

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE

FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre.....

Série.....

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de magistère en physique

Spécialité : Energétique

Option : Photothermique

THEME

**EFFET DE L'HUMIDITE SUR LES CARACTERISTIQUES THERMIQUES ET MECANIQUES DE
MATERIAUX UTILISES DANS LA CONSTRUCTION**

Par :

HAMIDA MOHAMED LAMINE

Soutenue le: /.../ 2010

Devant le jury :

Président :	N. BELLEL	M.C	Univ. Mentouri- Constantine
Rapporteur :	A. CHAKER	Pr.	Univ. Mentouri- Constantine
Examineurs :	H. CHABIL	Pr.	Univ. Mentouri- Constantine
	M. DJEZZAR	M.C	Univ. Mentouri- Constantine

Dédicaces

À ma mère

À mon père

À ma femme et mes enfants

À mes frères

À ma sœur et son mari

À tous mes amis

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de Physique Energétique de l'Université Mentouri de Constantine.

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à madame A. Chaker, Professeur au département de Physique pour avoir assuré l'encadrement de ce travail et de m'avoir fait profiter de ses connaissances scientifiques, de ses suggestions pertinentes et de ses conseils et commentaires pratiques, qui ont été fondamentaux pour mener à bon terme ce mémoire.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur N. Bellel, maître de conférences à l'Université de Constantine, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse.

Je remercie vivement Monsieur H. Chabil, professeur au département de génie civil et Monsieur M. Djeddar, maître de conférences au département de physique, pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici mon entière considération.

Je ne pourrais oublier de remercier tout le personnel de L.T.P EST pour l'ensemble de leurs contributions à la réalisation des essais mécaniques.

A tous mes amis de près et de loin qui m'ont encouragé et m'ont aidé à progresser dans mon travail, spécialement Messieurs A. Nahoui et M. Mhimdatssi

Un remerciement spécial s'adresse à toute ma famille pour leur soutien moral, principalement ma tendre mère et mon père pour leur constant appui et leurs encouragements, à ma femme et mes enfants pour leur patience et leur compréhension dont ils ont fait preuve durant toute la période de préparation de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Nomenclature

<i>Symboles</i>	<i>Unités</i>
B_0 : Champ magnétique	Tesla
C : Coefficient de déperdition de la boîtes	$w/^\circ C$
D : Coefficient de diffusion moléculaire de vapeur d'eau	m^2/s
e : Epaisseur de l'échantillon	m
f_0 : Fréquence de Larmor	Hz
g : Accélération terrestre	m/s^2
K_l : Perméabilité du milieu à la phase liquide	m^2
M : Masse molaire	-
M_i : Masse d'un constituant i	Kg
M_0 : Moment magnétique	-
P_c : Pression capillaire	N/m^2
P_i : Pression d'un constituant i	N/m^2
q : Flux de chaleur	W
R : Constante molaire	J/mol K
R_c : Resistance à la compression	MPa
S : Nombre de spin	-
S_r : Saturation en eau	-
S_s : Surface spécifique	$1/m$
T : Température	$^\circ C$
T_1 : Temps de relaxation longitudinal	S
T_2 : Temps de relaxation transversal	S
T_e : Temps d'écho	S
V_i : Volume d'un constituant i	m^3

λ	: Conductivité thermique	$W/m^{\circ}C$
ε	: Porosité totale	-
ε_o	: Porosité ouverte	-
τ	: Tortuosité	-
θ_l	: Teneur volumique en eau	-
ω	: Teneur massique en eau	-
σ	: Tension superficielle	N/m
ρ	: Masse volumique	Kg/m^3
α	: Coefficient de rétractibilité	-
ν	: Viscosité cinématique de l'eau	m^2/s
Ψ	: succion	m
Φ	: Humidité relative	-

EFFET DE L'HUMIDITE SUR LES CARACTERISTIQUES THERMIQUES ET MECANIQUES DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Résumé

Le présent travail vise essentiellement à montrer que l'emploi d'ajouts de nature végétale peut offrir de nouvelles possibilités de développement des matériaux de construction. Notre intérêt a porté particulièrement sur l'effet d'ajouts sciure de bois et paille sur les propriétés thermophysiques et mécaniques du matériau plâtre. La méthode expérimentale utilisée à cet effet est la méthode "des boîtes", employée surtout pour mesurer la conductivité thermique. Les limites mécaniques ont été déterminées par des essais de compression.

Les résultats obtenus nous ont permis en premier lieu de conclure que, la présence d'eau dans les matériaux poreux diminue sensiblement leur pouvoir isolant. En outre, l'analyse thermo-mécanique effectuée nous a donné la possibilité de mettre en évidence la prévalence de la solution ajout sciure de bois sur celle d'ajout paille. Les essais menés sur des échantillons de deux essences de bois utilisés en construction ont révélés que le Sapin est meilleur isolant que le Pin, de plus ce dernier est thermiquement moins influencé par l'humidité.

Mots clés : matériaux poreux- conductivité- plâtre- bois- humidité-
résistances mécaniques

Sommaire

Nomenclature

INTRODUCTION	10
---------------------------	----

Chapitre I : LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

<u>I.1- LE MATERIAU PLATRE</u>	12
I.1.1- Histoire du plâtre.....	12
I.1.2- Origine.....	12
I.1.3- Fabrication.....	12
I.1.4- Les différents types de plâtre.....	14
I.1.5- Le plâtre pris.....	14
I.1.6- Gypse et plâtre en Algérie.....	14
<u>I.2- LE MATERIAU BOIS</u>	17
I.2.1- Généralités sur le bois.....	17
I.2.2 Formation du bois.....	17
I.2.3- Structure et anatomie du bois.....	18
I.2.4- L'eau dans le bois.....	20
I.2.5- Rétractibilité du bois.....	21
I.2.6- Les essences.....	23
<u>I.3- LE MATERIAU BETON</u>	25
I.3.1- Généralités sur le béton.....	25
I.3.2- Composition du béton.....	25
I.3.3- Les différents types de béton.....	26

Chapitre II : L'HUMIDITE DANS LES MATERIAUX POREUX

<u>II.1- CARACTERISTIQUES DES MILIEUX POREUX</u>	28
II.1.1- Définition.....	28
II.1.2- Changement d'échelle et notion de V.E.R	28
II.1.3- Paramètres géométriques caractérisant un milieu poreux.....	29
II.1.4- Teneurs en eau.....	31
II.1.5- La perméabilité.....	32
<u>II.2- LES MILIEUX POREUX ET L'HUMIDITE</u>	32
II.2.1- Fixation de l'humidité dans un matériau poreux.....	32
II.2.2- Mécanismes de déplacement de l'humidité dans un matériau poreux.....	37
<u>II.3- TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE</u>	39

Chapitre III : TECHNIQUES DE MESURE DE L'HUMIDITE

<u>III.1- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA RMN</u>	40
III.1.1- Principe de la RMN.....	40
III.1.2- Détermination de l'humidité à partir d'une mesure RMN.....	46
<u>III.2- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA SPECTROSCOPIE DES RAYONS GAMMA</u>	49
<u>III.3- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA METHODE NEUTRONIQUE</u>	50
<u>III.4- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA METHODE ELECTRIQUE</u>	51
<u>III.5- MESURE DE L'HUMIDITE PAR L'ATTENUATION DES RAYONNEMENTS MICRO-ONDES</u>	52
<u>III.6- METHODE GRAVIMETRIQUE</u>	52

Chapitre IV : MATERIAUX ETUDES ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL

<u>IV.1-METHODE DE MESURE UTILISEE</u>	54
IV.1.1- Description du dispositif utilisé.....	54
IV.1.2- Inconvénients et limites d'utilisation de la méthode des boîtes	57
<u>IV.2- COMPORTEMENT THERMIQUE</u>	57
IV.2.1- Généralités sur Le transfert de chaleur	57
IV.2.2- Etude expérimentale.....	60
<u>IV.3- ELABORATION DES ECHANTILLONS</u>	64
IV.3.1- Echantillons de plâtre.....	64
IV.3.2- Echantillons de bois.....	69

Chapitre V : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

<u>V.1- PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS</u>	71
V.1.1- Essais thermiques.....	71
V.1.2- Essais mécaniques.....	76
<u>V.2- ANALYSE DES RESULTATS</u>	77
V.2.1- Résultats thermiques.....	77
V.2.2- Analyse des résultats thermo-mécaniques.....	79
CONCLUSION	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87

INTRODUCTION

La principale préoccupation des bâtisseurs est d'assurer la pérennité de leurs constructions, cette dernière est rendue possible par l'emploi de matériaux performants en terme de résistance mécanique et de durabilité. Les aspects de confort n'étaient traités qu'a posteriori, les parois des battisses réalisées avaient alors une faible inertie thermique et ne pouvaient résister aux changements climatiques. Ainsi pour assurer des conditions de confort thermique adéquates à l'intérieur des bâtiments, les installations de chauffage ou de climatisation devaient consommer d'importantes quantités d'énergie. D'autre part les matériaux utilisés sont généralement à base de ciment, or le procédé de fabrication du ciment consomme beaucoup d'énergie et produit des déchets toxiques.

Cette façon de construire séduit de moins en moins, la tendance actuelle est donc de favoriser des produits locaux moins onéreux et capable de remplir plusieurs usages, des matériaux dits "isolants et porteurs" qui permettent de réaliser des économies d'énergie substantielles et d'alléger ainsi la facture énergétique des pays en voie de développement, d'une part et de réduire l'impact environnemental des bâtiments d'autre part.

Dans ce travail nous nous sommes particulièrement intéressés à connaître l'effet de l'humidité et des ajouts paille et sciure de bois sur les comportements thermique et mécanique du matériau plâtre. Pour ce fait, deux types de plâtre provenant de carrières différentes, celles d'Ouled Djellal et de Ghardaïa sont choisis.

Plusieurs dosages en ajouts ont été testés et dans chaque cas les conductivités thermiques sont mesurées, en parallèle des essais de compression permettant de juger des performances mécaniques des matériaux élaborés ont été effectués.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres :

- Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur le plâtre, le bois et le béton, visant à mieux connaître ces matériaux. Des définitions portant sur les différents caractéristiques et spécificités de ces matériaux, de leurs structures et composition, tout comme leurs multiples utilisations ont été abordées.
- Dans le deuxième chapitre nous nous sommes attelés à décrire les différents mécanismes de fixation et de migration de l'humidité au sein d'un matériau poreux. On s'est notamment intéressé au phénomène d'hystérèse que présentent les courbes de sorption pour finir par un aperçu bibliographique sur les transferts couplés de chaleur et de masse.

- Quant au troisième chapitre, il nous est paru intéressant d'y exposer les techniques expérimentales les plus utilisées pour la mesure de l'humidité dans les matériaux poreux, particulièrement la technique de la résonance magnétique nucléaire ou de la RMN, une méthode récente qui, bien qu'elle fut le sujet de nombreuses investigations, demeure néanmoins toujours peu connue.
- Dans le quatrième chapitre une description de la méthode dite "des boîtes" utilisée et du dispositif expérimental qui nous a permis d'acquies les caractéristiques thermophysiques des matériaux étudiés a été faite. On y trouve également les détails portant sur l'élaboration de tous les échantillons testés dans ce travail.
- Dans le dernier chapitre, les résultats des essais thermiques et mécaniques sont présentés, accompagnés des analyses et des commentaires qui s'imposent.

I.1- LE MATERIAU PLATRE

I.1.1- Histoire du plâtre

Des 9000 avant J-C, on trouve des restes d'enduits à base de plâtre en Anatolie (Turquie) et à Gizeh (Egypte 2700 avant J-C) où trône la magnifique pyramide de Kheops, jointoyée avec un mélange de plâtre, de chaux et de poudre en marbre. Beaucoup plus tard en Grèce antique, le gypse est utilisé aussi bien pour la construction que pour la réalisation des fresques.

Durant le haut moyen âge, alors que l'occident sombrait dans la décadence, la civilisation musulmane réinvente l'usage du gypse et marque l'un des sommets de l'art du plâtre, ses artisans le cisèlent en de délicates et exubérantes arabesques qui viennent orner mosquées et palais. Au fil des siècles ses qualités ignifuges en font un matériau incontournable dans la construction.

I.1.2- Origine

La pierre à plâtre est un sulfate de calcium qui se trouve dans la nature sous deux formes :

- L'anhydrite, ou sulfate de calcium anhydre, assez rare, qui répond à la formule chimique CaSO_4 .

- Le gypse, ou sulfate de calcium à deux molécules d'eau, dihydraté, très abondant, qui répond à la formule chimique $\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$.

Le mot plâtre désigne à la fois le matériau de structure solide (plâtre pris) et la poudre qui permet de l'obtenir, cette poudre (sulfate de calcium hemihydraté, $\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) s'obtient en déshydratant du gypse, selon la réaction :



I.1.3- Fabrication

Après extraction des mines, le gypse est broyé puis cuit dans des fours à lits fluidisé ou à flammes directes. Soumis ainsi à l'action de la chaleur, il perd tout ou une partie de son eau de cristallisation et conduit à une série de produits partiellement hydratés ou anhydres.

Selon les conditions de pression et de vapeur d'eau imposées, on distingue deux principes de cuisson :

- ♦ La Cuisson par voie sèche (la plus utilisée, car moins coûteuse), est réalisée à la pression atmosphériques ou sous une faible pression partielle de vapeur d'eau.

Vers des températures de 140 à 170 °C, l'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et donne un solide microporeux constitué d'un assemblage de microcristaux, (figure I.1), c'est l'hémihydrate β , il nécessite un taux de gâchage $e/p \geq 0,6$. Il s'agit du composé principal de plâtres courants utilisés en tant que matériau de construction. Par chauffage vers 400 à 600 °C on obtient de l'anhydrite II, (CaSO_4).

- ♦ La Cuisson par voie humide qui s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau dans des autoclaves sous 2 à 7 bars pendant quelques heures. Le produit obtenu est l'hémihydrate α , il nécessite un taux de gâchage faible ($e/p \approx 0,4$) [1] et donne des plâtres dits "durs" ayant de très bonnes résistances mécaniques.

Les plâtres courants qui se présentent sous forme d'une poudre blanche sont constitués soit :

- d'hémihydrate β ($\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) qui est le principal constituant des plâtres, la formule correspondant à 93,79% de sulfate de calcium CaSO_4 et 6,21% d'eau de cristallisation.
- d'un mélange d'hémihydrate β avec de l'anhydrite II (CaSO_4) dans la proportion d'environ $2/3$ d'hémihydrate et $1/3$ d'anhydrite II, il est à noter que plus la proportion d'anhydrite II est importante plus le durcissement est étalé dans le temps.
- d'hémihydrate α , compact, cristallin, faiblement soluble dans l'eau

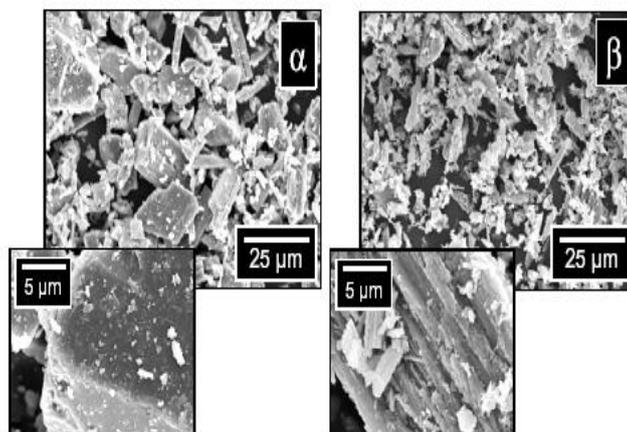


Figure I.1- Image MEB des plâtres prestia (usine Meriel du groupe Lafarge) obtenus respectivement par voie humide (α) et par voie sèche (β) [1].

I.1.4- Les différents types de plâtres

Les principaux types de plâtres commercialisés ainsi que leurs utilisations les plus courantes bien que non exhaustives sont en fonction des différentes variétés suivantes :

- Plâtres gros qui ont une forte granulométrie. Le refus au tamis de 800 μ pouvant être compris entre 5 et 20%. Ils peuvent être utilisés purs ou additionnés soit de sable, soit d'un mélange de sable et de chaux, et servent en principe pour la première couche des enduits, pour effectuer le dressage des murs et plafonds, pour exécuter des remplissages en forte épaisseur des scellements etc.
- Plâtres fins à enduire, pour lesquels le refus au tamis de 800 μ est inférieur à 1% et celui au tamis de 200 μ est de l'ordre de 25%. Il existe plusieurs types, soit normaux, ou présentant une très haute dureté (T.H.D) ou encore allégés à la perlite. Ces plâtres se gâchent généralement dans un rapport e/p voisin de l'unité. Ils peuvent être appliqués manuellement ou projetés mécaniquement.

L'industrie plâtrière fournit également des plâtres à usages particuliers, c'est ainsi que l'on trouve les plâtres à briqueter, destinés au montage des cloisons de distribution, les plâtres chaux de surfacage, ainsi et surtout les plâtres pour préfabrication, essentiellement utilisés pour la fabrication de carreaux de plâtre, d'éléments de cloison en plaques de parement [2].

I.1.5- Le plâtre pris

I.1.5.1- Microstructure du plâtre pris

Le plâtre pris se présente sous la forme d'un solide poreux à texture désordonnée. C'est un matériau d'une grande porosité, constitué d'un assemblage de cristaux de gypse. La microstructure du plâtre est très dépendante des conditions de cristallisation (sursaturation, PH, température, présence d'additifs, etc.), mais aussi de la granulométrie de l'hémihydrate initial. L'observation au microscope électronique à balayage, (figure I.2), fait apparaître une structure d'aiguilles de gypse enchevêtrées en amas. La taille moyenne de ces cristaux formés dans des conditions classiques de gâchage (25° C, sans adjuvant) [1], est environ 15×2×2 μm^3 .

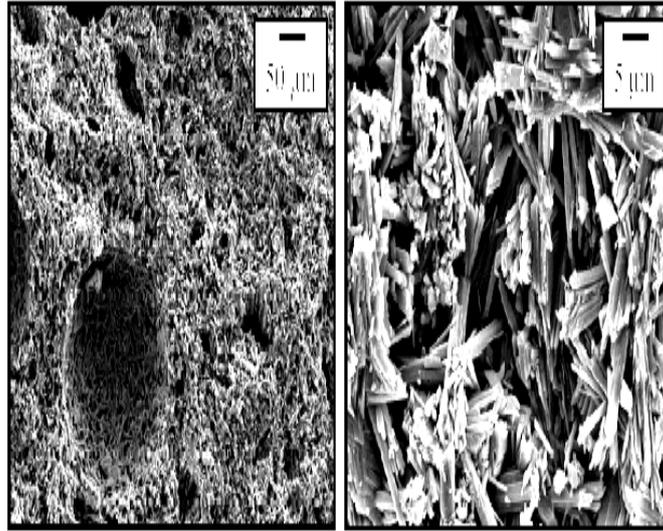


Figure I.2-Images MEB d'une fracture de plâtre pris ($e/p = 0.6$) à deux échelles différentes (50 et $5\mu\text{m}$) [1].

I.1.5.2- Le taux de gâchage

Le taux de gâchage, rapport de la masse d'eau à la masse de plâtre " e/p " est une grandeur d'une importance capitale dont dépendent en particulier la densité et la porosité du matériau final. Il est à noter que la quantité stœchiométrique nécessaire pour hydrater l'hémihydrate en gypse est de 0,186 g d'eau pour 1 g d'hémihydrate (rapport des masses molaires correspondant à l'eau et à l'hémihydrate), ce qui correspond à un taux de gâchage $e/p = 0,186$. En réalité, le gâchage du plâtre se fait avec des rapports e/p largement supérieurs aux rapports stœchiométriques dans le but d'obtenir une pâte fluide, homogène et facile à manier. L'eau en excès par rapport à la stœchiométrie, en s'évaporant provoque la formation de pores, c'est pour cette raison que la quantité d'eau de gâchage initiale fixe la porosité finale du matériau, (figure I.3) et par conséquent ses propriétés thermophysiques et mécaniques [3]; [4]. En effet des essais expérimentaux déjà effectués dans notre laboratoire, ont montrés l'influence du taux de gâchage sur la conductivité thermique du plâtre pris ainsi que sur ses résistances à la compression et à la flexion. Les courbes obtenues ont permis de déduire que la conductivité aussi bien que les résistances mécaniques, varient en sens inverse de la quantité d'eau utilisée lors du gâchage.

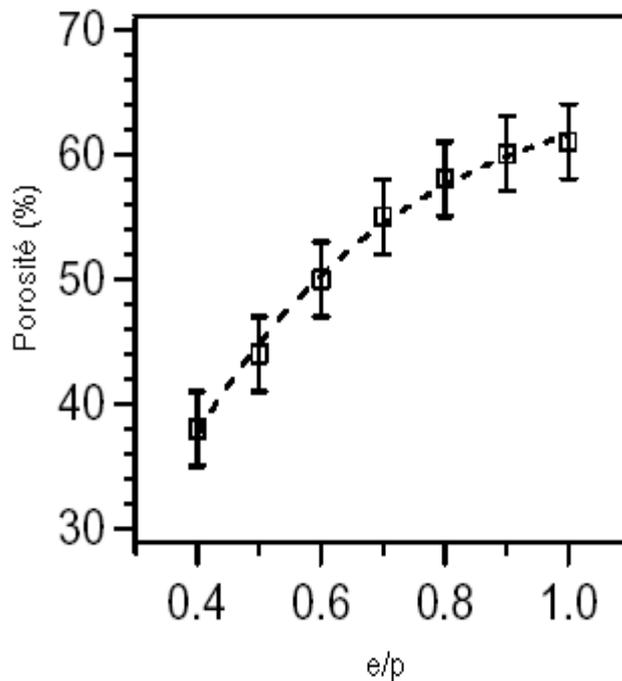


Figure I.3- Evolution de la porosité du plâtre pris en fonction du taux de gâchage Initial, mesurée par porosimétrie au mercure [1].

I.1.5.3- Origine des propriétés mécaniques du plâtre pris

Le plâtre pris est un matériau poreux constitué principalement de cristaux de gypse aléatoirement enchevêtrés. Il doit sa bonne cohésion à cet enchevêtrement et aux interactions intercrystallines. En effet au cours de la prise, les cristaux de gypse apparaissent, croissent et s'enchevêtrent pour former une structure solide continue et résistante. Ce sont surtout les points de contact entre cristaux qui gouvernent la tenue mécanique de ce matériau, [5]. Ce phénomène est confirmé par la présence de cristaux de gypse désenchevêtrés et non cassés sur les faciès de rupture des échantillons de plâtre pris.

I.1.6- Gypse et plâtre en Algérie

D'après des études géologiques, l'Algérie dispose d'abondantes ressources en gypse naturel dont la teneur dépasse les 75% requis pour la construction, le sud du pays notamment en possède d'importants gisements. D'autre part, le plâtre vu sa bonne propriété d'isolation thermique, peut être considéré comme un matériau très adéquat à la construction dans ces régions chaudes du pays qui présentent une faible hygrométrie de l'air, une pluviométrie courte et irrégulière et une sismicité pratiquement nulle. Il est donc plus qu'intéressant d'envisager l'introduction du plâtre et mortier de plâtre comme substitue au béton abusivement utilisé au sud.

I.2- LE MATERIAU BOIS

I.2.1- Généralités sur le bois

Le bois est un matériau naturel utilisé universellement depuis des milliers d'années. Vu sa grande disponibilité, sa mise en œuvre assez facile, ses qualités particulières, on lui retrouve diverses applications, parmi elles, la construction d'habitation. En effet en plus de ses vertus d'isolation thermique (faible conductivité thermique) offrant ainsi un confort thermique exceptionnel et réduisant les charges de chauffage, le bois agit de surcroît comme un régulateur d'humidité en maintenant à l'intérieur de l'habitation une humidité relative adéquate. Cela justifie le regain de construction d'habitation en bois observé ces dernières années surtout dans les pays du nord.

Dans la construction, le bois est utilisé principalement sous deux formes :

- ▶ Bois massif
- ▶ Bois reconstitué

Le bois massif est utilisé essentiellement pour les éléments de charpente traditionnelle.

Le bois reconstitué peut être fabriqué à partir de deux sous-produits tels que les sciures ou des bois de moindre qualité, ou à partir de composants en bois (lamelles par exemple). On distingue ainsi :

- Les panneaux : ces produits de grand format sont constitués d'éléments de placage fins, de lames de bois, de particules ou de fibres assemblés par collage, pressage et/ou thermodurcissement d'un liant. De nombreux panneaux ont été mis au point en fonction de divers usages spécifiques.
- Les poutres reconstituées : bois lamellé collé (BLC).

I.2.2 Formation du bois

Le bois est un ensemble de tissus végétaux formant la partie principale du tronc, des branches et des racines des arbres, ces tissus se forment à la suite du fonctionnement d'une assise génératrice périphérique à paroi cellulaire appelé cambium.

Le cambium est un feuillet unistratifié de cellules embryonnaires continuellement en division, certaines cellules se groupent et se soudent pour former les fibres de 1 à 3mm de

longueur, les fibres groupées longitudinalement dans le sens du fil constituent le tissu fibreux ou de soutien qui donne sa résistance au bois.

Le réseau cellulaire qui est formé par les parois, les lumens et les ponctuations des différents éléments cellulaires fait du bois un matériau poreux.

I.2.3- Structure et anatomie du bois

I.2.3.1- Section droite d'un tronc d'arbre

La section droite d'un tronc d'arbre fait apparaître de la périphérie vers le centre, les éléments suivants, (figure I.4) :

- ◆ l'écorce, c'est le manchon protecteur de l'arbre, elle est partagée en une partie externe visible, le liège formé de cellules mortes et une partie interne, le liber qui conduit la sève élaborée.
- ◆ l'assise génératrice ou cambium, seule partie vivante de l'arbre, élabore périodiquement par divisions cellulaires le liber vers l'extérieur et les cellules de bois vers l'intérieur.
- ◆ le bois proprement dit, les cellules de bois se transforment et s'organisent de la périphérie vers le centre pour former d'abord l'aubier, constitué de cellules vivantes conductrices de sève brute qui se transforme par suite en bois de cœur ou bois parfait encore appelé duramen. L'aubier contient beaucoup plus d'eau que le duramen et peut plus facilement la céder.

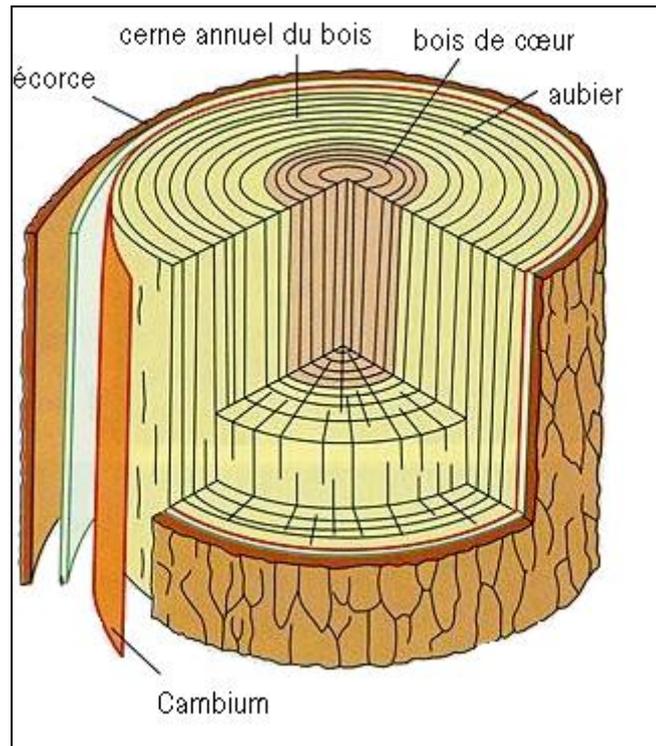


Figure I.4- Différentes parties d'un tronc d'arbre

I.2.3.2- Les cernes de croissance

Le bois produit pendant la période de végétation annuelle s'appelle cerne annuel de croissance ou encore couche d'accroissement. On distingue dans ces couches le « bois initial », qui comme son nom l'indique est formé le premier et dont les cellules sont plus grosses. Ce bois est moins dense que le « bois final » dont les tissus sont plus serrés, plus fibreux.

La largeur des cernes, leur régularité et la part plus ou moins importante du bois initial et du bois final, comme de duramen et d'aubier, ont une influence sur les propriétés physiques et mécaniques du bois, il va sans dire que le comportement thermophysique du matériau bois va aussi dépendre de ces facteurs.

I.2.3.3- Plans de coupe d'un tronc d'arbre

Le bois est formé par un ensemble de tissus cellulaires, ces cellules s'organisent parallèlement ou perpendiculairement à l'axe du tronc, on peut donc distinguer dans le bois trois directions privilégiées, (figure I.5).

- La direction axiale, qui est la direction de l'axe de symétrie du tronc. Une section perpendiculaire à cet axe est une coupe transversale ou en « bois de bout ».
- La direction radiale, définie suivant les rayons du cercle de la section droite du tronc. Une coupe suivant un plan parallèle à cette direction donnera un « bois sur mailles » ou sur « quartier »
- La direction tangentielle, c'est la direction des tangentes aux cernes. Une coupe dans un plan parallèle à cette tangente donnera un « bois sur dosse ».

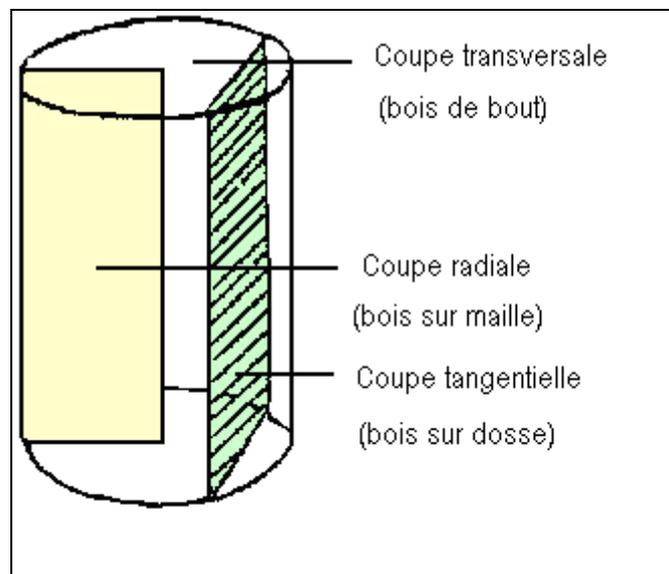


Figure I.5- Plans de coupe d'un tronc d'arbre

I.2.4- L'eau dans le bois

L'eau existe dans le bois sous trois formes :

- L'eau de constitution qui fait partie intégrante de la molécule de cellulose et de lignine, elle n'intervient pas dans le dosage de l'humidité du bois.
- L'eau libre, c'est de l'eau liquide qui remplit partiellement ou totalement les vides et les cavités cellulaires. Comme son nom l'indique l'eau libre peut circuler facilement dans le bois sans apport d'énergie.
- L'eau liée ou eau de saturation, retenue par les parois des cellules

La limite entre l'eau libre et l'eau liée, est le point de saturation des fibres (PSF), qui est une propriété très importante du bois du fait qu'il régit le comportement de la plupart de ses propriétés physiques.

Cette propriété fut définie en 1906 par Tiemann [6] comme la teneur en humidité à laquelle les parois de cellules sont complètement saturées tandis qu'il n'y a pas d'eau libre (ou liquide) dans les cavités cellulaires. Il est connu que les propriétés physiques et mécaniques du bois sont affectées au dessous du PSF, alors qu'elles restent inchangées au dessus de celui-ci. Une perte donc d'humidité des parois cellulaires provoque entre autre une augmentation de la résistance mécanique du bois ainsi qu'un changement dimensionnel de ce dernier, tandis qu'une perte d'eau liquide logée dans les cavités cellulaires n'a aucun effet. Le PSF est de ce fait utilisé pour ajuster les côtes mécaniques du bois en fonction de la teneur en humidité, de même que pour les modèles d'ajustement de la densité et du retrait du bois [7].

Le domaine qui s'étend de l'état anhydre correspondant à un degré hygrométrique de l'air nul jusqu'au point de saturation des fibres (PSF=30% à 20°C) est appelé domaine hygroscopique du bois. Cependant des travaux récents [6], [8] ont montré que l'altération des propriétés physiques et mécaniques du bois peut s'étendre au-delà du domaine hygroscopique pour certaines essences de bois.

I.2.5- Rétractibilité du bois

La rétractibilité désigne les variations de dimensions du bois quelqu'en soit le sens. Elle inclut donc le retrait qui correspond à une diminution des dimensions et le gonflement impliquant une augmentation de celles-ci. Pour mesurer la rétractibilité, les coefficients généralement utilisés sont les suivants :

- Coefficient de rétractibilité volumique (α_v) qui correspond à la variation de volume depuis une teneur en eau donnée, jusqu'à l'état sec.
- Coefficient de rétractibilité linéaire, qui exprime en pourcentage de la dimension considéré, le retrait pour une variation de 1% de l'humidité. Les trois directions sont alors considérées, d'où les coefficients de rétractibilité axial (α_L) ; radial (α_R) et tangentiel (α_T).

L'expérience montre que le retrait ou le gonflement est fortement anisotrope, (figure I.6).

$$\alpha_T > \alpha_R >> \alpha_L$$

On remarque aussi une linéarité de l'évolution du volume en fonction de l'humidité dans le domaine hygroscopique.

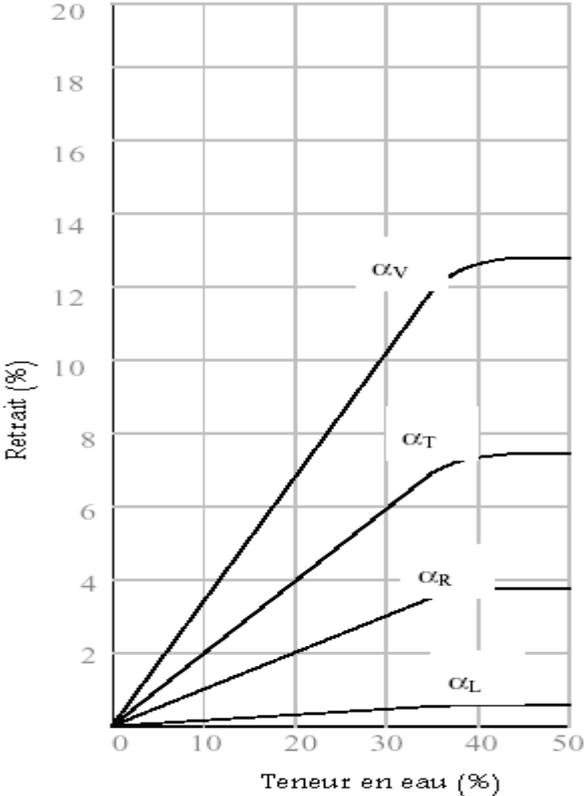


Figure I.6-Valeurs de la rétractibilité du bois en fonction de la teneur en eau

I.2.6- Les essences

Les familles d'arbres dites essences, productrice de bois se classent en deux grands groupes :

- ◆ Les gymnospermes (résineux)
- ◆ Les angiospermes (feuillus)

Les feuillus forment la large bande des forêts tropicales alors que les résineux exigent en général des climats assez humides à hivers froids.

Les essences utilisées dans la construction sont :

- Les essences résineuses (80% de l'utilisation), tels que le Sapin, l'Epicéa, le Meleze et le Pin.
- Les essences feuillues (20% de l'utilisation), comme le Chêne et le Hêtre.

Notre choix s'est porté sur deux essences de bois différentes, le Pin et le Sapin. Ce sont deux espèces appartenant à une même catégorie de bois, celle des résineux, ils sont largement utilisés dans le monde comme matériaux de construction du fait de leur grande disponibilité et de leurs propriétés mécaniques intéressantes, alliées à une masse volumique peu élevée.

I.2.6.1- Le Pin

La dénomination botanique du Pin est "Pinus Sylvestris", c'est une espèce boréale et montagnarde provenant essentiellement d'Europe et d'Asie du nord. Il est d'un aubier blanc à blanc jaunâtre et d'un duramen clair à jaune brun-rouge, (figure I.7), sa masse volumique varie de 320 à 800 kg/m³ à 15% d'humidité relative, possédant un retrait moyen de 4% radial et 8% tangentiel, une bonne résistance mécanique (résistance à la compression parallèle aux fibres de 47N/mm² et une résistance à la flexion de 79N/mm²).

Le Pin est utilisé pour un très grand nombre d'applications mais on notera surtout celles liées à la construction d'habitations tel que, charpentes et ossatures en bois, murs et plafonds, lambris, parquets, etc.

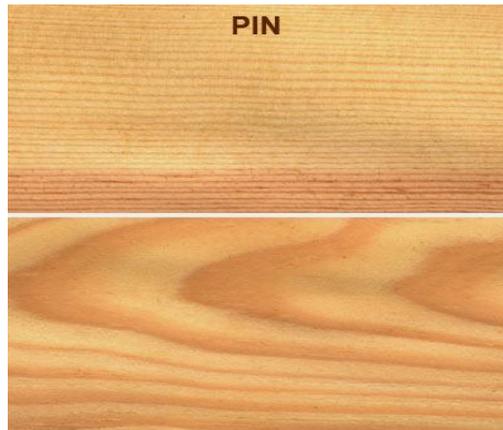


Figure I.7-Aspect du bois Pin

I.2.6.2- Le Sapin

Il s'agit d'un bois léger et tendre (masse volumique à 12 % d'humidité relative égale à 350 kg/m³), de couleur blanc à blanc crème ou brun pâle à cernes annuels distincts, (figure I.8). Ses propriétés mécaniques sont moindres que celles du Pin (résistance à la compression 34N/mm² et à la flexion 58.3N/mm²), par contre il possède presque les mêmes valeurs de retrait que le Pin et il est utilisé dans la construction pour les mêmes applications.

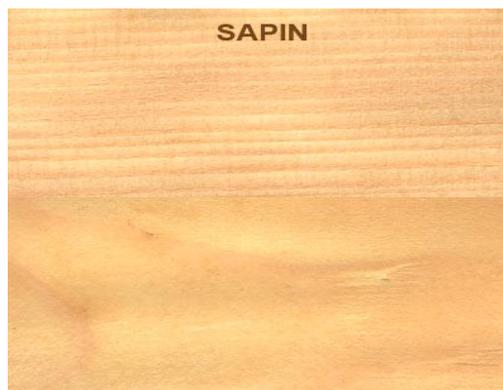


Figure I.8-Aspect du bois Sapin

I.3- LE MATERIAU BETON

I.3.1- Généralités sur le béton

Obtenu en mélangeant du sable, des granulats, du ciment et de l'eau, le béton occupe depuis son invention la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son faible coût, il présente également d'autres qualités, telles qu'une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc.

Le bois, la brique, la pierre, le métal ne répondent pas à l'ensemble des demandes et des contraintes technologiques auxquelles satisfait le béton. Ces produits sont souvent utilisés en complément des structures de béton qui assurent alors l'ossature et la tenue des édifices.

Toutefois, le matériau béton présente un impact environnemental non négligeable. En effet, le ciment inclus dans sa fabrication nécessite une cuisson et donc consomme de l'énergie lors de sa production, les sociétés et les pouvoirs publics sont de plus en plus intransigeants vis-à-vis des problèmes de pollution occasionnés par le gaz carbonique dégagé et la forte consommation d'énergie.

I.3.2- Composition du béton

Le mélange de ciment et d'eau (avec éventuellement des ajouts), constitue ce que l'on appelle la pâte de ciment. En y rajoutant du sable, on obtient un mortier, l'addition de sable et de granulats donne du béton. La pâte présente à l'intérieur du béton joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. C'est l'élément actif du béton, elle représente environ 30% du volume d'un béton. Les granulats constituent un squelette inerte dispersé dans cette pâte. La présence des granulats dans le mélange limite la propagation des fissures de la pâte due au retrait.

Le béton est donc un matériau hétérogène mais aussi, particulièrement complexe et évolutif. Il présente une structure poreuse dont la porosité lui confère plusieurs caractéristiques, telles que sa perméabilité, sa résistance, sa durabilité et son comportement rhéologique [10], on distingue :

- Les pores capillaires ($0.01\mu\text{m} \leq \phi \leq 0.5\mu\text{m}$)
- Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ($\phi < 40$ angströms)

- Les bulles d'air occluses ($\phi > 1\text{mm}$) piégées à l'intérieur du béton lors du malaxage du mélange.

I.3.3-Les différents types de bétons

Une grande panoplie de béton est actuellement à la disposition des constructeurs, les plus courants sont, les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BMP), les bétons à très hautes performances (BTHP) et les bétons auto-plaçants (BAP).

Cependant, il existe d'autres types de bétons moins utilisés mais offrant des avantages particuliers, élaborés en additionnant au mélange ciment, sable, graviers et eau, certains ajouts qui permettent entre autre d'améliorer les performances thermiques du béton. Parmi eux nous citons, les bétons allégés, obtenus par ajout à la pâte de ciment d'agents tels que : polystyrène, sciure, ponce, granulats de chanvre, etc.

Les bétons allégés présentent l'avantage d'avoir une faible densité et une isolation thermique et phonique renforcée.

II.1- CARACTERISTIQUES DES MILIEUX POREUX

II.1.1- Définition

Un milieu poreux est un ensemble hétérogène constitué d'au moins une phase solide et une phase fluide renfermée dans des vides appelés "pores" pouvant ou non communiquer entre eux.

L'examen de la matrice solide nous permet de distinguer deux grandes classes de milieux poreux :

- ◆ Milieux poreux granulaires pulvérulents ou non consolidés, formés de grains ou de fibres non soudés (sable, laine de verre, billes de verre, etc.).
- ◆ Milieux poreux consolidés dont la matrice solide est continue (plâtre, bois béton, etc.) et renfermant des cavités appelées pores. Les cavités isolées au sein du matériau sont appelées pores fermés, celles débouchant sur la surface sont dites pores ouverts. (figure II.1).

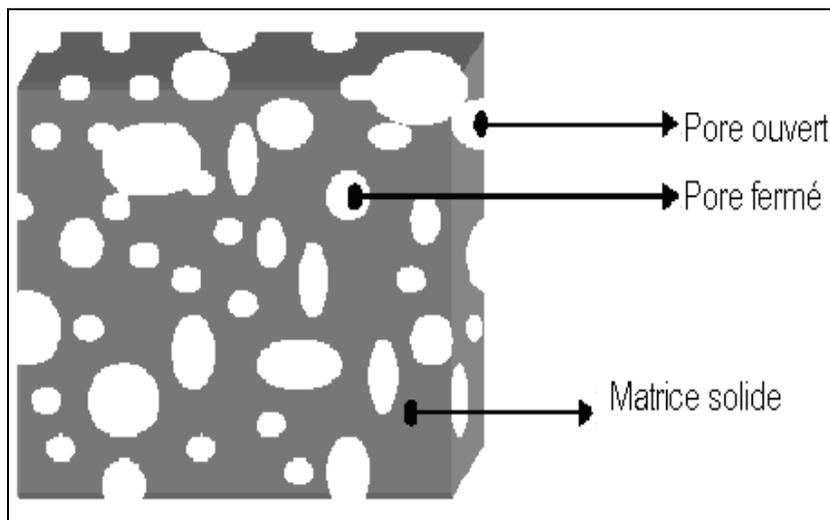


Figure II.1-Schéma d'un milieu poreux

II.1.2- Changement d'échelle et notion de V.E.R

L'étude du phénomène des transferts à l'intérieur des milieux poreux fait intervenir les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ces équations conviennent en effet à l'écoulement du fluide à l'intérieur des pores, cependant la complexité géométrique de la surface interne de la phase solide rend la résolution du système

difficile. Les transferts ne peuvent donc être décrits à l'échelle microscopique et on est obligé de définir des grandeurs macroscopiques. Des procédures spécifiques de changement d'échelle sont alors appliquées, parmi lesquelles nous citons, la méthode d'homogénéisation [11] ou la prise de moyenne volumique [12]. Ce changement d'échelle permet de construire à partir d'un milieu réel dispersé, un milieu continu fictif.

La nouvelle échelle est représentée par le VER, le Volume Représentatif Élémentaire. Ce dernier doit être suffisamment grand, (taille grande par rapport à celle des pores) pour être représentatif, c'est-à-dire permettre la caractérisation de toute propriété, mais suffisamment petit pour que la grandeur ainsi définie conserve un caractère local, de cette façon le VER peut être considéré comme homogène et le modèle physique représentant les phénomènes de transfert au sein du milieu poreux est obtenu par intégration des équations de conservation dans l'espace sur ce volume de référence.

II.1.3- Paramètres géométriques caractérisant un milieu poreux

Pour caractériser les milieux poreux, en particulier les milieux consolidés, considérés comme indéformables, on fait généralement appel aux paramètres suivants:

II.1.2.1- La porosité totale

La porosité totale ε se définit comme étant le rapport du volume de vides V_p (volume de tous les pores) au volume total apparent du milieu poreux considéré V_a

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_a} \quad (\text{II.1})$$

II.1.2.2- Porosité ouverte

C'est la fraction du volume V_o occupé par les pores ouverts, appelée aussi porosité utile ou accessible.

$$\varepsilon_o = \frac{V_o}{V_a} \quad (\text{II.2})$$

II.1.2.3- Porosité cinématique (ou efficace)

C'est la fraction de milieu poreux dans laquelle peut circuler un fluide. En fait le volume dans lequel l'eau peut circuler est inférieur au volume vide total, la porosité cinématique exclut donc les pores non connectés, les pores en cul-de-sac (pores connectés par une de leurs faces seulement), ainsi que la couche d'eau liée à la surface des parois des pores par le jeu d'attraction moléculaire et qui peut être considéré comme faisant partie de la matrice solide.

II.1.2.4- Surface spécifique

La surface d'interface entre le solide et les pores joue un rôle très important, en effet, en plus de pouvoir permettre une estimation de la quantité d'eau fixée par le mécanisme d'adsorption physique, elle intervient aussi dans l'expression des relations entre la géométrie du milieu poreux et l'écoulement, les forces de frottement visqueux entre le fluide et les parois sont d'autant plus grandes que la surface spécifique est importante.

La surface spécifique S_s est généralement définie comme le rapport de l'aire d'interface S_p (surface totale des vides), au volume total du milieu poreux.

$$S_s = \frac{S_p}{V_a} \quad (\text{II.3})$$

Il faut toutefois noter que la surface spécifique, comme la porosité, n'est jamais, au mieux, qu'une information moyenne censée représenter une réalité complexe.

II.1.2.5- Tortuosité

La tortuosité τ est une grandeur qui décrit l'allongement du trajet d'une particule du fluide dû à la présence du milieu poreux. Elle peut être définie à partir des longueurs suivantes :

- ◆ L_p : la distance réelle entre deux points
- ◆ L_o : la distance effective de passage, c'est-à-dire parcourue par une particule fluide entre ces deux points

$$\tau = \left(\frac{L_p}{L_o} \right)^2 \quad (\text{II.4})$$

La tortuosité a une grande influence sur les propriétés de migration et de diffusion de l'humidité dans le milieu poreux.

II.1.4- Teneurs en eau

On définit :

- ◆ La saturation en eau :

$$S_r = \frac{V_l}{V_p} = \frac{V_l}{\varepsilon V_a} \quad ; \quad 0 \leq S_r \leq 1 \quad (\text{II.5})$$

Où :

V_l : Volume de l'eau dans les pores

V_p : Volume des pores

- ◆ La teneur massique en eau

$$\omega = \frac{M_l}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

M_l : Masse de l'eau

M_h : Masse humide

M_s : Masse sèche

- ◆ La teneur volumique en eau

$$\theta_l = \frac{V_l}{V_a} = \varepsilon S_r \quad ; \quad 0 \leq \theta_l \leq \varepsilon \quad (\text{II.7})$$

Ou encore :

$$\theta_l = \frac{\omega \rho_{\text{sec}}}{1000}$$

ρ_{sec} : Masse volumique à l'état sec

II.1.5- La perméabilité

La perméabilité décrit la capacité d'un matériau poreux à se laisser traverser par un fluide. Elle dépend de la nature du milieu poreux, en particulier, la porosité, la forme et la taille des pores, et la connectivité des pores. De nombreuses études se sont penchées sur les corrélations existant entre porosité et perméabilité, dont nous pouvons citer celles de Kozeny-Carman [13], Chilingar et al [14].

II.2- LES MILIEUX POREUX ET L'HUMIDITE

II.2.1- Fixation de l'humidité dans un matériau poreux

La fixation de l'humidité au sein d'un milieu poreux se fait essentiellement par deux phénomènes, l'adsorption et la capillarité, dite aussi absorption.

II.2.1.1- L'adsorption

Dans les processus qui conduisent à l'adsorption d'une molécule d'eau sur la phase solide, on distingue, la physisorption et la chimisorption, ce derniers processus conduisant à des modifications irréversibles ne sera pas pris en compte. Les forces de physisorption sont de trois types, les forces de Van der waals, agissant sur les molécules de vapeur au voisinage de l'interface solide fluide dans les pores, les forces polaires résultant de la présence de champs électriques dans les micropores, et les liaisons hydrogène dues aux groupements hydroxyle ou amine [15], [16].

Lorsqu'on place un matériau poreux non humide dans une enceinte à température constante et humidité régulée, une augmentation de sa masse due à la fixation d'une certaine quantité de vapeur d'eau par adsorption sera donc observée. La masse d'eau fixée croit au fur et à mesure que la pression de vapeur P_v dans l'enceinte se rapproche de la pression de vapeur saturante P_{vs} , le rapport de ces deux pressions définit ce qu'on appelle, humidité relative de l'air notée Φ .

$$\Phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (\text{II.8})$$

a) Isotherme de sorption

Pour une température donnée, la quantité d'eau absorbée ω (Teneur en eau) en fonction de l'humidité relative Φ est représentée par une courbe se déterminant expérimentalement, dite isotherme de sorption, (figure II.2).

Ces isothermes présentent en général, trois zones. En effet suivant la valeur de Φ une ou plusieurs couches de molécules d'eau peuvent être fixées sur la paroi des pores.

- ❖ Pour $0 \leq \Phi \leq 0.2$, la fixation de l'humidité est représentée par la théorie d'adsorption monomoléculaire de Langmuir. L'hypothèse de base suppose qu'entre la phase gazeuse et la phase solide, cette dernière se recouvre d'une couche monomoléculaire de molécules gazeuses, il se forme alors l'équivalent d'un film moléculaire qui recouvre plus ou moins la surface externe des pores, l'énergie de liaison entre les molécules d'eau et la surface dans ce cas est importante, et les molécules sont par conséquent peu mobiles (eau à l'état rigide).
- ❖ Pour $0.2 \leq \Phi \leq 0.5$, la fixation de l'humidité est expliquée par l'hypothèse des couches multiples, la sorption de molécules gazeuses sur la surface solide ne se limite pas à une seule couche monomoléculaire, mais plutôt à un ensemble de couches qui se déposent les unes sur les autres, l'énergie de liaison diminue avec le nombre de couches et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide. Le traitement théorique de cette hypothèse a été fait par Brunauer, Emmet et Teller (méthode B.E.T).
- ❖ Pour $0.5 \leq \Phi \leq 1$, il y'a condensation capillaire sur les ménisques formés par la jonction des couches plurimoléculaires. L'interprétation physique du processus fait appel à la théorie de kelvin, dans ce cas la pression de vapeur d'équilibre est reliée à la pression de vapeur saturante par la relation :

$$\Phi = \frac{P_v}{P_{vs}} = e^{\frac{-2\sigma M}{rRT\rho_l}} \quad (\text{II.9})$$

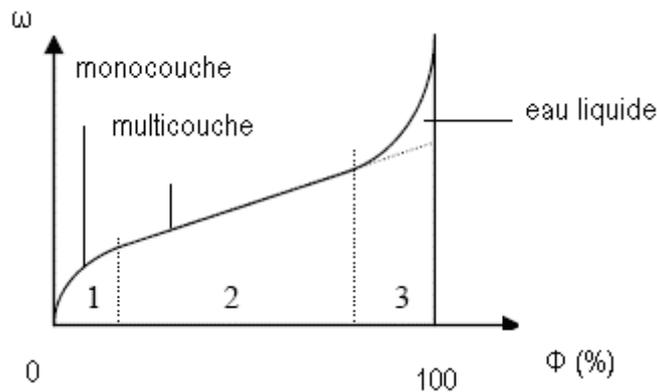


Figure II.2- Isotherme de sorption

b) Hystérèse de la sorption d'humidité

On peut supposer que pour une température fixe, une seule teneur en humidité d'un matériau poreux, correspond à une humidité relative de l'air donnée. En réalité il n'en est pas ainsi, puisqu'il existe cependant des écarts considérables entre les teneurs en humidité d'équilibre obtenues suivant que le matériau perd (désorption) ou gagne (adsorption) de l'humidité. Ce phénomène connu depuis longtemps est appelé, hystérèse de la sorption d'humidité. La figure II.3 présente cette hystérèse chez certains matériaux poreux utilisés en construction. Ce graphique montre les écarts entre l'adsorption à partir de l'état anhydre et la désorption depuis l'état de saturation.

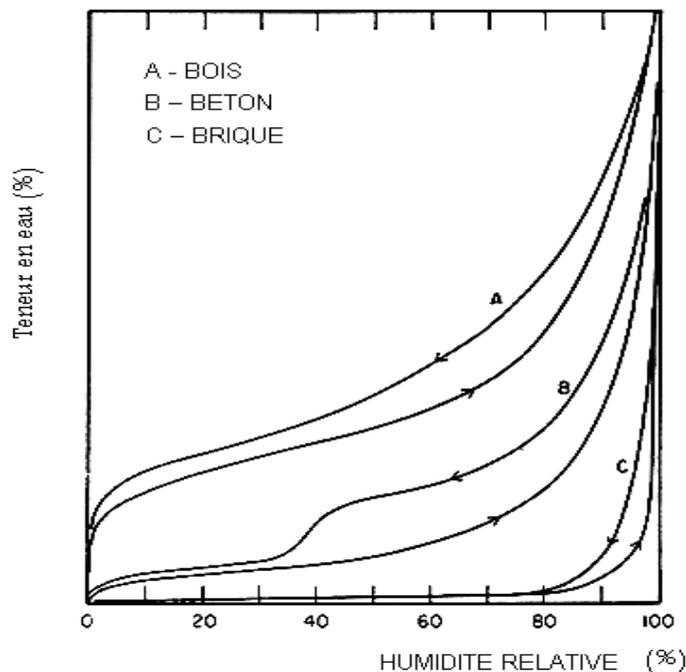


Figure II.3- Phénomène de l'hystérèse de sorption chez certains matériaux poreux

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ce phénomène, parmi lesquelles nous citons celle de l'effet de la bouteille d'encre de Rao [6], [17]. Cette théorie suppose que les pores sont en forme de bouteille, c'est-à-dire composés de cols étroits et de larges corps, dans ce cas les répartitions de l'eau dans les pores pour une valeur donnée d'humidité relative, donc de pression capillaire, seront différentes en adsorption et en désorption, (figure II.4).

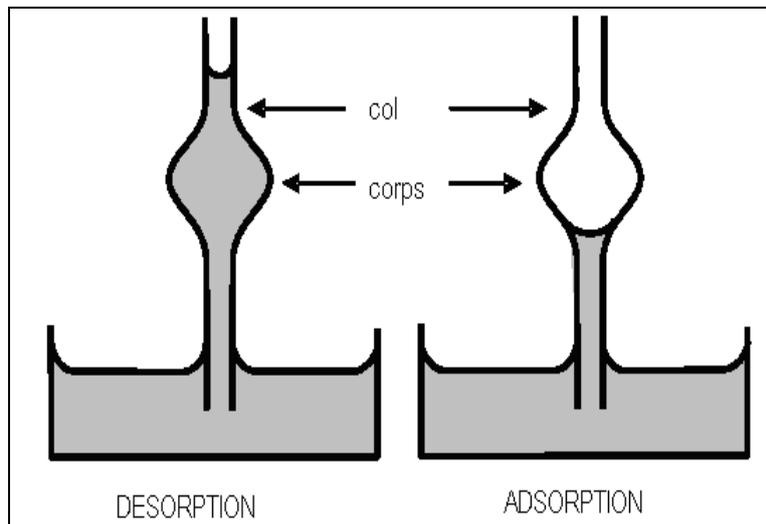


Figure II.4- Effet de la bouteille d'encre

En effet, la variation de dimensions entre les différents types de cavités connectées en série, suggère que la désorption est contrôlée par les plus petits pores et l'adsorption par les gros pores. La courbe de désorption est alors fortement influencée par le diamètre des canaux qui relient les cavités, tandis que la courbe d'adsorption est surtout régie par le diamètre de ces cavités.

L'établissement des isothermes de sorption permet surtout de recueillir des informations concernant l'équilibre hygroscopique du matériau considéré, ainsi elles trouvent une grande utilité lors de l'étude des mécanismes de séchage de matériaux poreux, en particulier le bois (dans ce cas l'intérêt se porte sur l'équilibre de désorption) ou bien lors de la détermination des conditions de leur stockage (l'intérêt se porte alors sur l'équilibre d'adsorption). En plus l'analyse des courbes de sorption permet la détermination de la distribution de la taille des pores.

Les isothermes de sorption sont des courbes qui se déterminent expérimentalement, parmi les méthodes expérimentales utilisées nous pouvons citer, la technique des solutions salines saturées et celle de la membrane poreuse sous pression [8].

Cependant, dans la littérature de nombreux modèles mathématiques sous forme empiriques existent, décrivant la relation graphique entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température pour un matériau donné, parmi lesquels nous citons ceux de [18], [19] :

- Guggenheim, Anderson et De boer (G.A.B).
- Chung. P fost, Henderson.
- Brunauer, Emmett et Teller (B.E.T).

II.2.1.2- La capillarité

Elle intervient lorsque le matériau poreux est mis en contact avec de l'eau en phase liquide suite à un phénomène de condensation superficielle ou à un phénomène de mouillage (pluie). L'expérience montre que lorsqu'un liquide mouille un solide hydrophile, il a tendance à s'étaler naturellement le long de sa surface. En milieu poreux, ce mécanisme conduit à la formation dans les pores d'interfaces courbes entre les phases liquide et celle gazeuses, la condition d'équilibre de ces interfaces se traduit par la présence d'une différence de pression positive entre les deux phases, appelée pression capillaire et donnée par la loi de Laplace :

$$P_c = P_g - P_l = \frac{2.\sigma.\cos(\theta)}{r} \quad (\text{II.10})$$

Avec:

P_g : La pression dans la phase gazeuse

P_l : La pression dans la phase liquide

σ : Tension superficielle ou interfaciale du couple eau-air, elle résulte des forces d'interaction moléculaire au sein d'un fluide

θ : Angle de mouillage entre la surface du solide et la tangente au point de contact, dans le cas de l'eau (corps parfaitement mouillant), $\cos(\theta) \approx 1$

r : Rayon du capillaire

Il est à signaler que dans de nombreux cas, la pression capillaire est remplacée par une autre variable ψ , la succion à laquelle elle se trouve reliée, par l'expression :

$$P_c = -\rho_l g \psi \quad (\text{II.11})$$

Où :

g : Accélération due à la pesanteur

ρ_l : Masse volumique du liquide

On peut alors écrire la loi de Laplace sous la forme :

$$\psi = -\frac{2\sigma \cos(\theta)}{\rho_l g r} \quad (\text{II.12})$$

La relation entre la pression capillaire et l'humidité relative de l'air est donnée par la loi de kelvin qu'on peut retrouver en combinant les relations (II.9) et (II.10).

$$P_c = P_g - P_l = -\frac{RT\rho_l}{M} \text{Ln } \Phi \quad (\text{II.13})$$

Ou encore sous la forme :

$$\psi = \frac{RT}{gM} \text{Ln } \Phi \quad (\text{II.14})$$

On remarque bien d'après l'équation (II.10) que la pression capillaire est importante lorsque le rayon du pore est faible.

II.2.2- Mécanismes de déplacement de l'humidité dans un matériau poreux

L'humidité se déplace dans les matériaux poreux grâce au transport de la vapeur d'eau et/ou de l'eau liquide, les causes de ce déplacement sont :

- la diffusion (pour la vapeur d'eau).
- la capillarité (pour l'eau liquide).
- la convection et la gravité.

Toutefois, les modes de migration par diffusion moléculaire et par capillarité sont les plus importants.

II.2.2.1- La diffusion

La diffusion de la vapeur d'eau provient des différences de concentration entre les deux composantes du mélange gazeux, air sec-vapeur d'eau. C'est un exemple spécifique du principe physique universel selon lequel, dans un mélange de gaz présentant des différences

de concentration il se produit un transfert moléculaire vers les milieux de faible concentration jusqu'à la disparition de ces différences. Celles-ci se rencontrent par exemple de part et d'autre des parois d'une construction, en effet la teneur en vapeur est généralement plus élevée à l'intérieur d'une habitation qu'à l'extérieur, à cause des sources de vapeur d'eau internes (occupants, cuisson, lessive, etc.).

Les matériaux de construction tel que plâtre, béton et brique sont poreux et laissent donc passer les gaz, notamment la vapeur d'eau qui aura tendance à quitter l'intérieur par diffusion à travers les parois.

La densité de flux de masse de vapeur par diffusion moléculaire s'exprime par la loi de Fick.

$$\vec{q}_{vd} = -\delta \vec{grad}P_v \quad (\text{II.15})$$

Avec:

$$\delta = F(X_l) \frac{D.M.P}{RT(P - P_v)} \quad (\text{II.16})$$

$F(X_l)$ est une fonction de pondération dépendant de la structure du milieu et de la teneur en eau X_l .

D : Le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air.

P : Pression totale.

II.2.2.2- La capillarité

Le transport de l'eau par capillarité est la conséquence directe de la force d'aspiration provoquée par la différence de pression (pression capillaire) entre les phases gazeuses et liquide dans les pores, ce qui entraîne l'envahissement spontané du volume des pores par la phase liquide mouillante. Un flux de transfert de masse \vec{q}_l des zones à forte concentration de liquide vers ceux à faible concentration en liquide se crée alors. Ce déplacement de l'eau est régi par la loi de Darcy:

$$\vec{q}_l = -\frac{k_l}{\nu_l} \vec{grad}\hat{P} \quad (\text{II.17})$$

Où :

k_l : Perméabilité du milieu à la phase liquide.

ν_l : Viscosité cinématique de l'eau.

\hat{P} : Pression motrice dans le liquide ($\hat{P} = p_l - \rho_l gz$).

Conformément à la loi de Laplace (II.10), dans les pores les plus petits règnent les pressions capillaires les plus importantes, il s'ensuit un remplissage des capillaires par ordre croissant de leur rayon, pendant ce temps la pression capillaire diminue (phénomène d'imbibition) [20].

II.3- TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE

Dans un milieu poreux à plusieurs phases, partiellement saturé on ne peut considérer uniquement le transfert d'énergie par conduction. En effet, un transfert d'énergie induit par un transfert de masse en phase liquide et gazeuse, vient s'ajouter au transfert de chaleur à travers les différentes phases du milieu.

Ce transfert de masse s'établit du fait de la présence d'un gradient de température dans le milieu poreux, l'eau qui alors s'évapore d'une zone chaude est transportée par diffusion vers une zone froide, où elle se condense libérant ainsi sa chaleur latente de vaporisation qui contribuera d'une part au transfert de chaleur et d'autre part, modifiera les caractéristiques thermophysiques locales de la paroi.

L'évaporation condensation successive de l'eau est un phénomène qui conduit à un accroissement sensible du transfert de chaleur et par conséquent, de la conductivité thermique.

Le couplage transfert de masse et transfert de chaleur a été historiquement mis en évidence et analysé par Krischer [21], Philippe et Devries [22] et Luikov [23], puis validé expérimentalement en 1981 par Crausse [24]. Une grande contribution est apportée par Philip et Devries sur la description des transferts couplés en milieu poreux non saturé à partir d'études sur les sols, ils ont formulé sur des bases physiques claires, les équations constitutives pour les densités de flux de liquide et vapeur en fonction des gradients de concentration volumique d'eau liquide et de température.

Il existe de nombreuses méthodes de mesure de l'humidité dont les plus connues sont:

III.1- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA RMN

La Résonance Magnétique nucléaire (RMN) est un phénomène par lequel un noyau d'atome absorbe les rayonnements électromagnétiques d'une fréquence spécifiques en présence d'un fort champ magnétique. Isodore Issac Rabi a découvert le phénomène de résonance magnétique en 1938. Les travaux de Felix Boch et Edward Purcel sur la RMN dans les solides leurs ont valu le prix Nobel de physique en 1952, dès lors la résonance magnétique a été appliquée à la détection des atomes légers tel que l'hydrogène.

Le principal intérêt de l'utilisation de la résonance magnétique en milieux poreux est qu'il s'agit d'une technique non destructive et non invasive, fournissant des informations sur la dynamique des molécules au voisinage des interfaces solide-liquide. La mesure de l'aimantation initiale du signal RMN proportionnelle à la quantité de protons liquides, permet une mesure rapide et quantitative du volume de liquide présent dans une structure poreuse.

III.1.1- Principe de la RMN

III.1.1.1- Définition du spin

Les noyaux d'atomes possèdent une propriété purement quantique appelée spin, cette propriété peut être imagée par la rotation du noyau atomique sur lui-même. A cette rotation correspond un moment cinétique de spin noté S , les valeurs de S peuvent être prévues empiriquement et sont soit nulles, $S=0$, soit entier $S=1$, soit demi entier $S=1/2$.

Les noyaux ayant un nombre de spin nul ne possèdent donc pas de moment cinétique et ne peuvent être donc utilisés en RMN. Pour la mesure de l'humidité on utilise la résonance magnétique de l'hydrogène H^1 , ($S= 1/2$), dite aussi du proton.

L'existence d'un moment cinétique pour le noyau rend celui-ci semblable à une charge électrique en rotation et lui confère ainsi les caractéristiques d'un petit solénoïde. Les noyaux atomiques de spin non nul peuvent être donc comparés à de très petits aimants droits dotés d'un pôle nord et d'un pôle sud.

III.1.1.2-Etapes d'une mesure RMN

a) Alignement des noyaux

D'ordinaire les pôles nord des noyaux pointent dans n'importe quel sens, la première étape d'une mesure RMN consiste à aligner les aimants nucléaires à l'aide d'un fort champ magnétique qu'en notera \vec{B}_0 , pour cela on utilise un gros aimant, les noyaux sont ainsi alignés de tel sorte que leur pôle nord pointe vers le pôle sud de l'aimant, (figure III.1), et il en résulte dans le milieu une aimantation nucléaire macroscopique de moment \vec{M}_0 aligné parallèle au champ magnétique statique. \vec{B}_0

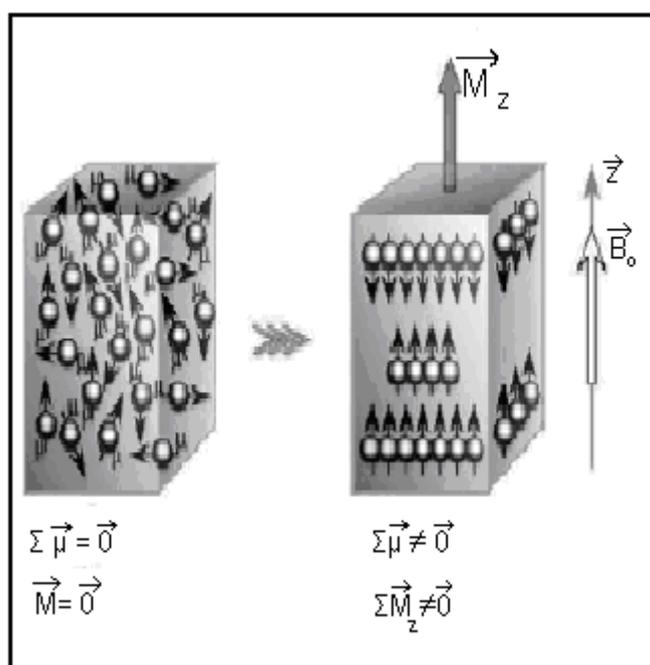


Figure III.1- Alignement des noyaux

b) Basculement de l'aimantation nucléaire

La deuxième étape d'une mesure RMN consiste à faire basculer l'aimantation nucléaire \vec{M}_0 par rapport à sa position d'équilibre parallèle à \vec{B}_0 , pour cela on applique un champ magnétique additionnel \vec{B}_1 de direction perpendiculaire à \vec{B}_0 et d'intensité infiniment plus faible mais tournant à la même vitesse que les spins, ce qui a pour effet de

modifier leur état en créant des conditions de résonance. Ce champ magnétique tournant peut être fourni par une onde électromagnétique dont la fréquence dite fréquence de résonance est proportionnelle au champ \vec{B}_0 exprimé par la relation de Larmor [25], [26] :

$$f_0 = \frac{\gamma}{2\pi} B_0 \quad (\text{III.1})$$

Où

γ est le rapport gyromagnétique

La relation de Larmor permet de déduire que pour un champ $\vec{B}_0 = 0.5$ Tesla, la fréquence de résonance des noyaux d'hydrogène est de 21.29 MHz. Il s'agit donc d'impulsion de radiofréquence, elles seront appelées impulsions d'excitations, on parlera d'impulsion de 90° ou de 180° selon qu'à la fin de l'excitation le moment magnétique \vec{M}_0 aura été basculé de 90° ou de 180° par rapport à sa position initiale, (figure III.2).

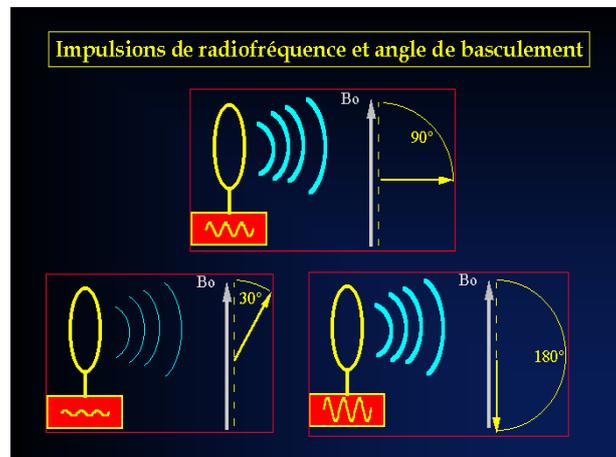


Figure III.2- Basculement de l'aimantation

c) Mesure du signal RMN

L'équipement RMN comprend donc essentiellement un électroaimant permettant de générer un champ magnétique \vec{B}_0 intense, un émetteur d'onde électromagnétique à une fréquence bien déterminée f_0 , mais aussi une bobine ou une antenne réceptrice qui permet de détecter le signal provenant des spins en résonance.

Lorsque l'aimantation nucléaire aura basculé d'un angle de 90° , l'impulsion d'excitation est stoppée et l'aimantation nucléaire retourne à sa position d'équilibre parallèle au champ \vec{B}_0 , ce retour peut être décomposé en deux mouvements dits de précession et de relaxation.

◆ **Mouvement de précession libre**

Sitôt écarté de sa position d'équilibre le vecteur moment magnétique est animé d'un mouvement de rotation autour de, \vec{B}_0 ce mouvement de rotation est désigné sous le terme de précession, dont la fréquence est égale à la fréquence de résonance des noyaux d'hydrogène, (figure III.3).

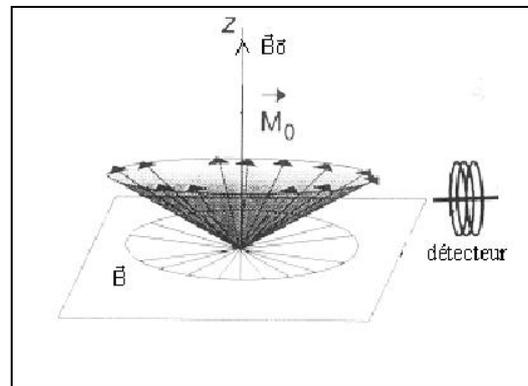


Figure III.3-Mouvement de précession libre

◆ **Relaxation de l'aimantation nucléaire**

Elle représente son retour proprement dit à la position d'équilibre, au cours duquel le vecteur moment magnétique \vec{M}_0 peut être décrit par sa projection sur la direction de \vec{B}_0 , appelée composante longitudinale (\vec{M}_z), et sa projection sur le plan perpendiculaire à \vec{B}_0 , appelée composante transversale (\vec{M}_{xy}), (figure III.4).

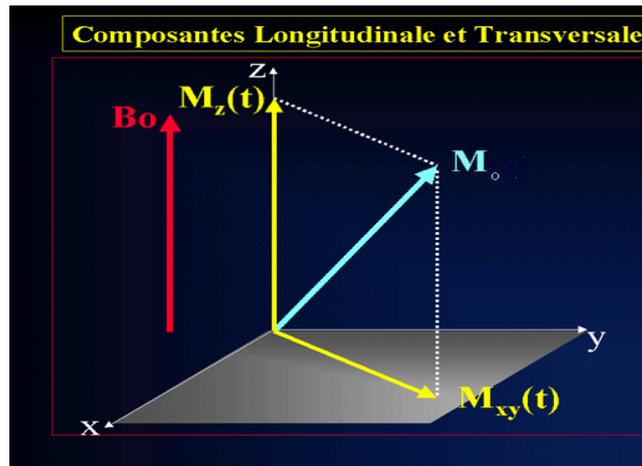


Figure III.4-Composantes longitudinale et transversale du moment magnétique

Le retour à l'équilibre correspond donc à la disparition de l'aimantation transversale et à la récupération de l'aimantation longitudinale. Le moment magnétique ne garde pas un module constant lors de son retour à l'équilibre, de sorte que l'aimantation transversale disparaît plus vite que ne réapparaît l'aimantation longitudinale, il est donc nécessaire de définir pour la relaxation deux durées caractéristiques.

- Le temps de relaxation longitudinale T_1 , qui correspond à la récupération de l'aimantation longitudinale.
- Le temps de relaxation transversale T_2 , correspondant à la disparition de l'aimantation transversale.

Les temps de relaxation sont sensibles au confinement poreux et à la dynamique de l'eau, plus le confinement est important, plus la relaxation est rapide et donc plus le temps de relaxation est faible, (figure III.5).

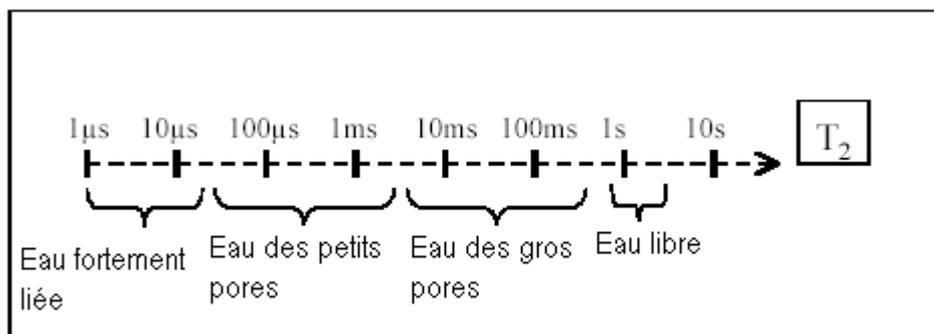


Figure III.5- Ordre de grandeur du temps de relaxation transversal T_2
Associé a différents types d'eau

d) Séquences standards de mesure

Plusieurs séquences de mesure sont utilisées en RMN telles que, la séquence FID (free induction decay) ou bien la séquence d'inversion et de récupération mais la plus utilisée reste celle de Carrl-Purcell-Melboom –Gill, dite séquence C.P.M.G. [1].

L'aimantation longitudinale parallèle au champ \vec{B}_0 ne peut precesser, seule la composante transversale precesse, induisant un courant dans la bobine réceptrice, la durée du signal est aussi déterminée par la persistance de l'aimantation transversale, une constante de temps la caractérisant est donc le temps de relaxation transversale T_2 .

Mais certains facteurs tels que la non uniformité du champ magnétique \vec{B}_0 peuvent provoquer une décroissance plus rapide du signal, cette décroissance sera caractérisée par une autre constante de temps T_2^* toujours inférieure à T_2 .

Pour mesurer la valeur de T_2 réelle, la technique dite de la séquence CPMG est largement utilisée. Son principe consiste à rephaser les aimantations élémentaires en appliquant une impulsion de 180° , ce qui a pour effet d'inverser la position des aimantations de sorte que les aimantations les plus rapides rattrapent les plus lentes et se retrouvent ainsi en phase (parallèles) après un temps τ après l'impulsion de 180° , à ce moment l'aimantation totale passe par un maximum détecté par l'antenne comme un écho caractérisé par le temps $T_e = 2 \tau$ dit temps d'écho, (figure III.6), (figure III.7).

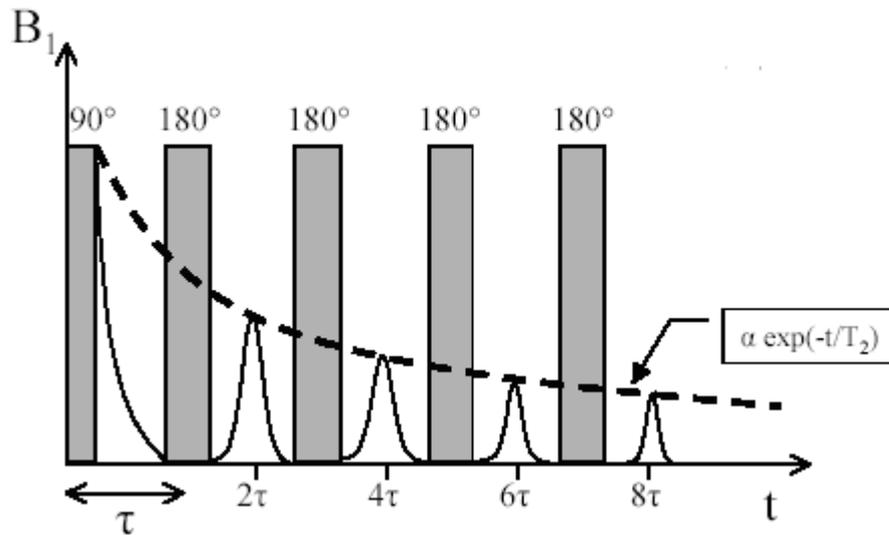


Figure III.6- Séquence CPMG [1].

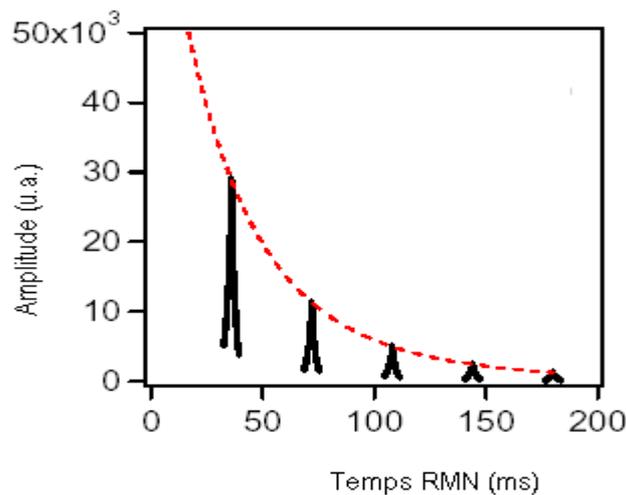


Figure III.7- Observation des échos de spins dans une séquence CPMG dans le cas d'une eau confinée dans la porosité d'un échantillon de plâtre ($e/p = 0.6$), [1]

III.1.2- Détermination de l'humidité à partir d'une mesure RMN

En utilisant la séquence d'échos de spin CPMG, qui permet une acquisition rapide du signal d'aimantation transversale, et en choisissant un temps minimal d'observation de l'ordre de quelques centaines de microsecondes (largement supérieur au temps de relaxation des protons solides, typiquement de l'ordre de quelques microsecondes), le signal d'aimantation nucléaire ne sera par conséquent sensible qu'aux protons des liquides, les protons du solide relaxent très rapidement et leur aimantation est indétectable dans ces

conditions. Ainsi l'amplitude du signal RMN ne sera proportionnelle qu'au nombre de molécules d'eau mobiles dans l'échantillon.

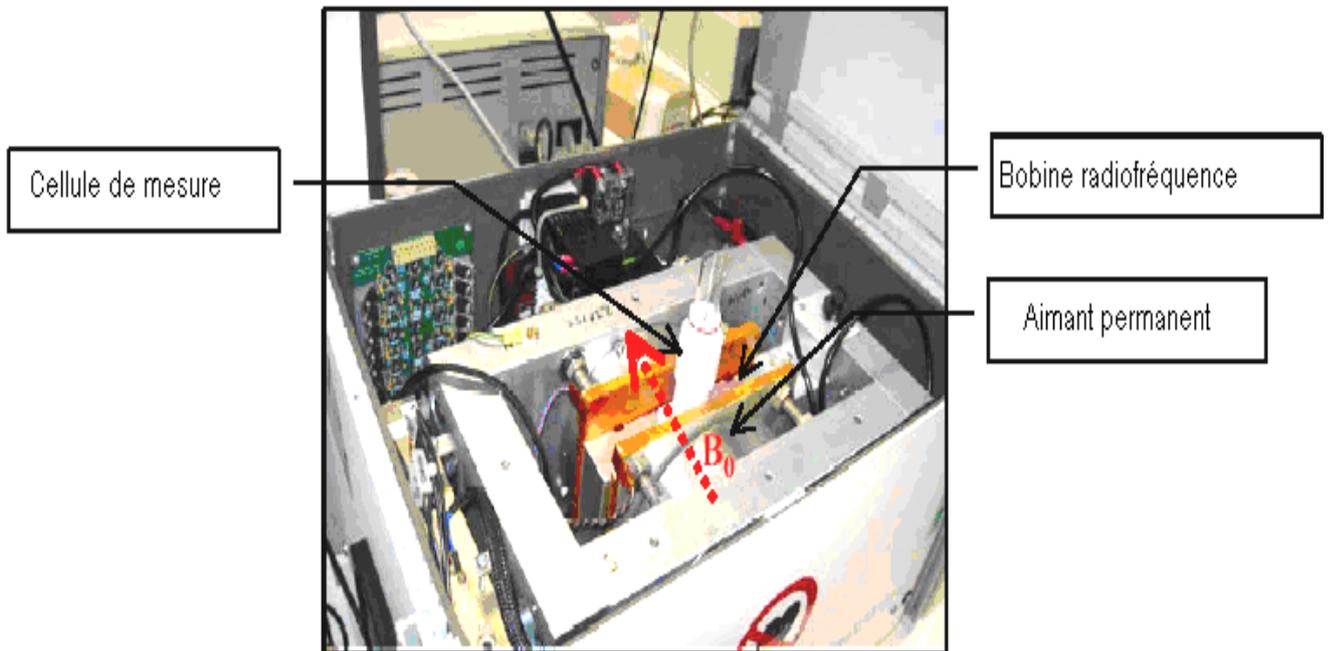


Figure III.8- Spectromètre Maron Ultra (0.55Tesla / 23MHz) [1]

Un essai de calibrage des mesures effectué par un spectromètre type Maron Ultra (0.55Tesla / 23MHz), (figure III.8) a permis de voir une évolution linéaire de l'amplitude du signal d'aimantation en fonction du volume d'eau introduit dans la cellule de mesure du spectromètre. La figure III.9 montre cette évolution. Il est donc possible de quantifier non destructivement et en continu la quantité d'eau disponible dans une structure poreuse donnée en utilisant cette simple loi de proportionnalité [1].

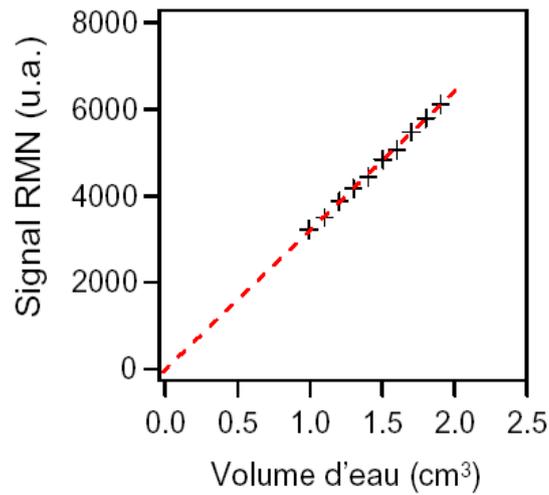


Figure III.9- Proportionnalité du signal d'aimantation RMN au volume d'eau total introduit dans la cellule de mesure.

La figure III.10, représente une autre courbe d'étalonnage typique représentant la dépendance fonctionnelle entre l'amplitude A du signal RMN du proton et la teneur en eau dans le béton léger [27].

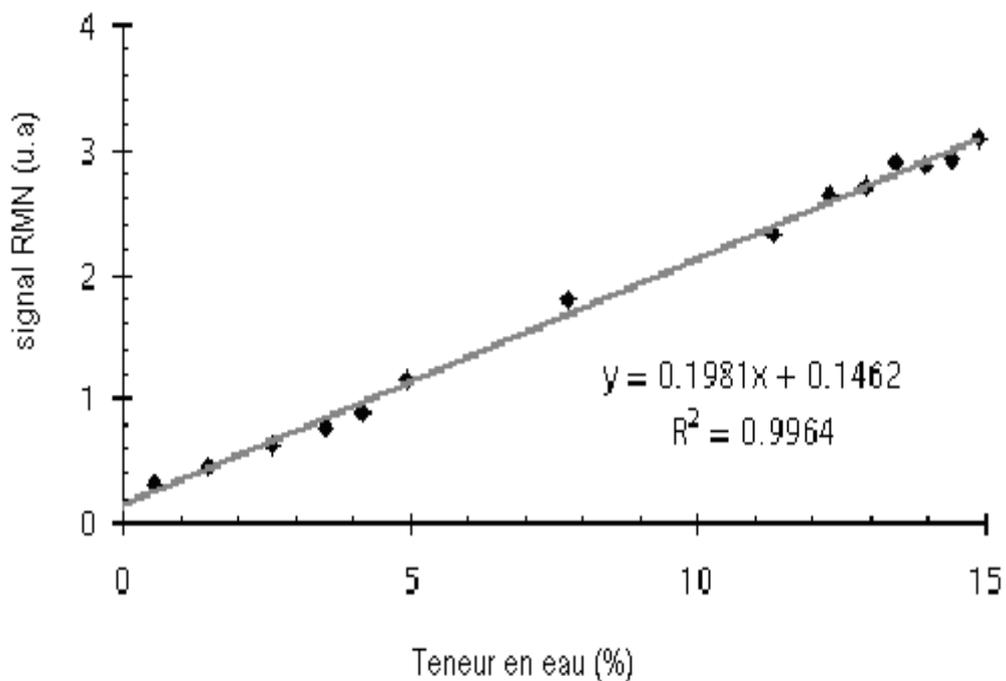


Figure III.10-Dépendance fonctionnelle entre l'amplitude du signal RMN et la teneur en eau dans le béton léger

III.2- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA TECHNIQUE DE LA SPECTROSCOPIE DES RAYONS GAMMA

La technique d'atténuation des rayons γ permet une détermination rapide, précise et non destructive des profils d'humidité dans un matériau poreux. Pour effectuer une mesure d'humidité, une source à rayon γ et un détecteur sont nécessaires. La source génère un faisceau de rayon γ émis par un matériau radio-isotope. En effet les rayons γ sont une forme ionisée de radiation électromagnétique (photons) émise par des noyaux excités au cours de leur transition à un bas niveau d'énergie. Les radio-isotopes les plus fréquemment utilisés sont l'américium Am^{241} et le césium Cs^{137} .

La technique est basée sur l'interaction des photons émis par la source avec les électrons orbitaux des molécules du matériau à explorer, et sont soit absorbés, soit dispersés, ce qui a pour conséquence l'atténuation du faisceau incident de rayon γ noté I_0 . L'intensité résiduelle notée I est alors indiquée par la fraction des photons qui ont traversé la couche du matériau poreux sans aucune interaction, et ont donc gardé leur énergie et direction originales. Le détecteur est ainsi utilisé pour mesurer l'intensité I , pour cela l'échantillon est mis entre la source et le détecteur, ce dernier consiste habituellement en un cristal à scintillation (tel que *NAI*).

La loi de Beer donne la valeur de l'intensité I de photons traversant l'échantillon en fonction de l'humidité contenue dans ce dernier [28], [29].

$$I = I_0 \exp(-\rho \cdot \sigma \cdot d) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

I_0 : Intensité du faisceau γ du rayon incident (photon/m².s).

I : Intensité des rayons γ après passage par l'échantillon.

d : Epaisseur de l'échantillon (en m).

σ : Coefficient d'atténuation massique du matériau (m²/kg).

ρ : Densité apparente de l'eau (kg/m³).

Une relation empirique donnant σ pour l'eau pure a été établie à partir de mesures d'atténuation de rayon γ sur des colonnes d'eau pure de longueurs d' . La relation est comme suit [30].

$$\sigma = A + B.d' \quad (\text{III.3})$$

Où

$$A = 0.203 \text{ cm}^2/\text{g}$$

$$B = - 0.0018 \text{ cm/g}$$

Cette relation servira à calculer la valeur de σ qui sera utilisée dans la loi de Beer, une méthode itérative de calcul sera suivie [29], dont la procédure est comme suit :

- Premièrement la valeur de σ est estimée égale à $0.203 \text{ cm}^2/\text{g}$, on utilise alors la loi de Beer pour calculer une valeur approximative de la densité apparente ρ , qui elle-même sera utilisée pour déterminer une valeur approximative de la longueur d' , et cela à partir de la relation suivante :

$$d' = \frac{\rho}{1000} \times d \quad (\text{III.4})$$

Où d est l'épaisseur constante de l'échantillon.

- À partir de la valeur de d' , on calcule la valeur approximative de σ en utilisant la relation (III.3), puis les mêmes étapes de calcul se répéteront jusqu'à convergence des valeurs de ρ .

Toutefois, cette méthode présente certains inconvénients qui nécessitent la prise de mesures de sécurité rigoureuses, notamment du fait de la radioactivité des matériaux utilisés.

III.3- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA METHODE NEUTRONIQUE

Cette méthode non destructive est similaire à la technique d'atténuation des rayons γ . On utilise ainsi une source à neutrons et un détecteur entre lesquels l'échantillon est placé, contrairement au rayon γ agissant sur les électrons des molécules de l'échantillon, les neutrons agissent sur les noyaux de ces derniers mais principalement sur les noyaux d'hydrogène, l'atténuation d'un faisceau de neutrons provoquée par la dispersion et l'absorption des neutrons sera donc directement liée à la teneur en eau dans le matériau à explorer. L'intensité d'un faisceau de neutron passant par un échantillon est donnée par la relation [28],[26] :

$$I = I_o \exp[-d(\mu_{mat} + \mu_e \varepsilon)] \quad (\text{III.5})$$

Avec :

I : L'intensité du faisceau de neutron après être passé à travers l'échantillon.

I_0 : L'intensité initiale du faisceau de neutron émanant de la source.

d : Épaisseur de l'échantillon

μ_{mat} : Le coefficient d'atténuation macroscopique du matériau considéré

μ_e : Le coefficient d'atténuation macroscopique de l'eau.

ε : La quantité d'eau contenue volume par volume

Les coefficients d'atténuation macroscopique μ_e et μ_{mat} dans équation III.5 sont déterminés indépendamment en mesurant la transmission de neutrons à travers respectivement l'eau pure et l'échantillon à tester à l'état sec.

Du fait des radiations émises lors des tests, certaines précautions de sécurité doivent être prises, en plus un personnel qualifié est requis.

III.4- MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA METHODE ELECTRIQUE

C'est une méthode non destructive et peu coûteuse, basée sur la mesure de la conductivité électrique du matériau à tester. En effet et pour la plupart des matériaux, la conductivité électrique du matériau à tester, (par conséquent la résistivité qui est l'inverse de la conductivité) augmente avec la teneur en eau. Les travaux de Stamm [31],[32] ont montré clairement qu'à température constante la résistivité électrique est liée à la teneur en eau par la relation :

$$\text{Log}\rho = E + F\text{Log}\omega \quad (\text{III.6})$$

Avec:

ρ : La résistivité électrique du matériau ($\Omega.m$).

ω : Teneur en eau (Kg d'eau/Kg de matière sèche).

E et F étant des constantes réelles définies pour une température donnée avec F réel négatif.

Cependant cette relation n'est valable que pour des teneurs en eau comprises entre 7 et 30%.

Le principe de la technique consiste à mesurer la résistivité électrique entre deux électrodes, l'une à potentiel positif, l'autre négatif placées en contact direct avec le matériau, un appareil (mégohmmètre par exemple) permet d'imposer une tension U aux bornes des électrodes et d'en déduire la valeur de la résistance électrique mesurée à partir de l'intensité du courant qui traverse l'échantillon. À partir de la valeur de la résistance électrique, la résistivité ρ est déduite.

III.5- MESURE DE L'HUMIDITE PAR L'ATTENUATION DES RAYONNEMENTS MICRO-ONDES

C'est aussi une méthode non destructive se basant sur l'atténuation d'un faisceau de micro-onde traversant l'échantillon. L'atténuation est fortement influencée par la constante diélectrique du matériau, la constante diélectrique de l'eau est 10 à 40 fois plus élevée que celle du matériau sec. Pendant la mesure, l'échantillon est placé entre un émetteur et un récepteur et l'atténuation du faisceau provoquée par l'oscillation des molécules d'eau dans l'échantillon est mesurée, la valeur de cette atténuation dépend étroitement de la quantité d'eau présente dans l'échantillon.

III.6- METHODE GRAVIMETRIQUE

En général la méthode consiste à peser l'échantillon humide dont la masse sera notée M_h , puis le mettre à sécher. Le procédé de séchage peut être effectué de différentes manières selon le matériau et sa capacité à résister à la chaleur, la manière la plus rapide et la plus commune consiste à employer un four à température réglable (pouvant dépasser les 100 °C). Les matériaux ne pouvant pas supporter les hautes températures sont séchés en utilisant des déshydratants tel que le silica gel ou l'acide sulfurique. Cette dernière méthode présente toutefois l'inconvénient de consommer beaucoup de temps. L'échantillon est ensuite pesé une autre fois et sa masse sera notée M_s .

La perte de masse provoquée par l'évaporation de l'eau est égale à la différence des poids :

$$M_e = M_h - M_s \quad (\text{III.7})$$

Par la suite l'échantillon est remis à sécher dans le four sous les mêmes conditions de températures pour quelques heures puis il est pesé de nouveau, l'opération se répétera

jusqu'à ce qu'il n'y a plus aucune différence de masse entre deux pesés successives, la teneur en eau dans l'échantillon est alors donnée par :

$$\omega = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_h}{M_s} - 1 \quad (\text{III.8})$$

Cette méthode a été adoptée pour déterminer les teneurs en eau des matériaux étudiés dans le cadre de ce travail.

Il est à noter que des techniques de mesure de l'humidité autres que celles présentées dans ce chapitre sont à explorer dont nous citons :

- ◆ La tomographie par ordinateur (Computer Tomography).
- ◆ L'atténuation des rayons X.
- ◆ L'imagerie thermique (Thermal Imaging).

IV.1-METHODE DE MESURE UTILISEE

La technique de mesure de la conductivité thermique utilisée dans le cadre de ce travail et dite " méthode des boîtes". Elle a été mise au point par le laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'université Claude Bernard de Lyon. Le laboratoire d'énergétique de la faculté des Sciences Exactes de Constantine est équipé d'un dispositif fonctionnant suivant ce principe. (figure IV.1).

L'appareil en question permet la mesure simultanée de la conductivité et de la diffusivité thermique en des temps relativement courts (4 à 7 heures suivant les matériaux pour la conductivité thermique, et 1 heure pour la diffusivité), de deux échantillons de taille significative. La précision des mesures est comparable à celle obtenue par les méthodes conventionnelles, [34], (plaque chaude gardée, fil chaud, flux radial, flash laser, etc.). En outre les mesures se font dans des conditions très proches des conditions réelles d'utilisation du matériau.



Figure IV.1- Dispositif expérimental utilisé

IV.1.1- Description du dispositif utilisé

Le principe de mesure est basé sur la réalisation de façon permanente d'un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers l'échantillon, la figure IV.2 présente un schéma représentatif du dispositif expérimental. Il est essentiellement constitué des éléments suivants :

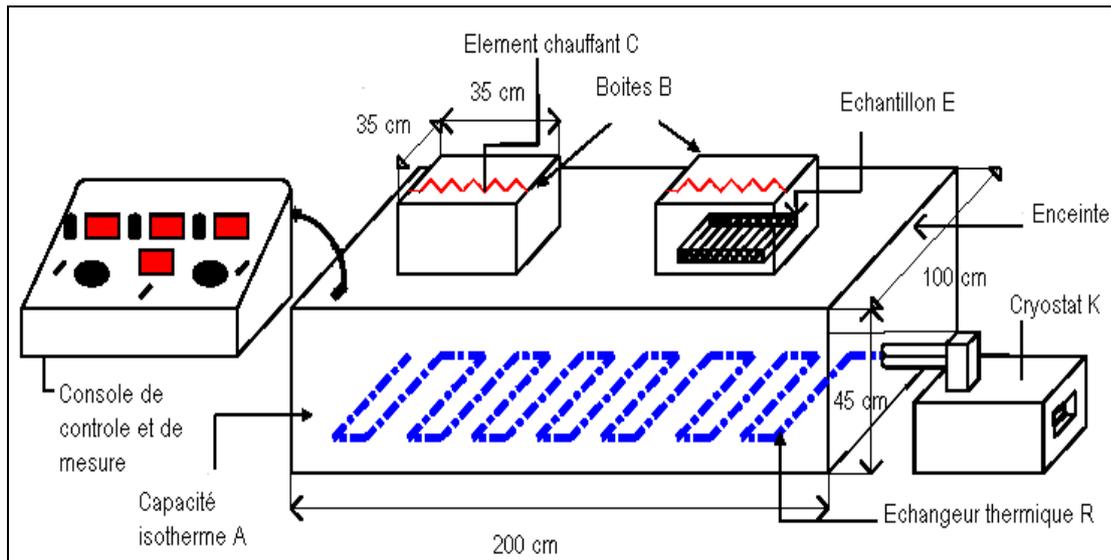


Figure IV.2- Schéma représentatif du dispositif de mesure par la méthode des boîtes

◆ **Capacité isotherme A**

C'est une grande capacité de dimensions $(200 \times 100 \times 45) \text{ cm}^3$, jouant le rôle de l'ambiance froide. Elle est maintenue à une faible température pouvant aller jusqu'à -4°C grâce à un échangeur thermique situé à sa base et alimenté par de l'eau glycolée dont la circulation et le refroidissement sont assurés par un cryostat K.

Ses parois internes sont couvertes par des plaques en styrodur permettant de l'isoler thermiquement de l'ambiance externe.

◆ **Boîtes chaudes B**

Les deux boîtes sont identiques, elles permettent de faire deux mesures simultanées. Ce sont des boîtes en contre-plaqué, isolées de l'intérieur par du styrodur et présentant chacune une face ouverte. Elles sont revêtues sur la partie interne de leur face supérieure d'un film chauffant C (résistance électrique) dont l'émission de chaleur peut être réglée à l'aide d'un rhéostat. L'intérieur des boîtes joue le rôle de l'ambiance chaude, (figure IV.3).

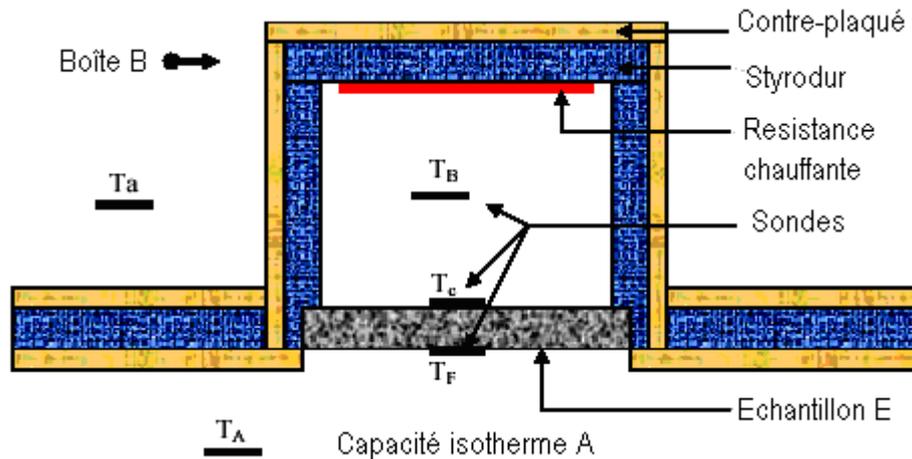


Figure IV.3- Boîtes chaude B pour la mesure de la conductivité thermique et position des sondes

◆ **Capteurs de température**

Les capteurs de température sont des thermosondes en platine (sondes SP 683 GAL) pour la mesure des températures de surface et des sondes d'ambiance pour la mesure des températures d'ambiance. Ces différentes sondes sont réparties en divers endroits de l'appareil. On retrouve ainsi une sonde de surface sur chaque face de l'échantillon à tester indiquant les températures T_c et T_f respectivement pour les faces chaude et froide. Une sonde d'ambiance sert à mesurer la température T_b à l'intérieur de la boîte. On dispose également de deux autres sondes d'ambiance indiquant les températures T_a et T_A respectivement la température de la salle dans laquelle s'effectuent les expériences, et la température de l'ambiance intérieure, (figure IV.2).

◆ **Echantillons E**

Les échantillons (E) à tester doivent avoir une forme parallélépipédique de 27cm de côté et d'une épaisseur allant de 1 à 7cm. Ils sont placés entre la boîte B et la capacité isotherme A, de telle sorte que les flux latéraux soient négligeables. Par analogie avec les murs d'un habitat en hiver, chaque échantillon présente une face chaude et une face froide.

◆ **Console de mesure**

C'est une centrale de mesure disposant d'un nombre important de voies (12 fils de connexion pour le cas de notre dispositif), et pouvant donner des informations instantanées que nous pouvons directement lire sur des afficheurs. Elle est équipée de deux

autotransformateurs variables (rhéostats) qui permettent d'ajuster les tensions électriques désirées aux bornes de la résistance chauffante de chaque boîte.

IV.1.2- Inconvénients et limites d'utilisation de la méthode des boîtes

Cette méthode présente quelques inconvénients :

- Elle est surtout appropriée à des matériaux homogènes dont la conductivité thermique n'excède pas la valeur de $3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- pour des températures élevées les résultats deviennent moins précis.
- durant les mesures un phénomène de séchage s'opère, ce qui influence la teneur en humidité des échantillons.

Par ailleurs nous avons pu noter d'autres inconvénients que nous avons observé lors des différentes manipulations effectuées. En effet et du fait de la puissance limitée des résistances chauffantes ($q_{\max} = 11.3 \text{ W}$), on ne peut pas toujours élever la température d'ambiance des boîtes T_b pour quelle atteigne celle de l'ambiance externe T_a , (condition impérative pour minimiser les pertes de chaleur à travers les parois latérales des boîtes), ainsi pour les matériaux dont les conductivités thermiques sont relativement élevées, il devient quasiment impossible d'atteindre le régime permanent, toutefois l'utilisation d'un conditionneur d'air permet de palier à ce problème.

IV.2- COMPORTEMENT THERMIQUE

IV.2.1- Généralités sur Le transfert de chaleur

Le transfert de chaleur correspond à une transmission de l'énergie d'une zone vers une autre. Ce transfert a lieu sous trois formes, la conduction sous l'effet d'un gradient de température, la convection et le rayonnement.

La conduction désigne le transfert d'énergie par contact sans déplacement global de matière. Ce mode de transfert est très étudié car il dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants. La conductivité λ est donc une valeur caractéristique intrinsèque du matériau.

La convection caractérise le transfert de chaleur entre une matrice solide immobile et un fluide qui s'écoule le long de la paroi solide, ces deux éléments étant à des températures différentes.

Le rayonnement est dû aux émissions d'ondes électromagnétiques. La chaleur se transmet entre le corps émetteur qui joue le rôle de source et le corps récepteur qui emmagasine l'énergie sans aucun support matériel entre les deux matériaux.

IV.2.1.1- Equation de la chaleur

L'équation générale de la chaleur pour un point M d'un solide homogène isotrope repéré par ses coordonnées cartésiennes spatiales et temporelles s'écrit :

$$\lambda \Delta T + \text{grad}T \cdot \text{grad}\lambda + m = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \text{grad}T \right) \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

C : Chaleur massique

m : Terme source

T : Champ de température dans le matériau

U : Champ des vitesses du solide

L'équation IV.1 est simplifiée grâce aux hypothèses suivantes:

- La conductivité des solides varie très peu avec la température d'où $\text{grad}\lambda = 0$
- Il n'y a pas de production interne de chaleur donc $m = 0$
- Le solide considéré est immobile donc $\vec{U} = \vec{0}$
- Les études sont faites en régime permanent ce qui veut dire que $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

On aboutit alors à l'équation :

$$\lambda \Delta T = 0 \quad (\text{IV.2})$$

Cette équation n'est valable que pour un matériau homogène mais elle peut être considérée comme exacte au niveau macroscopique sur des volumes élémentaires, (les VER) déjà définis au chapitre II. La conductivité macroscopique est appelée conductivité apparente du matériau notée λ_a .

De plus, dans le cas d'un transfert de chaleur unidirectionnelle (hypothèse justifiée expérimentalement), l'équation IV.2 s'écrit :

$$\lambda_a \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

Or les matériaux étudiés sont poreux, la conductivité thermique apparente peut alors s'écrire sous la forme :

$$\lambda_a = \lambda_c + \lambda_v + \lambda_r \quad (\text{IV.4})$$

Où λ_c , λ_v , λ_r sont respectivement les conductivités thermiques dues au transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement.

Dans cette étude, nous supposons que les échanges dus au rayonnement et à la convection sont négligeables devant ceux dus à la conduction résultant du faible écart de température auquel sont soumis les échantillons, ainsi qu'au volume restreint de la boîte de mesure, par conséquent $\lambda_a = \lambda_c$. Pour simplifier l'écriture on notera la conductivité par λ

IV.2.1.2- Résolution de l'équation de chaleur dans le cas d'un mur plan

Sachant que nos échantillons sont simulables à des murs plans d'épaisseur constante e dont les parois de surfaces S sont soumises à deux températures différentes (écoulement monodimensionnel de la chaleur), dans ce cas la résolution de l'équation IV.3 aboutit à une variation linéaire de la température et les isothermes sont des plans parallèles à la surface S , [35]. En effet en tenant compte des conditions aux limites, (figure IV.4), on trouve que :

$$T(x) = T_c + (T_f - T_c) \frac{x}{e} \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

T_c : Température de la surface chaude de l'échantillon.

T_f : Température de la surface froide.

La puissance de chaleur dissipée à travers les parois des échantillons, d'après la loi de Fourier est :

$$dq = -\lambda \frac{dT}{dx} S \quad (\text{IV.6})$$

En considérant qu'il n'y a pas de fuites par les parois latérales et par intégration de l'équation IV.6, en tenant compte de l'équation IV.5, on obtient :

$$q = \lambda \cdot \frac{S}{e} (T_c - T_f) \quad (\text{IV.7})$$

L'écoulement de chaleur dans le dispositif de mesure utilisé peut être décrit par l'équation IV.7.

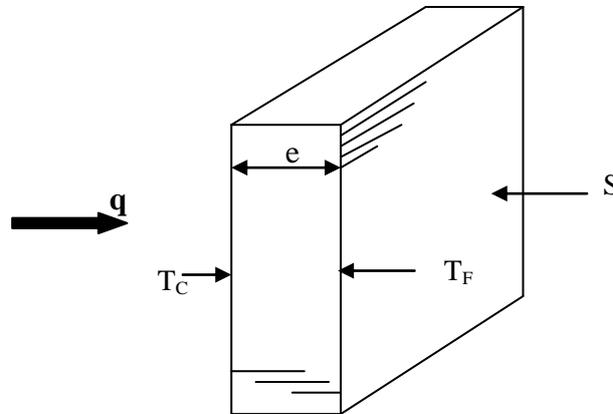


Figure IV.4- Ecoulement monodimensionnel de la chaleur à travers un mur plan

IV.2.2- Etude expérimentale

a) Détermination expérimentale de la conductivité thermique

Après avoir soigneusement mis en place les sondes de surfaces sur les deux faces de l'échantillon, ce dernier est inséré à l'intérieur des boîtes et une tension est appliquée aux bornes du film chauffant (le système de refroidissement étant préalablement mis en marche).

Une montée de températures commencera alors à être observée et au bout d'un certain temps plus ou moins long (suivant les matériaux et le taux d'humidité des échantillons), les températures finissent par se stabiliser. Pour dire que le régime permanent est atteint, il faut s'assurer que l'écart de température ($T_c - T_f$) entre les deux faces de l'échantillon reste constant pendant au moins 30 minutes. Une température est dite constante si sa variation absolue ne dépasse nullement 0.1°C pendant la durée considérée. Cependant les valeurs des différentes températures ne seront retenues que si l'écart de température entre l'ambiance intérieure des boîtes et l'ambiance extérieure ($T_b - T_a$) est inférieur à 1°C .

Pour pouvoir assurer cette condition, il faut jouer sur la valeur de la tension V aux bornes des films chauffants. Au début de l'expérience une tension arbitraire est fixée (on peut se référer néanmoins aux valeurs des tensions appliquées lors des expériences précédentes),

puis des ajustements adéquats lui sont apportés au fur et à mesure du déroulement des essais jusqu'à obtention de la condition imposée.

Des que le régime permanent est atteint et que la condition $(T_b - T_a) < 1^\circ\text{C}$ est assurée, on commence à relever cinq à six quintuplés (T_a, T_b, T_c, T_f et V) par espace de cinq minutes.

A la fin de l'expérience les échantillons sont retirés et l'on procède à la mesure de leurs masses et de leurs dimensions (dans le cas du bois).

Conformément au principe de la conservation de l'énergie, le flux de chaleur dégagé par le film chauffant sera d'une part transmis à travers l'échantillon, et d'autre part perdu à travers les parois latérales des boîtes B, on aura ainsi l'égalité suivante :

$$q = q_1 + q_2 \quad (\text{IV.8})$$

Où:

$$q = \frac{V^2}{R} \quad : \text{Flux émis par la résistance chauffante par effet joule.}$$

$$q_1 = \lambda \cdot \frac{S}{e} (T_c - T_f) \quad : \text{Flux transitant par l'échantillon.}$$

$$q_2 = C(T_b - T_c) \quad : \text{Flux perdu à travers les surfaces latérales de la boîte.}$$

Avec:

V : Tension aux bornes de la résistance

R : Valeur de la résistance.

S : Surface de l'échantillon

e : Epaisseur de l'échantillon

C : Coefficient de déperdition des boîtes.

De l'équation IV.8 résulte l'expression de la conductivité thermique :

$$\lambda = \frac{e}{S(T_c - T_f)} \left[\frac{V^2}{R} - C(T_b - T_a) \right] \quad (\text{IV.9})$$

L'équation IV.9 servira à calculer la valeur expérimentale de la conductivité thermique.

b) Détermination du coefficient de déperdition

Le coefficient de déperdition C caractérise les pertes de chaleur à travers les parois latérales des boîtes dues à la présence d'un gradient de température entre l'intérieur de celles-ci et l'ambiance extérieure. Théoriquement il est déterminé en utilisant les formules de Carslaw et Jaeger [36] qui permettent de déterminer les écoulements thermiques à travers un dièdre en régime permanent, et celles de Langmuir [37] donnant les valeurs du coefficient de forme pour un coin. Pour les boîtes avec le styrodur comme isolant et le contre-plaqué comme couverture externe, l'application numérique de ces formules [38], nous donne $C = 0.16 \text{ W/}^\circ\text{C}$.

La détermination expérimentale du coefficient de déperdition se fait soit en utilisant un échantillon en polystyrène dont la conductivité thermique est parfaitement connue, ou bien par emploi de deux régimes permanents pour deux flux différents du film chauffant, ce qui conduit à deux équations à deux inconnues (C et λ). L'utilisation de ces deux méthodes nous a conduit à un coefficient $C = 0.20 \text{ W/}^\circ\text{C}$ pour les deux boîtes, cette valeur a été par conséquent utilisée dans l'équation VIII et cela pour tous les essais que nous avons entrepris.

c) Calcul d'incertitudes

Une mesure en physique ne donne jamais un résultat infiniment précis, il y'a toujours une barre d'erreur sur la mesure effectuée, c'est-à-dire un intervalle de valeurs dans lequel le résultat se trouve. Dans notre travail, ces erreurs sont de deux types :

- **Erreurs systématiques**

Elles sont essentiellement dues aux fils de connexion reliés aux sondes ainsi qu'au vieillissement des sondes, ces erreurs ont pu être minimisées grâce à un étalonnage périodique. Pour leur détermination, une procédure simple qui consiste à coller toutes les sondes de surface sur une plaque de polystyrène, attendre que les températures se stabilisent puis noter pour chacune d'entre elles l'écart entre la valeur indiquée par celle-ci et celle prise en référence, (la sonde présentant la plus faible indication de température). On procède de manière similaire pour les sondes d'ambiance que l'on dispose à l'intérieur d'une même enceinte (l'ambiance), l'écart de chacune d'elles par rapport à l'indication la plus faible est enregistré. Les valeurs de températures prises en compte pour les calculs sont obtenues en soustrayant l'écart noté lors de l'étalonnage à la valeur indiquée pendant la mesure.

- **Erreurs accidentelles**

Elles sont surtout imputables aux phénomènes aléatoires tels que la fluctuation de la tension électrique du secteur ou la variation de la température de la salle dans laquelle les

mesures sont effectuées. Pour quantifier ces erreurs on peut utiliser la méthode des différentielles logarithmiques [39] qui permet de donner l'incertitude relative sur la conductivité thermique fournie par l'équation IV.9, en effet en passant par les logarithmes nous avons :

$$\ln \lambda = \ln e - \ln S - \ln(T_c - T_f) + \ln \left[\frac{V^2}{R} - C(T_b - T_a) \right] \quad (\text{IV.10})$$

En dérivant et en prenant en considération que R, C et S sont des valeurs supposées être constantes nous obtenons :

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{de}{e} - \frac{d(T_c - T_f)}{T_c - T_f} + \frac{\frac{2VdV}{R} - Cd(T_b - T_a)}{\left[\frac{V^2}{R} - C(T_b - T_a) \right]} \quad (\text{IV.11})$$

Le passage aux incertitudes correspond au passage à la plus grande valeur possible en valeur absolue de tous les coefficients multiplicatifs, soit :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta e}{e} - \frac{\Delta T_c - \Delta T_f}{|T_c - T_f|} + \frac{\frac{2V\Delta V}{R} - C\Delta(T_b - T_a)}{\left| \frac{V^2}{R} - C(T_b - T_a) \right|} \quad (\text{IV.12})$$

Avec:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad : \text{Moyenne des épaisseurs.}$$

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad : \text{Moyenne des températures.}$$

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad : \text{Moyenne des tensions.}$$

$$\Delta e = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta e_i}{n} \quad : \text{Moyenne des écarts moyens.}$$

$\Delta e_i = |e - e_i|$: Ecart moyen des épaisseurs

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i}{n}$$

$\Delta T_i = |T - T_i|$: Ecart moyen des températures.

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}{n}$$

$\Delta V_i = |V - V_i|$: Ecart moyen des tensions.

n : Nombre de mesures effectuées (pour l'épaisseur $n = 12$, pour les températures et les tensions $n = 6$).

IV.3- ELABORATION DES ECHANTILLONS

IV.3.1- Echantillons de plâtre

Dans le cadre de ce travail notre intérêt a porté sur l'étude d'ajouts naturels (paille, sciure de bois) à deux types de plâtres provenant de carrières différentes, celle d'Ouled Djellal et celle de Ghardaïa. Pour cela nous avons élaboré pour chaque type de plâtre deux séries d'échantillons avec plusieurs dosages en ajouts, en plus des échantillons avec du plâtre pur qui serviront surtout de témoin ou sujets de comparaison.

IV.3.1.1- Choix du taux de gâchage

La première étape dans l'élaboration des échantillons consiste à déterminer le taux de gâchage adéquat. Le choix du rapport e/p est primordial dans la mesure où il détermine, d'une part le comportement mécanique du plâtre pris, et d'autre part l'ouvrabilité de la pâte de plâtre en cours de prise.

Il est évident qu'un plâtre présentant des caractéristiques mécaniques trop faibles perd ses qualités d'élément porteur et ne peut donc répondre aux exigences imposées par les normes de sécurité dans la construction. Pour cette raison notre choix c'est porté sur le taux de gâchage qui permettra d'avoir les meilleures résistances mécaniques sachant que plus le rapport e/p est élevé, plus le plâtre durci obtenu présente des résistances faibles [5]. L'autre condition à considérer est l'ouvrabilité de la pâte en cours de prise. En effet il faut éviter

d'avoir une pâte de plâtre difficile ou impossible à travailler et n'épousant pas correctement la forme des moules. Dans ce cas, un taux de gâchage élevé assurera une bonne ouvrabilité. Pour pouvoir réunir ces deux conditions contradictoires, la méthode des essais et des erreurs est suivie, ainsi lors des essais de gâchage des rapports e/p très faibles sont utilisés au départ, puis augmentés graduellement en fonction de la consistance et de la fluidité de la pâte, jusqu'à une ouvrabilité optimale. Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux IV.1 et IV.2.

Taux de gâchage e/p	0.4	0.5	0.55	0.6	0.7
Observations	Très mauvaise ouvrabilité	mauvaise ouvrabilité	Peu ouvrable	Assez ouvrable	Trop fluide

Tableau IV.1- Essais de gâchage pour le plâtre d'Ouled Djellel

Taux de gâchage e/p	0.3	0.4	0.45	0.5	0.6
Observations	Très mauvaise ouvrabilité	mauvaise ouvrabilité	assez ouvrable	bonne ouvrabilité	Trop fluide

Tableau IV.2- Essais de gâchage pour le plâtre de Ghardaïa

A partir des tableaux IV.1 et IV.2, nous avons adopté les taux de gâchage suivants :

$e/p = 0.6$ pour le plâtre d'Ouled Djellel.

$e/p = 0.45$ pour le plâtre de Ghardaïa.

IV.3.1.2- Confection des échantillons

Une fois les taux de gâchage fixés, nous avons procédé à la confection des échantillons, des soins particuliers ont été pris lors de cette opération. Ainsi la paille a été coupée suivant des longueurs ne dépassant pas les 5cm, nous avons également tenu compte du fait que la sciure de bois tout autant que la paille est un matériau hydrophile qui, s'il été utilisé à l'état sec, il absorberait une grande quantité d'eau de gâchage qui de ce fait, ne participerait pas à hydrater le plâtre en poudre. Ainsi les ajouts sont préalablement trempés dans de l'eau longuement, jusqu'à ce qu'ils atteignent le degré de saturation. La différence de masse à l'état sec (m_{sec}) et après saturation (m_{sat}) correspondra donc à la masse d'eau absorbée par les ajouts (m_{abs}), qui sera ainsi retranchée de la masse d'eau nécessaire au gâchage (m_{eau}). La quantité d'eau ainsi déterminée est celle réellement utilisée pour le gâchage ($m_{réel}$). Les tableaux IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, présentent les formulations pour le plâtre d'Ouled Djellel avec les différents ajouts, alors que les tableaux IV.8, IV.9, IV.10 et IV.11, présentent celles pour le plâtre de Ghardaïa.

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 2% sciure bois	m_{sat} 2% sciure bois	m_{abs}	$m_{réel}$
0.6	4 kg	2400 g	80 g	350 g	270 g	2130 g

Tableau IV.3- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre d'Ouled Djellal à 2% de sciure de bois

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 4% sciure bois	m_{sat} 4% sciure bois	m_{abs}	$m_{réel}$
0.6	4 kg	2400 g	160 g	700 g	540 g	1830 g

Tableau IV.4- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre d'Ouled Djellal à 4% de sciure de bois

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 8% sciure bois	m_{sat} 8% sciure bois	m_{abs}	$m_{réel}$
0.6	3 kg	1800 g	240 g	1050 g	810 g	990 g

Tableau IV.5- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre d'Ouled Djellal à 8% de sciure de bois

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 2% paille	m_{sat} 2% paille	m_{abs}	$m_{réel}$
0.6	4 kg	2400 g	80 g	335 g	255 g	2145 g

Tableau IV.6- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre d'Ouled Djellal à 2% de paille

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 4% paille	m_{sat} 4% paille	m_{abs}	$m_{réel}$
0.6	4 kg	2400 g	160 g	670 g	510 g	1890 g

Tableau IV.7- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre d'Ouled Djellal à 4% de Paille

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 2% sciure bois	m_{sat} 2% sciure bois	m_{abs}	$m_{réel}$
0.45	4 kg	1800 g	80 g	360 g	280 g	1520 g

Tableau IV.8- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre de Ghardaïa à 2% de sciure de bois

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 4% sciure bois	m_{sat} 4% sciure bois	m_{abs}	$m_{réel}$
0.45	4 kg	1800 g	160 g	360 g	720 g	1240 g

Tableau IV.9- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre de Ghardaïa à 4% de sciure de bois

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 2% paille	m_{sat} 2% paille	m_{abs}	$m_{réel}$
0.45	4 kg	1800 g	80 g	347 g	267 g	1533 g

Tableau IV.10- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre de Ghardaïa à 2% de paille

e/p	m_{platre}	m_{eau}	m_{sec} 4% paille	m_{sat} 4% paille	m_{abs}	$m_{réel}$
0.45	4 kg	1800 g	160 g	725 g	565 g	1235 g

Tableau IV.11- Formulation pour l'échantillon à base de plâtre de Ghardaïa à 4% de paille

VI.3.2- Echantillons de bois

Des travaux menés par des chercheurs comme ceux de Ngohe-Ekam [9] ont montré l'influence du niveau de débitage de l'arbre et du plan de coupe principal sur les caractéristiques thermophysiques du bois. Ainsi la conductivité thermique de même que la diffusivité peuvent fortement varier suivant que l'on a un bois de bout (coupe transversale) ou un bois sur mailles (coupe radiale) ou bien du bois sur dosse (coupe tangentielle). En général, le bois conduit la chaleur environ 2.5 fois plus rapidement dans le sens axial (flux parallèle aux fibres) que dans les sens radial et tangentiel (flux perpendiculaire aux fibres).

Les échantillons que nous avons testés ont été débités suivant une coupe tangentielle, il s'agit de deux planchettes, l'une en bois de pin et l'autre en bois de sapin. Les dimensions choisies sont indiquées sur le tableau VI.12.

Il est à noter que certaines précautions ont été prises lors du choix des échantillons tel que l'absence de tout défaut et vice que peut présenter le bois, à savoir la présence de nœuds, trous, fentes, fractures, fibres ondulées, entrecorse, etc.

	SAPIN	PIN
Largeur (mm)	143	145
Longueur (mm)	244	244
Epaisseur (mm)	21	25

Tableau VI.12- Dimensions des échantillons de bois utilisés

V.1- PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Une attention particulière a été portée à l'effet de l'humidité sur la conductivité thermique puisque l'humidité est comme nous le montrerons dans ce qui suit, peut altérer considérablement les caractéristiques thermophysiques et mécaniques d'un matériau.

V.1.1- Essais thermiques

V.1.1.1- Effet de l'humidité sur la conductivité thermique

Les mesures de la conductivité thermique des échantillons élaborés à base de plâtre ainsi que ceux en bois à différentes teneurs en eau, montrent clairement l'influence de l'humidité sur le pouvoir isolant de ces deux matériaux. On remarque très nettement sur les figures V.1, V.2, V.3 et V.4, l'accroissement de la conductivité thermique λ avec l'augmentation de la teneur en eau ω . Ceci peut être expliqué aisément par le fait que l'eau qui possède une conductivité thermique (0,60 W/ m°C) supérieure à celle de l'air (0,026 W/m°C), remplace graduellement l'air dans les pores. Il en résulte un accroissement de la conductivité du matériau.

Les courbes obtenues sont semblables à celles existantes dans la littérature [5], [10], [40], [41].

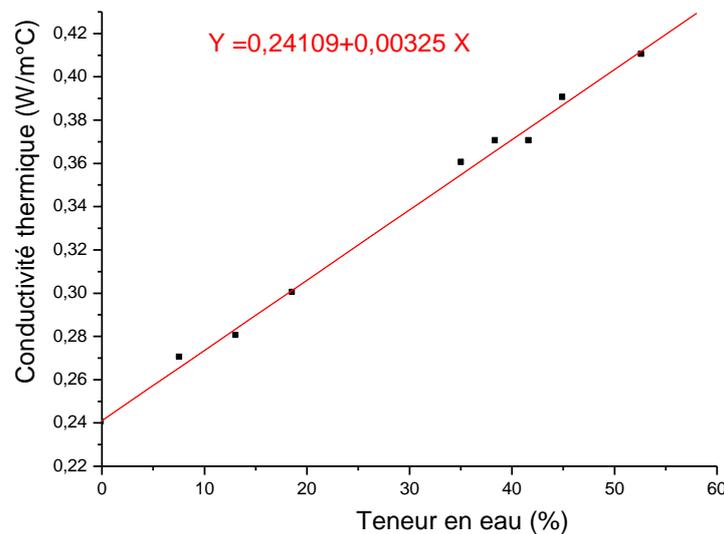


Figure V.1- Variation de la conductivité thermique du PIN en fonction de l'humidité

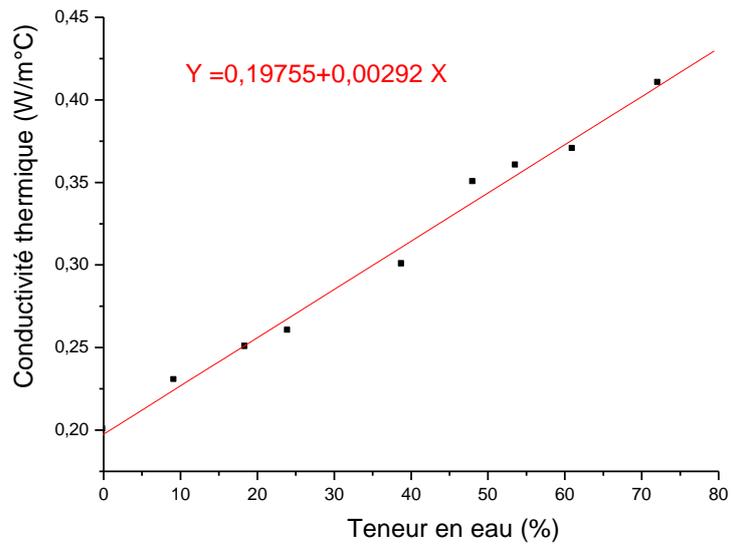


Figure V.2- Variation de la conductivité thermique du SAPIN en fonction de l'humidité

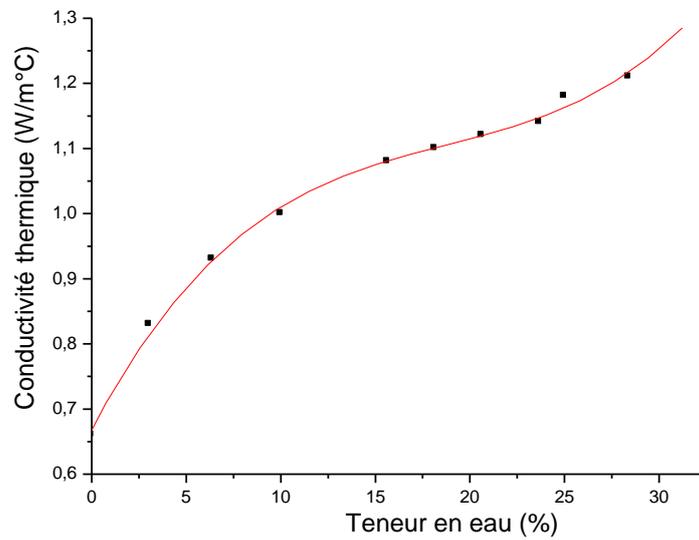


Figure V.3- Variation de la conductivité thermique du plâtre pur d'Ouled Djellal en fonction de l'humidité

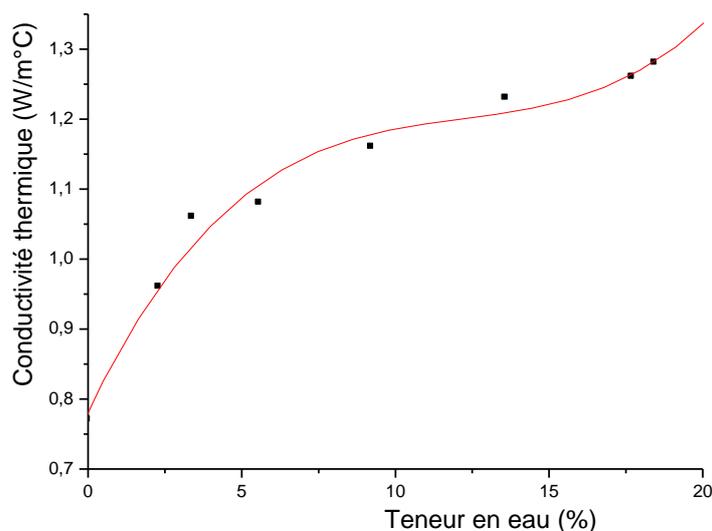


Figure V.4- Variation de la conductivité thermique du plâtre pur de Ghardaïa en fonction de l'humidité

V.1.1.2- Effet de différents ajouts sur la conductivité thermique

Nous avons essayé de mettre en évidence, d'une part l'effet du type d'ajout et d'autre part, la proportion de l'ajout utilisé sur la conductivité thermique. Deux types d'ajouts, paille et sciure de bois avec différentes proportions ont été utilisés.

◆ Ajout paille

Les courbes des figures, V.5, V.6, V.7, V.8, montrent clairement une nette régression de la conductivité thermique des échantillons plâtre avec ajout de paille par rapport à ceux confectionnés avec du plâtre pur. Cette diminution est d'autant plus importante que la proportion de l'ajout paille utilisée est élevée.

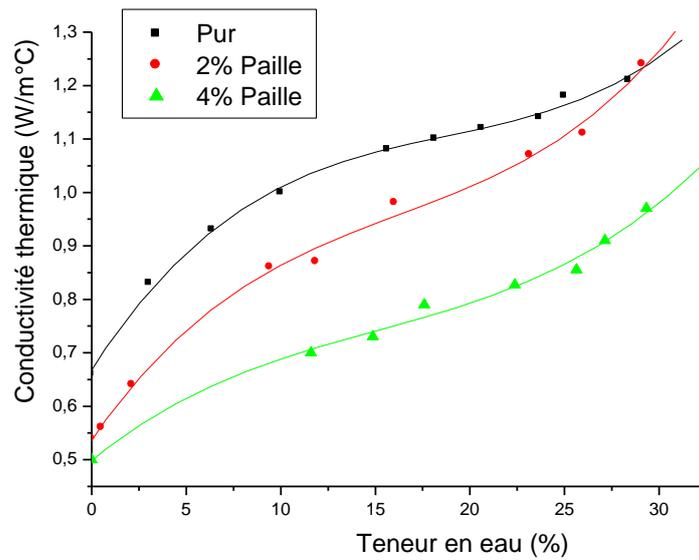


Figure V.5- Effet de l'ajout paille sur la conductivité thermique du plâtre d'Ouled Djellal

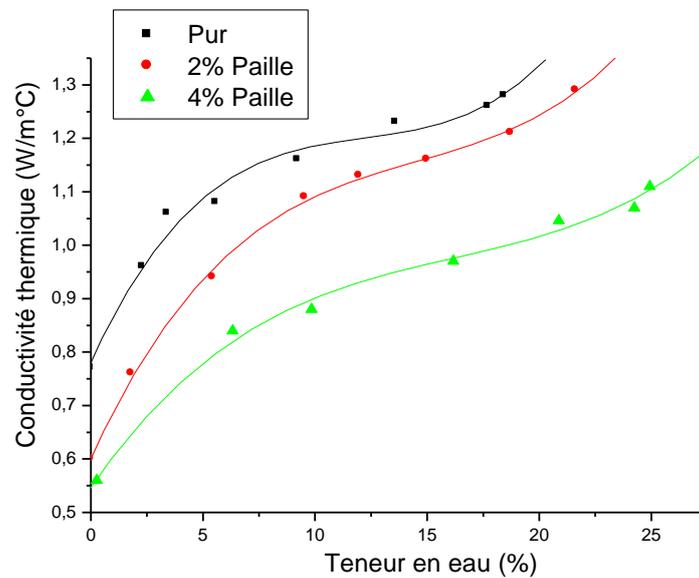


Figure V.6- Effet de l'ajout paille sur la conductivité thermique du plâtre de Ghardaïa

◆ **Ajout sciure de bois**

Il en est de même pour l'ajout en sciure de bois, l'effet sur la conductivité thermique est apparent bien que la régression soit manifestement moins

importante, en particulier pour le cas du plâtre d'Ouled Djellal, (figure V.7). En ce qui concerne le plâtre Ghardaïa, elle est beaucoup plus nette, (figure V.8).

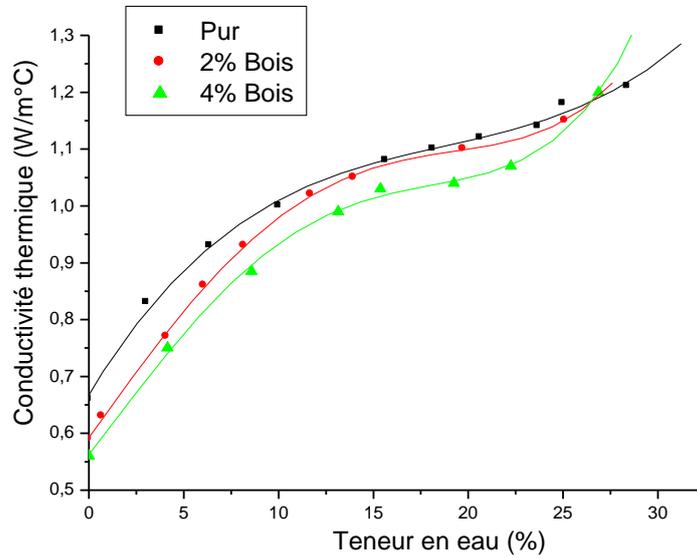


Figure V.7- Effet de l'ajout sciure de bois sur la conductivité thermique du plâtre d'Ouled Djellal

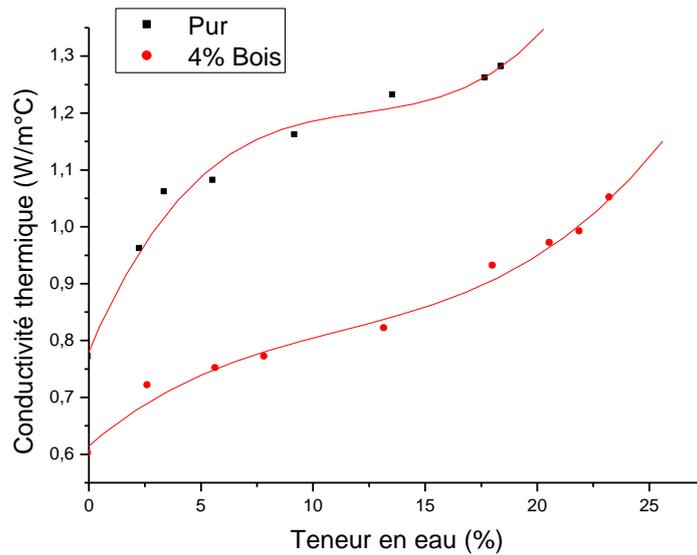


Figure V.8- Effet de l'ajout sciure de bois sur la conductivité thermique du plâtre de Ghardaïa

V.1.2- Essais mécaniques

Les matériaux de construction utilisés comme éléments porteurs sont appelés à supporter des charges. Les sollicitations mécaniques auxquelles ils sont sujets et dont il faut tenir compte sont essentiellement la compression et la flexion. Afin de s'assurer de la bonne tenue mécanique des matériaux utilisés, il est nécessaire d'effectuer des essais, il s'agit d'essais expérimentaux sur des machines spécifiques qui permettent de déterminer les limites mécaniques du matériau testé, c'est-à-dire les contraintes au-delà desquelles le matériau perd toute sa résistance ou son élasticité

Dans le cadre de notre travail nous avons entrepris des essais à la compression sur des presses hydraulique de capacité 2000KN. Les échantillons testés sont des éprouvettes de forme prismatique à section carré de (7×7) cm². La presse exerce une force d'écrasement que l'on augmente graduellement jusqu'à la rupture de l'éprouvette, on note alors la valeur de la charge maximale atteinte F, et la résistance à la compression est déterminée en faisant le rapport de la charge maximale par l'aire initiale de la section de l'éprouvette.

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (V.1)$$

Les résultats obtenus pour différents échantillons testés, plâtre pur, plâtre et ajouts, sont répertoriés dans les tableaux V.1 et V.2.

formulations	pur	2% bois	4% bois	8% bois	2% paille	4% paille
R_c (14eme jour) En MPa	8.77	8.16	8.12	6.8	6.12	5.25
R_c (21eme jour) En MPa	10	9.43	9.20	8.7	7.96	5.61

Tableau V.1 - Valeurs des résistances à la compression pour le plâtre d'Ouled Djellel

formulations	pur	2% bois	4% bois	2% paille	4% paille
R_c (14eme jour) En MPa	10	8.16	6.53	6.12	6.10
R_c (21eme jour) En MPa	12.65	12.24	11.57	9.18	7.14

Tableau V.2 - Valeurs des résistances à la compression pour le plâtre de Ghardaïa

V.2- ANALYSE DES RESULTATS

V.2.1- Résultats thermiques

V.2.1.1- Analyse des courbes obtenues pour le plâtre

Il est clair que toutes les courbes obtenues, (figures V.3, V.4, V.5, V.6, V.7, V.8) ne sont pas linéaires, l'analyse de leurs allures révèle en général trois zones plus ou moins distinctes :

- Zone à faible teneur en eau, variant de 0 à environ 10% de ω .

Les courbes présentent une forte pente, la conductivité thermique dans cet intervalle croit rapidement en fonction de la teneur en eau.

- Zone à moyenne et forte teneur en eau, elle débute en général au-delà de 10% de ω jusqu'à 20 à 25% suivant les cas.

L'accroissement de la conductivité thermique devient dans cette zone moins important.

- Zone à très forte teneur en eau, s'approchant de la saturation ($\omega > 25\%$)

Les courbes reprennent une forte pente due à un accroissement rapide de la conductivité thermique.

La présence de ces trois zones peut s'expliquer par les phénomènes suivants, [17], [42] :

- la zone à faible teneur en eau correspond à ce qu'on appelle en milieu poreux, le domaine pendulaire (figure V.9 .a), dans ce cas la phase gazeuse est continue et occupe un espace nettement supérieur à celui de la phase liquide discontinue. Autour des points de contact, entre les grains formant le matériau, des ménisques liquides se

forment reliant les grains, ce qui a pour effet de créer un pont thermique qui peut être considéré comme une des causes de l'accroissement brutal de la conductivité thermique apparente du plâtre. D'autre part dans le domaine pendulaire, un transfert de masse se fait par changement de phase (phénomène d'évapo-condensation), dû à l'existence d'un gradient de pression partielle qui conduit à une diffusion de vapeur entraînant un accroissement du transfert de chaleur et par conséquent de la conductivité thermique.

- Zone à moyenne teneur en eau, cette zone correspond au domaine funiculaire, (figure V.9.b), pour lequel la phase liquide est continue et la phase gazeuse se trouve sous forme de bulles occluses. En effet, en augmentant l'humidité du matériau, la surface mouillée s'élargit autour des points de contact des grains favorisant moins le transfert de chaleur par conduction, de plus dans ce domaine, les transferts de masse par changement de phase ne s'opèrent plus et l'accroissement du transfert de chaleur dû à la contribution de la chaleur latente de vaporisation n'est plus possible, ce qui a pour effet une augmentation moins importante de la conductivité thermique pour les moyennes teneurs en eau.
- Zone à forte teneur en eau.
Ce qui correspond à l'état de saturation, (figure V.9.c), pour lequel il y a formation de chemins continus de liquide, entraînant une augmentation de nouveau rapide de la conductivité thermique.

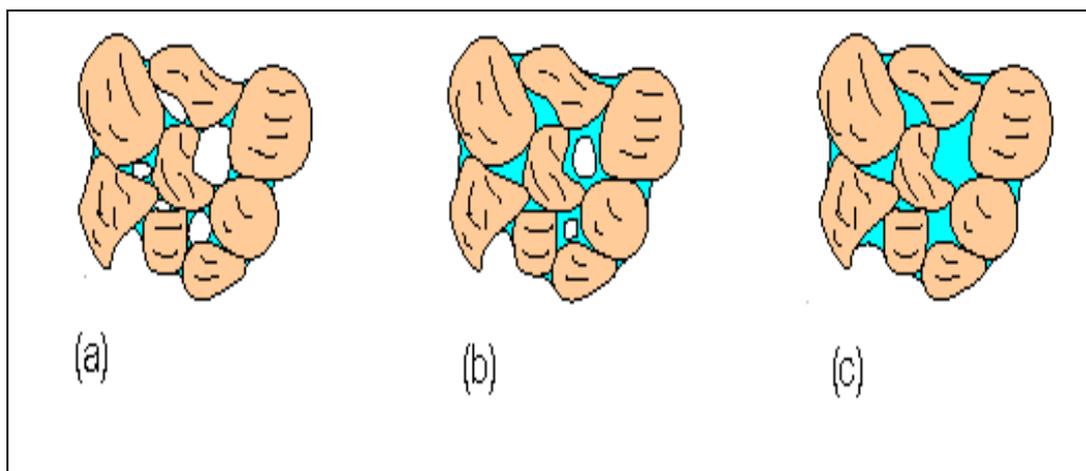


Figure V.9- Représentation schématique des états hydriques d'un matériau poreux

V.2.1.2- Analyse des courbes obtenues pour le bois

Les courbes obtenues (figures V.1 et V.2) montrent une variation linéaire de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.

◆ Pour le Pin.

L'étude statistique montre que l'équation $\lambda = A + B\omega$ pour le Pin, décrit correctement cette variation, du fait qu'elle présente le plus grand coefficient de corrélation (99,77%), les paramètres A et B ont les valeurs suivantes:

$$A = 0,24109 \text{ et } B = 0,00325$$

◆ Pour le Sapin:

De même pour le Sapin, l'équation est de la même forme $\lambda = C + D\omega$ avec un coefficient de corrélation égal à 99,77% avec $C = 0,19755$ et $D = 0,00292$

L'analyse de ces courbes permet d'aboutir à deux conclusions très importantes:

- le Sapin est un matériau plus isolant que le Pin.
- l'influence de l'humidité sur la conductivité thermique du Sapin est moindre que celle du Pin. En effet les pentes des courbes (les coefficients B pour le Pin et D pour le Sapin), témoignent bien de ce fait.

Il est à noter que ces résultats ont été obtenus à température moyenne voisine de 15°C. En effet, il faut savoir que l'humidité n'influe pas à elle seule sur la valeur de la conductivité thermique, la température a, également un effet non négligeable bien que moins important que l'humidité. Les courbes illustrant la variation de λ en fonction de la température pour une teneur en eau donnée fixe, sont des droites, en général de faible pente [10].

V.2.2- Analyse des résultats thermo-mécaniques

Un des principaux objectifs de ce travail expérimental était de recueillir les informations nécessaires qui permettraient de connaître l'influence des ajouts paille et sciure de bois sur les caractéristiques thermophysiques et les résistances mécaniques, du plâtre. Les essais à la compression ont été effectués en parallèle avec les mesures de la conductivité thermique des différents échantillons élaborés en ajoutant au plâtre pur lors de son gâchage, des éléments naturels. Les résultats obtenus sont consignés sur les tableaux V.3 et V.4.

	Pur		2% Paille		4%Paille		2% Bois		4% Bois		8% Bois	
λ_{sec} (W/m°C)	0,66		0,54		0,50		0,59		0,56		0,46	
R_c (MPa)	14eme jour	21eme jour										
	8,77	10	6,12	7,96	5,25	5,61	8,16	9,43	8,12	9,20	6,80	8,70

Tableau V.3-Résultats thermo-mécaniques pour le plâtre d'Ouled Djellel

	Pur		2% Paille		4%Paille		2% Bois		4% Bois	
λ_{sec} (W/m°C)	0,77		0,59		0,56		N'a pas été effectuée		0,60	
R_c (MPa)	14eme jour	21eme jour	14eme jour	21eme jour	14eme jour	21eme jour	14eme jour	21eme jour	14eme jour	21eme jour
	10	12,65	6,12	9,18	6,12	7,14	8,16	12,24	6,53	12,00

Tableau V.4-Résultats thermo-mécaniques pour le plâtre de Ghardaïa

L'ajout d'éléments de faible densité au plâtre permet de l'alléger, c'est-à-dire de diminuer sa masse volumique, ce qui a pour effet d'abaisser sa conductivité thermique. Cependant un plâtre léger devient moins résistant, en somme un gain des performances thermophysiques ne peut se faire qu'au détriment des résistances mécaniques. Or dans la construction il serait idéal d'utiliser des matériaux ayant des qualités d'isolation thermique les plus performantes, mais en même temps, des résistances mécaniques surtout de compression les plus élevées. Réunir deux conditions aussi disparates, semble délicat. Il faut donc déterminer un compromis entre ces deux exigences, c'est-à-dire une formulation optimale qui assurera simultanément le plus grand recul de la conductivité thermique possible avec le plus petit affaiblissement des résistances à la compression qu'on puisse obtenir.

Pour ce faire, une analyse rigoureuse des résultats thermiques et mécaniques nous a permis de déduire ce qui suit :

- 1) Dans le cas du plâtre d'Ouled Djellal, les formulations à 2% et à 4% de paille ont permis respectivement une baisse de la conductivité thermique de 18,18% et de 24,24% par rapport à celle d'un échantillon témoin en plâtre pur. Comparativement aux formulations avec sciure de bois à dosage équivalent, on remarque une baisse de la conductivité thermique de 10,6% pour la formulation à 2% et une baisse de 15,15% pour celle à 4%. On peut dire à priori que la paille est un moyen plus efficace à renforcer les qualités isolantes du plâtre que la sciure de bois. Néanmoins en se référant aux valeurs des résistances à la compression, on remarque que l'ajout de paille au plâtre a considérablement atténué la capacité de celui-ci à résister aux sollicitations mécaniques, en effet une chute de 20,4% de la résistance à la compression R_c par rapport à celle d'un échantillon témoin en plâtre pur (essai du 21eme jour) est observée pour la formulation à 2% de paille et de 43,9% pour la formulation à 4% de paille, en contre partie pour le plâtre avec ajout de sciure de bois, la chute n'est que de 5,7% pour la formulation à 2% et 8% pour la formulation à 4% de bois. En ce qui concerne la formulation à 8% de sciure de bois, on peut constater que les qualités d'isolation de l'échantillon se sont nettement améliorées sans pour autant que ses pouvoirs résistants à la compression ne soit trop endommagé. En effet, R_c n'a reculé que de 13%, alors que λ s'est vu diminué de plus de 30% ce qui est très appréciable.

Cette statistique conduit à deux importantes observations à savoir :

- a) La première, est que la formulation à 4% de paille ne peut être retenue, vu la dégradation conséquente de la résistance à la compression qu'elle présente (dégradation presque de la moitié), d'autre part, la formulation à 2% de paille peut être considérée comme la limite du dosage en paille, puisque au-delà, le plâtre devient peu résistant
 - b) La formulation en sciure de bois par contre présente une diminution relativement faible de la résistance à la compression avec une baisse très intéressante de la conductivité thermique, notamment pour des valeurs de dosage élevées.
- 2) Afin de pouvoir mettre en évidence la prévalence de la solution ajout sciure de bois sur celle d'ajout paille et ceci pour le plâtre d'Ouled Djellel, nous avons tracé sur un même graphe, les courbes donnant la variation de la conductivité thermique apparente en fonction de

la résistance à la compression pour chaque type d'ajout. Les résultats obtenus sont donnés par la figure V.10. Vu que la meilleure solution est celle qui présenterait une faible variation de la résistance à la compression R_c pour une grande diminution de la conductivité thermique λ , il va sans dire que les courbes idéales seraient celles qui présenteraient les pentes les plus fortes. Dans notre cas la différence entre les pentes des deux courbes (en faveur de la courbe correspondant au dosage en sciure de bois) est très nette.

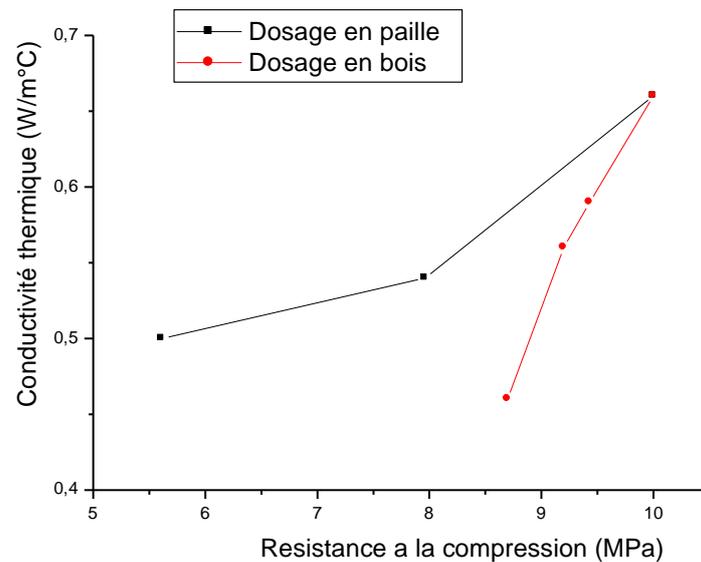


Figure V.10-Conductivité thermique apparente en fonction de la résistance à la compression pour les deux types d'ajout testés

3) Dans le cas du plâtre de Ghardaïa, des constatations similaires peuvent être faites, de plus on peut remarquer que la formulation à 2% de paille et celle à 4% de sciure de bois, donnent pratiquement une même valeur de la conductivité thermique avec la différence que la formulation à 4% de sciure de bois, ne provoque qu'un affaiblissement de 8,53% de la résistance à la compression (par rapport à un échantillon témoin en plâtre pur), alors que l'affaiblissement est de 27,43% pour la formulation à 2% de paille. On en conclut que l'utilisation de la sciure de bois comme ajout au plâtre de Ghardaïa paraît une solution beaucoup plus avantageuse et peut donc être retenue avec une recommandation, d'augmenter d'avantage le dosage en sciure de bois aux environs de 6% à 8% (voir même plus).

4) Le plâtre pur d'Ouled Djellal présente une plus faible conductivité thermique que le plâtre Ghardaïa (mesuré à l'état sec). Une comparaison des courbes obtenues pour les deux plâtres, à l'état pur (figure V.11), avec ajout de 2 % de paille (figure V.12), et de 4 % de paille (figure V.13), permet d'apprécier l'écart entre les conductivités thermiques. Il est important de noter ici que cette différence est d'autant plus grande que la teneur en eau de ces matériaux est élevée. Cependant en se référant aux résultats des tests mécaniques, on remarque que les échantillons en plâtre d'Ouled Djellal aussi bien pur que ceux additionnés de paille ou de sciure de bois, sont moins résistants que ceux en plâtre de Ghardaïa. Cela peut s'expliquer par les taux de gâchage différents utilisés pour élaborer les échantillons. Il a été noté dans de nombreux travaux sur le plâtre [5], [3], que la conductivité thermique et les résistances mécaniques, varient tous deux en sens inverse avec le rapport de gâchage utilisé.

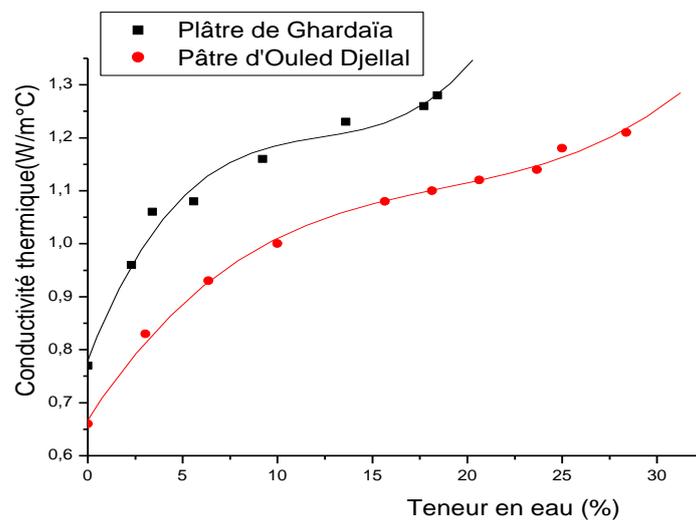


Figure V.11- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité des plâtres purs de Ghardaïa et d'Ouled Djellel

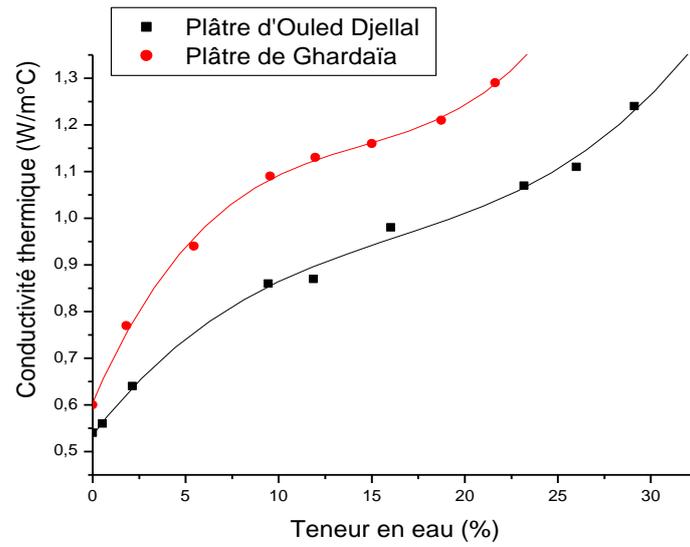


Figure V.12- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité des plâtres de Ghardaïa et d'Ouled Djellal avec ajout de 2% de paille

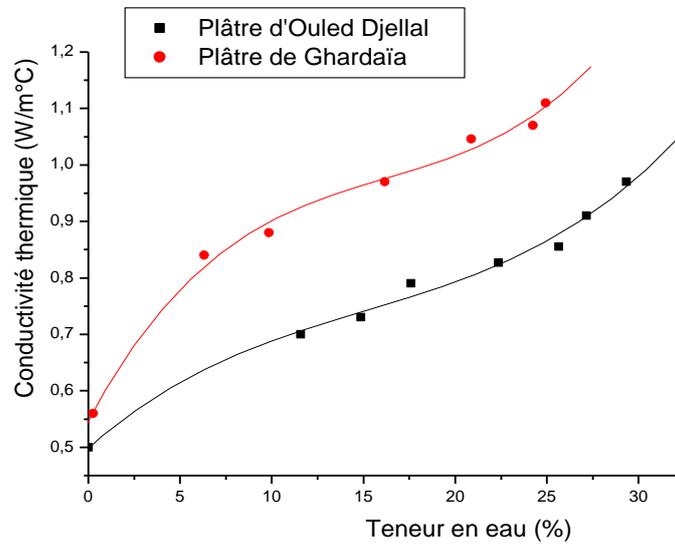


Figure V.13- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité des plâtres de Ghardaïa et d'Ouled Djellal avec ajout de 4% de paille

Conclusion

L'étude que nous avons menée, visait essentiellement à améliorer les caractéristiques thermophysiques du matériau plâtre en lui additionnant des ajouts naturels de paille ou de sciure de bois. Nous nous sommes alors attachés à rechercher les formulations les plus optimales qui permettraient d'obtenir un matériau qui satisfait au mieux aux conditions thermomécaniques, auxquelles doit répondre un matériau de construction performant.

En outre, nous avons cherché à mettre en évidence l'effet de l'humidité sur la conductivité thermique du plâtre et du bois, matériau également utilisé en construction. A cet effet, les résultats ont montré une variation linéaire de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour les deux essences de bois choisies, le Pin et le Sapin. Cependant pour le plâtre, la variation est décrite suivant des courbes non linéaires mais dont l'allure est typiquement la même pour toutes les formulations testées. Pour tous les matériaux nous avons constaté qu'en régime permanent, l'humidité modifie considérablement les propriétés thermiques. La présence d'eau même en faible quantité diminue très notablement le pouvoir isolant des matériaux poreux.

L'étude thermique du matériau bois nous a permis de déduire que le Sapin est meilleur isolant que le Pin, et il est thermiquement moins influencé par l'humidité.

L'étude thermomécanique du plâtre allégé avec de la paille et celui allégé avec de la sciure de bois a conduit aux observations suivantes :

- Le plâtre d'Ouled Djellal se prête au gâchage avec un rapport supérieur à celui du plâtre de Ghardaïa, ce qui lui confère de meilleures performances thermiques mais qui le rend d'un autre côté moins résistant.
- L'ajout de paille ou de sciure de bois au plâtre, aussi bien celui de Ghardaïa que celui d'Ouled Djellal, permet d'améliorer nettement ses qualités d'isolation. Cependant on observe une chute des résistances mécaniques qui ne cesse de s'accroître au fur et à mesure que le dosage en ajout est augmenté.
- La formulation avec sciure de bois est la plus apte à être retenue, et cela pour les deux types de plâtre étudiés

Les perspectives envisageables et pouvant donner suite à ce travail sont :

- L'étude de l'effet de l'ajout de sciure de bois à dosage plus élevé (au-delà de 8%) sur le comportement thermomécanique du plâtre.

- L'étude de l'influence de la sciure de bois sur le pouvoir de captation ou de libération de l'humidité du plâtre par le phénomène d'absorption capillaire et adsorption (étude des isothermes d'adsorption), ainsi que sur ses capacités d'isolation phonique susceptibles d'être améliorées, ce qui permettrait de juger de sa qualité, et ainsi de valider son application comme enduit et revêtement interne aux murs des habitations.
- L'étude thermomécanique de mortier de plâtre avec ajout en sciure de bois ou en paille.

Références bibliographiques

- [1] **JAFFEL, H.** Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution: cas du plâtre ; thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, France (2006).
- [2] **Festa, J.** Techniques et pratique du plâtre, Edition Eyrolles, 2eme édition. (1998).
- [3] **SATTLER, H ; BRUCKNER, H.** Changes in volume and density during the hydration of gypsum binders as a fonction of quantity available. ZKG International. (2001).
- [4] **CHAKER, A.** Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud ; thèse de doctorat d'état, Université de Constantine. (1999).
- [5] **MEILLE, S.** Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure ; thèse de doctorat de l'INSA, Lyon. (2001).
- [6] **GIANA, A.** Influence de la structure du bois sur ses propretés physico-mécaniques a des teneurs en humidité élevées ; thèse de doctorat, Université Laval, Québec. (2006).
- [7] **SIAU, J.F.** Influence of moisture on physical properties, Virginia polytechnic Institute and state University. VA. (1995).
- [8] **PONTIN, M.G.** Propriétés physico-mécaniques de trois bois tropicaux au dessous et au dessus de la saturation des membranes ; thèse de doctorat, Université Laval, Québec. (2005).
- [9] **NGOHE-EICAM, P.** Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des bois tropicaux ; thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon. (1992).
- [10] **ANDRIAMANANTSILAVO, N.** Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation ; thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud. (2003).
- [11] **SANCHEZ- PALENCIA, E.** Non homogeneous media and vibration theory, lecture notes in physics, 127, Spinger, Berlin, PP 398. (1980).
- [12] **QUINLARD, M ; WHITAKER, S.** Transport in ordered and disordered porous media : Volume averaged equation, closure problems and comparisons with experiments, Chem Eng Sci. 48, PP. 2537-2564. (1993).
- [13] **CARMAN, P.C.** Fluid flow through granular beds. Transactions, Institution of chemical engineers, Vol. 15, PP. 150-166. (1937).
- [14] **CHILINGAR, G.V, MAIN, R et SINNOKROT, A.** Relationship between porosity and surface area of sediments. Journal of Sedimentary Petrology. Vol. 33. PP. 759-765. (1963).

- [15] **BARKA, N.** L'élimination des colorants de synthèse par adsorption sur un phosphate naturel et par dégradation photocatalytique ; thèse de doctorat, Faculté des sciences, Agadir, Maroc. (2008).
- [16] **SALAGER, S.** Influence de la température sur le comportement hydrique de milieux poreux partiellement saturés, XXIVème rencontres universitaires de génie civil, Université de Montpellier. (2006).
- [17] **BOSSART, L.** contribution à l'optimisation du séchage en lit fluidisé ; thèse de doctorat, Université de Bruxelles. (2006).
- [18] **AGHFIR, M ; KOUHILA, M ; JAMALI, A, IDLIMAM, A ; LAMHARRAR, A ; RHAZI, M.** Isotherme d'adsorption-désorption des feuilles de romarin, 12eme Journées Internationales de Thermique, Maroc. (2005).
- [19] **KOUHILA, M ; BELGHIT, A ; DAGUENET, M.** Approche expérimentale des courbes de désorption de la menthe en vue d'un séchage par énergie solaire, Rev Energ Ren. Vol. 2. (1999).
- [20] **RENARD, F.** Transport polyphasique réactif en milieu poreux, master professionnel, Observatoire des sciences de l'université de Grenoble. (2007).
- [21] **KRISCHER, D.** Uber die Bestimmung de's diffusions niderstands der kapillaren flussigkeits leitzahl aus stationaren und instationaren vorgangen, VDI. Forschungshf. P. 473. (1959).
- [22] **DEVRIES, D.A ; PHILIP, J.** Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans Am Geophys. Union. 38. PP. 222-232. (1957).
- [23] **LUIKOV, A.V.** Heat and mass transfert in capillary porous bodies, Pergamon Press. (1966).
- [24] **CRAUSS, P ; BACON, G ; BORIES, S.** Etude fondamentale des transferts chaleurs-masse en milieu poreux, Int. J. Heat Masse Transfer, 24 N°6. PP. 991-1004. (1981).
- [25] **NUZILLARD, J.M.** Introduction a la résonance magnétique nucléaire des liquides. (2006).
- [26] **LEENDERT, P.** Moisture transport in porous building materials ; thèse de doctorat, Hollande. (1995).
- [27] **DOBMAN, G ; KROENING, M ; SURKOWA, N ; VONBERNUS, L ; WOLTER, B.** The potential of nuclear magnetic resonance (NMR) to non-destructively characterize early-age concrete by an one-sided access (OSA) technique. National Seminar of ISNT chennai, Germany. (2002).

- [28] **MARTEN, J.** Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels ; thèse de doctorat. (1997).
- [29] **DESCAMP, F.** Moisture content measurement using gamma ray attenuation. Research report, laboratorium, Boumw fysica, Katholiekeuniversitet. Leuven. (1990).
- [30] **KUMARAN, M.K ; BOMBERG, M.** A gamma spectrometer for determination of density distribution and moisture distribution in building materials, Proceeding of the International Symposium on moisture and humidity, Washington DC. P. 485. (1985).
- [31] **HAMDAOUI, M ; FAYALA, F ; PERRE, P ; BENNASRALLAH, S.** Experimental study of capillary rise in fabrics using an electrical resistance technique, Autex Research Journal. Vol 8. N°2. (2008).
- [32] **KOUCHADE, A.** Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse a partir de la mesure électrique en régime transitoire ; thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie rural des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy. (2004).
- [33] **EL BAKKOURI, A.** Caractérisation hygroscopique, thermique et mécanique des matériaux allégés ; thèse de doctorat en sciences, Université Abdelmalek Essaadi, Maroc. (2004).
- [34] **SACADURA, J.F.** Initiation aux transferts thermiques, Techniques et documentations, Paris. (1979).
- [35] **CARSLAW, H.S ; JAEGER, J.C.** Conduction of heat in solides, second edition, Oxford University, Press, London. (1973).
- [36] **LANGMUIR, I ; ADAMS, E.G ; MEIKEL, F.S.** Flow of heat through furnace walls. Trans Ame Electro-chem Soc. Vol 24. PP. 53-61. (1913).
- [37] **MOURTADA, A.** Comportement thermique des mortiers d'isolation extérieur du bâtiment ; thèse doctorat d'ingénieur, Université Claude Bernard, Lyon. (1982).
- [38] **BOURDILLON, C.** Notion de base sur les incertitudes et le traitement des données expérimentales en physique, chimie et biologie. (2001).
- [39] **EL BAKKOURI, A.** Caractérisation hygroscopique, thermique et mécanique des matériaux allégés : cas du béton allégé avec du liège ou avec des grignons d'olive ; thèse de doctorat, Faculté des Sciences Tétouan, Maroc. (2004).
- [40] **KHAB, H.** Etude du comportement hygrothermique d'éléments de construction : Application aux toitures ; thèse de magister, Université de Constantine. (2007).
- [41] **SOULIE, F.** Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires ; thèse de doctorat, Université Montpellier II. (2005).

تأثير الرطوبة على الخواص الحرارية والميكانيكية لمواد مستعملة في البناء

ملخص

يهدف هذا العمل أساساً إلى تبيان أهمية استعمال الإضافات الطبيعية لتطوير مواد البناء. نركز اهتمامنا بالخصوص على آثار إضافة نشارة الخشب والتبن على الخواص الحرارية والميكانيكية لمادة الجبس. الطرق التجريبية المستعملة لهذا الغرض هي طريقة "العلب" وهذا لقياس الناقلية الحرارية في حين تم تحديد الإجهادات الميكانيكية عن طريق تجربة الضغط. توضح النتائج المتحصل عليها بأن وجود الماء داخل المواد المسامية يقلل بشكل ملحوظ من خواصها العازلة، من ناحية أخرى فإن التحليل الميكانيكي الحراري سمح لنا بإبراز صلاحية حل زيادة نشارة الخشب على حل زيادة التبن. التجارب التي أنجزت على عينات من نوعين من الخشب المستعمل في مجال البناء، بينت بأن خشب التنوب هو عازل حراري أحسن من خشب الصنوبر، كما أنه أقل تأثراً بالرطوبة.

الكلمات الدالة:

وسط مسامي - ناقلية - جبس - خشب - رطوبة - مقاومة ميكانيكية.

Effect of the moisture on the thermophysical and mechanical properties of materials used in construction

Abstract

This work aims mainly to show only the use of additions such plant may offer new opportunities for the development of bulding materials. Our interest has focused particularly on the effect sawdust wood and straw on the thermophysical and mechanical properties of plaster. The experimental methods used for this purpose are the « boxes method", used especially for measuring the thermal conductivity. The mechanical limits were determined by compression tests.

The results obtained allowed us at the first place to conclude that the presence of water in porous materials decreases their insulating capacity appreciably. The thermo-mechanical analysis conducted gave us the possibility to highlight the prevalence of the solution adding sawdust on the addition of straw.

The tests carried out on samples of two species of wood used in construction, have proved that the Fir Tree is better insulator than Pine, moreover it is thermically less influenced by moisture.

Key words : porous materials- conductivity- plaster- wood- mechanical resistances

EFFET DE L'HUMIDITE SUR LES CARACTERISTIQUES THERMIQUES ET MECANIQUES DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Résumé

Le présent travail vise essentiellement à montrer que l'emploi d'ajouts de nature végétale peut offrir de nouvelles possibilités de développement des matériaux de construction. Notre intérêt a porté particulièrement sur l'effet d'ajouts sciure de bois et paille sur les propriétés thermophysiques et mécaniques du matériau plâtre. La méthode expérimentale utilisée à cet effet est la méthode "des boîtes", employée surtout pour mesurer la conductivité thermique. Les limites mécaniques ont été déterminées par des essais de compression.

Les résultats obtenus nous ont permis en premier lieu de conclure que, la présence d'eau dans les matériaux poreux diminue sensiblement leur pouvoir isolant. En outre, l'analyse thermo-mécanique effectuée nous a donné la possibilité de mettre en évidence la prévalence de la solution ajout sciure de bois sur celle d'ajout paille. Les essais menés sur des échantillons de deux essences de bois utilisés en construction ont révélés que le Sapin est meilleur isolant que le Pin, de plus ce dernier est thermiquement moins influencé par l'humidité.

Mots clés : matériaux poreux- conductivité- plâtre- bois- humidité-
résistances mécaniques