



THESE



en co-tutelle entre l'Université de Cergy-Pontoise et l'Université de Yaoundé I

pour obtenir le grade de docteur d'Université

Spécialité : Energétique – Génie Civil

VALORISATION DES BRIQUES DE TERRE STABILISEES EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS

par

Pierre MEUKAM

Docteur 3^o Cycle

10 DECEMBRE 2004 A YAOUNDE

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

M. PUIGGALI Jean R.	Université Bordeaux I	Président
M. AYINA OHANJA L.M.	Université de Yaoundé I	Examineur
M. DUVAL Roger	Université de Cergy-Pontoise	Directeur de Thèse
M. JANNOT Yves	Université de Bordeaux I	Examineur
M. KOFANE Timoléon C.	Université de Yaoundé I	Directeur de Thèse
M. NGANHOU Jean	Université de Yaoundé I	Examineur
M. NOUMOWE N. Albert	Université de Cergy Pontoise	Examineur
M. WOUAFFO Paul.	Université de Yaoundé I	Rapporteur



THESE



Présentée

A l' UNIVERSITE DE YAOUNDE I

pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT /Ph.D

Spécialité Energétique

par

Pierre MEUKAM

Docteur 3° Cycle

sur

CARACTERISATION DE MATERIAUX LOCAUX EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS

SOUTENUE LE NOVEMBRE 2004 DEVANT LE JURY COMPOSE DE

M. TONYE Emmanuel	Professeur	Université de Yaoundé I	Président
M. DUVAL Roger	Professeur	Université de Cergy Pontoise	Rapporteur
M. KOFANE Timoléon C.	Professeur	Université de Yaoundé I	Rapporteur
M. PUGGALI Jean R.	Professeur	Université de Bordeaux I	Rapporteur
M. AWONO ONANA	M.C.	Université de Yaoundé I	Examineur
M. NGANHOU Jean	M.C.	Université de Yaoundé I	Examineur
M. NOUMOWE Albert	M.C.	Université de Cergy Pontoise	Examineur
M. JANNOT Yves	Chargé de Recherche	LEPT-ENSAM Bordeaux I	Examineur

*Travail réalisé au Laboratoire d'Energétique (ENSP Yaoundé) et à l'IUP Génie Civil
(Université de Cergy Pontoise)*

L'Eternel est mon Berger, je ne manquerai de rien

(Psaume 23)

Remerciements

Ce travail a été initié, au Laboratoire d'Energétique de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé lorsque M. Yves JANNOT en était le Responsable. Nous tenons tout d'abord à lui adresser ainsi qu'à M. Albert NOUMOWE, Maître de Conférences à l'Université de Cergy-Pontoise, nos remerciements pour avoir conduit l'encadrement des travaux jusqu'à leur terme.

Que Monsieur Timoléon Crépin KOFANE, Professeur des Universités camerounaises et Monsieur Roger DUVAL, Professeur émérite à l'Université de Cergy Pontoise, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour avoir accepté de diriger nos travaux.

Nous tenons à remercier vivement et respectueusement le Professeur Jean-Rodolphe PUIGGALI, Directeur du laboratoire TREFLE à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM), d'avoir bien voulu présider notre jury. Nous mesurons tout l'honneur qu'il nous fait.

Nous sommes particulièrement reconnaissant envers les Professeurs Louis Max AYINA OHANJA, Directeur de l'IUT de Douala et Paul WOAFU du Laboratoire de Mécanique de la faculté des sciences de l'Université de Yaoundé I, qui participent en tant rapporteurs au jury de cette thèse.

Nous adressons notre profonde gratitude au professeur Jean NGANHOU Chef de Département GIM à l'ENSP, qui a accepté de lire et de juger ce travail.

Que le Dr Capel BIDJOCKA, Responsable du Laboratoire de Géotechnique et des Matériaux de l'ENSP, ainsi que son personnel technique trouvent l'expression de nos chaleureux remerciements pour le sérieux accordé à la réalisation des essais mécaniques.

Je tiens à remercier tous les membres du Laboratoire d'Energétique et mes collègues du département MSP de l'ENSP, pour l'ambiance amicale qu'ils ont su créer pendant toute la durée de mes travaux. Je m'adresse en particulier au Docteur Paul Salomon NGOHE EKAM qui a bien voulu me faire profiter de son expérience pour la mesure des propriétés thermophysiques utilisant la méthode dite des boîtes.

En fin, je sais combien la présence de mon épouse et de mes enfants à mes côtés a été importante pour surmonter les moments difficiles. C'est à eux que je dédie particulièrement ce mémoire.

NOMENCLATURE

a	Diffusivité thermique	$m^2.s^{-2}$
a_{ce}	Activité de l'eau	
c_e	Chaleur spécifique de l'eau	$J.kg^{-1}.°C^{-1}$
C_l	Coefficient de déperdition	$W.K^{-1}$
c_p	Chaleur spécifique à pression constante	$J.kg^{-1}.°C^{-1}$
d	Diamètre de l'éprouvette	mm
D	Diffusivité	
e	Epaisseur de l'échantillon	m
E	Effusivité	$J.m^{-2}.s^{-0.5}.K^{-1}$
F	Force appliquée	N
H	Hauteur de l'éprouvette	mm
HR	Humidité relative	%
m	Masse	kg
m_e	Masse de l'eau	kg
m_h	Masse humide	kg
m_s	Masse sèche	kg
P_o	Pression de vapeur de l'eau pure	Pa
P_T	Porosité totale	Pa
P_v	Pression de vapeur d'eau du matériau	Pa
P_{vs}	Pression de vapeur à saturation	Pa
Q	Quantité de chaleur échangée par unité de surface	$J.m^{-2}$
T	Température	°C
T_a	Température ambiante	°C
T_A	Température ambiante de la salle d'expérience	°C
T_B	Température à l'intérieur de la boîte	°C
T_C	Température de la face chaude	°C
T_e	Température d'équilibre	°C
T_{em}	Température moyenne de l'eau	°C
T_{eo}	Température initiale de l'eau	°C
T_f	Température de la face froide	°C
T_m	Température moyenne du mélange	°C

T_{so}	Température initiale du solide	$^{\circ}\text{C}$
R_c	Résistance en compression	MPa
R_t	Résistance en traction	MPa
R_{tf}	Résistance en traction par fendage	MPa
R	Résistance des fils	Ω
S	Surface	m^2
U	Coefficient global d'échange	$\text{W.m}^{-2}.\text{^{\circ}C}^{-1}$
V	Tension	V
V_a	Volume apparent du matériau	m^3
V_p	Volume total des pores	m^3
V_{pf}	Volume total des pores fermées	m^3
V_{po}	Volume total des pores ouvertes	m^3
t	Temps	s
x	Distance	m
y	Distance	m
w	Teneur en eau	%

Symboles grecs

ε	Porosité	
λ	Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
λ_g	Conductivité thermique en phase gazeuse	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
λ_s	Conductivité thermique en phase solide	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Φ_c	Flux de chaleur convectif	W.m^{-2}
Φ_r	Flux de chaleur radiatif	W.m^{-2}
ρ_0	Masse volumique du matériau à l'état sec	kg.m^{-3}
ρ	Masse volumique de l'eau liquide	kg.m^{-3}
ρ_w	Masse volumique de la vapeur d'eau	kg.m^{-3}
μ	Potentiel chimique	
μ_c	Valeur en eau du calorimètre	kg
γ	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	J.kg^{-1}
Π	Perméabilité de la vapeur	

TABLE DE MATIERES		Page
	Remerciements	
	Résumé/Abstract	
	Nomenclature	
	Introduction générale	1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et présentation des matériaux locaux		3
Chapitre 2 : Méthodes de mesure des propriétés thermophysiques		23
Chapitre 3 : Caractérisation thermophysique		59
Chapitre 4 : Caractérisation mécanique		80
Chapitre 5 : Modélisation des transferts de chaleur et d'humidité dans une enveloppe de bâtiment en briques de terre stabilisées		94
	Conclusion générale	123
	Références bibliographiques	125
	Annexes	130

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La part importante de l'énergie consommée pour le chauffage ou la climatisation des bâtiments a amené des chercheurs à se pencher sur le problème des échanges de chaleur entre les locaux et l'environnement. Ce problème très vaste et complexe dépend de paramètres tels que :

- La nature des matériaux servant à la construction,
- La forme des bâtiments qui influe sur le captage de l'énergie solaire,
- L'environnement climatique dans lequel se trouve le bâtiment,
- L'interaction bâtiment sol.

Dans de nombreux pays, la courbe de consommation d'énergie continue d'augmenter. La réduction de gaz brûlés, de suie et de poussière par des économies d'énergie correspond à une contribution directe à la protection de l'environnement, et l'isolation thermique est un facteur déterminant à cet égard. L'isolation thermique de parois, sols et plafonds est aussi une composante de la qualité de vie. Un climat ambiant sain et confortable n'est toutefois possible que dans des locaux où la température et l'humidité de l'air varient dans les limites acceptables. L'isolation thermique permet en l'occurrence de créer un climat ambiant confortable.

Une bonne partie de la déperdition de chaleur se faisant par les murs, les matériaux isolants ralentissent le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. La qualité de l'isolation à prévoir dépend du climat, de l'exposition des murs et aussi des matériaux employés pour la construction. Le choix d'un matériau utilisé comme isolant dépend naturellement de sa disponibilité et de son coût.

Contrairement au ciment, au béton ou à l'acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction pratiquement sans dépense d'énergie. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. La terre largement utilisée dans la construction des bâtiments est très sensible à l'eau. Les blocs de terre sont produits par la compression de terre crue dans une presse mécanique ou hydraulique. La terre est retenue dans un moule où elle est comprimée entre deux plateaux qui se rapprochent lentement. Cette compression permet de réduire le volume des vides dans le bloc, ce qui diminue ainsi sa sensibilité à l'eau et augmente sa résistance à la compression.

Certaines propriétés des briques de terre (faible masse volumique, faible conductivité thermique) justifient leur utilisation pour l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments comme par exemple les briques alvéolées et les briques creuses. Il s'avère utile de rechercher des matériaux locaux qui améliorent l'isolation thermique des bâtiments et dont le coût de production est faible.

Nous nous proposons dans ce travail de mettre au point des briques de terre avec incorporation de matériaux à faible masse volumique et dont les conductivités thermiques sont suffisamment faibles pour que le béton de terre obtenu soit judicieux pour une isolation thermique. Nous avons choisi d'incorporer dans les briques de terre stabilisées (BTS) soit de la pouzzolane naturelle soit de la sciure de bois. La valorisation de la sciure de bois et une contribution à la protection de l'environnement (la sciure de bois est le plus souvent brûlée, produisant du CO₂) constituent le second objectif de ce travail.

Pour optimiser les échanges d'air, de chaleur et d'humidité dans les bâtiments, les concepteurs ont besoin de connaître les propriétés thermo-hydriques de chaque élément qui compose l'enveloppe du bâtiment. Dans la littérature, il existe peu de données sur les propriétés du matériau terre, pourtant largement utilisé dans les constructions et notamment au Cameroun. Ces propriétés incluent :

- la capacité calorifique;
- la conductivité thermique et son lien avec la température;
- la perméabilité à la vapeur d'eau et son lien avec l'humidité relative;
- la teneur en humidité au point d'équilibre et son lien avec l'humidité relative;
- le coefficient d'absorption d'eau;
- la diffusivité de l'eau à l'état liquide (une propriété qui détermine le taux de diffusion de l'eau à l'état liquide dans les matériaux poreux) et sa relation avec la teneur en eau;
- la perméabilité à l'air qui dépend des différentiels de pression.

La plupart des matériaux de construction possèdent une structure poreuse à l'intérieur de laquelle l'eau sous forme liquide ou vapeur peut être stockée ou restituée au milieu environnant. L'humidité constitue l'une des principales causes des dommages que subissent les bâtiments. Les simulations informatiques permettent d'étudier la performance hygrothermique (diffusion combinée de la chaleur, de l'air et de l'humidité) des enveloppes de bâtiments offrant la possibilité d'en améliorer la conception. La recherche menée dans ce travail a aussi pour objectif d'utiliser des outils de modélisation pour prédire le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiment en BTS et d'en améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité.

Le transfert de chaleur, dans un milieu poreux, s'accompagne le plus souvent de transfert d'humidité. De nombreuses études menées sur ce phénomène assez complexe ont montré la difficulté de mise en œuvre des modèles. Quelques modèles proposés plus récemment prennent en compte le transfert couplé de chaleur et d'humidité en considérant l'eau sous forme liquide ou sous forme vapeur.

Nous nous proposons dans ce travail de faire une étude approfondie des BTS afin d'acquérir un ensemble de données thermophysiques les concernant. Nous présentons la méthode utilisée pour la mesure de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique. Etant donnée la variation de ces deux propriétés avec l'humidité, nous avons fait une étude sur l'influence de la teneur en eau sur chacune d'elles. La méthode calorimétrique est utilisée pour la détermination de la chaleur spécifique.

Les briques de terre confectionnées ainsi que celles avec incorporation de pouzzolane naturelle ou de sciure de bois doivent avoir une résistance mécanique suffisante pour éviter que les parois ne se fissurent rapidement. Une partie de ce travail est donc consacrée à l'étude des propriétés mécaniques des briques de terre réalisées.

Nous nous sommes attachés ensuite à mesurer les paramètres hygrothermiques des BTS nécessaires à la modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité entre les environnements extérieur et l'intérieur d'une enveloppe de bâtiment. Nous faisons une étude incluant les isothermes de sorption des matériaux et des données climatiques moyennes des trois localités choisies.

Nous réalisons enfin grâce à la modélisation des transferts chaleur et de masse des simulations indiquant les profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau, de façon à prévoir la durabilité des matériaux mis au point dans ce travail.

1. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE et PRESENTATION DES MATERIAUX LOCAUX

Chapitre 1

SYNTHESE BIBIOGRAPHIQUE ET PRESENTATION DE MATERIAUX LOCAUX

Sommaire

Introduction	5
1.1- L'isolation thermique des bâtiments.....	6
1.1.2- Les techniques d'isolation thermique dans le bâtiment.....	12
1.1.2.1-Isolation intégrée	12
1.1.2.2- Les autres solutions	12
1.2-La pouzzolane naturelle au Cameroun.....	13
1.2.1-Définition de la pouzzolane.....	13
1.2.2-Présentation des sites de prélèvement	13
1. 3. Production de la sciure de bois au Cameroun	17
1. 4- Production du ciment au Cameroun.....	20
1. 5-Stabilisation des briques de terre	21
1.5.1-Stabilisation mécanique.....	22
1.5.2-Stabilisation chimique	22
1.5.3- Stabilisation physique.....	22
1. 5.4- Stabilisation au ciment	22
1.5.5- Stabilisation par cuisson	23

Introduction

La meilleure façon d'assurer le développement durable du système énergétique passe, de l'avis général, par la réduction de la consommation de toutes les ressources énergétiques. La mise en œuvre des potentialités d'économie d'énergie existantes ne peut avoir que des effets bénéfiques, d'abord sur le plan financier et ensuite sur la situation environnementale globale. En effet, l'économie d'énergie est l'une des manières de contribuer à la diminution des risques de changements climatiques auxquels notre planète est exposée.

La plupart des bâtiments, qu'ils soient à usage d'habitation ou industriel, constituent des systèmes dont la consommation d'énergie est importante si l'on désire assurer un confort thermique acceptable par ses occupants. Pour les deux raisons ci-dessus mentionnées, la mise en œuvre d'un programme d'économie d'énergie dans les bâtiments devrait être une des actions prioritaires à entreprendre. La mise en œuvre d'un tel programme se traduirait par :

- l'amélioration de la conception thermique des bâtiments adaptée aux climats du pays concerné
- l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments,
- un code de qualité pour les bâtiments neufs et un guide d'exploitation.

Il est par ailleurs indispensable de mener des études qui permettent l'amélioration du confort thermique dans l'habitat non climatisé.

Pour améliorer le confort thermique dans un pays chaud comme le Cameroun, le recours à la climatisation s'avère nécessaire. La climatisation naturelle contribue à limiter les recours aux appareils de climatisation, ce qui est une nécessité économique dans un grand nombre de pays chauds. On constate que chaque année, les techniques traditionnelles reculent au profit des standards architecturaux importés et inadaptés aux climats chauds avec des conséquences pour le moins négatives (Abdesselam, 1999).

Pour une climatisation naturelle ou passive, à savoir un choix adéquat des matériaux et leur disposition pour réduire les apports de chaleur, les outils dont dispose le concepteur d'un bâtiment ne lui permettent pas toujours de répondre directement aux préoccupations qui peuvent être entre autres :

- le niveau d'isolation à adapter pour un bâtiment sans climatisation active
- la répartition des conductances et des capacités thermiques
- l'épaisseur optimale pour les couches des matériaux
- l'action thermique la plus efficace dans un contexte donné (climatisation artificielle/ climatisation naturelle).

Le transfert de chaleur, dans un milieu poreux, s'accompagne le plus souvent de transfert d'humidité. De nombreuses études menées sur ce phénomène assez complexe ont montré la difficulté de mise en œuvre des modèles. Lewis (1921) a étudié le transfert d'humidité dans les milieux poreux en négligeant les effets de transfert de chaleur et a conclu que le mouvement de l'humidité diffuse de l'intérieur à la surface du matériau où l'eau s'évapore. Biot (1941) a développé une théorie de déformation des milieux poreux isotropiques à trois dimensions en supposant le composant solide homogène et élastique ou homogène mais anisotropique. Une modélisation des phénomènes physiques fondamentaux repose sur la caractérisation des propriétés intrinsèques des matériaux. La mesure des grandeurs physiques intervenant dans ces modèles est indispensable et la plupart des difficultés proviennent :

- . de la pauvreté des données physiques caractéristiques des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments,
- . de la complexité des modèles basés sur la théorie de Glaser cité par Perrin (1985) qui ne concerne que le régime établi négligeant les variations des caractéristiques thermiques des matériaux avec l'humidité et la température et supposant que les transferts n'ont lieu qu'en phase vapeur, ce qui n'est pas souvent le cas.

Quelques modèles proposés plus récemment prennent en compte le transfert couplé de chaleur et d'humidité en considérant l'eau sous forme liquide ou sous forme vapeur (Shun-Lund Su, 1997)

1.1- L'isolation thermique des bâtiments

Pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment et économiser de l'énergie, il est nécessaire de mettre en œuvre des matériaux particulièrement performants, apportant une bonne isolation thermique. En effet, une bonne isolation thermique entraîne le choix d'équipements de climatisation moins puissants donc plus économiques.

Dans la plupart des cas, l'isolation est obtenue par l'emploi de matériaux spécifiques, qui, outre une bonne résistance à la transmission de la chaleur, doivent présenter d'autres qualités qui sont fonction des impératifs de mise en œuvre comme :

- la légèreté et la non hygroscopicité afin de conserver dans le temps ses qualités isolantes,
- une bonne résistance mécanique,
- une bonne tenue aux températures d'emploi,
- une absence d'effets nuisibles sur les matériaux en contact avec l'isolant.

On peut par exemple, au cas où il y a nécessité d'isolation complémentaire, opter pour la mise en œuvre d'isolants pour habiller la construction tant par l'intérieur que par l'extérieur, mais dans ce cas il faudrait traiter les ponts avec soin. Une autre solution consiste à faire appel à des matériaux qui, en raison de leurs propriétés isolantes, se suffisent à eux-mêmes et ne nécessitent pas la mise en œuvre d'une isolation complémentaire.

1.1.1- Les isolants thermiques

Les isolants thermiques diffèrent les uns des autres par de nombreux paramètres. Nous présentons ci-après un aperçu des principales caractéristiques par type d'isolant (Busschaert, 1996).

- La laine de verre minérale (MW)

La laine de verre minérale se présente sous différentes formes (matelas ou panneaux). Les produits sont fabriqués par un mélange de matières premières en fusion (pour la laine de roche il s'agit essentiellement de diabase et de calcaire, pour la laine de verre essentiellement de sable et de débris de verre) jusqu'à l'obtention de fibres de consistance laineuse.

- Le polystyrène expansé (EPS)

On distingue le polystyrène expansé modifié non résistant au feu et le polystyrène expansé modifié résistant au feu. La masse volumique et, donc les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours de fabrication. En effet, la conductivité thermique par exemple est liée à la masse volumique. La masse volumique est fonction de la taille des billes, de leur vitesse d'introduction et du débit de vapeur.

- Le verre cellulaire (CG)

Les isolants en verre cellulaire se présentent sous forme de panneaux à bords ou de pièces découpées dans les panneaux. La masse volumique ou les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours de fabrication. Le produit est obtenu par fusion pure et d'additifs, puis passé dans une étireuse, vitrifié et broyé.

- Le polystyrène extrudé (XPS)

Le polystyrène extrudé se présente sous forme de panneaux à bords droits, à rainure et languettes ou à butée. Les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours

de fabrication. Le produit est obtenu par mélange de granulats de polystyrène et d'additifs (agents expansifs notamment) jusqu'à l'obtention d'une pâte que l'on introduit dans une extrudeuse pour produire l'épaisseur désirée. Le produit doit ses propriétés isolantes spécifiques au type d'agent expansif utilisé ainsi qu'à la vitesse de montée en température et à la vitesse d'intrusion. L'adjonction de l'agent expansif engendre une migration air/agent expansif qui se stabilise avec le temps.

- Polyuréthane (PUR) et Polyisocyanurate (PIR)

Les produits se présentent sous forme de panneaux à bords droits pourvus éventuellement de rainures et de languettes. Les panneaux sont constitués d'une âme de mousse rigide en PUR/PIR et sont dotés d'un parement sur les deux faces. Les parements conditionnent en partie les propriétés isolantes. La mousse rigide de PUR/PIR résulte d'une réaction chimique exothermique de polyisocyanurates et de polyol sous l'effet d'agents expansifs.

- La laine de bois

Les panneaux de laine de bois sont élaborés à partir de fibres de bois, le liant étant la lignine de bois. Ce matériau naturel possède un coefficient de conductivité thermique λ identique aux autres laines isolantes, une structure rigide à assemblage rainuré garantissant une très grande longévité.

- Phénol (PF)

Ce produit se présente sous forme de panneaux à bords droits pourvus éventuellement de rainures et languettes. Les panneaux sont constitués d'une âme en mousse phénolique et sont dotés d'un parement sur les deux faces qui conditionne en partie les propriétés isolantes. Le produit doit ses propriétés isolantes spécifiques au type d'agent expansif et à la formulation adoptée.

- Perlite expansée (EPB)

Le processus de fabrication consiste à poser sur un tapis roulant un mélange composé d'eau de perlite expansée, de fibres de verre, de cellulose et d'un liant bitumeux. Le mélange est comprimé jusqu'à l'obtention de l'épaisseur voulue.

Les matériaux comme les granulats de verre, le chanvre, la terre cuite sont utilisés dans la confection des briques spécifiques qui entrent dans la composition d'éléments particulièrement isolants.

Avec le granulats de verre, on confectionne un béton isolant. C'est aussi le cas du chanvre qui est un bon isolant biologique sur les plans thermique et phonique, et difficilement inflammable. On rencontre également sur le marché du bâtiment des briques alvéolées en quinconce qui offrent un bon pouvoir isolant. Les masses volumiques et les conductivités thermiques des isolants présentés ci-dessus sont regroupées dans le *tableau 1.1*.

Tableau 1.1 : Masses volumiques et conductivités thermiques de quelques isolants

Matériau	Masse volumique	Conductivité
----------	-----------------	--------------

	ρ (kg/m ³)	thermique λ (W/m.°C)
Laine de verre minérale	18	0,034 - 0,056
Polystyrène expansé	18	0,040 - 0,046
Verre cellulaire		0,050
Poliuréthane	35	
Polystyrène extrudé	35	0,031 - 0,034
Laine de bois	150	0,052 - 0,065
Perlite expansée	90	0,060

Parmi les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés comme isolants dans le bâtiment, la conductivité thermique est celle dont la valeur est la plus fréquemment réclamée. Nous présentons dans le *tableau 1.2* les conductivités thermiques de quelques matériaux d'isolation utilisés au Cameroun.

Tableau 1.2 : Masses volumiques et conductivités thermiques de quelques matériaux utilisés dans le bâtiment au Cameroun

Matériau	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Béton de fibre de bois	300 - 400	0,12
Béton de copeau de bois	450 - 650	0,16
Béton de pouzzolane		0,52
Liège de bambou	150 - 250	0,048
Paille	300 - 400	0,12
Carton		0,14 - 0,35
Carton comprimé		0,26
Sciure de bois	190 - 215	0,06 - 0,07
Terre sèche	1000 - 2000	0,17 - 0,58
Terre à 10% d'eau	1000 - 2000	0,50 - 2,1
Terre à 20% d'eau	1000 - 2000	0,80 - 2,6
Terre battue (mur)	1700	0,99
Contre plaqué		0,12
Bois lourds		0,15 - 0,23
Bois légers		0,12
Terre cuite	1800 - 2000	1,15
Kapok		0,035 à 30°C

Dans le *tableau 2.3* sont présentées les masses volumiques et les conductivités thermiques des principaux isolants thermiques utilisés dans le bâtiment.

Tableau 1.3: Coefficients de conductivité thermique de quelques matériaux utilisés dans le bâtiment (RECKNAGEL, 1995).

Matériau	Masse volumique ^{1.} kg/m ³	Conductivité thermique (W/m°C)
Bloc de terre comprimée	1700 - 1900	1,05
Terre cuite	1700 - 2100	1 - 1,35
Bétons		
• Béton plein (granulats)	1600 – 2400	0,8 – 1,75
• Béton caverneux (granulats)	1000 – 2000	0,35 – 0,7
• Bétons de pouzzolane	1000 – 1200	0,35
• Béton de perlite	400 – 800	0,24 – 0,31
• Béton de bois	250 – 650	0,10 – 0,16
• Béton cellulaire traité à l'autoclave	375 - 825	0,16 – 0,33
Plaques à fibres de bois	• 450 – 550 • 350 – 450 • 250 – 350	0,16 0,12 0,10
Bois naturel spéciaux		
• Balsa	60 – 120	0,052
• Bois lourd	800 – 1000	0,29
Mousse rigide à base de polychlorure de vinyle	25 – 48	0,031 – 0,034
Mousse rigide à base de polyuréthane	30 – 40	0,029
• Plaque expansée en continu	30 – 60	0,030 – 0,033
• Bloc expansé en discontinu		

Nous présentons ci-dessous les principaux matériaux utilisés pour le remplissage des murs dans la construction des bâtiments.

- La brique de terre stabilisée (BTS)

Un bloc de terre non ou très peu stabilisé ne supporte pas d'immersion dans l'eau. Il se disloque complètement lorsqu'il est plongé dans l'eau. La stabilisation a donc pour but de remédier à cet inconvénient. La stabilisation dépend de plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- La nature du stabilisant et sa quantité
- La qualité de la terre
- La qualité du compactage

Le travail de Ayissi (1993) montre que la terre non stabilisée a une résistance à sec acceptable car supérieure au minimum exigée dans la construction. Il a testé les effets stabilisateurs du ciment et de la chaux, deux produits minéraux d'utilisation courante, sur un échantillon de sol donné.

- L'ajout de 4% de ciment améliore la résistance à sec tandis qu'avec 8% de ciment cette résistance est multipliée par trois. D'après les essais effectués il constate une dégradation des échantillons non stabilisés après quatre heures trente sept minutes d'immersion, alors

qu'après vingt quatre heures les échantillons stabilisés à 4 et 8% de ciment n'ont subi aucune altération évidente. La résistance humide des échantillons stabilisés au ciment est supérieure au seuil exigé dans les constructions.

- Par ailleurs une BTS avec 8% de chaux permet un gain important par rapport à la terre simple en ayant à peu près la même efficacité que le ciment à 8%.

Les travaux du Laboratoire des Travaux Publics du Cameroun (LTPC) de Yaoundé rapportés par Ottou (1987), présentés dans le *tableau 1.4*, mettent en évidence l'importance de la teneur en eau sur le compactage.

Tableau 1.4: Qualité de compactage en fonction de la teneur en eau de moulage

Teneur en eau de moulage en fonction de l'O.P.M.	Qualité du compactage en pourcentage de l'O.P.M.
l'O.P.M.	Compactage impossible ; les grains ne peuvent glisser les uns sur les autres
l'O.P.M. + 3%	80 à 92%
l'O.P.M. + 5%	79 à 85%
l'O.P.M. + 8%	84 à 96%
l'O.P.M. +10 à 17%	72 à 88%

O.P.M. : optimum PROCTOR modifié

En se basant sur les études antérieures faites sur les BTS (résistance en compression, sensibilité à l'eau etc.), Dongmo (1991) a utilisé trois valeurs de teneur en ciment à savoir : 0%, 5% et 10%. Il a choisi quatre valeurs de compactage en tenant compte des valeurs couramment utilisées en matière de compactage de blocs de terre ; ces pressions de compactage sont comprises entre 7 et 20 bars.

A partir des données tirées du mémoire de Dongmo (1991), nous avons tracé la courbe de variation de la conductivité thermique d'une BTS en fonction de la teneur en eau. La figure 1 montre que la conductivité thermique augmente logiquement avec la teneur en eau. En effet, le géobéton est poreux et le coefficient de conductivité thermique de l'eau (0,54W/m.K à 20°C) est supérieur à celui de l'air (0,02W/m.K à 20°C).

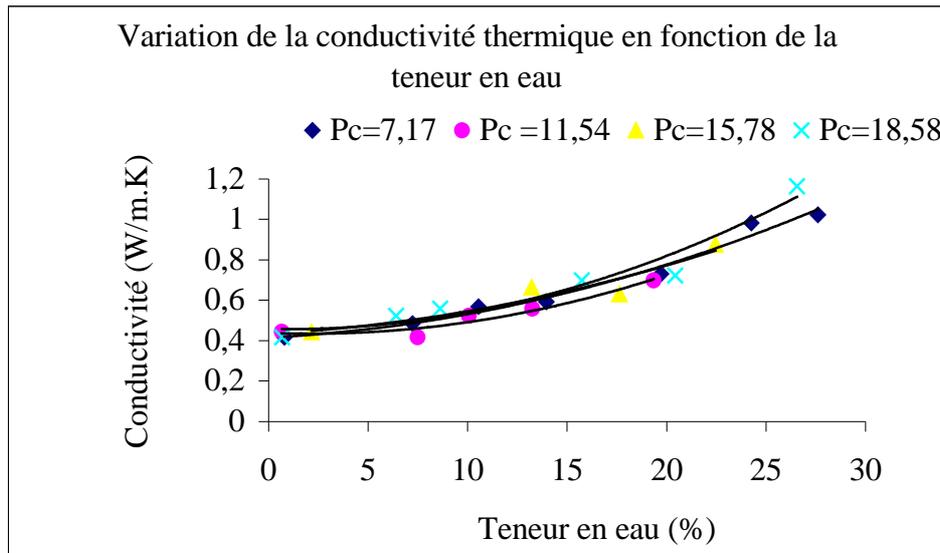


Figure 1.1 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau d'une BTS avec 10% de ciment

- La terre cuite

Construire et isoler simultanément constitue un pari mis en œuvre par la terre cuite grâce au bloc de terre G19 à savoir une brique munie d'un grand nombre de rangées d'alvéoles à parois quinconcées. Elle sert de matériau de construction et présente des qualités de rigidité et de tenue mécanique. Ses 37,5 cm d'épaisseur et ses 19 rangées d'alvéoles allongent le parcours thermique, réduisant les déperditions énergétiques (Richard, 1995). Ce bloc de terre à isolation répartie a un coefficient de conductivité $\lambda = 0,46 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ pour un tesson en terre cuite standard et $\lambda = 0,37 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ pour un tesson allégé par incorporation de sciure ou de polystyrène. Sa forte inertie permet une bonne régulation de la température et préserve la fraîcheur des locaux. Incombustible, il ne dégage pas de gaz toxiques en cas d'incendie. De plus il est non polluant et résout les problèmes de recyclage.

- Le béton cellulaire autoclavé

C'est un matériau silico-calcaire alvéolaire obtenu par traitement à l'autoclave d'un mélange de sable siliceux broyé, de chaux et de ciment additionné de poudre d'aluminium. Une multitude d'alvéoles se forme dans le matériau par dégagement gazeux d'hydrogène. La conductivité est variable avec la masse volumique.

- Les bétons légers de pouzzolane

Ce sont des bétons à granulats de pouzzolane, donc à granulats poreux. On désigne par pouzzolane les pyroclastites, qui sont des projections issues des éruptions volcaniques. Les bétons de pouzzolane naturelle ont une masse volumique qui se situe entre 1100 et 1500 kg/m^3 (Bidjocka 1990). Leurs propriétés mécaniques et physiques rendent possible leur utilisation soit comme bétons isolants et porteurs soit comme bétons de structure.

- Le béton mousse

Les bétons mousse sont des bétons dans lesquels des bulles d'air sont introduites par l'intermédiaire d'une mousse. Ils présentent des propriétés d'isolation thermique et acoustique ainsi qu'une bonne résistance au feu et au gel.

- Le tronc de cocotier ou de palmier

Une étude portant sur l'utilisation des matériaux locaux faite au Nigeria par Kolawole (1995) a montré que le tronc de palmier ou de cocotier peut être utilisé comme isolant dans le bâtiment. En effet, la composition des fibres de palmier est très différente des autres bois de construction. Pour cette raison il offre des propriétés thermiques différentes de la plupart des essences de bois. Les propriétés thermiques déterminées sont la conductivité thermique, la résistivité thermique et la résistance thermique spécifique.

1.1.2- Les techniques d'isolation thermique dans le bâtiment

1.1.2.1-Isolation intégrée

- Le bloc de coffrage isolant

C'est un système de mur composé d'éléments en polystyrène expansé ou d'éléments mixtes béton/polystyrène expansé destiné à être empilés à sec et formant coffrage pour la mise en œuvre d'un voile armé ou non.

- Le petit élément à isolation intégrée

Ce système est constitué de murs en petits éléments permettant la réalisation de murs maçonnés qui assurent simultanément des fonctions mécaniques et isolantes.

- Le système à isolation intégrée

Dans ce cas on fait appel à des éléments coffrants de la hauteur d'un étage, préconditionnés lors de la fabrication en usine. L'ossature est en béton.

- Éléments lourds en béton

Ce système se compose d'éléments lourds en béton de grandes dimensions avec une âme en polystyrène expansé.

- Le panneau sandwich

C'est un système constitué d'une peau extérieure décorative, d'un isolant par exemple le polystyrène expansé et d'une peau intérieure décorative ou non. Il s'agit d'éléments industrialisés de grande hauteur qui se mettent facilement en œuvre et qui apportent une bonne isolation.

1.1.2.2- Les autres solutions

D'autres matériaux entrent dans la composition d'éléments particulièrement isolants. Ce sont par exemple le granulats de verre, le chanvre (plante à fibres) et la terre cuite qui entrent dans la confection de briques spécifiques.

Avec le granulats de verre et le chanvre, qui est un bon isolant thermique et phonique difficilement inflammable, on confectionne un béton isolant.

Les briques alvéolées en quinconce offrent un bon pouvoir isolant (les briques "G" de l'entreprise Bouyer-Leroux). Le granulats de verre cellulaire Verexpan fabriqué à partir des sélections de verre de recyclage, de composition entièrement minérale permet par une série de traitements thermiques à haute température, d'obtenir une structure cellulaire homogène et fermée, légère et résistante.

1.2-La pouzzolane naturelle au Cameroun

1.2.1-Définition de la pouzzolane

En nous appuyant sur les travaux de Bidjocka (1990), nous présentons ci-dessous quelques notions sur la pouzzolane, l'un des matériaux à utiliser pour la réalisation des matériaux composites dont nous nous proposons de déterminer les caractéristiques.

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques. Le mot pouzzolane rappelle le nom d'une ville italienne, POUZZOLES où se trouve ce type de roche. Actuellement le terme pouzzolane est étendu au sens industriel et désigne tout matériau naturel ou artificiel riche en silice et alumine capable de réagir à température ambiante avec les chaux en présence d'eau pour former des produits aux propriétés liantes.

Pour notre étude nous utilisons le terme pouzzolane pour désigner uniquement les scories volcaniques provenant de lambeaux de laves à l'état liquide. La structure morphologique de type vacuolaire des pouzzolanes proprement dites, ainsi que leur forme déchiquetée leur sont caractéristiques. Les vésicules de tailles variables que présentent les pouzzolanes sont dues aux gaz emprisonnés dans la lave ; plus celle-ci est fluide moins elle est vacuolaire. La forme extérieure provient des explosions volcaniques qui provoquent l'éjection des lambeaux de laves constitutifs des pouzzolanes naturelles après refroidissement. Cette structure donne aux granulats une porosité remarquable ainsi qu'un haut pouvoir d'isolation thermique.

1.2.2-Présentation des sites de prélèvement

Il est reconnu que le Cameroun est affecté par un gigantesque accident tectonique qui relierait Sao-Tomé au Cameroun et se poursuivrait jusqu'au Tibesti (*figure 1.2*). Au Cameroun, cet accident est bien observé par l'alignement d'une quarantaine de massifs sur plus de 500 km, de l'océan atlantique au lac Tchad selon une direction SW-NE. Ces massifs se situent dans la partie Ouest du Cameroun, à la frontière du Nigéria. Ces fractures sont jalonnées de nombreuses émissions volcaniques.

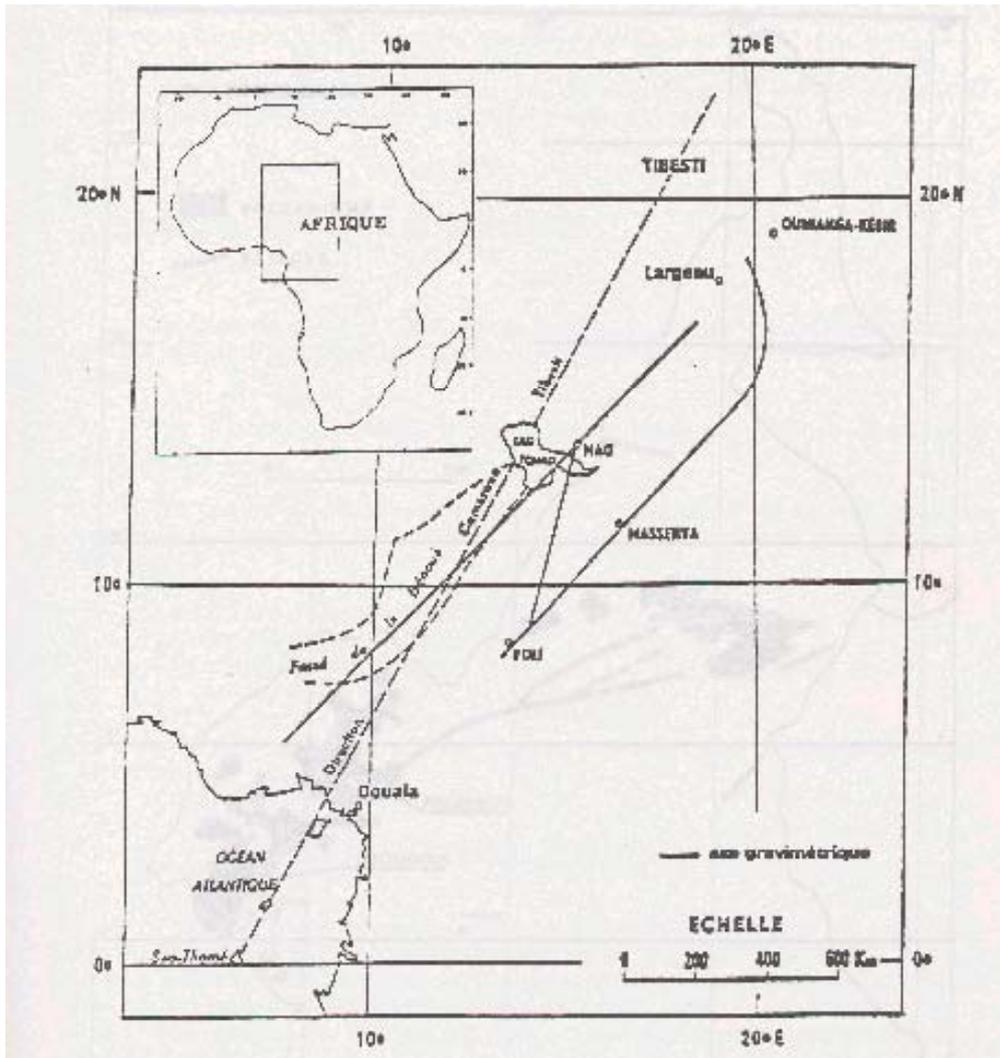


Figure 1.2 : La direction Cameroun-Tibesti et les axes gravimétriques par P. Louis, cité par Bidjocka, 1990

Les sites de prélèvement de pouzzolane peuvent être localisés dans deux régions différentes de l'Ouest Cameroun présentés sur la figure 1.3.

- La plaine de Tombel où se trouve la carrière de Djoungo,
- La plaine de Noun où se trouvent quatre carrières ouvertes qui seraient les plus importantes de la région de Foubot.

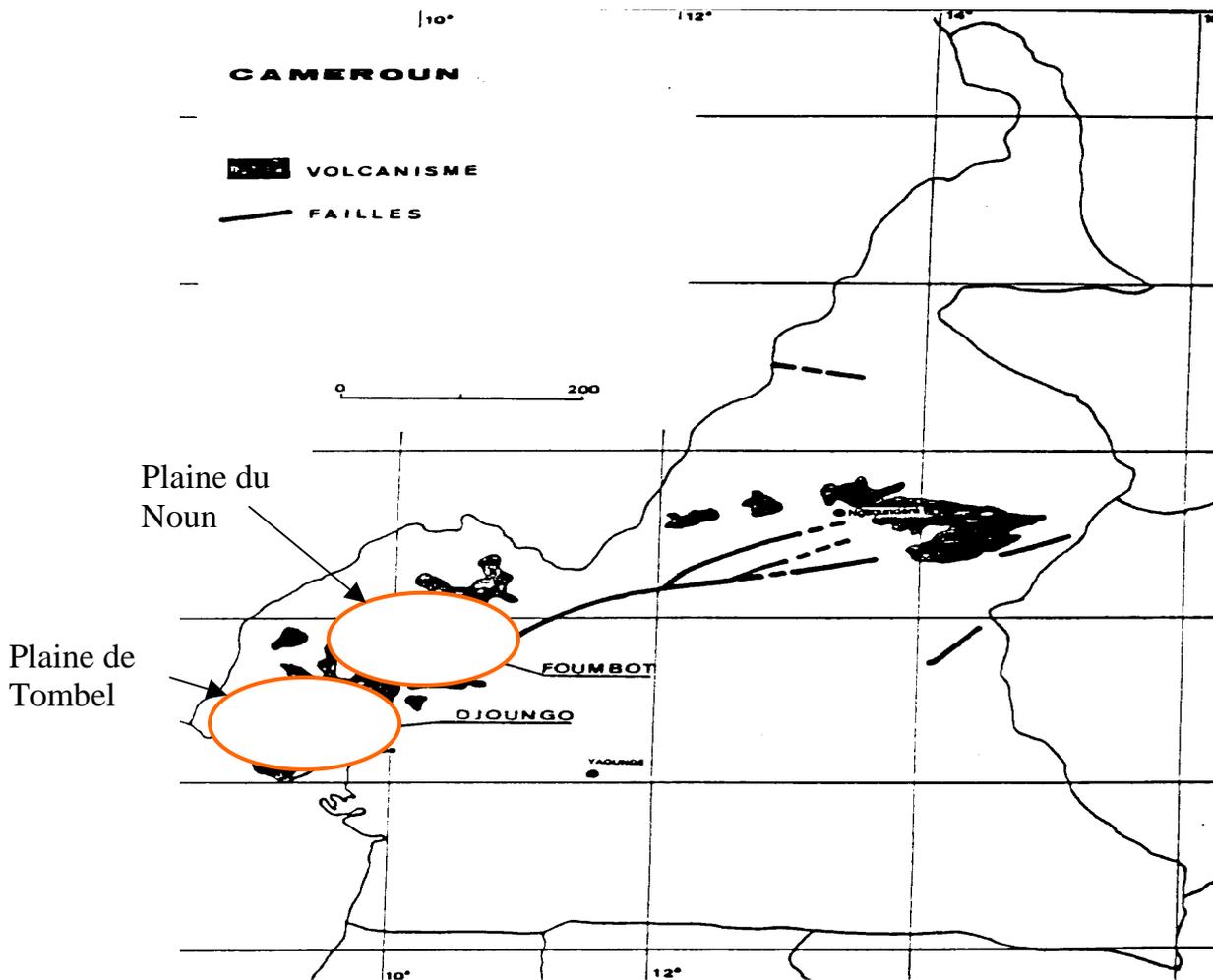


Figure 1.3 : Le volcanisme au Cameroun

Nous avons choisi de travailler avec de la pouzzolane de la carrière de Djoungo. Cette carrière se trouve au pied Sud-Est du Mont Pelé (figure 1.4). Les pouzzolanes qui y sont exploitées ont tout d'abord été utilisées comme granulats pour la construction de la ligne occidentale du chemin de fer du Cameroun. Les analyses chimiques ont permis de les utiliser aussi comme liants hydrauliques. C'est d'ailleurs à cette fin qu'est destiné l'essentiel de l'exploitation de la carrière par les cimenteries du Cameroun (CIMENCAM). Le Djoungo, encore appelé mont Pelé est l'un des mieux conservés de tous les cônes volcaniques de la plaine de Tombel. Sa masse principale qui n'a jamais été évaluée est constituée de produits de projection, parmi lesquels dominent les scories. Elles sont généralement noir violacé, mais on en trouve également de couleur rouge brique.

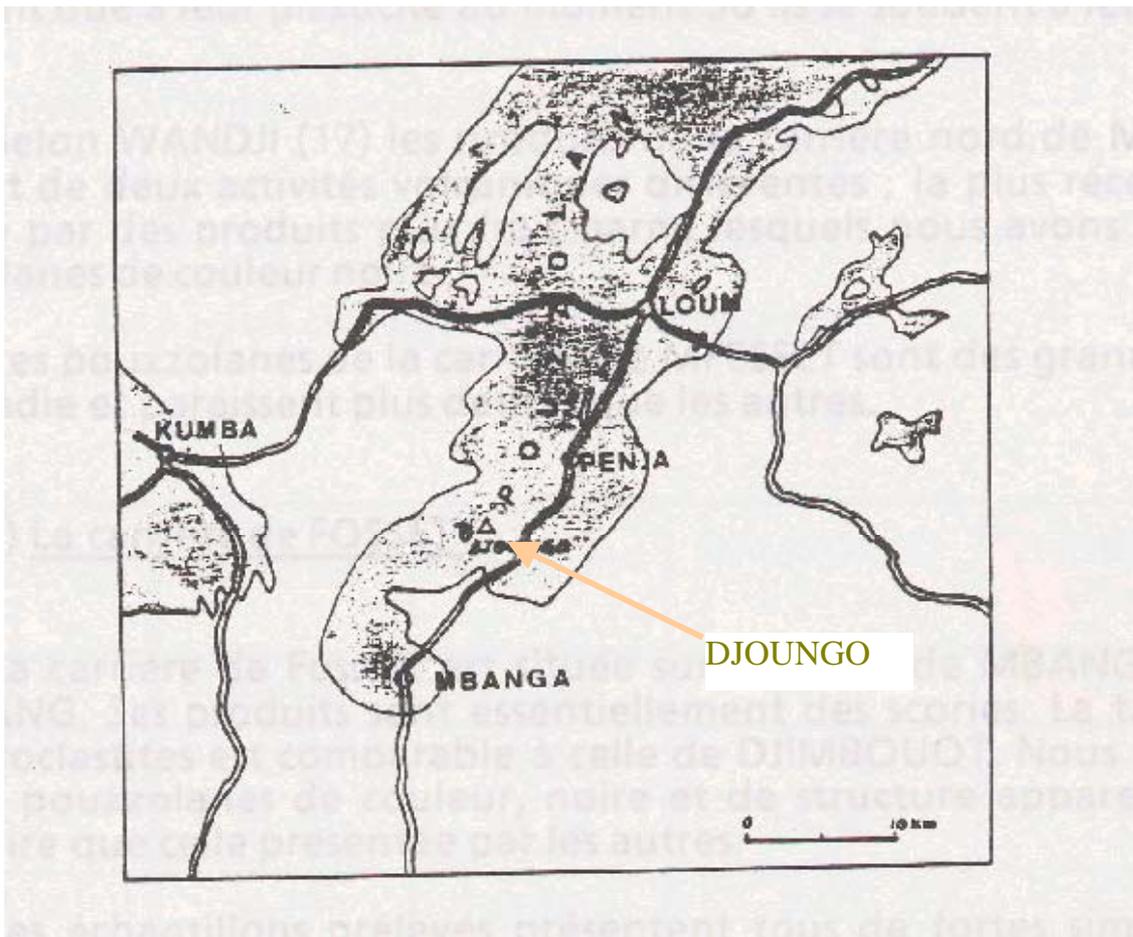


Figure 1.4 : Situation géographique du site de Djoungo

1.2.3- Différentes utilisations de la pouzzolane

La pouzzolane par toutes les caractéristiques qu'elle offre de façon naturelle, tant sur le plan physico-chimique que sur le plan économique trouve un éventail toujours croissant de domaines de valorisation. Que ce soit au niveau artisanal ou agricole, l'utilisation de la pouzzolane se diversifie surtout au voisinage des régions volcaniques. Les principaux domaines d'utilisation sont les suivants:

- L'agriculture

Les pouzzolanes sont riches en silice, en alcalino-terreux et en oligo-éléments. Elles offrent pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, chimiquement inerte, d'absence de parasites au départ de la mise en œuvre, de facilité de désinfection par la suite et d'une grande stabilité et durabilité. Les pouzzolanes servent aussi au drainage des tranchées, à l'amendement des sols. Elles sont également utilisées avec succès en horticulture et cultures maraîchères.

- Applications routières

Dans ce domaine la pouzzolane est utilisée comme sable comportant des fines.

- Fabrication des ciments

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de certains types de ciment comme constituant secondaire. Elle est également utilisée comme filler, donc comme un produit plus ou moins réactif du point de vue hydraulique et dont la présence accroît la maniabilité et diminue la capillarité du ciment. L'emploi de tels ciments est d'un grand avantage dans les

bétons de masse, à cause de l'accroissement de leur résistance au gel et à l'action des eaux agressives sans oublier la diminution de la solubilité de la chaux que présentent ces bétons.

▪ Fabrication des bétons

Dans le domaine des bétons, les pouzzolanes naturelles, lorsqu'elles sont disponibles, sont abondamment utilisées, avec des aspects diversifiés. De nombreuses applications possibles avec les pouzzolanes naturelles dépendent directement des propriétés de ces matériaux.

1. 3. Production de la sciure de bois au Cameroun

Le bassin du Congo comprend six pays d'Afrique Centrale dont le Cameroun. Environ 76 %, soit plus de 17 millions d'hectares, de forêts camerounaises (qui s'étendent sur 22,8 millions d'hectares dont 17,5 millions de forêt productive) ont été exploités ou au moins désignés comme concession forestière. Moins d'un cinquième des forêts non protégées du pays, surtout dans le Centre et l'Est du pays, n'a pas été touché par l'exploitation. Seulement 6%, soit 1,4 millions d'hectares, des forêts camerounaises sont protégées sous le statut d'un parc national ou d'une réserve. En 1994, le Cameroun a adopté une nouvelle loi forestière qui, si elle est appliquée, pourrait contribuer à la réduction des coûts sociaux et environnementaux de l'exploitation, tout en générant plus de revenus fiscaux. Au-delà de la valeur économique du bois, les forêts camerounaises sont parmi les plus diversifiées et les plus menacées d'Afrique Centrale. Les forêts du Bassin du Congo, qui s'étendaient sur plus de 198 millions d'hectares en 1995, représentent le deuxième plus grand bloc de forêts tropicales au monde après le Bassin de l'Amazonie. Les forêts les plus intactes du Cameroun sont situées dans le sud-est du pays. C'est dans cette zone que se trouvent les concessions les plus vastes et les taux d'extraction les plus élevés. L'exploitation a commencé par les zones les plus accessibles. Aujourd'hui, 7 millions d'hectares de forêt vierge restent disponibles. Les inventaires ont couvert à ce jour 13,8 millions d'hectares et le potentiel de bois sur pied est estimé à plus d'un milliard de mètre cube (m³) sur trois cents essences répertoriées. Parmi les essences répertoriées, une soixantaine fait l'objet d'une exploitation commerciale dont une vingtaine de façon systématique et le reste au gré de la conjoncture. La production forestière camerounaise a régulièrement augmenté depuis 20 ans pour atteindre de nos jours un régime de croisière qui semble se stabiliser aux environs de 2,5 millions de mètres cubes de grumes par an.

Les capacités de transformation de bois au Cameroun connaissent une augmentation depuis 1993-94 (*tableau 1.5*). En cinq ans, 28 nouvelles usines ont été construites pour une capacité de transformation de 1,15 million de m³. En outre, 9 des 38 usines existantes en 1993-94 ont fait l'objet de rachats avec modernisation (augmentation de capacité de 320 000 m³). Ainsi, en cinq ans, la capacité de transformation a plus que doublé, passant de 1,20 à 2,67 millions de m³.

Tableau 1.5 : Augmentation de la transformation du bois au Cameroun

Année fiscale	1993 /94	1998/99	1999/2000
Volume transformé (millions de m ³ de grumes)	1,00	1,83	2,32
Capacité de transformation (millions de m ³ de grumes)	1,20	2,22	2,68
Nombre d'usines en activité	38	51	66

Source : l'industrialisation de la filière bois au Cameroun entre 1994 et 1998 (Carret 1999)

Comme le montre le *tableau 1.5* le volume de grumes est en augmentation ainsi que le nombre d'usines de transformation. Ceci conduit à une augmentation de la quantité de sciure de bois produite au Cameroun depuis 1993.

L'estimation de la quantité de sciure de bois est possible si on connaît le taux de rendement dans les chaînes de production. La transformation du bois génère une grande quantité de résidus dont les propriétés physico-chimiques et énergétiques sont très diversifiées. On distingue dans ce secteur d'activité deux grands groupes d'industries : celle de la première transformation, qui travaille à partir des grumes ou de bois ronds, et celle de la seconde transformation qui utilise les bois déjà usinés.

- Résidus de l'industrie de la première transformation

Ces industries assurent le débit des grumes ou l'usinage des bois ronds. Le *tableau 1.6* présente le taux de résidus générés par la première transformation.

Tableau 1.6 : Quantité de résidus générés par l'industrie de première transformation (Carre et al. 1992)

Type de résidus	Pourcentage du volume initial (%)
Sciage écorces	7 à 15
Dosses et délignures	25 à 40
Sciure	7 à 12
Mise à dimension des grumes	4 à 12
Tranchage écorce	10 à 11
contre-plaqué ; Noyaux de déroulage	4 à 5
Résidus de placage humide	24
Résidus de placage sec	8 à 9
Poussières de ponçage, sciure	4 à 5
Pointes, mise à dimension	15 à 20

- Résidus de l'industrie de la seconde transformation

Ce sont les industries qui utilisent les assortissants de bois ayant déjà subi une première transformation. Elles sont encore peu développées. On peut estimer à quelques millions de mètre cube par an, la production des produits élaborés mis aujourd'hui sur le marché.

Les zones et les localités d'implantation des sociétés qui exploitent du bois au Cameroun sont présentées sur la *figure 1.5* (Carret, 1999). Trois types de transformation figurent sur la carte : le sciage (étoile), le sciage et la menuiserie (rectangle), et le déroulage, le tranchage et le contre plaqué (cylindre).

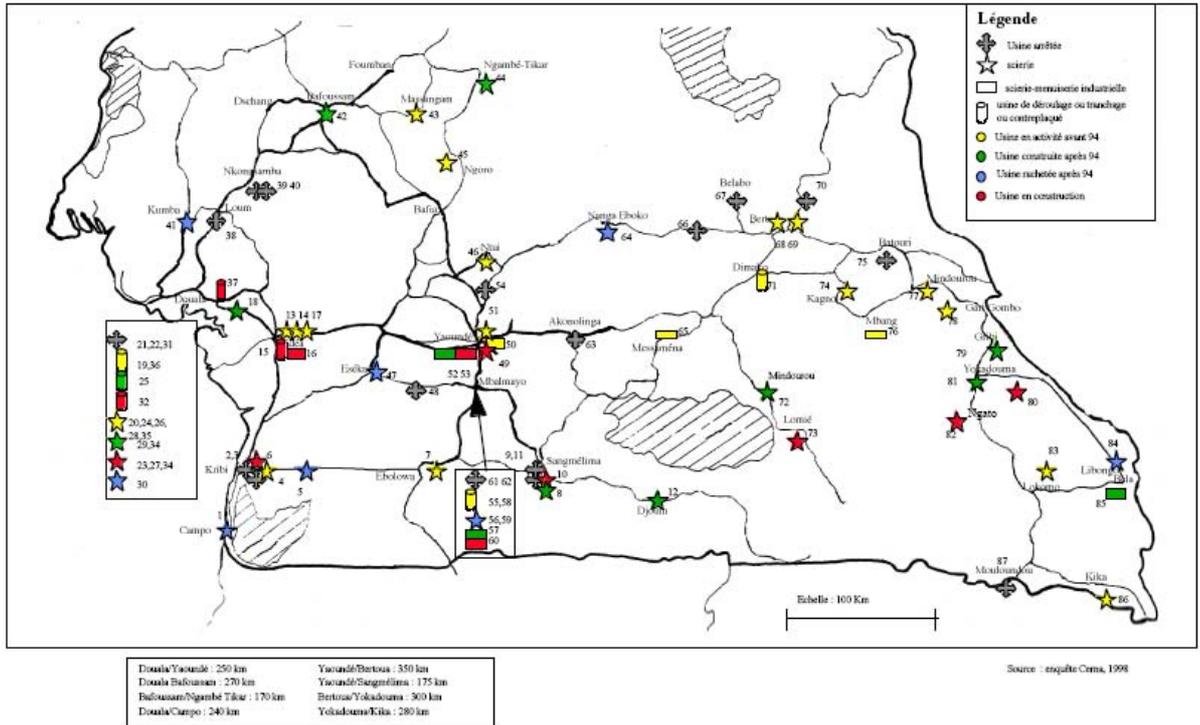


Figure 1.5 : Localisation des usines de transformation de bois au Cameroun

Sur la figure 1.6 est présentée l'évolution des exportations du bois au Cameroun. On peut y constater que, depuis 1999, la quantité de bois scié sur place augmente au détriment du bois brut avec pour conséquence l'augmentation de la quantité de sciure de bois produite.

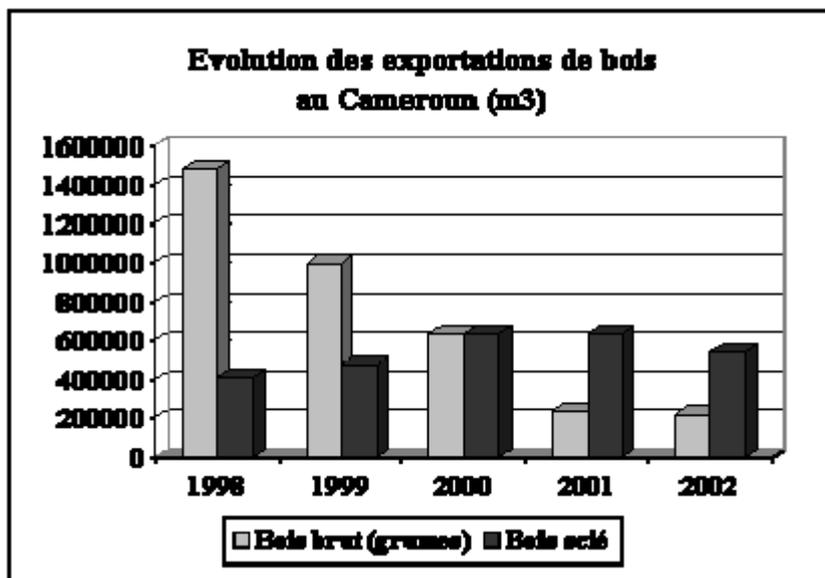


Figure 1.6 : Evolution des exportations du bois au Cameroun.

Le tableau 1.7 présente les activités de quelques usines de transformation de bois au Cameroun. La quantité de sciure générée par ces usines est calculée à partir du taux de production des résidus du tableau 1.6. Si on prend en compte le taux de production de résidus de la seconde transformation on devrait obtenir une plus grande quantité de sciure de bois.

Tableau 1.7 : Activités de quelques unités de transformations de bois au Cameroun

Usine	Activités	Essences transformées	Capacité de production annuelle	Quantité de sciure annuelle estimée
SFID M'bang	Sciage Séchage Aboutage parqueterie	Ayous Sapeli Iroko Tali Mbabi Doussie	120 000 m ³	12 000 m ³
SID Djoum	Sciage	Iroko Sapelli Movingui Bosse Tali	50 000 m ³	5 000 m ³
SFID Dimako	contre-plaqués Placage	Ayous Sapelli Lotofa Frake	50 000 m ³	6 000 m ³

L'analyse statistique a montré qu'il existe des différences importantes des caractéristiques de la transformation en fonction du type de transformation choisi, c'est-à-dire selon que l'usine est une scierie simple, une scierie avec séchoir, une scierie avec un atelier de menuiserie industriel, une usine de déroulage/contre plaqué ou une usine de tranchage. Il apparaît que le nombre de transformations de scieries avec séchoir, de scieries intégrées avec à un atelier de menuiserie industrielle et de scieries de déroulage est en augmentation sensible et devrait s'amplifier dans les années à venir en raison de l'existence de nombreux nouveaux projets. Il est par conséquent probable que la quantité de sciure de bois générée augmente dans les années à venir.

Si la tendance à l'accélération de l'investissement se poursuivait, le principal problème consisterait à réguler et à orienter le développement de l'industrie de transformation au Cameroun de manière à ce qu'il soit compatible avec la gestion durable et l'aménagement des forêts. Il faut en effet éviter qu'une surcapacité industrielle entraîne une surexploitation de la forêt et épuise ainsi une matière première lentement renouvelable.

De même, si la tendance à construire des usines sommaires se poursuivait, il pourrait se poser aussi un sérieux problème d'adéquation entre la qualité de la matière première disponible sur le marché intérieur camerounais et la qualité de la transformation locale, avec comme conséquence une mauvaise valorisation industrielle de la forêt camerounaise.

1. 4- Production du ciment au Cameroun

Le ciment est produit au Cameroun par la société CIMENCAM installée au Cameroun depuis 30 ans, et qui est le fournisseur des ciments en Afrique Centrale. CIMENCAM assure la fourniture régulière du Cameroun à partir de 2 usines (Bonaberi dans le littoral et Figuil dans la région nord du pays). CIMENCAM met à la disposition des consommateurs une gamme de 4 produits à savoir :

- **Le CPJ 35**, ciment conçu pour les principaux besoins de maçonnerie courante : parpaings, enduits, mortiers, bétons de propreté, de fondation, chapes, dallages.

- **Le CPJ 45**, ciment pour les travaux de génie civil appelant des résistances élevées : béton armé, béton de fondation, béton routier, préfabriqués, chapes, dallages, etc...
- **Le CPA 50**, ciment à très haute résistance et à durcissement rapide pour tous les préfabriqués, bétons précontraint, armé, de fondation, de semelle, etc...
- **Le CPA 45**, ciment pour les travaux de génie civil et en milieux agressifs : bétons armés, fondation, routier, précontraint, préfabriqués, chapes, dallages, etc...

Les résistances mécaniques à la compression des différents types de ciment produit au Cameroun varient entre 15 et 25 MPa pour deux jours, entre 39 et 58 MPa pour 28 jours comme on peut le constater dans le *tableau 1.8*.

Tableau 1.8 : Résistance à la compression des différents types de ciment produits au Cameroun.

Type de ciment		Résistance mécanique à la compression (MPa)	
		Norme	CIMENCAM
Le CPJ 35	à deux jours	-	15
	à 28 jours	32,5	39
Le CPJ 45	à deux jours	-	23
	à 28 jours	42,5	50
Le CPA 45	à deux jours	-	25
	à 28 jours	42,5	52
Le CPA 50	à deux jours	-	25
	à 28 jours	52,5	58

Source : <http://www.cameroun-plus.com/>

1. 5-Stabilisation des briques de terre

Suivant l'usage que l'on va faire des briques, il peut être utile, voire nécessaire de les stabiliser. Une brique de terre comprimée non stabilisée a de très bonnes propriétés d'échanges thermiques et hygrométriques et une résistance suffisante à la compression pour pouvoir être utilisée telle quelle dans la construction. Dans les régions très pluvieuses, il est nécessaire de stabiliser les briques de terres comprimées (BTC) : l'humidité contenue dans les briques entraîne leur émiettement.

Selon Remillon cité par Ottou (1987), on distingue deux processus de latérisation, correspondant aux deux zones climatiques en Afrique : la zone tropicale humide et la zone tropicale sèche. La composition des latérites est donnée par le *tableau 8* ci-dessous.

Tableau 1.8 : Composition de la latérite

Oxydes de fer	Oxydes d'aluminium	Minéraux argileux
goethite	gibbsite	kaolinite
limonite	boenmite	halloysite
hermatite		illite

La stabilisation est un ensemble de procédés physiques ou chimiques visant à améliorer les caractéristiques d'une brique de terre, en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité. Elle doit permettre :

- de réduire le volume des vides entre les particules solides
- de colmater les vides que l'on peut supprimer
- de créer des liens ou d'améliorer les liaisons existant entre les particules (résistances mécaniques)

L'amélioration de ces caractéristiques doit garder un caractère irréversible.

1.5.1-Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique améliore la brique de terre par la modification de sa densité naturelle. Il s'agit du compactage qui consiste essentiellement en une réduction de la porosité du matériau par resserrement des particules. Les effets d'un compactage effectué dans de bonnes conditions, se traduisent par une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. Les résistances mécaniques initiales et à long terme augmentent. Le compactage à lui seul permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mise au contact de l'eau, la brique redevient plastique et ne résiste plus du tout à la compression. L'immersion d'une brique de terre comprimée (BTC) dans un seau d'eau, donne le lendemain un tas de boue au fond du seau. Si les BTC sont protégées des intempéries (débords de toiture importants, protections contre le rejaillissement, soubassements suffisamment élevés, drainage en pied de mur), il n'est pas nécessaire de stabiliser. Ce qui n'est pas toujours le cas dans les zones concernées par cette étude.

1.5.2-Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les propriétés d'une brique de terre par l'intermédiaire de certains adjuvants. Afin de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de produits (liants hydrauliques par exemple), rendant les sols traités moins hydrophiles. L'adjonction du ciment qui est un liant hydraulique permet de lier les grains de sable tout en stabilisant l'argile de terre. On obtient ainsi une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la sensibilité à l'eau. Il faudra veiller à ce que l'eau de gâchage ne contienne ni de matières organiques, ni de sulfates. D'après Remillon cité par Ottou (1987), la technique anglaise estime que tous les sols sont utilisables, sauf ceux dont la nature est trop plastique, c'est-à-dire ceux dont l'indice de plasticité est supérieur à 20% et ceux contenant des sulfates nuisibles au ciment ou des matières organiques.

1.5.3- Stabilisation physique

La stabilisation physique modifie les propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Le mélange obtenu conduit selon le cas, soit à diminuer l'indice de plasticité de matériau de base, soit à lui conférer une certaine cohésion. Sikali cité par Ottou (1987) a étudié la stabilisation granulaire d'une latérite par ajout de gravillons concassés. Il a constaté que pour un pourcentage optimum du matériau d'apport, la portance du matériau étudié s'améliore considérablement.

1. 5.4- Stabilisation au ciment

Lors de la fabrication des BTS, il faut tenir compte du fait que le ciment a besoin d'eau pour faire sa prise (matériau hydraulique). Pour que le ciment assure son rôle de stabilisant, il faut un minimum de 3 à 4 % en poids de ciment par rapport au poids de la terre utilisée, sinon

il n'y pas de assez de liant. Ce minimum vaut pour un ciment de bonne qualité : suivant les qualités du ciment utilisé, ce pourcentage peut monter à plus de 10 %. Plus la terre est composée d'éléments fins, plus il faudra de ciment pour lier les éléments entre eux. Dans le cas où il est difficile de se procurer du ciment, il est moins coûteux d'avoir une terre contenant des éléments plus gros car nécessitant moins de ciment pour un même degré de stabilisation (tout en restant dans les proportions et dimensions des éléments d'une terre propre à fabriquer des BTC). Pour des constructions devant résister à l'eau de pluie, il faut monter le pourcentage de ciment à 10%. La stabilisation améliore la résistance à la compression et la tenue des angles des briques à l'abrasion et aux chocs.

1.5.5- Stabilisation par cuisson

Les briques sont issues d'un mélange de terre et d'eau, dans lequel on ajoute, pour certains modèles isolants, des grains combustibles, tels que la sciure de bois. Lors de la cuisson, dans des fours au gaz naturel, la sciure se consume en économisant l'énergie du four et disparaît en créant de petites bulles d'air qui améliorent l'isolation thermique. La brique de terre cuite, est un matériau qui permet d'évacuer efficacement l'humidité vers l'extérieur. Cette maîtrise essentielle de l'hygrométrie et de la ventilation est un avantage que possède la terre cuite. Une maison en brique de terre cuite est un habitat bioclimatique qui protège les occupants du bruit, des variations climatiques, de l'humidité, de l'incendie. Elle nécessite par contre de d'énergie pour la cuisson et par conséquent coûte plus cher que la brique de terre stabilisée au ciment et sa production participe à la déforestation.

2. METHODES DE MESURE DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES

Chapitre 2

LES METHODES DE MESURE DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES

Sommaire

Introduction	24
2.1–Les principales méthodes de mesure des propriétés thermophysiques	25
2.1.1-Les méthodes en régime permanent.....	26
2.1.1.1-méthode de la plaque chaude gardée.	26
2.1.1.2-Méthode des boîtes	27
2.1.2-Les méthodes en régime transitoire	29
2.1.2.1-Méthode de la plaque chaude avec excitation sinusoïdale.....	29
2.1.2.2-Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud	32
2.1.2.3-Mesure de l'effusivité thermique par la méthode du plan chaud.....	34
2.1.2.4-Mesure simultanée de la conductivité et de l'effusivité.....	36
2.1.2.5-Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash	39
2.1.3-Méthode de mesure de la chaleur spécifique	45
2.1.3.1-Principe de la méthode.....	45
2.1.3.2-Détermination de la valeur en eau du calorimètre	46
2.1.3.4-Détermination de la chaleur massique du matériau humide	46
2.1.4-Conclusion	47
2.2–Les principales méthodes de mesure des propriétés hygroscopiques	47
2.2.1-Méthode gravimétrique	47
2.2.1.1-Méthode des solutions salines concentrées :.....	47
2.2.1.2-Méthode des solutions d'acide sulfurique :	48
2.2.2-Méthode dynamique.....	48
2.2.3-Méthodes de l'enceinte régulée en température et en humidité.....	50
2.2.4-Conclusion	50
2.3-Influence de la porosité sur les propriétés thermophysiques	50
2.3.1-Rappels théoriques sur les milieux poreux	50
2.3.2-Différents types de porosités.....	52
2.3.2-Mécanismes de transfert de chaleur dans les matériaux poreux	53
2.3.3-Modélisation des transferts de chaleur dans les matériaux poreux.....	53
2.3.4-Influence de l'humidité sur les propriétés thermophysiques des matériaux	56
2.3.5-Modélisation des isothermes d'adsorption/désorption.....	57

Introduction

La fabrication de la plupart des matériaux de bâtiment consomme beaucoup d'énergie provoquant ainsi des effets néfastes pour l'environnement. Cependant, les matériaux naturels permettent d'éviter une grande partie de ces problèmes liés à leur fabrication et contribuent à la création d'une ambiance saine à l'intérieure d'une maison. L'estimation des propriétés thermophysiques des matériaux de construction joue un rôle primordial dans un grand nombre de domaines scientifiques et industriels. Notre choix s'est porté sur la terre qui connaît actuellement un regain d'intérêt suite à la crise énergétique et à celle du logement. La terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction sans une grande dépense d'énergie. Dans la plupart des pays en voie de développement et en particulier au Cameroun, le revenu d'une majorité d'habitants ne leur permet de construire que des logements sociaux économiques. La terre est un matériau naturel, disponible en abondance ; il n'implique souvent ni achat, ni transport, ni transformation importante, de plus elle est facilement recyclable. Contrairement aux matériaux et produits semi-finis dont la fabrication industrielle exige énormément d'énergie, le matériau terre nécessite très peu d'énergie pour être produit (la fabrication d'un mètre cube de béton requiert 400 à 800 kWh Houben, 1997). Les avantages de la terre naturelle utilisée comme matériau de construction sont connus. Les matériaux naturels comme la terre ne requièrent que de 5 à 10 kWh par mètre cube. Toutefois les performances des briques de terre en terme d'isolation thermique des bâtiments restent encore peu connues. Nous entendons par isolant thermique un matériau, qui par sa composition ou sa nature ralentit le transfert de l'énergie calorifique. Dans le bâtiment l'appellation isolant thermique est réservée aux produits dont la résistance thermique, aptitude d'un matériau à ralentir la propagation de l'énergie qui le traverse, est inférieure à $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ (Pompeo n°178) et dont la conductivité thermique est au plus égale à $0,065 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. La détermination des propriétés thermophysiques de ces briques pourrait être d'une grande utilité pour l'évaluation de leur efficacité dans l'isolation thermique des bâtiments. La conductivité thermique des briques dépend de la nature du sol. Adam et al. (1995) ont obtenu des valeurs comprises entre 0,38 et 0,88 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, alors que les valeurs trouvées par Lamkharouet et al. (1991), pour les briques stabilisées au ciment, varient entre 0,71 et 1,53 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Les caractéristiques thermophysiques des matériaux représentent la faculté qu'a la chaleur de se propager dans un corps ou d'y être stockée. Pour introduire les caractéristiques thermophysiques internes des matériaux, nous allons rappeler quelques notions de base sur la propagation de la chaleur dans les solides et nous exposerons ensuite quelques méthodologies de mesure qui permettent d'obtenir les coefficients.

Les grandeurs thermophysiques que nous allons examiner pour les briques de terre stabilisées étudiées sont :

- la conductivité thermique
- la diffusivité thermique
- la chaleur massique

• La conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermophysiques la plus recherchée pour les matériaux de construction. En régime permanent, dans le cas le plus simple de l'écoulement unidimensionnel de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur e et de températures uniformes T_1 et T_2 , ce flux de chaleur Φ en W s'exprime sous la forme :

$$\Phi = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2) S \quad \text{où } S \text{ est l'aire des faces latérales en m}^2$$

La conductivité thermique mesure donc la faculté qu'a la chaleur de traverser plus ou moins aisément un corps en régime permanent. Elle dépend de la nature du corps et de sa température. Le processus de transfert de l'énergie thermique est un phénomène statistique. En réalité, l'énergie n'entre pas simplement par un bout pour atteindre l'autre bout en suivant une ligne droite, mais l'énergie diffuse dans l'échantillon en se transmettant par des collisions successives. C'est la nature statistique du processus qui introduit le gradient thermique et un libre parcours moyen dans l'expression du flux de chaleur. Dans le cas de l'isolation thermique des bâtiments, il s'agit de minimiser ce transfert.

• Diffusivité thermique

Lorsque la température du milieu est fonction du temps et que la conductivité dépend de la température et des coordonnées spatiales, l'équation de Fourier s'écrit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(\lambda \cdot \vec{\text{grad}} T \right)$$

Lorsque les paramètres thermiques sont indépendants de la température, la relation

ci-dessus devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T \quad \text{avec,} \quad \Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Cette relation fait apparaître le rapport $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ qui représente la diffusivité thermique du

milieu. On peut donc écrire : $\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T$

La diffusivité thermique, lorsqu'elle est définie est donc liée à la conductivité thermique, à la chaleur massique et à la masse volumique. Elle caractérise la vitesse de propagation d'une onde dans un corps et intéresse tous les problèmes d'inertie thermique des matériaux.

• Chaleur massique

L'équation calorimétrique classique : $Q = m C_p (T_2 - T_1)$ montre que la quantité de chaleur absorbée par un corps de masse m quand sa température augmente de T_1 à T_2 est proportionnelle à la chaleur massique C_p du solide considéré. Pratiquement, la chaleur massique C_p d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a besoin pour que la température d'une unité de sa masse s'élève d'un degré. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur massique pour tous les calculs de stockage de chaleur ou de transport de chaleur. D'autre part, la chaleur massique intervenant dans la diffusivité thermique α , sa mesure est souvent nécessaire.

2.1–Les principales méthodes de mesure des propriétés thermophysiques

La conductivité thermique λ , la chaleur spécifique C_p , l'effusivité thermique E et la diffusivité thermique a sont des paramètres thermophysiques importants dans l'étude des transferts de chaleur dans les matériaux ; c'est ainsi qu'ils sont essentiels au niveau des procédés de séchage, de chauffage, de refroidissement et en thermique du bâtiment.

Ces paramètres peuvent être mesurés par diverses méthodes, mais la connaissance de deux quelconques d'entre eux entraîne la détermination des autres à l'aide des relations :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad \text{et} \quad E = \sqrt{\rho C_p \lambda} \quad (2.1)$$

La mesure de la conductivité thermique est d'une grande importance quand on désire étudier les échanges de chaleur dans un système. Un grand nombre de méthodes ont été déjà utilisées pour déterminer la conductivité thermique de différents matériaux. Quelques-unes d'entre elles développent des théories basées sur les équations de conduction de la chaleur.

Les méthodes de mesure de la conductivité thermique peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes à état stable et les méthodes à état transitoires.

2.1.1-Les méthodes en régime permanent

Ces méthodes nécessitent un long temps de manipulation et la variation de l'humidité au cours du temps entraîne ainsi des résultats entachés d'erreurs. Cependant parmi celles-ci, la méthode de Lee (Avery et Ingran, 1976) donne des résultats satisfaisants, mais elle exige plus de temps surtout pour des matériaux à faible conductivité thermique. Les mesures statiques supposent l'utilisation des équations de Fourier dans l'état stationnaire. Il est nécessaire de déterminer la densité de flux de chaleur et le gradient de température le long de la normale à l'échantillon. Le régime permanent permet d'obtenir des mesures d'une grande précision mais le temps qu'il faut pour atteindre l'équilibre peut constituer un long processus si la conductivité est très faible.

2.1.1.1-méthode de la plaque chaude gardée.

Le principe du montage expérimental consiste à maintenir une différence de température ΔT entre deux plaques, A et B, planes, parallèles et portées respectivement aux températures constantes T_A et T_B . Un échantillon du matériau à étudier, solide faiblement conducteur, est placé entre les deux plaques (figure 2.1). La méthode de la plaque chaude gardée a été développée pour la mesure de faibles conductivités thermiques (Gustafson et al 1981; Pradhan et al 1991).

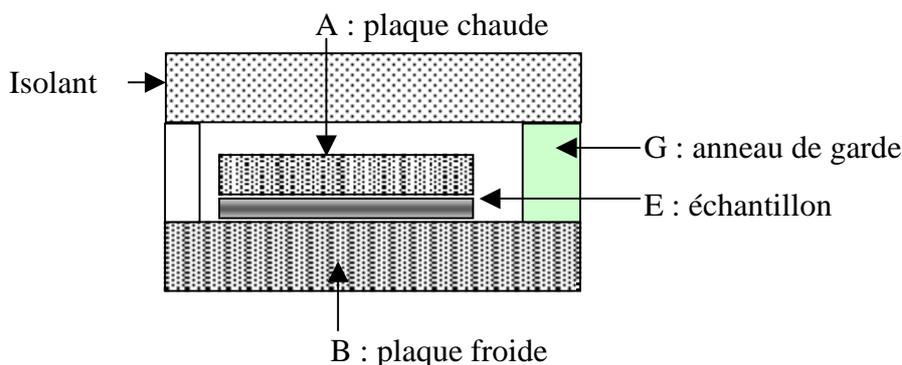


Figure 2.1 : Schéma de principe de mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée.

Soit e l'épaisseur de l'échantillon et ϕ le flux thermique en régime stationnaire par unité de surface, transféré d'une plaque à l'autre. La conductivité thermique λ du matériau est donnée par :

$$\lambda = \frac{\phi e}{\Delta T} \quad (2.2)$$

avec $\Delta T = T_A - T_B$.

La résistance thermique est d'autant plus élevée que la conductivité λ est petite.

Afin d'éviter les phénomènes de bord, la plaque A est entourée d'un anneau porté à la même température T_A . L'intervalle qui sépare l'anneau de garde de la plaque A est suffisamment petit pour éviter une perturbation trop importante du flux thermique sur les bords de la plaque. La précision de la mesure dépendra de celles des quantités figurant dans l'équation (2.2) ainsi que des corrections à apporter à cette relation qui néglige plusieurs phénomènes thermiques. Pour les matériaux nécessitant des échantillons représentatifs de surface relativement importante, tels que les isolants utilisés dans le bâtiment, cette technique est le plus souvent utilisée.

La conductivité thermique des matériaux sous forme de plaques peut être mesurée par la méthode fluxmétrique, dite secondaire ou relative, ou par la méthode absolue, autrement appelée « de la plaque chaude gardée », dont le principe est défini par les normes ISO 8301 et 8302.

Cette méthode permet d'obtenir la précision maximale de mesure de la conductivité thermique ($\pm 1\%$), mais nécessite un temps de mesure de 1 à 3 jours par essai et le montage technique est délicat.

Le principe de la méthode du flux radial est celui de la plaque chaude gardée mais il est utilisé pour la mesure de la conductivité de matériaux granulaires ou pulvérulents. Le matériau est placé entre deux cylindres, à bases circulaires, concentriques de rayons r_1 et r_2 et de hauteur h . Le flux de chaleur est créé par effet Joule dans le cylindre intérieur ; le cylindre extérieur est refroidi par une circulation d'eau. En régime permanent on a :

$$\lambda = \frac{q}{2\pi \Delta T} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.3)$$

ΔT : différence de température entre les deux faces.

Comme pour la méthode précédente, le temps d'expérimentation est long et le montage technique délicat.

La méthode fluxmétrique permet des temps de mesure beaucoup plus courts (15 minutes à deux heures) pour une précision allant de $\pm 3\%$ à $\pm 5\%$ selon les performances des appareils présents sur le marché (A.L.B. instrumentation 1998).

2.1.1.2-Méthode des boîtes

Le principe de cette méthode, mise au point par le Laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'Université Claude Bernard de Lyon, est schématisé sur la *figure 2.2*.

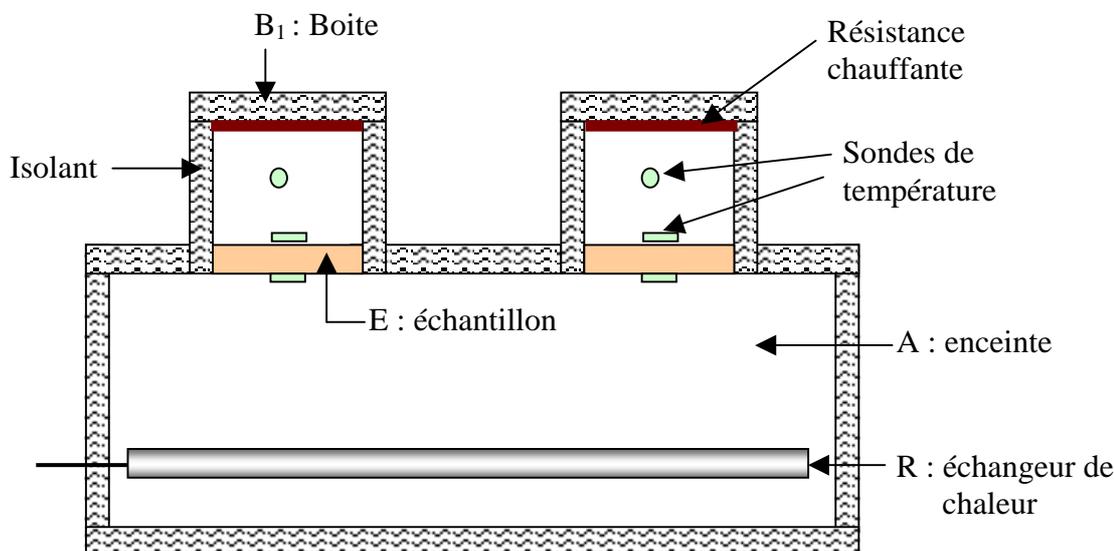


Figure 2.2 : Coupe du dispositif "des boîtes"

- Le volume A est maintenu à une température plus basse que les deux boîtes grâce à un échangeur basse température R relié à un cryostat. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E.
- En régime permanent, les mesures du flux de chaleur émis par C et des températures sur les faces supérieure et inférieure de E permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon.

Le système de chauffage est maintenu pendant une certaine durée. On observe l'évolution des températures T_C et T_F des faces chaude et froide de l'échantillon.

Lorsque ces températures se stabilisent (variation de l'ordre du $1/10^\circ$ de degré en une heure) on considère que l'on a atteint le régime permanent. Ceci intervient généralement 4 à 7 heures après le montage de l'échantillon, si le système de refroidissement n'a pas été arrêté après l'essai précédent. A ce moment, le bilan énergétique du "local boîte" permet de considérer les trois flux suivants :

- l'effet Joule produit par l'élément chauffant C :

$$\Phi_J = \frac{V^2}{R} \quad (2.4)$$

- les déperditions thermiques à travers la boîte B :

$$\Phi_d = C_1(T_B - T_{am}) \quad (2.5)$$

- et le flux conductif à travers l'échantillon :

$$\Phi_C = \frac{\lambda_e S}{e}(T_C - T_F) \quad (2.6)$$

Le flux Φ_J compensant les déperditions Φ_d et la conduction Φ_C ($\Phi_J = \Phi_d + \Phi_C$), les équations (3), (4) et (5) conduisent à la conductivité thermique sous la forme :

$$\lambda = \frac{e}{S(T_C - T_F)} \left[\frac{V^2}{R} - C_1(T_B - T_A) \right] \quad (2.7)$$

2.1.2-Les méthodes en régime transitoire

Ces méthodes sont le plus souvent utilisées pour des matériaux biologiques qui sont généralement hétérogènes et ont un taux d'humidité élevé. La méthode du Fil Chaud est l'une des méthodes à état transitoire la plus utilisée. La méthode transitoire suppose l'équation différentielle complète de l'écoulement de chaleur (Carslaw et Jagger 1959). La méthode dynamique ne donne pas en général une grande précision.

Nous présentons ci-dessous quelques méthodes de mesure de la conductivité thermique dont nous exposons rapidement les principes.

Nous allons, en nous appuyant sur les travaux de Jannot (2003), présenter les différentes méthodes de mesure des propriétés thermophysiques par le fil chaud et le plan chaud.

2.1.2.1-Méthode de la plaque chaude avec excitation sinusoïdale.

Cette méthode est basée sur le système à plaque chaude encore appelée plan chaud. La *figure 2.3* représente le schéma de principe de la méthode. Le principe de cette méthode consiste à générer un signal thermique périodique sur la face inférieure de la paire d'échantillons, tout en maintenant constante la température de la face supérieure, à l'aide d'un dispositif de refroidissement à plaque d'eau froide. Ce signal est produit par un flux de chaleur intermittent à l'intérieur de la plaque chaude. Lorsque le régime périodique est établi, les signaux de température et de flux de chaleur peuvent être décomposés en série de Fourier, donnant ainsi des signaux sinusoïdaux de même que celle du générateur électrique. Ces termes sinusoïdaux nous donnent la diffusivité et l'effusivité thermique. Il est à noter que le choix de la période du signal dépend de l'épaisseur et de la nature du matériau à étudier. En général, ce choix s'opère de façon à ce que l'hypothèse de température constante de la face supérieure de la paire d'échantillons soit vérifiée, tout en évitant d'avoir une amplitude du signal négligeable. Pour un matériau donné, la période du signal croît avec l'épaisseur.

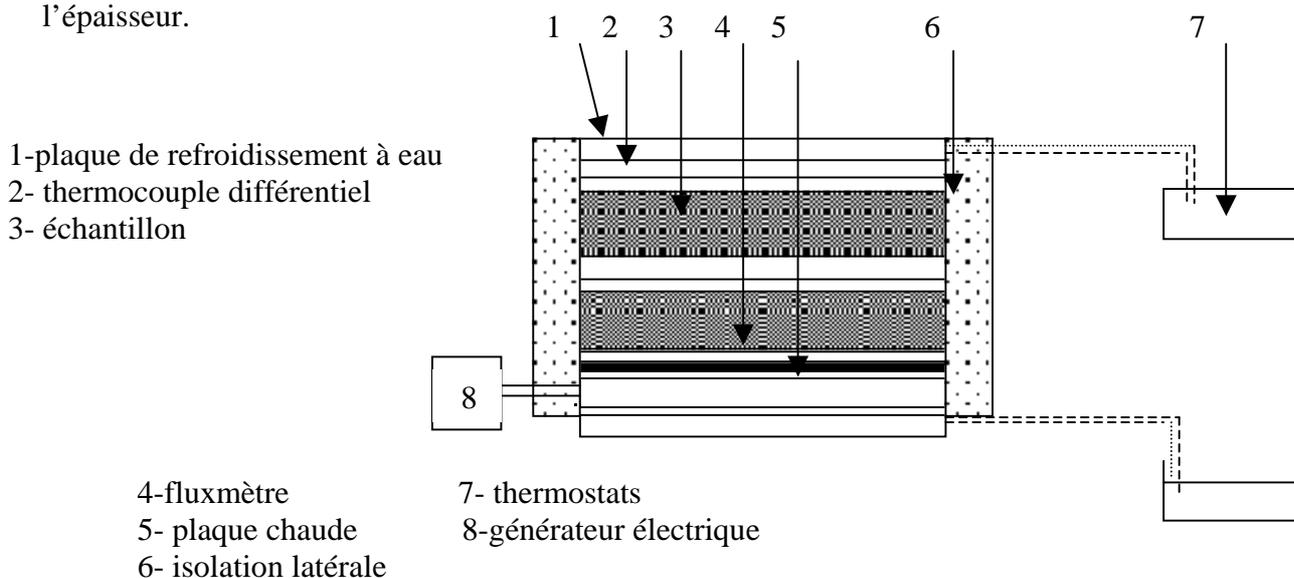
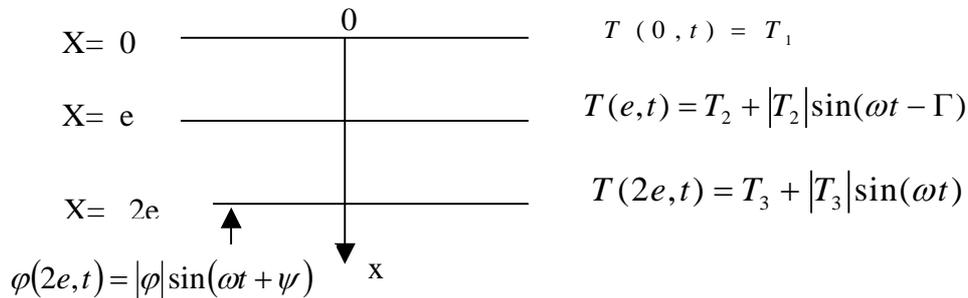


Figure 2.3 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique par la méthode des signaux

• **Modélisation mathématique**



Le transfert de chaleur est supposé unidirectionnel en raison de la symétrie de l'échantillon et de l'isolation latérale. Ce qui permet d'écrire l'équation de Laplace suivante :

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}$$

avec les conditions aux limites : $T(0,t) = T_1 = \text{constante}$

$$T(2e,t) = T_3 + |T_3| \sin(\omega t)$$

La température à l'interface s'écrit :

$$T(e,t) = A |T_2| \sin(\omega t - \Gamma) \quad (2.8)$$

T_1 , T_2 et T_3 sont les températures aux points ($x=0$, $x=e$ et $x=2e$) respectivement.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad T \text{ étant la période et } t \text{ le temps.}$$

Le flux de chaleur appliqué sur la face inférieure s'écrit :

$$\varphi(2e,t) = |\varphi| \sin(\omega t + \psi) \quad (2.9)$$

En posant
$$Z = 2e \left(\frac{\omega}{2\alpha} \right)^{1/2},$$

on obtient :

$$A(z) = \left[\frac{1}{2(\operatorname{ch}z + \operatorname{cos}z)} \right]^{1/2}$$

$$\Gamma(z) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg}z}{\operatorname{th}z} \right) - \operatorname{artg} \left(\frac{\operatorname{tg} \left(\frac{z}{2} \right)}{\operatorname{th} \left(\frac{z}{2} \right)} \right)$$

$$|\varphi| = |T_3| E^{1/2} \left[\frac{\operatorname{ch}2z + \cos2z}{\operatorname{ch}2z - \cos2z} \right]^{1/2}$$

$$\psi(z) = \frac{\pi}{4} + \operatorname{artg}[(\operatorname{tg}z)(\operatorname{th}z)] - \operatorname{artg}\left(\frac{\operatorname{tg}z}{\operatorname{th}z}\right)$$

- Mesure de la diffusivité thermique a

L'analyse harmonique des signaux $T(2e, t)$ et $T(e, t)$ donne les valeurs de A et Γ . Les expressions de $A(z)$ et $\Gamma(z)$ permettent d'obtenir les valeurs de z et finalement on en déduit la diffusivité grâce à la relation :

$$a = \frac{(2e)^2 \pi}{z^2 T} \quad (2.10)$$

- Mesure de l'effusivité thermique E

Le fluxmètre est considéré comme une mince couche homogène. L'analyse harmonique de $|\varphi|, |T_3|, z$ permet de déterminer l'effusivité thermique E , connaissant $|\varphi|, |T_3|, z$ et ω , à savoir :

$$E = \frac{|\varphi|}{|T_3| \omega^{1/2}} \beta(z) \quad (2.11)$$

avec

$$\beta(z) = \left[\frac{\operatorname{ch}2z - \cos2z}{\operatorname{ch}2z + \cos2z} \right]^{1/2}$$

Cette valeur de l'effusivité E devra être corrigée par la relation :

$$E_c = E * r$$

avec

$$r = \left(1 + \frac{\Omega^2}{4} - \Omega \sin \delta \right)^{1/2}$$

et

$$\Omega = \frac{\omega S' |T_3|}{S |\varphi|}, \text{ un paramètre adimensionnel.}$$

S' : capacité calorifique du fluxmètre ;

S : surface de la zone de mesure du fluxmètre ;

δ : différence de phase entre $T(2e, t)$ et le détecteur.

r est le rapport du flux de chaleur traversant l'échantillon au flux de chaleur traversant une couche équivalente homogène de fluxmètre.

L'ajout d'un deuxième fluxmètre permet de déterminer en plus des valeurs de l'effusivité thermique et de la diffusivité thermique, celle de la conductivité thermique.

2.1.2.2-Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud

• Principe de la méthode

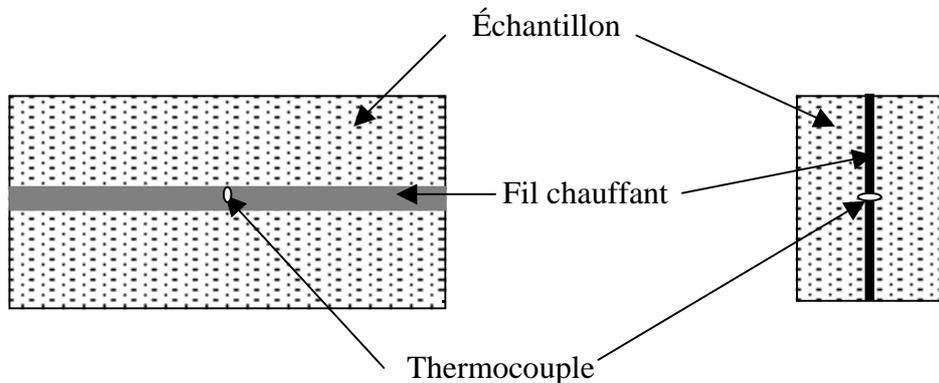


Figure 2.4 : Schéma de principe de la mesure de conductivité thermique par la méthode du fil chaud

Un flux de chaleur constant ($\varphi = 0$ si $t < t_0$; $\varphi = \varphi_0$ si $t > t_0$) est appliqué au fil chauffant. Un thermocouple nous permet de relever l'évolution au cours du temps de la température $T_0(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces c'est-à-dire lorsque l'hypothèse du milieu infini est valide, on peut supposer que le transfert dans l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. Une méthode d'estimation judicieusement choisie de façon à minimiser l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales nous permet d'évaluer la conductivité thermique λ , la capacitance thermique $(mc)_s$ de l'ensemble sonde + résistance chauffante et la résistance de contact R_c à l'interface sonde /échantillon.

• Modélisation du fil chaud

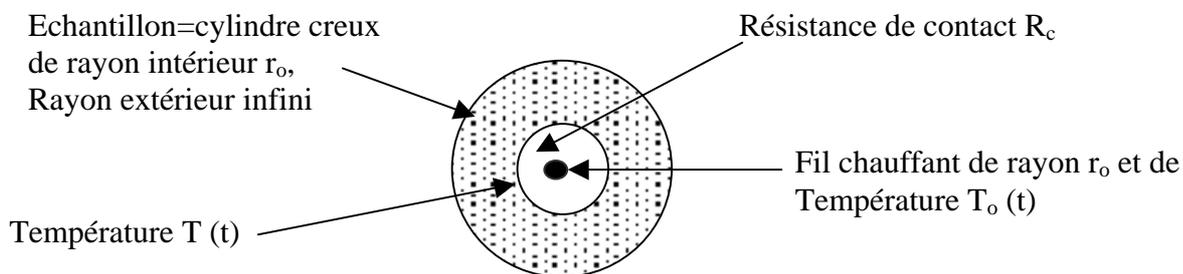


Figure 2.5 : Une vue en coupe du fil chaud et de l'échantillon.

La modélisation du système à l'aide du formalisme des quadripôles permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ \frac{\varphi_0}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2\pi\lambda L q} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} - \frac{1}{\rho c \pi r_0^2 L p} \\ \rho c \pi r_0^2 L p & \frac{qr_0}{2} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ 2\pi\lambda L q r_0 \frac{K_1(qr_0)}{K_0(qr_0)} \theta \end{bmatrix} \text{ avec } q = \sqrt{\frac{p}{a}}$$

où :

θ_0	Transformée de Laplace de la différence $T_0(t) - T_0(t=0)$
θ	Transformée de Laplace de la différence $T(t) - T_0(t=0)$
R_c	Résistance de contact à l'interface résistance chauffante/échantillon
c	Capacité calorifique du thermocouple résistance
λ	Conductivité thermique de l'échantillon
a	Diffusivité thermique de l'échantillon
p	Variable de Laplace
r_0	Rayon du fil chauffant
L	Longueur du fil chauffant
φ_0	Puissance dissipée dans la résistance chauffante
I_0, I_1, K_0, K_1	Fonctions de Bessel.

On en déduit θ_0 :

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0 A_0 + (A_0 R_c + B_0)/Z}{p C_0 + (C_0 R_c + D_0)/Z} \quad (2.12)$$

$$A_0 = 1 ; \quad B_0 = \frac{1}{2\pi\lambda L q r_0} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} - \frac{1}{\rho \pi r_0^2 p L} ;$$

$$C_0 = \rho \pi c r_0^2 p L \quad D_0 = \frac{qr_0}{2} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} ; \quad \frac{1}{Z} = 2\pi\lambda q L r_0 \frac{K_1(qr_0)}{K_0(qr_0)}$$

Les paramètres inconnus à déterminer sont la conductivité thermique λ de l'échantillon, la résistance thermique de contact R_c entre la sonde et l'échantillon et la capacité thermique (mc) de la sonde.

• Estimation simplifiée aux temps longs

En considérant r_0 petit (fil fin) et aux temps très longs $p \rightarrow 0$ on a les développements limités au voisinage de 0 suivants :

$$K_0(x) \cong -\ln(x), \quad K_1(x); \frac{1}{x},$$

$$I_0(x) \cong 1, \quad I_1(x); \frac{x}{2}$$

ce qui conduit à :

$$A_0 = 1 ; \quad B_0 = 0 ; \quad C_0 = \rho c \pi r_0^2 L p ; \quad D_0 = 1 ; \quad \frac{1}{Z} = -\frac{2\pi\lambda L}{\ln(qr_0)}$$

On en déduit :

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0}{p} \frac{Z + R_c}{\text{mcp}(R_c + Z) + 1} \approx \frac{\varphi_0}{p} (Z + R_c) \approx \frac{\varphi_0}{p} \left[-\frac{\ln\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{2\pi} + R_c \right] \approx \frac{\varphi_0}{p} \left[\frac{-\ln(p)}{4kL} - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{4kL} + R_c \right]$$

L'utilisation des tables de la transformée inverse, permet de calculer la température $T_0(t)$ aux temps longs :

$$T_0(t) - T_0(0) \approx \frac{\varphi_0}{2\pi\lambda L} \ln(t) + R_c \varphi_0 - \frac{\gamma \varphi_0}{2\pi\lambda L} - \frac{\varphi_0 \ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} \quad (2.13)$$

avec $\gamma = 0.57721$ la constante d'Euler.

On obtient finalement :

$$T_0(t) - T_0(0) \approx \frac{\varphi_0}{2\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left(R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{2\pi\lambda L} \right)$$

Le tracé de $T_0(t) - T_0(t=0)$ en fonction de $\ln(t)$ est une droite de pente $\frac{\varphi_0}{2\pi\lambda L}$

ce qui nous permet de déduire la conductivité thermique λ .

2.1.2.3-Mesure de l'effusivité thermique par la méthode du plan chaud

- Principe de la méthode

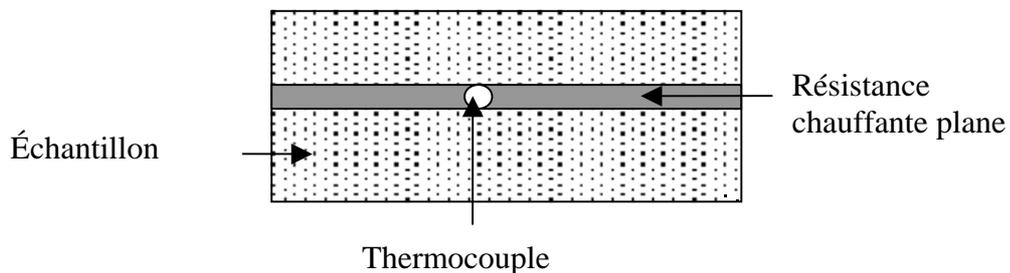


Figure 2.6 : Schéma du principe de la mesure de la conductivité thermique par la méthode du plan chaud

Un flux de chaleur constant ($\varphi = 0$ si $t < t_0$ et $\varphi = \varphi_0$ si $t > t_0$) est appliqué à la résistance chauffante et on relève l'évolution de la température $T_0(t)$ au centre de cette même résistance dans ou sur laquelle est placé un thermocouple. Nous supposons le transfert au centre de l'échantillon unidirectionnel lorsque la perturbation n'a pas encore atteint les autres faces (validité du milieu semi-infini). Une méthode d'estimation des paramètres judicieusement choisie permet d'évaluer à la fois l'effusivité thermique E , la capacitance thermique $(mc)_s$ de l'ensemble (sonde + résistance chauffante) et la résistance de contact R_c entre la sonde et l'échantillon. Le choix de la méthode d'estimation est fait de façon à minimiser l'écart entre les courbes $T_0(t)$ théoriques et expérimentales.

- **Modélisation du plan chaud a l'aide du formalisme des quadripôles.**

La modélisation du système à l'aide du formalisme des quadripôles permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ \frac{\varphi_0}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (mc)_s p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ ES\sqrt{p}\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta + R_c ES\sqrt{p}\theta \\ (mc)_s p\theta + [R_c(mc)_s p + 1]ES\sqrt{p}\theta \end{bmatrix}$$

où :

θ_0	Transformée de Laplace de la différence $T_0(t) - T_0(t=0)$
θ	Transformée de Laplace de la différence $T(t) - T_0(t=0)$
R_c	Résistance de contact à l'interface résistance chauffante/échantillon
m	Masse thermocouple + résistance chauffante
c	Capacité calorifique du thermocouple + résistance chauffante
E	Effusivité thermique de l'échantillon
p	Variable de Laplace
S	Surface de la résistance chauffante
φ_0	Puissance dissipée dans la résistance chauffante

on en déduit la transforme de Laplace θ_0 .

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0}{p} \frac{1 + R_c ES\sqrt{p}}{(mc)_s p + [R_c(mc)_s p + 1]ES\sqrt{p}} \quad (2.14)$$

Les paramètres inconnus à déterminer sont l'effusivité thermique, la résistance thermique de contact R_c entre la sonde et l'échantillon.

- **Estimation du temps pendant lequel l'hypothèse de milieu semi long est valide**

On se fixe un temps t arbitraire et on détermine l'évolution de la température $T_e(t)$ à une distance égale à l'épaisseur e . Si elle diffère de plus de 0.1°C de $T_e(t=0)$, on reprend les calculs sur un temps plus court jusqu'à ce que cette condition soit vérifiée. En utilisant le

formalisme des quadripôles et en supposant la résistance de contact R_c et la capacitance $(mc)_s$ nulles, on obtient :

$$T(e, t) = T(e, 0) + \frac{2\varphi_0}{\lambda} \sqrt{at} \operatorname{ierfc}\left(\frac{e}{2\sqrt{at}}\right) \quad (2.15)$$

où
$$\operatorname{ierfc}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) - u[1 - \operatorname{erf}(u)]$$

- **Estimation simplifiée au temps long**

Aux temps très longs ($p \rightarrow 0$), l'expression θ_0 devient :

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0}{ESp^{3/2}} + \frac{\varphi_0}{p} \left(R_c - \frac{(mc)_s}{(ES)^2} \right) \quad (2.16)$$

Sa transformée inverse donne :

$$T_0(t) - T_0(t=0) = \varphi_0 \left[R_c - \frac{(ms)_s}{(ES)^2} \right] + \frac{2\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (2.17)$$

La relation (1.21), montre que la graphe de $T_0(t) - T_0(t=0)$ en fonction de \sqrt{t} est une droite de pente $\frac{2\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}}$ ce qui permet de déterminer l'effusivité thermique E.

2.1.2.4-Mesure simultanée de la conductivité et de l'effusivité

Cette méthode développée au laboratoire TREFLE de l'ENSAM (Jannot et Meukam, 2004) permet de mesurer à la fois la conductivité thermique et l'effusivité thermique.

- **Principe de la méthode**

Une présentation simplifiée de la méthode du ruban chaud pourrait être la suivante :

- Exploiter aux temps courts un comportement de type plan chaud au centre de la sonde, lié à un flux de chaleur perpendiculaire au ruban ;
- Exploiter aux temps longs un comportement de type fil chaud quand le flux devient assimilable à un flux radial.

Le ruban chaud (*figure 2.6*) se présentera donc sous la même forme que le plan chaud, seules ses dimensions vont différer.

- **Modélisation du ruban chaud**

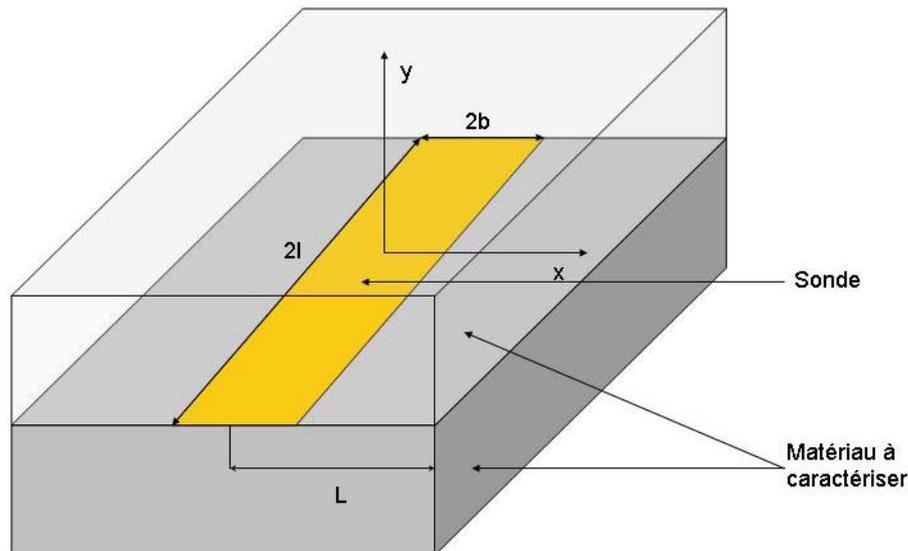


Figure 2.7 : Schématisation de la mesure simultanée de la conductivité et de l'effusivité avec le "ruban chaud"

L'élévation de température $\bar{T}_s(x, y, t)$ en un point de coordonnées (x, y) vérifie l'équation suivante pendant le temps t_2 où le transfert en ce point reste bidirectionnel (hypothèse du ruban infini) :

$$\frac{\partial^2 \bar{T}(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}(x, y, t)}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \bar{T}(x, y, t)}{\partial t} \quad (2.18)$$

Avec les conditions aux limites suivantes :

$$\text{En } y=0 : \quad -\lambda \frac{\partial \bar{T}(x, 0, t)}{\partial y} = -\phi \quad \text{si } x < b \quad \text{et} \quad -\lambda \frac{\partial \bar{T}(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad \text{si } x > b ;$$

$$\text{En } x=0 : \quad \frac{\partial \bar{T}(0, y, t)}{\partial x} = 0 \quad \text{par symétrie ;}$$

$$\text{En } x = L : \quad \bar{T}(L, y, t) = 0 \quad \text{hypothèse du milieu semi-infini selon } Ox ;$$

$$\text{En } y = e : \quad \bar{T}(x, e, t) = 0 \quad \text{hypothèse du milieu semi-infini selon } Oy.$$

En appliquant successivement une transformation de Laplace puis une transformation finie de Fourier en cosinus entre $y=0$ et $y=L$ à la relation (2.18), on obtient :

$$\frac{\partial^2 \theta(x, y, p)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, p)}{\partial y^2} = \frac{p}{a} \theta(x, y, p) \quad (2.19)$$

puis

$$\frac{\partial^2 \theta_c(n, y, p)}{\partial y^2} = \left(\frac{p}{a} + \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \right) \theta_c(n, y, p) \quad (2.20)$$

La solution générale de l'équation (1.24) s'écrit sous la forme :

$$\theta_c(n, y, p) = C_1 \cosh(q_n y) + C_2 \sinh(q_n y) \quad \text{avec} \quad q_n^2 = \frac{p}{a} + \frac{n^2 \pi^2}{L^2}$$

En utilisant le formalisme des quadripôles (Ladevie), on peut écrire sous forme matricielle au centre de la sonde considérée comme un système mince (pas de gradient thermique dans l'épaisseur) :

$$\begin{bmatrix} \theta_{cs}(n,0,p) \\ \Phi_{cs}(n,0,p) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ m_s c_s p & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Sonde}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Résistance de contact}} \underbrace{\begin{bmatrix} \theta_c(n,0,p) \\ \lambda q_n S \theta_c(n,0,p) \end{bmatrix}}_{\text{Milieu semi-infini}}$$

$$\text{On en déduit : } \theta_{cs}(n,0,p) = \frac{1 + \frac{\lambda}{h} q_n}{\frac{m_s c_s p}{S} \left(1 + \frac{\lambda}{h} q_n\right) + \lambda q_n} \frac{\sin(\alpha_n b)}{\alpha_n} \frac{\phi}{p} \quad (2.21)$$

$$\text{avec } q_n = \sqrt{\frac{p}{a} + \frac{n^2 \pi^2}{L^2}}, \quad \alpha_n = \frac{n\pi}{L} \quad \text{et} \quad \phi = \frac{U^2}{2RS}$$

Par transformation inverse de Fourier de la relation (1.25), on obtient la variation de température de la sonde dans l'espace de Laplace :

$$\theta_s(0,0,p) = \frac{1}{L} \theta_{cs}(0,0,p) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \theta_{cs}(n,0,p) \quad (2.22)$$

Et par transformation inverse de Laplace par la méthode de Steffest, la variation de température $\bar{T}(0,0,t)$ peut finalement se calculer par :

$$\bar{T}(0,0,t) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{j=1}^{n_s} V_j \theta_s \left(0,0, \frac{j \ln(2)}{t}\right)$$

• Modèle simplifié

Ce modèle complet de la température au centre de la sonde permet de justifier le modèle simplifié et intuitif présenté en introduction de ce chapitre : un comportement de type plan chaud aux temps courts, fil chaud aux temps longs. Pour cela, on considère un ruban chaud présentant les caractéristiques suivantes :

- Longueur (2l) : 5,4 cm ;
- Largeur (2b) : 1,2 cm ;
- Résistance : 61,8 Ω .

Les caractéristiques de l'échantillon sont fixées :

- Conductivité (λ) : 0.21 W.m⁻¹.K⁻¹ ;
- Effusivité (E) : 510 J.m⁻².K⁻¹.s^{-1/2}.

On modélise l'évolution de la température au centre du ruban inséré entre 2 échantillons de ce matériau et soumis à une tension (U) de 6V :

- en le considérant comme un plan de surface 6,48 cm² ;
- en le considérant comme un ruban ;
- en le considérant comme un fil de longueur 5,4 cm et de rayon 1/10^{ème} de millimètre.

La *figure 2.8* représente l'évolution de la température sur une durée de 180 secondes dans ces trois cas, après que l'on ait fait subir à la courbe représentative du modèle « fil chaud » une translation pour faire coïncider sa température finale avec celle du modèle

« ruban chaud ». Elle fait apparaître très clairement les similitudes de comportement entre le ruban et les deux autres sondes en début et en fin d'expérience.

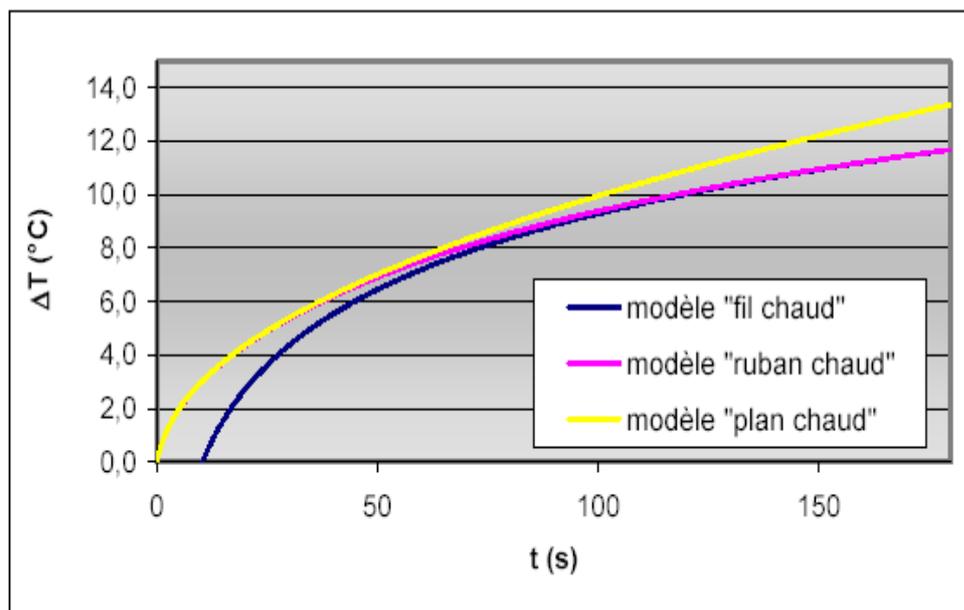


Figure 2.8 : comparaison des 3 modèles appliqués à une sonde de type "ruban chaud"

2.1.2-5-Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash

- Cas d'une excitation courte

La mesure de la diffusivité thermique, qui caractérise l'aptitude d'un matériau à diffuser de la chaleur, peut se faire en utilisant diverses méthodes transitoires. La méthode du chauffage périodique a été énoncée par A.J. Angstrom, cité par Hladik (1990), en 1863. Divers développements de la méthode initiale sont apparus rapidement, tel le chauffage aux deux extrémités de la barre de Weber en 1872 (Carslaw et Jaeger, 1965). La méthode flash proposée par Parker et al. (1961) est la plus connue et l'une des plus utilisées. Dans son principe, cette méthode unidirectionnelle consiste à soumettre la face avant d'un échantillon plan à une impulsion de flux de chaleur de courte durée et à observer l'évolution temporelle de la température (appelée thermogramme) en un ou plusieurs points de l'échantillon. Elle a fait l'objet de nombreux développements liés aux méthodes de calcul et d'estimation des paramètres, aux capteurs, aux dispositifs d'acquisition et de traitement des données. Dans le premier modèle de Parker, les fuites thermiques sont négligées sur les différentes faces de l'échantillon. Maillet et al. (1993) ont utilisé deux méthodes de temps partiels pour traiter le thermogramme issu d'une expérience flash. La *figure 2.7* représente l'élévation de la température de la face irradiée d'un échantillon plan lorsqu'il est soumis à un moment donné à une distribution de type Dirac d'énergie. En effet, si une impulsion s'approche d'une impulsion de Dirac c'est-à-dire si sa durée peut être supposée infiniment courte, alors l'analyse d'une réponse en température en un seul point de l'échantillon (généralement dans sa face arrière) suffit pour estimer la diffusivité thermique (Hay et al., 2004).

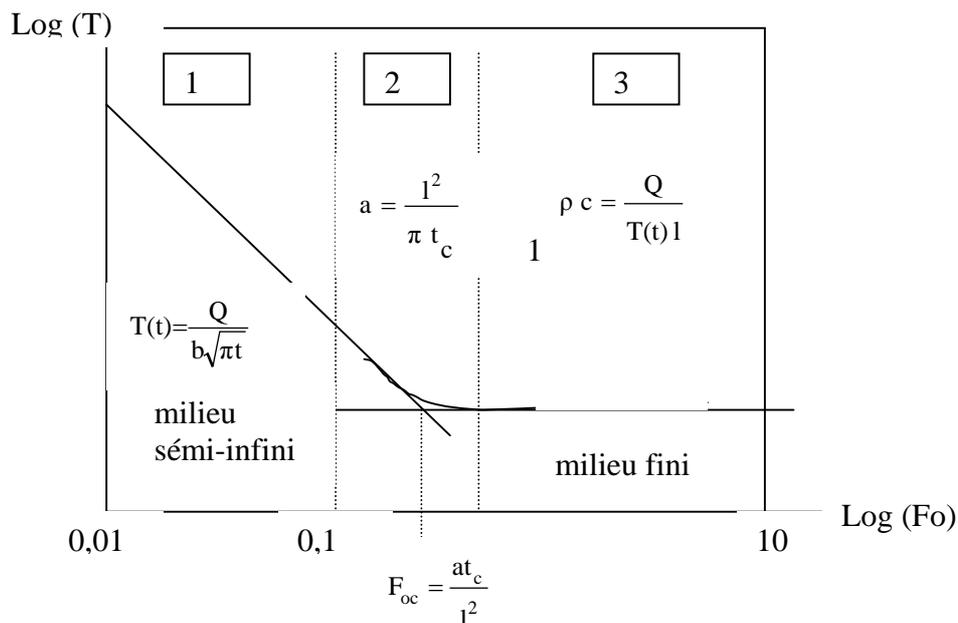


Figure 2.9 : Thermogramme face avant d'un échantillon adiabatique

Dans la zone (1) la loi de comportement de l'échantillon s'apparente à celle d'un mur semi-infini. L'évolution de l'élévation de température de la face irradiée suit la loi :

$$T(t) = \frac{Q}{E \sqrt{\pi t}} \quad (2.23)$$

où

Q : densité de flux d'excitation (W.m^{-2})

E : effusivité thermique du matériau donné par :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c_p} \quad (2.24)$$

La connaissance du flux de chaleur échangé par unité de surface et l'évolution de sa température permet de déterminer E.

Dans la zone (2), nous assistons à une transition entre le comportement d'un milieu semi-infini et celui d'un milieu fini isotherme. L'intersection des pentes relatives à ces lois de comportement permet de définir un temps caractéristique noté t_c :

$$t_c = \frac{l^2}{\pi a} \quad (2.25)$$

où a est la diffusivité thermique. La connaissance expérimentale de t_c et de l'épaisseur l de l'échantillon permet d'accéder à la diffusivité thermique du matériau :

$$a = \frac{l^2}{\pi t_c} \quad (2.26)$$

Dans la zone (3) l'échantillon devient isotherme, l'énergie absorbée est répartie de manière uniforme dans le matériau. La température atteinte est alors :

$$T(t) = \frac{Q}{\rho c l} \quad (2.27)$$

Si l'énergie absorbée est connue, la mesure de l'élévation de température que le

spécimen atteint dans cette zone permet de connaître la chaleur massique du matériau par la relation :

$$C = \frac{Q}{T(t) \rho l} \quad (2.28)$$

Les mesures de la diffusivité, de l'effusivité et de la chaleur massique permettent de calculer dans cette configuration exempte de toute perturbation, la conductivité thermique par trois voies différentes :

- zone 1 et 2 $\lambda = E\sqrt{a}$
- zone 2 et 3 $\lambda = a\rho C_p$
- zone 3 et 1 $\lambda = \frac{b^2}{\rho C}$

Cette possibilité de mesure reste théorique et n'est pas applicable dans la pratique. Pour obtenir les résultats on est obligé d'analyser plutôt le thermogramme de la face non irradiée. Lors de l'application expérimentale, deux facteurs vont perturber les thermogrammes

- la durée d'impulsion
- les pertes thermiques par rayonnement et par convection.

La perturbation la plus importante du thermogramme est due aux pertes thermiques. En effet, elle est d'autant plus importante que le niveau de température de l'échantillon est élevé (pertes radiatives), le spécimen faiblement diffusant ou son épaisseur élevée.

Le principe de la méthode consiste à produire une impulsion de très courte durée sur l'une des faces de l'échantillon et à noter l'évolution de la température sur l'autre face.

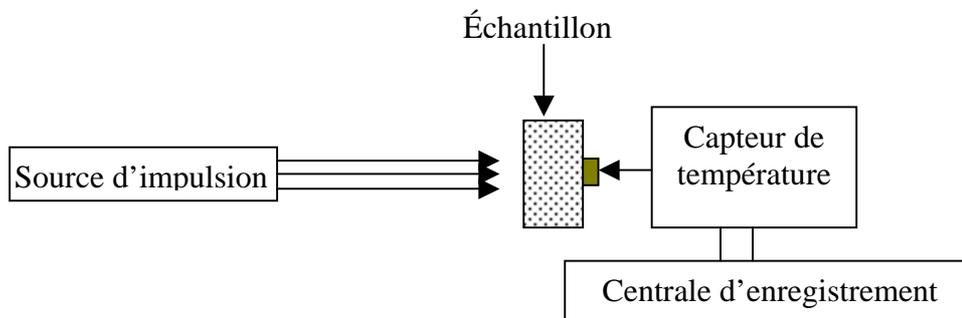


Figure 2.10 : Schéma de principe de la méthode impulsionnelle

L'analyse du thermogramme expérimental enregistré sur la face non irradiée permet de déterminer, en utilisant des techniques de dépouillement déjà existantes, la diffusivité thermique de l'échantillon. Une technique de dépouillement des thermogrammes proposée par Degiovani et Laurent (1986) permet d'estimer la diffusivité des matériaux en s'affranchissant des pertes thermiques. Son principe est fondé sur une méthode d'identification de paramètres qui utilise les moments temporels de la température d'ordre 0 et -1 (figure 2.11). Elle présente l'avantage de prendre en compte la partie du thermogramme où l'influence de la diffusivité est prépondérante par rapport à celle des pertes. A partir des thermogrammes, il est possible de calculer les moments temporels M_0 et M_{-1} de la température. Pour les coefficients d'échange réduits inférieurs à 1 (ce qui est souvent le cas en pratique), la diffusivité thermique peut être obtenue par les formules ci-dessous :

$$a_{2/3} = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left(1,15 - 1,25 \frac{t_{2/3}}{t_{5/6}} \right) \quad (2.29a)$$

$$a_{1/2} = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left(0,761 - 0,926 \frac{t_{1/2}}{t_{5/6}} \right) \quad (2.29b)$$

$$a_{1/3} = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left(0,617 - 0,9626 \frac{t_{1/3}}{t_{5/6}} \right) \quad (2.29c)$$

où - e est l'épaisseur de l'échantillon en m

- t_p est le temps écoulé depuis l'excitation pour que la température de la face arrière s'élève de p fois son élévation maximale au cours de l'expérience.

Dans la pratique on retiendra la valeur :

$$a = \frac{1}{3} \left(a_{2/3} + a_{1/2} + a_{1/3} \right)$$

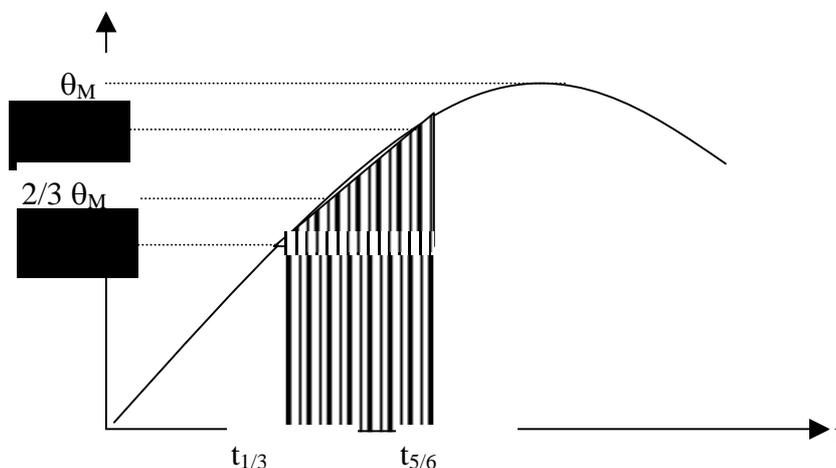


Figure 2.11 : Courbe théorique du thermogramme de la face non irradiée

• Cas d'une excitation longue : modélisation de la méthode flash

Pour tenir compte du fait que le flux d'énergie n'est pas une impulsion brève mais dure 30 s, nous avons développé une modélisation de la méthode flash par la méthode des quadripôles thermiques.

La modélisation que nous présentons ci-dessous utilise la méthode des quadripôles. En effet, elle est bien adaptée à la modélisation des effets parasites et des variantes intervenant dans la méthode flash, car elle permet d'obtenir des expressions mathématiques compactes dans un espace transformé et des solutions approchées de forme simple.

➤ Principe de modélisation

Nous schématisons sur la figure 2.12 le bilan d'échange de chaleur d'un échantillon ayant reçu une excitation lumineuse.

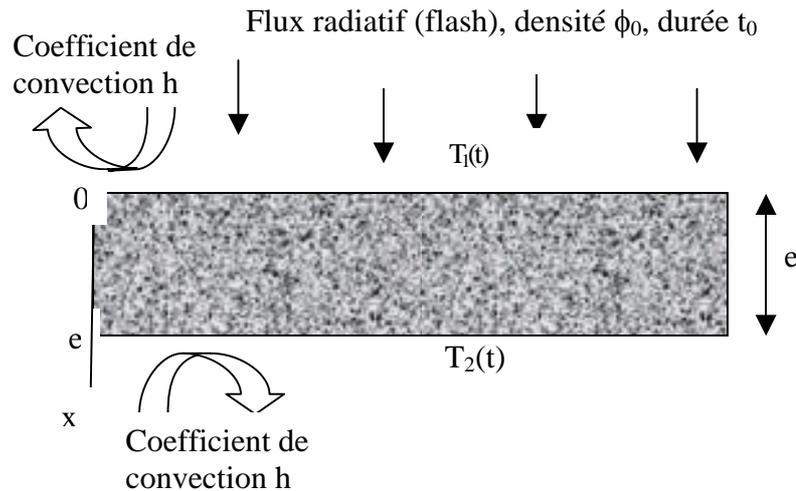


Figure 2.12 : Echantillon soumis a un flux radiatif.

L'équation de chaleur régissant les transferts transitoires à une dimension dans un mur homogène d'épaisseur e s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

La transformée de Laplace de l'équation de la chaleur est donnée par la relation

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = \frac{p}{a} \theta$$

si la température initiale $T(x,0)$ est supposée nulle en tout point du milieu.

Le flux de chaleur en un point quelconque du milieu s'écrit :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$$

dont la transformée de Laplace Φ est telle que :

$$\Phi = -\lambda S \frac{d\theta(x,p)}{dx}$$

La solution de cette équation est de la forme

$$\Phi(x,p) = -\lambda S k_1 q \text{sh}(qx) - \lambda S k_2 q \text{ch}(qx)$$

En appliquant cette relation en $x = 0$ et en $x = e$, et en éliminant k_1 et k_2 , on aboutit à l'écriture quadripolaire :

$$\begin{bmatrix} \theta_1(p) \\ \Phi_1(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(qe) & \frac{1}{\lambda q S} \text{sh}(qe) \\ \lambda q S \text{sh}(qe) & \text{ch}(qe) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(p) \\ \Phi_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(p) \\ \Phi_2(p) \end{bmatrix}$$

Pour la modélisation de la méthode flash les hypothèses suivantes sont formulées :

- la température à la surface de l'échantillon est uniforme et égale à la température ambiante à l'instant $t = 0$,
- les pertes latérales sont négligeables en raison de la faible épaisseur de l'échantillon devant ses dimensions latérales,
- le coefficient d'échange h est uniforme en face avant et en face arrière.

Nous pouvons écrire le bilan thermique de la face avant :

$$\varphi_0(t) = \varphi_1(t) + h [T_1(t) - T_a]$$

et celui de la face arrière :

$$\varphi_2(t) - h [T_2(t) - T_a] = 0$$

d'où dans l'espace de Laplace :

$$\Phi_1(p) = L[\varphi_0(t)] - h \theta_1(p)$$

où $\varphi_0(t) = \varphi_0$ si $t < t_0$ et $\varphi_0(t) = 0$ si $t > t_0$.

D'après les propriétés de la transformation de Laplace:

$$\Phi_0(p) = \frac{\varphi_0}{p} [1 - \exp(-pt_0)]$$

En développant le système du quadripôle on obtient le système ci-dessous :

$$\begin{aligned} \theta_1(p) &= A\theta_2(p) + B\Phi_2(p) \\ \Phi_1(p) &= C\theta_2(p) + D\Phi_2(p) \end{aligned}$$

En posant :

$$\begin{aligned} \theta_1(p) &= L[T_1(t) - T_a] ; & \theta_2(p) &= L[T_2(t) - T_a] ; \\ \Phi_1(p) &= L[\varphi_1(t)] & \text{et} & \Phi_2(p) = L[\varphi_2(t)], \end{aligned}$$

les flux thermiques des deux faces dans l'espace de Laplace s'écrivent :

$$\begin{aligned} \Phi_1(p) &= \Phi_0(p) - h\theta_1(p) \\ \Phi_2(p) &= h\theta_2(p) \end{aligned}$$

En combinant ces relations on arrive au résultat :

$$\theta_2(p) = \frac{\varphi_0}{p} \frac{1 - \exp(-pt_0)}{C + 2Ah + Bh^2} \quad (2.30)$$

➤ Estimation à partir du modèle complet

On peut appliquer une simple méthode dichotomique (Jannot 2003) pour déterminer la diffusivité thermique à partir de la connaissance d'une courbe expérimentale $T_0(t)$ de la manière suivante. On fixe les valeurs minimales et maximales :

- a_m et a_M de la diffusivité thermique a ,
- λ_m et λ_M de la conductivité thermique λ ,
- φ_m et φ_M du flux de chaleur incident (éclairage) φ ,
- h_m et h_M et du coefficient de convection h .

On calcule $T_0(t)$ pour chaque valeur de t correspondant à une mesure en appliquant la méthode de Stehfest à la formule (2.28) pour chaque quadruplet de valeurs :

$$[a_m + 0,25 i (a_M - a_m), \lambda_m + 0,25 j (\lambda_M - \lambda_m), \varphi_m + 0,25 k (\varphi_M - \varphi_m), h_m + 0,25 l (h_M - h_m)]$$

où i, j, k et l varient de 0 à 4.

On retient le quadruplet $[a_1, \lambda_1, \varphi_1, h_1]$ qui permet de minimiser l'écart entre les courbes $T_0(t)$ expérimentales et théoriques. On réitère le calcul en prenant comme nouvelles valeurs minimales et maximales :

$$\begin{aligned} a_{m2} &= a_1 - 0,25 (a_{M1} - a_{m1}) ; a_{M2} = a_1 + 0,25 (a_{M1} - a_{m1}) \\ \lambda_{m2} &= \lambda_1 - 0,25 (\lambda_{M1} - \lambda_{m1}) ; \lambda_{M2} = \lambda_1 + 0,25 (\lambda_{M1} - \lambda_{m1}) \\ \varphi_{m2} &= \varphi_1 - 0,25 [\varphi_{M1} - \varphi_{m1}] ; \varphi_{M2} = \varphi_1 + 0,25 [\varphi_{M1} - \varphi_{m1}] \\ h_{m2} &= h_1 - 0,25 (h_{M1} - h_{m1}) ; h_{M2} = h_1 + 0,25 (h_{M1} - h_{m1}) \end{aligned}$$

Le nombre d'itérations successives dépend de la précision souhaitée, toutefois un nombre de 6 itérations est suffisant. Le programme de calcul de la diffusivité utilisant la modélisation de la méthode flash est présenté en annexe A2.

2.1.3-Méthode de mesure de la chaleur spécifique

Pour la mesure de la chaleur spécifique des matériaux dont des propriétés thermophysiques sont déterminées dans ce travail, nous avons utilisé la méthode calorimétrique.

2.1.3.1-Principe de la méthode

On plonge dans un calorimètre contenant de l'eau froide un solide préalablement chauffé pendant au moins 24 heures dans une étuve dont la température est fixée à 100°C. On relève la température maximale atteinte par l'eau du calorimètre.

Le bilan thermique entre l'instant initial $t_0 = 0$ (introduction du solide dans le calorimètre) et l'instant t (température maximale atteinte par l'eau du calorimètre) s'écrit :

$$m_s c_s (T_{s0} - T_{s1}) = m_e c_e (T_e - T_{e0}) + \int_0^t U S (T_{em} - T_a) dt \quad (2.31)$$

avec :

- T_{s1} : température moyenne du solide à l'instant t ,
- T_{s0} : température initiale du solide (échantillon),
- T_e : température maximale de l'eau,
- T_{e0} : température initiale de l'eau,
- T_{em} : température moyenne de l'eau,
- T_a : température de la salle d'expérience.

On déduit la chaleur spécifique du solide c_s en J/kg.°C:

$$c_s = \frac{m_e T_e - T_{e0}}{m_s T_{s0} - T_e} c_e + \int_0^t \frac{U S T_m - T_a}{m_s T_{s0} - T_e} dt \quad (2.32)$$

Dans la relation (2.31) donnant c_s , m_e représente la masse de l'eau et la valeur en eau du calorimètre et ses accessoires. U désigne le coefficient global de pertes thermiques.

2.1.3 2-Détermination de la valeur en eau du calorimètre

On verse une masse m_{ec} d'eau chaude à la température T_{ec} dans un calorimètre contenant m_{ef} d'eau froide à la température T_{ef} . Si T_e est la température maximale atteinte par le mélange le bilan thermique permet d'écrire l'égalité suivante :

$$(m_{ef} + \mu_c)(T_e - T_{ef}) = m_{ec}(T_{ec} - T_e) \quad (2.33)$$

Dans la relation (2.31), on néglige les déperditions thermiques. En effet, la manipulation est tellement rapide que l'on peut admettre que l'échange de chaleur entre le calorimètre et la salle d'expérience est pratiquement nul.

On en déduit μ_c par la relation :

$$\mu_c = m_{ec} \frac{T_{ec} - T_e}{T_e - T_{ef}} - m_{ef} \quad (2.34)$$

2.1. 3.4-Détermination de la chaleur massique du matériau humide

La chaleur massique de l'éprouvette sèche étant connue, on peut déterminer la chaleur massique c de l'échantillon ayant une teneur en eau connue.

Si on néglige les chaleurs volumiques de l'air et de la vapeur d'eau devant celles des phases liquide et solide, on peut écrire :

$$\rho C = \rho_0 (C_s + C_e \omega)$$

Sachant que $\rho = \rho_0 (1 + \omega)$

et $\omega = \frac{m_e}{m_s}$,

on en déduit la chaleur spécifique de l'échantillon humide donnée par la relation (2.35).

$$C = \frac{m_s C_s + m_e C_e}{m_h} \quad (2.35)$$

avec :

- ω teneur en eau de l'échantillon,
- ρ_0 masse volumique à l'état sec,
- m_e masse de l'eau contenue dans l'échantillon,
- m_s masse de l'échantillon à l'état sec,
- m_h masse de l'échantillon humide,
- C_e chaleur massique de l'eau,
- C_s chaleur massique de l'échantillon à l'état sec.

2.1.4-Conclusion

L'objectif à atteindre lorsqu'on veut réaliser une mesure expérimentale est la précision et la fiabilité des résultats. Le choix d'une méthode de mesure va dépendre de plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

- la fiabilité des résultats et la durée de mesure,
- le coût d'acquisition et d'entretien du matériel ainsi que sa robustesse,
- la disponibilité du matériel.

Les mesures des propriétés thermophysiques dont il est question dans ce travail ont été réalisées en utilisant les dispositifs dont disposait le LAEN au moment des essais :

- la méthode dite des boîtes pour la mesure de la conductivité thermique,
- la méthode flash pour la mesure de la diffusivité thermique,
- la méthode calorimétrique pour la mesure de la chaleur spécifique.

2.2–Les principales méthodes de mesure des propriétés hygroscopiques

2.2.1-Méthode gravimétrique

Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant : on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température T et à humidité relative HR de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à (T, HR). Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau X, le couple (HR, X) fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption.

Le produit est suspendu dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante. Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée. La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentration différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme. Le tableau 1 indique les humidités relatives de l'air au-dessus des solutions salines saturées (à 25°C) préconisées pour la mise en œuvre de la méthode des sels, un tableau plus complet en donnant les valeurs pour diverses températures est présenté en annexe A3 . Le choix des concentrations en acide sulfurique s'effectue en fonction des données fournies dans le tableau 2.

2.2.1.1-Méthode des solutions salines concentrées :

$$p_v = HR p_{sat}(T) \quad (2.36)$$

Tableau 2.1 : Valeur de HR (%) en fonction de la nature du sel et de la température.

LiBr	LiCl	KCH ₃ O	KF	MgCl ₂	KCO ₃
6,4	11,3	22,5	30,9	32,8	43,2
NaBr	CuCl ₂	CoCl ₂	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
57,6	68,5	64,9	75,3	84,3	97,3

2.2.1.2-Méthode des solutions d'acide sulfurique :

$$\log \left[\frac{p_v}{p_{sat}(T)} \right] = \left(a_1 - \frac{a_2}{T} \right) + \frac{1}{\log[p_{sat}(T)]} \quad (2.37)$$

où : T en K
 p_v, p_{sat} en Pa

Les valeurs des coefficients a_1 et a_2 sont regroupés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Valeurs des coefficients a_1 et a_2 pour le calcul de HR avec des solutions d'acide sulfurique.

T (°C)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
a_1	8,925	8,922	8,864	8,84	8,832	8,841	9,032	9,293	9,265	9,79
a_2	2,259	2,268	2,271	2,299	2,357	2,457	2,688	3,040	3,390	9,880

avec :

$$\log_{10} [p_{sat}(T)] = 20,3182 - \frac{2795}{T} - 3,868 \log_{10}(T) \quad \text{en mmHg, avec } 223 \text{ K} < T < 473 \text{ K}$$

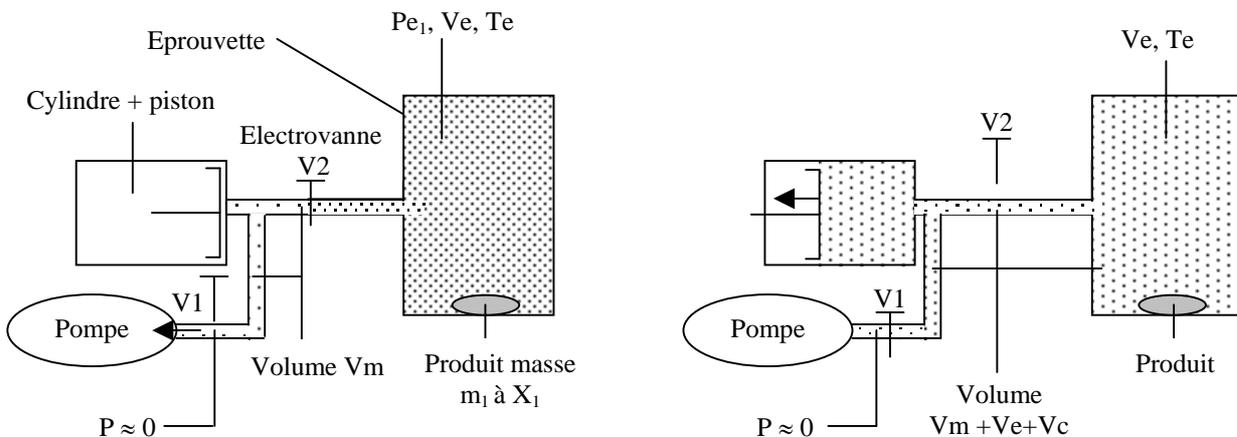
2.2 2-Méthode dynamique

L'appareil est principalement constitué d'un cylindre calibré dans lequel évolue un piston et d'une éprouvette dans laquelle on place l'échantillon dont on veut mesurer la courbe de sorption. On peut déterminer deux types d'isothermes :

- Adsorption : on place dans l'éprouvette un échantillon sec de masse connue, on injecte un volume connu de vapeur d'eau à une température et à une pression contrôlée et connue, on attend l'équilibre avant de relever la pression p_e dans l'éprouvette.
- Désorption : l'échantillon étant saturé, on prélève un volume connu de vapeur d'eau dans l'éprouvette et on attend l'équilibre avant de relever la pression p_e dans l'éprouvette.

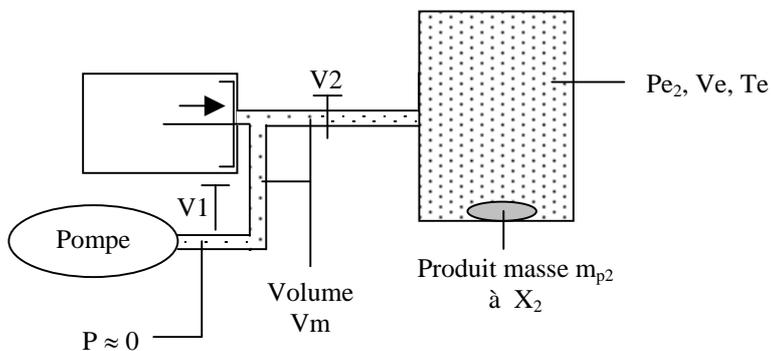
Dans les deux cas, la connaissance des valeurs des pressions, des volumes et des températures permet de calculer :

- la variation totale de masse d'eau dans le système entre deux injections ou retraits de volumes,
- la variation de masse de vapeur d'eau dans l'éprouvette, et d'en déduire la variation de la masse d'eau contenue dans l'échantillon et de remonter ainsi à la variation de sa teneur en eau. Les schémas ci-dessous illustrent le principe de la méthode (Jannot 2003).



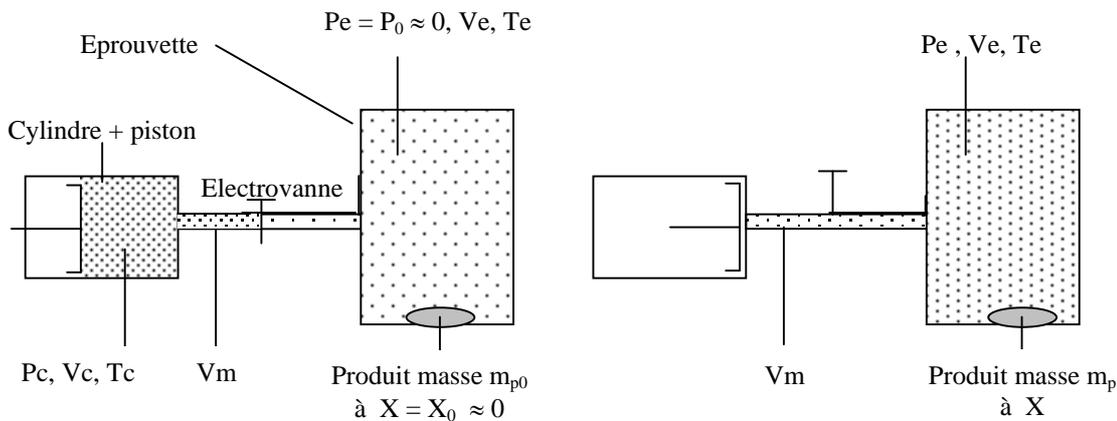
Etat d'équilibre 1: produit de masse m_{p1} à X_1

Fermeture de V1, retrait du piston et ouverture de V2



Attente de l'équilibre, relevé de Pe_2 puis fermeture de V2, ouverture de V1 et poussée du piston

Schématisation de la phase de désorption



Etat initial : Produit sec, $Pe \approx 0$

Après N injections d'un volume V_c de vapeur d'eau à P_c, T_c

Figure 2.13 : Schématisation de la phase d'adsorption

La méthode dynamique est très longue : l'équilibre air/produit n'est parfois atteint qu'après plusieurs semaines, elle ne convient donc pas à la détermination des points de l'isotherme correspondants aux valeurs élevées de HR pour des produits biologiques qui subiraient des dégradations dues aux moisissures avant que l'équilibre ne soit atteint. La cinétique peut toutefois être accélérée de manière importante en créant un vide dans les récipients ce qui peut alors étendre le champ d'application de la méthode en réduisant la durée de la mesure.

2.2.3-Méthodes de l'enceinte régulée en température et en humidité

Le principe de cette méthode est le même que celui de la méthode gravimétrique. Mais dans le cas de l'enceinte régulée en température l'échantillon placée dans l'enceinte ayant subi auparavant un extrait sec absorbe de la vapeur d'eau jusqu'à la stabilisation de sa masse.

2.2.4-Conclusion

Les critères pour choisir une des méthodes sont les mêmes que ceux énoncés en 2.1.4. La méthode de l'enceinte régulée en température et en humidité a été choisie pour les isothermes de sorption pour les mêmes raisons à savoir que c'est cette méthode que nous avons à notre disposition au moment de des essais..

2.3-Influence de la porosité sur les propriétés thermophysiques

2.3.1-Rappels théoriques sur les milieux poreux

Pour un corps poreux il est plus difficile d'obtenir la conductivité thermique à cause de l'hétérogénéité que présente leur structure et de la multiplicité des phases en présence. Sur le plan structural, il est prouvé (Kittel, 1972) que la conductivité thermique des pores dépend de leur taille et de leur nombre, à cause des effets du rayonnement à prendre en compte à l'intérieur de ces pores. La conductivité thermique des corps poreux obtenue par l'expérience est dite apparente à cause de la diversité des mécanismes de transfert de chaleur dont ces corps sont le siège. La notion de conductivité vraie est réservée à λ qui provient directement de l'écriture de la loi de Fourier pour un milieu continu homogène équivalent à un milieu poreux. Les matériaux dont nous allons déterminer les propriétés thermophysiques sont des matériaux poreux.

Nous allons rappeler, en nous basant sur les travaux de Perrin (1985) et Bidjocka (1990), les grandes lignes de la théorie sur les milieux poreux.

Un matériau poreux contient trois phases en proportion variable qui sont :

- Une phase solide qui constitue le squelette de l'éprouvette caractérisée par sa masse m_s et son volume V_s ;
- Une phase liquide qui est de l'eau pouvant éventuellement contenir des sels dissous, de masse m_e et de volume V_e ;
- Une phase gazeuse, mélange d'air et de vapeur d'eau. Cette dernière phase occupe un volume V_a .

Pour un milieu considéré, la masse totale est $m_t = m_s + m_e + m_a$ occupant un volume

$$V_t = V_s + V_e + V_a$$

La masse volumique totale à l'état sec s'écrit : $\rho_a = \frac{m_s}{V_t}$

La masse volumique de la phase solide est : $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$

La masse volumique équivalente s'écrit : $\rho_{eq} = \frac{m_t}{V_t} = \frac{m_s + m_e + m_a}{V_t} = \rho_a \left(1 + \frac{m_e}{m_s} + \frac{m_a}{m_s} \right)$

En négligeant la masse de l'air devant celle des autres phases on obtient :

$$\rho_{eq} = \rho_a \left(1 + \frac{m_e}{m_s} \right)$$

La porosité totale s'écrit : $\varepsilon = \frac{V_a + V_e}{V_t}$

La structure des bétons et en particulier celle des bétons de pouzzolane naturelle laisse apparaître des cavités qui peuvent selon les conditions d'élaboration et les conditions thermohygrométriques de traitement et de conservation, comporter une phase liquide ou une phase gazeuse ou un mélange des deux.

Le nombre et les caractéristiques géométriques de ces cavités permettent de connaître la porosité du matériau. Pour le cas du béton il on définit généralement plusieurs types de porosité.

- Une porosité macrométrique ou porosité capillaire : elle est constituée de pores de plus de 0,1 μm . Cette porosité est supposée ouverte et accessible par un liquide, en occurrence l'eau. Son intérêt est dû au fait qu'elle conditionne pour une bonne part la durabilité du béton vis-à-vis du milieu environnant.
- Une porosité fermée : généralement considérée comme inaccessible à l'eau liquide.
- Une porosité totale : qui est la somme des porosités fermée et ouverte. Elle prend en compte les vides granulaires et les vides intergranulaires. La porosité est intéressante pour les bétons légers à cause de son influence sur les propriétés thermiques.

Un matériau de construction n'est absolument exempt d'eau que lorsqu'il se trouve dans une ambiance totalement sèche. Comme dans les conditions naturelles l'air présente une humidité relative plus ou moins élevée, tout matériau de construction poreux contient une plus ou moins grande quantité d'eau. Nous allons, en nous appuyant sur les travaux de Nadeau (1995), décrire l'influence de l'eau sur les propriétés thermophysiques des matériaux.

La caractérisation d'un solide est liée à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermophysiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations donc une modification de la structure poreuse. La porosité est un paramètre important à prendre en compte lors de l'étude de caractérisation d'un produit. La taille des pores, de dimensions variables dans un même matériau, influence en partie le caractère hygroscopique du matériau. L'histogramme de la *figure 2. 14* montre la répartition des pores dans un échantillon de terre cuite sous forme de distribution du rayon des pores (Perrin 1985). La taille des pores influence directement tous les transferts d'eau et conditionne la quantité d'eau liée présente dans le matériau.

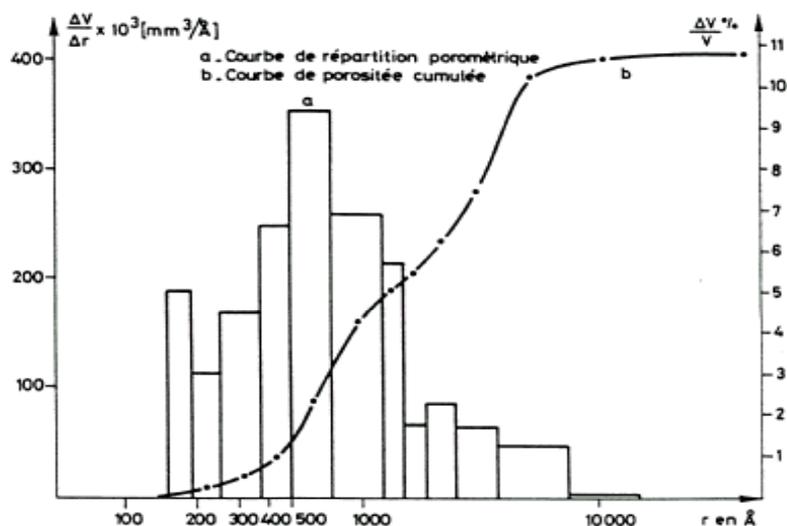


Figure 2.14 : Répartition porométrique d'une terre cuite (Perrin 1985)

Certains matériaux utilisés dans les bâtiments avec fonction d'isolation thermique contiennent des espaces remplis de gaz thermiquement isolant tel que l'air. Nous présentons en nous appuyant sur les travaux de Menguy et Azabakhe (1987), une modélisation qui prend en compte la morphologie du matériau, notamment ses porosités ouvertes et fermées, et qui décrit le comportement thermique du matériau.

2.3.2-Différents types de porosités

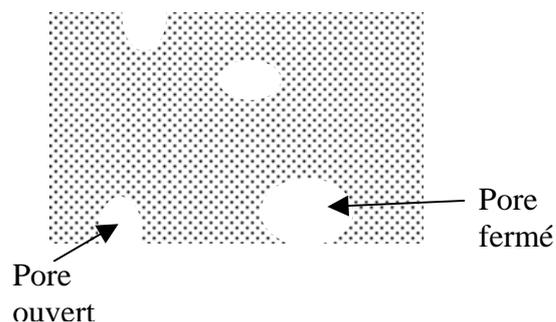
Les cellules des matériaux cellulaires peuvent être ouvertes c'est-à-dire déboucher sur la surface, ou fermées. Trois types de porosité permettent de caractériser les matériaux :

- la porosité totale

$$P_t = \frac{V_p}{V_a}$$

Figure 2.15 pores fermes et ouverts dans un matériau poreux

- la porosité ouverte $P_o = \frac{V_{po}}{V_a}$
- la porosité fermée $P_f = \frac{V_{pf}}{V_a}$



Les relations suivantes existent entre ces différentes grandeurs :

- $V_p = V_{po} + V_{pf}$

- $P_T = P_o + P_f$

2.3.2-Mécanismes de transfert de chaleur dans les matériaux poreux

Les différents mécanismes de transfert de chaleur pouvant entrer en jeu sont :

- la convection. Une mise en mouvement de l'air ou de tout autre gaz présent dans la cellule peut intervenir. Mais l'expérience montre que le gradient de température est tel que le mouvement de convection dans les cellules est négligeable.
- la conduction. La transmission de chaleur par conduction pure s'effectue dans les gaz inclus dans les pores et dans la structure solide.
- le rayonnement. L'épaisseur des matériaux utilisés dans le bâtiment est suffisante pour admettre que le corps est non transparent c'est-à-dire que la fraction du rayonnement transmise est nulle. Le seul transfert par rayonnement qui intervient se fait au sein des cellules dont les parois possèdent un gradient de température. Comme les températures des parois sont en général voisines de la température ambiante, ce phénomène est souvent très faible vis-à-vis de la valeur correspondant à la conduction pure.
- Evaporation-condensation. Ce mécanisme s'apparente au transfert de masse. Il intervient lors de l'évaporation sur la face chaude et de la condensation sur la face froide du matériau. L'évaporation condensation est favorisée par une porosité ouverte importante. Ce phénomène peut être négligé dans le cas de matériaux secs.

2.3.3-Modélisation des transferts de chaleur dans les matériaux poreux

• Hypothèses de base

- la convection est négligeable dans les pores,
- le matériau est non transparent et sec,
- seule reste à exprimer la quantité de chaleur transmise par conduction et par rayonnement.

En régime permanent, le flux de chaleur qui traverse un matériau s'exprime par la relation (2.38)

$$\Phi = \frac{\lambda}{e} (T_c - T_f) \quad (2.38)$$

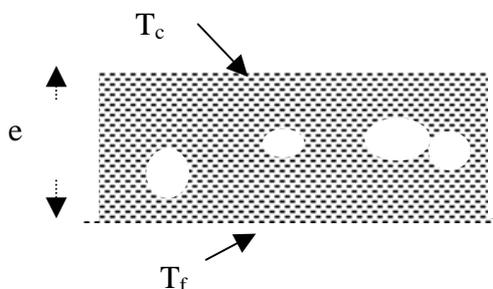


Figure 2.16 : Schéma d'un échantillon poreux à modéliser

où λ est une conductivité globale que nous allons exprimer en faisant une représentation de la chaleur traversant le corps par conduction et par rayonnement.

- **Transmission par conduction pure**

La transmission par conduction s'effectue dans la structure solide et dans les pores. Le modèle de Krischer, le plus utilisé pour exprimer cette quantité, fait l'hypothèse que le matériau poreux est équivalent à un empilage de structures planes séparées par la phase fluide (air dans notre étude). Les structures sont disposées en parallèle ou en série par rapport à la direction du flux de chaleur (figure 2.17).

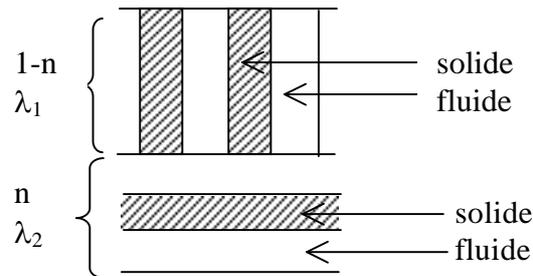


Figure 2.17 : Modèle de Krischer de transfert de chaleur par conduction dans un matériau poreux

Le premier ensemble de conductivité λ_1 est formé de plaques en parallèle alors que le second de conductivité λ_2 est constitué de plaques en série. Le paramètre n caractérise la répartition série-parallèle. Le flux thermique à travers l'ensemble est donné par la relation (2.38).

$$\Phi_c = \frac{\lambda_c}{e} (T_c - T_f) \quad (2.38)$$

avec

$$\lambda_c = \frac{1}{\frac{1-n}{\lambda_1} + \frac{n}{\lambda_2}} \quad (2.40)$$

Les conductivités thermiques λ_1 et λ_2 sont exprimées en fonction de la porosité et des conductivités de la phase solide λ_s et gazeux λ_g selon les relations :

$$\lambda_1 = (1 - P_T) \lambda_s + P_T \lambda_g$$

et

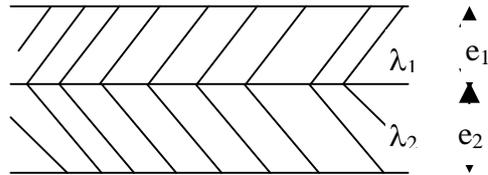
$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{1 - P_T}{\lambda_s} + \frac{P_T}{\lambda_g}}$$

On peut faire l'analogie de la représentation précédente avec un mur composé pour lequel on a :

$$\frac{e}{\lambda} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2}$$

$$\text{et } \lambda = \frac{1}{\frac{e_1}{e} \cdot \frac{1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{e} \cdot \frac{1}{\lambda_2}}$$

où λ est la conductivité totale du mur.



λ_g et P_T étant connus, Krischer (1961) a utilisé les mesures de la conductivité thermique apparente sur les matériaux secs et saturés totalement en eau pour obtenir λ_s et n . n étant déterminé, λ_c peut être calculée grâce à la relation (2.40). Bien que cette méthode donne des résultats satisfaisants elle ne fait pas de distinction entre porosité ouverte et fermée.

• Transmission de chaleur par rayonnement

Soit un matériau poreux d'épaisseur e , de diamètre moyen D . On peut assimiler ce corps à un milieu fictif composé d'un ensemble d'écrans parallèles d'émissivité ε sur chaque face. En supposant le gaz contenu dans les pores non absorbant et l'écart de température faible entre les faces, la densité de flux de chaleur échangée par rayonnement entre les deux écrans est donnée par la relation (2.41) (Siegel et Howell, 1972).

$$\varphi_r = 4\sigma T_m^3 \frac{(T_c - T_f)}{n \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right)} \quad (2.41)$$

avec

$$n = \frac{e}{D} : \text{nombre d'intervalles,}$$

$$T_m = \frac{T_c + T_f}{2} : \text{température moyenne du matériau}$$

Si on introduit un coefficient de conductivité thermique par rayonnement λ_R on obtient la relation (2.42) :

$$\varphi_R = \frac{\lambda_R}{e} (T_c - T_f) \quad (2.42)$$

avec

$$\lambda_R = \frac{4\sigma\varepsilon D T_m^3}{2 - \varepsilon}$$

Cette approximation n'est satisfaisante que dans le cas où l'épaisseur de la matrice solide est très inférieure au diamètre des pores, ce qui est généralement le cas dans les matériaux de construction.

• Echange global de chaleur

En régime permanent la densité de flux global de chaleur qui traverse le matériau s'écrit sous la forme

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_R = \frac{(\lambda_c + \lambda_R)}{e} (T_c - T_f) \quad (2.43)$$

Par analogie avec les matériaux où le transfert de chaleur se fait seulement par conduction pure, on introduit une conductivité thermique globale λ telle que : $\lambda = \lambda_c + \lambda_R$. En pratique, pour les matériaux cellulaires de bâtiment et dans les conditions normales d'utilisation, λ_R est nettement inférieur à λ_c .

2.3.4-Influence de l'humidité sur les propriétés thermophysiques des matériaux

L'eau étant le facteur principal des agents susceptibles de dégrader les constructions en latérite, il nous a paru nécessaire de mener une étude sur l'influence de l'humidité sur les propriétés thermophysiques des matériaux étudiés.

• Répartition de l'eau dans le matériau

L'eau présente dans le matériau l'est sous trois états :

- Eau libre ou eau capillaire : elle remplit la majeure partie des vides de la structure. Elle est piégée sous forme liquide par les forces d'origine capillaire. La quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu.
- Eau liée ou eau adsorbée : cette eau est adsorbée dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle est aussi liée à la taille des pores qui indique la proportion eau liée/eau libre dans le matériau. Un produit constitué de petits pores aura à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de gros pores.

La liaison de l'eau à un matériau est quantifiée par une grandeur physique appelée activité de l'eau, définie par GRET-GERES (1986), pour une température donnée, par la relation (2.44)

$$a_{ce} = \frac{P_v}{P_o} \quad (2.44)$$

L'activité de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température. La teneur en eau particulière pour laquelle les parois des structures cellulaires sont saturées sans présence d'eau libre est appelée point de saturation. Ce point permet de définir deux domaines. Au-dessous de ce point le matériau n'a pas de comportement hygroscopique alors qu'en deçà il existe une relation entre la quantité d'eau et la pression partielle de vapeur d'eau. Le matériau est dit à comportement hygroscopique.

- Eau vapeur : la vapeur d'eau mélangée à l'air (mélange parfait) occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.

• Équilibre hygroscopique

Dans le travail que nous présentons, nous nous intéressons au cas de l'eau dans un matériau à structure poreuse comme la pouzzolane. Nous allons décrire ce phénomène physique que l'on retrouve dans les éprouvettes de briques de terre stabilisées que nous avons confectionnées.

Considérons une éprouvette à structure poreuse, initialement sèche dans une ambiance où existe de la vapeur d'eau. Lorsque l'humidité de l'ambiance augmente, en partant de zéro, on constate que la masse de l'éprouvette augmente progressivement. Cette augmentation de masse est due à la fixation par le milieu poreux, d'une certaine quantité d'eau. Cette fixation se fait en plusieurs étapes :

- La phase d'adsorption monomoléculaire: aux basses humidités relatives, il y a fixation d'une première couche de molécules d'eau sur la surface du squelette solide, l'énergie de liaison est très importante et les molécules très stables. Une seule couche d'eau dont l'état n'est pas liquide recouvre le squelette solide du milieu en lui étant fortement liée.
- La phase d'absorption polymoléculaire au cours de laquelle les couches d'eau s'empilent les unes sur les autres. L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'eau avec l'humidité relative ϕ conduit à l'apparition de ponts liquides entre les parois des pores. Le phénomène de la condensation capillaire se produit alors et provoque des pores de petits diamètres avec formation de ménisques.

La teneur en eau massique, à l'intérieur du matériau, augmente lorsque la courbe a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec (la *figure 2.18*). La courbe représentant pour une température T donnée la teneur en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_{ce} ou de l'humidité relative HR est appelée courbe de sorption ou isotherme d'adsorption.

Lorsque le matériau humide est placé dans une ambiance plus sèche, elle perd de l'eau ; la teneur en eau X décroît en fonction de l'humidité relative HR et on obtient l'isotherme de désorption représentée également sur la *figure 2.18* où X_{eq} désigne la teneur en eau d'équilibre.

Les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de $a_{ce} = 1$ à $a_{ce} < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles. Il y a donc dans l'expérience un phénomène d'hystérésis.

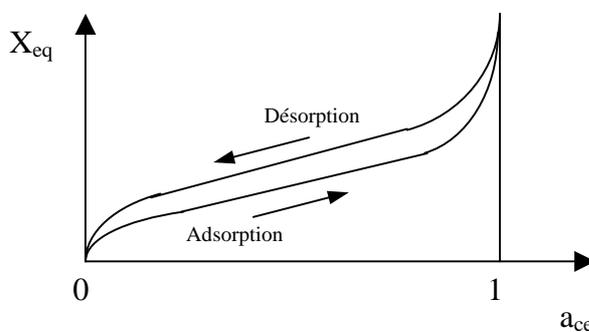


Figure 2.18 : Courbe théorique de sorption et de désorption d'un matériau.

2.3.5-Modélisation des isothermes d'adsorption/désorption.

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones, chacune correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit (*figure 2.19*).

- Zone 1 : constitution monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau.
- Zone 2 : adsorption des molécules sur la couche initiale. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

- Zone 3 : eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'épaisseur de la pellicule est suffisamment petite pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau microcapillaire constitue une phase continue.

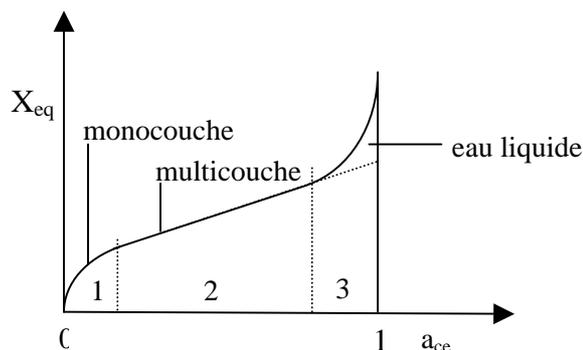


Figure 2.19 : les trois zones d'une isotherme d'adsorption/désorption.

Plusieurs auteurs ont proposé des modèles théoriques pour déterminer les isothermes d'adsorption /désorption. Le modèle de Guggenheim, Anderson et Boer (GAB) donné par l'équation (2.45) est le plus utilisé, probablement en raison du fait que ce modèle couvre toutes les zones.

$$X = \frac{X_{12} HR C K}{(1 - HR K)(1 + HR C K - HR K)} \quad (2.45)$$

avec :

X_{12} teneur en eau à 1 tension entre zones 1 et 2 (saturation de la monocouche),
 HR humidité relative

$$C = C_0 \exp\left(\frac{H_1 - H_m}{RT}\right) \quad ; \quad K = K_0 \exp\left(\frac{H_1 - H_q}{RT}\right)$$

H_1 chaleur de condensation de l'eau pure,
 H_m chaleur de sorption totale de la première couche,
 H_q chaleur de sorption totale des multicouches.

La teneur en eau de transition X_{12} se déduit d'une méthode d'estimation de paramètres à partir d'une courbe expérimentale pour trouver les paramètres de la formule de GAB. Nous avons, grâce au solveur de Microsoft Excel, déterminé la teneur en eau de chaque matériau en utilisant le modèle donné par l'équation (2.44).

3. CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE

Chapitre 3 :

CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE

Sommaire

3.1 - Fabrication des éprouvettes.....	60
3.1.1 - Caractéristiques des matériaux utilisés.....	60
3.1.2 -Dispositif expérimental de fabrication	61
3.1.3- Préparation des mélanges à compacter.....	62
3.1.3.1-Tamisage.....	62
3.1.3.2- Teneur en eau.....	63
3.1.3.3 - Séchage des éprouvettes	64
3.2- Mesure de la conductivité thermique.....	65
3.2.1 -Méthodologie expérimentale	65
3.2.1.1-Dispositif expérimental.....	65
3.2.1.2-Etalonnage des sondes	66
3.2.3-Influence de la teneur en ciment sur la conductivité thermique	68
3.3- Mesure de la diffusivité thermique	70
3.3.1- Dispositif de mesure	70
3.3.2- Résultats de mesure de la diffusivité thermique.....	70
3.3.4- Influence de la teneur en ciment sur la diffusivité thermique	73
3.3.5- Influence de la teneur en eau sur la diffusivité thermique.....	74
3.4- Mesure de la chaleur spécifique.....	74
3.4.1- Matériels	74
3.4.2-Valeur en eau du calorimètre.....	75
3.4.3 -Détermination du coefficient global de perte thermique	75
3.4.4- résultats et discussions.....	76
3.5 -Comparaison des résultats expérimentaux aux valeur calculées	77
3.6-Propriétés hygroscopiques des matériaux étudiés.....	78

Les propriétés thermophysiques dont nous avons présenté les méthodes de mesure dans le chapitre précédent vont être déterminées expérimentalement dans ce chapitre. Pour chaque propriété, nous allons décrire le dispositif expérimental, présenter les résultats avant de les analyser.

3.1 - Fabrication des éprouvettes

3.1.1 - Caractéristiques des matériaux utilisés.

Les matériaux utilisés pour réaliser les trois types de briques de terre dont il est question dans cette étude sont : la latérite, la pouzzolane naturelle, le ciment et la sciure de bois. Dans une étude ultérieure une attention devra être accordée aux BTS avec incorporation de sciure de bois dans la mesure où les risques de pourrissement et d'attaque des termites existent si les blocs ne sont pas minéralisés.

- **La latérite**

La latérite retenue pour la confection des éprouvettes a été étudiée à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé (Dongmo 1991). Les essais d'identification ont porté sur l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg et l'essai Protor. Le pourcentage des fines est de 11%. Il a donc fallu apporter une correction pour que cette latérite respecte le critère de granulométrie de Ramillon et Cratère à savoir : la proportion des fines doit être comprise entre 15 et 30%. Cette étude a montré que la plasticité de ce sol est de 15,5%.

- **Le ciment**

Le liant hydraulique utilisé est le ciment CIMENCAM 325 de l'usine de Douala. Il est composé de :

- 80 à 85% de clinker
- 10 à 15% de pouzzolane de Djoungo
- 5% de gypse

- **La pouzzolane**

La pouzzolane naturelle que nous avons utilisée pour la confection des éprouvettes est issue du site de Djoungo. D'après l'étude faite par Bidjocka (1990), la porosité des grains est de 0,49 alors que sa masse volumique absolue est de 2850 kg/m^3 . La teneur en eau varie selon la position du point de prélèvement qui peut se trouver soit en superficie soit en profondeur. La distribution de la taille des pores dans les grains est variable au sein d'un granulat donné. L'essentiel des pores inclus dans les granulats a des diamètres qui varient de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres. L'analyse chimique de cette pouzzolane est présentée dans le *tableau 3.1*.

Tableau 3.1 : Analyse chimique de la pouzzolane naturelle de Djoungo

	Constituants											Total
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.	
Teneur (%)	45,79	15,68	12,83	0,17	6,26	9,60	3,54	1,39	2,84	0,60	0,31	99,01

La masse volumique apparente des granulats est utile pour la détermination de la quantité de granulats à mettre en œuvre dans la fabrication des bétons. Différentes masses

volumiques de la pouzzolane utilisée dans cette étude ont été évaluées ainsi que la teneur en eau à l'état naturel. Les résultats sont présentés dans le *tableau 3.2*.

Tableau 3.2 : Masse volumique, porosité et teneur en eau de la pouzzolane à l'état naturelle.

ρ_h (kg.m^{-3})	ρ_g (kg.m^{-3})	ρ_{vhg} (kg.m^{-3})	ρ_{hg} (kg.m^{-3})	ρ_a (kg.m^{-3})	e	w(%)
720	1440	2780	1460	2850	0,49	6

Dans le *tableau 3.2* les masses volumiques sont exprimées en kg.m^{-3} et ont les significations suivantes :

- ρ_h : masse volumique apparente des granulats à l'état naturel (les vides intergranulaires sont pris en compte),
- ρ_g : masse volumique réelle des granulats prémouillés (les vides intergranulaires ne sont pas pris en compte),
- ρ_{vhg} : masse volumique vraie mesurée au porosimètre à mercure,
- ρ_{hg} : masse volumique apparente mesurée au porosimètre à mercure,
- ρ_a : masse volumique absolue mesurée au picnomètre,
- e : porosité des grains,
- w : teneur en eau des granulats à l'état naturel.

La porosité des grains de pouzzolane, volume de vide dans l'unité de volume réel, est donnée par la relation (3.1).

$$e = \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_a} \quad (3.1)$$

La pouzzolane naturelle utilisée est constituée de scories basaltiques riches en alcalis et présente une phase vitreuse. Sa teneur en alcalis équivalente Na_2O ($\text{Na}_2\text{O}+0,66\text{K}_2\text{O}$) est de 4,46%. Cette pouzzolane manifeste une forte activité pouzzolanique particulièrement à long terme. Les échantillons contenant des granulats de cette pouzzolane semblent manifester un retrait dans les solutions de NaOH et KOH ainsi que dans les bains de nitrites. Cette pouzzolanité rend leur usage avantageux en cimenterie où elles serviraient comme ajouts réactifs.

• La sciure de bois

La sciure de bois blanc (Ayous) a été choisie en raison de sa disponibilité sur le territoire camerounais. Cette essence est aussi parmi les plus légères que l'on rencontre au Cameroun. Le bois étant un matériau fibreux et plus léger que la latérite, son incorporation dans les briques de terre a pour objectif d'obtenir un matériau plus léger et meilleur isolant thermique que la brique de terre comprimée.

3.1.2 -Dispositif expérimental de fabrication

Le dispositif expérimental de fabrication des éprouvettes comprend le moule métallique avec ses accessoires et la presse hydraulique. La photo de la *figure 3.1* montre le moule métallique ainsi que les éprouvettes réalisées.



Figure 3.1 : Moule (à gauche), une éprouvette en latérite + sciure de bois (au centre) et un lot de trois éprouvettes (à droite)

Le moule est fabriqué avec une tôle en acier d'épaisseur 8 mm pour pouvoir supporter la pression de compactage sans déformation. Les ouvertures sur le couvercle et le fond du moule permettent son remplissage et le démoulage de l'éprouvette à la fin du compactage. Deux plaques métalliques coulissant à l'intérieur du moule permettent de bien aplatir les surfaces de l'éprouvette. Deux planches d'épaisseur 8 cm servent de socle.

La presse hydraulique, utilisée pour le compactage, présentée sur la figure 3.2, est adaptable pour les essais tels que la compression, le fendage et la flexion.



Figure 3.2: Photo de la pression hydraulique utilisée.

3. 1.3- Préparation des mélanges à compacter

3. 1. 3. 1-Tamisage

Un double tamisage de la pouzzolane permet de ne retenir qu'une granulométrie de diamètre compris entre 4 mm et 12,5 mm. Cette granulométrie permet d'éliminer les fines de pouzzolane qui ne sont pas assez poreuses. En effet, la présence des pores (remplies d'air) contribue à diminuer la valeur de la conductivité thermique du matériau et à en faire un meilleur isolant thermique. Par ailleurs la résistance mécanique augmente avec les fines de pouzzolane du fait de la diminution du volume d'air. Une granulométrie de diamètres compris entre 4 mm et 12,5 mm a été choisie dans le souci de trouver un compromis entre une bonne isolation thermique et une résistance mécanique acceptable pour les bétons.

La granulométrie de la latérite utilisée pour les éprouvettes en latérite et celles en latérite + sciure de bois est inférieure à 12,5 mm également obtenue par tamisage. Etant donné

que la pouzzolane ne contient plus de fines, nous n'avons utilisé que les fines de latérite obtenues avec un tamis de maille 4 mm, pour la réalisation des éprouvettes en latérite + pouzzolane.

3. 1.3. 2- Teneur en eau

Pour réaliser le compactage, de l'eau est ajoutée aux matériaux préalablement séchés jusqu'à la consistance désirée, à savoir jusqu'à ce que le mélange soit aisément malléable. La quantité d'eau nécessaire pour obtenir cette consistance varie entre 18% et 25% de la masse totale.

La teneur en eau représente le pourcentage d'eau contenu dans un échantillon. Elle s'exprime en pourcentage et est calculée de la manière suivante :

$$\omega = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (3. 2)$$

m_h et m_s représentent respectivement les masses humide et sèche de l'échantillon. Avant de procéder au compactage d'une éprouvette, on prélève une quantité dont on fait l'extrait sec afin de déterminer la teneur en eau du mélange. La masse de chaque éprouvette après séchage est également mesurée juste après la mesure de sa conductivité thermique. On procède ensuite à l'extrait sec en vue de déterminer la teneur en eau de l'éprouvette.

Les essais d'absorption d'eau, destinés à déterminer la quantité d'eau absorbée par capillarité, ont été préalablement effectués. Chaque essai a consisté à mesurer l'accroissement de la masse d'eau de l'éprouvette placée dans un récipient dont le niveau est maintenu à 1 cm au dessus de la face inférieure de l'éprouvette. On en déduit le temps au bout duquel l'éprouvette est saturée en eau.

Les éprouvettes sont de forme parallélépipédique de dimensions 27 cm x 27 cm x e ; où e est l'épaisseur de l'échantillon. Cette épaisseur varie, pour les éprouvettes fabriquées, entre 3,75 cm et 5,5 cm. Douze éprouvettes de quatre compositions différentes ont été fabriquées :

- 3 éprouvettes en latérite enrichie de 8% de ciment,
- 3 éprouvettes en latérite et sciure de bois enrichie de 10% de ciment ,
- 3 éprouvettes en latérite et pouzzolane enrichie de 10% de ciment,
- 3 éprouvettes en pouzzolane et sciure de bois enrichie de 10% de ciment.

Tableau 3. 3: Composition des mélanges étudiés

	Composition massique
Latérite	92% latérite +8% ciment
Latérite + pouzzolane	45% latérite +45% pouzzolane +10% ciment
Latérite + sciure de bois	81% latérite +9% sciure de bois +10% ciment

La différence entre les éprouvettes de même composition est la pression de compactage. Les épaisseurs sont aussi légèrement différentes. Dans le *tableau 3.3* la ligne correspondante au mélange pouzzolane + sciure de bois n'apparaît pas. En effet, après le séchage des éprouvettes de ce mélange leur rupture a été immédiate lorsqu'on a voulu les

soulever. Cette fragilité peut être due soit à l'insuffisance de la quantité de ciment qui joue ici le rôle de liant, soit à sa nature non adaptée comme liant pour cette composition. Par conséquent la conductivité thermique de ce matériau n'a pas été déterminée.

3. 1. 3.3 - Séchage des éprouvettes

Le séchage des éprouvettes a été effectué à l'air libre jusqu'à la stabilisation de la masse de l'éprouvette. Nous donnons en annexe A3 un exemple de courbe de séchage.

La *figure 3.3* montre trois éprouvettes l'une en latérite, l'autre en latérite avec incorporation de pouzzolane et la dernière en latérite avec incorporation de sciure de bois.



Figure 3.3 : Trois éprouvettes en latérite (à droite), latérite+pouzzolane (au milieu) latérite+ sciure de bois (à droite)

Sur la *figure 3.4*, on remarque la disposition des granulats de pouzzolane entre les fines de latérite sur un échantillon latérite+pouzzolane.

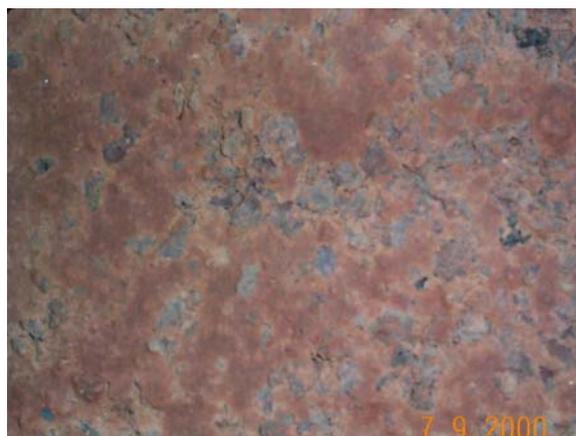


Figure 3. 4 : Coupe d'une éprouvette en latérite + pouzzolane

3.2- Mesure de la conductivité thermique

3.2.1 -Méthodologie expérimentale

3.2.1.1-Dispositif expérimental

Nous avons quand à nous utilisé la méthode dite des boîtes qui a été mis au point par le Laboratoire d'Études thermiques et solaires de l'Université Claude Bernard Lyon I (Ngohe Ekam, 1992). Un dispositif similaire a été monté au LAEN. Le schéma de l'équipement utilisé pour la mesure de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique est présenté sur la *figure 2.13*. C'est une enceinte isotherme dont le fond est équipé d'un échangeur de chaleur. Il contient de l'eau glycolée maintenue à une basse température par un cryostat. La mesure de la conductivité thermique est basée comme nous l'avons vu au chapitre 1 sur le transfert de chaleur en régime permanent. L'échantillon dont on veut déterminer la conductivité thermique est situé entre deux ambiances chaude et froide. Un bilan des échanges thermiques a permis d'établir l'expression de la conductivité thermique λ donnée par la relation (2.3) :

$$\lambda = \frac{e}{S(T_C - T_F)} \left[\frac{V^2}{R} - C_1(T_B - T_A) \right] \quad (3.3)$$

où :

- V tension appliquée aux bornes de la plaque chauffante
- R résistance de la plaque
- C_1 coefficient de déperdition de chaleur
- T_A température ambiante de la salle d'expérience
- T_B température à l'intérieur de la boîte
- T_C température de la face chaude de l'échantillon
- T_F température de la face froide de l'échantillon
- S surface de l'échantillon
- e épaisseur de l'échantillon

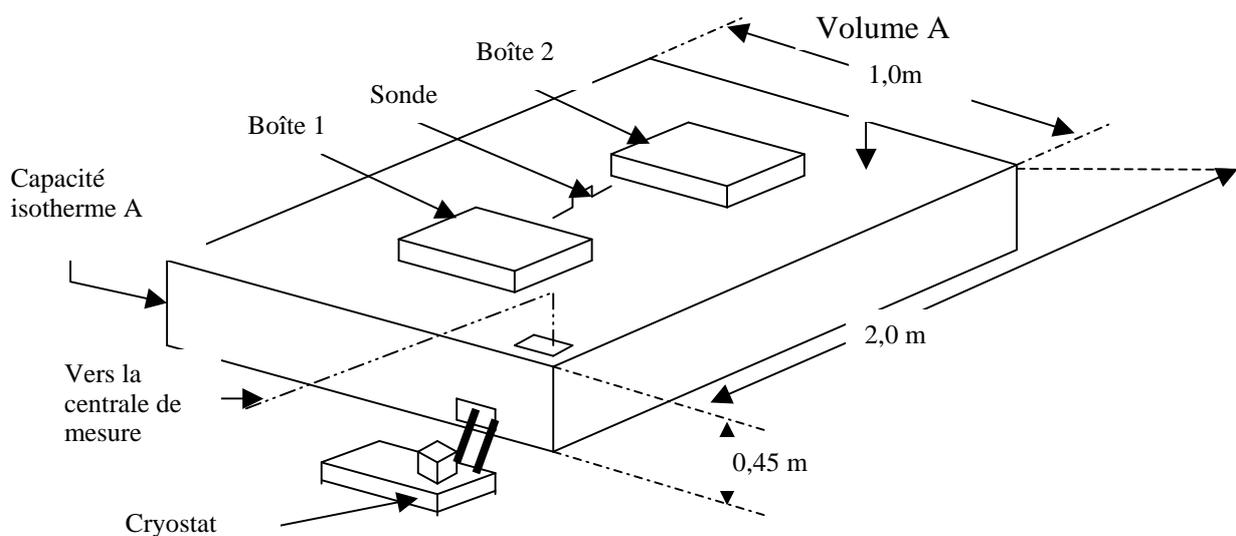


Figure 3.5 : Schéma du dispositif de la méthode des boîtes

Le coefficient de déperditions C_1 a été évalué par Mourtada (1982) par utilisation des formules de Carslaw et Jaeger (1959) qui permettent de déterminer l'écoulement thermique à travers un dièdre en régime permanent, et celles de Langmuir cité par Ngohe-ekam (1992) donnant les valeurs du coefficient de forme pour un coin. Pour une boîte en contreplaqué avec du styrodur comme isolant dont les épaisseurs sont respectivement de un et quatre centimètres, l'application de ces formules donne d'après Mourtada (1982): $C_1 = 0.16 \text{ W/K}$.

Lorsque l'échantillon est inséré sur la face ouverte de la boîte B, les sondes utiles ayant au préalable été mises en place, une tension arbitraire V est appliquée aux bornes de l'émetteur C, à l'aide d'un autotransformateur. Le cryostat est réglé à une température de consigne T_0 . Cette température fait alors circuler dans l'échangeur R, de l'eau glycolée à la température T_0 . La chaleur émise par C et celle absorbée par R créent de part et d'autre de l'échantillon E des ambiances chaude (en haut) et froide (en bas) et produisent un gradient de température dans l'échantillon, dans le sens de l'épaisseur.

La conductivité donnée par l'équation (3.3) est bien une conductivité thermique mesurée lorsque le régime permanent est atteint.

3.2.1.2-Etalonnage des sondes

Les résistances des fils de connexion et l'encrassement de quelques fiches modifient les valeurs des résistances de sondes. Il est par conséquent indispensable de procéder à l'étalonnage des sondes avant leur utilisation. Les courbes d'étalonnage des trois sondes utilisées pour les mesures des températures de l'ambiance de la boîte et de celles des surfaces supérieure et inférieure de l'échantillon sont présentées sur les figures en annexe A3.2.

Juste avant le compactage, nous avons prélevé une petite quantité du mélange qui est utilisée pour déterminer la teneur en eau. Nous avons ensuite déterminé la teneur en eau de l'éprouvette, juste après la mesure de la conductivité thermique.

Les grandeurs utilisées dans l'équation (3. 3) sont obtenues de la manière suivante :

- . l'épaisseur e est mesurée par un pied à coulisse au $1/50^\circ$: afin de prendre en compte la déformation du matériau à tester dans le domaine hygroscopique, l'épaisseur est mesurée à plusieurs endroits et une moyenne arithmétique donne la valeur à retenir.
- . la surface S est le produit de la longueur par la largeur de l'échantillon, ces dimensions étant obtenues par simple mesure à l'aide d'une règle millimétrique.
- . le quintuplet (T_A, T_B, T_C, T_F, V) les températures sont mesurées grâce sondes platine et la tension avec un multimètre à affichage numérique. Les mesures sont réalisées toutes les heures au début de la manipulation, puis toutes les cinq minutes dès que le régime permanent est atteint ; un relevé de douze quintuplets en régime permanent permet une estimation de la conductivité thermique par calcul statistique.
- . La valeur de la résistance R est mesurée à l'aide d'un multimètre, après les douze quintuplets.

Pour les relevés de températures en vue du calcul de la conductivité thermique, il est indispensable que le régime permanent soit atteint. Ce régime est généralement atteint, au cours de nos expériences, six heures après le début de l'essai. Par ailleurs la température ambiante qui intervient dans ce calcul varie et influence la précision des mesures. Chaque jour, nous avons commencé l'essai à huit heures du matin. Comme en fin de journée la température ambiante varie très peu, nous relevons les mesures à partir de dix huit heures et nous effectuons douze séries de mesures toutes les cinq minutes. Le lendemain aux environs de huit heures nous procédons au relevé d'une dernière série de mesures.

3.2.2-Resultats de mesure des conductivités thermiques

Les principaux résultats de la conductivité thermique, moyenne de 12 valeurs, des éprouvettes sont présentés dans le *tableau 3.4*. Les détails de calcul sont regroupés dans l'exemple de tableau de calcul en annexe A3.

Tableau 3.4 : Résultats expérimentaux des conductivité thermiques des matériaux étudiés

Désignation des éprouvettes		Teneur en eau (%)		e (cm)	ρ (kg.m ⁻³)	λ (W.m ⁻¹ °C ⁻¹)	Ecart type sur λ (%)
		Au compactage	Après séchage				
Latérite	L1	19,0	2,9	3,8	1491	0,75	11
	L2	19,0	2,9	4,8	1807	0,95	16
	L3	19,0	2,9	4,8	1966	1,15	9,6
Latérite + pouzzolane	LP1	16,0	7,0	4,5	1329	0,65	9,6
	LP2	16,0	7,0	4,2	1576	0,69	14
	LP3	16,0	7,0	4,6	1643	0,71	11
Latérite + sciure de bois	LS1	22,0	5,2	5,6	1050	0,50	12
	LS2	22,0	5,2	5,5	1098	0,51	16
	LS3	22,0	5,2	5,4	1207	0,65	19

Les masses volumiques présentées dans le *tableau 3.4* sont obtenues en mesurant les différentes masses grâce à une balance dont la précision est le dixième de milligramme. Les volumes sont mesurés par déplacement de liquide grâce à une éprouvette graduée en ml. A cet effet, on relève le volume de l'eau puis contenue dans l'éprouvette puis on y place l'échantillon on note le nouveau volume. Le volume de l'échantillon est la différence entre les volumes initial et final de l'eau contenue dans l'éprouvette. L'expérience est faite assez rapidement pour éviter l'influence d'absorption d'eau par capillarité qui peut entraîner une augmentation du volume de l'échantillon.

Les éprouvettes en latérite + sciure de bois sont plus épaisses que les autres en raison de l'augmentation de leur volume juste après le démoulage. Nous pensons que l'eau absorbée par le bois modifie les propriétés physiques du bois dont son module d'élasticité. L'augmentation du volume de l'éprouvette après le compactage peut s'expliquer par le fait que la limite d'élasticité n'est pas atteinte au cours de la pression subie par le mélange. La sciure de bois a donc tendance à reprendre ses dimensions initiales dès que cesse l'effort de compression.

En dépit des précautions prises pour obtenir la même épaisseur pour tous les échantillons, cette épaisseur varie après le démoulage. La conductivité thermique du matériau étant indépendante de l'épaisseur de l'éprouvette, cette variation d'épaisseur n'a pas d'incidence sur les résultats expérimentaux.

Il apparaît dans le *tableau 3.4* que la conductivité thermique augmente avec la masse volumique qui croît avec la pression de compactage. Ce résultat est à lier directement à la diminution de la porosité en fonction de la pression de compactage. En effet, l'augmentation de la pression de compactage réduit l'espace que l'air, de faible conductivité thermique, occupe dans le matériau.

3.2.3-Influence de la teneur en ciment sur la conductivité thermique

La figure 3.5 présente l'influence de la teneur en ciment sur la conductivité thermique des éprouvettes en latérite. Cette conductivité croît lorsqu'on augmente la teneur en ciment dans le matériau. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le ciment constitué de fines, réduit le nombre de pores remplis d'air dont la conductivité thermique est relativement faible.

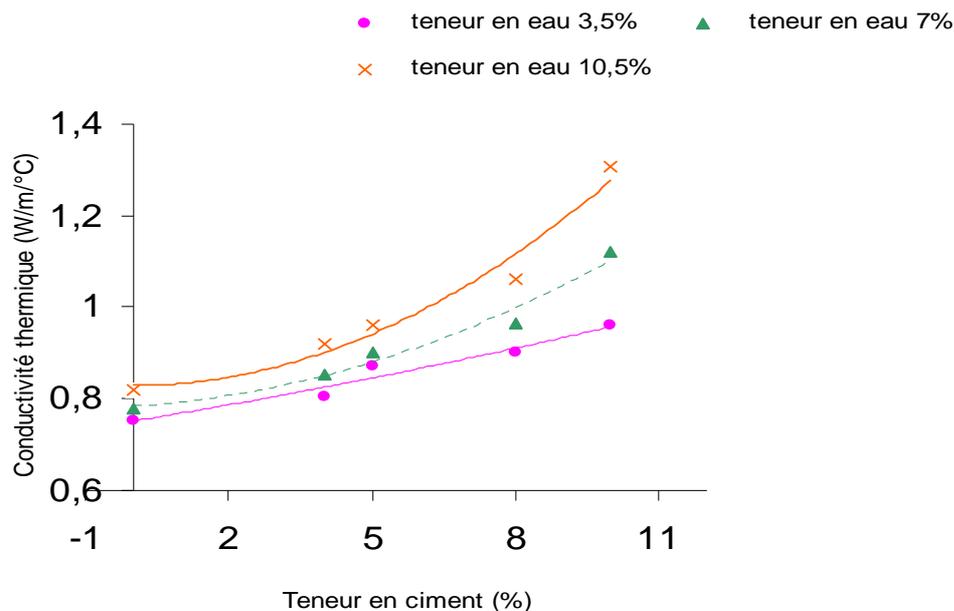


Figure 3.5 : Variation de la conductivité en fonction de la teneur en ciment.

3.2.4-Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique

Pour cette étude, nous commençons par obtenir des éprouvettes complètement sèches (extrait sec stabilisé). Au début de chaque essai, l'éprouvette humide est placée dans une étuve dont la température est réglée à 110°C. Sa masse est déterminée toutes les 24 heures jusqu'à la stabilisation.

Après l'extrait sec, nous procédons à l'humidification des éprouvettes dans une enceinte humide régulée en température et en humidité. Sa masse est mesurée au fur et à mesure de son humidification afin de déterminer sa teneur en eau. On réalise ensuite la mesure de la conductivité thermique. L'échantillon est ensuite remis dans l'enceinte. On obtient ainsi une série de mesures de conductivité d'un matériau pour différentes teneurs en eau.

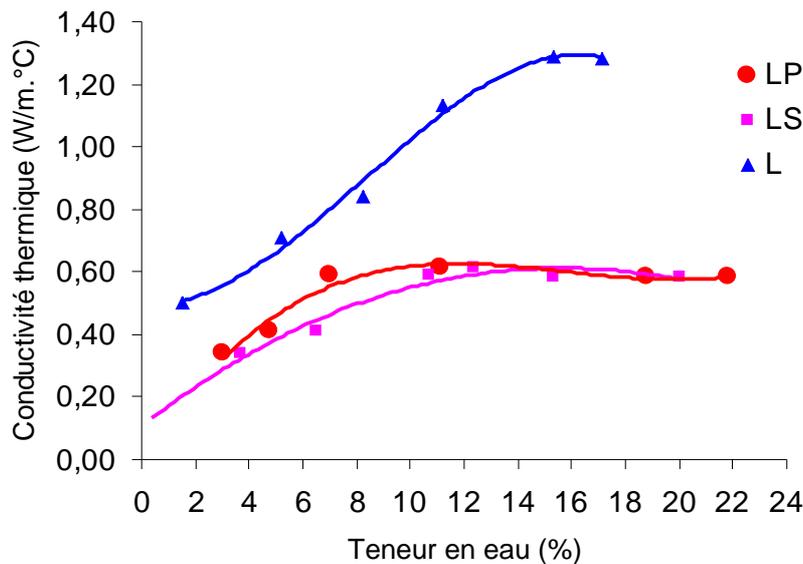


Figure 3.6 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.

La figure 3.6 montre l'évolution de la conductivité thermique des trois matériaux étudiés en fonction de la teneur en eau. On constate que la conductivité thermique croît logiquement en fonction de la teneur en eau. En effet, l'humidification croissante des matériaux se traduit par un remplacement progressif de l'air contenu dans les pores par l'eau. La conductivité thermique de l'eau est beaucoup plus élevée que celle de l'air ($0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ contre $0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) à la même température. L'humidification des briques entraîne par conséquent une augmentation de leur conductivité thermique.

Le comportement thermique des matériaux étudiés est fonction de la distribution de l'eau au sein de ces matériaux, laquelle se fait suivant trois étapes :

- A l'état sec ou pour des teneurs en eau faible, le transfert de chaleur se fait essentiellement au niveau des points de contact entre les grains formant le matériau, ce qui peut expliquer la faible augmentation de la conductivité thermique.
- L'augmentation de la teneur en eau, entraîne la formation de ponts thermiques ou ponts de conduction de la chaleur au sein du matériau avec comme résultat l'augmentation de sa conductivité thermique.
- Le comportement thermique du matériau hygroscopique est influencé par la teneur en eau qui atteint sa valeur maximale correspondant à un état de saturation relatif. Lorsque la teneur en eau atteint une valeur maximale, correspondant à un état de saturation ou état de formation de chemins continus, la conductivité thermique tend à se stabiliser.

La conductivité d'une éprouvette en latérite augmente rapidement avec la teneur en eau mais se stabilise lorsque la teneur en eau atteint 15%. Cette augmentation rapide peut s'expliquer par la présence de nombreux ponts thermiques pour des faibles teneurs en eau (Missenard, 1965). Cette augmentation de la conductivité avec la teneur en eau est en accord avec les travaux de Dos Santos (2000) qui montrent que lorsque l'on fait décroître la quantité de vapeur absorbée par un matériau en augmentant la porosité, on observe une décroissance de sa conductivité thermique. La combinaison de ces deux mécanismes à savoir l'augmentation d'énergie par absorption d'eau et la formation des pores suite à l'évaporation de l'eau conduit à une valeur maximale de la conductivité thermique.

Pour les éprouvettes avec incorporation de pouzzolane naturelle ou de sciure de bois, la conductivité se stabilise autour de $0,6 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, proche de celle de l'eau à l'état liquide. En

effet, la conductivité thermique du bois est inférieure à celle de l'eau et la pouzzolane étant très poreuse contient beaucoup plus d'air, que la latérite.

3.3- Mesure de la diffusivité thermique

3.3.1- Dispositif de mesure

Le dispositif utilisé est le même que celui de la méthode des boîtes pour la mesure de la conductivité thermique. L'échantillon dont on mesure la diffusivité thermique est placé dans une boîte à faces réfléchissantes et thermiquement bien isolée. Cet échantillon reçoit, d'une source de rayonnement à flux constant constituée d'une lampe à incandescence de 500 W, une impulsion thermique. La distance séparant la lampe de l'échantillon peut être réglée grâce à la vis sur laquelle est fixée la lampe (*figure 3.7*).

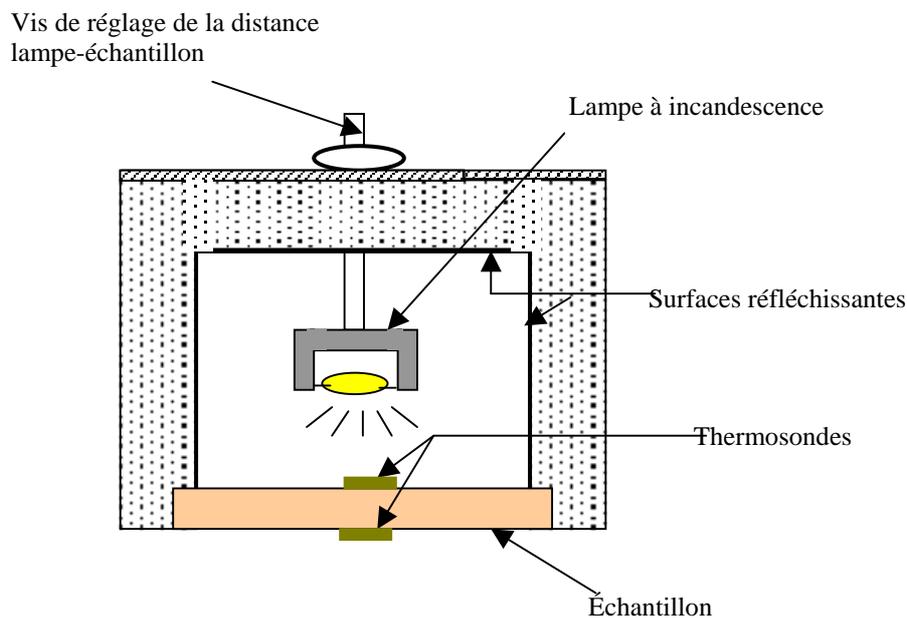


Figure 3.7 : Vue en coupe de la boîte de mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash

3.3.2- Résultats de mesure de la diffusivité thermique

Lors de nos expériences, nous avons constaté qu'une durée d'excitation de 30 s est suffisante pour obtenir une élévation significative de la température de la face arrière. Un exemple de dépouillement du thermogramme de la face non irradiée d'une éprouvette en latérite + sciure est présenté sur la *figure 3.8*.

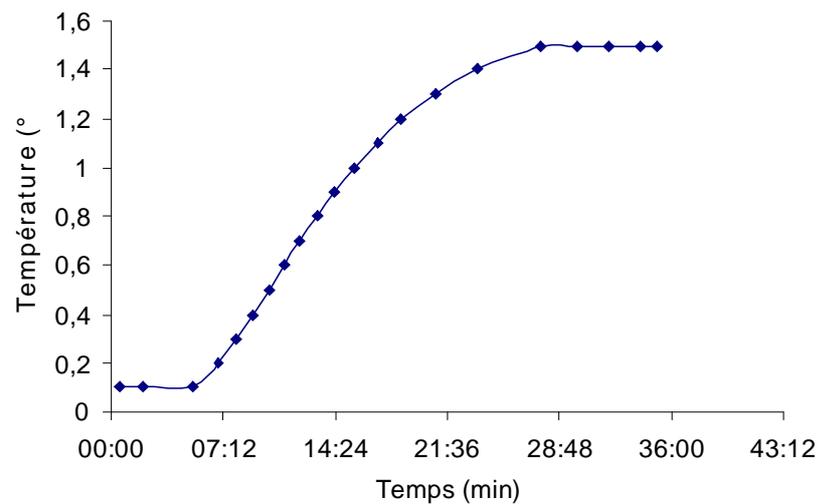


Figure 3. 8 : Thermogramme expérimental de la face arrière d'une éprouvette en Latérite + sciure de bois

Une première estimation de la diffusivité est réalisée grâce aux formules données par les relations (2.29) applicables cependant pour une impulsion de flux, ce qui n'est pas le cas dans nos expériences. L'élévation maximale de température est déduite de la figure 3. 8. Chacune des valeurs de t_p est déterminée grâce à une corrélation obtenue en traçant une courbe entre la durée et l'élévation de température. Un exemple de cette courbe est présenté sur la figure 3.9.

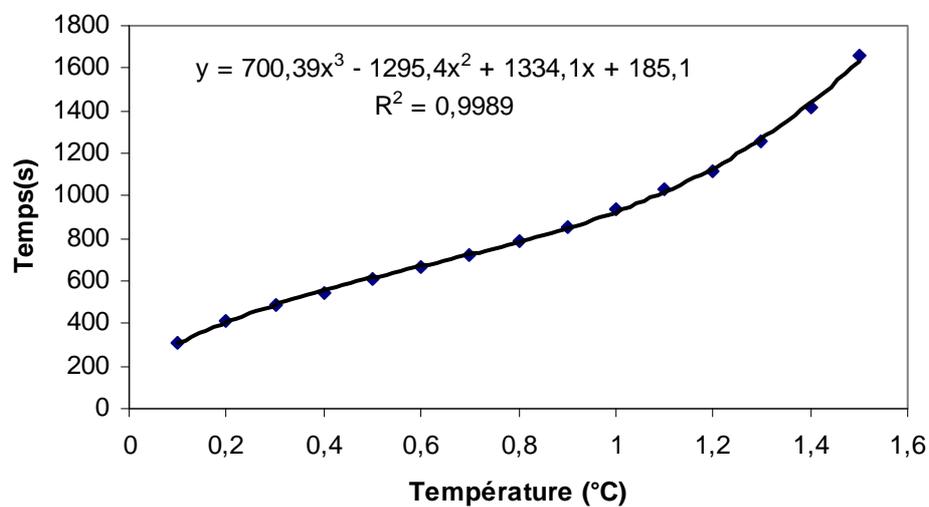


Figure 3. 9 : Corrélation entre élévation de température de la face arrière (non irradiée) et durée de diffusion de la chaleur.

Les résultats approchés de la diffusivité thermique estimés par les relations (2.29) des matériaux étudiés sont regroupés dans le tableau 3. 5. Un exemple de calcul détaillé est donné en annexe A3.

Tableau 3.5 : Valeurs des diffusivités thermiques par la méthode flash

	Pression de compactage P (bar)	Diffusivité (2.10) $a \times 10^7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
L	20	5,39
	15	5,18
	10	4,6
LS	20	3,03
	15	2,61
	10	2,34
LP	20	4,01
	15	3,83
	10	3,74

3.3.3 -Validation de la modélisation de la méthode flash

La modélisation de la méthode flash a été appliquée aux résultats expérimentaux des 9 essais que nous avons réalisés sur les différents matériaux et a permis de simuler de manière très satisfaisante les thermogrammes. Comme on peut le constater sur l'exemple de la *figure 3.10*, les courbes expérimentales et celles obtenues par simulation sont en parfait accord. Ce programme a donc permis d'obtenir une valeur plus fiable et justifiable de la diffusivité thermique. Le *tableau 3.6* compare quelques valeurs estimées données par la relation (2.29) des diffusivités thermiques, des matériaux étudiés, aux résultats du modèle complet de la relation (2.30).

Tableau 3.6 : Valeurs comparées des diffusivités thermiques estimées par la méthode flash

	Pression de compactage P (bar)	Diffusivité modèle « impulsion » (2.29) $a \times 10^7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Diffusivité modèle complet (2.11) $a \times 10^7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Ecart (%)
L	20	5,39	5,36	0,56
	15	5,18	5,26	1,52
	10	4,6	4,91	6,31
LS	20	3,03	3,0	0,99
	15	2,61	2,55	2,30
	10	2,34	2,37	1,27
LP	20	4,01	4,40	8,86
	15	3,83	4,05	5,43
	10	3,74	3,86	3,11

On remarque sur le *tableau 3.6* que la diffusivité thermique décroît lorsqu'on augmente la pression de compactage pour les trois matériaux étudiés. En effet, l'augmentation de la pression a pour effet la réduction du nombre de pores et par conséquent de la quantité d'air dans les échantillons.

Sur la *figure 3.10*, en abscisse le temps en seconde et en ordonnée la différence de température en °C.

Latérite incorporant de la sciure de bois

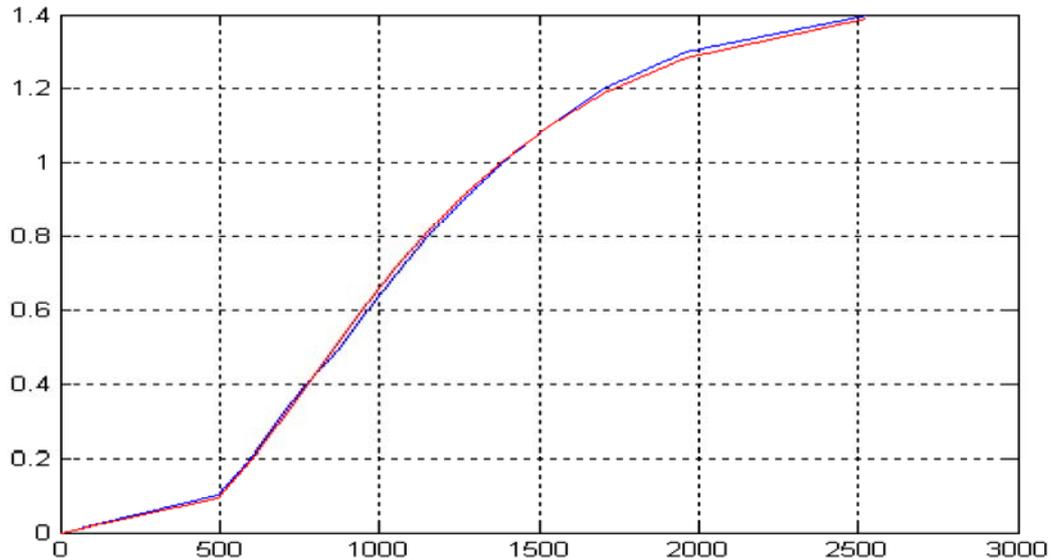


Figure 3.10 : Thermogramme expérimental et simulé d'expérience de la méthode Flash

3.3.4- Influence de la teneur en ciment sur la diffusivité thermique

Comme on peut le constater sur la *figure 3.11*, la diffusivité des BTS en latérite diminue lorsqu'on y augmente la teneur en ciment. Ce phénomène peut s'expliquer par l'observation faite sur l'influence de la teneur en ciment sur la conductivité thermique puisque la diffusivité est inversement proportionnelle à la conductivité thermique.

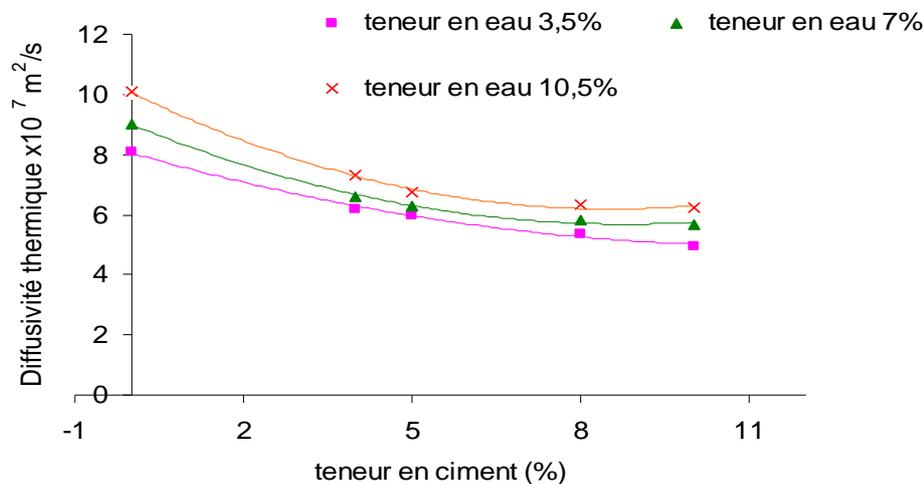


Figure 3.11 : Influence de la teneur en ciment sur la diffusivité thermique

3.3.5- Influence de la teneur en eau sur la diffusivité thermique

La diffusivité thermique croît aussi avec la teneur en eau comme on peut le constater sur la *figure 3.12*. Elle passe par un maximum pour chacun des matériaux étudiés. Cette évolution de la diffusivité est en accord avec d'autres travaux scientifiques (Chaker et al., 1998). On observe un maximum de diffusivité thermique pour une teneur en eau de 15% pour la latérite, et de 8% pour la latérite + pouzzolane et la latérite + sciure de bois.

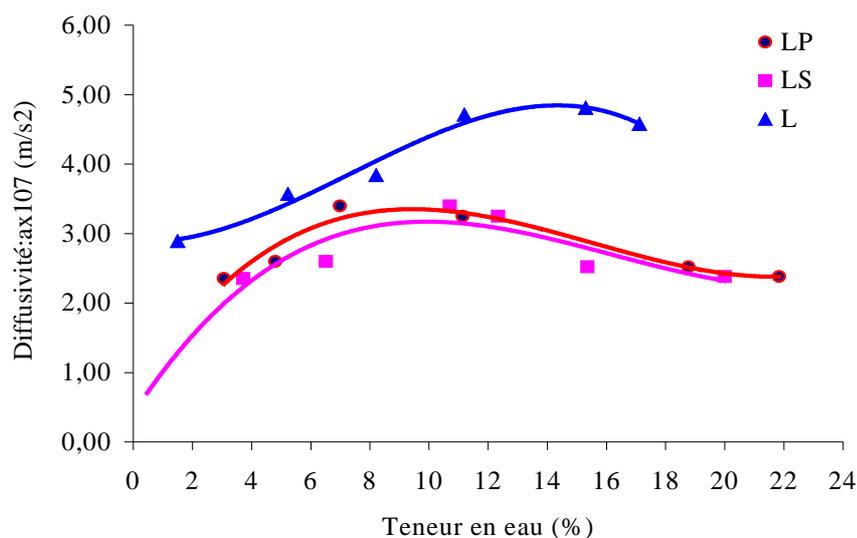


Figure 3.12 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau

3.4- Mesure de la chaleur spécifique

3.4.1- Matériels

Nous disposons pour cette étude du matériel suivant :

- une bombe calorimétrique de marque PROLABO,
- une centrale d'acquisition de données reliée à un ordinateur,
- une balance de précision 0,1g,
- des thermocouples de type K.
- un système d'acquisition des données relié à un PC.

Les échantillons utilisés pour cette expérimentation ont une épaisseur d'environ 2 cm. La valeur moyenne de la diffusivité thermique des matériaux étudiés est de $4.10^{-7} m^2.s^{-1}$. La température maximale de l'eau est atteinte environ 900 s après l'introduction de l'échantillon dans le calorimètre comme on peut le constater sur la *figure 3.14*. Les échantillons sont placés dans une étuve réglée à la température de 110 °C pour en éliminer toute l'eau qu'ils contiennent (extrait sec). La chaleur spécifique mesurée correspond par conséquent à celle des éprouvettes sèches.

3.4.2-Valeur en eau du calorimètre

La courbe de la *figure 3.13* montre un exemple de l'évolution de la température de l'eau enregistrée par la centrale d'acquisition des données du LAEN (Laboratoire d'Energétique de l'ENSP). On en déduit la température maximale atteinte par l'eau du calorimètre. Une série de mesure a permis de trouver la valeur en eau du calorimètre et ses accessoires égale à 60g.

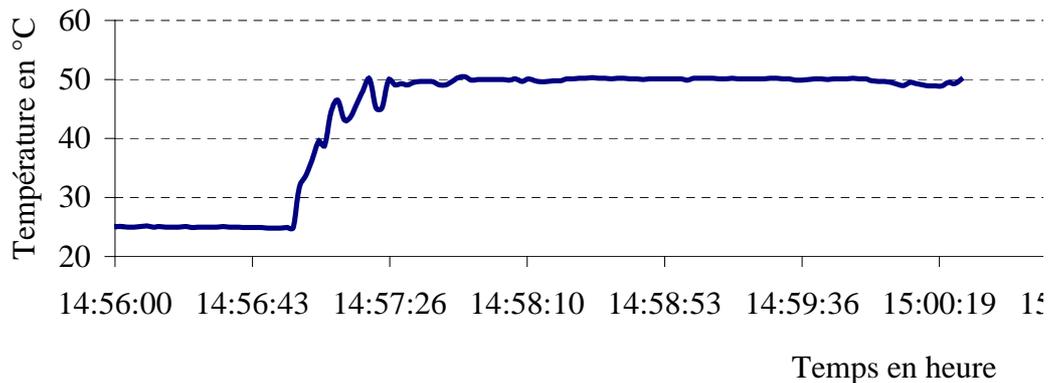


Figure 3.13 : Evolution de la température de l'eau du calorimètre après ajout de l'eau chaude

3.4.3 -Détermination du coefficient global de perte thermique

Considérons le calorimètre et l'eau qui s'y trouve en équilibre thermique. La variation de la température de l'eau est due principalement aux pertes thermiques. En effet, l'eau du calorimètre échange avec la salle d'expérience de la chaleur par conduction, rayonnement et convection. Le bilan thermique qui en résulte s'exprime par la relation suivante :

$$U(T_e - T_a) = -m \frac{dT_e}{dt} \quad (3.4)$$

où T_e désigne la température de l'eau du calorimètre et T_a la température de la salle d'expérience. En négligeant la variation de la température T_a de la salle, pendant la durée de l'expérience, l'intégration de la relation (3.4) donne :

$$\ln \left(\frac{T_e(t) - T_a}{T_{e0} - T_a} \right) = -\frac{U}{mc_e} t \quad (3.5)$$

La pente K de la courbe $\ln \left(\frac{T_e(t) - T_a}{T_{e0} - T_a} \right) = f(t)$ (*figure 2.14*) ci-dessous permet de calculer le coefficient U :

$$K = -\frac{U}{mc_e} \quad \text{et} \quad U = mc_e \cdot K$$

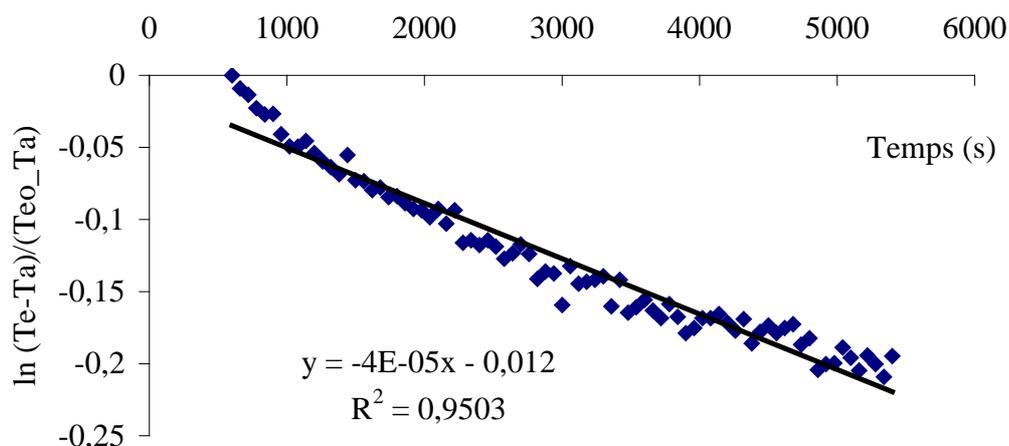


Figure 3.14 : Détermination graphique du coefficient global de perte thermique de la bombe calorimétrique

Avec $K = -4 \cdot 10^{-5}$ et une surface d'échange $S = 0,452 \text{ m}^2$, on trouve $U = 0,563 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

3.4. 4- Résultats et discussions

La figure 3.15 montre l'évolution de la température de l'eau du calorimètre, relevée à partir de l'instant où on y introduit l'échantillon solide sorti immédiatement de l'étuve. Cette courbe permet d'obtenir les valeurs de température nécessaire pour déterminer la chaleur spécifique du matériau sec.

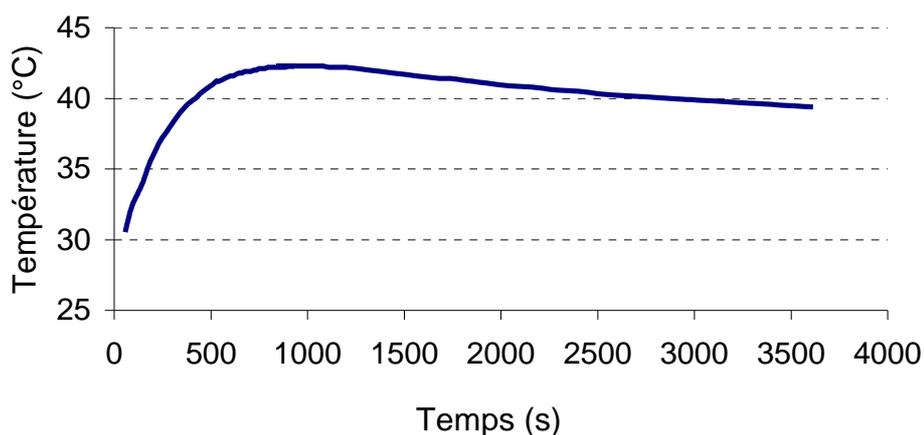


Figure 3.15 : Evolution de la température du calorimètre après introduction de l'échantillon sorti de l'étuve.

Les résultats de la chaleur spécifique des matériaux étudiés sont regroupés dans le tableau 3.7, où chacune des valeurs est la moyenne de trois mesures.

Le coefficient de convection entre l'eau liquide et le solide est élevé. Si de plus la diffusivité de l'échantillon n'est pas trop faible on peut faire l'hypothèse simplificatrice $T_{s1} = T_e$. En fait $T_{s1} \geq T_e$, donc C_s calculée par la relation (2. 30) est évaluée par défaut.

Tableau 3.7 : Résultats de mesure de la chaleur spécifique des matériaux étudiés

Désignation des mélanges		Masse Volumique (kg/m ³)	Teneur en eau (%)	Chaleurs spécifiques (kJ/kg.°C)	
				sèche	humide
Latérite	L1	2023	3,45	1,01	1,12
	L2	1930	3,41	0,90	1,01
	L3	2070	3,34	1,10	1,20
Latérite + pouzzolane	LZ	1734	2,71	0,95	1,04
	LZ	1777	2,82	0,91	1,0
	LZ 3	1772	2,38	0,97	1,04
Lat érite + sciure de bois	LS	1220	3,25	0,82	0,92
	LS	1274	3,69	0,91	1,02
	LS 3	1241	3,76	0,91	1,03

3.5 - Comparaison des résultats expérimentaux aux valeurs calculées

Les trois propriétés thermophysiques, à savoir la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique sont liées par la relation $a = \frac{\lambda}{\rho c}$. Chacune des grandeurs peut être calculée si on connaît les valeurs expérimentales des deux autres grandeurs. Les résultats comparés des valeurs expérimentales et calculées sont présentés dans le *tableau 3.8*.

Dans le *tableau 3.8*, l'indice ex désigne les valeurs expérimentales et l'indice ca les valeurs calculées. Les écarts entre les valeurs expérimentales et calculées de la diffusivité thermique est acceptable (varie entre 0,5% et 22%) compte tenu des incertitudes, en particulier sur la masse volumique, sauf pour la latérite + sciure de bois. On notera que c'est le matériau qui présente la plus faible diffusivité thermique. Cet écart pourrait s'expliquer par le fait que ce matériau est plus hygroscopique que les autres. La présence d'une plus grande quantité d'eau pourrait expliquer sa faible diffusivité thermique expérimentale. Nous avons aussi montré que la mesure de la capacité calorifique est évaluée par défaut ce qui peut avoir contribué à augmenter l'écart entre les résultats expérimentaux et calculés de diffusivité thermique.

Tableau 3.8 : Résultats expérimentaux et calculés des propriétés thermophysiques.

	Pression compactage (bar)	Diffusivité thermique $\times 10^7$ (m ² /s)			Conductivité thermique			Capacité calorifique (kJ/kg)		
		a_{ex} (2.29)	a_{ca}	Ecart (%)	λ_{ex}	λ_{ca}	Ecart t (%)	$\rho_{ex}C_{ex}$	$\rho_{ex}C_{ca}$	Ecart (%)
Latérite	20	5,39	4,19	22	1,03	1,04	0,96	2265	2063	8,92
	15	5,18	4,87	5,98	0,87	1,01	13	1949	1872	3,95
	10	4,6	3,82	16	0,79	0,89	11	2484	2111	15
Latérite + Pouzzol.	20	4,01	3,79	5,49	0,56	0,62	9,68	1803	1664	7,71
	15	3,83	3,85	0,52	0,49	0,60	18	1777	1705	4,05
	10	3,74	3,71	0,80	0,46	0,58	20	1842	1718	6,73
Latérite+sciure	20	3,03	4,92	38	0,46	0,44	4,35	1134	1305	13
	15	2,61	4,26	38	0,43	0,38	5,56	1299	1490	12
	10	2,34	4,33	45	0,36	0,34	5,56	1278	1365	6,37

3.6-Propriétés hygroscopiques des matériaux étudiés

Pour établir les isothermes d'absorption et de désorption de nos matériaux, nous avons placé dans une enceinte régulée en température et en humidité, de petits échantillons de dimensions 4x3x3 cm. Nous avons fait nos essais à la température de 25°C qui est très proche de la moyenne journalière des températures maximales de la ville de Yaoundé.

On commence par faire un extrait sec, de matériau qu'on dépose dans une étuve et on suit la diminution de sa masse jusqu'à la stabilisation. Pour chaque humidité choisie, la masse de chaque échantillon est mesurée à intervalle de temps de 24 h jusqu'à ce qu'elle ne varie plus. La teneur en eau de l'échantillon est calculée pour cette humidité et on passe à une autre valeur. On fait ainsi croître progressivement l'humidité jusqu'à 95% (l'humidité de 100% étant très difficile à obtenir). On remarque que les courbes commencent par une humidité de 40% (figure 3.15). En effet, l'enceinte régulée en température et en humidité qui a servi pour l'expérience ne permet pas d'avoir une humidité inférieure à 40% dans les conditions climatiques locales. Pour les valeurs d'humidité inférieure à 40%, il ne sera pas possible d'avoir des renseignements sur la teneur en eau des matériaux étudiés. Pour avoir des isothermes d'adsorption/désorption qui prennent en compte toutes les valeurs d'humidité en commençant par 0, nous avons procédé à la modélisation de la méthode flash aux trois matériaux pour déterminer leurs isothermes.

Les résultats du modèle ainsi que les valeurs expérimentales des trois matériaux étudiés sont représentés sur la figure 3.15.

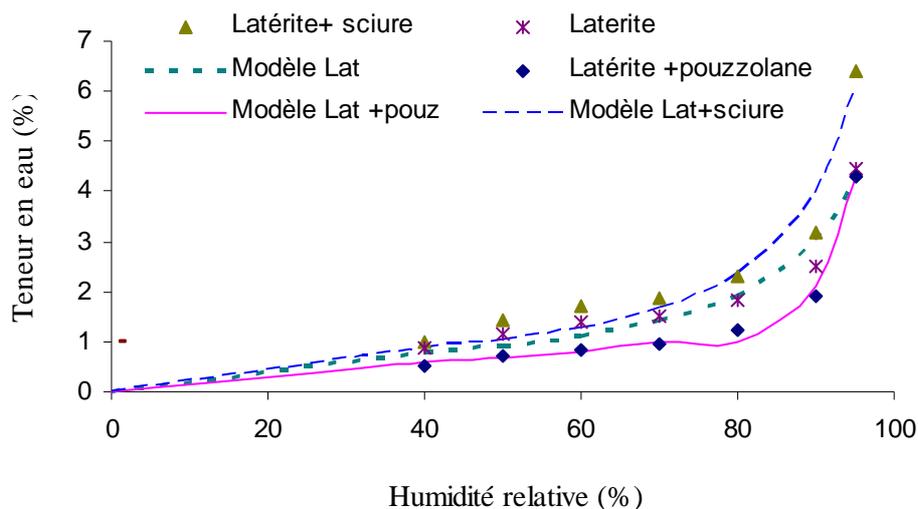


Figure 3.15 : Courbes de sorption des éprouvettes L, LP et LS

Les différents matériaux dont les courbes de sorption sont représentées sur la *figure 3.15* n'ont pas tous la même structure de pores. Le bois matériau fibreux, prend aussi rapidement l'eau et la rend tout aussi facilement. L'introduction de la sciure de bois dans les BTS favorise l'absorption de la vapeur d'eau. La pouzzolane naturelle possède des pores. Ceux-ci peuvent être ouverts ou fermés. Les BTS, avec incorporation de pouzzolane naturelle, absorbe moins de vapeur d'eau que les BTS en latérite. Cela peut s'expliquer par la présence des pores fermés dont l'enveloppe peut constituer un obstacle à la diffusion de la vapeur.

La teneur en eau maximale obtenue au voisinage de $\varphi = 100\%$, est appelée par beaucoup d'auteurs, teneur en eau critique. Cette teneur en eau est inférieure à la teneur en eau maximale que le matériau poreux est susceptible d'absorber lorsque tous ses pores sont remplis. Elle est difficile à définir car, d'une part, la teneur en eau du matériau augmente très rapidement lorsque φ tend vers 100% et que, d'autre part, il est difficile d'obtenir une ambiance dont l'humidité relative est égale à 100%. Pour remplir les pores les plus gros du matériau, il est nécessaire de le mettre directement en contact avec l'eau, on parle alors du domaine de capillarité.

CONCLUSION

L'étude expérimentale portant sur les propriétés thermophysiques et hygroscopiques donne des indications pour le choix du matériau en vue de l'isolation thermique de bâtiments. Si on prend comme seul critère de choix les performances du matériau en isolation thermique, les BTS avec incorporation de sciure de bois présentent les meilleurs avantages. Elles ont en plus une plus faible masse volumique donc sont plus légères que les BTS réalisées avec de la latérite simple et celles incorporant de la pouzzolane naturelle. Les BTS incorporant de la pouzzolane naturelle sont moins hygroscopiques et seraient préférables aux deux autres matériaux si le critère de choix est la durabilité du matériau. Les propriétés thermophysiques et hygroscopiques ne sont pas à elles seules les critères de choix. Il faudrait également tenir compte des propriétés mécaniques des matériaux étudiés dont l'étude va faire l'objet du quatrième chapitre de ce mémoire.

4. CARACTERISATION MECANIQUE

Chapitre 4

CARACTERISATION MECANIQUE

Sommaire

Introduction.....	81
4.1-Propriétés mécaniques des éprouvettes réalisées.....	82
4.1.1- Rappels théoriques.....	82
4.1.2- Fabrication des éprouvettes	82
4.1.3 -Absorption d'eau	83
4.1.4- Essais de résistance en compression et en traction simple	85
4.2- Influence de la stabilisation sur les propriétés mécaniques	89
4. 3- Influence de l'humidité sur la résistance en compression	91
Conclusion	93

Introduction

Les matériaux de constructions subissent des efforts et réagissent aux efforts simples de compression ou de traction. Ils subissent en tout premier lieu les effets de leur propre poids puis des charges qu'ils supportent. Ils réagissent dans la mesure où le sol offre une force de réaction qui les empêche de s'enfoncer. Le poids tend à écraser les matériaux, à les compresser. La qualité première d'un matériau de construction est donc de résister à cette pression sans se déformer. En effet, la résistance du poids provoquée par la réaction du sol entraîne dans le corps d'un cylindre du matériau les efforts de compression. Le cylindre résiste tant que les éléments qui le composent restent compacts. La résistance d'une colonne se mesure par sa capacité à supporter une charge sans se déformer.

La résistance à la traction mesure la capacité d'une pièce à résister à l'arrachement. En effet, c'est l'effort strictement opposé à la compression. Les matériaux qui résistent bien à la compression ne résistent pas nécessairement aussi bien à la traction.

La résistance en compression et la résistance en traction intéressent les chercheurs (Öztürk H. et Ayvaz Y., 2002) en raison de leur importance pour la construction. Dymioli et Gutleiderer (2002) ont développé un modèle qui permet, à partir des paramètres relatifs à la géométrie de la brique, de déterminer sa résistance en compression.

Afin de nous assurer que les BTS dont nous avons déterminé les propriétés thermophysiques sont bien adaptées à la construction de bâtiments, nous avons réalisé des essais en compression et en traction par flexion ainsi que des essais en traction par fendage. En effet, à défaut d'améliorer les propriétés physiques ou mécaniques des bétons, il faudrait s'assurer que l'introduction de pouzzolane naturelle ou de sciure de bois dans les matériaux n'entraîne pas une baisse de leurs propriétés mécaniques au-dessous d'une valeur critique. D'autre part, il convient de s'assurer que les éléments incorporés dans les briques de terre stabilisées ne présente pas de risques pour l'environnement. En effet, les considérations environnementales sont actuellement très débattues et connaissent une constante évolution. Ces essais consistent à mesurer à l'aide d'une presse la résistance à la rupture, à une échéance d'au moins 28 jours, d'une éprouvette normalisée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux trouvés dans la littérature.

Les matériaux retenus pour cette étude sont les mêmes que ceux ayant servi à la mesure des conductivité thermiques à savoir :

- La latérite enrichie de 8% de ciment
- La latérite + pouzzolane enrichie de 8% de ciment
- La latérite + sciure de bois enrichies de 8% de ciment.

Nous allons donc nous intéresser à l'influence de l'incorporation des déchets de bois sur les propriétés des bétons. Les caractéristiques des bétons sont très nombreuses mais ce chapitre se limite à l'étude de leur résistance mécanique. La durabilité et les propriétés thermophysiques étant traitées dans les autres chapitres. L'étude des résistances mécaniques est faite par des essais de rupture en compression, en traction simple et en traction par fendage. La durabilité des bétons, quelque soit la nature de l'agression, est conditionnée par l'accessibilité du béton aux agents agressifs. Cette accessibilité est elle même fonction des propriétés physiques du bétons durci (Aubert, 2002). L'approche durabiliste se limite à la mesure des caractéristiques physiques du béton : absorption d'eau par capillarité, perméabilité à la vapeur d'eau. La pouzzolane naturelle ou la sciure de bois est utilisée comme granulats ou liant selon ses caractéristiques et ses propriétés dans les matériaux. La quantité de matériau incorporé dépend de l'objectif fixé. Trois cas de figures peuvent être envisagés :

- Des bétons pour bâtiments, de résistance mécanique moyenne, qui comportent de ce fait un faible dosage en agrégats,

- Des bétons de faibles performances mécaniques qui peuvent inclure un dosage important d'agréats.

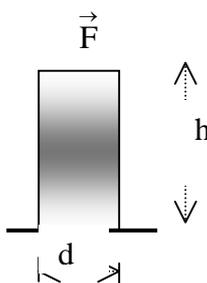
4.1-Propriétés mécaniques des éprouvettes réalisées

4.1.1- Rappels théoriques

Nous rappelons ci-dessous les méthodes usuelles de mesure des résistances en compression en traction et en traction par fendage.

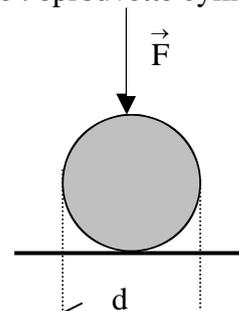
- Résistance à la compression : éprouvette cylindrique norme NFP 18-406.

diamètre $d = 16 \text{ cm}$
 hauteur $h = 2d = 32 \text{ cm}$.



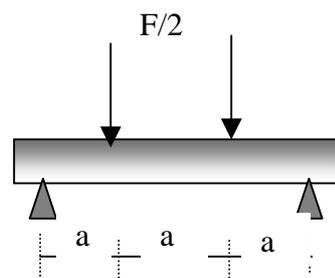
$$R_c = \frac{4F}{\pi d} \tag{4.1}$$

- Résistance à la traction par fendage : éprouvette cylindrique norme NF P 18-408.



$$R_t = \frac{2F}{\pi d h} \tag{4.2}$$

- Résistance à la traction par flexion : éprouvette parallélépipédique norme NF P 18-407



$$R_t = \frac{300 F}{a^2} \tag{4.3}$$

a: en mm

4.1.2- Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes pour les essais en compression et en traction simple par flexion sont de forme parallélépipédique et de dimensions 4 x 4 x 16 cm. Celles utilisées pour les essais en traction par fendage sont cylindriques avec un diamètre de 16 cm et une hauteur de 32 cm.

- **Dispositif expérimental de fabrication**

- Le dispositif de compactage

Le compactage du mélange pour la réalisation des éprouvettes est un compactage dynamique. Pour les éprouvettes de forme parallélépipédique, il se fait sur une table à choc normalisé en deux couches avec 60 coups par couche. Pour les éprouvettes de forme cylindrique, le compactage se fait sur une autre table à choc avec 40 coups. La *figure 4.1* montre les éprouvettes parallélépipédiques réalisées au laboratoire.

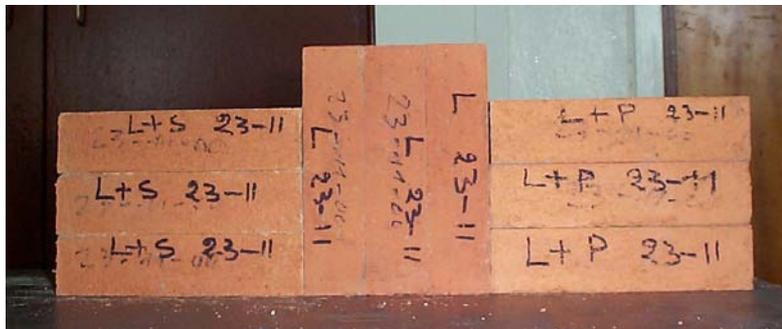


Figure 4. 1 : Epreuves de forme parallélépipédique : à gauche latérite + sciure de bois, au centre latérite et à droite latérite + pouzzolane

Sur la *figure 4. 2* sont disposées les éprouvettes cylindriques utilisées pour les essais en traction par fendage.



Figure 4.2: Epreuves de forme cylindrique ; à gauche : latérite, au centre : latérite + pouzzolane et à droite : latérite + sciure de bois.

4.1.3 - Absorption d'eau

L'essai d'absorption d'eau est destiné à déterminer la quantité d'eau absorbée par capillarité. Cet essai consiste à mesurer l'accroissement de la masse de l'éprouvette placée dans un récipient dont le niveau d'eau est maintenu à 1 cm au dessus de la face inférieure de l'éprouvette. On en déduit le temps au bout duquel l'éprouvette est saturée en eau. Les blocs de terre comprimés sans aucun liant sont très vulnérables à l'eau. La propension de tels blocs à absorber l'eau par capillarité se traduit par l'appauvrissement en eau du mortier des joints. Par conséquent les blocs de terre ont une mauvaise adhérence avec le mortier, ce qui entraîne une chute de la résistance des murs. L'adjonction des liants hydrauliques permet de diminuer les effets néfastes de l'eau.

La *figure 4. 3* présente l'évolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la teneur en ciment pour différentes durées d'immersion. La quantité d'eau absorbée par capillarité

diminue lorsqu'on augmente la teneur en ciment. Pour des briques de terre en latérite, le taux d'absorption d'eau est pratiquement constant au delà d'une teneur en ciment de 8 %. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le ciment hydraté contribue à réduire la porosité de la latérite.

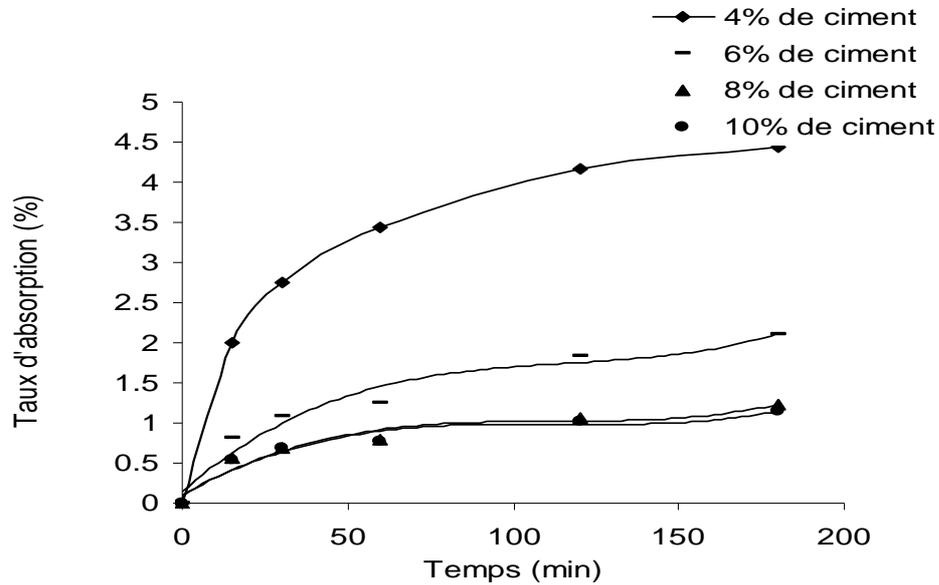


Figure 4.3: Variation du taux d'absorption d'eau d'un BTS en latérite en fonction du temps pour différentes teneurs en ciment

On constate sur la figure 4.4 que pour une teneur en ciment variant de 4 à 8 %, le taux d'absorption d'eau baisse fortement. Pour toutes les durées d'exposition, ce taux d'absorption d'eau est pratiquement stable lorsque la teneur en ciment dépasse 8 %. La quantité d'eau absorbée par capillarité est alors très faible (entre 0,8 et 1,2 %), ce qui laisse supposer une meilleure durabilité pour un matériau de teneur en ciment supérieure à 8 %, constituant l'enveloppe du bâtiment susceptible de recevoir l'eau de pluie.

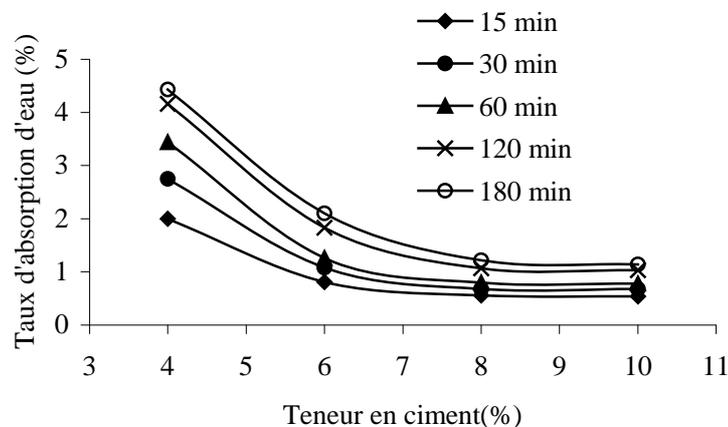


Figure 4.4 : Variation du taux d'absorption d'eau en fonction de la teneur en ciment

L'absorption d'eau augmente avec le dosage en liant avec ajout de la pouzzolane (figure 4. 5). Ce phénomène est contraire à celui observé avec le dosage en ciment. Il peut s'expliquer par le fait que la pouzzolane en tant que constituant secondaire est un matériau plus poreux que la latérite. La porosité globale du matériau étant plus élevée, la tendance à absorber l'eau est plus importante.

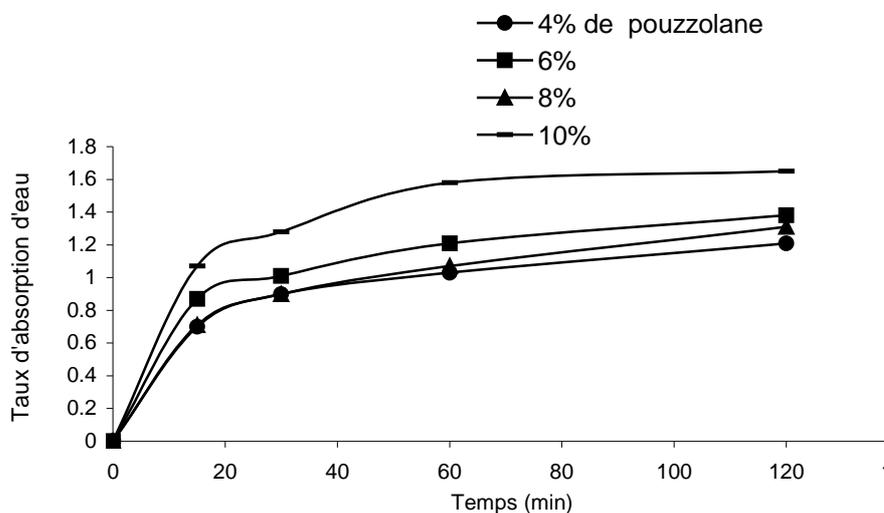


Figure 4. 5 : Variation du taux d'absorption d'eau d'un BTS en latérite en fonction du temps pour différentes teneurs en liant avec ajout de la pouzzolane

4.1.4- Essais de résistance en compression et en traction simple

Les éprouvettes parallélépipédiques stabilisées à 8% de ciment ont fait l'objet d'essais en compression et en traction simple. Les résultats de ces essais sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 4.1: Résistance en compression et en traction simple des échantillons en latérite
Date de fabrication : 23 11 2001 Date de rupture : 16 01 2001

Compression				Traction simple		
N°échantillon	Fc (kN)	Rc (MPa)	Moyenne	Ft (N)	Rt (MPa)	Moyenne (MPa)
1	3,6	2,25	2,35	200	0,51	0,53
2	4,1	2,56		215	0,54	
3	3,6	2,31				
4	3,7	2,50		210	0,52	
5	4	2,19				
6	3,5	2,31				

Comme on peut le constater dans le tableau 4.1, la résistance en compression moyenne des BTS avec 8% de ciment est de 2,35 MPa. Ce résultat est en accord avec les travaux de Solomon-Ayeh (1994), effectués sur la latérite du Ghana. Il a obtenu une résistance en compression des blocs de terre stabilisée avec 8% de ciment comprise entre 3 et

4,5 MPa alors que ceux stabilisés avec 4 % de ciment ont une résistance en compression qui varie entre 2 et 3,5 MPa.

Le *tableau 4.2* présente les résultats des essais effectués sur les BTS avec incorporation de pouzzolane naturelle. La résistance en compression pour ce matériau est plus faible que celle des briques réalisées avec uniquement de la latérite. En effet, la pouzzolane étant plus poreuse, son incorporation dans les briques contribue à augmenter la porosité du matériau obtenu et par conséquent à faire baisser sa résistance en compression.

Dans le *tableau 4.3* sont présentés les résultats concernant les BTS avec incorporation de sciure de bois. On constate dans ce cas une légère amélioration de la résistance en compression. Cela peut s'expliquer par la présence dans le matériau de petites fibres de bois qui renforcent les propriétés mécaniques des briques obtenues.

Tableau 4.2: Résistance en compression et en traction simple des échantillons en latérite + pouzzolane

Date de fabrication : 23 11 2001

Date de rupture : 16 01 2001

Compression				Traction simple		
N°échantillon	Fc (kN)	Rc (MPa)	Moyenne	Ft (N)	Rt (MPa)	Moyenne (MPa)
1	1,6	1,0	1,01	225	0,54	0,56
2	1,5	0,94		230	0,56	
3	1,6	1,0		235	0,58	
4	1,6	1,0				
5	1,7	1,06				
6	1,7	1,06				

Tableau 4.3: Résistance en compression et en traction simple des échantillons en latérite + sciure de bois

Date de fabrication : 23 11 2001

Date de rupture : 16 01 2001

Compression				Traction		
N°échantillon	Fc (kN)	Rc (MPa)	Moyenne	Fc (N)	Rt (MPa)	Moyenne (MPa)
1	2	1,25	2,61	195	0,49	0,47
2	2,4	1,50		190	0,46	
3	3,4	2,13		180	0,45	
4	4,5	2,81				
5	6	3,75				
6	6,7	4,19				

Les *tableaux 4.1, 4.2 et 4.3* indiquent la charge de rupture et la résistance moyenne de chaque échantillon testé.

- La résistance à la compression du bloc en latérite + pouzzolane est la plus faible, en raison probablement de la porosité élevée de la pouzzolane.
- Celle de l'échantillon en latérite + sciure de bois est la plus élevée.

- La résistance en traction est environ le sixième de la résistance en compression.

Le matériau incorporant de la sciure de bois offre une meilleure résistance en compression. Les résultats montrent une faible chute des résistances en compression et traction lors de l'incorporation des granulats de pouzzolane naturelle.

4.1.5 -Essais de résistance en traction par fendage

Les éprouvettes cylindriques de la *figure 4. 2* ont fait l'objet d'une mesure de la résistance en traction par fendage. La presse que nous avons utilisée pour la rupture des éprouvettes a une précision de 2kN. Il ne nous est pas possible de déterminer l'effort de rupture de l'échantillon latérite+ sciure de bois qui est inférieur à 2 kN. Les résultats des mesures sont regroupés dans le *tableau 4.4* ci-dessous.

Tableau 4. 4: Résistance en traction par fendage des échantillons

Latérite			Latérite + pouzzolane			Latérite + sciure de bois		
N°	Fr (kN)	R _{tf} (kPa)	N°	Fr (kN)	R _{tf} (kPa)	N°	Fr (kN)	R _{tf} (kPa)
1	4	44,79	1	4	44,79	1	< 2 kN*	<22,39
2	4	44,79	2	4	44,79	2	< 2 kN*	<22,39
3	4	44,79	3	4	44,79	3	< 2 kN*	<22,39

Les *figures 4.5* représentent les états des éprouvettes cylindriques après avoir subi les essais de rupture en traction par fendage.

On note sur la latérite (*figure4. 5 a*) l'apparition de fissures verticales suivant la hauteur de l'éprouvette. L'éprouvette en latérite + pouzzolane (*figure 4.5 b*) présente une fente en son milieu. Le bloc en latérite + sciure de bois (*figure 4.5 c*) est fendu en deux pour une charge de rupture inférieure à 2 kN.

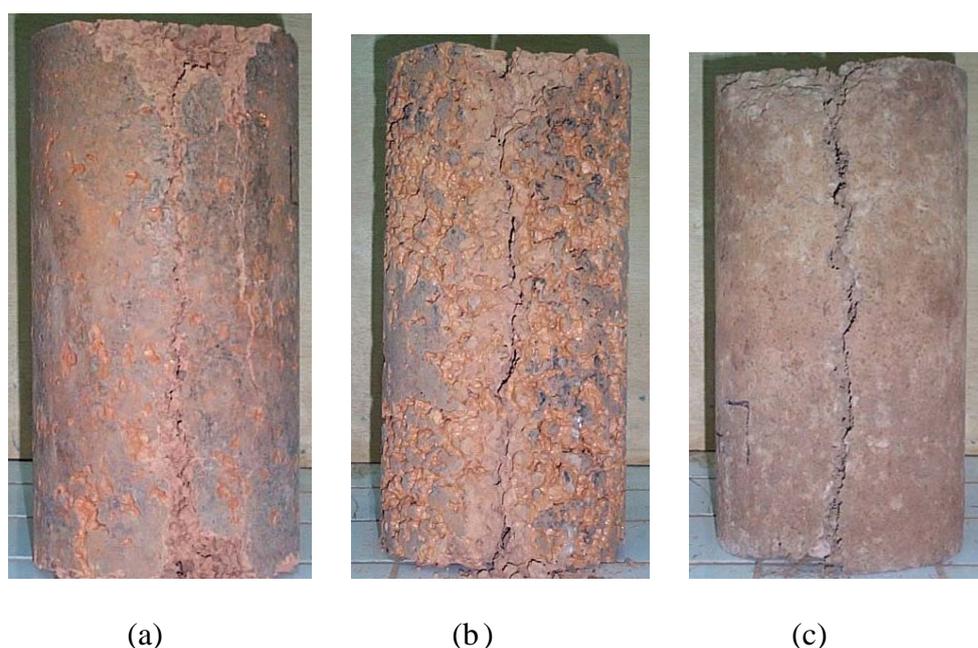


Figure 4.5 : Différentes éprouvettes après la rupture ; a : latérite, b : latérite + pouzzolane, c : latérite + sciure de bois

Les résistances en traction par fendage des blocs en latérite ou en latérite + pouzzolane sont voisines et de l'ordre de 44,8 kPa. Il a fallu moins de la moitié de cette résistance pour provoquer la rupture des échantillons en latérite + sciure de bois. Ce dernier matériau, dans son état actuel ne nous semble pas convenir à la construction en raison de sa faible résistance à la traction par fendage, malgré sa bonne conductivité thermique (voir *tableau 3.5* de synthèse).

Tableau 4.5 : Récapitulatif des propriétés thermophysiques et mécaniques des matériaux étudiés

Matériau	Conductivité thermique (W/m.°C)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction par fendage (Kpa)
Latérite	$0,75 \leq \lambda \leq 1,15$	2,35	44,79
Latérite + pouzzolane	$0,65 \leq \lambda \leq 0,71$	1,01	44,79
Latérite + sciure de bois	$0,51 \leq \lambda \leq 0,65$	2,65	<22,39

L'incorporation de granulats dans les blocs de terre peut avoir pour effet d'augmenter ou de diminuer la résistance en compression (Beshr et al., 2003). Dans une étude expérimentale, C.S. Poon et al. (2002) montrent qu'un pourcentage d'agrégats compris entre 25 et 50% a pour conséquence une légère augmentation de la résistance en compression des blocs et briques concernés. Par contre une quantité plus importante d'agrégats réduit la résistance en compression.

4.2- Influence de la stabilisation sur les propriétés mécaniques

La résistance en compression pour les bétons est très variable. Elle est influencée par plusieurs facteurs. La stabilisation, par exemple, améliore la résistance à la compression, et la tenue des angles des briques à l'abrasion et aux chocs.

Le liant que nous avons utilisé est du ciment. La qualité du gâchage lui est aussi associée. D'après Gresillon cité par Ottou (1987), la résistance en compression avec divers dosages en ciment est d'autant plus forte que la densité sèche est elle-même élevée. Nous présentons sur la *figure 3. 6*, tracée à partir des données tirées du mémoire de Ottou (1987), l'influence de la teneur en ciment sur la résistance en compression. Lorsque la teneur en ciment passe de 4% à 10%, la résistance en compression passe pratiquement du simple au double. La stabilisation au ciment rend le processus de réhumidification de l'argile inopérant. Malgré cette amélioration de la résistance en compression, la teneur en ciment dans les BTS doit être limitée en raison de son coût.

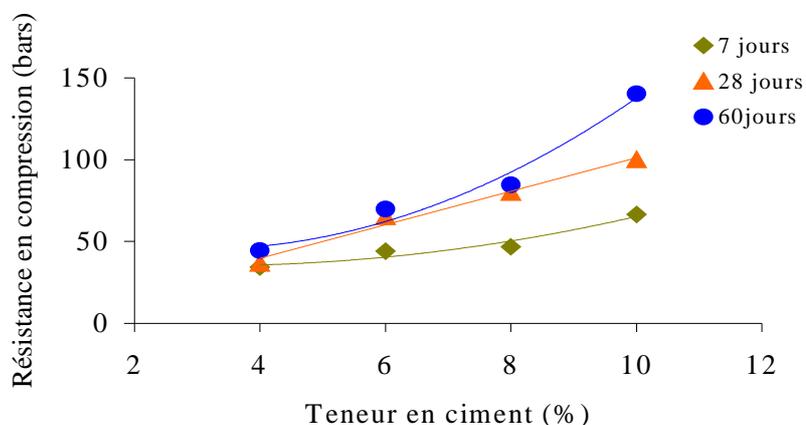


Figure 4. 6 : Variation de la résistance en compression simple en fonction de la teneur en ciment

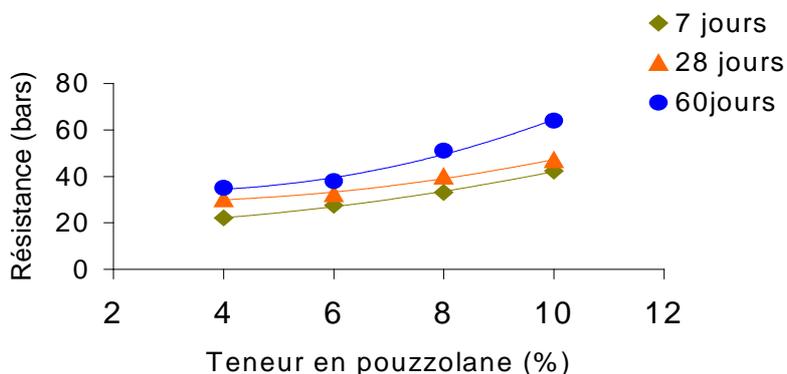


Figure 4. 7 : Résistance en compression en fonction de la teneur de pouzzolane pour différentes durées

Un autre liant utilisé pour la stabilisation est le ciment pouzzolanique de synthèse. C'est un mélange de 50% de ciment CIMENCAM 325 et 50% de latérite thermiquement activée. La *figure 4.7* montre l'influence de ce liant sur la résistance en compression. Comme dans le cas du ciment, l'augmentation de la teneur en liant pouzzolanique contribue à améliorer la résistance en compression des BTS de façon plus limitée que le ciment précédent.

Il existe également d'autres procédés de stabilisation plus ou moins onéreux et satisfaisants suivant le résultat recherché.

D'autres facteurs influencent également la résistance en compression :

- Les grains : ils jouent un rôle déterminant sur la résistance finale du béton.
- La masse volumique : Cormon cité par Bidjocka (1990) montre que la masse volumique est un critère de variation de la résistance en compression.
- Le compactage : Ottou (1987) rapporte les travaux de Danson qui estime que pour la terre non stabilisée, la résistance en compression est proportionnelle à la pression de compactage.

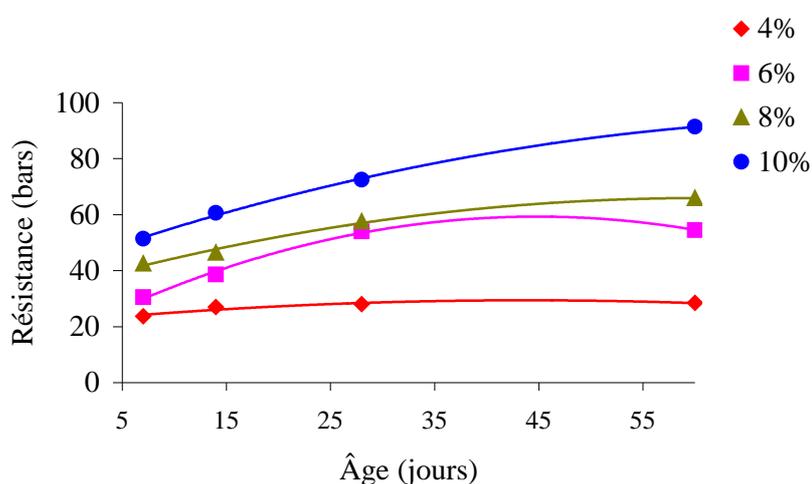


Figure 4. 8 : Résistance de compression en fonction de l'âge pour différentes teneurs en ciment

Les *figures 4.8 et 4.9* montrent l'évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge de l'éprouvette pour différentes teneurs en ciment et en liant pouzzolanique respectivement. Elle augmente avec l'âge de l'éprouvette. On constate qu'au delà de 28 jours, l'augmentation de cette résistance reste faible sauf pour la teneur en ciment de 10%.

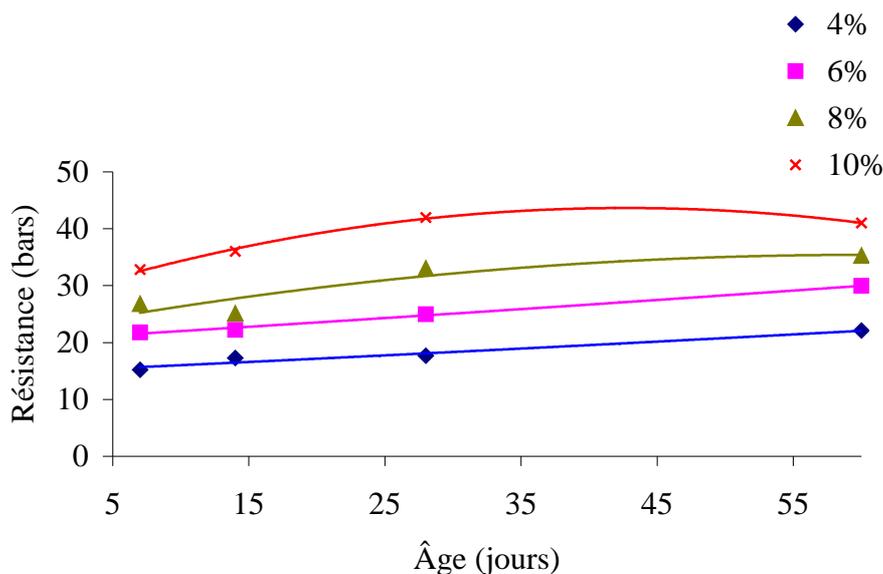


Figure 4.9 : Résistance en compression en fonction de l'âge pour différentes teneur en liant pouzzolanique

Comme on peut le constater sur la figure 4.10, la teneur en argile contribue à l'augmentation de la résistance en compression des blocs de terre.

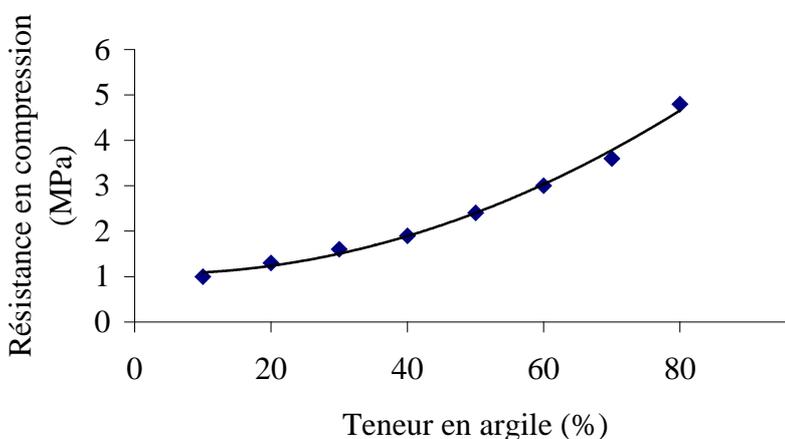


Figure 4.10 : Résistance en compression en fonction de la teneur en argile (d'après données de Heathcote, 1991)

4. 3- Influence de l'humidité sur la résistance en compression

Nous présentons ci-dessous une étude expérimentale portant sur l'influence de la durée d'immersion et du temps de séchage sur la résistance en compression simple des blocs de terre comprimés et stabilisés au ciment. Il s'agit des échantillons dosés à 10% de ciment et compressés à 80 bars (Hakimi et al., 1998). La durée d'immersion considérée est la plus

petite durée d'immersion au bout de laquelle on n'enregistre plus de variations notables de leur résistance en compression.

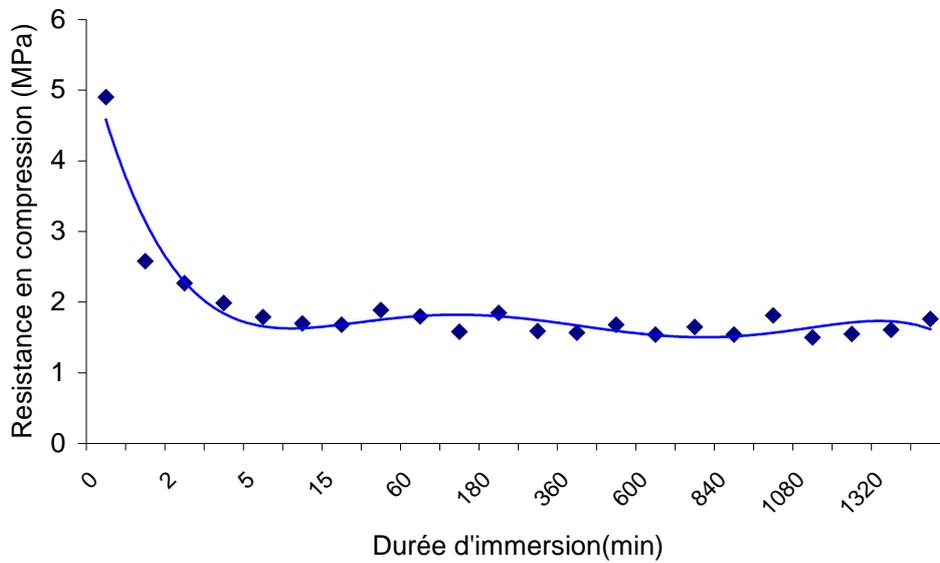


Figure 4.11 : Evolution de la résistance en compression d'une éprouvette en fonction de sa durée d'immersion dans l'eau

D'après cette étude, la résistance en compression simple d'une éprouvette n'ayant subi aucune immersion est voisine de 5 MPa. Au bout d'une minute d'immersion on note une chute de 50%, puis on assiste à une atténuation de cette décroissance sur les quinze minutes qui suivent. La résistance en compression se stabilise au fur et à mesure de l'augmentation du temps d'immersion. On note une augmentation de la résistance de compression avec celle du temps de séchage suivie d'une stabilisation de cette résistance pour des durées supérieures à trente deux heures.

La figure 4.12 montre l'influence de la teneur en eau sur la résistance en compression, des blocs de terre stabilisée au ciment.

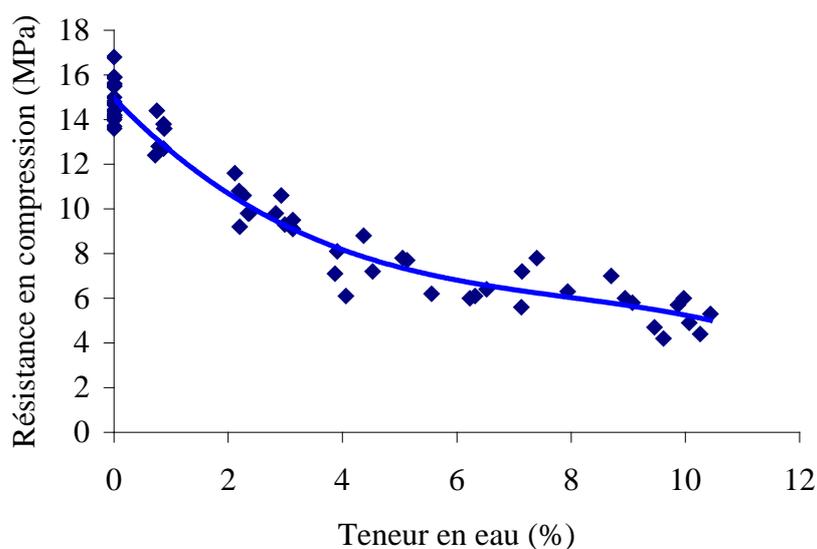


Figure 4.12 : Evolution de la résistance en compression en fonction de la teneur en eau. (d'après données de Heathcote et Jankulovski I, 1993)

On observe une diminution importante de la résistance en compression lorsque la teneur en eau augmente. Les essais réalisés sur trois échantillons ont permis de tracer plusieurs courbes qui ont permis de proposer une corrélation entre la résistance en compression et la teneur en eau donnée par la relation (4.4).

$$R_c = a(1 - b\sqrt{w}) \quad (4.4)$$

où

a et b : constantes

w teneur en eau (%).

Une courbe normalisée est proposée à partir des différentes courbes tracées. Elle prend en compte la résistance en compression de l'échantillon à l'état sec, suivant la relation (4.5) :

$$R_c = R_c^{\text{sec}}(1 - b\sqrt{w}) \quad (4.5)$$

Conclusion

Les aspects particulièrement importants dans l'introduction de la sciure de bois ou des granulats de la pouzzolane naturelle sur les BTS sont : leur influence sur ses résistances mécaniques, le comportement des bétons en contact avec de l'eau et l'influence de l'humidité sur leurs propriétés mécaniques. Les résistances en compression sont presque conservées même si on note une légère augmentation pour les briques incorporant la pouzzolane. Par contre les résistances en traction diminuent légèrement en comparaison des briques de latérite simple. Quant à la résistance en traction par fendage, les briques réalisées uniquement avec la latérite et celles incorporant de la pouzzolane naturelle donnent des résultats très proches. Si on prend en compte la résistance en compression qui reste le facteur le plus important dans la construction de bâtiments, le matériau latérite + sciure de bois présente les meilleures qualités mécaniques. Le comportement des BTS en contact avec l'eau reste un critère dont il faudra tenir compte pour le choix définitif. L'étude du comportement des matériaux étudiés présentée au chapitre 5 permettra de mieux nous situer dans ce choix.

**5. MODELISATION DES TRANSFERTS DE
CHALEUR ET D'HUMIDITE DANS UNE
ENVELOPPE DE BATIMENT EN BRIQUES
DE TERRE STABILISEES.**

Chapitre 5

MODELISATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET D'HUMIDITE DANS UNE ENVELOPPE DE BATIMENT EN BRIQUES DE TERRE STABILISEES.

Sommaire

Introduction.....	95
5. 1-Humidité et condensation dans une maison	97
5. 1.1- Sources d'humidité	97
5.1.2- Élimination de la vapeur d'eau	98
5.1.3-Condensation superficielle	98
5.1.4-Condensation cachée	100
5.2- Formulation mathématique.....	100
5.3-Description des murs de référence.....	103
5.4 -Détermination des coefficients de diffusivité du système	104
5.4.1- Développement du modèle numérique.....	104
5.4.2-Conditions aux limites et initiales	105
5.4.4-Considération du mur pris en compte dans le programme.....	106
5.5-Système discret de différences finies.....	109
5.6- Application aux enveloppes de bâtiment en BTS, BTSP et BTSS.....	111
5.6 1 Profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau.	112
5.6.2. Influence de l'enduit de ciment sur les profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau.	114
5.6.3-Influence de la nature du matériau sur les profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau.	118
Conclusion	122

Introduction

Les matériaux de construction fabriqués à partir de matériaux de récupération sont de plus en plus utilisés et peuvent contribuer à réduire les impacts de la construction des bâtiments sur l'environnement. On utilise de plus en plus, pour la réalisation des maisons d'habitation et de petits commerces, des matériaux naturels bon marché tels que les briques de terre. Ces matériaux utilisés dans l'enveloppe de bâtiment sont d'une importance capitale car c'est elle qui détermine l'interaction entre l'intérieur et l'extérieur d'un habitat. Des échanges de chaleur se font par l'infiltration et l'exfiltration de l'air, les gains ou pertes de rayonnement solaire à travers les fenêtres, les transferts internes de chaleur et les déperditions par les murs, le sol et le plafond.

L'analyse des transferts de chaleur en vue de prévoir le comportement thermique des enveloppes de bâtiments est l'une des préoccupations de l'architecte. En effet, l'enveloppe protège l'occupant de l'environnement extérieur, en subissant les conditions climatiques du milieu environnant. Une enveloppe de bâtiment est en général soumise à deux expositions climatiques différentes qui peuvent être à l'origine des transferts hygrothermiques à travers ses différents composants. La différence de température entre ses deux faces crée un phénomène de transfert de chaleur par conduction.

Certaines enveloppes de bâtiment sont faites de matériaux hygroscopiques. Les sources d'humidité sont multiples : les habitants et leurs activités, l'évaporation de l'eau du sol s'il n'est pas recouvert, la diffusion et la condensation de l'air humide intérieur et de l'air contenu dans les petits vides à travers les murs. D'autres sources d'humidité comme les pluie battantes ou les remontées capillaires peuvent aussi affecter l'ensemble du bâtiment.

Pour prévoir et suivre les mouvements d'humidité dans l'enveloppe d'un bâtiment, plusieurs études ont été réalisées et de nombreux outils de simulation ont été développés et validés au cours des dernières années (Lucas F. et al., 2002 ; Ulgen K., 2002).

Pour décrire le volume d'un bâti contenant des matériaux hygroscopiques, Cunningham (2003) a écrit des équations différentielles traitant les transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux hygroscopiques et dans un volume d'air du bâtiment. Ces équations décrivent l'humidité de l'air à l'intérieur du local comme une fonction de la ventilation, du taux de libération d'humidité et de l'interaction avec les matériaux hygroscopiques. Des hypothèses simplificatrices physiques et mathématiques ont conduit à une solution analytique générale de tout le bâtiment construit avec des matériaux hygroscopiques.

Hendriks et Linden (2003) dans leur approche méthodologique ont poussé l'analyse plus loin dans leurs études relatives à plusieurs matériaux accessibles et disponibles pour les enveloppes de bâtiment.

L'eau contenue dans les matériaux poreux de construction peut être sous forme liquide solide ou vapeur. Les changements de phase et transfert d'humidité sont liés aux transferts de chaleur. Le comportement des éléments exposés du bâtiment face à l'humidité a une grande influence sur leur durabilité. En effet, l'eau est le vecteur majeur de la dégradation des matériaux. Ainsi les propriétés des phénomènes de transport des phases liquide ou vapeur des matériaux poreux sont d'une grande

importance dans leur durabilité.

De nos jours il existe plusieurs modèles numériques permettant de décrire les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les enveloppes de bâtiment (Hens, 1996 ; Deru et al. (2002) ; Tsiringirils, 2002). Ces modèles développent des théories utilisées dans le transport couplé de chaleur et d'humidité pour étudier le comportement hygrothermique des matériaux composites avec comme avantage la similarité avec les équations à l'état transitoire de transfert de chaleur et d'humidité des phases vapeur ou liquide. Des études expérimentales et numériques ont été développées au Building Research Institute (Japon) sur les transferts couplés de chaleur et de masse dans les éléments de bâtiment (Noumowe et al., 1999). Pour modéliser le comportement thermohydrique, un programme informatique a été développé et a permis de déterminer, en fonction du temps, la distribution de température et d'humidité dans les structures multicouches, lors de leur humidification ou de leur séchage (Watanabe, 1994). Un modèle complet de simulation de transfert de chaleur et de masse dans les matériaux poreux déformables a été développé par Gawin (1996). Pour calculer le flux de chaleur en régime transitoire Shengwei et Youming (2003) présentent un modèle qui permet en outre d'analyser les flux de chaleur transitoire à travers une enveloppe et évalue les facteurs de réponse et les coefficients de transfert par conduction.

Néanmoins il existe plusieurs enveloppes de bâtiment dans les pays en voie de développement dont le comportement hygrothermique reste inconnu. En particulier, en Afrique, la plupart de maisons d'habitation ont des enveloppes en briques de terre. La connaissance des propriétés thermophysiques de ces matériaux est indispensable pour l'étude des transferts de chaleur entre l'intérieur des maisons et le milieu extérieur. Une étude expérimentale a permis de déterminer les propriétés thermophysiques des briques de terre à base de latérite et les résultats sont présentés dans le chapitre 2 de ce travail.

L'humidité constituant la principale cause des dommages que subissent les maisons d'habitation, l'exploitation de techniques de simulation informatique perfectionnées pour étudier leur performance hygrothermique (diffusion combinée de la chaleur, de l'air et de l'humidité) offre la possibilité d'aboutir à l'amélioration de la conception des bâtiments. La recherche menée dans ce travail va permettre d'exploiter la modélisation pour prévoir le comportement hygrothermique des murs en BTS et de prévoir la performance à long terme de différentes stratégies de rattrapage qui pourraient profiter à ces systèmes muraux. L'étude de la performance hygrothermique des composants de bâtiments permet d'évaluer la durabilité, l'efficacité énergétique et les effets de la réhabilitation des maisons à usage d'habitation ou de commerce.

L'objectif de ce travail est d'améliorer la qualité d'isolation thermique en utilisant les matériaux locaux de construction. L'application du programme HMtrans, développé par Watanabe (1994) est utilisée pour simuler le comportement des briques de terre face à l'humidité, utilisées comme enveloppes de bâtiment. Ce programme va permettre de prévoir la distribution de température, d'humidité et de teneur en eau dans les éléments de bâtiment exposés à trois types de climat ; un climat équatorial (Yaoundé) , un climat tropical humide (Douala) et un climat tropical sec (Garoua). L'analyse des résultats sur plusieurs types de briques donnera des indications sur le type de brique qui présente un meilleur comportement thermohydrique dans une enveloppe de bâtiment.

5. 1-Humidité et condensation dans une maison

L'apparition de l'humidité dans l'enveloppe des bâtiments est généralement attribuée aux phénomènes de diffusion et de condensation de l'air humide intérieur. La condensation qui se produit pendant la saison des pluies est probablement le problème d'humidité le plus courant dans les maisons. Dans les cas les plus bénins, elle entraîne la formation de buée sur les vitrages. Dans les cas graves, elle peut causer un pourrissement pouvant même affecter la structure. Entre ces extrêmes, elle peut se manifester par l'apparition de moisissure sur le revêtement intérieur de finition, par des taches et des fuites au plafond ou l'écaillage de la peinture.

L'humidité s'ajoute à l'air ambiant et peut être évacuée de différentes façons. L'équilibre qui se crée entre le taux de production et d'élimination de la vapeur d'eau détermine le niveau d'humidité relative dans une maison et par conséquent, le risque de problèmes futurs. L'eau sous forme liquide prend beaucoup de temps à s'évaporer et peut causer entre-temps de sérieux dommages. Le bois va pourrir si les fibres sont saturées et à une température supérieure à 10 °C pour une certaine durée. La corrosion des matériaux peut se produire dans des conditions humides. Les cycles d'humidification et d'assèchement provoquent des changements dimensionnels dans plusieurs composantes du bâtiment, ce qui entraîne souvent des dommages physiques. Des problèmes d'esthétique et d'entretien surviennent lorsque les matériaux de finition sont tachés d'eau. La moisissure et les champignons se développent dans des conditions très humides, créant quelques fois de sérieux problèmes de qualité d'air à l'intérieur du bâtiment.

5. 1.1- Sources d'humidité

Le niveau d'humidité de l'air ambiant peut être accru soit intentionnellement, à l'aide d'humidificateurs, soit involontairement, par les activités quotidiennes. L'humidité peut aussi provenir du sol entourant le bâtiment en passant par les murs de fondation ou par le plancher du sous-sol ou du vide sanitaire.

Le *tableau 5.1* indique la quantité d'humidité produite par les différentes activités domestiques (ASHRAE Handbook on Equipment, 1979).

Tableau 5.1. Production de vapeur d'eau dans les maisons

Source d'humidité	Quantité (l/h)
Lavage du plancher (pour 7,4 m ²)	1,09
Séchage des vêtements* (sans ventilation)	11,97
Lessive* (sans ventilation)	1,96
Cuisson* (sans ventilation) (ajouter 1,24)	0,92
Bain	0,05
Lavage de la vaisselle*	0,45
Contribution humaine (par h) (moyenne)	0,18
Plantes (par h)	0,02

*Pour une famille de 4 personnes.

Les planchers en terre battue dans les vides sanitaires ou les sous-sols peuvent produire jusqu'à 45 litres d'eau par jour lorsque le sol est humide. Même la pierre exposée peut dégager des quantités importantes de vapeur d'eau. Les matériaux hygroscopiques comme le bois produisent également de l'humidité. Le bois absorbe une quantité croissante de vapeur d'eau à mesure que l'humidité relative augmente. Dans les régions où l'humidité est élevée, il peut absorber une quantité de vapeur d'eau supplémentaire correspondant à 4 ou 5 pour cent de son poids. Cette humidité est libérée pendant la saison de sèche, lorsque le taux d'humidité intérieure baisse (Brooks, E 1956). S'il se produit une augmentation moyenne de l'humidité de 4 pour cent, l'ossature du plancher et des cloisons d'une maison ordinaire produira 100 litres d'eau supplémentaires pendant la saison sèche. Il ne s'agit toutefois là que d'une partie de toute l'eau dégagée par les matériaux à mesure qu'ils s'adaptent au milieu intérieur plus sec. L'humidité contenue dans le béton, le plâtre et le bois non séché d'une nouvelle construction est susceptible d'être dégagée lorsque les conditions sont favorables.

5.1.2- Élimination de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau peut être évacuée de trois façons principales, à savoir ; la diffusion à travers l'enveloppe du bâtiment, la déshumidification mécanique et le remplacement de l'air intérieur par de l'air extérieur.

L'élimination de l'humidité par diffusion se produit lorsque de l'humidité traverse les matériaux de l'enveloppe en direction de l'extérieur, où la pression de la vapeur d'eau est inférieure. Une humidité relative supérieure à 40 % peut produire une condensation importante par temps froid.

L'air humide qui est évacué directement, sans traverser les vides entre les poteaux et les vides sous toit, ne crée généralement pas de problèmes. Par contre, si l'air humide traverse ces vides, il peut s'y produire de la condensation et toutes sortes de désordres peuvent alors survenir.

5.1.3-Condensation superficielle

Lorsque la production de vapeur d'eau est plus rapide que son élimination, l'humidité relative augmente jusqu'à la formation de condensation. Cette dernière se forme sur toute surface dont la température est inférieure au point de rosée (niveau de saturation) de l'air ambiant. La température de la surface intérieure d'un mur extérieur, par exemple, dépend des températures de l'air intérieur et extérieur et de la résistance thermique des différents matériaux de la paroi. La capacité de l'air à absorber la vapeur d'eau diminue à mesure que sa température baisse. Ainsi, au contact d'une surface froide, l'air perd de sa capacité d'absorption et de la condensation finit par se produire. Par temps froid, il faut donc généralement réduire le taux d'humidité pour diminuer le risque de condensation. En raison de leurs températures superficielles inférieures, les fenêtres sont les premières surfaces où la condensation se forme. Elles constituent donc un bon indicateur d'humidité excessive. (Une faible condensation peut toutefois se former sans qu'il y ait une humidité trop élevée et est parfaitement tolérable si elle ne cause pas de dommages).

Les niveaux d'humidité théoriques auxquels la condensation se forme à la surface des fenêtres sont indiqués à la *figure 5.1* (ASHRAE Handbook on Equipment, 1979). Ces niveaux ne sont qu'approximatifs étant donné qu'un certain nombre de facteurs peuvent modifier la température superficielle des fenêtres. Par exemple, le pourtour d'un vitrage étant plus froid que le centre, la condensation s'y formera plus rapidement.

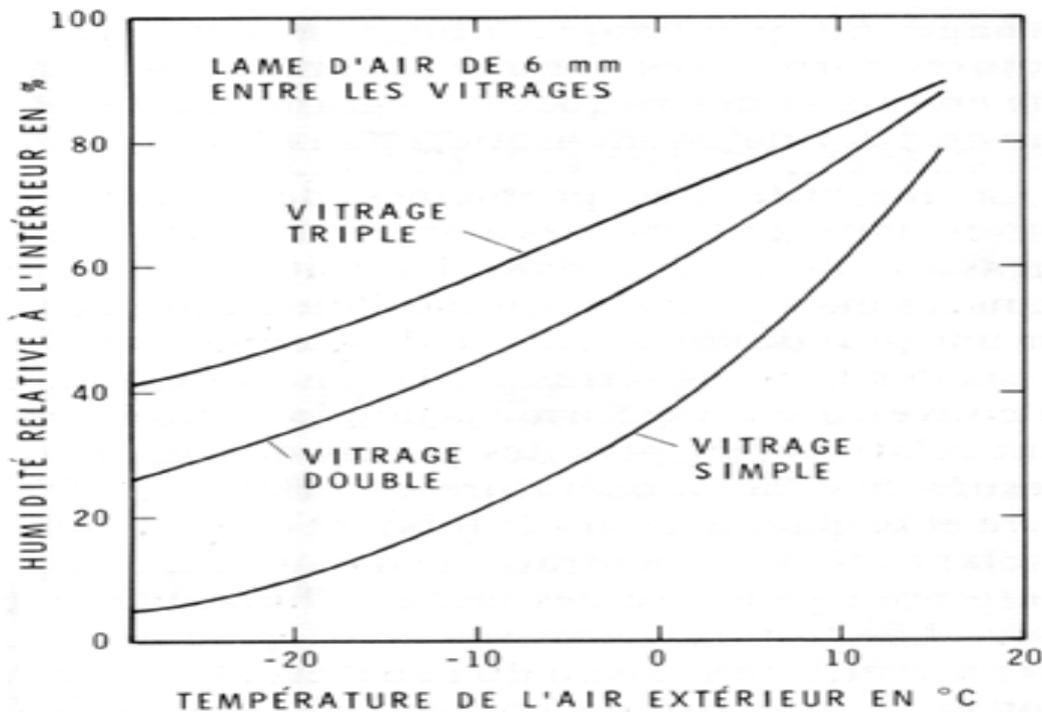


Figure 5. 1. Humidités relatives auxquelles de la condensation se forme sur une surface

Le taux d'humidité d'équilibre qui finit par être atteint dépend non seulement du taux de production de vapeur d'eau mais aussi de son taux d'élimination. La *figure 5.2* indique les niveaux d'humidité atteints dans un prototype de maison en tenant compte de différents taux de production de vapeur d'eau et de renouvellement d'air. La courbe 1 montre l'effet du réchauffement de l'air extérieur admis à 80 % d'humidité relative jusqu'à ce qu'il atteigne la température de la pièce sans qu'on y ajoute d'humidité. Les courbes 2 à 5 indiquent les taux d'humidité relative d'équilibre pour deux taux de production de vapeur d'eau (11,5 litres par jour moyen et 23 litres par jour de lessive) et deux taux de renouvellement d'air (0,5 et 0,25 renouvellement d'air par heure illustrant les conditions qui prévalent dans des maisons relativement étanches avec et sans conduit de fumée), en supposant encore que l'humidité relative de l'air extérieur est de 80 %. Les courbes 3 et 4 sont identiques, puisque le fait de doubler le taux de production de vapeur d'eau a le même effet sur l'humidité relative que réduire de moitié le taux de renouvellement d'air.

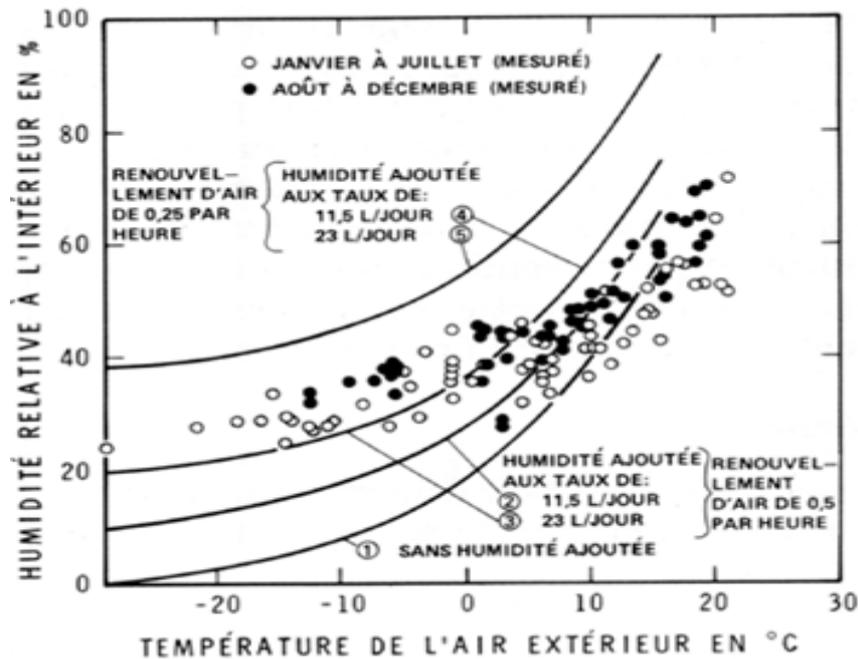


Figure 5. 2. Humidités d'équilibre pour des taux constants de production de vapeur d'eau et de ventilation (calculé pour de l'air extérieur à 80 % d'humidité relative d'après ASHRAE Handbook on Equipment, 1979)

5.1.4-Condensation cachée

Par temps froid, de la condensation se forme dans les vides des murs et du toit de toutes les maisons. Toutefois, cette condensation n'entraîne généralement pas de sérieux problèmes puisqu'elle est habituellement dissipée avant l'apparition de pourriture.

Les conditions idéales qui amènent le pourrissement sont rassemblées lorsque la teneur en eau du bois est au point de saturation de ses fibres (environ 30 %) ou au-dessus et que la température se situe entre 18 et 35°C (ASHRAE Handbook on Equipment, 1979).

Au fur et à mesure qu'on rend les fenêtres et portes plus étanches et qu'on obture ou élimine les conduits de fumée, un pourcentage plus élevé de l'humidité globale est évacué par les fuites d'air dans l'enveloppe du bâtiment.

5.2- Formulation mathématique

La brique de terre stabilisée à base de latérite utilisée dans cette étude comme enveloppe de bâtiment est un matériau poreux. Elle contient de l'eau en phase solide, liquide ou gazeuse. Les surfaces intérieure et extérieure des enveloppes sont à des températures différentes. Il existe par conséquent un transfert de chaleur par conduction à travers le matériau et un transfert de chaleur accompagnant chaque changement de phase. La formulation mathématique est basée sur le bilan de chaleur et d'humidité dans le processus de transfert d'humidité (Watanabe, 1994).

- **Hypothèses simplificatrices**

- Aucune réaction chimique n'a lieu pendant le transfert de chaleur ou d'humidité.
- Les propriétés thermophysiques (λ , ρ et C_p) des matériaux sont supposées constantes. En effet, l'isotherme de sorption de la *figure 3.15* montre que la teneur en eau de chacun des matériaux étudiés ne dépasse pas 3% pour une humidité relative de 90%. L'humidité maximale pour chacune des localités reste inférieure à 90%.

En tenant compte des hypothèses ci-dessus, trois équations sont utilisées pour décrire le comportement hygrothermique des matériaux : l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation de l'énergie et l'isotherme de sorption.

- **Conservation de la masse**

La variation de la teneur en eau dans une cellule par unité de temps est due à la diffusion de l'humidité dans deux directions comme le montre l'équation (5.1) :

$$\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} + D_T \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (5.1)$$

où D_ϕ : diffusivité hydrique,
 D_T : diffusivité thermique,
 ϕ : teneur en eau volumique.

- **Conservation de l'énergie**

Dans les milieux poreux le transfert de chaleur s'accompagne probablement d'un transfert hydrique. La variation de la température dans une cellule par unité de temps est due :

- au transfert de chaleur par conduction, due à une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur,
- à la diffusion de la vapeur d'eau à travers le matériau, provenant d'une différence de pression de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur,
- à la chaleur latente de l'eau en mouvement.

Ces phénomènes se traduisent par l'équation (5.2) :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \gamma D_{TG}) \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma D_{\phi G} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \gamma D_{TG}) \frac{\partial T}{\partial y} + \gamma D_{\phi G} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] \quad (5.2)$$

où D_{TG} : diffusivité thermique en phase gazeuse,
 $D_{\phi G}$: diffusivité hydrique en phase gazeuse,
 γ : chaleur latente vapeur-liquide de l'eau,
 λ : conductivité thermique du matériau.

• **Conditions aux limites: isotherme de sorption**

La teneur en eau locale est déterminée à partir de l'isotherme de sorption définie par la relation (5.3) :

$$\phi = F(HR, t) \cong F(HR) \quad (5.3)$$

Les équations (5.1) et (5.2) peuvent être appliquées aux matériaux non hygroscopiques. En présence de surfaces en contact avec des matériaux non hygroscopiques ou des couches d'air, les équations représentant la continuité des flux aux interfaces s'écrivent :

$$-\left(D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial X} + D_T \frac{\partial T}{\partial X} \right) S = \lambda' (X_n - X_s) \quad (5.4)$$

$$\left\{ (\lambda + \gamma D_{TG}) \frac{\partial T}{\partial X} + \gamma D_{\phi G} \frac{\partial \phi}{\partial X} \right\} S = \lambda' (T_N - T_s) + \gamma \lambda' (X_N - X_s) \quad (5.5)$$

où

λ' : conductivité thermique du matériau non hygroscopique

X : humidité absolue

S : surface du matériau hygroscopique

N : surface du matériau non-hygroscopique

Les conditions aux limites sont également remplacées par $\phi = f(X, T)$.

Dans le modèle que nous utilisons, les hypothèses suivantes sont considérées pour les régions hygroscopiques (Noumowe et al, 1999) :

$$D_\phi = D_{\phi G} = \Pi P_{VS} \left(\frac{\partial HR}{\partial \phi} \right)_T \quad (5.6)$$

$$D_T = D_{TG} = \Pi HR \frac{\partial P_{VS}}{\partial T} \quad (5.7)$$

où

Π : perméabilité de la vapeur,

P_{VS} : pression de la vapeur,

HR : humidité relative.

L'isotherme de sorption, donnée par la relation (5.3) permet d'exprimer la teneur en eau locale en fonction de l'humidité relative. Cette relation sert plus précisément à déterminer la teneur en eau de saturation, repérée graphiquement pour une humidité relative correspondante de 100%. Ces teneurs en eau de saturation pour chaque matériau serviront de condition initiale pour la résolution du problème hygrothermique.

Les équations (5.1) et (5.2) sont applicables en phase liquide comme en phase gazeuse. Dans ce modèle, la teneur en eau ϕ est remplacée par le potentiel chimique de l'eau μ . En effet, μ reste constant lors d'un changement de phase sans réaction

chimique. En remplaçant la teneur en eau ϕ par le potentiel chimique de l'eau μ , les équations (5.1) et (5.2) deviennent :

$$E \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A(x, y) \frac{\partial \mu}{\partial x} + B(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A(x, y) \frac{\partial \mu}{\partial y} + B(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5.8)$$

$$F \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(C(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} + D(x, y) \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} + D(x, y) \frac{\partial \mu}{\partial y} \right) \quad (5.9)$$

où,

$$E = \rho_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu}$$

$$F = \rho c$$

$A(x, y)$: diffusivité de l'humidité due au gradient du potentiel chimique (Π_μ),

$B(x, y)$: diffusivité de l'humidité due au gradient de température (Π_T),

$$C = \lambda + \gamma \Pi_{TG},$$

$$D = \gamma \Pi_{\mu G}$$

En introduisant le potentiel chimique, le transfert couplé de chaleur et d'humidité se réduit à deux équations différentielles. Connaissant les propriétés des matériaux, on résout les équations pour trouver la température T et le potentiel μ .

- l'humidité relative de la vapeur d'eau est obtenue par $HR = \exp(\mu/R_v T)$,
- l'isotherme de sorption donne la teneur en eau ϕ (équation d'état) en fonction de HR ,
- à partir de l'humidité relative HR et de la courbe de pression de la vapeur saturante, on obtient $P_v = HR \cdot P_{vsat}$

Pour chaque matériau utilisé, les propriétés à connaître sont : la masse volumique, la chaleur spécifique, la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur et l'isotherme de sorption.

5.3-Description des murs de référence

Divers types d'enveloppes sont utilisés dans la construction des maisons. Une large gamme de matériaux composites constitués de bétons ou de briques de terre est généralement utilisée. L'enveloppe d'un bâtiment en fonctionnement normal est sollicitée par des conditions atmosphériques variables. Sur la face extérieure, soumise aux intempéries, de nombreux paramètres influencent la température et l'humidité relative (vent, pluie..) et on peut y enregistrer de fortes variations durant l'année, suivant les conditions météorologiques. Sur la face intérieure, la régulation climatique est effectuée en fonction du bien-être des occupants. Cette régulation tend plutôt à stabiliser la température et l'humidité. Il se pose alors la question de savoir quelles sont les conséquences de la différence de température et d'humidité sur les faces intérieure et extérieure de l'enveloppe. Les gradients thermiques et hydriques qui s'établissent dans l'enveloppe sont susceptibles de créer des déformations préjudiciables à sa durabilité. Dans les structures multicouches, un facteur aggravant peut apparaître avec la condensation.

Les études effectuées dans ce travail portent sur trois matériaux utilisés comme enveloppes de bâtiment :

- . la latérite stabilisée au ciment,
- . la latérite stabilisée au ciment avec incorporation de pouzzolane naturelle,
- . et la latérite stabilisée au ciment avec incorporation de sciure de bois.

Chacun de ces matériaux peut être utilisé dans une des structures d'enveloppe suivantes :

- un mur simple constitué uniquement du matériau,
- un mur composé du matériau avec enduit sur la face intérieure,
- un mur composé du matériau avec enduit sur les deux faces intérieure et extérieure.

5.4 -Détermination des coefficients de diffusivité du système

5.4.1- Développement du modèle numérique

Le transfert d'humidité dans une structure de bâtiment est un procédé assez complexe, dû à plusieurs phénomènes physiques dont la dépendance de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau. La chaleur latente qui se produit lors des changements de phase va contribuer à modifier la distribution de la température et la valeur de la pression de vapeur saturante. Le processus de transfert va dépendre de la variation des propriétés des matériaux (avec la teneur en eau et la température), de la succion capillaire, des mouvements de l'humidité et de l'air dans les fentes et les cavités. L'humidité dans l'enveloppe de bâtiments crée de nombreux inconvénients tels que la condensation et l'accumulation de l'eau qui sont à l'origine de la dégradation des matériaux (Sanders, 1988). Nous présentons sur la *figure 5.3* les différents paramètres nécessaires pour le modèle de calcul.

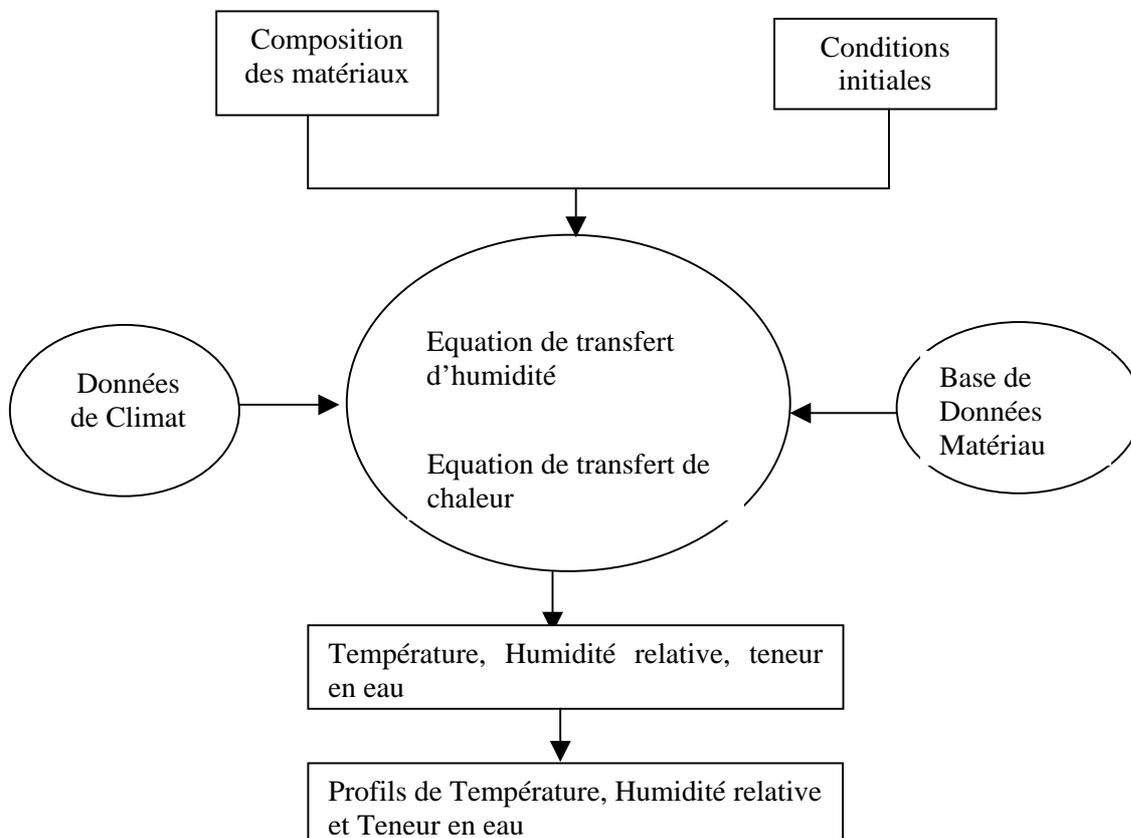


Figure 5.3 : organigramme du modèle mathématique du programme HMTrans
HMTrans étant l'abréviation de Heat et Mass Transfer.

5.4.2-Conditions aux limites et initiales

Les températures extérieure T_{∞} et intérieure T_{in} , ainsi que les humidités relatives HR_{∞} et HR_{in} sont imposées et supposées uniformes sur la longueur et la hauteur des faces extérieure et intérieure de l'enveloppe, traduisant ainsi le climat ambiant auquel est soumis le bâtiment.

Loin des liaisons mur-sol et mur-toit, les variations du champ hygrothermique suivant la hauteur y sont négligeables devant celles qui se produisent suivant l'axe des épaisseurs x . Avec l'hypothèse simplificatrice d'un transfert à une dimension (en négligeant l'épaisseur du mur devant sa hauteur), nous admettons qu'aucun flux thermique ou hydrique n'est donc pas imposé sur les extrémités supérieure et inférieure du mur.

Les Coefficients de diffusivité relatifs aux équations sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 - E &= \rho_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \\
 - F &= \rho \cdot C_p \\
 - A &= \Pi_{\mu} = \Pi P_{vs} \left(\frac{\partial HR}{\partial \mu} \right)_T + \frac{HR}{R_v T} \frac{\partial \phi}{\partial HR} D_{\phi} \\
 - B &= \Pi_T = \Pi HR \left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \right) + D_{TI} \\
 - C &= \lambda + \gamma \Pi_{TG} = \lambda + \gamma \Pi HR \left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \right) \\
 - D &= \gamma \Pi_{\mu G} = \gamma \Pi P_{vs} \left(\frac{\partial HR}{\partial \mu} \right)_T
 \end{aligned}$$

Ces coefficients sont obtenus expérimentalement, grâce aux isothermes de sorption et la connaissance des propriétés physiques de chaque matériau utilisé pour l'enveloppe.

Le système d'équations (5.8) et (5.9) est résolu afin de déterminer le potentiel chimique μ et la température T . Les valeurs de la température T et du potentiel chimique μ permettent ensuite de calculer l'humidité relative à l'aide de la loi d'Arrhénius suivante :

$$HR = e^{\left(\frac{\mu}{R_v \cdot T} \right)}$$

où R_v est la constante de la vapeur d'eau.

En raison de la variation journalière des paramètres météorologiques, la résolution des équations est faite pour chaque journée. Le résultat est ensuite étendu sur une année.

Le calcul numérique est basé sur une résolution par différences finies des équations (5.8) et (5.9), complétées par les conditions aux limites précédentes, et des

propriétés physiques pour chacun des matériaux de l'enveloppe, telles que la masse volumique ρ , la chaleur spécifique C_p , la conductivité thermique λ , la perméabilité à la vapeur Π , la teneur en eau de saturation ϕ_{\max} et les épaisseurs x et y .

Chaque enveloppe, constituée de deux ou trois matériaux peut être considérée comme un mur multicouches à une dimension. Chacun des matériaux est supposé homogène et ses propriétés thermophysiques (λ , ρ et C_p) constantes.

5.4.4-Considération du mur pris en compte dans le programme.

La section de l'enveloppe est discrétisée selon la grille présentée à la figure 5.4

L'épaisseur de l'enveloppe selon la direction x est découpée en NX cellules et celle dans la direction y en NY cellules.

Chacune des cellules est affectée d'un code qui caractérise le milieu auquel elles appartiennent. Ainsi, la température et l'humidité sont déterminées numériquement au centre des cellules et notées $T(I,J)$ et $HR(I,J)$, ce qui diffère d'une approche classique où les inconnues sont obtenues aux nœuds de la grille.

La première couche d'éléments selon x notée 1 correspond au milieu extérieur, la dernière couche notée 2 au milieu intérieur. Les séries notées 3 correspondent aux limites en hauteur de l'enveloppe où il n'y a aucun échange d'humidité ni de chaleur.

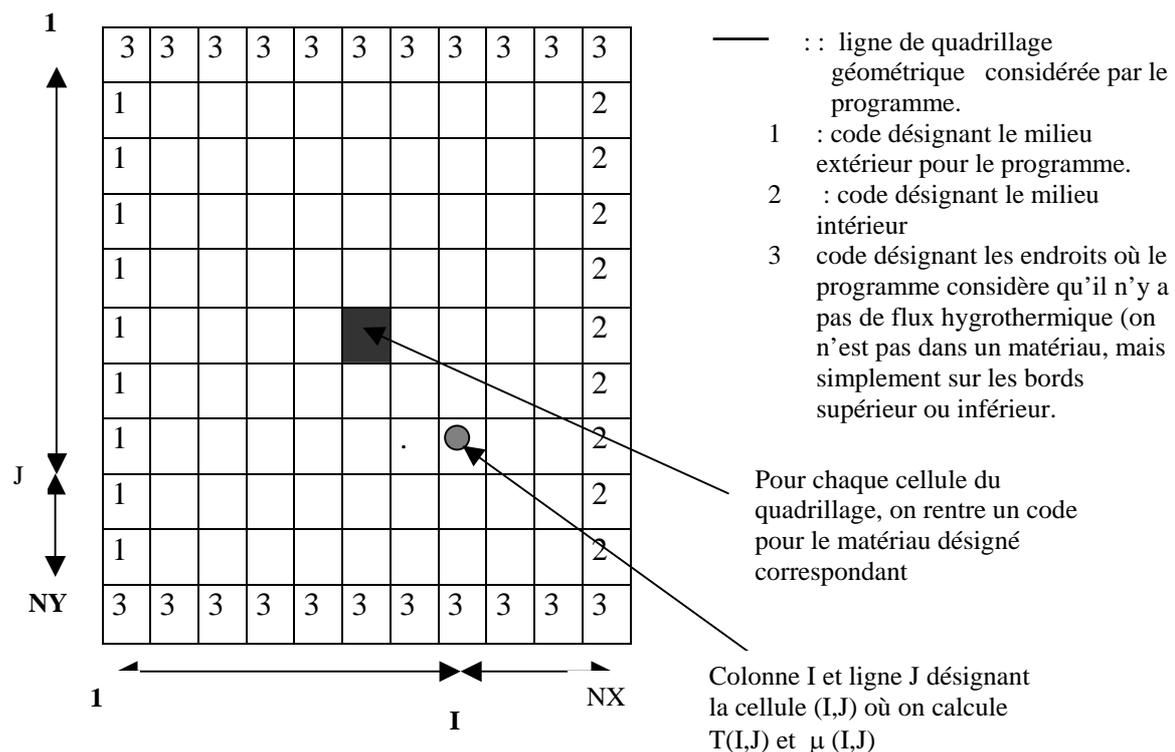


Figure 5.4 : Section de l'enveloppe de bâtiment discrétisée en une dimension.

La résolution est faite par une méthode de convergence accélérée et implique la connaissance des propriétés thermophysiques de chaque matériau constituant les couches. Ces propriétés formeront essentiellement les coefficients des matrices de la résolution du schéma implicite à inconnues μ et T pour chaque itération.

La simulation est faite après avoir implémenté le fichier de données nécessaire à la résolution (voir annexe 5 pour le type de fichier de données pour la résolution).

Nous y rencontrons les codes de matériaux identiques pour la direction **y** afin de reproduire la configuration réelle d'enveloppes de bâtiments (disposition des couches en série, invariant suivant la direction **z** du mur).

Pour chaque matériau la connaissance de paramètres suivants est nécessaire :

- Propriétés thermophysiques (masse volumique, conductivité thermique, chaleur spécifique)
- Perméabilité à la vapeur,
- Teneur en eau à la saturation,
- Epaisseur **x** et hauteur **y** du mur.

Pour les calculs que nous avons effectués, les propriétés thermophysiques des matériaux ont été déterminées au Laboratoire d'Energétique de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé. Les résultats sont présentés dans le *tableau 5.2* ci-dessous où les unités des différentes grandeurs sont celles utilisées dans le programme HMTrans..

Table 5. 2: Propriétés thermophysiques des différents matériaux composant l'enveloppe de bâtiment

Matériau	ρ (kg.m^{-3})	$\lambda(\text{W.m}^{-1}.\text{°C})$	C ($\text{kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	x (m)	Π g/mhmmHg	ω
BTS	1817	0.887	0.27	0.15	0.07	0.029
BTSP	1497	0.482	0.25	0.15	0.07	0.070
BTSS	1451	0.396	0.24	0.15	0.07	0.052
Enduit de ciment	892	0.19	0.40	0.02	0.0033	0.42

ω : pente de l'isotherme de sorption

BTS: brique de terre stabilisée

BTSP: brique de terre stabilisée avec incorporation de pouzzolane naturelle

BTSS: brique de terre stabilisée avec incorporation de sciure de bois.

La teneur en eau à la saturation est obtenue expérimentalement sur l'isotherme de sorption de la *figure 3.15* du chapitre 3. La perméabilité à la vapeur et la conductivité thermique de l'enduit de ciment sont obtenues dans la littérature.

Les faces extérieures de l'enveloppe étant soumises aux conditions climatiques locales, les paramètres météorologiques telles que la température (T_∞) et l'humidité relative (HR_∞) sont nécessaires pour la simulation. Ces paramètres sont présentés dans le *tableau 5.3*. La température et l'humidité relatives intérieures sont indispensables pour la suite du calcul. Nous les avons supposées constantes au cours d'une année. Une humidité relative ($HR_i = 60\%$) et une température ($T_i = 20^\circ\text{C}$) ont été choisies en accord avec les conditions de confort thermique en climat tropical (IEPF, 2002).

Tableau 5. 3 : Données météorologiques des trois villes du Cameroun.

	Douala 1961-1990		Yaoundé 1961-1990		Garoua 1961-1990	
	Température (°C)	Humidité relative (%)	Température (°C)	Humidité relative (%)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Janvier	27,6	79	24,4	75	26,0	31
Février	28,1	78	25,3	72	28,9	26
Mars	27,8	80	25,0	76	32,2	29
Avril	27,6	81	24,6	79	33	47
Mai	27,2	82	24,1	80	30,7	63
Juin	26,2	84	23,4	82	28,2	74
Juillet	25,1	87	22,6	83	26,7	79
Août	25,1	88	22,6	83	26,3	81
Septembre	25,6	85	23,1	82	26,7	80
Octobre	26,1	84	23,3	82	28,0	72
Novembre	26,7	82	23,7	80	27,5	52
Décembre	27,2	81	23,7	78	26,0	38

Source : Direction de la météorologie nationale du Cameroun
 Douala : au bord de la mer l'autre, climat équatorial humide ;
 Yaoundé : au centre à environ 300km de la mer, climat tropical humide ;
 (Garoua) : au nord, climat tropical sec.

Le programme de calcul HMtrans considère qu'il n'y a pas de variation de flux thermique et hydrique dans la direction y. Les flux thermique Φ_T et hydrique Φ_H sont nuls au sol et au plafond. Par conséquent, la variation de ces flux a lieu uniquement dans la direction x (figure 5.5).

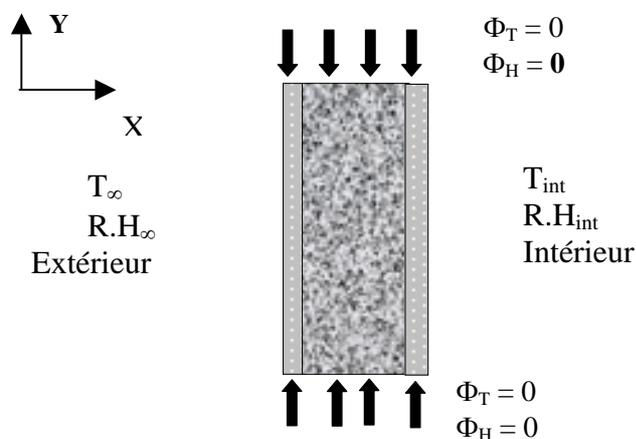


Figure 5.5: Zone de l'enveloppe loin des bords considérée par le programme de calcul HMTrans.

5.5-Système discret de différences finies

Dans le modèle que nous utilisons, une différence est faite, lors de la résolution du système d'équations, entre le milieu du quadrillage considéré et son bord, en contact avec un autre quadrillage.

- **A l'intérieur du quadrillage**

L'enveloppe de bâtiment est divisée en plusieurs cellules. A l'intérieur de chaque cellule, la continuité de la température et du potentiel chimique est prise en compte par l'introduction de l'homogénéisation.

Homogénéisation

Cette homogénéisation est présentée sur la *figure 5.6*, où B_1 , B_2 , B_3 et B_4 sont des coefficients de diffusivité hydrique dus aux gradients de température relatifs à quatre cellules consécutives.

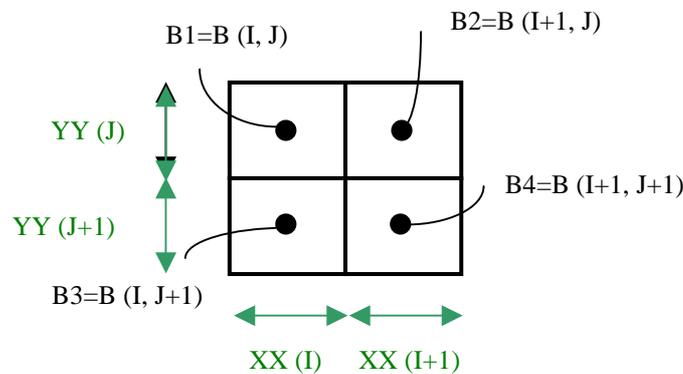


Figure 5.6 : 4 cellules consécutives de l'enveloppe considérée

Comme la température et le potentiel chimique sont calculés au centre de la cellule, il faut obtenir les coefficients de diffusivité hydrique au centre de la cellule. Avec l'hypothèse de contacts parfaits aux interfaces des couches, l'homogénéisation se traduit par l'analogie entre les résistances équivalentes thermiques et les résistances à la diffusion pour les cellules consécutives. Les coefficients de diffusion hydrique homogénéisés sont alors définis sous forme de résistances équivalentes comme suit dans le programme :

$$B_x(I,J) = \frac{1}{\frac{XX(I)/2}{B(I,J)} + \frac{XX(I+1)/2}{B(I+1,J)}}$$

$$B_x(I,J+1) = \frac{1}{\frac{XX(I)/2}{B(I,J+1)} + \frac{XX(I+1)/2}{B(I+1,J+1)}}$$

$$B_y(I,J)=\frac{1}{\frac{YY(J)/2}{B(I,J)} + \frac{YY(J+1)/2}{B(I,J+1)}}$$

$$B_y(I+1,J)=\frac{1}{\frac{YY(J)/2}{B(I+1,J)} + \frac{YY(J+1)/2}{B(I+1,J+1)}}$$

où XX et YY sont les dimensions de la cellule.

Les rapports $XX(I)/B$ sont analogues à la résistance thermique e/λ ou à la résistance à la diffusion e/Π . Ce processus est effectué de la même façon pour les autres coefficients d'échanges A, C, D du système (4.8)- (4.9).

Le système (4.8)-(4.9) est alors résolu avec les coefficients de diffusion homogénéisés ou résistances équivalentes $A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y, D_x, D_y$, ce qui permet de déterminer la continuité de la température et du potentiel chimique aux interfaces.

- Aux bords du quadrillage

Après avoir analysé les interfaces matériau/matériau, examinons l'interface matériau/ milieu extérieur ou intérieur représenté par la figure 4.7.

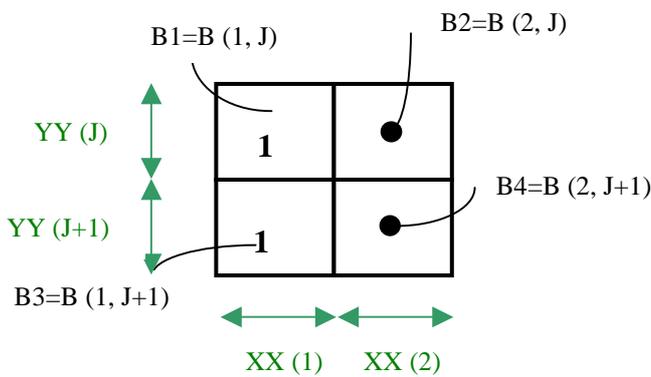


Figure 5.7a : 2 cellules consécutives en contact avec 2 cellules milieu extérieur

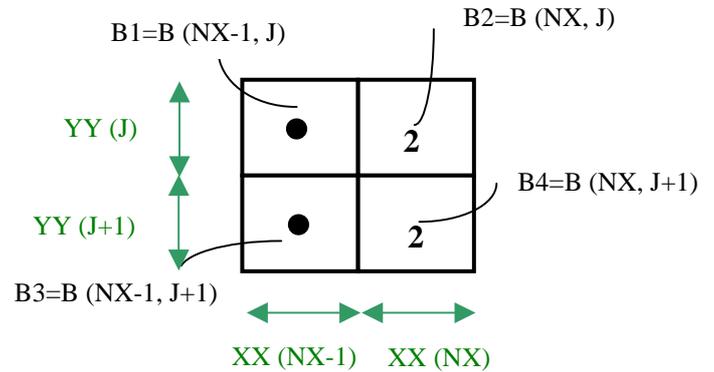


Figure 5.7b : 2 cellules consécutives en contact avec 2 cellules milieu intérieur

En contact parfait, le programme considère à l'interface l'égalité du flux convectif (en provenance de l'intérieur ou de l'extérieur) avec le flux convectif venant du matériau. Les coefficients homogénéisés B, par exemple, des cellules en contact avec l'intérieur ou l'extérieur sont donnés par :

$$B_x(1, J) = \frac{1}{\frac{1}{B(1, J)} + \frac{XX(2)/2}{B(2, J)}} \quad B_y(1, J) = \frac{1}{\frac{YY(J)/2}{B(1, J)} + \frac{YY(J+1)/2}{B(1, J+1)}}$$

$$B_x(1, J+1) = \frac{1}{\frac{1}{B(1, J+1)} + \frac{XX(2)/2}{B(2, J+1)}} \quad B_y(2, J) = \frac{1}{\frac{YY(J)/2}{B(2, J)} + \frac{YY(J+1)/2}{B(2, J+1)}}$$

Ces expressions sont analogues à l'expression de la résistance thermique équivalente d'un système milieu extérieur (ou intérieur)/matériau à savoir :

$$\frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{e}{\lambda}} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda}}$$

h_e : coefficient d'échange convectif pour un milieu extérieur

h_i : coefficient d'échange convectif pour un milieu intérieur

Le même procédé est effectué pour les coefficients A, C et D.

Pour l'interface matériau/bord supérieur (ou inférieur), on définit les coefficients A, B, C et D des cellules n°3 de sorte que les flux de chaleur et d'humidité soient nuls à ces endroits. Les coefficients homogénéisés A_x , A_y , B_x , B_y , C_x , C_y , D_x , et D_y y sont donc égaux à zéro.

En prenant en compte les coefficients homogénéisés de diffusion, les équations à résoudre pour chaque cellule sont les suivantes :

$$E(I, J) \frac{\partial \mu(I, J)}{\partial t} \cong \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x(I, J) \frac{\partial \mu(I, J)}{\partial x} + B_x(I, J) \frac{\partial T(I, J)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y(I, J) \frac{\partial \mu(I, J)}{\partial y} + B_y(I, J) \frac{\partial T(I, J)}{\partial y} \right) \quad (5.10)$$

$$F(I, J) \frac{\partial T(I, J)}{\partial t} \cong \frac{\partial}{\partial x} \left(C_x(I, J) \frac{\partial T(I, J)}{\partial x} + D_x(I, J) \frac{\partial \mu(I, J)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C_y(I, J) \frac{\partial T(I, J)}{\partial y} + D_y(I, J) \frac{\partial \mu(I, J)}{\partial y} \right) \quad (5.11)$$

Lorsque le potentiel chimique $\mu(I, J)$ et la température $T(I, J)$ sont connus pour chaque cellule, l'humidité relative $HR(I, J)$ est ensuite calculée pour la même cellule.

5.6- Application aux enveloppes de bâtiment en BTS, BTSP et BTSS

L'analyse développée dans cette étude permet de faire une investigation du comportement de l'enveloppe soumise à deux conditions climatiques différentes, à savoir l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Pour bien assurer son rôle qui consiste à séparer l'environnement intérieur de celui de l'extérieur, l'enveloppe de bâtiment doit avoir une structure solide et durable. En général, l'humidité est la cause de la dégradation de l'enveloppe des bâtiments dans environ 80% des cas (Bomberg et Brown, 1993).

5.6 1 Profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau.

Nous avons choisi, pour le calcul, en ce qui concerne les conditions météorologiques, la température moyenne mensuelle du mois le plus chaud de l'année. Un exemple de profil de température pour un mur en BTS simple est présenté sur la *figure 5.8*. Cette figure montre que la variation de la température est quasiment linéaire, ce qui était prévisible puisque la conductivité thermique et la chaleur massique sont constantes pour chaque matériau. On observe une pente plus forte pour la localité (Garoua) dont la température ambiante est la plus grande. En effet, les conditions de confort intérieur sont les mêmes pour les trois localités. La pente du profil de température à travers une enveloppe de bâtiment va être de ce fait d'autant plus grande que la température de la localité concernée est élevée.

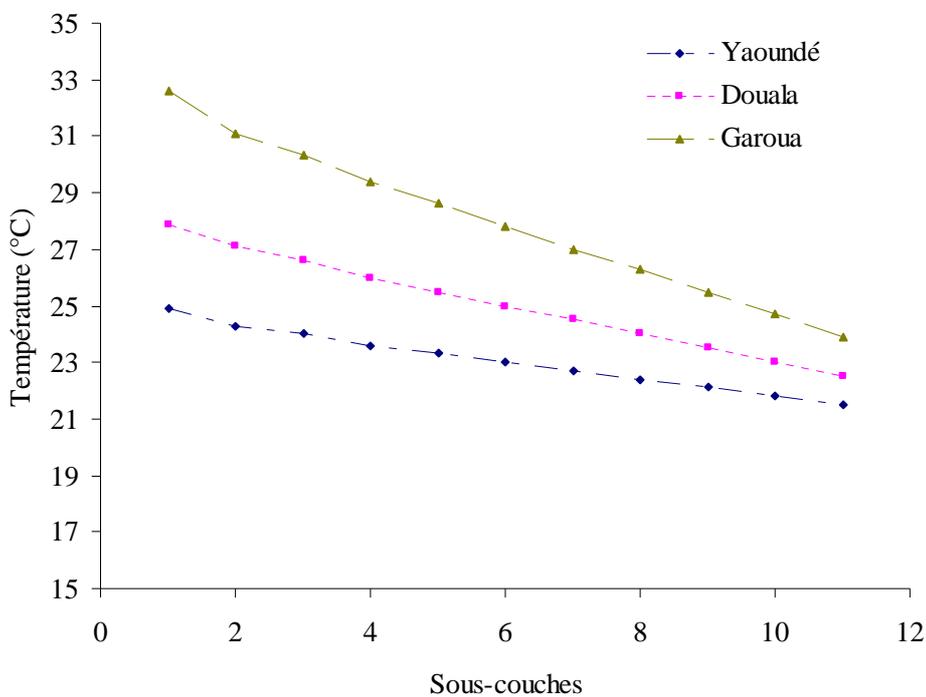


Figure 4.8 : Profil de température à travers une enveloppe composite de bâtiment en régime permanent

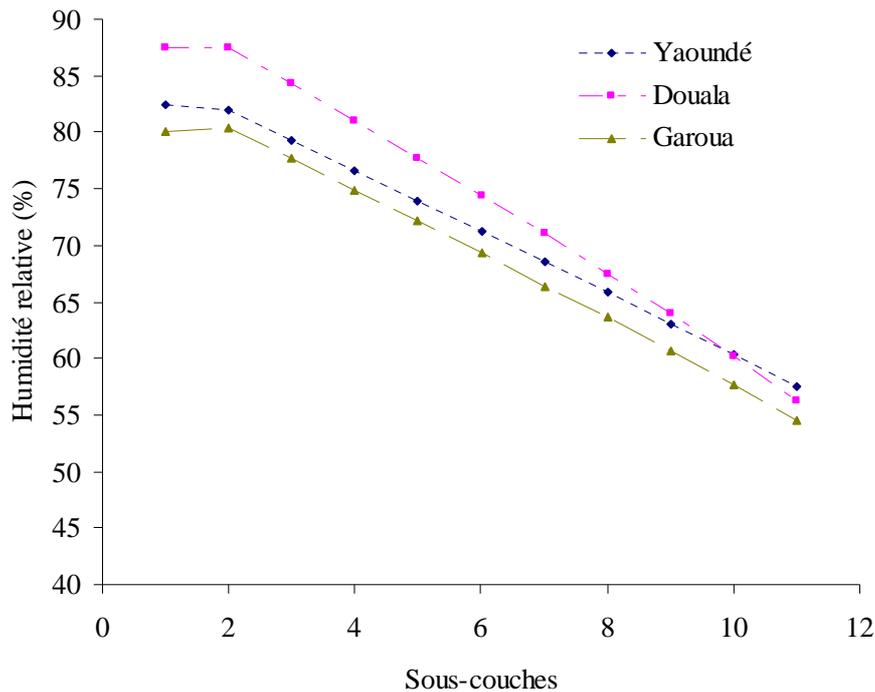


Figure 5.9: Profil d'humidité relative à travers une enveloppe composite de bâtiment en régime permanent

La Figure 5.9 montre le profil d'humidité relative à travers une enveloppe pour trois climats différents. On y observe que l'humidité relative pour la partie de l'enveloppe en contact avec l'extérieur reste pratiquement constante sur les deux premières couches. A partir de la deuxième couche, l'humidité relative est linéaire et décroît avec une plus forte pente pour Douala qui présente la plus grande humidité des trois localités. En effet, les conditions de confort intérieur étant la même pour les trois localités, le profil d'humidité relative présente la plus grande pente pour la localité de plus grande humidité.

Le profil de teneur en eau pour une enveloppe en brique de terre stabilisée est présenté sur la figure 5.10. Comme on peut le constater, la teneur en eau varie entre 1,6 % et 2,5%, pour les trois localités, ce qui permet d'affirmer que la possibilité de la condensation de l'eau est minimale.

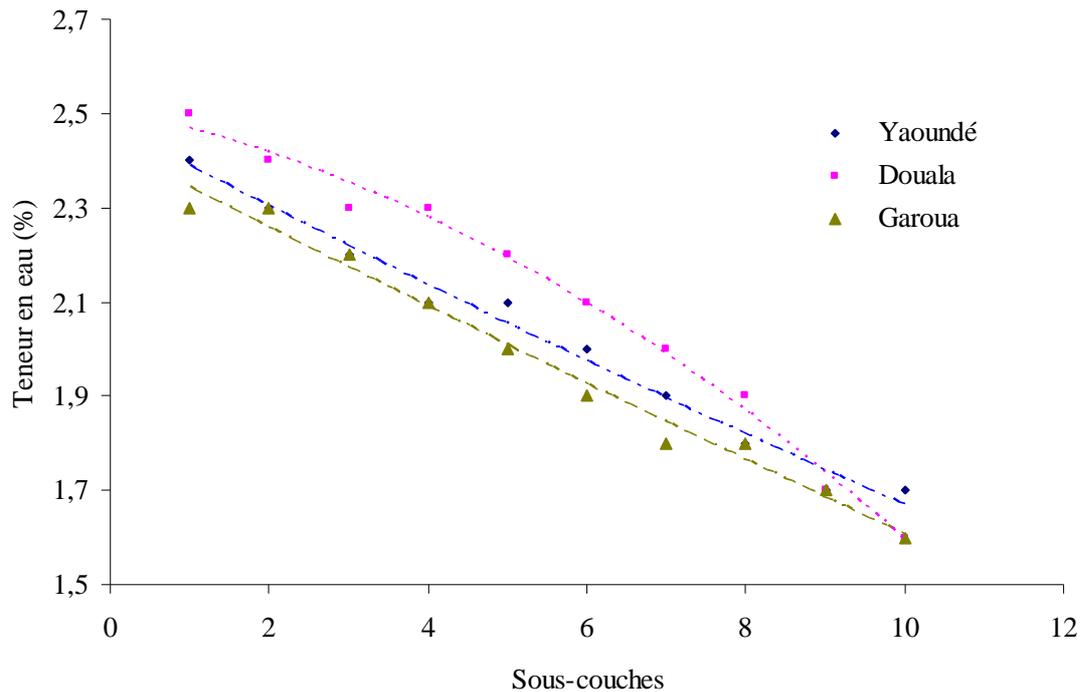


Figure 5.10: Profil de teneur en eau d'une enveloppe composite de bâtiment pour le mois le plus chaud de l'année.

5.6.2. Influence de l'enduit de ciment sur les profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau.

Une couche d'enduit de ciment sur la surface intérieure de l'enveloppe de bâtiment modifie le profil de l'humidité relative comme le montre la *figure 5.11*. On constate que la pente de ce profil est plus faible pour les matériaux BTSS et BTSP qui sont respectivement plus poreux et plus hygroscopiques, que le matériau BTS. Une couche d'enduit contribue à maintenir l'humidité relative à la surface extérieure de l'enveloppe pratiquement égale à celle du milieu environnant, protégeant ainsi les briques des effets de l'humidité. Avec un enduit sur la couche extérieure de l'enveloppe, on maintient une faible quantité d'humidité dans les briques, ce qui les préserve de la dégradation due à l'humidité.

L'enduit de ciment modifie aussi le profil de température à travers l'enveloppe de bâtiment comme le montre la *figure 5.12*. La modification de la pente du profil de température peut s'expliquer par le fait que la conductivité thermique de la brique de terre stabilisée est plus faible que celle de l'enduit.

La *figure 5.13* montre que les couches d'enduit créent une discontinuité sur le profil de teneur en eau. La couche d'enduit tant à l'intérieur qu'à l'extérieur a pour effet de retenir le maximum de vapeur d'eau. La teneur en eau des BTS reste par conséquent très faible, ce qui contribue à leur durabilité.

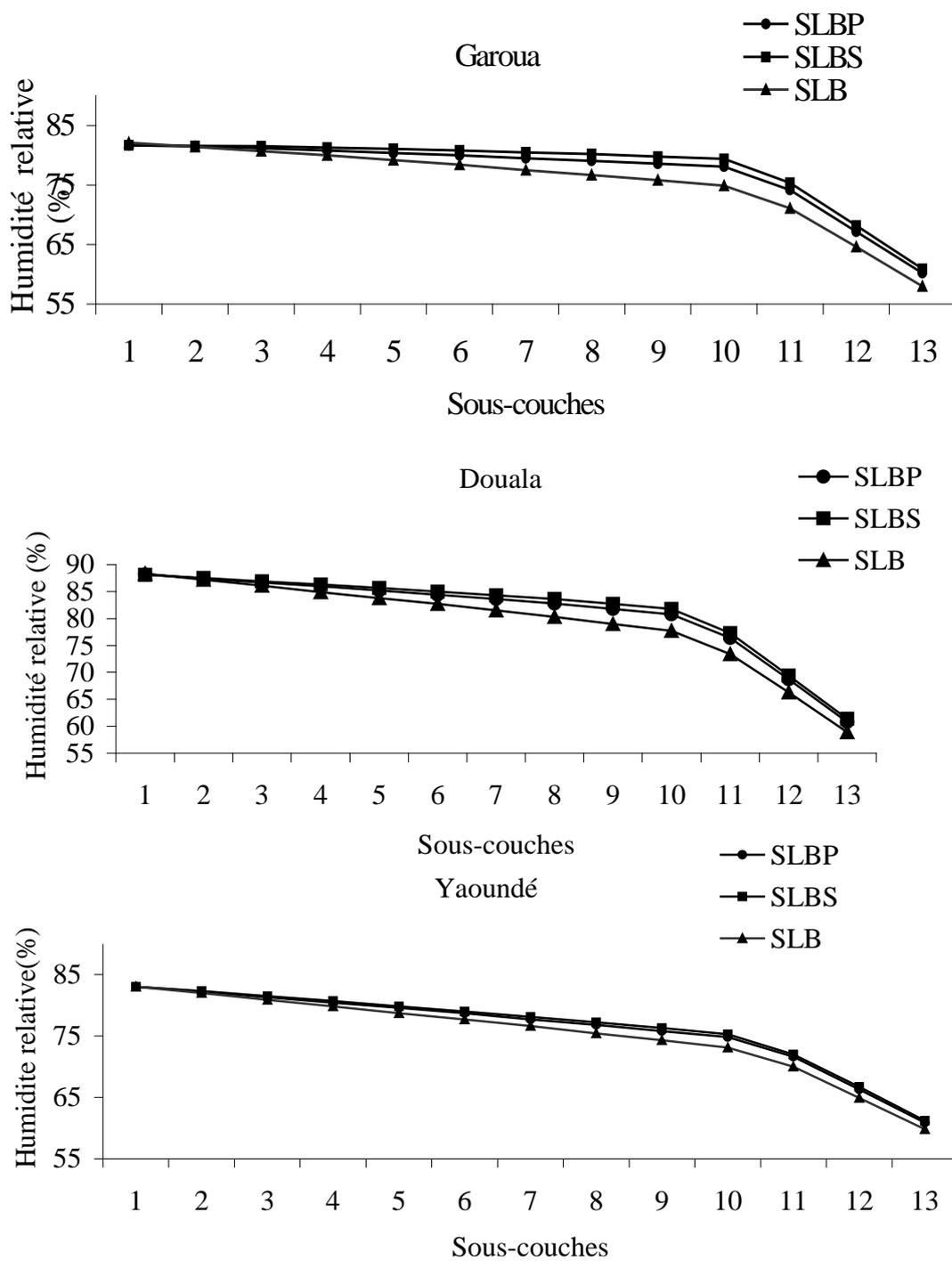


Figure 5.11: Influence de l'enduit sur le profil de l'humidité relative (enduit intérieur)

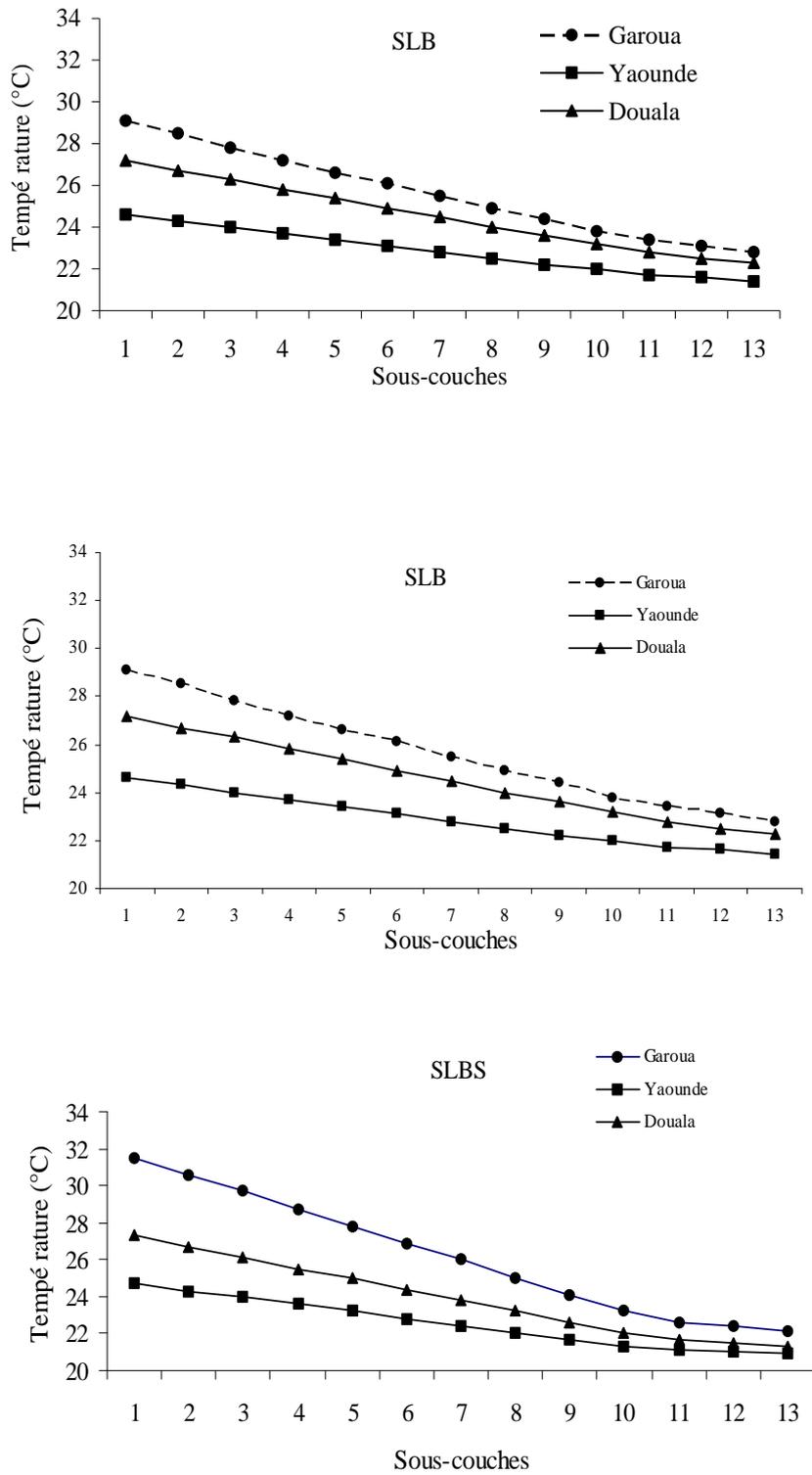


Figure 5.12: Influence de l'enduit de ciment sur le profil de température à travers l'enveloppe de bâtiment pour trois climats différents (enduit intérieur).

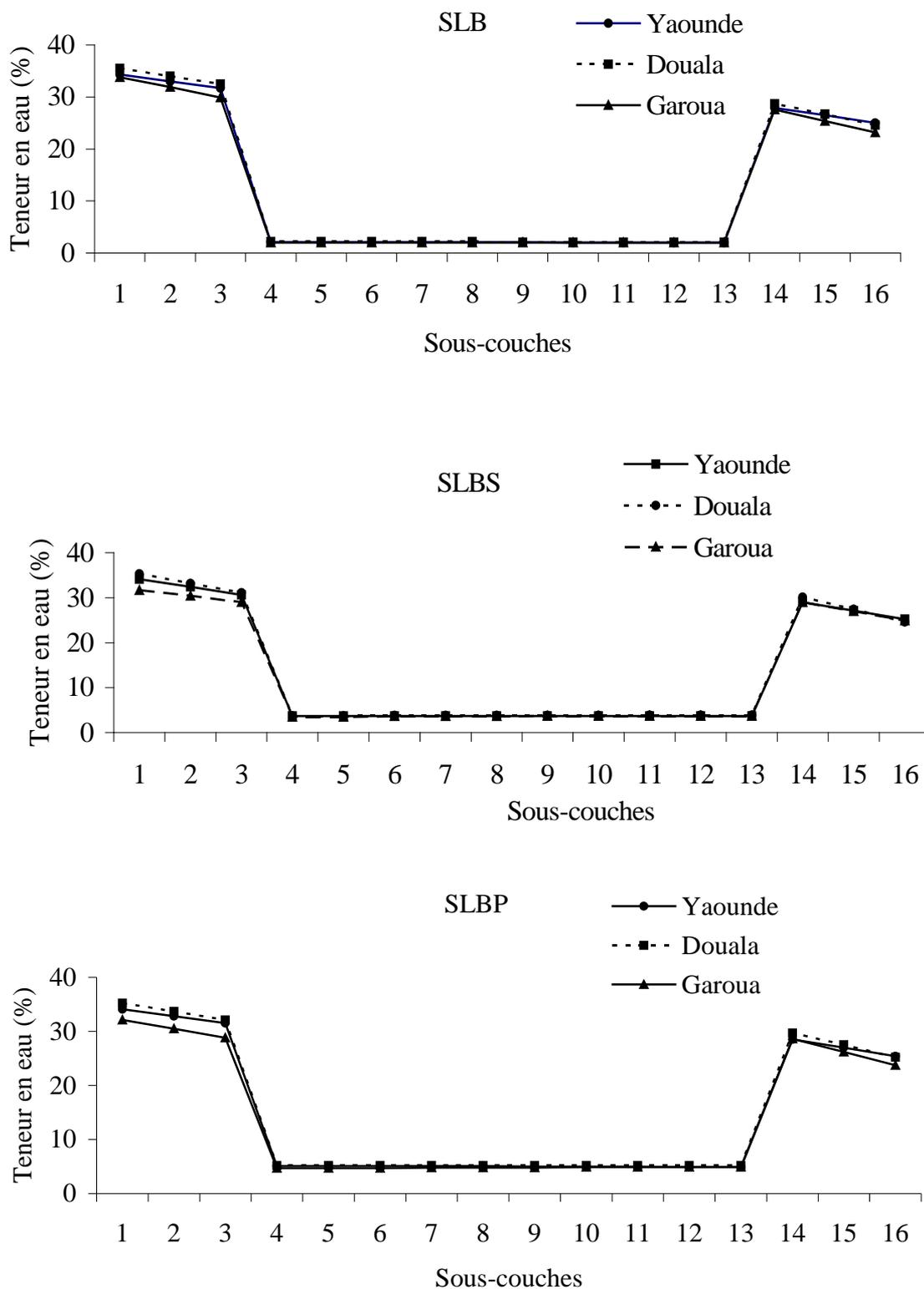


Figure 5.13: Influence de l'enduit sur le profil de la teneur en eau à travers une enveloppe composite de bâtiment (enduit intérieur et extérieur).

5.6.3-Influence de la nature du matériau sur les profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau.

Les profils de température à travers des murs en BTS, BTSP et BTSS sont présentés sur les *figures 5.14*. La pente du profil avec la BTS est la plus faible, ce qui peut être dû à sa plus grande conductivité thermique. Ces profils de températures décroissent plus rapidement pour la localité de Garoua en raison, probablement de la plus grande température extérieure.

L'évolution de l'humidité relative à travers un mur composite (matériau avec enduit intérieur et enduit extérieur) est présentée sur la *figure 5.15*. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que ce matériau est le plus hygroscopique des trois en raison de la présence en son sein de la sciure de bois. La pouzzolane naturelle, matériau en lui-même très poreux, présente un grand nombre de pores qui auraient pu contribuer à augmenter l'humidité relative de ce matériau. Comme nous l'avons constaté sur les isothermes de sorption, l'enveloppe des pores peut constituer un système de croutage, empêchant l'absorption de la vapeur d'eau.

La brique de terre stabilisée avec incorporation de pouzzolane naturelle présente la teneur en eau la plus importante comme le montre la *figure 5.16*. En effet, ce matériau est plus poreux que la BTS et la BTSS. L'augmentation de la teneur en eau dans la BTSP est sans doute due au remplacement progressif de l'air contenu dans les pores par de la vapeur d'eau.

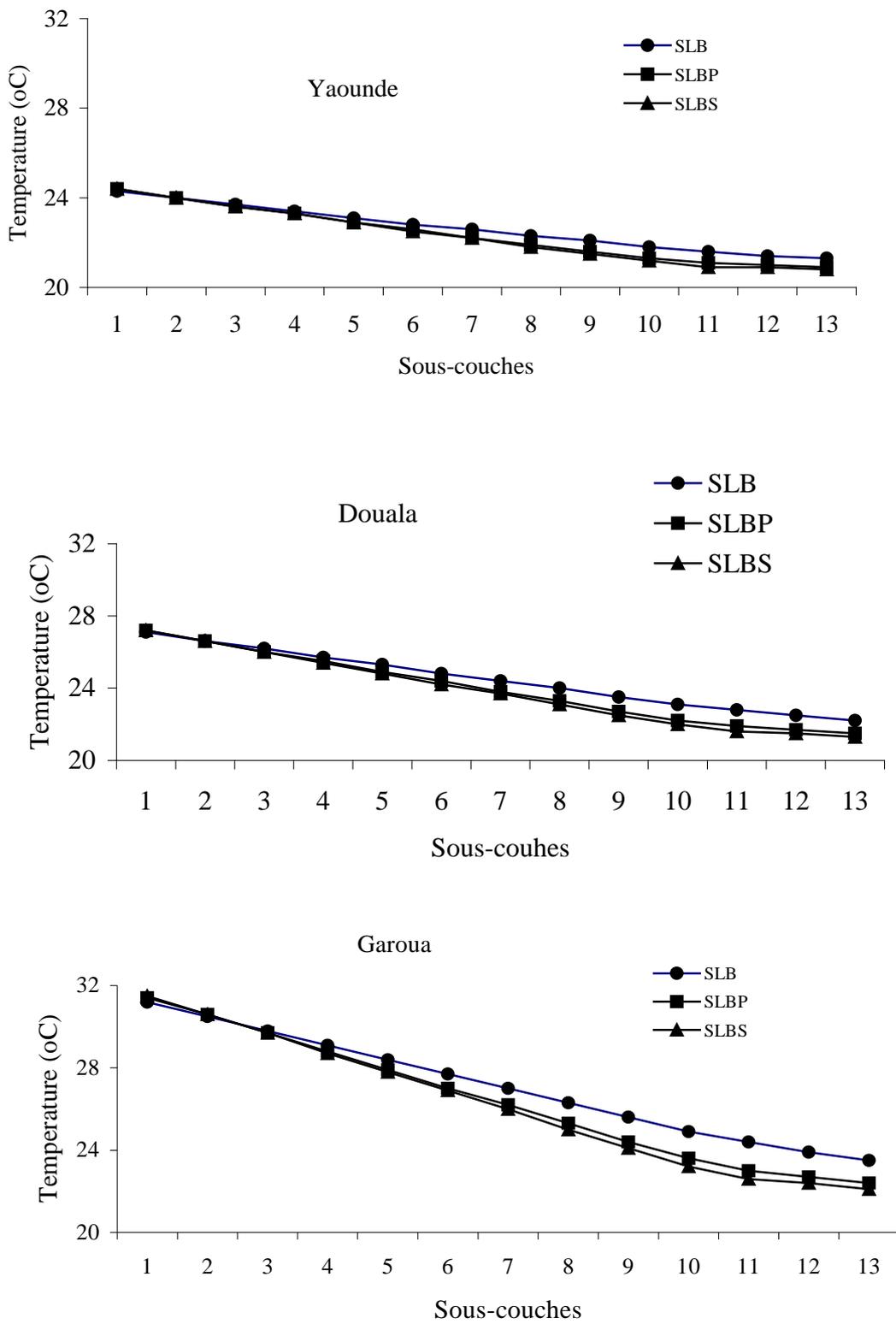


Figure 5.14: Influence de différents matériaux de l'enveloppe de bâtiment sur le profil de température (enduit intérieur).

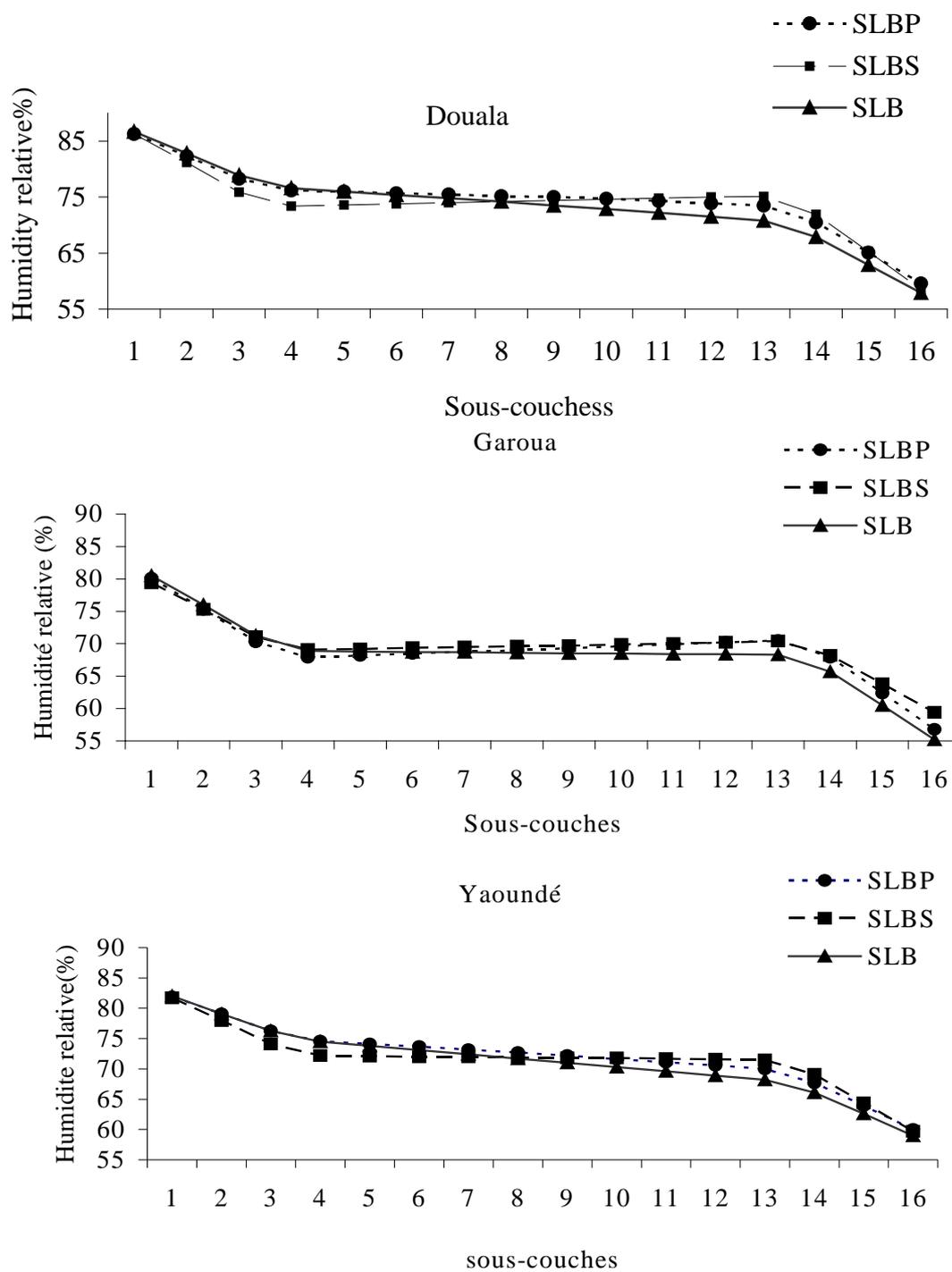


Figure 5.15: Influence de la nature du matériau sur le profil de l'humidité relative à travers une enveloppe de bâtiment (enduit intérieur et extérieur).

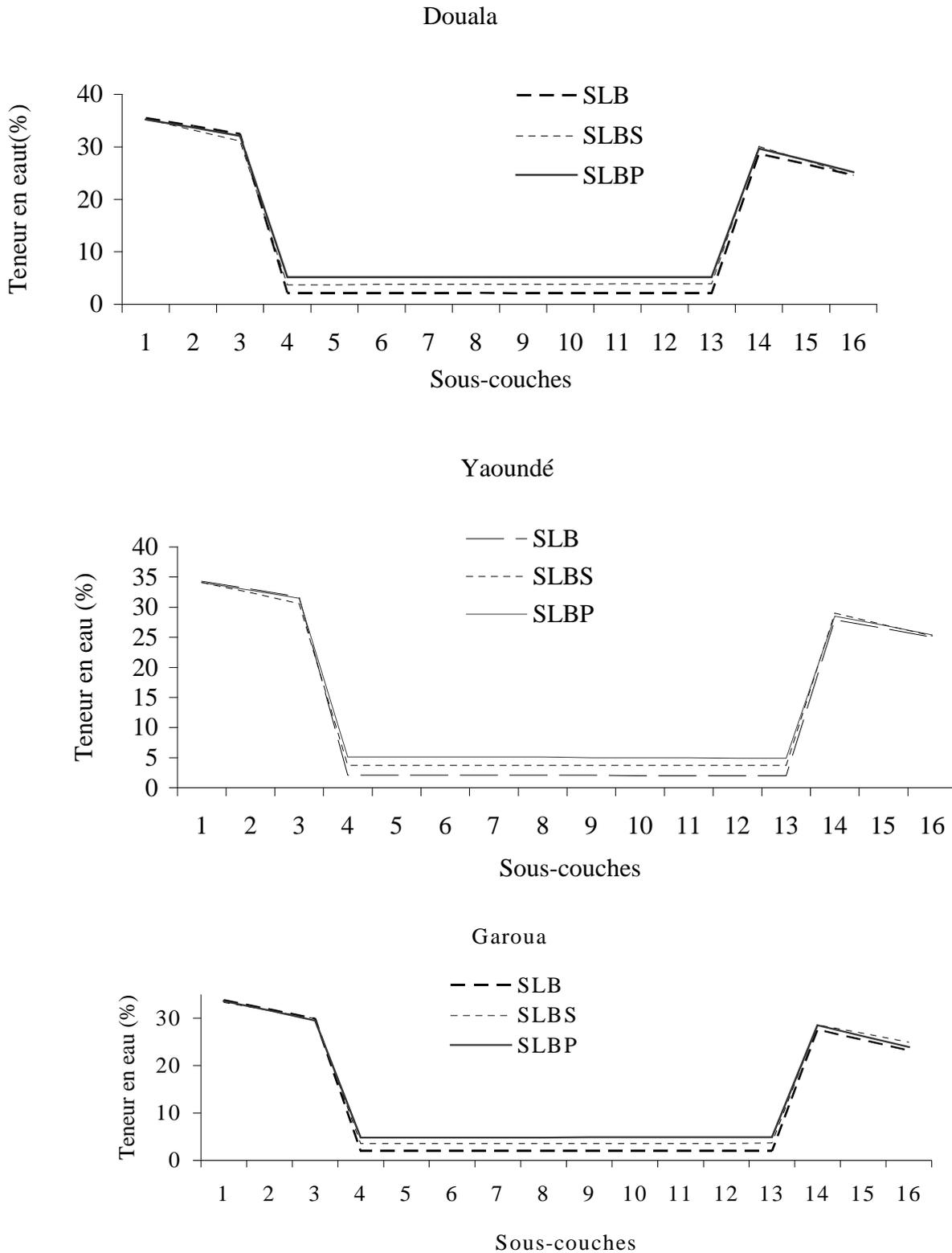


Figure 5.16: Influence de la nature du matériau sur le profil de la teneur en eau à travers une enveloppe de bâtiment (enduit intérieur et extérieur).

Conclusion

Cette partie de notre travail a consisté à faire une investigation du comportement des enveloppes de bâtiment réalisées en matériaux locaux face à trois climats : un climat tropical sec, un climat tropical humide et équatorial humide. L'enveloppe de bâtiment est constituée soit de briques de terre stabilisée, soit de briques de terre stabilisée avec incorporation de pouzzolane naturelle ou de sciure de bois. L'étude numérique a porté sur la modélisation et la simulation du transfert couplé de chaleur et d'humidité grâce au programme de calcul HMTrans. La simulation a permis de déterminer les profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau à travers l'enveloppe de bâtiment. Les résultats permettent de faire une prédiction sur la durabilité des matériaux utilisés pour les murs soumis aux conditions climatiques locales. Les résultats montrent que pour chacun des trois climats considérés, il existe une faible possibilité de condensation de la vapeur d'eau dans les matériaux utilisés. On peut conclure que les briques de terre stabilisée avec incorporation de pouzzolane ou de sciure de bois peuvent être utilisées comme enveloppe de bâtiment dans les régions à climat tropical ou équatorial sans que leur durabilité soit fortement altérée par les conditions climatiques. Sur le plan hygroscopique l'enduit de ciment a pour effet de maintenir l'humidité relative de l'enduit à celle du milieu environnant empêchant ainsi l'augmentation de l'humidité des briques. La teneur en eau augmente dans les deux cas. La vapeur d'eau est donc retenue par cet enduit qui joue un peu le rôle de pare vapeur entre l'extérieur et l'intérieur et protège mieux le matériau. La brique de terre stabilisée (sans incorporation ni de pouzzolane naturelle, ni de sciure de bois) présente la plus faible humidité relative et la plus faible teneur en eau. Ce matériau a un meilleur comportement hygroscopique, comme enveloppe de bâtiment, mais est un moins bon isolant thermique que les deux autres matériaux. Les autres propriétés (thermophysiques et mécaniques) devront être prises en compte pour le choix définitif qui devrait être un compromis entre la nécessité de réduire le coût de la climatisation, la durabilité et le coût de l'enveloppe de bâtiment.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les briques de terre stabilisées (BTS) au ciment sont utilisées pour la construction de l'enveloppe de bâtiments. Dans notre étude, nous avons réalisé de nouveaux matériaux incorporant un troisième composant en vue d'une amélioration de leurs performances en isolation thermique. Nous avons voulu également obtenir des données sur l'aptitude de ces matériaux à résister aux agressions de l'humidité du milieu environnant. Notre travail a donc consisté à déterminer un ensemble de propriétés thermophysiques et mécaniques relatives à leur utilisation dans le bâtiment.

Une première contribution concerne la mise au point de nouveaux matériaux locaux pour l'enveloppe de bâtiment. La pouzzolane naturelle et la sciure de bois qu'on trouve en abondance au Cameroun ont servi à réaliser des briques de terre plus légères et de meilleures performances thermiques que celles actuellement utilisées dans la construction des maisons. Sur le plan économique l'utilisation de ces matériaux contribue à diminuer la quantité des matériaux importés et sur le plan écologique à réduire l'émission de dioxyde de carbone.

Pour pouvoir utiliser les matériaux étudiés dans la construction des maisons, il est nécessaire de s'assurer qu'ils possèdent des propriétés mécaniques suffisantes. Les mesures de la résistance en compression faites sur des BTS incorporant de la pouzzolane naturelle et sur celles incorporant une quantité limitée de sciure de bois donnent des résultats du même ordre de grandeur que les BTS actuellement utilisées. Ces résultats montrent que les briques de terres confectionnées peuvent être utilisées dans la construction des bâtiments sans présenter de grands risques de fissuration.

La nécessité de connaître les propriétés thermophysiques de ces matériaux nous a conduit à choisir une méthode de mesure de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique d'une part, et une méthode de détermination de la chaleur spécifique d'autre part. La mesure de la diffusivité thermique a nécessité une modélisation de la méthode flash utilisée. Cette modélisation appliquée aux résultats expérimentaux a permis de simuler de manière très satisfaisante les thermogrammes obtenus et donc d'obtenir une valeur plus fiable et justifiable de la diffusivité thermique des matériaux étudiés.

Nous avons ensuite procédé à la détermination des variations de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique des matériaux avec la teneur en eau d'une part et la teneur en ciment d'autre part. La dépendance de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique de ces matériaux en fonction de la teneur en eau reste faible. L'augmentation de la teneur en ciment dans les BTS étudiées entraîne une augmentation de la conductivité et une baisse de la diffusivité thermique.

Si l'on ne considère que les propriétés d'isolation, on peut trouver des matériaux plus performants que la brique de terre stabilisée. Le polyuréthane est thermiquement plus isolant de même que la laine de roche qui absorbe mieux les bruits. Cependant ces isolants couramment utilisés avec des matériaux porteurs dans les pays industrialisés sont d'un prix de revient élevé par rapport aux briques de terre stabilisées. En effet, ces dernières possèdent des propriétés qui peuvent justifier leur utilisation dans la construction des bâtiments. Les BTS peuvent être considérées comme le compromis idéal entre trois exigences : un coût raisonnable, une résistance en compression satisfaisante et des caractéristiques thermiques avantageuses.

Les dommages subits par les maisons en terre ont pour principale origine des processus de vieillissement et de dégradation dus à l'humidité. Pour analyser leur

comportement hygrothermique et les conséquences sur la durabilité des murs en terre, des échantillons de BTS ont été caractérisés en laboratoire dans le but d'obtenir des paramètres nécessaires à la simulation numérique. Des échantillons initialement secs ont été exposés dans une enceinte régulée en température et en humidité afin de simuler le comportement des briques réalisées vis-à-vis de l'humidité. Tandis que les échantillons avec incorporation de sciure de bois ont une plus grande capacité d'absorption de la vapeur d'eau que les BTS simples, ceux incorporant de la pouzzolane naturelle en absorbent moins que les BTS simples.

La dernière étape de notre travail a consisté à modéliser le transfert couplé de chaleur et d'humidité à travers une enveloppe de bâtiment. Cette partie a permis de faire une étude portant sur l'évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau, entre un environnement climatique extérieur donné et une enceinte, séparés par une enveloppe de bâtiment réalisée avec chacun des trois matériaux étudiés. Les faibles teneurs en eau relevées dans les différents cas permettent de conclure qu'il y a une possibilité mineure de condensation d'eau dans ces matériaux. Grâce à leur structure poreuse, ces briques atténuent les variations d'humidité à l'intérieur des bâtiments. Les enveloppes de bâtiments peuvent être recouvertes d'un enduit de mortier soit pour des raisons d'esthétique (enduit intérieur), soit pour des raisons d'esthétique et de protection (enduit extérieur). La simulation de l'influence de l'enduit de mortier sur l'évolution des trois paramètres (température, humidité et teneur en eau) a confirmé qu'en revêtement extérieur, il protège l'enveloppe de bâtiment (constituée de briques de terre stabilisées) contre l'humidité environnante.

Le choix d'un des trois matériaux étudiés va dépendre de la disponibilité du matériau à incorporer et aussi de plusieurs facteurs dont les plus importants sont les performances en isolation thermique et le comportement face à l'humidité du milieu environnant. Les BTS incorporant de la sciure de bois présentent les meilleures performances en matière d'isolation, par contre elles sont plus hygroscopiques. Par conséquent, leur utilisation est conseillée pour un climat tropical sec. Quant aux BTS incorporant de la pouzzolane naturelle, elles sont moins hygroscopiques et leur utilisation serait plus judicieuse dans un climat tropical humide.

Dans cette étude nous avons utilisé de la sciure de l'Ayous comme agrégat pour obtenir des briques de terre plus légères et de meilleure performance en isolation thermique que celles actuellement utilisées. De nombreuses autres essences de bois sont exploitées au Cameroun. Une étude portant sur la nature du bois permettrait de bien se situer sur l'utilisation de la sciure de bois comme éléments à incorporer dans les BTS pour améliorer l'isolation thermique de bâtiments au Cameroun.

Il existe dans les régions volcaniques, en plus de la pouzzolane naturelle noire utilisée dans ce travail, de la pouzzolane rouge. L'étude de l'influence de la nature de la pouzzolane serait aussi d'une grande utilité.

Des études portant sur l'influence de la teneur en sciure de bois et sur celle de la teneur en pouzzolane naturelle dans les BTS permettraient d'optimiser la teneur de chacun des matériaux dans les briques de terre pour valoriser au mieux leur utilisation.

Une étude exhaustive sur la disponibilité d'autres matériaux locaux dans le cadre de la performance d'isolation thermique pourrait être généralisée à d'autres BTS.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques.

ABDESSELAM M (1999).

Une nouvelle approche de la conception climatique des bâtiments. Liaison Energies Francophone N° 42.

ADAM E.A. AND JONES P.J. (1995)

Thermophysical properties of stabilized soil building blocks. Building and Environment, Vol. 30 No pp 245-253.

A.L.B. instrumentation (1998)

Mesure de conductivité thermique.

AUBERT Jean Emmanuel (2002)

Valorisation d'une cendre d'incinération d'ordures ménagères, traitée par le procédé REVASOL dans les bétons hydrauliques. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse 2002.

AYISSI OKELE H.G. (1993).

Brique de terre stabilisée : contribution à l'étude des stabilisants d'origine organique et minérale. Mémoire de fin d'études d'élèves ingénieurs Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Yaoundé.

BESHR H., ALMUSALLAM A.A. AND MASLEHUDDIN M. (2003).

Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. Construction and Building Materials, Issue 2, March 2003, pp 97-103.

BIDJOCKA Cappel (1990).

Conception de bétons légers isolants porteurs. Applications aux pouzzolanes naturelles du Cameroun. Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon ; 1990.

BIOT M.A. (1941)

General theory of three-dimensional consolidation. Journal of Appl. Phys. 12. 155-161.

BLACKWELL J. H. (1956).

The effect of finite length of the heating probe. Canad. J. Phys.; VOL.34, 412-417.

BUSSCHAERT Luc (1996)

De nouvelles valeurs de λ pour les matériaux d'isolation. Printemps 1996.

CARSLAW H.S. et JAEGER J. C. (1959).

Conduction of heat in solids. Oxford, university press.

CARRET Jean-Christophe (1999).

L'industrialisation de la filière bois au Cameroun entre 1994 et 1998 ; observations, interprétations, conjectures. CERNA, Centre d'économie industriel de Paris.

CERTU (1998)

Remplage des tranchées Utilisation de matériaux autocompactants. Publication technique Certu.

DEGIOVANI et LAURENT (1986)

Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash. Revue de Phys. Appli. 21 (1986) 229-237.

DERU MICHAEL P. AND KIRKPATRICKALLAN T. (2002).

Ground-coupled moisture transfer from buildings. Part 1-Analysis and modeling. Transaction of the ASME 10/Vol. 124, February 2002.

DONGMO S. (1991)

Etude des propriétés thermophysiques d'un géobéton : prise en compte de l'humidité, de la compacité et de la granulométrie. Mémoire de fin d'études d'élèves ingénieurs ENS P, Yaoundé.

DOS SANTOS W. N. (2000).

Experimental investigation of the effect of moisture on thermal conductivity and specific heat of porous ceramic materials. Journal of Materials Sciences **35** (2000) 3977 – 3982.

DOUZANE Omar, LANGLET Thierry, ROUCOULT Jean M (1997)

Metrology of the thermophysical characteristics of building materials: a new experimental device. High Temperatures-High pressures, 1997, volume 29, pages 443-447; 14 ECTP Proceedings pages 189-193.

DYMIOTIS Christiana and Brigitte M. GUTLEDERER (2002)

Allowing uncertainties in the modeling of masonry compressive strength. Construction and Building materials, issue 8, December 2002, pp 443-452.

FORT Ch., ROUX J.M., GUIDON M. (1988)

Détermination des grandeurs thermophysiques par analyse des thermogrammes avant et arrière d'un échantillon plan soumis à un flash. Société française des thermiciens, Journée du 24 Février 1988.

GUSTAFSSON S. E. , KARAWASKI E. and Khan N.N. (1981).

Determination of the thermal conductivity tensor and the heat capacity of insulating solids with the transient hot-strip method. J. Phys., VOL. 52 (4) pp 2596-2600

HAKIMI A., OUISSI H., EL KORBI M. et YAMANI N (1998).

Un test d'humification séchage pour des blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment. Materials and structures/ Matériaux et Construction, Vol 31 pp 20-26 ; January-February.

HAMID Y.H. et HAMED O. A. (1992)

Determination of the thermal conductivities of building and insulating materials by the probe method. International journal of energy research;; VOL. 16; N°9 ; pp 829-835.

HAY B., FITZ JR. et BARSALÉ JC. (2004).

Mesure de Diffusivité thermique par méthode flash. Encyclopédie: "Techniques de l'Ingénieur", R 2955, pp1-12.

HEATHOCOTE Kevan (1991).

Compressive strength of cement stabilized pressed earth blocks. Building Research and Information Volume 19 Number 2.

HEATHOCOTE K. and E. JANKULOVSKI (1993).

Relationship between moisture content and strength of soil Crete blocks. Results of experimental investigation into relationship between moisture content and compressive strength of cement-stabilized soil Crete blocks. Building Research and Information Volume 21 Number 2.

HLADIK Jean (1990)

Métrologie thermique des propriétés thermophysiques des matériaux. Masson, Paris.

HOUBEN Hugo (1997)

Pour une architecture nouvelle. Ecodecision, Autonome 1997.

JANNOT Yves (2003)

Transferts et échangeurs de chaleur. Cours LEPT-ENSAM [http://. www.lept-ensam.u-bordeaux.fr/](http://www.lept-ensam.u-bordeaux.fr/).

JANNOT Yves and MEUKAM Pierre (2004)

Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip. Measurement Sciences and Technology 15 (2004) 1932-1938.

JOE O. Akinmusuru, Member, ASCE. (1994)

Thermal Conductivity of Earth Blocks. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No. 3, August.

KITTEL C. (1972)

Introduction à la physique de l'état solide. Paris : Dunod, 350p.

KOLAWOLE Ajibola; ONABANJO BO (1995).

Investigation of cocos nucifera as a potential insulator for buildings. Renewable Energy; 1995; VOL. 6; N° 1; pp 81-84.

LAMKHAROUET N., BOUSSAID S., EZBAKHE H., BAKKOURI A. AJZOUI T. ET BOUARDI A. Etude de la terre de Larache stabilisée au ciment. www.fst.ac.ma/fier/91.

LEWIS W.K. (1921).

Ind. Eng. Chem. 13, 427-432.

LUCAS F., ADELARD L., GARDE F. AND BOYER H. (2002)

Study of moisture in buildings for hot humid climates. *Energy and Building*, Volume 34, Issue 4, May 2002, pp 345-355.

MAILLET D. ANDRE S. et DEGIOVANI A. (1993).

Les erreurs sur la diffusivité thermique mesurée par la méthode flash : confrontation théorie-expérience. *J.Phys.III France* 3 (1993) 883-909.

MENGUY G. et EZBAKHE H. (1987)

Influence de la porosité sur les caractéristiques de matériaux de constructions. *Materials science to construction materials engineering, de la science des matériaux au génie des matériaux de construction volume one*, Paris.

MISSENARD A. (1965).

Conductivité thermique des solides gazeux et leurs mélanges. Paris : Eyrolles.

MOHAMAD K.B. (1990).

Modélisation du comportement hygroscopique de parois multicouches : application à la prévision des risques de condensation. Thèse de doctorat, université Paul Sabatier de Toulouse.

MOURTADA A. (1982).

Comportement thermique des mortiers d'isolation extérieure du bâtiment. Thèse de Doctorat d'ingénieur, Université Claude Bernard de Lyon I.

NGOHE-EKAM P.S. (1992).

Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des bois tropicaux. Thèse de doctorat, université Claude Bernard de Lyon I.

OTTOU J. M. A. (1987)

Contribution à l'étude de la stabilisation des sols latéritiques par association compactage dynamique liant hydraulique en vue de l'élaboration de blocs pour la construction. Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Yaoundé.

ÖZTÜRK H. and AYVAZ Y (2002).

Comparative Study of reinforced concrete beams strengthened and repaired-strengthened by using V connecting bars and U connecting stirrups. *Construction and Building Materials*, Volume 16, Issue 6, September 2002, pp 321-329.

PARKER W.J., JENKINS R.J., BUTTER B.P., ABBOT B.L. (1961).

Flash method of determining thermal diffusivity heat capacity and thermal conductivity. *J.Appl. Phys.* 32 N° 9 September 1961.

PERRIN B. (1985)

Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en Génie civil. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.

POMPEO C.

L'isolation thermique dans le bâtiment en France. Revue technique du bâtiment et des constructions industrielles N°178.

POON C.S., KOU S. C. and LAM L. (2002).

Use recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. Construction and building Materials. Volume16, July 2002, pp281-289.

PRADHAN P.R., SACHDEV K. BALA K. SAXENA N. S. AND SACKSENA M. P. (1991). Temperature dependence of thermal conductivity and thermal diffusivity of some composites using the transient plane source technique. Int. J. Energy Res. ;; VOL.13, pp 411-417.

RECKNAGEL-SPRENGER-HÖNEMANN-SCHRAMEK (1995)

Manuel pratique de génie climatique tome 1. PYC Éditions Livres, édition 1995.

RICHARD A. M.(1995)

La terre cuite. Le moniteur 17 Mars 1995.

SIEGEL R and HOWELL J.R. (1972).

Thermal radiation heat transfers. Mc Graw Hill Book Company.

SOLOMON-AYEH K.A. (1994).

Studies of strengths of stabilized laterite blocks and rendering mortars. Building Research and Information Volume 22 Number 3.

SHUN-LUNG SU (1997).

Modeling of multi-phase moisture transfert and stress in drying clay bricks. Applied Clay Science 12 (1997) 189-207.

ULGEN K. (2002)

Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. Energy and Building, Volume 34, Issue 3, March 2002, pp 273-278.

WATANABE Kazumasa (1994).

Hygro-thermal condition in building Components simulated with heat and moisture simultaneous transfer model. March 1994.

YANG W. S. SOKHANSANJ; J. TANG; P. WINTER (2002).

Determination of Thermal Conductivity, Specific Heat and Thermal Diffusivity of Borage Seeds. Biosystems Engineering 82(2), 169-176

ANNEXES

Annexes

A.2. 1- Programme de calcul MATLAB : Modélisation de la méthode flash	131
A.2.2-Transformation de Laplace inverse	133
A3.1-Courbes de séchage des éprouvettes.....	135
A3.2-Etalonnage des sondes	136
A3.3-Exemple de tableau de Calcul de la conductivité thermique.....	137
A3.4-Exemple de tableau des essais de mesure de diffusivité thermique	138
A 5.1-Format Notepad les données du fichier HMSIM:.....	139
A.6 -Liste des Publications de la thèse	140

A.2. 1- Programme de calcul MATLAB : Modélisation de la méthode flash

```

% Estimation des paramètres de la méthode flash
clear
% Lecture des données
% L146
tm=[0 10 20 120 237 300 365 420 485 560 650 765 910 1190 1230 1530]
Tm=[0 0 0 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1 1]
e=.045;NT=15
t0=30;
% Fin lecture des données
% Coefficients de Stehfest avec N=10 termes
V=[8.333333333333333333333333333333e-2 -3.208333333333333333333333333333e1 1.279e3 -1.5623666666666666667e4
8.4244166666666666666666667e4];
V=[V -2.369575e5 3.7591166666666666666666667e5 -3.4007166666666666666666667e5 1.640625e5 -3.28125e4];
% a = effusivité
% b = conductivité
% c = densité de flux
% d = coefficient de convection
% Entrée des valeurs extrêmes des paramètres
bmin=1;bmax=1;cmin=4000;cmax=12000;dmin=0;dmax=10;amin=4e-7;amax=6e-7; % Valeurs extremes des
paramètres
db=bmax-bmin;dc=cmax-cmin;dd=dmax-dmin;da=amax-amin;
b=(bmin+bmax)/2;c=(cmax+cmin)/2;dm=(dmax+dmin)/2;a=(amax+amin)/2;
dmin0=dmin;bmin0=bmin;cmin0=cmin;amin0=amin;
dmax0=dmax;bmax0=bmax;cmax0=cmax;amax0=amax;
% Fin de l'entrée des valeurs extrêmes des paramètres
% Estimation des paramètres
for u=1:6
Ecartmin=10000000;
db=db/2;bmin=b-db;bmax=b+db;
dc=dc/2;cmin=c-dc;cmax=c+dc;
dd=dd/2;dmin=dm-dd;dmax=dm+dd;
da=da/2;amin=a-da;amax=a+da;
if bmin<bmin0
bmin=bmin0;
end
if bmax>bmax0
bmax=bmax0;
end
if cmin<cmin0
cmin=cmin0;
end
if dmin<dmin0
dmin=dmin0;
end
if dmax>dmax0
dmax=dmax0;
end
if amin<amin0
amin=amin0;
end
if cmax>cmax0
cmax=cmax0;
end
if amax>amax0
amax=amax0;
end
for l=1:5
b=bmin+(l-1)*.25*(bmax-bmin);

```

```

for n=1:5
d=dmin+(n-1)*.25*(dmax-dmin);
for s=1:5
a=amin+(s-1)*(amax-amin)*.25;
for m=1:5
c=cmin+(m-1)*.25*(cmax-cmin);
% Calcul de Tc(t)
Tc(1)=0;
for k=1:NT;
t=tm(k+1);
Tc(k+1)=0;
for i=1:10
p=i*log(2)/t;
q=(p/a)^.5;
X=(c/p)*(1-exp(-t0*p))/(b*(p/a)^.5*sinh((p/a)^.5*e)+2*d*cosh((p/a)^.5*e)+d*d*sinh((p/a)^.5*e)/b/(p/a)^.5);
Tc(k+1)=Tc(k+1)+V(i)*X;
end
Tc(k+1)=log(2)*Tc(k+1)/t;
end
% Fin du calcul de Tc(t)
Ecart2=0;
for w=2:NT
Ecart2=Ecart2+((Tm(w)-Tc(w)))^2
end
if Ecart2<Ecartmin
Ecartmin=Ecart2;
lmin=l;
mmin=m;
nmin=n;
smin=s;
end
end
end
end
end
b=bmin+(lmin-1)*.25*(bmax-bmin)
c=cmin+(mmin-1)*.25*(cmax-cmin)
d=dmin+(nmin-1)*.25*(dmax-dmin)
a=amin+(smin-1)*(amax-amin)*.25
end
% Fin de l'estimation
plot(tm(1:NT+1),Tm(1:NT+1),'b',tm(1:NT+1),Tc(1:NT+1),'r')
grid

```

A.2.2-Transformation de Laplace inverse

Méthode analytique

La transformée de Laplace $\theta(p)$ de la fonction $T(t)$ est donnée par : $L[T(t)] = \theta(p) = \int_0^{\infty} \exp(-p t) T(t) dt$

Il n'existe pas de formule analytique générale permettant de calculer $T(t)$ connaissant $\theta(p)$. On connaît cependant l'expression exacte de $T(t)$ pour certaines fonctions particulières $\theta(p)$, on en trouvera des exemples page suivante (cf. Spiegel pour des tables plus complètes). L'utilisation de ces tables associée aux propriétés particulières de la transformation de Laplace inverse rappelées en annexe A.2.2 peut permettre de résoudre un certain nombre de cas. On essaiera toujours de décomposer une fonction complexe en somme, produit, série... de fonctions simples plus facilement inversibles.

Méthodes numériques

Pour les cas de figure pour lesquels on ne peut pas trouver une solution analytique, on peut employer l'une des deux méthodes numériques suivantes :

Méthode de Stehfest

La transformée inverse de la fonction $\theta(p)$ peut se calculer par :

$$T(t) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{j=1}^N V_j \theta_i \left(\frac{j \ln(2)}{t} \right)$$

$N = 20$ (double précision) :

$V1 = -5,511463844797178 \cdot 10^{-6}$	$V2 = 1,523864638447972 \cdot 10^{-1}$	$V3 = -1,174654761904762 \cdot 10^2$
$V4 = 1,734244933862434 \cdot 10^4$	$V5 = -9,228069289021164 \cdot 10^5$	$V6 = 2,37740877871031810 \cdot 10^7$
$V7 = -3,494211661953704 \cdot 10^8$	$V8 = 3,241369852231879 \cdot 10^9$	$V9 = -2,027694830723779 \cdot 10^{10}$
$V10 = 8,946482982379724 \cdot 10^{10}$	$V11 = -2,870209211471027 \cdot 10^{11}$	$V12 = 6,829920102815115 \cdot 10^{11}$
$V13 = -1,219082330054374 \cdot 10^{12}$	$V14 = 1,637573800842013 \cdot 10^{12}$	$V15 = -1,647177486836117 \cdot 10^{12}$
$V16 = 1,221924554444226 \cdot 10^{12}$	$V17 = -6,488065588175326 \cdot 10^{11}$	$V18 = 2,333166532137059 \cdot 10^{11}$
$V19 = -5,091380070546738 \cdot 10^{10}$	$V20 = 5,091380070546738 \cdot 10^9$	

$N = 10$ (simple précision):

$V1 = 1/12$	$V2 = -385/12$	$V3 = 1279$	$V4 = -46871/3$	$V5 = 505465/6$	$V6 = -473915/2$
$V7 = 1127735/3$	$V8 = -1020215/3$	$V9 = 328125/2$	$V10 = -65625/2$		

Méthode de Fourier

$$T(t) = \frac{\exp(ct)}{t_{\max}} \left[\frac{\theta(c)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (\text{Re}[\theta(c + j\omega_k)] \cos(\omega_k t) - \text{Im}[\theta(c + j\omega_k)] \sin(\omega_k t)) \right]$$

Avec $\omega_k = \frac{k \pi}{t_{\max}}$

La somme infinie est dans la pratique calculée pour un nombre de fini N de termes, on prendra en général $N > 100$. Cette méthode nécessite de choisir deux paramètres : c et t_{\max} . On doit s'assurer a posteriori que $\exp(-2 c t_{\max}) T(2 t_{\max}) \approx 0$.

Choix d'une méthode et vérification des résultats

La méthode de Stehfest est plus simple à mettre en oeuvre car elle ne nécessite pas de choisir certains paramètres. La méthode de Fourier peut conduire à un meilleur résultat dans le cas d'inversion de certaines fonctions comme les fonctions périodiques par exemple (cf. Maillet).

L'étude du comportement de la fonction $\theta(p)$ aux temps longs ($t \rightarrow \infty$ soit $p \rightarrow 0$) et aux temps courts ($t \rightarrow 0$ soit $p \rightarrow \infty$) peut conduire à des formules approchées de $\theta(p)$ dont on peut alors trouver la transformée de Laplace inverse analytiquement. La comparaison de ces solutions analytiques avec les résultats de l'inversion numérique donne une indication sur la justesse de l'inversion numérique.

Transformation de Laplace inverse

$$q = \sqrt{\frac{p}{a}}$$

$\theta(p) = L\{T(t)\}$	$T(t)$	$\theta(p) = L\{T(t)\}$	$T(t)$
$\frac{1}{p}$	1	$\frac{\ln(p)}{p}$	$-\ln(t) - \gamma$; $\gamma = 0,57721$
1	$\delta(t)$ Dirac	$\frac{1}{\sqrt{p}}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}}$
$\frac{1}{p + \beta}$	$e^{-\beta t}$	$\frac{1}{p\sqrt{p}}$	$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t}$
$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$	$\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{p^2 - \omega^2}$	$\text{sh}(\omega t)$
$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$	$\cos(\omega t)$	$\frac{p}{p^2 - \omega^2}$	$\text{ch}(\omega t)$
$\frac{b}{p(b + \sqrt{p})}$	$1 - \exp(b^2 t) \text{erfc}(b\sqrt{t})$	$\frac{1}{p^n}$ $n = 1, 2, 3, \dots$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}$

$\theta(p) = L\{T(t)\}$	$T(t)$
e^{-qx}	$\frac{x}{2\sqrt{\pi \alpha t^3}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{q}$	$\left(\frac{\alpha}{\pi t}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{p}$	$\text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{pq}$	$2\left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - x \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{p^2}$	$\left(t + \frac{x^2}{2\alpha}\right) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - x \left(\frac{t}{\pi \alpha}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{q+h}$	$\left(\frac{\alpha}{\pi t}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - h \alpha \exp(hx + \alpha t h^2) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + h\sqrt{\alpha t}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{q(q+h)}$	$\alpha \exp(hx + \alpha t h^2) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + h\sqrt{\alpha t}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{p(q+h)}$	$\frac{1}{h} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \frac{1}{h} \exp(hx + \alpha t h^2) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + h\sqrt{\alpha t}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{pq(q+h)}$	$\frac{2}{h} \left(\frac{\alpha}{\pi t}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{1+hx}{h^2} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) + \frac{1}{h^2} \exp(hx + \alpha t h^2) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + h\sqrt{\alpha t}\right)$
$\frac{e^{-qx}}{(q+h)^2}$	$-2h \left(\frac{\alpha^3 t}{\pi}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\alpha t}\right) + \alpha (1+hx + 2h^2 \alpha t) \exp(hx + \alpha t h^2) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + h\sqrt{\alpha t}\right)$

A3.1-Courbes de séchage des éprouvettes

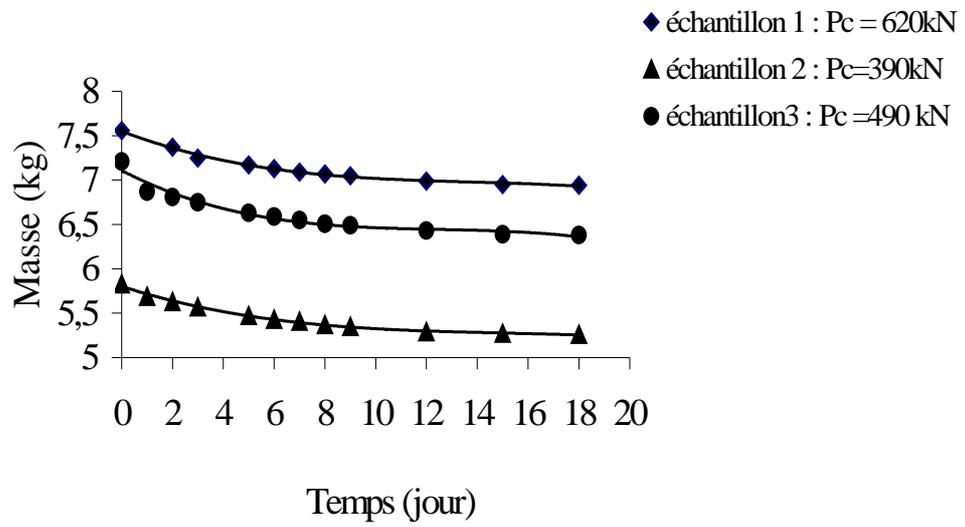


Figure A3.1 : Exemple de courbes de séchage des éprouvettes (latérite)

A3.2-Etalonnage des sondes

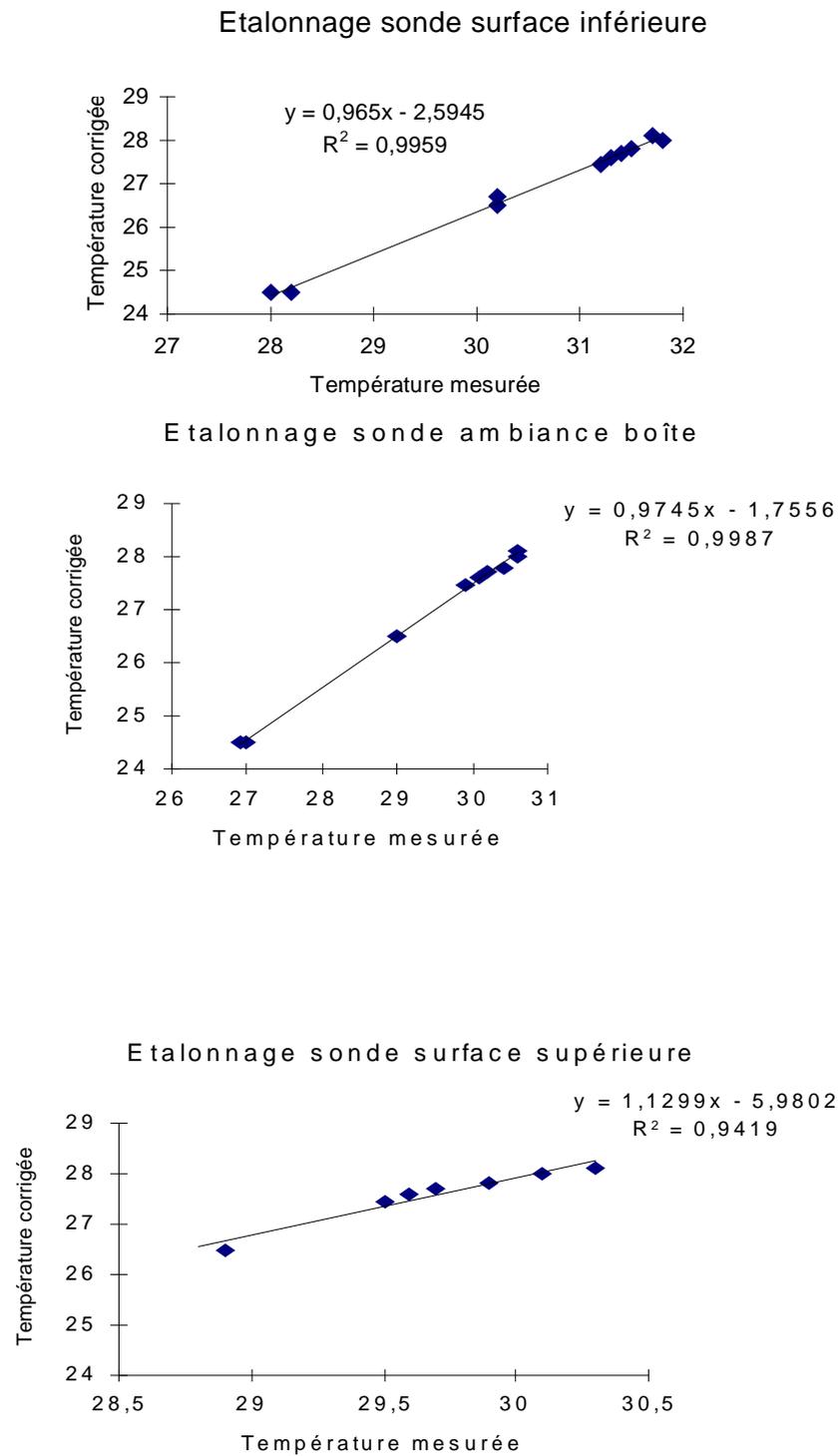


Figure A3.2 : Etalonnage des sondes de température pour la mesure de la conductivité thermique

A3.3-Exemple de tableau de Calcul de la conductivité thermique

Désignation	Symbole	Unité	19h	19h05	19h10	19h15	19h20	19h25	19h30	19h35	19h40	19h45	19h50	20h	8H(lendemain)
Aire des surfaces	S	m ²	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Epaisseur Echantillon	e	m	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Température chaude	Tc	°C	26,0	26,0	26,0	25,9	26,0	26,0	25,9	25,9	25,9	25,9	26,0	26,0	25,8
Température froide	Tf	°C	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6
Tension	V	V	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00
Résistance de chauffage	R	ohm	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800
Coefficient de perte	C1	W/m ² .°C	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Température boîte	Tb	°C	26,9	27,2	27,2	27,1	27,1	26,8	26,8	27,0	27,0	27,0	26,8	26,8	26,7
Température Ambiante	Ta	°C	25,4	25,6	25,6	26,0	25,9	25,7	25,6	25,7	25,6	25,8	25,6	25,6	23,6
S(Tc-Tf)			0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
A = e/S(Tc-tF)			1,40	1,40	1,40	1,70	1,40	1,56	1,70	1,70	1,70	1,50	1,40	1,40	2,17
B=V ² /R-C1(Tb-Ta)			0,74	0,73	0,73	0,81	0,79	0,81	0,79	0,78	0,76	0,79	0,79	0,79	0,49
Conductivité thermique	λ=A*B	W/m.°C	1,04	1,02	1,02	1,37	1,11	1,26	1,34	1,32	1,29	1,19	1,11	1,11	1,06
erreur sur λ	δλ		0,12	0,12	0,12	0,20	0,13	0,17	0,19	0,18	0,18	0,15	0,13	0,13	0,18
Conductivité Moyenne (8)	λ	W/m.°C	1,15												
erreur moyenne	Δλ		0,15												
Masse volumique	ρ	kg/m³	1966												
Teneur en eau	ω	%	2,91												

A3.4-Exemple de tableau des essais de mesure de diffusivité thermique

Date: 24/08/2001					
Expérimentateur : MEUKAM			Echantillon : LAT +Sciure (20 bar)		
Epaisseur Echantillon: 4,3 cm			Masse éprouvette (kg) : 4,45		
Distance Lampe-échantillon (cm) :			M.volumique (kg/m3) : 1475		
Durée de l'impulsion (s) : 30			Puissance Lampe (W): 500		
N.B.: l'heure, les minutes et les secondes sont entrées chacune dans sa colonne					
Conditions de départ (au moment de l'envoi de l'impulsion)					
H = 0 Min =0 Sec = 0 Température de départ 28 °C					
Ci-dessous l'évolution de la température de la face non irradiée avec le temps					
Température face non irradiée (°C)	minute	seconde	Durée calculée t(s)	Différence de température entre l'instant initial et l'instant considéré θ (°C)	
28,1	0	30	30	0,1	
28,1	2	0	120	0,1	
28,1	5	9	309	0,1	
28,2	6	52	412	0,2	
28,3	8	6	486	0,3	
28,4	9	6	546	0,4	
28,5	10	7	607	0,5	
28,6	11	5	665	0,6	
28,7	12	6	726	0,7	
28,8	13	12	792	0,8	
28,9	14	16	856	0,9	
29	15	37	937	1	
29,1	17	9	1029	1,1	
29,2	18	36	1116	1,2	
29,3	20	54	1254	1,3	
29,4	23	33	1413	1,4	
29,5	27	40	1660	1,5	
29,5	30	0	1800	1,5	
29,5	35	0	2100	1,5	
Calcul de la diffusivité Thermique					
Données	Symbole	Unité	Valeur	Diffusivité	
Epaisseur	e	m	0,045		
Teta max	θ_{max}	°C	1,5		
Coefficient de q3			700,39		
Coefficient de q2			-1295,4		
coefficient de q			1334,1		
constante	d		185,1		
Durée excitation		s	1196,61172		Expression de a
Durée excitation1/2		s	752,489531	3,02384E-07	$e^2/t_{5/6}[0,761-0,926t_{1/2}/t_{5/6}]$
Durée excitation2/3		s	924,19	3,12354E-07	$e^2/t_{5/6}[1,15-1,25t_{2/3}/t_{5/6}]$
Dureée excitation1/3		s	615,84875	2,93378E-07	$e^2/t_{5/6}[0,617-0,862t_{1/3}/t_{5/6}]$
			Moyenne	3,02705E-07	
			Ecart relatif (%)	2,975287292	

A.6 -Liste des Publications de la thèse

1. MEUKAM P., JANNOT Y., NOUMOWÉ A., KOFANE T.C. (2004) Thermo physical characteristics of economical building materials. *Construction and Building Materials*, Vol. 18, Issue 6, 2004.
2. MEUKAM P., NOUMOWÉ A., JANNOT Y., DUVAL R. (2003) Caractérisation Thermophysique et Mécanique de Briques de Terres Stabilisées en vue de l'Isolation Thermique de Bâtiment. *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, RILEM, Vol. 36, N°261, 2003.
3. MEUKAM P., NOUMOWÉ A., KOFANE T.C. (2002) ThermoPhysical Properties of Lateritic Soil Bricks : Influence of water content. *Journal of the International Centre for Theoretical Physics, UNESCO and International Atomic Energy Agency. Trieste*, N°157, 2002, IC/2002
4. MEUKAM P., NOUMOWÉ A., DUVAL, R., WATANABE K. (2003) Modeling of Heat and Moisture Transfers in Building Envelopes made of Lateritic Soil Bricks. 3rd International Conference on Computational Heat and Mass Transfer. May 2003, Banff, Canada
5. MEUKAM P. NOUMOWE A.(2005). Modeling of heat and Mass transfer in lateritic building envelopes. *Heat and Mass Transfer* 42 (2)158-167.