



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



MISE AU POINT D'ECO-MATERIAU A VOCATION D'ISOLATION THERMIQUE

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : GENIE CIVIL

Présenté et soutenu publiquement le [17/06/2010] par

Gustave Gnagny YAMOSSOU

Travaux dirigés par : Jean Hugues THOMASSIN

(Enseignant chercheur associé à 2iE, UTR-ISM)

Ismaila GUEYE

(Enseignant chercheur à 2iE, UTR-ISM)

Dr.Béli NEYA

(Chargé de recherche au DPF/INERA)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Ismaïla GUEYE

Membres et correcteurs : Raphaële VINAI
LAWANE

Promotion [2008/2010]

Dédicace

Je dédie ce mémoire,

*A Dieu tout puissant qui n'a cessé de m'accorder sa
grâce et ses bénédictions,*

*A mon père qui a eu confiance en moi en m'offrant
cette formation de master à 2iE,*

*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,*

*A ma belle et tendre Amie pour son affection, son
soutien et ses prières à mon égard.*

Remerciements

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 M. Jean-Hugues THOMASSIN pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à M. Béli NEYA, chargé de recherche à la DPF/INERA pour son encadrement, sa disponibilité, ses conseils et son chaleureux accueil à mon arrivé au laboratoire de la DPF ;

Je tiens également à remercier M. Ismaila GUEYE, Enseignant Chercheur à 2iE pour son encadrement et ses conseils ;

Je remercie également M. Raphaële VINAI, Enseignant à 2iE pour son encadrement tout au long de ce stage et surtout pour sa disponibilité ;

Je voudrais exprimer ma reconnaissance au Dr Oumar DISSA qui nous a permis de commencer les mesures thermiques au LPCE ;

Je remercie chaleureusement tous mes collègues 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 trois années de formation.

Résumé

Ce mémoire de recherche de master 2 a été consacré à l'étude de mise en œuvre, de caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des panneaux d'isolation faits à base de la bagasse de canne à sucre et de la balle de riz.

La mise en œuvre a été essentiellement de rechercher le mélange entre fibres végétales et liants qui présenterait une bonne rigidité et une bonne aération. Les compositions avec la bagasse de canne à sucre donnaient des résultats satisfaisants qui ont été confirmés par les essais mécaniques. Les compositions prenant en compte la balle de riz, la chaux et le ciment ont donné des panneaux peu rigides et friables contrairement à la composition de la balle de riz avec le plâtre qui elle était très rigide.

Une étude théorique de la conductivité avec le modèle de Voigt Reuss et celui de l'Homogénéisation Autocoherente a été faite pour la prédiction des conductivités thermiques des panneaux. Ces valeurs seront donc vérifiées par l'étude expérimentale en cours au Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement à l'Université de Ouagadougou. La première mesure sur l'échantillon 3.A de la composition 5 est en accord avec le modèle théorique et donne une conductivité de $0,114 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Cette étude a permis de mettre en œuvre des éco-matériaux comme les échantillons 3 E, 3F et J de la composition 5 qui ont des conductivités thermiques meilleures à celle du contreplaqué d'épaisseur 3mm. Elles apporteront alors un meilleur confort thermique à nos habitats.

La caractérisation thermique, volé très important de cette étude n'a pu se faire dans sa totalité expérimentalement, il est donc recommandé pour valider les modèles théoriques l'achèvement de cette partie de l'étude et ce avec des appareils plus adaptés tel la HFM 436 lambda.

Mots Clés :

1 – Eco-matériau

2 – Isolation thermique

3 – Résistance mécanique

4 – Résidu d'industrie agroalimentaire

5 – Gaz à effet de serre

Abstract

This report of research for master 2 was dedicated to the study of implementation, characterization of the thermal and mechanical properties of the panels of insulation made with the bagasse of sugar cane and the bullet of rice.

The implementation was essentially to look for the mixture between vegetable fibers and sociable binders which would present a good rigidity and a good aeration. The compositions with the bagasse of sugar cane gave satisfactory results which were confirmed by the mechanical tries(essays). The compositions taking into account the bullet of rice, the lime and the cement gave little stiff and crisp panels contrary to the composition of the bullet of rice with the plaster which it was very stiff.

A theoretical study of the conductivity with the model of Voigt Reuss and that of the Auto coherent Homogenization was made for the prediction of the thermal conductivities of panels.

These values will thus be verified by the current experimental study in the Laboratory of Physical appearance and Chemistry of the Environment at the University of Ouagadougou. The first measure on the sample 3.A of the composition 5 is in agreement with the Theoretical model and gives a conductivity of 0,114 W/m. ° C.

This study has implemented eco - materials like samples 3E , 3F and J of the composition 5 which have better thermal conductivity than 3mm thick plywood . then they will bring a better thermal comfort in our homes.

The thermal characterization , flew very important to this study could be done experimentally as a whole , it is recommended to validate the theoretical models, the completion of this part of the study and with what equipment best suited like HFM 436 lambda.

Key words:

1 – Eco-material

2 – Heat insulation 3 – The mechanical Resistance

4 - Residue of food-processing industry 5 – Greenhouse gas

Liste des abréviations

SISTC : Service information scientifique, technique et de communication

LR/D : Liaison recherche- développement

SEP : Service études et projets

CREAF : Centre de recherche environnementale, agricole et de formation

CRREA : Centre régional de recherches environnementales et agricoles

INERA : Institut de l'Environnement et de la Recherche Agricole

Liste des sigles

λ : conductivité thermique en W/m.°C

ρ : masse volumique en kg/m³

σ : contrainte en MPa

F : force en kN

m : masse en g

Vévap : vitesse d'évaporation en g/(j

Sommaire

Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des abréviations	vi
Liste des sigles.....	vi
Liste des tableaux	4
CHAPITRE I : GENERALITE	6
I- Introduction	6
I.1. Généralité.....	6
I.2. Contexte et objectif de l'étude	7
I.3. démarche et organisation du mémoire	8
II- Présentation de la structure d'accueil.....	9
II-1. Missions et attributions	9
II-2. Fonctionnement.....	10
II-3. Organigramme.....	10
CHAPITRE II : ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES	12
I- Etat de l'art des éco-matériaux à vocation isolation thermique.....	12
I.1. Eco-matériaux	12
I.1.1. Définition d'un éco-matériau	12
I.1.2. Caractéristique d'un éco-matériaux.....	12
I.1.3. Exemples d'éco-matériaux isolants.....	16
I.2. Isolation thermique des bâtiments	18
I.2.1 définition de l'isolation thermique.....	18
I.2.2. les différentes formes d'isolation d'un bâtiment.....	18
II- Approche théorique	19
II.1. Paramètres influençant les propriétés thermiques et mécanique d'un éco-matériau isolant.....	19
II.1.1 relation entre porosité apparente et conductivité thermique	19
II.1.2. Masse volumique et conductivité thermique	19
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES.....	21
I- Description des fibres végétales.....	21
I.1. la Bagasse de canne à sucre	21
I.2. la balle de riz.....	22
I.3 La tige de cotonnier	22

II-	Descriptions des liants.....	23
II.1.	La chaux.....	23
II.1.1.	définition	23
II.1.2.	Composition chimique de la chaux aérienne	23
II.1.3.	Quelques propriétés de la chaux.....	24
II.2.	Le ciment	24
II.2.1.	Définition	24
II.2.2.	Constituants	25
II.2.3.	Propriété mécanique.....	25
II.3.	Le plâtre.....	25
II.3.1.	Composition chimique.....	25
II.3.2.	Propriété mécanique	26
II.3.3.	Propriété physique et thermique	26
III-	Protocole expérimentale.....	26
III.1.	Matériels.....	26
III.2.	Etude expérimentale	27
III.2.1.	Mise en œuvre des panneaux	27
III.2.2.	Caractérisation thermique des panneaux	30
III.2.3.	Caractérisation mécanique des panneaux	31
	CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	33
I-	Mise en Œuvre des panneaux	33
I.1.	Présentation des essais	33
I.2.	cinétique de séchage.....	38
II-	Etude de la conductivité thermique	44
II.1.	étude de la conductivité thermique en milieu sec	44
II.2.	Modèles par Homogénéisation Autocohérente (HAC).....	47
II.3.	Discussion du modèle Voigt Reuss et du modèle HAC	47
II.2.	Mesures expérimentale	48
III-	Mesure mécanique.....	48
	CHAPITRE 5 : Conclusion – perspectives - Recommandations	50
I-	Perspectives et recommandations.....	50
II-	Conclusion.....	51

Liste des tableaux

Tableau II.1: conductivité thermique de quelques matériaux – source [10]	14
Tableau II.2: conductivité thermique de quelques éco-matériaux - source [10]	17
Tableau III 1: les différentes phases du Clinker [Seid et al.80]	25
Tableau III 2: propriété mécanique du plâtre – source [7]	26
Tableau III 3: propriétés physique et thermique du plâtre - source [7]	26
Tableau III 4: présentation des compositions	29
Tableau IV. 1: composition 1 & 7	35
Tableau IV. 2: composition 5	36
Tableau IV. 3: composition 10	37
Tableau IV. 4: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 1	39
Tableau IV. 5: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 5	40
Tableau IV. 6: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 7	42
Tableau IV. 7: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 10	43
Tableau IV. 8: intervalles des conductivités thermiques : méthode Voigt et Reuss & modèle HAC ...	47
Tableau IV. 9: conductivité thermique expérimentale	48
Tableau IV. 10: propriété mécanique des panneaux de fibres de bagasse et de balle de riz	49
Tableau IV. 11: cinétique de séchage de la composition 1	57
Tableau IV. 12: cinétique de séchage de la composition 5	57
Tableau IV. 13: cinétique de séchage de la composition 7	57
Tableau IV. 14: cinétique de séchage de la composition 10	58
Tableau IV. 15: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 1	59
Tableau IV. 16: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 5	59
Tableau IV. 17: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 7	59
Tableau IV. 18: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 10	60
Tableau IV. 19: procédure de calcul de la conductivité thermique par le modèle HAC	60

Liste des figures

Graphe II.1: conductivité thermique du matériau terre-paille en fonction de sa masse volumique 20

Graphe IV 1: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 1 en fonction du temps 39

Graphe IV 2: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 5 en fonction du temps 40

Graphe IV 3: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 7 en fonction du temps 42

Graphe IV 4: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 10 en fonction du temps 43

Photo III 1: étape de confection des armatures de cotonnier..... 28

Photo III 2: étape de fabrication des panneaux 29

Photo III 3: séchage des panneaux 30

Photo III 4: dispositif expérimental du plan chauffant 31

Photo III 5: portique d'essai universel didactique..... 32

CHAPITRE I : GENERALITE

I- Introduction

I.1. Généralité

Dès la fin des années 60, l'humanité a pris conscience de la tendance vers l'épuisement des ressources et la première conférence internationale sur l'environnement de Stockholm en 1972 en est le symbole. Un an plus tard, le premier choc pétrolier illustre la fragilité des systèmes dépendant des énergies fossiles. Ainsi, est apparue la nécessité de mettre en œuvre une gestion globale de la planète et de ses écosystèmes.

En 1988, l'ONU adopte la notion de développement durable qui signifie un développement social, économique et politique répondant aux besoins présents, sans hypothéquer ou compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leur propre développement. Cette notion fait apparaître la nécessité, tout à fait nouvelle dans son affirmation internationale officielle, d'une double solidarité : solidarité entre les peuples et solidarité entre les générations.

Chaque acteur, de chaque secteur de la vie économique, est donc confronté à la responsabilité qui lui incombe dans la gestion globale des ressources et de l'environnement.

Pour le secteur du BTP, très énergivore avec 30 % à 40 % de la consommation d'énergie totale selon les pays, le concepteur doit donc continuer à assurer l'abri et le confort de l'utilisateur, mais devra, de plus, faire en sorte que l'impact écologique du bâtiment sur l'environnement soit minimisé.

L'essor de l'éco-construction permet à la fois la théorisation et la concrétisation de cette réflexion dans la production normale du cadre bâti. Cette expression vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière 'naturelle', c'est-à-dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement.

L'intérêt de l'éco-matériau va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui en fait un facteur fondamental de l'art de construire. Pour cela, il faut veiller à:

- Préserver les ressources énergétiques conventionnelles,
- Réduire les coûts des investissements énergétiques, notamment en matière de chauffage et de climatisation,
- Réduire l'impact des énergies fossiles sur l'environnement.

Avec la raréfaction des ressources d'énergies fossiles et leurs coûts qui augmentent, en plus des effets négatifs des émissions qui en résultent sur le réchauffement de la planète, on commence à prendre conscience des biens faits d'intégrer l'éco-matériau dans le mode de construire et d'en faire un facteur important dans la recherche architecturale pour adapter les constructions aux conditions climatiques de la région d'implantation afin d'atteindre le niveau de confort thermique requis à moindre consommation d'énergie.

I.2. Contexte et objectif de l'étude

Le développement durable est un enjeu pour l'avenir de notre planète et sa prise en compte devrait entraîner des changements multiples dans les prochaines décennies (énergie, transport, logements ...). Le domaine de la construction, et en particulier celui basé sur l'utilisation de matériaux cimentaires n'échappera pas à cette évolution : il faudra limiter les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles non renouvelables, penser à la déconstruction tout en améliorant les propriétés d'usages des matériaux et des ouvrages et en veillant à la santé et au confort d'une population mondiale qui augmente très rapidement, surtout dans les Pays en voie de Développement. Ainsi, de nouveaux matériaux conçus dans cette optique à savoir les éco-matériaux vont devoir, à terme, remplacer les matériaux usuels.

L'Europe a une grande avance en matière de recherche de ces produits précités.

Quelques pays Africains, tel le Burkina Faso, se sont lancés dans la recherche de ces matériaux pour pallier aux importations de matériaux de construction et donc de faire face à la crise économique dû à la dévaluation.

Ces matériaux ont une importance capitales dans l'économie du pays car pourrait engendrer le développement d'une activité économique aussi bien industrielle qu'artisanale. Autant ils donneront un « confort économique », il participe au confort thermique des bâtiments, apportant ainsi un bien être aux habitants. Cependant, qui dit confort thermique, parle d'économie d'énergie en terme de climatisation compte tenue du temps d'ensoleillement au Burkina Faso.

Le projet actuel faisant objet de la présente étude est né du projet de valorisation des biomatériaux au Burkina Faso qui a vu le jour à Poitiers le 8 décembre 1994 lors d'une rencontre réunissant Messieurs Fouad AMIN (VALAGRO), Jean-Hugues THOMASSIN

(ESIP) et Béli NEYA (INERA, Ouagadougou). Ce projet avait pour objectif de fabriquer des produits de substitution à partir de déchets de matières végétale. Ce projet permettrait donc de mettre en œuvre des panneaux de fibres ayant pour but l'isolation thermique.

Il a fait l'objet de plusieurs stages depuis 1997 jusqu'à aujourd'hui.

Le thème du présent mémoire à savoir la mise en œuvre d'un éco-matériaux à vocation isolation thermique est donc un approfondissement des travaux de stage mené par les étudiants de Poitiers sur les panneaux de fibres en Aout-septembre 2009.

L'objectif général du projet est la mise en œuvre d'éco-matériaux à vocation d'isolation thermique.

Les objectifs à atteindre dans ce travail sont de:

- Définir des compositions pour la production de panneaux en utilisant les résidus de l'industrie agro-alimentaire pour remplacer les plafonds en contreplaqué d'épaisseur 3mm ;
- Caractériser les propriétés thermiques et mécaniques des panneaux isolants de façon expérimentale;

I.3. démarche et organisation du mémoire

La démarche scientifique adoptée est d'évaluer les performances thermiques et mécaniques des panneaux de fibres végétales mis en œuvre.

Le mémoire sera donc organisé comme suit :

La première partie sera basée sur la recherche bibliographique pour faire un état de l'art sur le domaine des panneaux de fibres végétales tout en prenant en compte les paramètres physiques susceptibles d'influencer les transferts thermiques dans les matériaux.

La deuxième partie, sera un travail purement expérimental qui permettra de reproduire le savoir faire européen en terme de panneaux isolants et l'adapter à des fibres africaines.

Enfin la troisième partie sera de discuter les valeurs des travaux expérimentaux et de faire des recommandations.

II- Présentation de la structure d'accueil

Le Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique est la structure en charge de la recherche au Burkina Faso. Autrefois nommé Institut Fondamental de l'Afrique Noire (IFAN) sous la colonisation, la structure est devenue Centre National Voltaïque de la Recherche Scientifique (CNVRS) puis Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique aujourd'hui.

Le CNRST comprend quatre instituts de recherche que sont :

- Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole (INERA).
- Institut des Sciences et des Sociétés (INSS).
- Institut de Recherche en Sciences de la Santé (IRSS).
- Institut de Recherche en Science Appliquées et Technologique (IRSAT)

L'INERA est, cependant, celle qui nous accueille pour le stage du mémoire de fin d'étude.

II-1. Missions et attributions

L'Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole a pour mission de :

- contribuer à mettre en œuvre les politiques de recherches agricoles et environnementales du Burkina ;
- organiser et gérer les recherches agricoles et contribuer à valoriser leurs résultats scientifiques et économiques ;
- promouvoir une gestion durable des ressources naturelles ;
- animer, suivre et coordonner les activités de recherches agricoles menées au Burkina tant par les structures de recherches nationales qu'étrangères, publiques ou privées, en groupe ou individuellement ;
- traduire en actes la politique de coopération et les engagements pris par le Burkina en matière de recherches agricoles ;
- contribuer à la formation et à l'information scientifique et technique du personnel de recherche et de développement agricole et environnemental ;
- créer et développer les unités de recherches agricoles et environnementales ;
- assurer un appui technique au développement agricole, y compris par des études, et le suivi d'exécution de projets ;

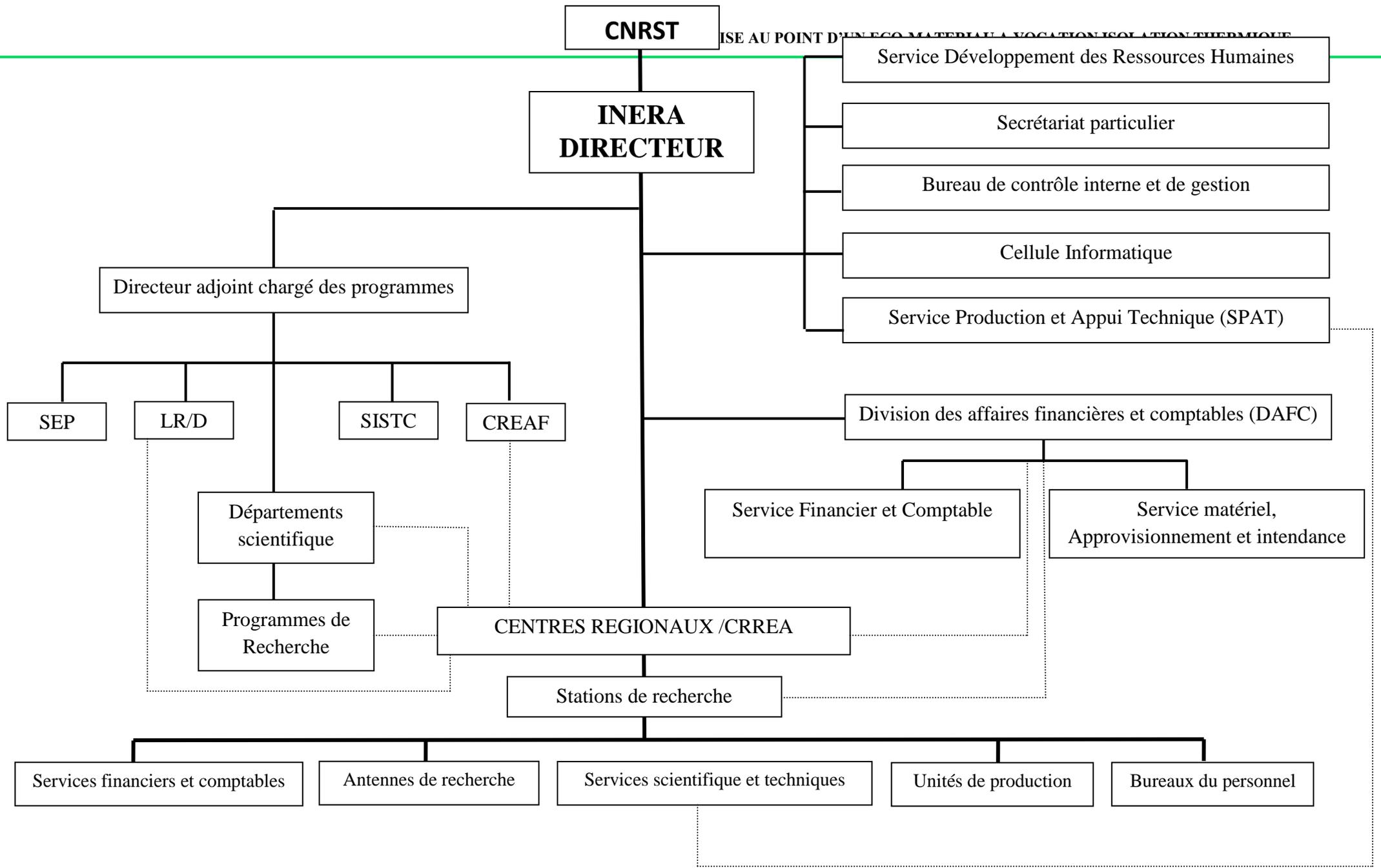
- décentraliser et régionaliser la recherche agricole dans le but de rapprocher les recherches de leurs clients et de promouvoir un développement optimal des potentialités agricoles régionales ;
- assurer la liaison entre la recherche et le développement, y compris le transfert des technologies aux producteurs ;
- produire des semences et des plants du matériel végétal retenu et proposer des races d'animaux aux différentes zones écologiques du pays.

II-2. Fonctionnement

Le fonctionnement de l'INERA repose sur :

- une Direction;
- des Centres Régionaux de Recherches Environnementales et agricoles (CRREA) ;
- un Centre de recherche environnemental, agricole et de formation (CREAF) ;
- des départements scientifiques regroupant les programmes de recherches.

II-3. Organigramme



CHAPITRE II : ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

I- Etat de l'art des éco-matériaux à vocation isolation thermique

I.1. Eco-matériaux

I.1.1. Définition d'un éco-matériau

Une définition universelle d'un éco-matériau, adoptée par l'ensemble des acteurs de la construction n'existe pas.

Cependant, le rapport de la rencontre des Amis de la terre¹ sur le thème : les éco-matériaux en France ; états des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements en Mars 2009 a permis de définir les éco matériaux selon quatre critères [Annexe II.1] d'où l'appellation définition multicritère des éco-matériaux. Ces critères sont les critères « mise en œuvre », « santé et confort », « environnement », « développement local équitable ». Leur résumé conduit à dire qu'un éco-matériau est un matériau caractérisé par son caractère renouvelable. D'origine naturelle, issu éventuellement d'un processus de transformation ou de fabrication non polluant et économe en énergie, un éco-matériau a des qualités en terme de performance énergétique, de résistance (durabilité, feu, humidité..), d'absence de nocivité pour la santé, de confort.

I.1.2. Caractéristique d'un éco-matériaux

a) Propriétés thermiques

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

Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en J/kg.K. Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C. 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.

Enfin, à partir de la conductivité λ et de la chaleur massique C , on définit la diffusivité α (J/(m.K)). Cette grandeur caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de α est faible, la chaleur met de temps à traverser le matériau.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho.C} \quad \text{équation 1}$$

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

D'autres paramètres thermiques se déduisent de tout ce qui précède à savoir la résistance thermique R qui est fonction de la conductivité thermique et de l'épaisseur du matériau.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{équation 2}$$

Ci-dessous, il est présenté quelques valeurs de conductivité thermique de quelques matériaux.

Tableau II.1: conductivité thermique de quelques matériaux – source [10]

Nom du matériau	λ (W/(m.°C))	Nom du matériau	λ (W/(m.°C))
Acier	52	Bloc monomur allégé	0.12 à 0.16
Agglo creu de béton léger	0.35 à 1	Bois	0.12 à 0.23
Agglo creu de béton léger contenant des agrégats expansés sans quartz	0.29 à 0.9	Bois cordé (sapin) + remplissage de chenevrotte de chanvre	0.13
Air	0.024	Brique de chanvre	0.12
Asphalte coulée	2.1	Brique de terre crue	1.1
Béton cellulaire	0.11 à 0.24	Brique de terre cuite	1.15
Béton plein	1.75	Ouate de cellulose	0.035 à 0.04
Bloc de terre comprimée	1.05	Paille en botte (densité 100kg/m ³)	0.045
Eau	0.58	Panneaux en fibre de bois	0.05
Enduit de plâtre	0.35	Panneaux en contreplaqué	0.15
Mortier de chaux	0.87	Chanvre en vrac	0.05 à 0.07
Mortier de ciment	1.4	Pierre lourde	2.1 à 3.5

b) Propriétés mécaniques

L'isolation des dalles, des planchers, ou des ouvrages souterrains nécessite des matériaux qui résistent à la compression. La résistance des isolants à la compression est mesurée par la contrainte nécessaire pour diminuer l'épaisseur d'un échantillon de 10%. Cette contrainte s'exprime en milliers de Pascals [kPa]. La résistance à la compression doit être d'au moins 110 kPa pour l'utilisation en toiture plate. Certains isolants comme la mousse de verre ou semi isolants comme le béton cellulaire autoclavé sont peu élastiques et ne se compriment pas autant. On utilise alors la contrainte à la rupture.

L'isolation extérieure compacte et les toitures plates non chargées nécessitent un isolant qui résiste dans une certaine mesure à la traction, de manière que les couches d'isolant ne se séparent pas 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 (en kPa) nécessaire à séparer le panneau en deux ou plusieurs parties. Un matériau isolant doit avoir une résistance supérieure à 6 kPa pour être utilisé en isolation extérieure compacte.

c) Propriétés physiques

- Etanchéité à l'air

L'étanchéité à l'air n'est pas, en principe, attendue d'un matériau isolant, car cette fonction doit généralement être remplie 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 (crépis ou enduit par ex.). Même si le matériau isolant est étanche à l'air, les joints entre les lés ou 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 doit être conjointement assurée.

- Absorption d'eau

Un matériau humide perd son pouvoir isolant. Les isolants en contact avec de l'eau (en toiture inversée ou en contact avec le terrain) ne doivent donc pas absorber d'eau. 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.

d) Propriété acoustique

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, parois de bulles ouvertes) du matériau.

I.1.3. Exemples d'éco-matériaux isolants

Appelés aussi isolants végétaux, les éco-matériaux d'isolation thermiques sont diverses. Il sera donc cité quatre parmi tant d'autre :

- 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, imputrescible, 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 laine de cellulose

Le papier est débarrassé de ses fibres, réduit en flocons et additionné d'agents de texture et d'agents ignifugeants. Les panneaux d'agencement sont utilisés pour l'isolation phonique sous dalle. La cellulose est difficilement inflammable, perméable à l'eau, imputrescible et non consommable par les rongeurs. Ce matériau est d'une grande disponibilité, demande peu d'énergie à la fabrication (6 kWh/m³) et il est réutilisable.

Des dégagements de poussières peuvent avoir lieu lors de la mise en œuvre du vrac. En cas d'incendie, il n'y a pas d'émanation de gaz toxique. La laine de cellulose présente un rapport qualité technique et écologique très intéressant.

- 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.

Aucun effet nocif sur la santé n'est connu à ce jour et il ne dégage aucun gaz toxique en cas d'incendie.

- Le bois feutrés

Il est obtenu par défibrage des chutes de bois résineux. Ces panneaux sont perméables à la vapeur d'eau et sont inflammables. Le bois est une ressource renouvelable, de grande disponibilité et recyclable. Lorsqu'il est correctement traité, il n'émet aucun dégagement toxique. En cas d'incendie, il n'y a pas de dégagement de gaz toxique.

Tableau II.2: conductivité thermique de quelques éco-matériaux - source [10]

Isolant	Densité (Kg/m ³)	λ (W/m.K)
Liège expansé	80 à 120	0,032 à 0,035
Laine de cellulose	35 à 45	0,035 à 0,040
Laine de chanvre	25 pour rouleaux	0,039
	30 à 35 pour panneaux	0,039
	20 pour vrac et rouleau	0,037
Bois feutrés	160 pour panneaux mous	0,042
	270 pour panneaux durs	0,070

I.2. Isolation thermique des bâtiments

I.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).

I.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. Cependant, par temps chaud, ils contribuent à augmenter le niveau de chaleur des bâtiments de la même façon, provoquant ainsi un alourdissement de l'air intérieur. D'où l'importance d'isoler ces différentes parties du bâtiment en vue de conserver en tout temps une bonne température ambiante. 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 $2,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Des volets en bois ou un rideau épais, placés intérieurement, seraient adéquats pour l'isolation thermique au cours des nuits. 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.

II- Approche théorique

II.1. Paramètres influençant les propriétés thermiques et mécanique 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.

II.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 $0,60 \text{ W/(m.K)}$.

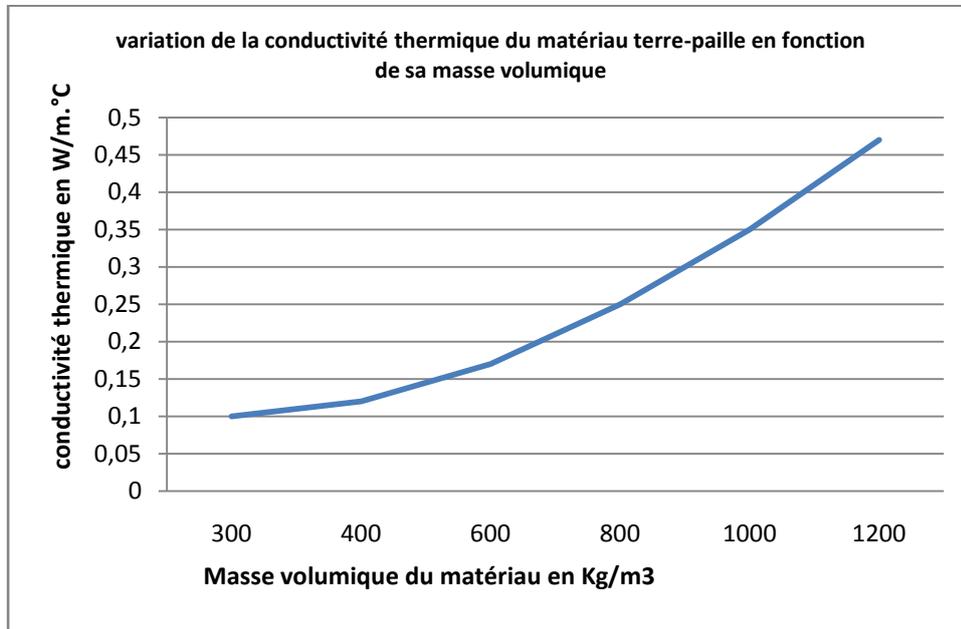
Cependant, cette relation entre porosité et faible conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte d'autre mode de transfert de la chaleur, la convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement.

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.

II.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 [AAC, 78]. Cependant, ces

conclusions ont été obtenues en couvrant une gamme restreinte de teneurs en eau. Plus tard, [BOUTIN, 96] montre 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 [Graphe II.1].



Graphe II.1: conductivité thermique du matériau terre-paille en fonction de sa masse volumique

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

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

I- Description des fibres végétales

Le projet valorisation des fibres végétales au Burkina Faso [source 1] avait pour objectif de sélectionner et caractériser ces fibres à des fins de fabrication de panneaux à isolation thermique. Cette étude a donc permis de faire un état des lieux de celles-ci et des déchets végétaux valorisables et d'en quantifier les stocks disponibles sur le territoire burkinabè. La présente étude utilisera quelques-unes de ces fibres que sont la bagasse de canne à sucre, la balle de riz, les tiges de cotonnier.

I.1. la Bagasse de canne à sucre

La bagasse est le résidu fibreux obtenu après broyage des tiges de canne à sucre. Elle est en premier lieu utilisée pour la production de vapeur (brûlage dans une chaudière), servant à l'alimentation énergétique de l'unité de transformation, qui fonctionne le plus souvent en autosuffisance énergétique. L'excédent de bagasse non utilisée pour ce premier usage peut servir à faire du papier, des panneaux de particules, de la litière pour animaux ou encore servir de nourriture pour le bétail ou être valorisé comme base de compost, etc.

Dans le cadre de la présente étude, la bagasse utilisée provient de l'unité industrielle de la SN. SOSUCO (Société Nouvelle, Société Sucrière de la Comoé). La SN. SOSUCO est le seul producteur de sucre au Burkina Faso. Sa surface d'exploitation est de 4000 ha. Les rendements agricoles atteignent les 90 tonnes à l'hectare.

La campagne de production de la SN.SOSUCO dure six mois, de novembre à avril. Pendant cette période, l'unité industrielle produit 90 000 tonnes de bagasse [MAGNERON Christian & PEUCH Frédéric]. Sur cette quantité 80 000 à 85 000 tonnes sont brûlées pour la production d'énergie et le reste de 5000 à 10000 tonnes représente la bagasse excédentaire.

Le choix de cette matière pour la fabrication de panneaux isolant dans le cadre de la présente étude est lié à sa disponibilité en termes de quantité produite annuellement. Elle contribue également à l'emprisonnement du CO₂ à travers les champs de canne à sucre. Elle est appropriée pour la fabrication des panneaux [source 1]

I.2. la balle de riz

Au Burkina Faso, c'est la SO.NA.CO.R qui s'occupe de la collecte, du traitement et la commercialisation du riz.

Elle réalise le décorticage et le blanchiment du riz. De ces opérations sont produits des déchets dont le son, utilisé pour l'industrie agro-alimentaire et la balle de riz, réel déchet pour la SONACOR.

La balle de riz est très riche en silice. Elle se dégrade donc difficile. Elle représente 23% en masse de la production de la SONACOR, ce qui est vraiment énorme. D'où l'importance de valoriser ces déchets.

Les stages sur la valorisation des biomatériaux au Burkina Faso ont permis de faire sa caractérisation en termes de mise en œuvre avec la colle comme liant et les résultats furent concluants. D'où l'essai avec d'autre liant à travers la présente étude.

I.3 La tige de cotonnier

Trois sociétés cotonnières existent au Burkina Faso (Sofitex, SOCOMA et FASOCOTON) depuis septembre 2004 et jouent un rôle de promotion de la culture du coton, chacune dans sa zone. La Sofitex dans l'ouest du pays a en charge 20 provinces, FASOCOTON dans le centre a 12 provinces et SOCOMA dans l'est, 6 provinces.

Grâce au dynamisme des ces entreprises et à la volonté politique qui accompagne la recherche cotonnière par l'INERA, a valu au Burkina Faso d'être en tête de liste des producteurs de coton pour la saison de 2009.

Après les récoltes, les tiges de cotonnier restent en place, dans les champs. Les sociétés telles Sofitex conseillent aux paysans de broyer puis de brûler ces tiges pour fumure d'une part, mais aussi et surtout pour éviter la prolifération des parasites pour la saison suivante. Le rendement moyen au niveau des tiges de cotonnier est d'environ 1,5 à 2 tonnes par hectare or il a été cultivé 115 000 hectares de coton au Burkina Faso en 2009.

Les tiges de cotonnier seront utilisées dans cette étude comme armatures dans les panneaux de dimensions 50 cm x 50 cm x 3 cm afin de leur donner une bonne résistance mécanique.

Ce choix se justifie par la disponibilité du matériau et de sa bonne résistance mécanique et thermique.

II- Descriptions des liants

II.1. La chaux

II.1.1. définition

La chaux est un liant. Son matériau de base est le calcaire (carbonate de calcium) contenant plus ou moins d'impuretés (telles que : argiles, magnésie, aluminates, silicates, oxydes métalliques). Il existe différentes sortes de calcaire dans la nature, comme le marbre, les coquillages etc. Suivant la composition du calcaire, on obtient différentes sortes de chaux :

- la chaux aérienne ;
- la chaux hydraulique ;

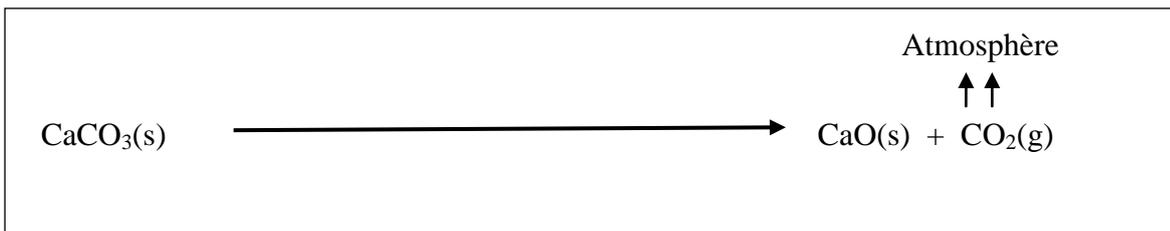
Ce calcaire est calciné pour donner de la chaux vive. La chaux vive est inutilisée telle quelle en tant que liant. On lui fait subir une réaction d'extinction pour obtenir de la chaux éteinte.

Selon la méthode d'extinction employée on obtient la chaux en poudre ou la chaux en pâte.

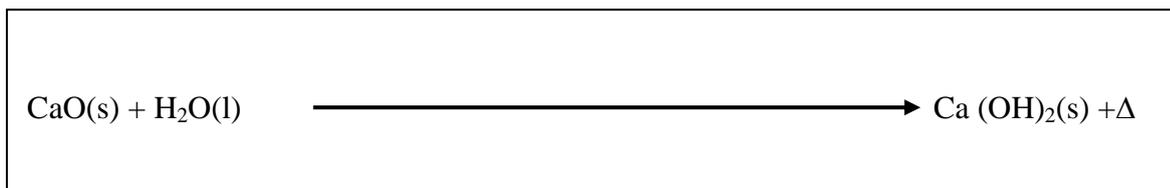
II.1.2. Composition chimique de la chaux aérienne

Rappelons que la chaux est un matériau à base de calcaire. Le cycle de transformation de la pierre calcaire se fait comme suite.

La calcination de la pierre calcaire (CaCO_3) $T > 1000\text{ }^\circ\text{C}$



L'hydratation de la chaux vive (CaO)



La carbonatation

Cette phase s'observe après la mise en œuvre.



II.1.3. Quelques 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. Elle est très résistante.

La chaux hydraulique, et encore plus l'aérienne, résiste particulièrement bien au feu, d'où son pouvoir ignifugeant.

II.2. Le ciment

II.2.1. Définition

Le ciment est 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 (SiO₂). 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.

La présente étude utilise le ciment CPA 45 de DIAMOND CEMENT.

II.2.2. Constituants

Le Ciment Portland Artificiel (CPA) se compose principalement de clinker. Ce dernier est obtenu par mélange de matières premières naturelles de composition chimique adéquate. La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et l'argile (20%). Le cru est ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker.

Les granulats de clinker, dont la taille varie de 5 à 40 mm de diamètre, sont finement broyés avec addition de gypse (3 à 5%) pour réguler la prise. Un ciment est composé en général de 4 phases principales C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF (tableau III.1).

Les phases C_3A et C_2 (A, F), plus couramment dénommée C_4AF , se situent généralement entre les grains de C_3S et C_2S . le clinker contient aussi des éléments mineurs tels que : Na_2O , K_2O , MgO , CaO libre, TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 et Cr_2O_3 .

Désignation des minéraux purs	Formules	Abréviation	Solution solide de la phase pure présente dans le clinker	Répartition %
Silicate tricalcique	$3CaO, SiO_2$	C_3S	Alite	45 à 65
Silicate bicalcique	$2CaO, SiO_2$	C_2S	Bélite	10 à 30
Aluninate tricalcique	$3CaO, Al_2O_3$	C_3A	Aluninate tricalcique ou célite	5 à 15
Alumino-ferrite de calcium	$2CaO, pAl_2O_3$ $(1-p)Fe_2O_3$	$C_2A_pF_{1-p}$	Alumino-ferrite	5 à 15

Tableau III 1: les différentes phases du Clinker [Seid et al.80]

II.2.3. Propriété mécanique

Le ciment utilisé dans le cadre du dit projet est le CPA 45. Sa résistance à la compression à 28 jours est de 35Mpa, celle à la traction est de 2MPa.

II.3. Le plâtre

II.3.1. Composition chimique

Le plâtre est composé essentiellement à base de gypse naturel (minéral de roches sédimentaires extrait des carrières de gypse à ciel ouvert ou souterraine). Le gypse est ensuite concassé, cuit à 150°C puis refroidi à 60°C avec une addition d'amidon et d'adjuvant.

II.3.2. Propriété mécanique

Les propriétés mécaniques du plâtre sont présentées dans le tableau III.2 ci-dessous

Tableau III 2: propriété mécanique du plâtre – source [7]

Contrainte de traction	Module d'élasticité longitudinal (3)	Module de poisson (4)	Contrainte de compression (5)	Contrainte de flexion
σ (MPa)	E (MPa)	ν (sd)	σ (MPa)	σ (MPa)
1 à 3	1 450	0,7	12	5

II.3.3. Propriété physique et thermique

Les propriétés physiques et thermiques du plâtre sont présentées dans le tableau III.3 ci-dessous

Tableau III 3: propriétés physique et thermique du plâtre - source [7]

Dilatation thermique	Conductivité thermique	Perméabilité à la vapeur d'eau(1)	Resistance à la diffusion de vapeur(2)	Chaleur spécifique	Température de fusion	asse volumique	Pouvoir calorifique
A (m/m. °C)	λ (W/m. °C)	π (g/m. h. mmHg)	μ (sd)	C (kcal/ °C.kg)	θ (°C)	ρ (kg/m ³)	p (MJ/kg)
18. 10 ⁶	0,48	1 300. 10 ⁵	10	0,19	1 250	1 000	0

III-Protocole expérimentale

III.1. Matériels

La mise en œuvre des panneaux à isolation thermique a nécessité les matériels techniques suivants :

- Une bassine métallique
- Une balance de type Roberval de précision 1g
- 2 moules de dimensions 24,5 cm x 33 cm x 3 cm
- 2 moules de dimensions 50 cm x 50 cm x 3 cm
- 1 sceau en caoutchouc
- 1 bouteille d'une capacité de 1l
- 1 bouteille d'une capacité de 1,5l

- 2 moules à éprouvettes 4 cm x 4 cm x 16 cm
- Des papiers firmes
- Des gants
- Une machette, un couteau, 2 ciseaux, 2 sécateurs

III.2. Etude expérimentale

III.2.1. Mise en œuvre des panneaux

a- Réalisation des moules

La phase de confection des panneaux ne pouvait se faire sans au préalable réaliser les moules qui serviront à donner forme aux panneaux.

La réalisation de ceux-ci a été l'œuvre des étudiants stagiaires de Poitiers qui ont travaillé sur la fabrication des panneaux de fibres dont l'étude présent est une continuité.

La conception des ces moules a été autant porté sur la contenance du moule que la facilité à démouler le panneau une fois durci. Le moule se compose de demi-cadres relié entre eux par des serre-joints. Selon le type de cadre (dimension 24,5 x 33 x 3 cm et 50 x 50 x 3 cm), le demi cadre se compose d'une baguette de 24,5 cm et une autre de 33cm (pour le moule de dimension 24,5 x 33 x 3 cm) liée entre elle par des pointes et un composant du serre-joint (mâle ou femelle) sur chaque extrémité du demi-cadre. Le même processus sera fait pour le moule de 50 x 50 x 3 cm mais cette fois ci avec des baguettes de 50cm de long.

b- Confection des armatures

Les armatures sont prévues pour les panneaux de dimension 50 x 50 x 3 cm pour leur assurer une bonne résistance mécanique.

Ces armatures sont faites à base de tige de cotonnier sèche découpées en morceau de 45cm de long. Ces morceaux de tiges sont ensuite sceller entre eux à l'aide d'une ficelle pour former un quadrillage.

Dans les premières confections, les armatures étaient disposées les unes parallèles aux autres avec une distance de 10 et ce à mi-épaisseur du panneau. Les observations ont montré que lorsqu'on soulevait le panneau dans le sens parallèle aux armatures, le panneau fléchissait sous l'action de son poids et se brisait ; d'où l'idée de concevoir le quadrillage à armature [photo III.1] qui donnerait une rigidité au panneau de tous les quatre côtés.



Photo III 1: étape de confection des armatures de cotonnier

c- Extinction de la chaux vive

Le procédé d'extinction de la chaux s'est fait comme suit : dans une bassine métallique il a été introduit de l'eau en grande quantité (5 fois celle de la chaux), puis l'on a ajouté la chaux vive. il faut noter que compte tenu du fort dégagement de chaleur il a été utilisé des caches nez et des gans 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.

d- Pesage

A l'aide d'une balance type Roberval avec 1g de précision, il a été mesuré la masse des matériaux rentrant en ligne de compte de la manipulation. Ces matériaux sont entre autre la chaux (vive ou éteinte), le ciment, le plâtre, la balle de riz, la bagasse de canne à sucre, l'eau.

e- Malaxage

Dans une bassine, il a été mis successivement les éléments (matière premières et liants) pesés selon la composition à faire et de l'eau. Le tout a été malaxé de façon manuelle jusqu'à obtention d'un mélange homogène (bonne cohésion entre liants et fibres).

En moyenne le temps de malaxage est estimé à 5min environ.

f- Fabrication des panneaux

Deux types de moules sont utilisés, les moules de dimension 24,5cm x 33cm x 3cm et ceux de 50cm x 50cm x 3cm. Pour les petits moules, le remplissage avec le mélange homogène se fait directement jusqu'à ce qu'ils soient pleins puis tout en veillant à l'aération,

l'ensemble est compacté avec la main ou avec un morceau de baguette pour donner une liaison entre fibres et liants. Pour les grands panneaux, le remplissage se fait jusqu'à mi porté de leur épaisseur puis y est posé le maillage d'armature. Ensuite les moules sont remplis complètement. Il faut noter que ceux-ci sont posés sur des papiers firme de Fasoplast pour faciliter le démoulage.



Photo III 2: étape de fabrication des panneaux

Cette opération a permis de faire plusieurs compositions de mélange dont 11 au total. Ceci étant il a été choisi 4 compositions jugées rigides sur lesquelles l'étude de mise en œuvre s'est appesantit. Les compositions ainsi retenues sont les compositions 1, 5, 7, 10 dont les détails sont dans le tableau III.4 ci-dessous. Le nombre élevé des compositions en balle de riz dans le choix se justifie par l'abondance de celle-ci dans le laboratoire du CNRST.

Tableau III 4: présentation des compositions

Libellé	Matériaux de la composition
Composition 1	Bagasse de canne à sucre + chaux + ciment
Composition 2	Bagasse de canne à sucre + chaux
Composition 3	Bagasse de canne à sucre + ciment
Composition 4	Bagasse de canne à sucre+ bale de riz + chaux
Composition 5	Balle de riz + plâtre
Composition 6	Balle de riz + plâtre + chaux
Composition 7	Balle de riz + chaux + ciment
Composition 8	Balle de riz + bagasse de canne à sucre + plâtre
Composition 9	Balle de riz + bagasse de canne à sucre + plâtre + chaux

Composition 10	Balle de riz + bagasse de canne à sucre + chaux + ciment
Composition 11	Balle de riz + chaux

g- Séchage

Le séchage s'est fait dans les locaux du labo du CNRST à la température ambiante. La moyenne de temps pour le démoulage est de un jour.

La cinétique de se séchage se définit alors comme suite : en moyenne chaque 5 jours il est procéder à la prise de masse des panneaux pour voir l'évolution de celles-ci.

A partir de ce premier résultat, il sera calculé les caractéristiques de la cinétique de séchage à savoir le pourcentage de pertes massique, la teneur en eau massique, la vitesse d'évaporation qui seront présentés dans la partie résultat du mémoire.



Photo III 3: séchage des panneaux

II.2.2 Caractérisation thermique des panneaux

Elle est en cours de déroulement dans les locaux du laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement de l'Université de Ouagadougou.

Le dispositif utilisé pour cette caractérisation fut celle du plan chauffant. Il 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 [photo III.4].



Photo III 4: dispositif expérimental du plan chauffant

Le principe de mesure est le suivant : un courant d'une intensité fixé à 0,4A est envoyé sur la plaque d'acier dont la résistance est de 118,8 ohms. La plaque chauffe et diffuse de la chaleur au panneau. Un thermocouple mesure la température de la résistance et deux autres sont installés de part et d'autre du panneau 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 : $P = R \cdot i^2 = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{e}$, on tire λ .

Trois mesures ont déjà été effectuées et ces valeurs sont mentionnées dans la partie discussion. D'autres essais pour les mesures sont toujours en cours afin de caractériser tous les échantillons.

II.2.3 Caractérisation mécanique des panneaux

La caractérisation mécanique des panneaux a consisté à faire un essai de flexion simple sur les plaques de bagasse de canne à sucre et de la balle de riz. Cet essai s'est fait à l'aide du portique d'essai universel didactique [référence SBD 3600] qui permet de simuler les contraintes subies par les matériaux et les armatures. Il est muni d'un cadre métallique comportant différent perçages et un vérin hydraulique d'une capacité de 160 KN qui peut être utilisé en compression, en flexion ou en traction.

Ainsi, pour réaliser l'essai de flexion simple les plaques sont placées dans le bâti du portique sur deux appuis. Ensuite, Une force est appliquée sur le couteau supérieur mobile

[SBD6300/13] vissé sur le vérin qui va entraîner l'appui coulissant [SBD3600/14] fixé sur la partie inférieure du bâti. Cette action comprime la partie supérieure de la plaque et soumet sa partie inférieure à la traction. Au bout d'un certains temps la partie inférieure fissure sous l'action de la contrainte. Cette force est lue sur l'écran de l'appareil.



Photo III 5: portique d'essai universel didactique

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

I- Mise en Œuvre des panneaux

I.1. Présentation des essais

La phase de fabrication a permis d'avoir les plaques dont les compositions ont été traduites dans les tableaux IV.2, IV.3, IV.4 ci-dessous. Un commentaire sur la rigidité et l'aération des panneaux a été fait et mentionné dans ceux-ci.

composition 1 : bagasse + chaux vive+ ciment																
Date confection	échantillons	Bagasse		chaux		ciment		eau ini		eau fin		panneau				Commentaires
		m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m(g)	%	m i (g)	m sec (g)	V (cm ³)	ρ (Kg/m ³)	
10/03/2010	E	250	32,89	400	52,63	100	13,2	675	47,37	10	1,32	1425	760	2425	313,34	Panneau rigide, bonne consolidation de la bagasse de canne à sucre avec les liants. Panneau relativement léger, assez bonne aération.
23/03/2010	O	250	28,41	400	45,45	100	11,4	1250	62,5	130	14,77	2000	880	2425	362,81	Panneau rigide, bonne consolidation de la bagasse de canne à sucre avec les liants. Panneau relativement léger, assez bonne aération. Couleur esthétique.
23/03/2010	N	250	28,41	450	51,14	50	5,68	1250	62,5	130	14,77	2000	880	2425	362,81	Panneau rigide, bonne consolidation de la bagasse de canne à sucre avec les liants. Panneau relativement léger, assez bonne aération. Couleur esthétique.
12/04/2010	1.A	250	21,55	400	34,48	100	8,62	1750	70	410	35,34	2500	1160	2425	478,25	
12/04/2010	1.B	250	26,04	500	52,08	100	10,4	1500	63,83	110	11,46	2350	960	2425	395,79	Panneaux compacts et très rigides, très bonne consolidation de la bagasse de canne à sucre avec les liants. Aération presque passable
12/04/2010	1.C	250	22,32	600	53,57	100	8,93	1500	61,22	170	15,18	2450	1120	2425	461,76	

composition 7 : balle de riz + chaux vive+ ciment																
Date confection	échantillons	Balle riz		chaux		ciment		eau ini		eau fin		panneau				Commentaires
		m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m i (g)	m sec (g)	V (cm ³)	ρ (Kg/m ³)	
19/04/2010	T1	250	20,83	400	33,33	100	8,33	1200	61,54	450	37,50	1950	1200	2425	494,74	panneau brisé lors du second pesage
19/04/2010	T2	250	26,04	500	52,08	100	10,40	1100	56,41	110	11,46	1950	960	2425	395,79	Panneau relativement rigide, consolidation passable de la balle de riz avec les liants. Panneau friable.
19/04/2010	T3	250	23,58	600	56,60	100	9,43	1200	55,81	110	10,38	2150	1060	2425	437,02	
19/04/2010	T4	250	28,41	300	34,09	200	22,70	1000	57,14	130	14,77	1750	880	2425	362,81	

Tableau IV. 1:composition 1 & 7

Tableau IV. 2: composition 5

composition 5 : balle de riz + plâtre														Commentaires
Date confection	échantillons	Bagasse		plâtre		eau ini		eau fin		panneau				
		m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m i (g)	m sec (g)	V (cm ³)	ρ (Kg/m ³)	
16/03/2010	J	250	29,76	500	59,52	650	46,43	90	10,71	1400	840	2425	346,32	Panneau très rigide le lendemain de la mise en œuvre. Nous remarquons une bonne consolidation de la balle de riz avec le plâtre. le panneau est compact et a presque pas d'aération (aération passable).panneau léger en fin de séchage
23/03/2010	3. A	300	31,25	600	62,50	600	40,00	60	6,25	1500	960	2425	395,79	Panneau rigide, bonne consolidation de la balle de riz avec le plâtre. Aération passable
23/03/2010	3. B	300	24,19	800	64,52	700	38,89	140	11,29	1800	1240	2425	511,23	panneau rigide, bonne consolidation de la balle de riz avec le plâtre. Aération passable
12/04/2010	3. C	300	20,55	1000	68,49	1000	43,48	160	10,96	2300	1460	2425	601,94	Panneau rigide, bonne consolidation de la balle de riz avec le plâtre. Aération passable, panneau lourd.
12/04/2010	3. E	300	34,09	500	56,82	600	42,86	80	9,09	1400	880	2425	362,81	Panneau rigide, bonne consolidation de la balle de riz avec le plâtre. Aération passable, panneau léger.
12/04/2010	3. F	300	39,47	300	39,47	600	50,00	160	21,05	1200	760	2425	313,34	

Tableau IV. 3: composition 10

composition 10 : bagasse de canne à sucre+balle de riz + chaux vive+ ciment																	
Date confection	échantillons	bagasse de canne à sucre		Balle riz		chaux		ciment		eau ini	eau fin		panneau				Commentaires
		m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m (g)	%	m (g)	m(g)	%	m i (g)	m sec (g)	V (cm3)	ρ (Kg/m3)	
14/05/2010	T5	125	13,02	125	13,02	400	41,67	100	10,42	1200	210	21,88	1950	960	2425	395,79	Les panneaux sont relativement rigides et ont une aération passable. Ils sont un peu friables.
14/05/2010	T6	125	12,02	125	12,02	500	48,08	100	9,62	1360	190	18,27	2210	1040	2425	428,78	
14/05/2010	T7	125	12,02	125	12,02	600	57,69	100	9,62	1400	90	8,65	2350	1040	2425	428,78	
14/05/2010	T8	125	14,88	125	14,88	300	35,71	200	23,81	1000	90	10,71	1750	840	2425	346,32	

I.2 cinétique de séchage

Lors du suivi de séchage des panneaux, on obtient une première courbe donnant la masse en fonction du temps : $M = f(t)$. Afin de comparer les échantillons entre eux, on utilise le pourcentage massique de perte qui vaut :

$$\% \text{ pertes} = \frac{\Delta M}{M_0} * 100 = \frac{M_0 - M(t)}{M_0} * 100 \quad \text{Équation IV. 1}$$

Avec

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

$M(t)$: masse de l'échantillon au temps t (g)

La vitesse d'évaporation $V_{\text{évap}}$ est définie comme la quantité d'eau qui disparaît, rapportée à la surface de séchage et au temps écoulé.

$$V_{\text{évap}} = \frac{\Delta M}{\Delta t * S_{\text{séchage}}} \text{ en } g/(j.m^2) \quad \text{Équation IV. 2}$$

Avec

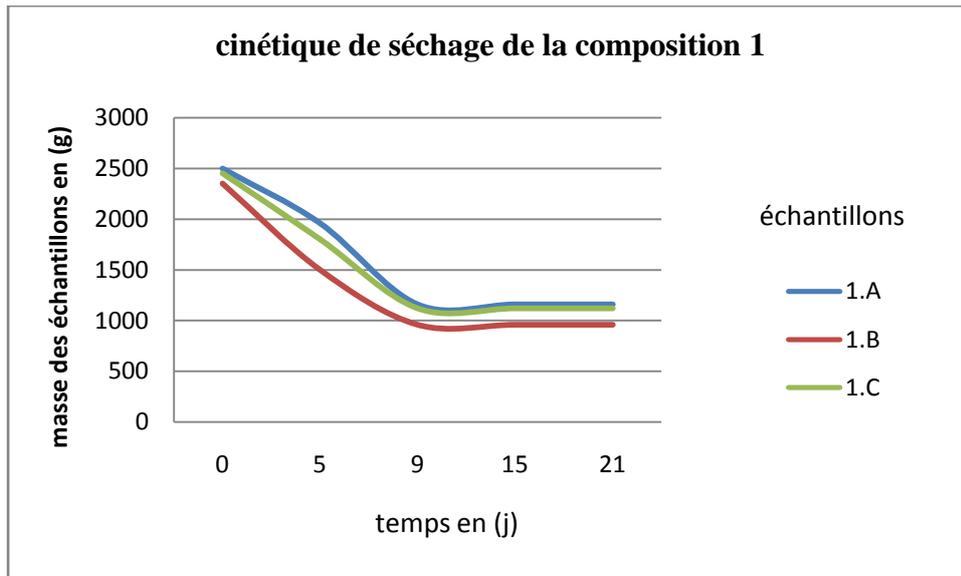
ΔM : masse d'eau perdue entre t_1 et t_2 en g

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

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

Les tableaux ayant permis d'avoir le graphe de la cinétique de séchage des différentes compositions sont les tableaux IV.9, IV.10, IV.11 se trouvant en annexe IV.

I.2.1 composition 1 : bagasse de canne à sucre + Chaux + ciment



Graphe IV 1: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 1 en fonction du temps

Tableau IV. 4: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 1

Echantillons	teneur en eau			vitesse d'évaporation		
	w1(%)	w2 (%)	w3 (%)	V évap 1 (g/(j.m2))	V évap 2 (g/ (j.m2))	V évap 3 (g/ (j.m2))
1. A	161,33	54,67	54,67	1335,81	2473,72	0
1. B	76,47	12,94	12,94	2102,66	1669,76	0
1. C	89,47	17,89	17,89	1607,92	2102,66	0

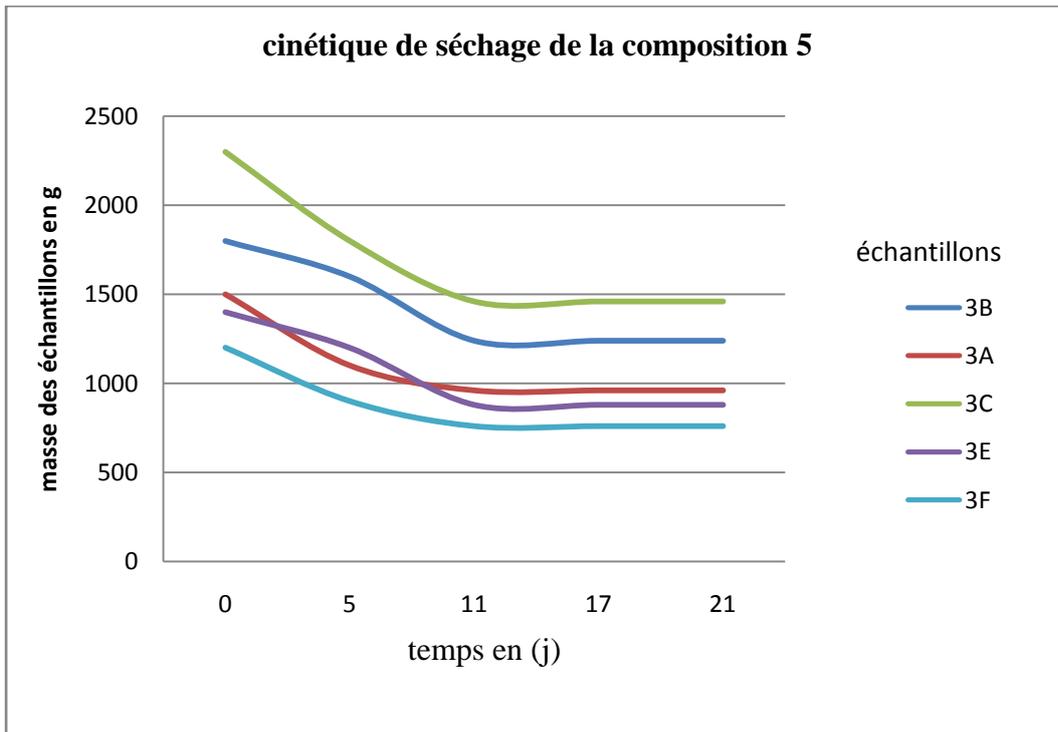
La cinétique de séchage de la composition 1 se fait en trois étapes. La première phase dure cinq jours et est caractérisée par de fortes teneurs en eau initialement dans le mélange, 161 % pour 1.A, 89% pour 1.C.

Cette forte teneur se justifie par le fait que la chaux vive utilisée demande beaucoup d'eau d'abord pour son extinction, et en plus pour en faire une pâte homogène. La bagasse de canne à sucre également de par sa microstructure est une fibre qui absorbe une quantité d'eau assez importante afin de pouvoir avec le liant former un mélange homogène.

Cependant, cette teneur en eau baisse considérablement en début de la deuxième phase (qui dure quatre jours), 54% pour 1.A et 17% pour 1.C avec des vitesses d'évaporation relativement élevées [tableau IV.5] par rapport à celle de l'étape une. C'est la phase de carbonatation de la chaux conjuguée au phénomène d'évaporation naturel du panneau de fibre dû au séchage des panneaux à la température ambiante.

La troisième étape (12 jours) est celle de la stabilisation du phénomène car l'on remarque une constance de la masse des échantillons pendant cette période. C'est la fin du séchage.

I.2.2 composition 5 : balle de riz + plâtre



Graphe IV 2: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 5 en fonction du temps

Tableau IV. 5: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 5

Echantillons	teneur en eau			vitesse d'évaporation		
	w0 (%)	w1 (%)	w2 (%)	V évap 1 (g/(j.m2))	V évap 2 (g/(j.m2))	V évap 3 (g/(j.m2))
3.A	66,67	44,44	4,44	412,29	742,12	0
3.B	63,64	27,27	14,55	824,57	288,60	0
3.C	76,92	38,46	12,31	1236,86	700,89	0
3.E	75,00	50,00	10,00	494,74	659,66	0
3.F	100,00	50,00	26,67	742,12	288,60	0

Les courbes correspondant au séchage des échantillons de la composition 5 montrent un découpage temporel en trois étapes au cours desquelles la cinétique du phénomène varie.

La première étape dure au moins 5 jours environ pour chacun des échantillons. Elle correspond à une perte d'eau importante dans les panneaux avec une vitesse d'évaporation très élevée pour l'ensemble des panneaux. Les teneurs en eau ω sont initialement très élevée (76% pour l'échantillon 3.C, 64% pour le 3.B par exemple). Elles chutent brusquement au bout de cinq jours. Pour ces mêmes échantillons elles sont à 38 % pour le 3.C et 27 % pour le 3.B au bout de cinq jours. Ce qui donne des différences de volume d'eau de l'ordre de 0,4 dm³ pour l'échantillon 3.B et 0,5 dm³ pour le 3.C.

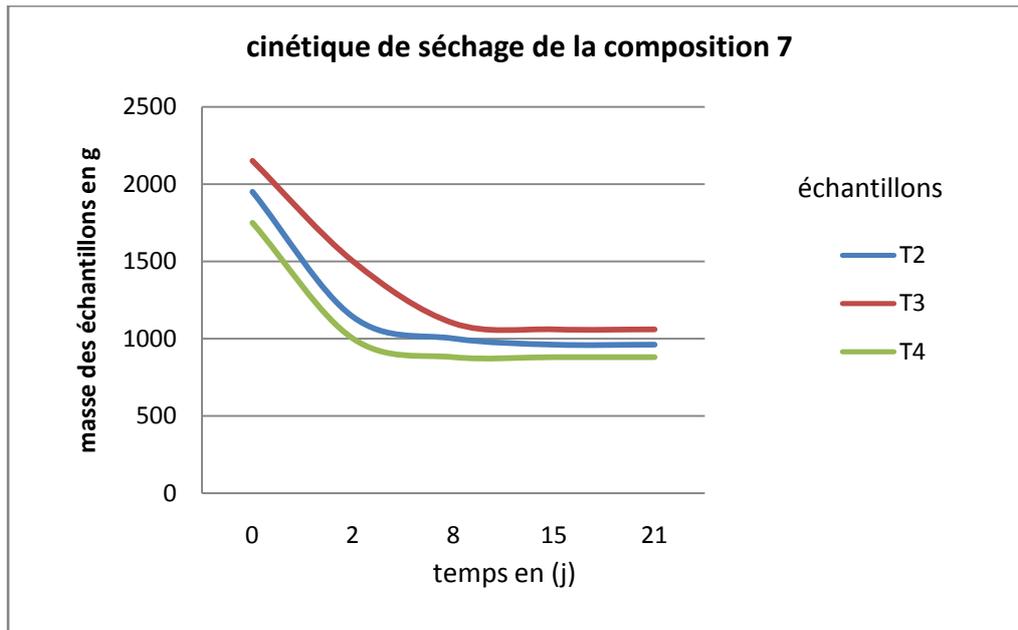
Ces valeurs élevés sont dû au fait qu'une partie de l'eau servira à la prise du plâtre et une partie sera évaporé par séchage à l'air ambiant simultanément à la prise.

A la deuxième phase qui dur 6 jours, les valeurs des teneurs en eau chutent en moyenne de moitié sauf exception du 3.A et 3.E dont les coefficients de chutes sont de l'ordre de 10 pour 3.A et 5 pour le 3.E ce qui se justifie par l'élévation de leur vitesse d'évaporation.

La faible teneur en eau et la baisse de la vitesse d'évaporation des trois autres échantillons montrent qu'ils sont soumis aux seuls phénomènes d'évaporation d'eau par séchage.

La troisième phase s'étendant sur dix jours traduit de faible teneur en eau et des vitesses d'évaporation nulles expliquant la constance de la masse des échantillons durant cette période. Les panneaux sont donc complètement secs car il n'ya plus de variation de masse.

I.2.3 composition 7 : balle de riz + chaux vive+ ciment



Graphe IV 3: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 7 en fonction du temps

Tableau IV. 6: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 7

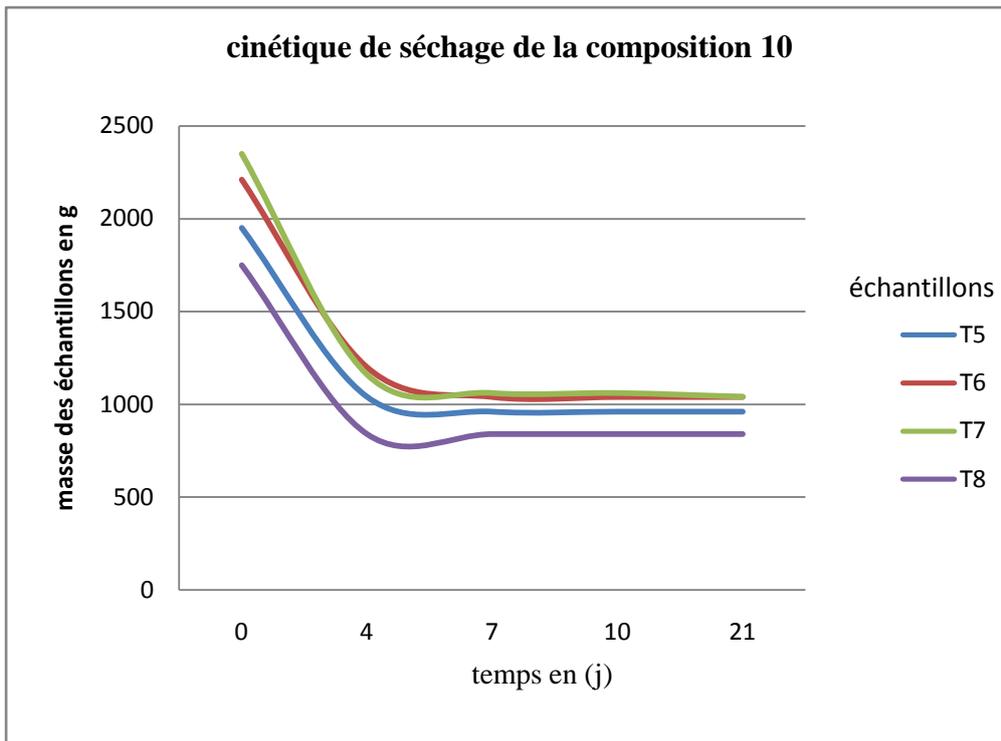
Echantillons	teneur en eau			vitesse d'évaporation			
	w1 (%)	w2 (%)	w3 (%)	V évap 1 (g / (j.m2))	V évap 2 (g / (j.m2))	V évap 3 (g / (j.m2))	V évap 4 (g / (j.m2))
T2	34,12	17,65	12,94	5009,28	288,60	70,68	0,00
T3	57,89	15,79	11,58	4019,79	824,57	70,68	0,00
T4	33,33	17,33	17,33	4638,22	247,37	0,00	0,00

La composition 7 a une cinétique de séchage qui respecte également la loi de découpage temporel en trois étapes c6omme celle de la composition 5. Cependant, cette cinétique montre de fortes valeurs de vitesses d'évaporation (5009,28 g/ (j.m2) pour le T1, 4638,22 g/ (j.m2) pour le T3 et 4019,79 g/(j.m2) pour le T2) [tableau IV.7] et des teneurs en eau élevées qui diminuent considérablement en fin de première étape (2 jours). Ces valeurs se justifie par la fait que cette composition utilise la chaux vive qui lors de son extinction est très exothermique donc vaporise une bonne quantité d'eau. Au reste du temps de cette étape les panneaux sont également soumis au phénomène de séchage à la température ambiante d'où une autre forme d'évaporation de l'eau.

Les autres étapes sont caractérisées par des teneurs en eau faibles et des vitesses d'évaporation faibles avec des différences pas trop considérables entre les valeurs des

paramètres des deux dernières étapes. Ceci se justifie par le fait que les panneaux subissent le séchage ordinaire (température ambiante) et la chaux se carbonatant dégage une certaine quantité d'eau par évaporation. Cette quantité d'eau n'étant pas trop élevée. Cette cinétique se stabilise à la troisième phase qui marque la constance des masses des échantillons du mélange.

I.2.4 composition 10 : balle de riz + bagasse de canne à sucre + chaux vive+ ciment



Graphe IV 4: courbes de variation de la masse des échantillons de la composition 10 en fonction du temps

Tableau IV. 7: paramètres de la cinétique de séchage de la composition 10

Echantillons	teneur en eau			vitesse d'évaporation			
	w1 (%)	w2 (%)	w3 (%)	V évap 1 (g / (j.m2))	V évap 2 (g / (j.m2))	V évap 3 (g / (j.m2))	V évap 4 (g / (j.m2))
T5	38,67	28	28	2813,85	329,83	0	0
T6	41,18	22,35	22,35	3123,07	659,66	0	0
T7	22,11	11,58	11,58	3679,65	412,29	0	0
T8	12,00	12	12	2813,85	0,00	0	0

Les échantillons T5, T6, T7 de la composition 10 ont une cinétique de séchage qui respecte la loi de découpage temporel en trois étapes. Par contre l'échantillon T8 de la même composition a une cinétique de séchage en deux étapes.

La première étape (4 jours) est caractérisée par de forte teneur en eau et des vitesses d'évaporation très élevées. C'est l'étape d'hydratation de la chaux et des premières évaporations naturelles dû au séchage.

Lors de la deuxième étape (3 jours pour T5, T6, T7 et 16 jours pour T8), les teneurs en eau baissent, ainsi que les vitesses d'évaporations. L'échantillon T8 à cette étape garde une masse constante jusqu'à la fin du séchage.

La dernière étape (13 jours) est caractérisée par la constance des masses des trois autres échantillons.

Conclusion partielle

Les vitesses d'évaporation pour les compositions utilisant la chaux vive sont très élevées à la première étape par rapport à celle utilisant le plâtre. Ceci est du au fait qu'à cette étape l'eau apportée contribue à l'extinction et à l'hydratation de la chaux. En seconde phase c'est l'inverse qui se produit.

En fin de séchage, il est à remarquer que pour des mêmes quantités de fibre et de liant, les panneaux de plâtre sont plus lourd que les panneaux à chaux vive [tableaux IV.6, IV.7, IV.8]. Ceci se justifie par le fait que le plâtre est naturellement lourd par rapport à la chaux. Les périodes des étapes de la cinétique de chaque composition sont presque identique et le temps de séchage (10 jours en moyenne) est le même pour chaque composition.

II- Etude de la conductivité thermique

II.1 étude de la conductivité thermique en milieu sec

II.1.1 Borne de Voigt et Reuss

Voigt et Reuss développent deux modèles simples, l'un série et l'autre parallèle, pour encadrer la conductivité thermique d'un milieu. Cette méthode sera donc utilisée pour définir

un intervalle dans lequel se situerait la conductivité thermique des panneaux de bagasse et de balle de riz confectionnés.

Notations

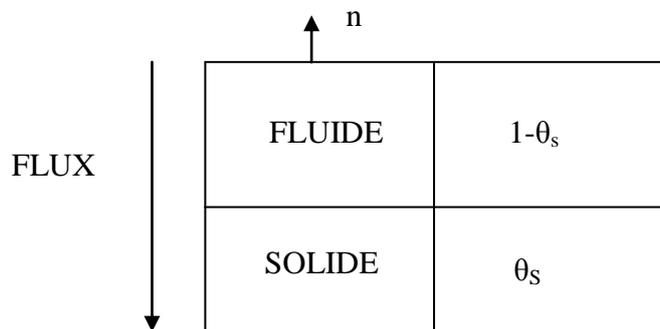
Notons θ_i la concentration volumique de la phase i , occupant un volume V_i dans un matériau de volume V .

$$\theta_i = \frac{V_i}{V} \quad \text{Équation IV. 3}$$

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, liants). La phase fluide contient la totalité d'air du matériau. Elle a une conductivité θ_f . Par déduction, $\theta_f = 1 - \theta_s$.

- **Modèle en série (borne inférieure de Voigt)**

Le modèle 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.

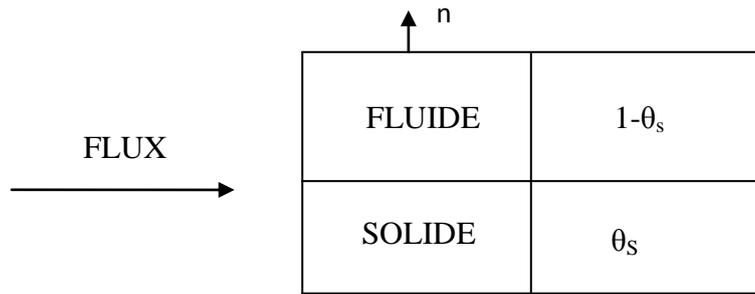


La conductivité thermique $\lambda_{série}$ correspondante est :

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\theta_s}{\lambda_s} + \frac{1 - \theta_s}{\theta_f}}$$

- **Modèle parallèle (borne supérieure de Voigt)**

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



La conductivité thermique $\lambda_{\text{parallèle}}$ correspondante est :

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

La conductivité thermique λ réelle du milieu est bornée par ces deux modèles. Ceux-ci permettent de déterminer une zone dans laquelle la conductivité se situe obligatoirement quelque soit le matériau considéré :

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

II.1.2 Application des bornes de Voigt et Reuss aux panneaux de fibres de bagasse et de balle de riz

Dans de le cas du schéma de cette étude, les hypothèses suivantes ont été faits :

- Le fluide ici est l'air qui a remplacé l'eau évaporée des panneaux de bagasse ou de balle de riz ;
- La matrice solide est soit (bagasse de canne à sucre + chaux vive + ciment) pour la composition 1, (balle de riz + plâtre) pour la composition 5, (balle de riz + chaux vive + ciment) pour la composition 7, (bagasse de canne à sucre + balle de riz + chaux + ciment) ;
- Détermination de la masse volumique de la bagasse de canne et de la balle de riz par la méthode de déplacement de l'eau ;
- Utilisation de la conductivité thermique de la chaux comme conductivité thermique de la matrice solide ;

Tous les calculs ayant permis d'avoir le tableau IV.8 sont dans les tableaux en annexe IV.2.1

II.2 Modèles par Homogénéisation Autocohérente (HAC)

La HAC est un modèle de calcul théorique de la conductivité thermique d'un matériau composite. Elle suppose la conservation de l'énergie entre un milieu hétérogène réel et un milieu homogène fictif dont les propriétés sont à définir. Elle considère les éléments du matériau comme des inclusions sphériques. Il est détaillé en annexe [IV.2.2]

II.3. Discussion du modèle Voigt Reuss et du modèle HAC

Tableau IV. 8: intervalles des conductivités thermiques : méthode Voigt et Reuss & modèle HAC

	échantillons	λ série (W/m.°C)	λ parallèle (W/m.°C)	λ moyen du modèle Voigt Reuss (W/m.°C)	λ du modèle HAC (W/m.°C)
composition 1	E	0,050	0,480	0,265	0,214
	O	0,050	0,480	0,265	0,248
	N	0,052	0,492	0,272	0,258
	1.A	0,050	0,480	0,265	0,333
	1.B	0,058	0,532	0,295	0,292
	1.C	0,067	0,584	0,326	0,366
composition 5	J	0,034	0,168	0,101	0,104
	3.A	0,038	0,197	0,117	0,116
	3.B	0,043	0,234	0,139	0,158
	3.C	0,050	0,272	0,161	0,196
	3.E	0,035	0,178	0,107	0,103
	3.F	0,032	0,140	0,086	0,078
composition 7	T2	0,043	0,405	0,224	0,285
	T3	0,048	0,457	0,252	0,336
	T4	0,042	0,392	0,217	0,214
composition 10	T5	0,044	0,416	0,230	0,265
	T6	0,049	0,468	0,259	0,313
	T7	0,056	0,520	0,288	0,331
	T8	0,042	0,392	0,217	0,207

En vue d'une analyse, le centre des intervalles de conductivités thermiques pour chaque échantillon a été calculé pour le modèle de Voigt Reuss. Les valeurs obtenues par le modèle HAC sont très proches du λ_{moyen} du modèle de Voigt Reuss. L'hypothèse selon laquelle les conductivités thermiques réelles des matériaux sont comprises entre λ série et λ parallèle est vérifié.

Les échantillons de la composition 5 telles 3E, 3F et J dont les conductivités thermiques sont respectivement 0,103 ; 0,078 et 0,104 W/m.°C présentent des lambda plus petits à celui du contreplaqué d'épaisseur 3mm qui de 0,112W/m.°C. Celles-ci donneront alors un meilleur confort thermique par rapport au contreplaqué.

Cette conductivité peut être améliorée tant pour cette composition que pour les autres, en jouant sur le rapport massique (fibre/liant). Plus ce rapport est grand moins la conductivité thermique est faible. Les particules de fibres, de par leur microstructure favorisent la présence d'air occlus dans le panneau, ce qui améliore le pouvoir isolant du panneau.

II.2 Mesures expérimentale

Les mesures expérimentales étant en cours, néanmoins trois essais sur des panneaux de différentes compositions ont été faite. Le récapitulatif dans le tableau IV.9 ci-dessous.

Tableau IV. 9: conductivité thermique expérimentale

	Echantillons	λ (W/m.°C)
Composition 1	1. B	régime permanent non atteint
Composition 5	3. A	0,114
Composition 10	T6	0,033

La valeur de la conductivité thermique expérimentale $\lambda_{\text{exp}} = 0,114$ W/m.°C de l'échantillon 3.A est sensiblement égale à la valeur théorique $\lambda_{\text{th}} = 0,116$ W/m.°C . Cependant le $\lambda_{\text{exp}} = 0,033$ W/m. °C de l'échantillon T6 est dix fois plus petite que la valeur théorique $\lambda_{\text{th}} = 0,313$ W/m. °C.

III- Mesure mécanique

L'essai de flexion simple sur les panneaux de fibres a permis de déterminer les sollicitations que celles-ci pouvaient supporter. A partir de leur caractéristique à savoir la longueur $l = 33$

cm, la largeur $b = 24,5$ cm et l'épaisseur $h = 3$ cm, l'inertie I a été calculée et sa valeur égale à $5,513 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$ ainsi que le moment et la contrainte à la traction dont les valeurs sont dans le tableau IV.10 ci-dessous.

Tableau IV. 10: propriété mécanique des panneaux de fibres de bagasse et de balle de riz

	échantillons	F (KN)	M (kN.m)	σ (MPa)
composition 1	O	0,200	0,017	0,449
	N	0,180	0,015	0,404
	1. A	0,110	0,009	0,247
	1. B	0,130	0,011	0,292
composition 5	J	0,150	0,012	0,337
	3. B	0,160	0,013	0,359
	3. C	0,150	0,012	0,337
composition 10	T7	0,070	0,006	0,157
	T8	0,100	0,008	0,224

L'analyse de ce tableau montre que les compositions 1 et 5 ont les plus grandes résistances à la traction. La composition 10 a des valeurs relativement faibles de contraintes à la traction. Il n'a pas été fait de mesure sur les échantillons de la composition 7 car les panneaux étaient friable et donc se sont brisés lors de leur transport au laboratoire Génie Civil de Kamboinsè. Les compositions à base de la balle de riz composition 5 et 7 sont peu résistantes du fait de la mauvaise consolidation entre la balle de riz et le mélange de liant (chaux- ciment). Cependant elle à de bon résultat avec le plâtre.

CHAPITRE 5 : Conclusion – perspectives - Recommandations

I- Perspectives et recommandations

La présente étude a fait des investigations sur quatre compositions parmi onze. A cet effet, elle préconise que d'autres études à venir puisse prendre en compte ces sept autres compositions.

Sur les compositions réalisées, l'étude de séchage n'a été observée que sur 21 jours en moyenne, période où la masse des échantillons étaient constantes. Il est recommandé pour des études d'une longue durée, que des observations soit faite sur les masses des échantillons sur une grande période pour voir si il n'y aurais pas une quelconque variation.

Toujours au niveau de la mise en œuvre, vu que les mélanges étaient fait avec la chaux vive, après le moulage nous avons des grumeaux de chaux qui apparaissent en surface du panneau ceci fragilisant la structure de celui-ci. Il est donc recommandé de prolonger le temps de malaxage de sorte à ce que la chaux et les fibres puissent former un mélange homogène. Ou soit de procéder à une autre forme de mélange en éteignant d'abord la chaux et y ajouter une quantité d'eau afin d'avoir une pâte homogène et par la suite y ajouter les fibres.

Il est aussi recommandé de prêter une réelle attention à la quantité d'eau dans les mélanges, car une structure trop pâteuse a une mauvaise aération et, veiller à moins compacter le panneau lors de la mise en moule.

Compte tenue de certains paramètres, l'étude expérimentale des transferts thermique n'a pas été fait dans sa totalité, ceci étant nous recommandons qu'une étude complète du comportement thermique soit fait sur les mélanges déjà effectués. Ce qui servira de base pour d'autres études pour une quelconque amélioration de ce qui a été déjà fait.

De nombreux aspects que nous jugeons utiles tels l'utilisation des panneaux de bagasse et de la balle de riz dans la construction (Norme, prescriptions technique pour la pose des panneaux), l'étude de faisabilité (étude économique), l'étude d'impact environnemental etc. devront être pris en compte dans d'autres études.

Vu les difficultés rencontrées au cours des premières mesures thermique, nous recommandons que la suite des essais soient faites sur des appareils plus adaptés tel la HFM 436 Lambda.

Les recommandations sont nombreuses mais nous nous arrêterons à celles-ci jugées pertinentes par la présente étude.

II- Conclusion

Cette étude est basée sur une approche globale des techniques de mise en œuvre des panneaux d'isolation thermique et de leur propriété thermique et mécanique. Ces panneaux sont faits à base de résidus des industries agro-alimentaires lesquels résidus sont la bagasse de canne à sucre et la balle de riz.

Elle visait deux objectifs. Le premier était de regarder ce qui se fait en Europe comme panneaux de fibres isolant pour le plafond et de reproduire cette technique en Afrique avec des fibres africaines. Cette mise œuvre a permis de déterminer quelques caractéristiques de ces panneaux à savoir la quantité de mélange fibre + liants qu'il faut pour une plaque, ainsi que le temps de séchage et tous les paramètres accompagnant cette cinétique à savoir déterminer les teneurs en eau et les vitesses d'évaporations des panneaux et de suivre leur évolution dans le temps. Ainsi la majorité des panneaux avait un temps de séchage de 21 jours. Le deuxième objectif était la caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des panneaux. Pour ce faire deux modélisations ont été faites pour la détermination théorique des conductivités thermiques. Le modèle de Voigt Reuss permettait de prédire l'intervalle dans lequel se situeraient cette conductivité et le modèle HAC la valeur théorique de celle-ci. Une phase expérimentation en cours doit donc vérifier la fiabilité de ces deux méthodes. Cependant le résultat du premier essai confirme cette fiabilité par contre le deuxième essai vérifie Voigt Reuss mais est très loin de la valeur donnée par la HAC.

Les mesures mécaniques viennent pour confirmer la rigidité des panneaux évoqués dans la première partie. Cependant les panneaux les plus résistants sont celles à base de bagasse en général. La balle de riz s'avère difficile à mettre en œuvre en utilisant la chaux comme liant.

Bibliographie

- [1] Thomassin, J.H., Neya, B., Amin, F. et al. 1997. La valorisation des fibres végétales au Burkina Faso : Elaboration de biomatériaux. Rapport de projet : ESIP. INERA. VALAGRO
- [2] Delolme, E., Davière, S. 2000. Valorisation de la biomasse au Burkina Faso. Elaboration de biomatériaux. Stage. 21p.
- [3] Magneron, C., Peuch, F. 1999. Valorisation de la biomasse au Burkina Faso. Stage. 56 p.
- [4] Agius, A., Gaugain, V. 2000. Valorisation de la biomasse au Burkina Faso : Elaboration de biomatériaux. Stage. 33p.
- [5] Bourdon, M., Tuizat, B. 2001. Conception de géotextiles à partir de fibres végétales. Stage. 21p.
- [6] Morel, N., Gnansounou, E. 2001. 2008. Energétique du bâtiment. Cours.217p.
- [7] Couasnet, Y. 2007. Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction. Editions : le Moniteur. 369p.

Site internet

- [8] http://www.ips-wa.org/sn_sosuco.htm ; consulté le 14 Mars 2010
- [9] <http://www.lefaso.net/spip.php?article2034>; consulté le 14 Mars 2010
- [10] <http://planeteconom.free.fr/index.php/301-economie.html>; consulté le 3 Avril 2010
- [11] http://www.ademe.fr/particuliers/fiches/isolation_thermique/rub4.htm; consulté le 22 Avril 2010
- [12] <http://pagesperso-orange.fr/lameca/dossiers/canne/4.htm>; consulté le 17 Avril 2010
- [13] <http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/08.calculs.pdf>; consulté le 13 Mai 2010

Annexes

Annexe II 1: définition d'éco-matériaux.....	54
ANNEXES iv 1 : Etude de la cinétique de séchage	57
ANNEXES iv 2:Etude de la conductivité thermique.....	58

Annexe II 1: définition d'éco-matériaux

Les critères élucidés par les Amis de la terre sont :

Le critère « mise en œuvre »

- L'aptitude à l'emploi :

Un éco-matériau doit satisfaire dans l'ouvrage une ou plusieurs fonctions. Cette aptitude à l'usage résulte du couplage entre les exigences de la fonction considérée et les performances de l'éco-matériau. Plus les matériaux choisis sont bon techniquement, plus la construction ou rénovation durera dans le temps, ce qui diminue d'autant les ponctions sur l'environnement.

- L'adaptation technique :

L'éco-matériau est choisi en cohérence avec la paroi à isoler, dans une compréhension des phénomènes thermiques. Il est mis en œuvre conformément aux règles de l'art qui l'accompagnent, dans une conception bioclimatique de l'habitat. Par exemple, en rénovation thermique, une épaisseur d'isolant doit être plus importante sur la façade Nord.

Le recours à un éco-matériau implique la sensibilisation des habitants aux gestes écologiques et économes en énergie.

Le critère « santé et confort »

L'éco-matériau n'émet pas de Composés Organiques Volatiles (COV) ou autres matières allergisantes susceptibles de provoquer des allergies et des irritations cutanées ; le matériau n'émet pas non plus d'autres gaz toxiques, cancérigènes, polluants ou à effets de serre, ni de champs électromagnétiques ou de nanoparticules. Il préserve ainsi la santé de l'occupant et de l'artisan lors de la durée de vie du bâtiment et en cas d'incendie.

L'éco-matériau, perméable à la vapeur d'eau, laisse respirer les murs grâce à une bonne régulation hygrométrique qui permet de maintenir un taux d'humidité compris entre 30% et 70% évitant le développement de moisissures et de champignons. Une bonne capacité de gestion de l'humidité permet aussi une durabilité des performances du matériau dans le temps et d'éviter les moisissures. La qualité de l'air intérieur est par ailleurs assurée par une bonne ventilation.

L'éco-matériau, grâce à son inertie thermique, garde les parois plus longtemps chaudes en hiver et fraîches en été pour un meilleur confort thermique avec moins de chauffage et de climatisation.

Le critère « environnement »

- Les performances de l'éco-matériau en tant qu'isolant :

Une forte résistance thermique (R) ou une faible conductivité thermique (U) pour engager des économies d'énergie sur la durée de vie du bâtiment.

- La faiblesse de l'énergie grise contenue dans l'éco-matériau :

Les dépenses énergétiques nécessaires à son extraction, sa transformation, son conditionnement et son transport jusqu'au lieu du chantier doivent être faibles.

- L'éco-matériau a un bon bilan carbone :

Sont privilégiés, ici, les matériaux issus de matières végétales, fixateurs de carbone comme le bois qui piège le gaz carbonique à raison d'une tonne par mètre cube de bois coupé et stocké.

Les matières premières de l'éco-matériau sont issues de ressources renouvelables comme le bois qui pousse dans les forêts françaises (lorsqu'il est issu de forêts répondant à un mode de gestion durable) ou la laine de mouton qui repousse chaque année et non les isolants synthétiques comme les polystyrènes issus de ressources d'hydrocarbures épuisables. La matière première peut également être issue d'une culture respectueuse des sols (agriculture recourant à peu d'intrants de nature chimique) comme le chanvre issu de l'agriculture biologique tant que les terres consacrées à sa culture n'étaient pas antérieurement utilisées à la production alimentaire ; les co-produits étant bien sûr à privilégier. Dans le cas de sources minérales, son extraction ne provoquera pas de fuites de produits nocifs dans l'environnement ayant des répercussions destructives sur la biodiversité ou les sources du sous-sol (nappes phréatiques en particulier).

L'éco-matériau est recyclable et/ou réutilisable ce qui implique que le matériau soit facilement détachable du reste de l'ensemble de l'ouvrage et qu'il existe une filière de tri sélectif des déchets localement. Son éventuelle incinération ne provoquera pas d'émanations nocives pour l'homme ou l'environnement tels que les dioxines ou les PVC.

Le critère « développement local équitable »

L'éco-matériau est respectueux du paysage et s'intègre aux spécificités paysagères locales. Il est en harmonie avec les techniques déjà employées dans la région tout en répondant efficacement aux exigences d'isolation thermique.

Le matériau est issu de ressources locales et son extraction et/ou sa transformation est porteuse de qualifications valorisant les métiers qui lui sont liés. Certains matériaux peuvent valoriser des savoir-faire locaux traditionnels.

Le matériau mobilise de la main d'œuvre locale. Il est créateur d'emplois durables localement au sein d'entreprises aux pratiques sociales et environnementales responsables : à la fois des entreprises respectueuses des droits sociaux des travailleurs et soucieuses de leur bien être dans l'entreprise ; et des entreprises respectueuses des populations à la source du matériau.

L'éco-matériau stimule une économie redistributive de richesses

L'éco-matériau est accessible à tous (dans le cadre de la lutte contre la précarité énergétique et dans un principe plus général d'équité sociale) : la matière en elle-même et sa mise en œuvre sont accessibles au plus grand nombre en terme de prix, d'information et de compétence, notamment par la possibilité de transfert de compétence (type chantier solidaire).

Cette liste de critères de définition des éco-matériaux n'est pas exhaustive. Par ailleurs, il est rare qu'un éco-matériau puisse recouvrir l'ensemble de ces critères. L'essentiel est de faire le meilleur choix en fonction du contexte et en s'aidant de ces critères sans les considérer comme hiérarchisés. Une méthode ayant fait ses preuves par l'expérience est de ne pas choisir les matériaux les plus performants sur un seul de ces critères, mais plutôt ceux qui sont les plus polyvalents sur l'ensemble de ces critères.

ANNEXES iv 1 : Etude de la cinétique de séchage

Tableau IV. 11: cinétique de séchage de la composition 1

Jours Echantillons	J0	J5	J9	J15	J21
1.A	2500	1960	1160	1160	1160
1.B	2350	1500	960	960	960
1.C	2450	1800	1120	1120	1120

Tableau IV. 12: cinétique de séchage de la composition 5

Jours Echantillons	J0	J5	J11	J17	J21
B	1800	1600	1240	1240	1240
A	1500	1100	960	960	960
C	2300	1800	1460	1460	1460
E	1400	1200	880	880	880
F	1200	900	760	760	760

Tableau IV. 13: cinétique de séchage de la composition 7

Jours Echantillons	J0	J2	J8	J15	J21
T2	1950	1140	1000	960	960
T3	2150	1500	1100	1060	1060
T4	1750	1000	880	880	880

Tableau IV. 14: cinétique de séchage de la composition 10

Echantillons	jours				
	J0	J4	J7	J10	J21
T5	1950	1040	960	960	960
T6	2210	1200	1040	1040	1040
T7	2350	1160	1060	1060	1040
T8	1750	840	840	840	840

ANNEXES iv 2: Etude de la conductivité thermique**Annexe IV.2.1 : modèle de Voigt Reuss**

Tableau IV. 15: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 1

échantillons	V _{échantillon}	V _{air}	V _{chaux}	V _{ciment}	V _{bagasse}	θ _s	θ _f	λ _s	λ _f	λ _{série}	λ _{parallèle}
E	2425,5	665	597,015	80	629,524	0,5387	0,2742	0,87	0,024	0,050	0,480
O	2425,5	1120	597,015	80	629,524	0,5387	0,4618	0,87	0,024	0,050	0,480
N	2425,5	1120	671,642	40	629,524	0,5529	0,4618	0,87	0,024	0,052	0,492
1. A	2425,5	1340	597,015	80	629,524	0,5387	0,5525	0,87	0,024	0,050	0,480
1. B	2425,5	1390	746,269	80	629,524	0,6002	0,5731	0,87	0,024	0,058	0,532
1. C	2425,5	1330	895,522	80	629,524	0,6617	0,5483	0,87	0,024	0,067	0,584

Tableau IV. 16: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 5

échantillons	V _{échantillons}	V _{air}	V _{plâtre}	V _{balle riz}	θ _s	θ _f	λ _s	λ _f	λ _{série}	λ _{parallèle}
J	2425,5	560	500	266,241	0,316	0,231	0,48	0,024	0,0343	0,1681
3. A	2425,5	540	600	319,489	0,379	0,223	0,48	0,024	0,0375	0,1969
3. B	2425,5	560	800	319,489	0,462	0,231	0,48	0,024	0,0427	0,2345
3. C	2425,5	840	1000	319,489	0,544	0,346	0,48	0,024	0,0497	0,2721
3. E	2425,5	520	500	319,489	0,338	0,214	0,48	0,024	0,0353	0,1781
3. F	2425,5	440	300	319,489	0,255	0,181	0,48	0,024	0,0317	0,1405

Tableau IV. 17: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 7

échantillons	V _{échantillons}	V _{air}	V _{chaux}	V _{ciment}	V _{balle riz}	θ _s	θ _f	λ _s	λ _f	λ _{série}	λ _{parallèle}
T2	2425,5	990	746,269	80	266,241	0,450	0,408	0,87	0,024	0,0427	0,4051
T3	2425,5	1090	895,522	80	266,241	0,512	0,449	0,87	0,024	0,0478	0,4571
T4	2425,5	870	447,761	160	266,241	0,360	0,359	0,87	0,024	0,0369	0,3288

Tableau IV. 18: paramètres de calcul de la méthode Voigt et Reuss pour la composition 10

échantillons	V _{échantillons}	V _{air}	V _{chaux}	V _{ciment}	V _{balle riz+ bagasse}	θ _s	θ _f	λ _s	λ _f	λ _{série}	λ _{parallèle}
T5	2425,5	990	597,015	80	447,883	0,4638	0,4082	0,87	0,024	0,044	0,416
T6	2425,5	1170	746,269	80	447,883	0,5253	0,4824	0,87	0,024	0,049	0,468
T7	2425,5	1310	895,522	80	447,883	0,5869	0,5401	0,87	0,024	0,056	0,520
T8	2425,5	910	447,761	160	447,883	0,4352	0,3752	0,87	0,024	0,042	0,392

Annexe IV.2.2 : modèle HAC**Tableau IV. 19: procédure de calcul de la conductivité thermique par le modèle HAC**

échantillons	ρ _{pc}	λ _l	λ _a	λ _{pc}	ρ	ρ _l	k	θ	δ	X1	X2	X3	X	λ
3.A	939	0,48	0,024	0,04	395,795	1000	0,500	0,736	0,191	0,975	0,088	-0,920	-0,971	0,116
3.B	939	0,48	0,024	0,04	511,235	1000	0,375	0,628	0,236	0,968	0,124	-0,913	-0,937	0,158
3.C	939	0,48	0,024	0,04	601,938	1000	0,300	0,537	0,275	0,963	0,154	-0,907	-0,908	0,196
3.E	939	0,48	0,024	0,04	362,812	1000	0,600	0,773	0,187	0,975	0,076	-0,921	-0,983	0,103
3.F	939	0,48	0,024	0,04	313,337	1000	1,000	0,843	0,198	0,974	0,052	-0,919	-1,007	0,078
J	939	0,48	0,024	0,04	346,320	1000	0,500	0,769	0,160	0,979	0,077	-0,925	-0,981	0,104
E	397	0,87	0,024	0,05	313,337	670	0,625	0,712	0,426	0,926	0,096	-0,890	-0,945	0,214
O	397	0,87	0,024	0,05	362,812	670	0,625	0,667	0,527	0,909	0,111	-0,871	-0,933	0,248
N	397	0,87	0,024	0,05	362,812	670	0,556	0,652	0,501	0,913	0,116	-0,876	-0,927	0,258
1.A	397	0,87	0,024	0,05	478,252	670	0,625	0,561	0,826	0,857	0,146	-0,813	-0,908	0,333
1.B	397	0,87	0,024	0,05	395,795	670	0,500	0,606	0,548	0,905	0,131	-0,866	-0,913	0,292
1.C	397	0,87	0,024	0,05	461,760	670	0,417	0,514	0,666	0,885	0,162	-0,844	-0,886	0,366
T2	939	0,87	0,024	0,04	395,795	670	0,500	0,606	0,232	0,969	0,131	-0,939	-0,901	0,285
T3	939	0,87	0,024	0,04	437,023	670	0,417	0,540	0,254	0,966	0,153	-0,935	-0,879	0,336
T4	939	0,87	0,024	0,04	362,812	670	0,833	0,705	0,249	0,967	0,098	-0,936	-0,934	0,214

T5	668	0,87	0,024	0,045	395,795	670	0,625	0,636	0,358	0,944	0,121	-0,911	-0,915	0,265
T6	668	0,87	0,024	0,045	428,778	670	0,500	0,573	0,373	0,942	0,142	-0,908	-0,895	0,313
T7	668	0,87	0,024	0,045	428,778	670	0,417	0,548	0,344	0,946	0,151	-0,913	-0,886	0,331
T8	668	0,87	0,024	0,045	346,320	670	0,833	0,718	0,328	0,949	0,094	-0,916	-0,942	0,207

HAC avec des inclusions simples.

Dans ce cas le milieu est 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. Le champ de températures solution de l'équation est de la forme :

$$T_i = \left(A_i r + \frac{B_i}{r^2} \right) \cos \theta$$

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 $\frac{B_{\text{eq}}}{R_1^2} + R_1 = A_1 R_1$
- En $r=R_1$ le flux Φ_1 est continu donc $\lambda_{\text{eq}} \left(1 - \frac{2B_{\text{eq}}}{R_1^2} \right) = \lambda_1 A_1$

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

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

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

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 de flux dans l'ensemble du matériau s'écrit :

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

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

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

On en déduit finalement :

$$\lambda_{eq}(\theta_1(gradT)_1 + \theta_2(gradT)_2) = \theta_1\lambda_1(gradT)_1 + \theta_2\lambda_2(gradT)_2$$

Soit $\lambda_{eq}(\theta_1A_1 + \theta_2A_2) = \lambda_1\theta_1A_1 + \lambda_2\theta_2A_2$

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

On pose les paramètres suivants :

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

Et on obtient l'équation du second ordre en λ

$$2X^2 + X(3\theta_1 - 2 + \beta(1 - 3\theta_1)) - \beta = 0$$

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). Donc l'équation se simplifie avec $\beta=0$

$$2X^2 + X(3\theta_1 - 2) = 0$$

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

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

HAC avec inclusions bicomposite

Dans ce cas, la convexité de la phase externe est imposée. 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

$\theta = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3$

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. 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.

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 $\lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_1^3} \right) = \lambda_1 A_1$
- 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 $\lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_2^3} \right) = \lambda_{\text{eq}} \left(1 - \frac{2B_{\text{eq}}}{R_2^3} \right)$

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.

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

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

On pose les concentrations volumiques suivantes :

$$\theta = (R_2/R_3)^3$$

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

On obtient alors un système de six équations à cinq inconnues et la conductivité équivalente est :

$$\lambda_{eq} = \lambda_3 \left(1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1 + \frac{(\lambda_1 - 1)\delta}{3}}{\frac{\lambda_1}{\lambda_3} - 1 - \frac{\delta(\lambda_1 - 1)(\frac{2\lambda_2}{\lambda_3} + 1)}{3}}} \right)$$

Quelques remarques peuvent être faites quant aux comportements limites par ces formules. Concernant les inclusions bicomposite. 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.

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

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

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.