec inclusions bicomposite

Dans ce cas, la connexité de la phase externe est imposée (milieu 2 dans Fig.III.5). On considère donc un constituant 1 modélisé par une sphère de rayon R_1 , de conductivité λ_1 et de masse volumique ρ_1 , entouré d'un constituant 2 de caractéristiques R_2 , λ_2 et ρ_2 . Cette inclusion bicomposite est entourée d'une matrice de matériau homogène équivalent de caractéristiques λ_{eq} et ρ_{eq} . On définit un paramètre θ qui permet de caractériser la concentration volumique de la phase interne 1 :

$$\theta = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3 \quad \text{Equation 24}$$

Tout comme dans le cas des inclusions simples, le milieu est soumis à un gradient de température uniforme unitaire G à l'infini. Le champ de température solution est de la forme $T_i = \left(A_i r + \frac{B_i}{r^2}\right) \cos \theta$. L'équation de la chaleur est résolue pour cette inclusion

composite en respectant les conditions aux limites c'est-à-dire la continuité des flux et des températures aux deux interfaces.

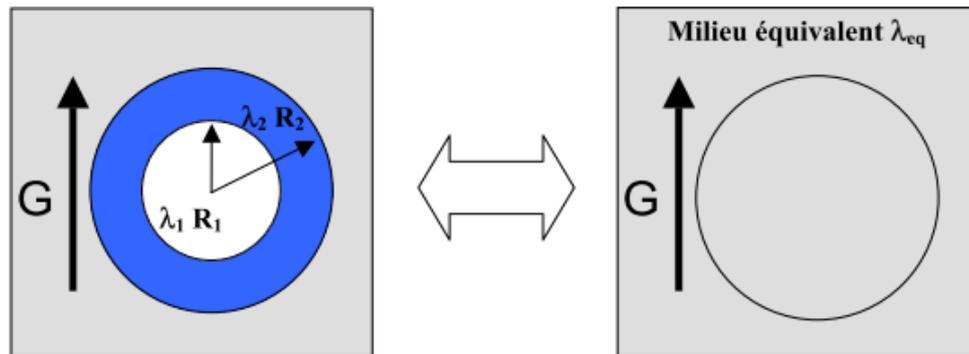


Figure 7: Equivalence entre milieu bicomposite à inclusions sphériques et milieu homogène

Les conditions aux limites imposent que:

- ❖ En $r=0$ T_1 est finie donc $B_1=0$
- ❖ En $r=\infty$ $(\text{grad}T)_{\text{eq}}$ tend vers G donc $A_{\text{eq}}=1$
- ❖ En $r=R_1$ T est continue donc $\frac{B_2}{R_1^2} + A_2 R_1 = A_1 R_1$
- ❖ En $r=R_1$ le flux Φ_i est continu donc $\lambda_2 (A_2 - \frac{2B_2}{R_1^3}) = \lambda_1 A_1$
- ❖ En $r=R_2$ T est continue donc $\frac{B_2}{R_2^2} + A_2 R_2 = R_2 + \frac{B_{\text{eq}}}{R_2^2}$
- ❖ En $r=R_2$ le flux est continu donc $\lambda_2 (A_2 - \frac{2B_2}{R_2^3}) = \lambda_{\text{eq}} (1 - \frac{2B_{\text{eq}}}{R_2^3})$

Dans la méthode autocohérente, la conductivité λ_{eq} doit être telle que sous le même gradient de température à l'infini G , il y ait identité entre les énergies thermiques contenues dans le milieu homogène équivalent sans inclusion et dans le milieu avec l'inclusion composite. Ceci équivaut à dire que la moyenne du gradient de température dans la sphère composite est égale au gradient G d'où $B_{\text{eq}} = 0$. On obtient ainsi un système de 4 équations à 3 inconnues. Ce dernier n'aura une solution que si le système est lié donc son déterminant est nul. On obtient ainsi la conductivité λ_{eq} du milieu homogénéisé bicomposite [8]:

$$\lambda_{eq} = \lambda_2 \left[1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1}{\lambda_1/\lambda_2 - 1}} \right] \quad \text{Equation 25}$$

La même méthode peut être appliquée au cas d'une inclusion sphérique tricomposite avec les milieux 1, 2, 3.

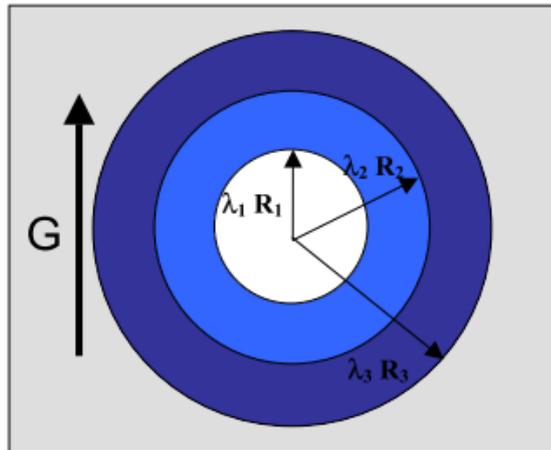


Figure 8: Inclusion sphérique tricomposite

On pose les concentrations volumiques suivantes :

$$\theta = \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^3 \quad \text{Equation 26}$$

$$\delta = 1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 \quad \text{Equation 27}$$

On obtient alors un système de six équations à cinq inconnues et la conductivité équivalente vaut [9] :

$$\lambda_{eq} = \lambda_3 \left[1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1 + \frac{(\lambda_1/\lambda_2 - 1)\delta}{3}}{\frac{\lambda_1}{\lambda_3} - 1 - \frac{\delta(\lambda_1/\lambda_2 - 1)(2\lambda_2/\lambda_3)}{3}}} \right] \quad \text{Equation 28}$$

Quelques remarques peuvent être faites quant aux comportements limites induits par ces deux formules. Concernant les inclusions bicomposites, quand θ tend vers 0, λ_{eq} tend vers λ_2 . En revanche, pour θ tendant vers ∞ , on retrouve $\lambda_{eq} \approx \lambda_1$. De plus, un fort contraste entre les deux milieux simplifie (Equation 25) en :

$$\lambda_2 \gg \lambda_1 \quad \lambda_{eq} = \lambda_2 \left(1 - \frac{3\theta}{2 + \theta} \right) \quad \text{Equation 29}$$

$$\lambda_1 \gg \lambda_2 \quad \lambda_{eq} = \lambda_2 \left(1 + \frac{3\theta}{1 - \theta} \right) \quad \text{Equation 30}$$

Dans le cas d'un milieu tricomposite, on se ramène au milieu bicomposite lorsque δ tend vers 0 (les phases 1 et 2 se confondent). Dans ce cas, on retrouve $\theta = (R_1/R_3)^3$

Cette méthode peut être étendue à des inclusions à n phases. Le problème se ramène à un système de n équations avec (n-1) inconnues pour lequel on déduit une relation entre les différents paramètres.

II.1.3. Application des bornes de Voigt et Reuss aux panneaux

Pour la caractérisation théorique des panneaux d'isolant par les bornes de Voigt et Reuss, les hypothèses suivantes sont définies :

- Le fluide est l'air qui occupe remplace l'eau après évaporation
- La matrice solide est soit :
 - Déchet de coton + chaux vive
 - Déchet de coton + ciment

- Déchet de coton + chaux vive + ciment
- Masse volumique de la matrice est déterminée par la méthode de déplacement de l'eau
- La conductivité thermique de la chaux sera utilisée comme conductivité thermique de la matrice solide

Tableau 6: Résultat de la méthode de Voigt et Reuss

Echantillons	$\lambda_{\text{série}}$	$\lambda_{\text{parallèle}}$	λ_{moyenne}
E1	0,0304	0,6698	0,3501
E2	0,0304	0,6698	0,3501
E3	0,0304	0,6698	0,3501
F1	0,0451	0,5865	0,3158
F2	0,0364	0,7331	0,3847
F3	0,0364	0,7331	0,3847
F4	0,0364	0,7331	0,3847
G1	0,0364	0,7331	0,3847
G2	0,0451	0,5865	0,3158
G3	0,0451	0,5865	0,3158
G4	0,0451	0,5865	0,3158

II.1.4. Application du modèle Homogénéisation Autocohérente aux panneaux

Posons :

- ρ_c : masse volumique du coton en vrac
- λ_c : conductivité thermique du coton
- ρ_{pc} : masse volumique de la particule végétale
- λ_{pc} : conductivité thermique de la particule végétale (inconnue)
- λ_a : conductivité thermique de l'air ambiant
- ρ_a : masse volumique de l'air (négligeable)

A partir de la mesure expérimentale de la conductivité macroscopique du déchet de coton en vrac, considéré comme le milieu équivalent, on peut déduire la valeur de la conductivité de la particule λ_{pc} en inversant la formule obtenue dans le cas du modèle à inclusions bicomposite. On considère une structure avec une bulle d'air centrale (phase 1)

de rayon R_a entourée d'une particule végétale (phase 2) de rayon R_{pc} [10]. La conductivité du déchet de coton en vrac s'écrit donc :

$$\lambda_c = \lambda_{pc} \left[1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1}{\lambda_a/\lambda_{pc} - 1}} \right] \quad \text{Equation 31}$$

Avec $\theta = \left(\frac{R_a}{R_{pc}} \right)^3 = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_{pc}} \approx 0.55$ Equation 32

- $\rho_c = 60 \text{ kg.m}^{-3}$
- $\lambda_c = 0.039 \text{ w/(m.K)}$
- $\rho_{pc} = 110 \text{ kg.m}^{-3}$
- $\lambda_a : 0.023$

. Finalement, on peut exprimer la conductivité du chanvre en vrac en fonction de sa masse volumique en remplaçant les valeurs numériques dans (Equation 31).

On tire donc $\lambda_{pc} = \frac{\lambda_c}{\left[1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1}{\lambda_a/\lambda_{pc} - 1}} \right]}$ Equation 33

D'où $\lambda_{pc} = 0.063 \text{ w/(m.K)}$

Les panneaux étant constitués de trois éléments, on utilise le modèle à inclusions tricomposite avec une bulle d'air, entourée de particules végétales, elles-mêmes entourées de liant [11]. Ce type d'inclusion générique est basé sur trois hypothèses:

- Le liant est constitué de chaux vive, de ciment ou de mélange chaux vive + ciment
- Les particules végétales sont constituées de la partie végétale et de l'air intra-particule
- La bulle d'air correspond à l'air macroscopique contenu dans le matériau (hors liant et hors particule)

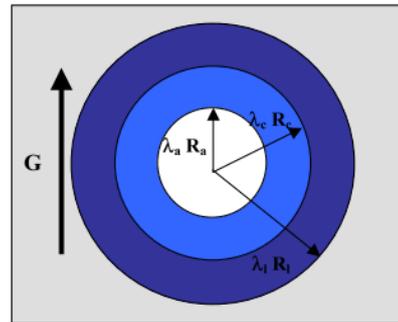


Figure 9: Inclusion sphérique tricomposite représentant les panneaux

$$\lambda = \lambda_l \left[1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1 + \frac{\delta}{3} \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_{pc}} - 1 \right)}{\frac{\lambda_a}{\lambda_l} - 1 - \frac{\delta}{3} \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_{pc}} - 1 \right) \left(\frac{2\lambda_{pc}}{\lambda_l} + 1 \right)}} \right] \quad \text{Equation 34}$$

Avec $\theta = \left(\frac{R_{pc}}{R_l} \right)^3$ $\delta = 1 - \left(\frac{R_a}{R_{pc}} \right)^3$ Equation 35

On pose $m_{pc} = k.m_l$ Equation 36

Avec m_{pc} : masse particules

m_l : masse de liants en poudre dans la formulation des panneaux

On en déduit :

$$\theta = 1 - \frac{1}{k+1} \frac{\rho}{\rho_l} \quad \text{Equation 37}$$

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{pc}} \frac{k}{(k+1)} \frac{1}{1 - \frac{1}{k+1} \frac{\rho}{\rho_l}} \quad \text{Equation 38}$$

Cette définition de k est basée sur l'hypothèse que les variations de propriétés entre le liant en poudre et le liant hydraté sec n'entraînent pas de variation notable sur la conductivité thermique. Ceci a été vérifié sur 6 formulations différentes [12] (utilisant deux liants distincts) pour lesquelles la variation de λ n'excédait pas 2% entre les deux approches.

Tableau 7: Conductivité thermique donnée le modèle HAC

Echantillons	λ série (w/m.K)	λ parallèle (w/m.K)	λ moyenne (w/m.K)	λ du modèle HAC (w/m.K)
E1	0,0304	0,6698	0,3501	0,1243
E2	0,0304	0,6698	0,3501	0,1243
E3	0,0304	0,6698	0,3501	0,1134
F1	0,0451	0,5865	0,3158	0,1346
F2	0,0364	0,7331	0,3847	0,1516
F3	0,0364	0,7331	0,3847	0,1014
F4	0,0364	0,7331	0,3847	0,1179
G1	0,0364	0,7331	0,3847	0,1179
G2	0,0451	0,5865	0,3158	0,1179
G3	0,0451	0,5865	0,3158	0,1179
G4	0,0451	0,5865	0,3158	0,1264

II.1.5. Présentation des résultats expérimentaux donnés par KD2 Pro sur les panneaux

Tableau 8: Résultats expérimentaux des panneaux

Echantillons	Conductivité λ (w/m.K)	Résistivité R(°C.cm/w)	Diffusivité D(mm ² /s)	Chaleur spécifique c(MJ/m ³ .K)
E1	0,215	466	0,224	0,959
E2	0,198	504,7	0,201	0,984
E3	0,194	514,6	0,228	0,854
F1	0,174	576,3	0,166	1,048
F2	0,22	454,2	0,307	0,718
F3	0,172	583,1	0,205	0,838
F4	0,146	685,5	0,204	0,715
G1	0,204	490,6	0,257	0,793
G2	0,178	560,6	0,241	0,739
G3	0,184	543,5	0,222	0,83
G4	0,199	501,3	0,238	0,837

II.1.6. Présentation des résultats expérimentaux donnés par KD2 Pro sur les rouleaux

Tableau 14: Résultats expérimentaux des rouleaux

Epaisseurs	Conductivité λ (w/m.K)	Résistivité R(°C.cm/w)	Diffusivité D(mm ² /s)	Chaleur spécifique c(MJ/m ³ .K)
5 cm	0,093	1078	0,222	0,417
10 cm	0,095	1048	0,237	0,402

La conductivité thermique des rouleaux est en moyenne $\lambda=0.094$ w/(m.K), elle est environ trois (3) fois celle de la laine de verre qui est $\lambda=0.036$ w/(m.K), valeur obtenue dans les mêmes conditions de température.

II.2. Discussion

Ces tableaux placés au-dessus nous donnent les résultats théoriques donnés par l'Homogénéisation Autocohérente, les intervalles encadrant les valeurs de conductivité thermique de la méthode de Voigt et Reuss et les résultats expérimentaux donnés par l'appareil de mesure KD2 Pro.

Nous remarquons que les différentes valeurs des résultats expérimentaux sont bien comprises entre les intervalles série-parallèle de la méthode de Voigt et Reuss. Dans ces intervalles se situe aussi les résultats théoriques du modèle par Homogénéisation Autocohérente. La moyenne des conductivités thermiques des panneaux données par Homogénéisation Autocohérente est de 0.121 w/(m.K) . Cette valeur n'est pas très loin de celle de la moyenne des conductivités thermiques expérimentales qui est de 0.189 w/(m.K) .

En ce qui concerne la conductivité thermique des isolants en rouleaux qui est de 0.094 w/(m.K) en moyenne, elle s'apparente à celle du déchet de coton en vrac qui, elle est de 0.063 w/(m.K) , valeur donnée par la méthode par Homogénéisation Autocohérente.

II.3. Détermination du gain en conductivité thermique

La conductivité thermique des briques classiques utilisées dans la construction des bâtiments est de $\lambda_b=1.15 \text{ w/(m.K)}$ (Briques en Terre Compactée utilisée : briques utilisées par l'entreprise CC3D). les isolants en rouleau à base de déchet de coton qui a une conductivité thermique de $\lambda_i=0.094 \text{ w/(m.K)}$ en moyenne seront utilisés en série avec le murs et nous pouvons déterminer la conductivité thermique équivalente du murs et de l'isolant thermique.

Avec une isolation de dix (10) cm d'épaisseur, la conductivité équivalente sera :

- Au niveau du mur (15 cm), on passe de $\lambda=1.15 \text{ w/(m.K)}$ à $\lambda_{eq}=0.209 \text{ w/(m.K)}$ donc un gain thermique de 81,83%
- Au niveau du faux plafond en plâtre (3 cm), on passe de $\lambda=0.48 \text{ w/(m.K)}$ à $\lambda_{eq}=0.115 \text{ w/(m.K)}$ donc le gain en conductivité thermique est de 76%.
- Au niveau du dallage en béton (10 cm), on passe de $\lambda=1.75 \text{ w/(m.K)}$ à $\lambda_{eq}=0.178 \text{ w/(m.K)}$ et le gain en conductivité thermique est de 90%

En moyenne, on a un gain en conductivité thermique dans tout le bâtiment de **82.61%**

Avec une isolation de cinq (5) cm d'épaisseur, la conductivité équivalente devient :

- Au niveau du mur (15 cm), on passe de $\lambda=1.15 \text{ w/(m.K)}$ à $\lambda_{eq}=0.736 \text{ w/(m.K)}$ donc un gain thermique de 36%
- Au niveau du faux plafond en plâtre (3 cm), on passe de $\lambda=0.48 \text{ w/(m.K)}$ à $\lambda_{eq}=0.135 \text{ w/(m.K)}$ donc le gain en conductivité thermique est de 72%.
- Au niveau du dallage en béton (10 cm), on passe de $\lambda=1.75 \text{ w/(m.K)}$ à $\lambda_{eq}=0.255 \text{ w/(m.K)}$ et le gain en conductivité thermique est de 85.45%

En moyenne, on a un gain en conductivité thermique dans tout le bâtiment de **64.48%**

CHAPITRE V : CONCLUSION-PERSPECTIVES-RECOMMANDATIONS

I. Perspectives et recommandations

Les études ont été faites sur trois (3) compositions différentes en ce qui concerne les isolants en panneaux, selon les matières premières utilisées et les proportions des différents constituants. La mise en place de ces échantillons ont été fait manuellement (artisanalement) et le but était de connaître la composition qui donnerait la meilleure conductivité thermique. Il aurait été beaucoup plus juste d'avoir la chaîne de production d'isolant thermique pour pouvoir comprimer le déchet de coton et en faire un isolant thermique et comparer ses propriétés thermiques avec celles des isolants disponibles sur le marché.

En ce qui est des isolants en rouleaux, on n'utilise pas de liant pour la fabrication. Sa mise en place est faite par compression à l'aide d'une machine. N'ayant pas cette machine, nous avons procédé artisanalement en mettant le déchet de coton sur du tissu après avoir appliqué de la colle liquide. On obtient une conductivité thermique meilleure que celle donnée par les panneaux.

Au niveau de la mise en œuvre, vu que les mélanges étaient fait avec la chaux vive, après le moulage nous avons observé des grumeaux de chaux qui apparaissaient et fragilisent la structure des panneaux. Il est donc recommandé de prolonger le temps de malaxage et d'ôter les grumeaux de la chaux éteinte afin la chaux puisse s'agglomérer aux fibres.

De nombreux aspects que nous jugeons utile tels que l'utilisation des panneaux et des rouleaux de déchets de coton dans la construction (Norme, prescriptions technique pour la pose des panneaux et des rouleaux), l'étude de faisabilité (étude économique), l'étude d'impact environnemental etc. devront être pris en compte dans d'autres études. L'étude économique a été faite mais a besoin d'être poussée.

Par ailleurs, les résultats du laboratoire nous conseillent de s'orienter beaucoup plus vers les rouleaux de déchets de coton ($\lambda=0.094$ w/(m.K)) au détriment des panneaux qui donnent une conductivité thermique moins bonne ($\lambda=0.189$ w/(m.K)).

II. Conclusion

Le travail mené est basé sur une approche globale des techniques de mise en œuvre des panneaux et rouleaux d'isolation thermique et de leur propriété thermique. Ces panneaux sont faits à base de déchets de coton. Pour ce faire, une étude bibliographique a précédé pour tracer le chemin qui aboutit à des résultats intéressants.

Déjà en au Nord il y a des entreprises qui utilisent les vêtements usagés pour la fabrication d'isolants thermiques. Il était donc intéressant de vérifier si techniquement le déchet de coton pourrait être utilisé en Afrique pour la fabrication d'isolant thermique. La mise en œuvre a permis de déterminer quelques caractéristiques des panneaux à savoir les proportions des matières premières pour la réalisation d'isolants de caractéristiques thermiques meilleurs, ainsi que le temps de séchage et tous les paramètres accompagnant cette cinétique. Ainsi tous les panneaux ont eu un temps de séchage de 20 jours. La caractérisation des propriétés thermiques des panneaux et des rouleaux faisait partie de cette étude. Pour ce faire deux modélisations ont été faites pour la détermination théorique des conductivités thermiques. Le modèle de Voigt Reuss qui permet de prédire l'intervalle dans lequel se situerait la conductivité thermique et le modèle HAC qui donne la valeur théorique de l'isolant. Une phase d'expérimentation a suivi pour donner les caractéristiques réelles des isolants. Nous constatons que les méthodes théoriques confirment bien les résultats expérimentaux des isolants.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: RAPPORT BRUNDTLAND Notre avenir à tous. «Commission mondiale sur l'environnement et le développement» présidée par Gro Harlem Brundtland, 1987.
- [2]JANNOT Y., Théorie et pratique de la métrologie Thermique, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), 2008
- [3]: JONNOT Y., Transfert Thermique, cours de 160 pages, 2005
- [4]: MOREL, N., GNANSOUNOU, (septembre2008). Energétique du bâtiment. Cours.217p
- [5]: COUASNET, Y. 2007. Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction. Editions: le Moniteur. 369p
- [6]: HASHIN, Z. Assessment of the Self Consistent Scheme Approximation: Conductivity of Particulate Composites. J. Composite Materials, 1968, vol.2, pp.284-300.
- [7]:BOUTIN, C. Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode autocohérente. Matériaux et Constructions, 1996, vol.29, pp.609-615.
- [8]: HASHIN, Z. Assessment of the Self Consistent Scheme Approximation: Conductivity of Particulate Composites. J. Composite Materials, 1968, vol.2, pp.284-300.
- [9]: BOUTIN, C. ROYER, P. and AURIAULT, J.L. Sound Absorption of Dry Porous Media with Single and Double Porosity. In : ASCE Ed. Proc. of the 11th Conference Engineering Mechanics Division/ ASCE, May 19-22, 1996, Fort Lauderdale, FL.
- [10]:ARNAUD, L. MONNET, H. SALLET, F. Modélisation par homogénéisation autocohérente de la conductivité thermique des bétons et laines de chanvre. In: Elsevier Ed. A. Lallemand et J.F. Leone, Proc. du Congrès français de thermique SFT2000, Lyon, 15-17 mai, 2000, pp.543-548.
- [11]: ARNAUD L., CORDIER C., SALLET F. Mechanical and thermal properties of vegetal concrete. In: Perazzo Barbosa N., Swamy R.N. and Lynsdale C. Ed. Proc. of the International Conference on Sustainable Construction into the next millennium:

Environmentally friendly and innovative cement based materials, November 2-5, Joao Pessoa, Brasil, 2000, pp.302-311.

[12]: CORDIER, C. Caractérisation thermique et mécanique des bétons de chanvre : rapport de stage de fin d'études. Ecole doctorale MEGA. Vaulx-en-Velin: ENTPE, 1999. 56 p.

[13]:http://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/kyoto_protocol/items/3274.php
p consulté le 24/04/2012

[14] :http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l28060_fr.htm consulté le 24/04/2012

[15] : <http://planeteconom.free.fr/index.php/301-economie.html>

[16] : <http://www.un.org/french/events/wssd/pages/cnued.html>

ANNEXES

Annexe I : Caractéristique de l'appareil KD2 Pro

Tableau 9: Caractéristique de KD2 Pro

	Taille		Plage				Précision conductivité (W/m.K)	Précision de la diffusivité thermique (mm ² /s)	Précision de la chaleur spécifique mJ/(m3.K)	Longueur câble (m)
	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Conductivité thermique (W/m.K)	Résistivité thermique (°C.cm/w)	Diffusivité thermique (mm ² /s)	Chaleur spécifique mJ/(m3.K)				
KS-1	1.3	60	0.02 à 02.0	50 à 5000	-	-	±5% de 0.2 à 2	-	-	0.8
							±0.01 de 0.02 à 0.2			
TR-1	2.4	100	0.1 à 4.0	25 à 1000	-	-	±10% de 0.2 à 4	-	-	0.8
							±0.02 de 0.1 à 0.2			
SH-1	1.3	30	0.02 à 2.0	50 à 5000	0.1 à 1	0.5 à 4	±10% de 0.2 à 2	±10% si conductivité thermique >0.1(W/m.K)	±10% si conductivité thermique >0.1(W/m.K)	0.8
							±0.01 de 0.02 à 0.2			

Capteur KS-1

Il mesure la conductivité thermique et la résistivité thermique. Il est bien adapté pour les liquides et les matériaux isolants dont la conductivité thermique reste inférieure à 0.1 W/(m.K). Ce type de capteur n'est pas conseillé pour les matériaux granulaires et poudreux.

Capteur TR-1

Il mesure aussi la conductivité thermique et la résistivité thermique des matériaux, mais sa particularité est qu'il est bien adapté au sol, au béton, au rocher et aux autres matériaux granulaires ou solides.

Capteur SH-1

Le SH-1 mesure la chaleur spécifique, la résistance thermique, la conductivité thermique et la diffusivité thermique. Il est adapté aux mesures de caractéristiques thermiques des matériaux solides et granulaires.

Le capteur KS-1 est bien adapté aux mesures des caractéristiques thermiques des matériaux isolants comme ceux que nous cherchons à mettre en place. Le temps de lecture est fixé suffisamment long (10 minutes) afin de minimiser les erreurs de contact entre le capteur et le matériau. L'échantillon ne doit pas mouvoir pendant les mesures.

Aussi sur le menu principal de l'appareil les unités que nous souhaitons utilisées sont à fixer au préalable, ainsi les différentes unités sont abrégées de la façon suivante :

K : conductivité thermique

C : chaleur spécifique

D : diffusivité thermique

Rho : résistivité thermique

A la fin des différentes mesures, les résultats peuvent être transférés à l'ordinateur sur lequel les programmes KD2 Pro utility et Microsoft office sont installé.

A la lumière des différentes informations sur les deux appareils de caractérisation thermique, on tourne son regard vers le KD2 Pro compte tenu de ses multiples avantages.

En effet avec ce dernier on n'a plus besoin d'effectuer des calculs pour avoir les informations thermiques souhaités mais il suffit tout simplement de savoir lire sur l'écran de l'appareil. Aussi avec cet appareil on connaît avec exactitude les marges d'erreur et pouvons ainsi juger de la fiabilité des résultats attendus. Les essais peuvent être effectués n'importe où (appareil portable), cela évite le déplacement des échantillons de matériaux.

Tableau 10: Composition 1

Composition 1 : Déchet de coton +chaux vive														
Date de confection	Echantillons	Déchet de coton		Chaux vive		Eau initiale		Eau finale		Panneau				Commentaires
		M (g)	%	M (g)	%	M (g)	%	M (g)	%	Mi (g)	Msec (g)	V (cm ³)	P (kg/m ³)	
08/05/2012	E1	760	13.79	750	13.61	4000	72.6	134	8.15	5510	1644	4000	411	Bonne prise de la chaux, mais présente des fissures survenues pendant le séchage
08/05/2012	E2	760	16.85	750	16.63	3000	66.52	180	10.65	4510	1690	4000	422.5	
08/05/2012	E3	760	17.84	500	11.74	3000	70.42	151	10.33	4310	1461,1	4000	365.28	
08/05/2012	E4	800	22.54	250	7.04	2500	70.42			3550		4000		Panneau brisé complètement

Annexe II

Tableau 11: Composition 2

Composition 2 : Déchet de coton +ciment														
Date de confection	Echantillons	Déchet de coton		ciment		Eau initiale		Eau finale		Panneau				Commentaires
		M (g)	%	M (g)	%	M (g)	%	M (g)	%	Mi (g)	Msec (g)	V (cm ³)	P (kg/m ³)	
08/05/2012	F1	800	24.24	500	15.15	2000	60.61	90.2	6.49	3300	1390,2	4000	347.55	Très bonne prise du ciment, panneaux très résistants et moins lourds que les autres
08/05/2012	F2	800	18.18	600	13.64	3000	68.18	134.7	8.78	4400	1534,7	4000	383.68	
08/05/2012	F3	800	22.22	300	8.33	2500	69.44	1.4	0.1	3600	1101,4	4000	275.35	
08/05/2012	F4	800	21.62	400	10.81	2500	67.57	5	0.4	3700	1205	4000	301.25	

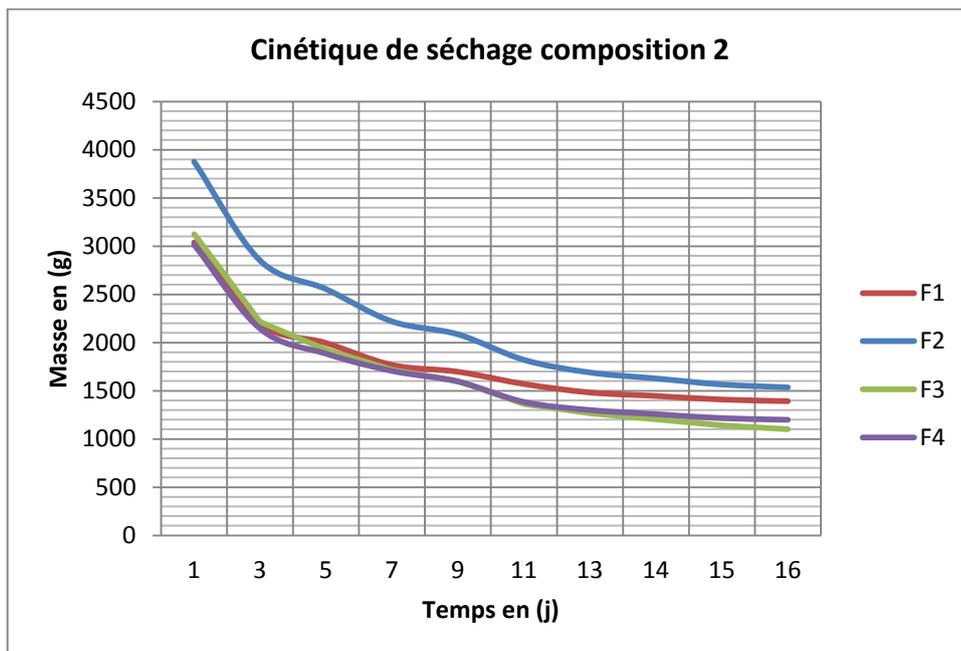
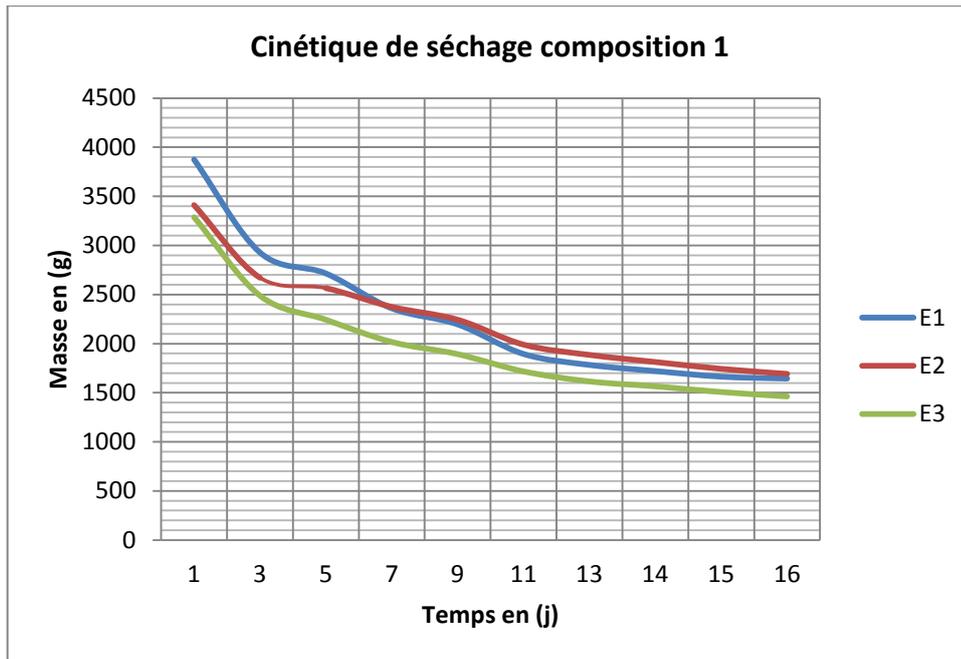
Tableau 12: Composition 3

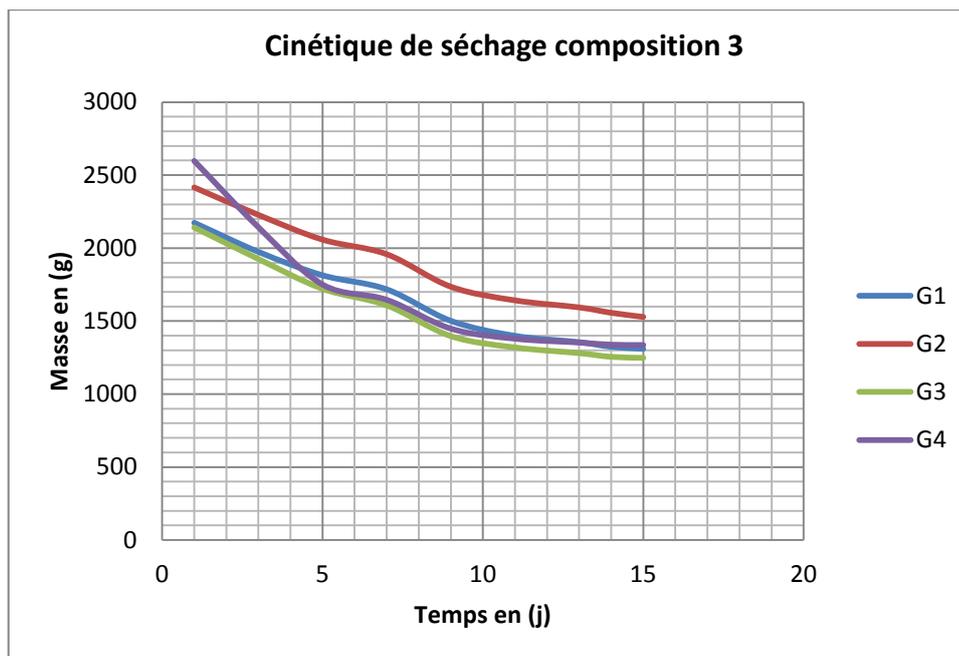
		Composition 3 : Déchet de coton +chaux + ciment														
Date de confection	Echantillons	Déchet de coton		Chaux vive		ciment		Eau initiale		Eau finale		Panneau				Commentaires
		M (g)	%	M (g)	%	M (g)	%	M (g)	%	M (g)	%	Mi (g)	Msec (g)	V (cm ³)	P (kg/m ³)	
09/05/2012	G1	800	21.62	200	5.41	200	5.41	2500	67.57	110.1	8.4	3700	1310,1	4000	327.53	Panneaux moins résistants que ceux à base de ciment uniquement, présentent des fissures longitudinales
09/05/2012	G2	800	25	300	9.38	100	3.13	2000	62.5	326.9	21.4	3200	1526,9	4000	381.73	
09/05/2012	G3	800	25	100	3.13	300	9.38	2000	62.5	47.6	3.8	3200	1247,6	4000	311.9	
09/05/2012	G4	800	25.81	100	3.23	200	6.45	2000	64.52	236.2	17.7	3100	1336,2	4000	334.05	

Annexe III

Tableau 13: Données du séchage

		Echantillons												
Masse (g)	jours	E1	E2	E3	E4	F1	F2	F3	F4	G1	G2	G3	G4	
	1	3874,5	3410,5	3287,5	3135,5	3038,5	3876,3	3123,3	3015,8					
	3	2928	2671,4	2488,4	2039,3	2197,6	2850,6	2212,5	2144,5	2173,8	2415,7	2141,4	2597,3	
	5	2715	2565,5	2243,6	1721,2	1995,8	2554,6	1926,8	1884,3	1974,6	2227,8	1925,6	2143,5	
	7	2359,8	2374,35	2016,82		1768,04	2219,35	1717,9	1705,75	1814,03	2058,15	1721,46	1750,55	
	9	2195,9	2243,51	1893,2		1697,3	2085,54	1602,77	1595,43	1717,67	1958,13	1607,51	1645,9	
	11	1895	1990	1717,16		1570,65	1820,78	1364,7	1384,34	1501,8	1735,61	1397,24	1448,5	
	13	1783	1885,4	1615,3		1482,3	1689,7	1266,4	1300,5	1399,1	1642,1	1319,5	1379,4	
	14	1720,9	1813	1565,2		1446,5	1627,9	1204,6	1258	1355,6	1593,8	1280,5	1353,2	
	15	1663,5	1743,36	1507,37		1409,43	1565,48	1142,01	1216,37	1323,86	1556,85	1255,11	1338,43	
	16	1644,2	1692,2	1462,4		1392,2	1535,2	1102,3	1199,2	1310,1	1528,6	1248	1336,2	
17	1644	1690	1461,1		1390,2	1534,7	1101,4	1199	1310,1	1526,9	1247,6	1336,2		





Annexe IV : Propriétés physiques de certains corps

Cuivre	20	8954	383,1	386	Contre-plaqué pin	20	500	3000	0,15
	400			363	Granite	20	2600	881	3
Duralumin	20	2787	883	164	Gravier (vrac)	20	1800	889	0,7
Etain	20	7304	226	64	Grès	20	2500	880	2,6
Fer	20	7870	452	73	Lave	20	2350	881	1,1
Fonte	20	7849	460	59	Marbre	20	2700	881	2,9
Laiton 70%Cu, 30%Zn	20	8522	385	111	Parquet	20	700	3143	0,2
	400			147	Plâtre	20			0,48
Magnésie	38	270		0,067	Schiste	20	2400	879	2,2
Or	20	1336	19300	129	Matériaux isolants				
Platine	20			72	Balsa	20	85		0,054
Plomb	20	11373	130	35	Copeaux bois	23			0,059
Sodium liquide	100			81,5	Coton	20	80	1300	0,06
Titane	20			16	Kapok	30			0,035
Tungstène	20	19350	134	163	Laine de roche	20	20	880	0,047
Zinc	20	7144	384	112		20	55	880	0,038
Zircone	20			4		20	135	880	0,041
Matériaux divers					Laine de verre	20	8	875	0,051
Amiante	20			0,16		20	10	880	0,045
Asphalte	20	2115	920	0,062		20	15	880	0,041
Caoutchouc (naturel)	20	1150		0,28		20	40	880	0,035
Caoutchouc (vulcanisé)	20	1100	2010	0,13	Liège expansé	20	120	2100	0,044
Carton	20	86	2030	0,048	Moquette	20	200	1300	0,06
Cuir	20	998		0,159	Polyuréthane (mousse rigide)	20	32	1300	0,03
Glace	0	920	2040	1,88		20	50	1360	0,035
Papier	20			0,48		20	85	1300	0,045
Plexiglass	20	1190	1465	0,19	PVC (mousse rigide)	20	30	1300	0,031
Sable	20	1515	800	0,2-1,0		20	40	1300	0,041
Sciure	20					20	12	1300	0,047
Nature	θ	ρ	c_p	λ	Nature	θ	ρ	c_p	λ
	°C	kg m ⁻³	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	W m ⁻¹ °C ⁻¹		°C	kg m ⁻³	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	W m ⁻¹ °C ⁻¹
Métaux, alliages et céramiques					Matériaux de construction				
Acier au carbone	20	7833	465	54	Ardoise	20	2400	879	2,2
	200			48	Basalte	20	2850	881	1,6
	600			35	Béton caverneux	20	1900	879	1,4
Acier inox 15%Cr, 10%Ni	20	7864	460	20	Béton plein	20	2300	878	1,75
Acier inox 18%Cr, 8%Ni	20	7816	460	16,3	Bitume (cartonné)	20	1050	1305	0,23
	600			22	Bois feuillus légers	20	525	3143	0,15
Acier inox 25%Cr, 20%Ni	20	7864	460	13	Bois feuillus mi-lourds	20	675	3156	0,23
Alumine	20			29	Bois feuillus très légers	20	375	3147	0,12
Aluminium	20	2707	896	204	Bois résineux légers	20	375	3147	0,12
	400			249	Bois résineux mi-lourds	20	500	3160	0,15
Argent	20	10525	234	407	Bois résineux très légers	20	375	3147	0,12
Bronze 75%Cu, 25%Sn	20	8666	343	26	Brique terre cuite	20	1800	878	1,15
Carbone	20			147	Calcaire dur	20	2450	882	2,4
Carbure de silicium	20			13	Calcaire tendre	20	1650	879	1
Chrome	20	2118	7160	449	Carrelage	20	2400	875	2,4
Constantan 60% Cu, 40%Ni	20	8922	410	22,7	Contre-plaqué okoumé	20	400	3000	0,12