

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

PAIX-TRAVAIL-PATRIE

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE
PHYSIQUES ET APPLICATIONS

E-mail : enquiries@uylecoledoc.com

Site web : www.uylresarchstg.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

PEACE-WORK-FATHERLAND

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCES

DEPARTMENT OF PHYSICS

DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR
PHYSICS AND APPLICATIONS

E-mail : enquiries@uylecoledoc.com

Site web : www.uylresarchstg.cm

LABORATOIRE D'ENERGIE, DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUE
ENERGY LABORATORY, ELECTRICALS AND ELECTRONICS SYSTEMS

**SIMULATION NUMERIQUE DU TRANSFERT COUPLE CHALEUR-
HUMIDITE DANS UN MILIEU POREUX APPLICATION A LA
CARACTERISATION THERMIQUE DES BOIS TROPICAUX**

**Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master of
Science en Physique**

Spécialité : Energie des Systèmes Électriques et Électroniques

Option : Energie et Environnement

Présenté par :

MOGOU NCHIFOR RICHARD

Matricule 12U0485

Licencié en physique



Sous la direction de :

Du Professeur NGONO MVONDO Rachel Raïssa

Année académique 2022

DEDICACE

Je dédie ce mémoire : À l'Eternel, Dieu Tout Puissant qui m'a assisté tout au long de cette formation et pour chaque souffle de vie qu'il me donne.

À ma mère MATCHE Rosalie, mon père PUIS Nchifor. Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire ne serait une réalité sans la contribution de certaines personnes à qui j'exprime toute ma reconnaissance.

Je tiens ainsi à adresser tous mes remerciements à mon encadreur de mémoire, le Professeur NGONO MVONDO Rachel Raïssa, pour son attention particulière accordée à la réalisation de ce travail.

J'exprime également mes plus vives reconnaissances au Docteur BOBDA Francklin pour ses multiples conseils durant toute la période de réalisation de ce mémoire malgré ses multiples occupations.

J'adresse toute ma gratitude à tous les responsables et enseignants de la formation doctorale Sciences Technologie ET Géoscience et plus particulièrement à ceux du Laboratoire d'énergie, et d'environnement , pour leurs précieux enseignements et conseils.

Je remercie le Professeur Meukam Pierre, pour nous avoir tendu la main au moment où nous étions en difficulté dans la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également le Professeur Elie SIMO responsable de Laboratoire d'énergie et d'environnement. Je saisis cette occasion pour exprimer toute ma considération à Ma mère MAKOUGANG Grace à mes frères, FOHA Stephen, DZEKUI Michèle, TEMB Abigael, NGADJOU Nchifor, TCHINDA Conscience, TCHUTCHOUA Jacques, pour leur infinie patience et, surtout, pour le bonheur qu'ils apportent à ma vie. J'exprime mes profondes gratitude à tous mes frères pour leurs soutiens moraux et matériels dans ma réussite de tous les jours. Je voudrais exprimer ici toute ma reconnaissance à tous mes collègues chercheurs qui, sous une forme ou une autre, m'ont aidé tout au long de ce travail. J'associe enfin à mes remerciements, tous ceux qui de près ou de loin, moralement et ou matériellement ont contribué à mon évolution jusqu'à ce stade.

SOMMAIRE

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
RESUME.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BOIS	1
I.1.1. L'échelle macroscopique	2
I.1.1.1. La décomposition d'un tronc	2
I.1.1.2. Plans d'orthotropie et plans ligneux	4
I.1.2. L'échelle microscopique	4
I.1.2.1. Constitution chimique	5
I.1.2.2. Parois cellulaires	5
I.1.2.2.1. Les résineux	5
I.1.2.2.2. Les feuillus	6
I.1.3. Echelle de la Paroi cellulaire.....	7
I.1.2. Propriété thermique et hydrique du bois	8
I.1.2.1. Propriétés thermiques.....	8
I.1.2.1.1. Conductivité thermique.....	8
I.1.2.1.2. Capacité thermique	9
I.1.2.2. Propriété hydrique.....	10
I.1.2.2.1. Teneur en eau	10
I.1.2.2.2. Point de saturation des fibres (PSF)	11
I.1.2.2.3. Teneur en eau à l'équilibre : Isothermes de désorption du bois.....	11
CHAPITRE II : METROLOGIE THERMIQUE ET MODELES DE TRANSFERTS	
COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE	13
II.1. Généralités	14
II.1.1. Méthode du fil chaud.....	18
II.1.1.1. Principe de la méthode :	18
II.1.1.2. Mesure de la conductivité thermique.....	18

II.1.1.3. Estimation de la conductivité thermique	19
II.1.1.4. Avantage et inconvénients	19
II.1.1.5. Etat de l'art	20
II.1.2. Méthode du ruban chaud	20
II.1.2.1. Principe de la méthode :	20
II.1.2.2. Estimation de la conductivité thermique	21
II.1.2.3. Avantage et inconvénients	21
II.1.2.4. Etat de l'art	21
II.1.3. Méthode du « Hot Disc ».....	22
II.1.3.1. Principe de la méthode :	22
II.1.3.2. Estimation de la conductivité thermique	22
II.1.3.3. Avantage et inconvénients	23
II.1.3.4. Etat de l'art	23
II.1.4. Méthode du plan chaud.....	23
II.1.4.1. Principe de la méthode :	23
II.1.4.2. Estimation des propriétés thermo-physiques	25
II.1.4.3. Avantage et inconvénients	27
II.1.4.4. Etat de l'art	27
II.1.5. Méthode du tri-couche.....	28
II.1.5.1. Principe de la méthode :	28
II.1.6. Méthode du tri-couche plan.....	28
II.1.7. Méthode du tri-couche cylindre.....	29
II.1.7.1. Estimation des propriétés thermo-physiques.	30
II.1.7.2. Avantage et inconvénients	30
II.1.7.3. Etat de l'art	31
II.1.8. Choix de la méthode de caractérisation :.....	31
II.2. Modèles de transferts couplés.....	32
II.2.1. Théorie de Krischer	32
II.2.2. Modèle de Philip et De Vries (1957)	33
II.2.3. Modèle de Luikov.....	33
CHAPITRE III : MODELISATION DE TRANSFERT COUPLE CHALEUR-HUMIDITE	
APPLIQUEE A LA METHODE DU FIL CHAUD PARALLELE.....	35
III.1. Modèle quadripolaire de transfert simple.....	36
III.2. Modèle de transfert couplé chaleur masse	39

III.2.1. Bilan de masse.....	40
III.2.3. Conditions aux limites :.....	42
III.2.4. Propriétés Thermiques et Physiques des essences	43
III.3. Résolution Numérique du modèle de transfert couplé	44
III.3.1. Discrétisation des équations du transfert couplé :	44
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS	49
Introduction	50
IV.1. Comparaison des modèles de températures	50
IV.1.1. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11% et 34%.....	50
IV.1.1.1. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11%.....	50
IV.1.1.2. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11% et 34% : étude comparative	51
IV.1.1.3. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11%.....	52
IV.1.2. Analyse du comportement hydrique	53
IV.1.2.1. Analyses des coefficients de diffusions de masse.....	54
IV.1.2.1.1. Variation avec le temps	54
IV.1.2.2. Analyse des coefficients de diffusion massique isotherme.....	55
IV.1.2.2.1. Variation avec le temps	55
CONCLUSION GENERALE	58
BIBLIOGRAPHIE	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation de la structure du bois	2
Figure 2 : Représentation des différentes couches composantes de l'arbre	3
Figure 3 : Anisotropie du bois, axes et plans de références	4
Figure 4 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les résineux.....	6
Figure 5 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les feuillus	7
Figure 6 : Représentation de la décomposition de la paroi cellulaire	8
Figure 7 : Forme des isothermes de désorption des bois tropicaux	12
Figure 8 : Régimes de mesure des propriétés thermo-physiques	15
Figure 9 : Régimes de mesure des propriétés thermo-physiques.	17
Figure 10 : Schéma du principe de la méthode du fil chaud	18
Figure 11 : Schéma de principe du dispositif du ruban chaud	20
Figure 12 : Schéma de principe de la méthode du hot disc.....	22
Figure 13 : Schéma de principe du dispositif plan chaud symétrique(a) et asymétrique (b) ..	24
Figure 14 : Profil d'évolution de température $T_c(\sqrt{t})$ du fil chaud.....	26
Figure 15 : Dispositif expérimentale du tri-couche plan.....	28
Figure 16 : Schéma de principe de la méthode du tri-couche cylindrique.....	29
Figure 17 : Schéma de discrétisation radial 1D suivant l'épaisseur de l'échantillon	45
Figure 18 : Thermogrammes de températures : (a) Bilinga à X=11%	51
Figure 19 : Thermogrammes de températures : : (a) Bilinga à X=11%, ,(b) ; Bilinga à X=34%,	52
Figure 20 : Thermogrammes de températures du bilinga pour une teneur en eau de 34%.....	53
Figure 21 : Humidité à la surface de bois : (a) Bilinga à X=34% ; (b) Bilinga à X=11%	53
Figure 22 : Coefficients de diffusion massique non isothermes, Bilinga à X=34%	54
Figure 23 : Coefficients de diffusion massique non isothermes, (a) Bilinga à X=11%,	55
Figure 24 : Coefficients de diffusion massique isothermes, Bilinga à X=34%,	56
Figure 25 : efficients de diffusion massique isothermes, (a) Bilinga à X=11%.....	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des méthodes de caractérisations	32
Tableau 2 : Données de Simulations	43
Tableau 3 : paramètres utilisés pour la simulation cas du bois de Bilinga	44

RESUME

L'objectif de ce travail de Master vise à proposer une solution de mesure des propriétés thermiques de matériau poreux tels que le bois par une approche de simulation numérique de transfert couplé de chaleur et d'humidité. Le matériau poreux choisi dans ce travail est une essence de bois mis lourd communément appelée Bilinga dont le nom scientifique est *Nauclea diderrichii*, il a une densité élevée, il est utilisé pour la construction des charpentes, du sol et clôtures. L'espèce choisi a une bonne durabilité avec respect des différents types de fungi. Le Bilinga peut être utilisé sans traitement de préservation et se déforme difficilement pendant le séchage. L'échantillon à teneur en eau variable est soumis à un flux de chaleur identique à celui provoqué par un dispositif fil chaud parallèle. Pour mieux mener notre étude, un modèle de transfert couplé de chaleur et de masse est résolu numériquement par la méthode des différences finies explicite, en considération 1D transitoire, sous MATLAB. La comparaison entre les courbes obtenues à partir du modèle de transfert couplé et celles obtenues avec le modèle des quadripôles thermique a permis d'analyser plus précisément l'influence des transferts de masse sur le comportement thermique de ce matériau. Les résultats montrent que pour des essences de bois de moins de 11% de teneurs en eau, les fibres sont occupées par l'eau lié, le modèle quadripolaire reste valable pour les différentes mesures. Les processus de transfert évoluent plus rapidement pour des faibles teneurs en eau par rapport au teneur en eau élevée. Pour des essences de bois de plus de 35% de teneurs en eau, le point de saturation des fibres est atteint il devient donc plus difficile de faire des mesures ; la teneur en eau a une influence significative sur le transfert de chaleur et ne peut donc être négligé lors des études de différent transfert.

Mots clés : Transfert couplé, matériau bois, fil chaud parallèle, caractérisation thermique.

ABSTRACT

The measurement of the thermal properties of porous materials such as wood has a major disadvantage related to their behavior with respect to the humidity of the ambient air. The porous material chosen in this work is a species of heavy wood commonly called Bilinga whose scientific name is *Nauclea diderrichii*, it has a high density, it is used for the construction of frameworks, ground and fences. The chosen species has a good durability with respect for the different types of fungi. Bilinga can be used without preservatives and is difficult to deform during drying. The sample with variable water content is subjected to a heat flux identical to that caused by a parallel hot wire device. To better conduct our study, a coupled heat and mass transfer model is solved numerically by the explicit finite difference method, in transient 1D consideration, under MATLAB. The comparison between the curves obtained from the coupled transfer model and those obtained from the thermal quadrupole model allowed to analyze more precisely the influence of mass transfers on the thermal behavior of this material. The results show that for wood species with less than 11% water content, the fibres are occupied by bound water, the quadrupole model remains valid for the various measurements. Transfer processes evolve faster for low water content compared to high water content. For wood species with more than 35% water content, the saturation point of the fibres has been reached, so it becomes more difficult to make measurements; The water content has a significant influence on heat transfer and therefore cannot be overlooked in different transfer studies.

Keywords: Coupled transfer, wood material, parallel hot wire, thermal characterization.

INTRODUCTION GENERALE

L'intérêt porté de nos jours à la baisse de la consommation énergétique de l'habitat, conduit les fabricants d'isolants thermiques de bâtiments à se tourner vers les matériaux hydrophiles (Sibille charpente). Parmi ceux-ci on retrouve les matériaux « intermédiaires » tels que le bois. Ceux-ci possèdent un double intérêt en termes de performance d'isolation thermique et de faible bilan carbone (Ducoulombier, 2019). Cependant la mesure des propriétés thermiques de matériaux poreux comme le bois possède un inconvénient majeur lié à leur comportement vis-à-vis de l'humidité de l'air ambiant. En effet par sa nature hygroscopique, le bois est capable d'absorber l'humidité ambiante et ses performances thermiques s'en trouve modifié (Bohnke, 2013). Ceci pose donc le problème de la fiabilité des mesures de propriétés thermiques de matériau poreux comme le bois à l'état humide par les méthodes classiques de métrologie. En effet, au transfert de la chaleur se superpose un transfert d'humidité qui contribue lui-même au transfert de la chaleur. De ce fait, les modèles mathématiques classiques de transfert de chaleur et les techniques de mesure classiques ne sont pas adaptés pour la mesure des propriétés thermo-physiques de ce type d'isolants à l'état humide ou en environnement humide (Aghahadi M. , 2019). Outre le problème que pose la présence de l'humidité, la forte porosité et l'hétérogénéité du matériau bois rajoute une contrainte supplémentaire à leur caractérisation thermo-physique.

Compte tenu de ce qui précède, les méthodes classiques de métrologie thermique telles que le plan chaud, le fil chaud ainsi que les appareils de type conductimètre ont montré leurs limites pour la caractérisation des isolants thermiques biologique comme le bois. L'objectif de ce travail est de démontrer que le modèle de transfert couplé de masse et de chaleur est mieux adapté pour décrire le comportement thermique du matériau bois à l'état sec qu'à l'état humide. Mais aussi, d'évaluer l'écart relatif entre les résultats donnés par le modèle couplé et le modèle quadripolaire. Ce travail est divisé en quatre chapitres :

Le chapitre un s'intéresse à la généralité sur le matériau bois ; son anatomie. Afin de comprendre la structure qui confère à la fibre végétale ses propriétés isolantes ainsi que le phénomène d'absorption d'humidité en lien avec le présent mémoire, une étude détaillée de la structure et des constituants d'une bois à l'échelle microscopique et macroscopique est définie et un point sur les propriétés thermiques ; conductivité thermique capacité thermique est établi.

Le chapitre deux expose les différentes méthodes de métrologie thermique. Le principe les inconvénients et les avantages de chaque méthode. Ces théories de transfert couplé de masse et de chaleur en milieu poreux ont été exposées pour identifier les modèles les mieux adaptés à

l'adsorption d'humidité du matériau bois, en vue de leur mise en œuvre dans l'approche expérimentale de la caractérisation thermique par la méthode du fil chaud parallèle.

Le troisième chapitre présente un modèle quadripolaire des transferts simple et fournit des équations de transfert couplés de chaleur et de masse, les conditions aux bords et les conditions initiales. Ce volet décrit également les méthodes numériques mises en œuvre pour la simulation et les propriétés thermo-physiques et hydriques de l'isolant, notamment celles requises dans la simulation numérique.

Au Quatrième chapitre il est présenté les résultats des simulations numériques effectuées et une analyse des résultats est proposée en confrontant le modèle couplé au modèle quadripolaire. L'impact significatif des transferts d'humidités sur le comportement thermique du matériau bois sera validé en comparant les écarts relatifs aux deux modèles.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BOIS

I.1. Anatomie du bois

L'arbre, source du bois, est avant d'être abattu, un être vivant dont les tissus cellulaires se sont organisés lors de sa croissance. Le bois proprement dit ou xylème est le matériau constitutif du tronc, des branches et des racines. C'est avant tout un matériau anisotrope et hétérogène. Sa structure peut être décrite à différents niveaux : à l'échelle macroscopique de l'arbre, microscopique des cellules et moléculaire des polymères de base (Bohnke, 2013). Cette description doit tenir compte de la croissance naturelle de l'arbre et des hétérogénéités qui en résultent sur le bois.

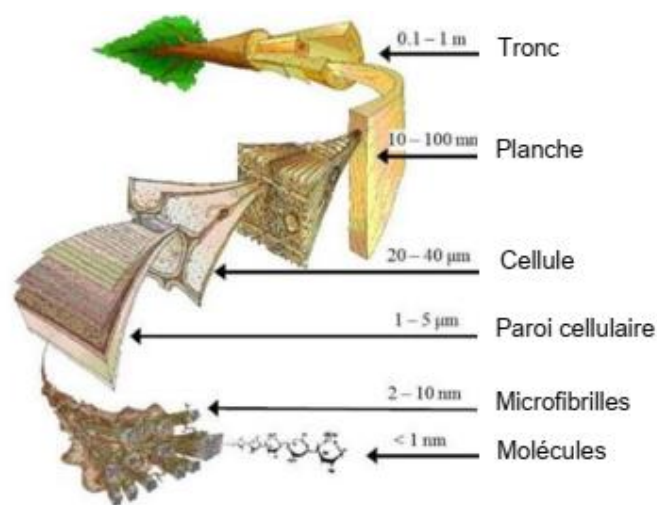


Figure 1 : Représentation de la structure du bois (Harrington, 1998)

I.1.1. L'échelle macroscopique

I.1.1.1. La décomposition d'un tronc

Lorsqu'on observe à l'œil nu un tronc, nous voyons l'écorce. C'est la première couche de l'arbre qui assure sa protection contre les chocs extérieurs. L'arbre grandit chaque année, aussi bien en hauteur qu'en largeur (Mchirgui, 2012). Selon le moment de l'année, il pousse plus ou moins vite. En effet, dans nos régions tempérées, l'arbre ralentit ou même stoppe sa croissance dans la période hivernale et la réactive au printemps. L'accroissement de l'arbre se fait selon des couches cylindriques superposées, et forme ainsi les cernes. Ces cellules sont créées par la deuxième couche, le cambium. Cette assise génératrice libéro ligneuse forme aussi bien le liber (cellules extérieures) que le bois (cellules intérieures).

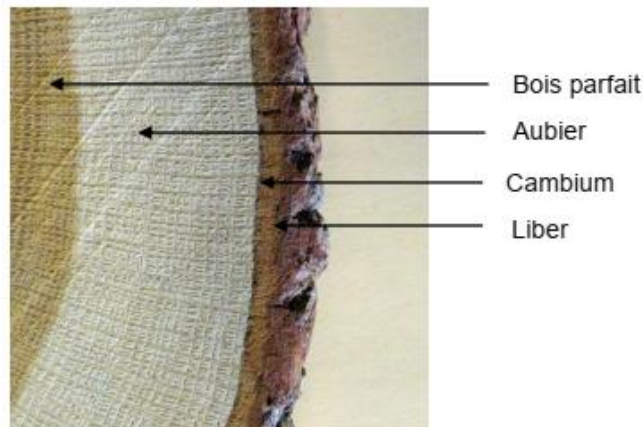


Figure 2 : Représentation des différentes couches composantes de l'arbre

En observant une coupe d'un arbre, nous pouvons alors différencier deux grandes couches constituant le bois :

L'aubier est le bois récemment formé. Il est situé en périphérie de l'arbre. Il est constitué de cellules vivantes (parenchyme). Cette couche a pour rôle la conduction de la sève brute, qui est assurée en majeure partie par les couches les plus récentes (les plus proches de l'écorce).

Le bois parfait est la partie centrale du tronc qui est composée de cellules mortes. Dans le cas où cette partie présente un ton plus sombre, le bois est dit à aubier différencié (pin, mélèze, douglas, chêne...). Ce bois parfait est alors nommé duramen. Dans le cas contraire, le bois est dit à aubier non différencié (hêtre, peuplier, tilleul, sapin, épicéa...). Lors de la duraminisation des cellules de parenchymes, des substances chimiques vont imprégner le bois, ce qui lui donnent alors sa couleur différente de l'aubier. Elles vont lui conférer une résistance naturelle aux attaques des champignons lignivores et insectes xylophages pendant et après la vie de l'arbre. Enfin, le rôle du bois de cœur est de conférer à l'arbre sur pied sa résistance mécanique, pour supporter les charges gravitaires et les effets de flexion et de torsion apportés par le vent.

Au fur et à mesure que l'arbre grandit en diamètre, de nouvelles cellules d'aubier sont créées, et, dans des quantités à peu près identiques, d'autres meurent pour former le bois de cœur. Cependant, la proportion aubier/bois de cœur peut être assez variable d'une essence à l'autre. Il est à noter que pour un arbre vivant, sa partie vivante (aubier) est souvent plus résistante aux attaques des insectes et champignons que le bois de cœur, car les cellules de parenchymes le protègent. Cependant, dans le cas du bois mis en œuvre, l'aubier, ne pouvant plus se protéger, ne résistera pas aux attaques. Au contraire, le bois de cœur composé d'aubier différencié résistera aux attaques grâce à son propre système de protection élaboré au moment de la duraminisation (transformation physique des cellules, tanins, ...).

I.1.1.2. Plans d'orthotropie et plans ligneux

Le bois est un matériau orthotrope du fait de sa structure cellulaire circulaire qui forme les cernes et de l'orientation de ces fibres. Il possède trois plans de symétries orthogonaux. Il a donc un comportement mécanique, thermique, et hydrique différent selon les trois axes de référence (Figure 3),

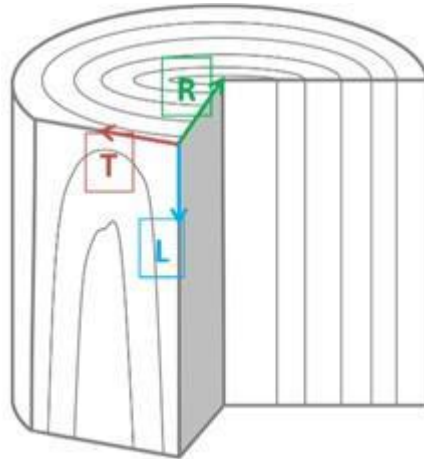


Figure 3 : Anisotropie du bois, axes et plans de références (Trouy, 2016)

- L'axe longitudinal L est orienté selon l'orientation de la plus grande partie des cellules,
- L'axe tangential T est tangent aux cernes de croissance,
- L'axe radial R est perpendiculaire aux deux autres. Il est orienté selon le rayon du tronc et passe par le centre biologique du tronc.

L'organisation des cellules par plans est appelée plan ligneux. Cette identification se fait selon trois plans de référence, à savoir :

- Le plan radial transversal RT
- Le plan longitudinal radial LR
- Le plan longitudinal tangential LT

Par l'influence de ces différentes organisations cellulaires, les caractéristiques physiques du matériau bois présentent des propriétés différentes selon ces trois plans.

I.1.2. L'échelle microscopique

La composition chimique et microscopique de l'arbre est matière à réflexion, par une étude anatomique il sera question de comprendre les phénomènes de transfert hydrique et les comportements thermique présentés dans la suite de cette étude.

I.1.2.1. Constitution chimique

Le bois est un polymère dont sa matière organique est composée (dans l'ordre décroissant des quantités massiques) de carbone, d'oxygène, d'hydrogène d'azote et d'extractibles (Varnier, 2019). Ce matériau est lui-même composé par trois polymères, de substances organiques et minérales, dont leurs proportions varient d'une essence à l'autre :

La cellulose est le principal constituant du bois, avec une proportion allant de 40 à 50%. Il est le principal responsable des propriétés physiques du matériau. De plus, ce polymère a la particularité d'être hydrophile, propriété caractérisée par des liaisons hydrogènes sur lesquelles viendront se greffer des molécules d'eau (Varnier, 2019).

L'hémicellulose, constituant du bois avec une proportion allant de 20 à 40%, possède une constitution moléculaire proche de la cellulose. Il est également hydrophile.

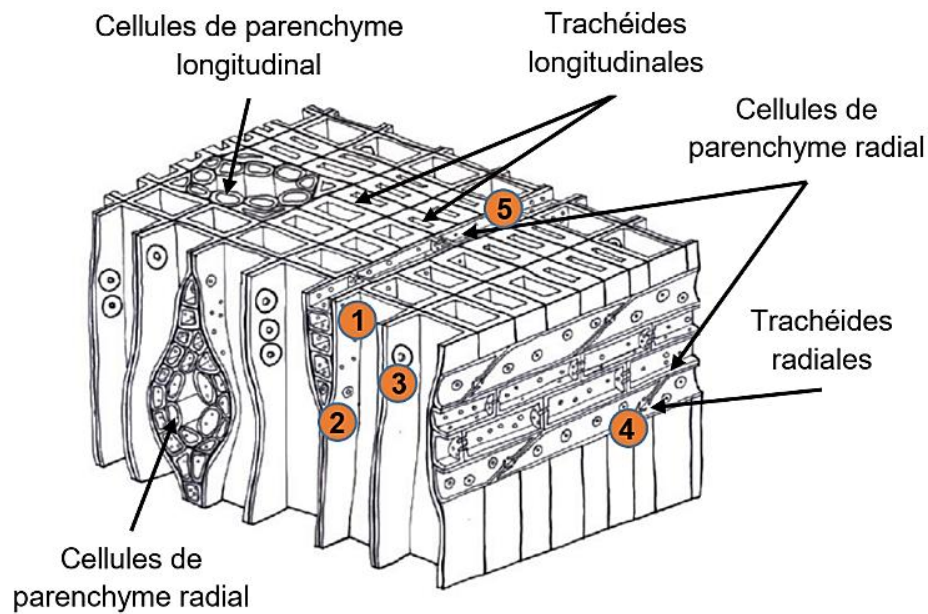
La lignine, présent à 20-30%, a le rôle de colle inter fibres. Contrairement aux autres constituants, elle a la particularité d'être hydrophobe. La proportion de ce polymère varie beaucoup entre résineux et feuillus.

Les substances organiques et minérales, en faible proportion (0 à 10%), sont les extractibles, tels que les tanins, les composantes aromatiques des huiles, les alcools, ou encore les minéraux (calcium, manganèse, potassium et sodium) (Varnier, 2019). Ils peuvent influencer le transfert hydrique dans le matériau.

I.1.2.2. Parois cellulaires

I.1.2.2.1. Les résineux

Les résineux, de l'embranchement des *Pinophyta*, sont désignés ainsi en raison de leur forme conique. Leur plan ligneux est simple. Il est formé de trachéides orientées dans le sens longitudinal. Elles sont allongées (1 à 8 mm de long) et de sections transversales polygonales et creuses (0,25 à 0,75 mm de diamètres) (Varnier, 2019). Dans le sens radial, au cours d'une saison, la dimension de la trachéide diminue, tandis que la paroi subit une augmentation d'épaisseur (dans le sens du bois initial vers le bois final).



- (1) : Ponctuation entre trachéides longitudinaux et cellules de parenchyme radial
- (2) : Ponctuation aréolée entre trachéides longitudinaux et trachéides radiaux
- (3) : Ponctuation aréolée entre trachéides longitudinaux
- (4) : Ponctuations aréolées entre trachéides radiaux
- (5) : Ponctuations entre cellules de parenchyme radial

Figure 4 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les résineux (Varnier, 2019)

I.1.2.2.2. Les feuillus

Ils désignent les arbres appartenant à la classe des dicotylédones en raison de leurs feuilles plates à nervation ramifiée. Ils présentent une structure plus complexe que les bois de résineux. Entre autres, chez les feuillus et les résineux, le rôle de soutien de l'arbre est effectué par les trachéides, alors que pour les résineux, elles assurent également le rôle de conduction de la sève (Varnier, 2019). Ce sont les vaisseaux qui assurent majoritairement cette fonction chez les feuillus.

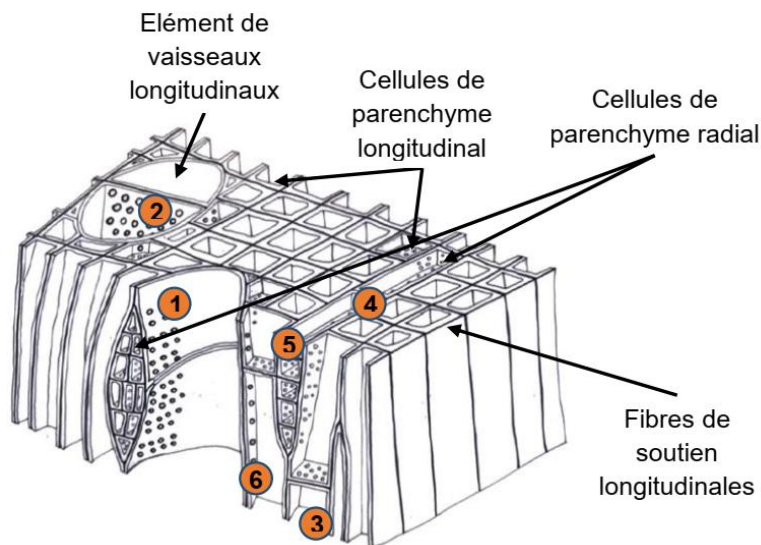


Figure 5 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les feuillus (Varnier, 2019)

I.1.3. Echelle de la Paroi cellulaire

Chaque cellule se décompose en deux parties. Au centre, se situe le lumen qui représente le vide à l'intérieur de la cellule. C'est là où passe la sève brute. Autour de cet espace, se trouve la paroi cellulaire qui est la structure de la cellule. C'est une structure lamellaire complexe qui est comparable à un composite avec une armature et une matrice. Elle peut être également assimilée à un matériau multicouche tel que du contreplaqué car les couches sont à fils croisés (Kollmann and Côté, 1968). Ces dernières sont définies en Figure 6

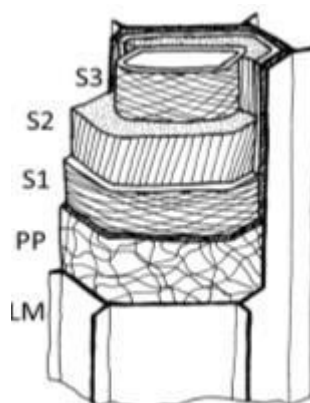


Figure 6 : Représentation de la décomposition de la paroi cellulaire (Trouy, 2016)

La lamelle moyenne (LM) est la paroi commune aux cellules voisines. Elle est non fibrillaire, c'est à dire qu'elle ne contient pas de cellulose. Elle est fortement constituée de lignine (dans les cellules ligneuses) ou de pectine (dans les cellules non ligneuses). Elle joue le rôle de ciment intercellulaire.

La paroi primaire (PP) est une paroi très fine et extensible car elle contient un réseau lâche de fibrilles de cellulose.

La paroi secondaire (S1 et S3) est composée de deux couches très fines S1 et S3 caractérisées par la présence de fibrilles de cellulose presque à l'horizontale.

I.1.2. Propriété thermique et hydrique du bois

I.1.2.1. Propriétés thermiques

I.1.2.1.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est un paramètre physique essentiel pour déterminer le taux de transfert de chaleur (Gu et Zink-Sharp, 2005). La conductivité thermique a généralement quatre contributions : la conduction à travers le solide (à travers les parois cellulaires) ; la conduction à travers le gaz (par l'intermédiaire de l'air dans les lumens des cellules); la convection à l'intérieur des cellules et le rayonnement à travers les vides et les parois cellulaires (Blomberg, 2006). Pour le bois et les composites à base de bois, l'effet d'un rayonnement est généralement négligé.

La conductivité thermique du bois est affectée par plusieurs facteurs fondamentaux : la densité, la température, la teneur en humidité, le contenu en extractibles, la direction du fil du bois, les irrégularités structurelles comme le fil spiralé et les nœuds et l'angle des microfibrilles. (Mvondo & Al, 2019) ont trouvé une relation linéaire entre la conductivité thermique et la densité. La conductivité thermique augmente avec la densité, la teneur en humidité, la température, ou le contenu en extractibles du bois (Bobda & al, 2022). (Peron & al, 2020) a prédit la conductivité thermique sur la base de la teneur en humidité et de la densité. La conductivité thermique varie avec la direction du flux de chaleur par rapport à l'orientation du fil du bois. L'effet de l'orientation du fil du bois sur la conductivité thermique a été étudié (Mvondo & Al, 2019). La conductivité thermique dans la direction radiale a été rapportée comme étant d'environ 5% à 10% supérieure à la direction tangentielle (Mvondo & Al, 2019). La conductivité thermique longitudinale a été rapportée comme 1,5 à 2,8 fois supérieure à la conductivité thermique transversale, mais les valeurs rapportées varient considérablement. Par exemple des auteurs ont trouvé que la conductivité thermique en direction longitudinale est

d'environ 2,25 à 2,75 fois supérieure à la conductivité thermique transversale avec une moyenne d'environ 2,5 fois (Qilan, 2019).

La conductivité thermique du bois est principalement déterminée par la méthode dite de l'état stable (Poliana, 2003). La plupart des mesures sont effectuées selon la direction transverse, soit la direction perpendiculaire aux fibres. La chaleur est appliquée sur les surfaces dans la direction transversale. (Mvondo & Al, 2019) a étudié la conductivité thermique du bois de plusieurs espèces de différentes densités et à différentes teneurs en humidité. Une équation empirique fonction de la densité et de la teneur en humidité a été établie sur la base de ces données. Cette équation a été établie sur la base de ces données. Cette équation a été en accord avec les résultats expérimentaux de (Siau, 1995). A titre d'exemple, pour un bois de densité de 450 kg/m^3 et une teneur en humidité de 12%, sa conductivité thermique dans le sens de l'épaisseur est de $0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. La conductivité thermique selon la direction longitudinale est de $0,31 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Tandis que pour un bois plus dense de 700 kg/m^3 , au même niveau de teneur en humidité, la conductivité thermique transversale et longitudinale est de $0,18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ et $0,44 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, respectivement. (Blomberg, 2006) a évalué la conductivité thermique du pin sylvestre densifié et non densifié et a obtenu des valeurs de $0,121 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ et $0,119 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ respectivement.

I.1.2.1.2. Capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau représente sa propension à emmagasiner de la chaleur en fonction de son volume. Elle est analogue à la capacité C d'un condensateur dans un circuit électrique. Elle est exprimée en $\text{kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$. Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus ce matériau sera capable d'emmagasiner et de restituer de la chaleur en hiver ou de la fraîcheur en été. Le principal bénéfice d'une forte capacité thermique est de lisser les variations de température d'un bâtiment (Djossou, 2014). Elle désigne l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un kilogramme de bois d'un Kelvin. Elle dépend de la température, de l'humidité du bois, de la direction anatomique et est pratiquement indépendante de la densité (Mvondo & Al, 2019).

Bénéficiant d'une grande liberté de mouvements à l'échelle atomique, les liquides et les gaz ont une capacité calorifique plus élevée que les solides, de manière générale. C'est pour cela qu'on utilise des fluides, souvent l'air ou l'eau, pour refroidir une installation qui génère de la chaleur (circuit électriques, réacteurs, etc.). Leurs capacités calorifiques sont quasiment indépendantes de la température.

La capacité calorifique est une propriété importante des matériaux de construction car elle est reliée à l'inertie thermique du bâtiment, très importante pour le confort d'été. Les matériaux à forte capacité calorifique stockent la chaleur pendant les heures chaudes et la restituent lentement pendant les heures fraîches, induisant à la fois un déphasage et un amortissement des variations de température à l'intérieur du bâtiment. La capacité calorifique volumique est une mesure directe de l'inertie thermique apportée par un matériau, qui tient compte de sa masse volumique :

$$C_{pvolumique} = C_{pmassique} \times X_{massevolumique} \quad (1)$$

Les $C_{pmassique}$ étant relativement proches pour les différentes matières utiles à la construction, plus un mur est épais et dense (peu poreux), plus son inertie thermique est grande. C'est le cas des maisons en terre battues ou pierres. On voit aussi que les matériaux poreux sont très bon isolant thermiques mais confèrent très peu d'inertie thermique.

I.1.2.2. Propriété hydrique

I.1.2.2.1. Teneur en eau

La procédure d'obtention des différentes teneurs en eau est pratiquement la même que celle développée par Laurent et al, 1995. La teneur en eau à base sèche est obtenue en séchant les échantillons à l'étuve réglée à 105°C pendant 48 h, le temps que l'équilibre hygrothermique soit atteint. A la sortie de l'étuve, les échantillons sont conservés dans du papier aluminium puis dans une enveloppe en matière plastique. Les autres teneurs en eau sont obtenues en plongeant les échantillons dans l'eau pendant 48 heures au moins ; puis en les séchant progressivement soit à l'étuve ou au four à microondes, soit à l'air libre. Dès l'obtention de chaque masse voulue, les échantillons sont à nouveau conservés pendant 24 h dans une enveloppe en matière plastique, le temps que l'équilibre hygrothermique au sein de l'échantillon s'établisse. Cette technique permet d'obtenir une répartition aussi uniforme que possible de l'eau à l'intérieur des échantillons (Laurent & al, 1995). Connaissant la masse sèche m_s de l'échantillon et sa masse humide m_h , la teneur en eau massique est calculée par :

$$X = \frac{m_h - m_s}{m_s} = 100 \left[\frac{m}{m_0} (1 + X_0) - 1 \right] \quad (2)$$

Où :

X : est la teneur en eau à la date t

X_0 : est la teneur en eau initiale

m : est la masse de l'échantillon à la date t

m_s : est la masse de l'échantillon sec

m_0 : est la masse initiale de l'échantillon

I.1.2.2.2. Point de saturation des fibres (PSF)

La cellulose est l'élément essentiel responsable de l'hygroscopicité du bois. C'est un polymère dont le monomère dérive du glucose.

La masse molaire du glucose est de 180g/mol. Le glucose contient trois groupes hydroxyles fortement hydrophiles. C'est sur ces derniers que viennent se fixer les molécules d'eau par liaison hydrogène. Ainsi, la masse d'eau maximale susceptible de s'accrocher est de 54g, donnant ainsi une valeur maximale de la teneur en eau liée de 30%. La plupart des essences ont une teneur en eau voisine à cette valeur lorsque leur structure est dépourvue d'eau libre, les fibres étant saturées d'eau liée. On dit alors qu'on a atteint le point de saturation des fibres. La présence des substances liquides autres que (résine, sucre et sels entre autres) l'eau dans le bois contribue à modifier l'humidité au PSF (Bjork & Rasmunson, 1995).

Lorsque l'humidité du bois est supérieure à celle au PSF, on se trouve dans le domaine non hygroscopique, dans le cas contraire, on est dans le domaine hygroscopique.

Plusieurs études montrent que les propriétés physico mécaniques du bois sont modifiées lorsque l'humidité du bois varie dans le domaine hygroscopique (Merakeb , 2006) ; (Moutee Mohssine, 2006). Des études récentes démontrent que les propriétés de quelques essences sont modifiées dès le domaine non hygroscopique (Geovana, 2005).

Dans la pratique, on le détermine en mesurant l'humidité du bois lorsque celui-ci est stabilisé dans une ambiance de température de 20°C et d'humidité relative de l'air égale à 100% (Geovana, 2005).

I.1.2.2.3. Teneur en eau à l'équilibre : Isothermes de désorption du bois

Les isothermes de désorption des bois tropicaux ont la forme des sigmoïdes, (figure 7). Les molécules d'eau dans le domaine hygroscopique se présentent sous trois formes différentes (Nadeau et Puiggali, 1995).

Aux basses humidités relatives de l'air (zone 1), une couche (monocouche) d'eau est liée au squelette du bois. La mobilité des molécules est quasi-impossible et il faudrait une forte énergie pour libérer ces molécules d'eau.

Aux humidités relatives de l'air intermédiaires (zone 2), quelques couches supplémentaires se superposent à la monocouche formant ainsi les multicouches. L'énergie

nécessaire pour rompre les liaisons entre les multicouches et le bois est moindre que précédemment.

Aux humidités relatives proches de 1 (zone 3), il y a accumulation d'eau dans les microporosités, puis dans les pores formant la phase liquide qui obéit aux lois de la capillarité. Dans cette zone, l'énergie de liaison est très faible.

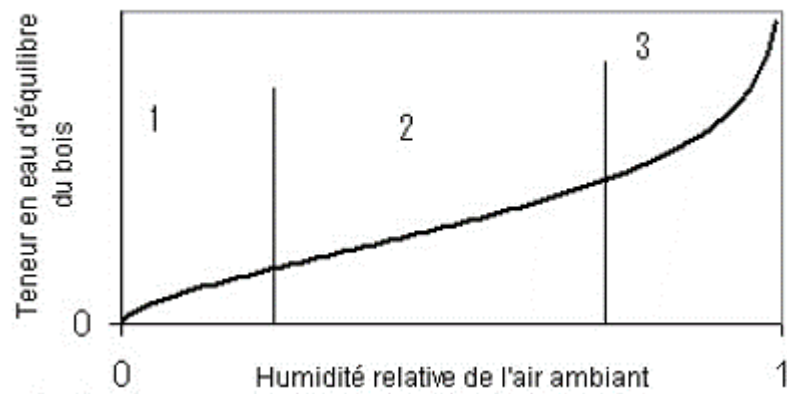


Figure 7 : Forme des isothermes de désorption des bois tropicaux (Jannot Y, 2003a)

CHAPITRE II : METROLOGIE THERMIQUE ET MODELES DE TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE

Introduction

La caractérisation thermique ou métrologie thermique d'un matériau se base sur les l'investigation des réponses reçues de la part de celui-ci lorsqu'il subit une perturbation thermique. Cette perturbation peut-être sous forme d'un flux de chaleur ou sous forme d'un ou plusieurs températures imposées. Par l'exploitation expérimentale de la réponse à cette perturbation thermique (flux ou température), les propriétés thermo-physique (conductivité thermique λ , diffusivité thermique α ,) du matériau sont estimées. La diffusivité thermique par exemple est estimée dans le régime transitoire de la perturbation et la conductivité thermique est estimée dans le régime permanent ou transitoire.

La connaissance des techniques de métrologie thermique est donc importante pour l'évaluation de l'estimation des propriétés thermique du matériaux bois. En fonction des résultats escomptés, choisir soit une méthode classique ou moderne.

Ce chapitre présente une vision des travaux qui évaluent l'impact de l'état hygroscopique du matériau sur les techniques de caractérisation thermiques. Les études qui sur les modèles de transfert couplés existants sont aussi examinées ainsi que les approches retenues dans les techniques de caractérisation thermiques.

II.1. Généralités

En pratique, il existe deux approches principales d'estimation des propriétés ; soit une estimation par une méthode classique permettant généralement de déterminer la conductivité thermique, ou alors une estimation par une méthode moderne, cette dernière permet d'estimer plusieurs propriétés à la fois. En métrologie thermique, le comportement thermique d'un matériau peut être plus ou moins influencé par des facteurs liés à l'environnement de la mesure, tels que les pertes thermiques, par la sensibilité des dispositifs et instruments de mesure ou par la résistance de contact et autres sources d'erreurs. Ces facteurs sont souvent difficiles à contrôler. Ce qui conduit souvent à plusieurs hypothèses simplificatrices lors d'une modélisation. Parmi ces hypothèses, celle d'un transfert thermique en milieu semi-infini et celle d'un transfert thermique unidirectionnel sont les plus utilisés (Jannot et al, 2017). Les principales sources d'erreurs influant sur la mesure ou l'estimation des propriétés thermo physiques sont (Felix, 2011) :

Les erreurs de modélisation liées aux hypothèses simplificatrices lors de la mise en équation des phénomènes de transfert thermique, le bruit de mesure lié aux perturbations thermiques,

L'erreur liée à l'étalonnage des capteurs de mesure et de la chaîne d'acquisition de données.

En pratique, il n'existe aucune méthode de mesure parfaite car toutes ces erreurs sont inéluctables. Néanmoins, selon les conditions d'étude et la nature du matériau, certaines d'entre elles sont plus ou moins minimisées. Afin de choisir la méthode de mesure des propriétés thermo-physiques la plus adaptée à un matériau donné, les méthodes de mesure peuvent être classées selon quatre critères (Felix, 2011).

❖ **Le premier critère concerne le régime de mesure (transitoire ou permanent).**

En effet, en fonction de la phase temporelle pendant laquelle la réponse du système est exploitée, le régime de mesure change si la mesure est effectuée au début du test en considérant l'instant initial, le régime est dit transitoire, cependant la conductivité thermique peut également être estimée. La méthode tri-couche et la méthode flash utilisées pour la mesure de la conductivité thermique sont des méthodes purement transitoires. Le régime de mesure change si la mesure est effectuée à des temps plus longs, excluant néanmoins l'instant final, et sans prendre en compte la variation temporelle de la température durant la phase transitoire, le régime est quasi-établi et la méthode de mesure est effectuée en régime quasi-stationnaire. C'est le cas de la méthode dite « fil chaud » et de la méthode du plan chaud.

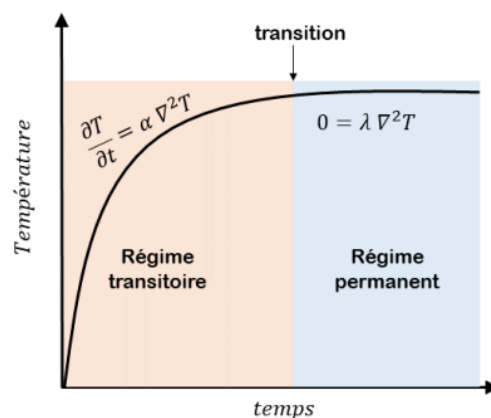


Figure 8 : Régimes de mesure des propriétés thermo-physiques

❖ **Le deuxième critère est la forme de la perturbation**

En effet, selon la méthode de mesure, le type de perturbation utilisé varie : le flux de chaleur de type échelon est utilisé pour la méthode plan chaud et la méthode fil chaud ou de type Dirac comme pour la méthode flash etc. (Degiovanni, 1994).

❖ Le troisième critère est la représentation géométrique du problème

On utilise couramment trois formes géométriques : plane, cylindrique et sphérique. En pratique, la géométrie du problème est choisie en fonction des hypothèses considérées lors de la modélisation et une méthode peut avoir plusieurs configurations géométriques

❖ Le quatrième critère concerne la grandeur mesurée.

Les méthodes de mesure peuvent être classées en fonction des grandeurs mesurées. Il est possible de mesurer une ou plusieurs températures à la fois, un flux de chaleur, une température et un flux de chaleur, etc.

La caractérisation thermique ou métrologie thermique d'un matériau se base sur les l'investigation des réponses reçues de la part de celui-ci lorsqu'il subit une perturbation thermique. Cette perturbation peut-être sous forme d'un flux de chaleur ou sous forme d'un ou plusieurs températures imposées. Par l'exploitation expérimentale de la réponse à cette perturbation thermique (flux ou température), les propriétés thermo-physique (conductivité thermique λ , diffusivité thermique α , ...) du matériau sont estimées. La diffusivité thermique par exemple est estimée dans le régime transitoire de la perturbation et la conductivité thermique est estimée dans le régime permanent ou transitoire.

En pratique, il existe deux approches principales d'estimation des propriétés thermo-physiques ; soit une estimation par une méthode classique à partir d'une seule valeur pertinente telle qu'un maximum, un état d'équilibre ou une pente, etc., et cette méthode donne généralement la conductivité thermique, soit une estimation par une méthode moderne à partir d'inversion d'un modèle analytique ou numérique et qui permet d'estimer plusieurs propriétés simultanément.

En métrologie thermique, le comportement thermique d'un matériau peut être plus ou moins influencé par des facteurs liés à l'environnement de la mesure, tels que les pertes thermiques, par la sensibilité des dispositifs et instruments de mesure ou par la résistance de contact et autres sources d'erreurs. Ces facteurs sont souvent difficiles à contrôler. Ce qui conduit souvent à plusieurs hypothèses simplificatrices lors d'une modélisation. Parmi ces hypothèses, celle d'un transfert thermique en milieu semi-infini et celle d'un transfert thermique unidirectionnel sont les plus utilisés (Jannot & Al, 2017).

Les principales sources d'erreurs influant sur la mesure ou l'estimation des propriétés thermo physiques sont (Felix, 2011).

- ❖ Les erreurs de modélisation liées aux hypothèses simplificatrices lors de la mise en équation des phénomènes de transfert thermique,

- ❖ Le bruit de mesure lié aux perturbations thermiques,
- ❖ L'erreur liée à l'étalonnage des capteurs de mesure et de la chaîne d'acquisition de données.
- ❖ L'incertitude sur les propriétés utilisées lors d'une modélisation.

En pratique, il n'existe aucune méthode de mesure parfaite car toutes ces erreurs sont inéluctables. Néanmoins, selon les conditions d'étude et la nature du matériau, certaines d'entre elles sont plus ou moins minimisées.

Afin de choisir la méthode de mesure des propriétés thermo-physiques la plus adaptée à un matériau donné, les méthodes de mesure peuvent être classées selon quatre critères (Felix, 2011) :

❖ **Le premier critère concerne le régime de mesure (transitoire ou permanent).**

En effet, en fonction de la phase temporelle pendant laquelle la réponse du système est exploitée, le régime de mesure change si la mesure est effectuée au début du test en considérant l'instant initial, le régime est dit transitoire, cependant la conductivité thermique peut également être estimée. La méthode tri-couche et la méthode flash utilisées pour la mesure de la conductivité thermique sont des méthodes purement transitoires. Le régime de mesure change si la mesure est effectuée à des temps plus longs, excluant néanmoins l'instant final, et sans prendre en compte la variation temporelle de la température durant la phase transitoire, le régime est quasi-établi et la méthode de mesure est effectuée en régime quasi-stationnaire. C'est le cas de la méthode dite « fil chaud » et de la méthode du plan chaud.

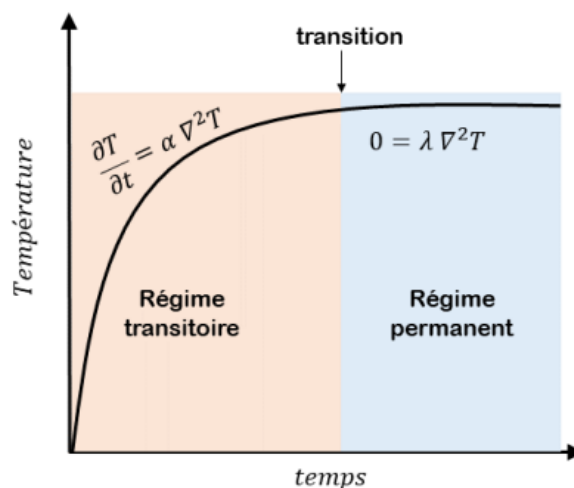


Figure 9 : Régimes de mesure des propriétés thermo-physiques.

❖ Le second critère est la forme de la perturbation

En effet, selon la méthode de mesure, le type de perturbation utilisé varie : le flux de chaleur de type échelon est utilisé pour la méthode plan chaud et la méthode fil chaud ou de type Dirac comme pour la méthode flash etc. (Degiovanni, 1994)

❖ Le troisième critère est la représentation géométrique du problème

On utilise couramment trois formes géométriques : plane, cylindrique et sphérique. En pratique, la géométrie du problème est choisie en fonction des hypothèses considérées lors de la modélisation et une méthode peut avoir plusieurs configurations géométriques.

❖ Le quatrième critère concerne la grandeur mesurée.

Les méthodes de mesure peuvent être classées en fonction des grandeurs mesurées. Il est possible de mesurer une ou plusieurs températures à la fois, un flux de chaleur, une température et un flux de chaleur, etc.

II.1.1. Méthode du fil chaud

II.1.1.1. Principe de la méthode :

La méthode du « **fil chaud** », qui est l'une des méthodes les plus utilisées dans le régime transitoire, est une méthode normalisée (ISO-8894-1 et 2). Son principe est basé sur la distribution radiale du flux de chaleur autour d'un fil chauffant. A cet effet, le fil chauffant est coincé entre deux échantillons identiques. Les dimensions de l'échantillon sont choisies de sorte que l'hypothèse d'un milieu semi-infini soit satisfait et reste valable pendant un temps suffisamment long.

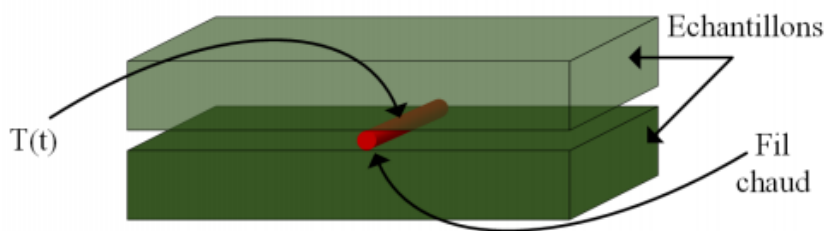


Figure 10 : Schéma du principe de la méthode du fil chaud

II.1.1.2. Mesure de la conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique par cette méthode est simple. Un flux de chaleur radial et constant ϕ est créé par le fil chauffant. L'évolution de la température du fil $T(t)$ est

relevée soit par un thermocouple soudé au milieu du fil, soit estimée à partir de la résistance électrique du fil.

II.1.1.3. Estimation de la conductivité thermique

En considérant les hypothèses d'un transfert thermique radial dans un milieu semi-infini, la valeur de la température du fil de longueur l peut être approchée par l'expression :

$$T(t) = \frac{\phi}{4\pi l \lambda} \ln(t) \quad \text{Équation 1}$$

En traçant $T(t)$ en fonction de $\ln(t)$, la pente de la partie linéaire de la courbe permet de calculer la conductivité thermique comme suit :

$$\lambda = \frac{\phi}{4\pi l \alpha} \quad \text{Équation 2}$$

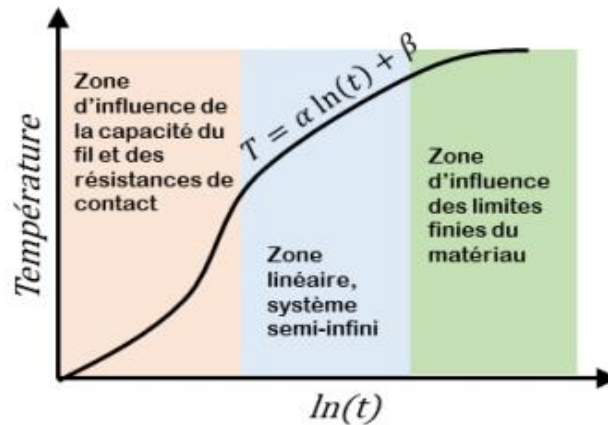


Figure 11 : Profil d'évolution de température du fil chaud

II.1.1.4. Avantage et inconvénients

Cette méthode a plusieurs avantages notamment sa simplicité de mise en œuvre et des mesures effectuées de façon rapide. En effet, étant donné que c'est une méthode transitoire, la durée de mesure est par conséquent très courte. Cette méthode est aussi applicable aux liquides et aux solides.

Sa principale contrainte est la nécessité de respecter l'hypothèse d'un milieu semi-infini. A cet effet, l'échantillon doit présenter une taille relativement importante par rapport à la longueur du fil chauffant. Dans le cas des isolants biosourcés, l'hétérogénéité du matériau requiert une taille de l'échantillon bien plus importante, et par conséquent, une longueur du fil chauffant plus importante aussi. Il en résulte une inertie thermique non négligeable du fil

chauffant avec pour conséquence un raccourcissement de la zone linéaire de la courbe (Figure 1.8) et donc de la zone dans laquelle la conductivité thermique est estimée

II.1.1.5. Etat de l'art

Quelques études mettant en œuvre la méthode du fil chaud ont été identifiées. (Franco, 2007) par exemple, utilise la méthode du fil chaud pour caractériser différents matériaux non métalliques de conductivité thermique située entre $0,2$ et $1,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et destinés à la construction. (Coquard & Quenard, 2006) ont adapté cette méthode aux matériaux à faible masse volumique. Ils ont effectué, par une approche théorique et une approche expérimentale, une adaptation de cette méthode sur des mousses EPS basse densité. (Azarfar & Beigzadeh, 2016) Et (Guo & al., 2018) ont mis en œuvre la méthode du fil chaud pour la caractérisation des liquides. Ils ont communiqué une erreur inférieure à $1,5\%$ sur leurs mesures ; montrant ainsi une bonne adaptation de cette méthode à ce type de mesure. (Nabil & Khodadadi, 2017) ont utilisé le fil chaud pour caractériser les matériaux à changement de phase.

II.1.2. Méthode du ruban chaud

II.1.2.1. Principe de la méthode :

La méthode du ruban chaud est une méthode intermédiaire entre la méthode du plan chaud et la méthode du fil chaud (Krapez, 2007) : l'élément chauffant est un ruban plan dont la largeur est plus petite que celle des échantillons à caractériser contrairement au plan chaud où l'élément chauffant et l'échantillon ont la même surface. Ce ruban est coincé entre deux échantillons à caractériser (Figure 1.). L'évolution de la température du ruban est enregistrée soit par un thermocouple fixé au centre du ruban soit par la mesure de la résistance électrique. Cette dernière donne la température moyenne du ruban. Aux temps courts où le transfert est unidirectionnel, les mesures permettent d'estimer l'effusivité thermique et aux temps longs où le transfert est bidirectionnel, elles permettent d'estimer la diffusivité thermique.

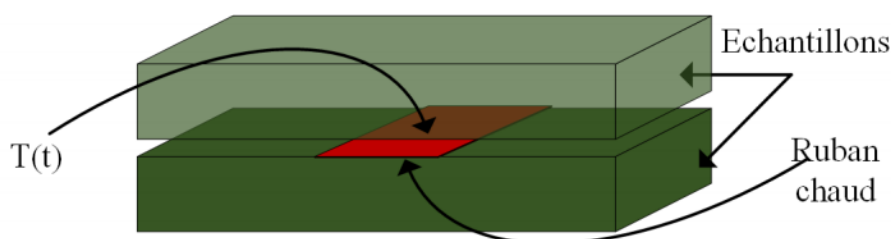


Figure 11 : Schéma de principe du dispositif du ruban chaud

Les contraintes de cette méthode sont le choix des dimensions du ruban et des échantillons et l'isotropie de ceux-ci. La longueur de l'échantillon peut influencer les pertes thermiques latérales. L'objectif de cette méthode est de créer une condition intermédiaire entre la méthode du fil chaud et celle du plan chaud pour bénéficier des avantages de ces deux méthodes.

II.1.2.2. Estimation de la conductivité thermique

La méthode du ruban chaud est le plus souvent utilisé pour l'estimation de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique par minimisation des erreurs quadratiques entre la température $T(t)$ mesurée au centre du ruban et les valeurs de température calculées par un modèle analytique (Jannot & al., 2004).

II.1.2.3. Avantage et inconvénients

Cette méthode possède les avantages des méthodes du fil chaud et du plan chaud. De plus, elle est très utilisée dans la caractérisation des matériaux anisotropes. En effet, l'orientation du ruban chaud est modifiable pour effectuer les mesures suivant différentes directions (Jannot & al., 2011). Il est par exemple possible d'estimer la conductivité thermique suivant la direction normale au ruban en pivotant celui-ci de 90° , c'est-à-dire en le positionnant suivant la longueur de l'échantillon.

II.1.2.4. Etat de l'art

Dans l'étude conduite par (Gustafsson & Karawacki, 1983), la méthode du ruban chaud transitoire est mise en œuvre pour caractériser un isolant solide biosourcé et un isolant liquide. Ils mesurent en particulier la conductivité thermique et la diffusivité thermique d'un échantillon compact de bois humide. De même, plusieurs auteurs ont utilisé cette méthode pour caractériser les isolants classiques (Hu & al, 2018) et (Bippus & al, 2014). (Jeanot & al, 2007) appliquent la méthode du ruban chaud pour caractériser un échantillon anisotrope. Ils ont mesuré l'évolution de la température au centre du ruban chauffant dans deux directions différentes et en appliquant la méthode de Levenberg-Marquart pour la minimisation des erreurs quadratiques entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques, ils ont estimé la conductivité thermique et l'effusivité thermique.

II.1.3. Méthode du « Hot Disc »

II.1.3.1. Principe de la méthode :

La méthode du « **hot disc** », initialement nommée "source plane instationnaire" (Transient Plane Source), a été proposée par S.E. (Gustafsson, 1991) en s'inspirant des développements effectués sur la méthode du ruban chaud.

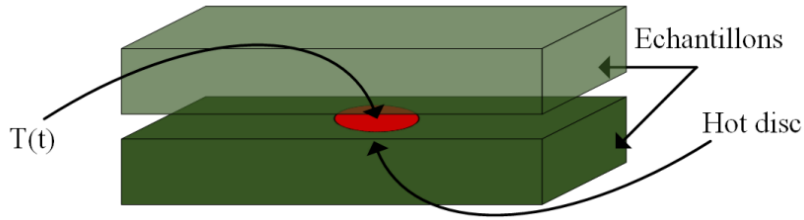


Figure 12 : Schéma de principe de la méthode du hot disc

Le dispositif de mesure associé à cette méthode est constitué d'un élément chauffant circulaire coincé entre deux échantillons. Comme la méthode du ruban chaud, la taille de l'échantillon est choisie de sorte que l'hypothèse du milieu semi-infini soit valable.

II.1.3.2. Estimation de la conductivité thermique

En négligeant l'inertie thermique de l'élément chauffant et les résistances de contact, la température moyenne de la sonde est exprimée par (Gustafsson, 1991):

$$T(t) = \frac{\phi}{\lambda r_s \pi^{\frac{3}{2}}} D_n(\tau) \quad \text{Équation 3}$$

Avec :

$$D_n(\tau) = \frac{1}{\tau [n(n+1)]^2} \int_0^\tau d\sigma \sigma^{-2} \quad \text{Équation 4}$$

$$* \left[\sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n k \exp\left(-\frac{l^2 + k^2}{4n^2 \sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2n^2 \sigma^2}\right) \right]$$

ϕ Désignant le flux de chaleur généré par l'élément chauffant,

$$\tau = \sqrt{\frac{at}{r_s^2}} \quad \text{Équation 5}$$

r_s le rayon de l'élément chauffant, λ étant la conductivité thermique et a la diffusivité thermique de l'échantillon à caractériser, I_0 est la fonction de Bessel modifiée d'ordre 0, et n le nombre de spire

II.1.3.3. Avantage et inconvénients

L'avantage de cette méthode par rapport aux autres méthodes est lié au fait que l'élément chauffant est coincé entre deux échantillons de plus grande taille en rendant donc négligeables les effets de bord. La température de l'élément chauffant est calculée à partir de la résistance électrique du fil électrique spiral, donc une mesure non destructive de la température (par opposition à une mesure par thermocouple) qui diminue la résistance de contact. Néanmoins, la température moyenne de l'élément chauffant est assez difficile à évaluer avec précision et nécessite de connaître parfaitement les propriétés de l'élément chauffant. L'autre inconvénient est lié aux perturbations générées par la connexion filaire de l'élément chauffant.

II.1.3.4. Etat de l'art

A travers la littérature, la méthode du hot disc est utilisée pour caractériser à la fois les solides et les liquides. (Warzoha & al, 2004) par exemple ont appliqué cette méthode à plusieurs liquides en mesurant des conductivités thermiques de 0,258 à 0,623 W.m-1.K-1 avec une erreur inférieure à 5%. (Dai & al, 2018) mettent également en œuvre la méthode du hot disc pour caractériser des composites d'aérogel de silice. Ils caractérisent d'abord l'aérogel de silice pur, puis la conductivité effective du composite est déduite en appliquant le modèle de Maxwell modifié.

II.1.4. Méthode du plan chaud

II.1.4.1. Principe de la méthode :

La méthode du plan chaud est l'extension de la méthode du fil chaud, en passant d'un élément chauffant filaire à un élément chauffant plan, comme le schématise la Figure. (Felix, 2011). En effet, dans la méthode du fil chaud, la morphologie du fil chauffant et l'hypothèse du milieu semi-infini supposent que les pertes thermiques aux extrémités du fil sont négligeables. Ce qui n'est pas toujours vrai et peut induire des erreurs de mesure. En remplaçant le fil chauffant par un élément chauffant plan, le flux thermique uniforme généré par l'élément chauffant crée un transfert unidirectionnel au centre de ce dernier en minimisant les pertes thermiques latérales.

Le dispositif expérimental de la méthode du plan chaud est constitué de l'élément chauffant plan coincé entre deux échantillons dont les faces sont de même surface que l'élément chauffant. L'ensemble est pris en sandwich entre deux blocs d'aluminium sous une pression réglable. L'élément chauffant génère un flux de chaleur qui traverse l'une des faces de chaque échantillon. Un thermocouple de type K constitué de deux fils fins ($15\ \mu\text{m}$) et fixé par un contact direct au centre de l'interface entre l'élément chauffant et l'échantillon, enregistre l'évolution de la température $T_c(t)$. Pour respecter l'hypothèse du milieu semi-infini, la température est relevée durant un intervalle de temps pendant lequel le flux thermique n'a pas encore atteint la face opposée de l'échantillon (Jannot & al., 2010).

Il existe deux configurations possibles de montage du dispositif du plan chaud : le montage symétrique (Figure 1.a) dans lequel les deux échantillons situés de part et d'autre de l'élément chauffant sont identiques et le montage asymétrique (Figure 1.b) dans lequel l'un des échantillons est le matériau à caractériser tandis que l'autre est fait d'un matériau dont les propriétés thermiques sont connues (échantillon de référence). Le montage symétrique convient pour les échantillons homogènes et isotropes et le montage asymétrique pour les matériaux anisotropes et hétérogènes pour lesquels il est difficile d'obtenir deux échantillons identiques (Jannot & al., 2011) ; (Laaroussi & al, 2014). La méthode du plan chaud peut être mise en œuvre en régime permanent pour mesurer la conductivité thermique ou en régime transitoire pour mesurer l'effusivité thermique

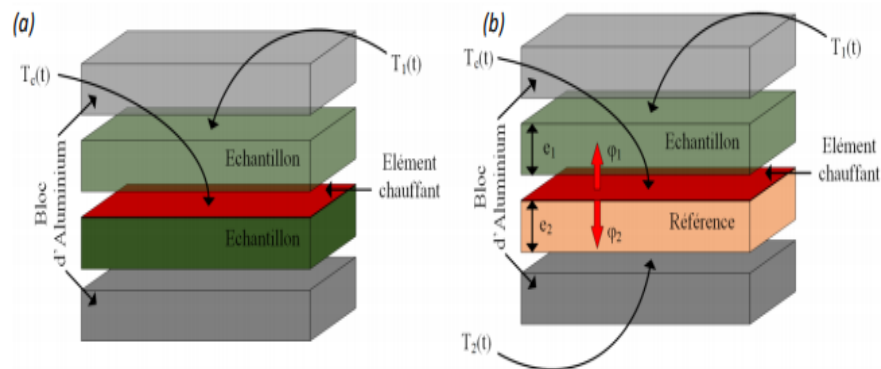


Figure 13 : Schéma de principe du dispositif plan chaud symétrique(a) et asymétrique (b)

Compte tenu de la morphologie plane du dispositif et de son montage, les hypothèses suivantes peuvent être faites :

Le transfert de chaleur au centre de l'élément chauffant est unidirectionnel et s'effectue dans l'épaisseur de l'échantillon suivant la normale à la surface de l'élément chauffant,

Les résistances de contact aux interfaces et avec le thermocouple sont négligeables étant donné que l'ensemble du dispositif est soumis à une pression constante tout au long de la manipulation,

La résistance thermique de l'élément chauffant est négligeable compte tenu de sa faible épaisseur (150µm).

L'aluminium étant un bon conducteur de chaleur, les faces libres des blocs d'aluminium sont sensiblement à la température ambiante.

A l'instant initial, le système est en équilibre thermique.

A l'aide d'un générateur de puissance, une tension U est appliquée aux bornes de l'élément chauffant et celui-ci génère un flux de chaleur ϕ dont les composantes ϕ_1 et ϕ_2 traversent chacun l'un des deux échantillons. Les températures $T_c(t)$ et $T_1(t)$ et $T_2(t)$ sont alors enregistrées pendant toute la durée de l'essai. Celle-ci est suffisamment longue pour permettre aux échanges thermiques d'atteindre le régime stationnaire.

II.1.4.2. Estimation des propriétés thermo-physiques

Comme déjà expliqué, la méthode du plan chaud permet d'estimer à la fois la conductivité thermique et l'effusivité thermique respectivement en régime permanent et en régime transitoire :

❖ Estimation de la conductivité thermique :

En négligeant les pertes latérales du flux thermique comme précédemment expliqué, le flux total ϕ dégagé par l'élément chauffant est égal à la somme des flux ϕ_1 et ϕ_2 traversant chacun l'un des deux échantillons :

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad \text{Équation 6}$$

avec $\phi = \frac{U^2}{RS}$ (Aghahadi M., 2018) étant respectivement la surface et la résistance électrique de l'élément chauffant et la tension appliquée à ses bornes.

❖ En régime stationnaire, la loi de fourrier permet d'écrire :

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{\lambda_1}{e_1}(T_c - T_1) \\ \phi_2 = \frac{\lambda_2}{e_2}(T_c - T_2) \end{cases} \quad \text{Équation 7}$$

On en déduit alors la conductivité thermique λ_1 de l'échantillon à caractériser en fonction des températures (correspondant à leurs valeurs en régime permanent) suivant le type de montage plan chaud comme suit :

En montage asymétrique, λ_1 est exprimé en fonction de la conductivité thermique λ_2 de l'échantillon de référence, :

$$\lambda_1 = \frac{e_1}{T_c - T_1} \left[\frac{U^2}{RS} - \frac{\lambda_2(T_c - T_2)}{e_2} \right] \quad \text{Équation 8}$$

❖ En montage symétrique,

$$\phi_1 = \phi_2 = \frac{\phi}{2} \quad \text{Équation 9}$$

et on obtient:

$$\lambda_1 = \frac{e_1}{T_c - T_1} \left[\frac{U^2}{2RS} \right] \quad \text{Équation 10}$$

Estimation de l'effusivité thermique : la température moyenne de l'élément chauffant aux temps longs dans un milieu semi-infini s'écrit (Felix, 2011) :

$$T_c(t) = \frac{\phi}{2SE\sqrt{\pi}} \sqrt{t} + cte \quad \text{Équation 11}$$

En traçant $T_c(t)$ en fonction de $\sqrt{t}$, la pente α de la partie linéaire de la courbe (en régime transitoire) permet de déduire l'effusivité thermique E, soit :

$$E = \frac{\phi}{2S\alpha\sqrt{\pi}} \quad \text{Équation 12}$$

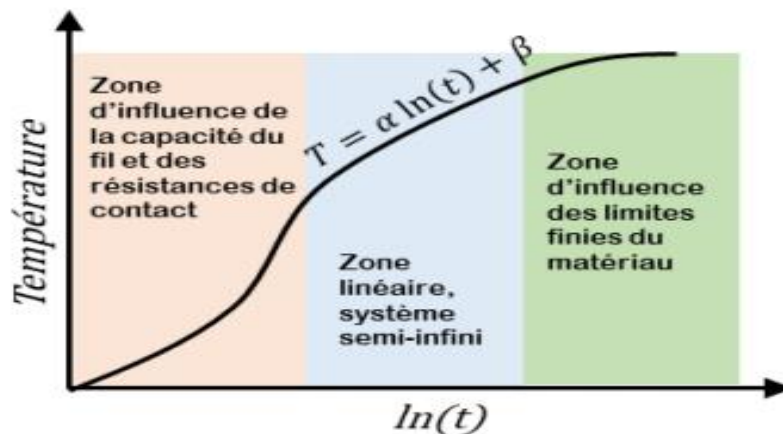


Figure 14 : Profil d'évolution de température $T_c(\sqrt{t})$ du fil chaud

II.1.4.3. Avantage et inconvénients

La précision, la rapidité et la simplicité de mise en œuvre sont les principaux avantages de la méthode du plan chaud. Le transfert unidirectionnel simplifie également le calcul de la conductivité thermique. Dans un milieu humide, la méthode n'est pas sensible à l'humidité et donne des valeurs précises. Le principal inconvénient de cette méthode est lié au fait que l'on néglige les pertes latérales. Ce qui diminue la précision de l'estimation des propriétés des isolants légers.

II.1.4.4. Etat de l'art

(Degiovanni, 1994) ont utilisé une sonde thermique plate pour mesurer l'effusivité thermique d'un matériau solide homogène dont la morphologie est très proche de celle du plan chaud. ont proposé un dispositif plan chaud qui est une approche complémentaire de la méthode du fil chaud. Ils ont utilisé le dispositif en régime transitoire pour estimer les propriétés thermo-physiques telles que la conductivité thermique et l'effusivité thermique.

(Jannot & al, 2010) ont utilisé le plan chaud en régime permanent pour estimer la conductivité thermique des matériaux d'isolation minces et le régime transitoire pour estimer l'effusivité thermique. Ils ont spécialement étudié les propriétés thermo-physiques des matériaux en PVC, des isolants de faible densité et des super-isolants. Une bonne reproductibilité est rapportée (environ 1%) pour ces matériaux. De plus, ils ont étudié le modèle de transfert de chaleur 3D et ont montré que le flux de chaleur est unidirectionnel, au centre du dispositif de mesure.

(Lamrani & al, 2017) ont utilisé cette méthode pour caractériser les isolants bio-sourcés. Ils ont utilisé un transfert de chaleur permanent pour estimer la conductivité thermique. Cependant, dans les deux études, l'effet de l'humidité est évité en séchant les échantillons.

(Damfeu & al, 2017) ont étudié l'influence de la teneur en eau dans les briques composites humides en utilisant l'approche asymétrique et un modèle de transfert de chaleur 1D. Ils ont montré une augmentation nette de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau des échantillons. Néanmoins, ils n'ont proposé aucun modèle théorique de transfert simultané de chaleur et d'humidité.

II.1.5. Méthode du tri-couche

II.1.5.1. Principe de la méthode :

La méthode du Tri-couche permet de mesurer les propriétés thermo-physiques des matériaux en régime transitoire. A partir de la mesure de la température moyenne de deux plaques de laiton entre lesquelles l'échantillon est coincé, la méthode du tri-couche est capable de mesurer la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique α des isolants et des supers isolants thermiques, même sur des échantillons de surface réduite et de faible épaisseur (Jannot & al, 2010).

Dans la littérature, il existe deux différents montages de ce dispositif, à savoir le dispositif du tri-couche plan pour mesurer la conductivité thermique des solides et le dispositif du tri-couche cylindrique pour mesurer celle des poudres.

II.1.6. Méthode du tri-couche plan

Le dispositif expérimental associé à cette méthode est constitué de deux plaques de laiton de rayon R présentant chacune une épaisseur $e_B = 1mm$. Un échantillon solide d'épaisseur e et de même rayon que les plaques en laiton sont coincé entre celles-ci (Figure 1.13). Deux thermocouples de type K sont soudés par la méthode du « contact séparé » sur les faces extérieures des plaques de laiton en gardant un écartement de 5 mm entre deux fils (Jannot & al, 2010). Un élément chauffant plan de rayon R est placé en contact direct avec la plaque de laiton inférieure. L'ensemble de ce système est placé sur un bloc isolant. La plaque supérieure (non chauffée) est maintenue sous pression avec une surface de contact très faible. Cette plaque de laiton échange la chaleur par convection naturelle et par rayonnement avec l'air et le milieu ambiants.

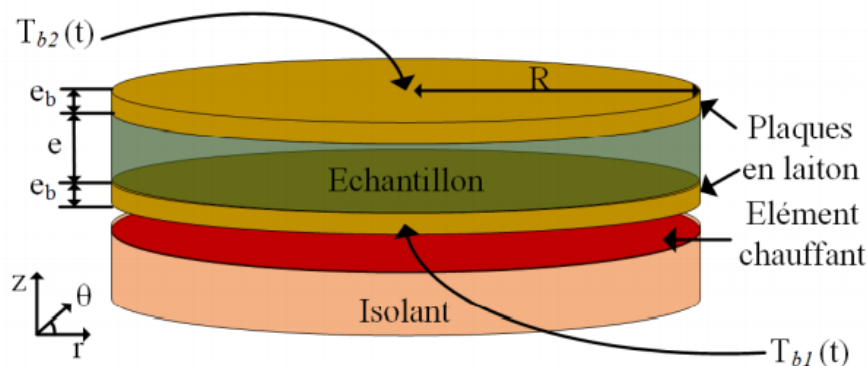


Figure 15 : Dispositif expérimentale du tri-couche plan

Un flux de chaleur d'une durée de quelques secondes est généré par l'élément chauffant dans le système et l'on enregistre l'évolution des températures $T_{b1}(t)$ et $T_{b2}(t)$ sur les faces

extérieures des plaques de laiton. La conductivité thermique de l'échantillon est alors estimée en minimisant l'écart quadratique entre le thermogramme expérimental et le thermogramme théorique.

II.1.7. Méthode du tri-couche cylindre

De nombreux matériaux, notamment des isolants thermiques en vrac, sont utilisés sous forme pulvérulente ou granulaire et il est indispensable de développer des méthodes adaptées pour déterminer leurs propriétés thermo-physiques. La méthode du fil chaud et la méthode du hot disc sont capables de mesurer ces propriétés moyennant quelques modifications mais elles présentent plusieurs inconvénients majeurs :

- ❖ Le nombre limité de points de contact entre l'élément chauffant et les particules du matériau granulaire,
- ❖ La faible précision sur des mesures effectuées sur des particules légères.
- ❖ La durée limitée du temps de mesure en vue de respecter l'hypothèse d'un milieu semi-infini.

Pour pallier ces inconvénients majeurs des méthodes du fil chaud et du hot disc, (Jannot & Degiovanni, 2013) ont proposé la méthode du tri-couche cylindrique. Le dispositif expérimental associé à cette méthode (Figure 1.14) est constitué de deux tubes coaxiaux entre lesquels est rempli l'échantillon pulvérulent. Le diamètre du tube intérieur (en inox) doit être assez grand pour créer plusieurs points de contact entre les particules de l'échantillon et les surfaces des tubes. Le tube extérieur (en laiton) est entouré par un élément chauffant flexible générant un flux de chaleur radial uniforme. Deux thermocouples sont fixés à mi-hauteur, l'un, sur la face extérieure du tube extérieur et l'autre sur la face intérieure du tube intérieur, et mesurent les températures respectives. Deux disques isolants maintiennent l'échantillon dans le cylindre et évitent le transfert de chaleur vers l'extérieur

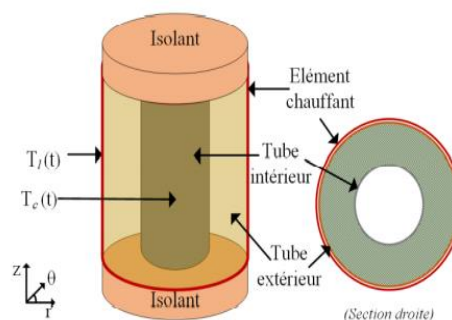


Figure 16 : Schéma de principe de la méthode du tri-couche cylindrique

L'élément chauffant crée un flux de chaleur qui est transmis au tube extérieur. Les thermocouples enregistrent les température $T_1(t)$ et $T_c(t)$. Connaissant les températures et le flux de chaleur, on peut alors en déduire la diffusivité thermique α et la capacité calorifique volumique ρC_p de l'échantillon.

II.1.7.1. Estimation des propriétés thermo-physiques.

Compte tenu de ce qui précède, la méthode du tri-couche permet d'estimer la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité calorifique volumique d'un échantillon. Dans le cas de la géométrie plane (Figure 1.15), en coordonnées cylindriques, l'équation de la chaleur s'écrit (Jannot & Degiovanni, 2009) :

Équation 13

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t}$$

Avec $\bar{T} = T(r, z, t) - T_i$ et T_i désigne la température initiale du système.

En considérant une température uniforme sur les plaques de laiton et la convection naturelle autour du dispositif, la solution de ce système est le résultat du produit de convolution de la transformée de Laplace inverse de la fonction de transfert avec la température (Jannot et al., 2009) :

Équation 14

$$T_{b2}(t) = T_{b1}(t) * \mathcal{L}^{-1}[\mathcal{H}(p)]$$

Avec $\mathcal{H}(p)$, la fonction de transfert définie par :

Équation 15

$$\mathcal{H}(p) = \frac{\theta(e, p)}{\theta(0, p)}$$

En utilisant une méthode de minimisation des erreurs quadratiques entre les températures expérimentales et théoriques, on estime les propriétés thermo-physiques du matériau à caractériser.

II.1.7.2. Avantage et inconvénients

L'avantage principal de la méthode du tri-couche est sa rapidité de mesure sur des échantillons de taille réduite. Pour les isolants légers, la précision de mesure est remarquable pourtant, la modélisation et l'estimation des paramètres restent assez compliquées par rapport à la méthode du plan chaud par exemple.

II.1.7.3. Etat de l'art

(Jannot & Degiovanni, 2009) ont proposé la méthode du tri-couche pour mesurer la conductivité thermique des isolants à faible densité avec des échantillons de taille réduite et présentant de faibles surfaces de contact. Ils expriment la fonction de transfert 3D du système en appliquant une méthode inverse et calculent la température de la face non-chauffée à partir d'un produit de convolution. Cette méthode donne une précision satisfaisante pour l'estimation de la conductivité thermique (erreur < 5%). En outre, ils procèdent à l'estimation de la diffusivité thermique par la minimisation des erreurs quadratiques. (Jannot & Degiovanni, 2013) ont ensuite proposé la méthode du tri-couche cylindrique pour mesurer les propriétés thermiques des matériaux secs en vrac tels que les poudres et les granulés. Cette méthode mesure à la fois la conductivité thermique λ et la capacité calorifique volumique ρC_p des matériaux isolants en vrac ($\lambda < 0,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) avec une précision supérieure à 5%. Les auteurs précisent néanmoins que cette méthode ne convient pas à la caractérisation thermique des matériaux humides en vrac comme toute méthode transitoire. (Bahrani & al, 2014) ont proposé deux améliorations de cette méthode qui permet de mesurer la conductivité thermique des isolants et super-isolant thermiques. Ils démontrent dans leur étude que l'épaisseur optimale de chaque plaque de laiton est de 1mm. Cette épaisseur assure une homogénéité satisfaisante de la température de la plaque. L'étude démontre ensuite que l'effet des pertes thermiques latérales pouvait être représenté par une simple résistance thermique parallèle à l'échantillon, notamment dans le cas des super-isolant.

II.1.8. Choix de la méthode de caractérisation :

Les méthodes usuelles de la métrologie thermique ont été exposées et peuvent être classées en méthodes classiques (plaque chaude gardée, flash disc, ruban chaud, hot disc, ...) et en méthodes modernes (tri-couche plan chaud, fil chaud parallèle) ces derniers étant une amélioration des premières. Le tableau 2 résume leurs principaux avantages et inconvénients.

Les inconvénients et limites des méthodes classiques montrent qu'elles sont peu adaptées à la caractérisation des isolants thermique, soit à cause des modèles physiques qu'elles implémentent soit à cause de la morphologie de l'isolant biosourcé.

En revanche, les méthodes modernes sont plus adaptées pour la caractérisation de ce type d'isolants thermiques, en partie, à cause de la taille réduite de l'échantillon et de son caractère hydrophile. La précision et la simplicité de mise en œuvre de ces méthodes nous ont conduit à choisir la méthode du fil chaud parallèle pour la suite de ce travail.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des méthodes de caractérisations

	Régime de mesure	Avantages	Inconvénients
Plaque chaude gardée	Permanent	Bonne précision	Matériaux dense, taille de l'échantillon, durée de la mesure
Fil chaud	Transitoire	Simplicité, rapidité	Taille de l'échantillon augmentant avec l'hétérogénéité
Ruban chaud	Transitoire	Matériaux anisotropes	Complexité de la mise en œuvre
Hot disc	Transitoire	Pas de perte thermiques latérales	Complexité de la mesure
Flash	Transitoire	Rapidité, bonne précision, matériaux légers	Complexité de la mesure
Tri-couche	Transitoire	Rapidité, bonne précision, matériaux légers	Complexité de la mesure
Plan chaud	Transitoire, permanent	Précision, rapidité, simplicité taille réduite	Pertes latérales thermiques pour les isolants légers

II.2. Modèles de transferts couplés

Différentes approches pour décrire les transferts couplés de chaleur et de masse sont proposées dans la littérature. La mise en place des équations de couplage des différents transferts est le fruit du travail de plusieurs chercheurs à l'instar de : Krischer et Kroll, Philip et De Vries et Luikov,, Jannot et Giovanni. Les formulations exprimant les différents bilans proposés par ces équipes, présentent de nombreuses analogies. Ces trois théories supposent que le milieu poreux est continu et localement en équilibre thermodynamique.

II.2.1. Théorie de Krischer

Cette théorie est basée sur l'analyse des transferts de chaleur et de masse d'une grande variété de milieu poreux. Elle suppose que l'humidité peut se déplacer sous forme liquide par capillarité, et sous forme vapeur sous l'action d'un gradient de concentration en vapeur. Les flux de vapeur et de liquide ont pour expressions :

$$\begin{cases} \vec{J}_l = -D_m^l \rho_l \overrightarrow{\text{grad}}(X) \\ \vec{J}_v = -D T_v \rho_v \overrightarrow{\text{grad}}(T) \end{cases} \quad (3)$$

Avec DT_v, D_m^l les valeurs respectives des coefficients de diffusion de vapeur d'eau et liquide. Ces valeurs peuvent être déterminées à l'aide des isothermes de sorption.

II.2.2. Modèle de Philip et De Vries (1957)

Philip et De Vries ont développé une théorie visant à modéliser les transferts de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux, ils décrivent les flux de vapeur de forme diffusif et liquide comme étant une fonction de la teneur en eau volumique et de la température. Ils ont considéré le transport de vapeur comme un processus diffusionnel régi par la loi de Fick. Et à partir de la loi de Darcy ils ont exprimé le flux en phase liquide :

$$\begin{cases} \vec{J}_v = -\rho_l(D_m^v \nabla X + DT_v \nabla T) \\ \vec{J}_l = \rho_l(D_m^l \nabla X + DT_l \nabla T - K) \end{cases} \quad (4)$$

D_m^v et D_m^l : Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide.

DT_v et DT_l : Coefficient de diffusion non-isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide.

X : la teneur en eau.

ρ_l : la masse volumique de l'eau.

Le modèle de Philip et De Vries considère le transfert de chaleur que par conduction et changement de phase, les équations différentielles générales décrivant les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux sont :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_m \nabla X) + \nabla(DT \nabla T) + \nabla k \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla(D_m^v \nabla X) \end{cases} \quad (5)$$

II.2.3. Modèle de Luikov

Luikov a mis en évidence le phénomène de thermo diffusion et établit qu'un thermo gradient provoque le déplacement de l'humidité à l'intérieur du matériau. Pour modéliser les transferts de chaleur et de masse dans les corps poreux, il propose la division des flux de liquide et de vapeur en deux parties, l'une induite par un gradient de concentration, et l'autre par un gradient thermique ; ce qui donne le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \vec{J}_v = -\rho_s(D_m^v \nabla X + DT_v \nabla T) \\ \vec{J}_l = -\rho_s(D_m^l \nabla X + DT_l \nabla T) \end{cases} \quad (6)$$

ρ_s : La masse volumique du solide sec

$$(7) \quad \begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_m \nabla X) + \delta_s \nabla(DT \nabla T) \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(DT \nabla X) - L_v \epsilon' \rho_s \nabla(D_m^v \nabla X) \end{cases}$$

X : Teneur en eau,

$D_v + D_l$: Coefficient de diffusion total,

$\delta_s = \frac{DT_v + DT_l}{D_v + D_l}$: Coefficient de thermo diffusion.

ϵ' : Taux de changement de phase qui est une fonction inconnue

Conclusion

Ce chapitre basé sur la revue bibliographique a permis de présenter quelques généralités sur le matériau bois et plus précisément les modes de transfert dans le bois. Il en ressort que le bois contient dans une moindre mesure des extractibles, des composés organiques de faibles poids moléculaires situés principalement dans la paroi cellulaire du duramen avec pour effet de réduire l'hygroscopicité et la perméabilité. Le bois contient également ; la cellulose, les hémicelluloses et la lignine qui sont d'ailleurs ses principaux constituant physique.

En métrologie thermique, le comportement thermique d'un matériau peut être plus ou moins influencé par des facteurs liés à l'environnement de la mesure, tels que les pertes thermiques, par la sensibilité des dispositifs et instruments de mesure ou par la résistance de contact et autres sources d'erreurs. Les modèles de transfert couplé de chaleur et de masse reposent sur le postulat qu'un milieu poreux est continu et localement en équilibre thermodynamique.

Dans le chapitre suivant il sera question de modéliser un type de transfert couplé chaleur-masse en application au fil chaud parallèle.

CHAPITRE III :

MODELISATION DE TRANSFERT COUPLE
CHALEUR-HUMIDITE APPLIQUEE A LA METHODE
DU FIL CHAUD PARALLELE

Introduction :

Le présent chapitre aborde l'approche théorique des transferts couplés chaleur-humidité au sein d'un matériau hydrophile. En effet, le transfert d'humidité a une interaction plus ou moins forte avec le transfert de chaleur, en influant de ce fait sur les propriétés thermophysiques de celui-ci. Ainsi, le gradient d'humidité influe sur le gradient de température et vice versa. Par conséquent, la modélisation du transfert de la chaleur au sein d'un matériau hydrophile en environnement humide s'accompagne nécessairement d'une modélisation simultanée du transfert d'humidité. Il sera donc question de modéliser les transferts simultanés de la chaleur et de l'humidité au sein des matériaux bois ; d'écrire une méthode de résolution numérique adaptée et de modéliser la méthode quadripolaire applicable au fil chaud parallèle

III.1. Modèle quadripolaire de transfert simple

Un certain nombre de méthode de caractérisation thermique sont devenues populaires du fait de la simplicité du mode d'exploitation des résultats, ce qui représentait un avantage décisif lorsque les moyens de calcul étaient plus limités qu'aujourd'hui. Dans cette catégorie nous pouvons ranger la méthode du plan chaud qui permet d'estimer l'effusivité thermique par simple estimation de la pente d'une courbe expérimentale de température. La méthode du fil chaud permet d'estimer la conductivité thermique par une méthode analogue en fait également partie. Ces méthodes simples reposent toutefois sur des hypothèses qu'il n'est pas toujours aisé de vérifier telles que l'inertie de sondes négligeables, milieu semi-infini. Le développement des moyens de calcul permet maintenant d'utiliser des modèles plus complets faisant appel à moins d'hypothèses simplificatrices.

La méthode quadripolaire est une méthode explicite exacte de représentation des systèmes linéaires. Basée sur les solutions analytiques des systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles résolus par une méthode de transformée intégrale ou de séparation des variables, elle constitue un formalisme qui permet la résolution rapide et efficace de problèmes dont la géométrie est suffisamment simple.

Le voisinage du fil chaud parallèle peut être schématiser de la manière suivante :

Considérons le cas d'un transfert unidirectionnel dans un cylindre d'épaisseur « r » comme décrit plus haut, la température $T(r, t)$ au sein du cylindre vérifie l'équation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial X_v}{\partial r} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \phi \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial X_v}{\partial r} = 0 \\ T_a = T_i \end{array} \right.$$

$$\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (8)$$

En appliquant la transformation de Laplace à cette équation on obtient :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} = \frac{p}{a} \theta \quad (9)$$

Cette équation admet pour solution :

$$\theta(r, p) = AI_0(qr_0) + BY_0(qr_0) \quad (10)$$

La condition limite pour $r=0$ implique que la fonction de Bessel $Y_0(qr_0) \rightarrow -\infty$ ce qui n'est physiquement pas acceptable, en effet la température doit rester finie et donc $B=0$. Ainsi, l'équation (10) devient :

$$\theta(r, p) = AI_0(qr_0) \quad (11)$$

On cherche aussi le flux Laplacien $\phi(r, p)$ qui découle directement de l'équation de Fourier et de la dérivation de θ par rapport à r .

Ainsi, la transformée de Laplace du flux s'écrit :

$$\phi(r, p) = L \left[-\lambda S \frac{\partial \theta(R, p)}{\partial r} \right] \quad (12)$$

Avec :

$$\theta(r, p) = AI_0(qr_0) \quad (13)$$

Les règles de dérivation des fonctions de Bessel permettent d'écrire la fonction matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ \psi_0 \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\omega & B_\omega \\ C_\omega & D_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(R, p) \\ \psi(R, p) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Résistance de contact entre le fil chauffant et le matériau bois

On considère maintenant le cas du transfert de chaleur à travers une résistance de contact R_c à l'interface entre deux l'élément chauffant et le bois.

Le flux de chaleur se note :

$$\phi = \frac{T_1(r=0) - T_2(r=0)}{R_c} \quad (15)$$

Avec $T_1(r=0)$ la température du fil et $T_2(r=0)$ la température de la face avant du matériau bois en contact avec le fil. Il en découle :

$$T_1(r=0) = R_c \phi + T_2(r=0) \quad (16)$$

On fait la transformée de Laplace de cette expression :

$$\theta_1(r=0) = R_c \phi + \theta_2(r=0) \quad (17)$$

On peut donc traduire cette dernière relation sous forme matricielle quadripolaire :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Le système matricielle finale donne

$$\begin{bmatrix} \theta_\omega \\ \frac{\psi_\omega}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\omega & B_\omega \\ C_\omega & D_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \frac{\psi_d}{p} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Soit :

$$A_\omega = 1 \quad (20)$$

$$B_\omega = \frac{1}{2\pi\lambda_\omega q r_\omega} \frac{I_\omega(q r_\omega)}{I_1(q r_\omega)} - \frac{1}{\rho_\omega C_\omega \pi r_\omega^2 L_p} \quad (21)$$

$$C_\omega = \rho C \pi r_\omega^2 L_p \quad (22)$$

$$D_\omega = \frac{q r_\omega}{2} \frac{I_\omega(q r_\omega)}{I_1(q r_\omega)} \quad (23)$$

$$\frac{1}{Z} = 2\pi\lambda L q r_\omega \frac{K_1(q r_\omega)}{K_\omega(q r_\omega)} \quad (24)$$

$$A_s = q_s d [K_1(q_s d) I_0(q_s r_\omega) + I_1(q_s d) K_0(q_s r_\omega)] \quad (25)$$

$$B_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s L} [K_0(q_s r_\omega) I_0(q_s d) - K_0(q_s d) I_0(q_s r_\omega)] \quad (26)$$

$$C_s = 2\pi L \rho_s C_s p r_\omega d [K_1(q_s r_\omega) I_1(q_s d) - K_1(q_s d) I_1(q_s r_\omega)] \quad (27)$$

$$D_s = q_s r_\omega [K_0(q_s d) I_1(q_s r_\omega) + K_1(q_s r_\omega) I_0(q_s d)] \quad (28)$$

Où :

θ_ω : est la transformée de Laplace de la température autour du fil

θ_d : est la transformée de la Laplace température à une distance d

$I_0; I_1; K_0; K_1$: sont des fonctions de Bessel modifiées

λ_ω : est la conductivité thermique du fil chaud

$\rho_\omega C_\omega$: est la capacité volumique du fil chauffant

a_ω : est la diffusivité thermique du fi chauffant

L : est la longueur du fil chauffant

r_ω : est le rayon du fil chauffant

d : est la distance entre le fil chauffant et le thermocouple

λ_s : est la conductivité thermique du matériau

$\rho_s C_s$: est la capacité volumique du matériau

a_s : est la diffusivité thermique du matériau

p : le paramètre de Laplace

R_c : est la résistance de contact entre le fil chauffant et le matériau

ϕ_ω est le flux thermique du fil chauffant

$$\frac{\psi_\omega}{p} = \left(C + \frac{D}{Z} \right) \theta_d \quad (29)$$

On a finalement :

$$\theta_d(p) = \frac{\frac{\psi_\omega}{p}}{\left(C + \frac{D}{Z}\right)} \quad (30)$$

Avec :

$$C = A_s C_\omega + C_s (C_\omega R_c + D_\omega) \quad (31)$$

$$D = B_s C_\omega + D_s (C_\omega R_c + D_\omega) \quad (32)$$

Si la résistance thermique du fil chauffant est négligée, on a la relation ci-dessous :

$$\theta_d(p) = \frac{\frac{\psi_\omega}{pL} K_0(q_s d)}{\rho_\omega C_\omega \pi r_\omega^2 p k_0 (q_s r_\omega) + 2\pi \lambda q_s r_\omega [1 + \rho_\omega C_\omega \pi r_\omega^2 p R_c L] K_1(q_s r_\omega)} \quad (33)$$

III.2. Modèle de transfert couplé chaleur masse

Un milieu poreux est un domaine matériel lacunaire qui possède des interstices susceptibles d'accueillir des fluides liquides ou gazeux (Mchirgui, 2012). Dans les conditions usuelles, un matériau poreux peut être décomposé en trois phases dont l'existence dépend des contraintes auxquelles le milieu sera soumis :

Une matrice solide cellulaire, alvéolaire ou fibreuse qui constitue le squelette matériel du milieu.

Une phase liquide constituée d'eau pure.

Une phase gazeuse constituée d'un mélange d'air et de vapeur d'eau. Air et vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits.

Le transfert de chaleur dans un matériau poreux hydrophile a une interaction plus ou moins forte avec le transfert d'humidité qui contribue lui-même au transfert de chaleur. L'eau présente dans le milieu poreux influe sur les paramètres thermiques par sa migration ou/et son changement de phase. Ainsi, la modélisation d'un transfert de chaleur au sein d'un matériau hygroscopique s'accompagne nécessairement de la prise en compte des mécanismes de changement de phase de l'eau. Les phénomènes des transferts couplés chaleur-humidité au sein du matériau poreux sont ici modélisés à l'échelle macroscopique. À cette échelle, un certain nombre d'hypothèses seront considérées :

La matrice solide est supposée homogène, continu et non déformable.

L'équilibre thermodynamique local entre les trois phases (solide, liquide, gaz) est atteint.

La phase gazeuse constituée de vapeur d'eau et d'air sec est un fluide parfait incompressible, à cause des faibles efforts mécaniques mis en jeux.

La fraction d'air sec est considérée comme immobile.

Les transferts radiatifs à l'intérieur du matériau négligé.

L'absence de réaction chimique à l'intérieur des matériaux (osmose).

L'absence de gel (le domaine de température utilisé est supérieur à 0°C).

L'effet de la gravité sur les transferts de masse négligé.

Le milieu poreux est supposé insaturé et indéformable.

Les transferts de chaleur et d'humidité dans le milieu sont unidirectionnels (dimension de l'épaisseur petit par rapport à la longueur et à la largeur).

La diffusion capillaire est négligée devant la diffusion Fickienne.

À l'échelle macroscopique, le flux de chaleur généré par l'élément chauffant vaporise l'humidité adsorbée au sein du matériau. Compte tenu de la grande taille des pores de l'échantillon et des conditions hygroscopiques expérimentales, la diffusion capillaire peut être négligée et le transport de la vapeur d'eau s'effectue principalement par la diffusion Fickienne au sein de l'isolant. Pour cette raison, on introduit la chaleur latente de vaporisation de l'eau dans le modèle simulant le transfert de masse et de chaleur et on se basera sur les modèles proposés dans la littérature pour simuler le séchage. (Perre et Degiovanni, 1990 ; Moyne et Perre, 1991 ; Qin et al., 2006 ; Abahri et al., 2011).

Le bilan de masse et de chaleur s'écrit à partir du modèle de Jannot et Degiovanni connue en coordonnée cylindrique.

III.2.1. Bilan de masse

L'équation du bilan de masse est constituée de divers potentiels d'humidité qui traduisent le mouvement des différentes phases existantes dans les pores et le comportement hygroscopique du matériau. Dans notre cas, le bilan de masse contient la proportion d'eau dans ses deux formes : liquide et vapeur. Ces proportions se déplacent sous l'effet des forces capillaires pour le transfert de la phase liquide (cependant, nous considérerons le transfert liquide inexistant dans notre cas) et par diffusion pour la phase vapeur. En zone diphasique la conservation de la masse est appliquée à chacune des deux phases mobiles en présence (liquide et vapeur). Le bilan massique effectué sur un volume élémentaire de liquide puis de vapeur permet s'écrire :

variation de masse d'eau liquide dans le volume dr

= quantité d'eau entrant en r – quantité d'eau sortant en $r + dr$
– quantité d'eau qui s'évapore

D'où :

$$(\rho_0 r dr) \frac{\partial X_l}{\partial t} = \left[-\rho_0 D_m^l \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^l \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]_r - \left[-\rho_0 D_m^l \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^l \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]_{r+dr} - \dot{m} r dr \quad (34)$$

$$(\rho_0 r dr) dX_l = \left[-\rho_0 D_m^l \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^l \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]_r dt - \left[-\rho_0 D_m^l \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^l \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]_{r+dr} dt - \dot{m} r dr dt \quad (35)$$

$\dot{m}$: est la quantité d'eau qui s'évapore par unité de volume de milieu poreux et par unité de temps ($\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$)

$$(\rho_0 r dr) dX_l = \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho_0 r D_m^v \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^v \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] dt dr - \dot{m} r dr dt \quad (36)$$

Liquide :

$$\rho_0 \frac{\partial X_l}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho_0 r D_m^l \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^l \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] - \dot{m} \quad (37)$$

Vapeur :

$$\rho_0 \frac{\partial X_v}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho_0 r D_m^v \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^v \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \dot{m} \quad (38)$$

Si on fait la somme des équations liquide et vapeur :

$$\rho_0 \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho_0 \left(r D_m \frac{\partial X}{\partial r} + (D_m^v \delta^v + D_m^l \delta^l) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (39)$$

Soit :

$$\rho_0 \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho_0 r D_m \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (40)$$

Avec :

$$D_m = D_m^l + D_m^v \quad (41)$$

$$D_m \delta = D_m^l \delta^l + D_m^v \delta^v \quad (42)$$

$$D_m^v = \left(\frac{\alpha}{\rho_0} \right) \left(\frac{D^*}{RT} \right) \left(\frac{M_v}{1-x_v} \right) (P_{vs}) \left(\frac{dHR}{dX} \right)$$

$$D_m^v = \left(\frac{\alpha}{\rho_0} \right) \left(\frac{D^*}{RT} \right) \left(\frac{M_v}{1-x_v} \right) (HR) \left(\frac{dP_{vs}}{dX} \right)$$

Pour $\alpha = 0$;

$D_T^v = 0$; $D_m^v = 0$. On se ramène à une équation de transfert simplifiée.

Si on reprend l'équation pour la vapeur et que l'on considère le terme d'accumulation petit par rapport au terme de transport et de changement de phase, alors :

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho_0 r D_m^v \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^v \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \dot{m} \quad (43)$$

Soit :

$$\dot{m} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho_0 r D_m^v \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta^v \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (44)$$

III.2.2. Bilan de chaleur

Sous l'hypothèse de l'existence d'un équilibre thermodynamique local entre les différentes phases du milieu poreux, la conservation de l'énergie est décrite par une équation globale, combinant la loi de Fourier qui représente le transfert de chaleur par conduction à laquelle est associé le terme relatif au changement de phase. Pour un volume élémentaire :

variation d'énergie par unité de volume du milieu dr

*= flux de chaleur entrant en r – flux de chaleur sortant en r + dr
+ terme de changement de phase.*

Soit :

$$\rho_0 C^* dT dr = - \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right]_r dt - \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r+dr} dt - \dot{m} L_v dt dr \quad (45)$$

$$\rho_0 C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \dot{m} L_v \quad (46)$$

On précise que :

$$\rho_0 C^* = \rho_0 (C_s + X_l C_l + X_v C_v) \simeq \rho_0 (C_s + X C_l) \quad (47)$$

Ce qui nous conduit au système suivant

$$\begin{cases} \rho_0 C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\lambda + \rho_0 D_m^v \delta^v L_v) r \frac{\partial T}{\partial r} + \rho_0 r D_m^v L_v \frac{\partial X}{\partial r} \right] \\ \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_m r \left(\frac{\partial X}{\partial r} + \delta \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \end{cases} \quad (48)$$

III.2.3. Conditions aux limites :

Le choix s'est porté sur des conditions aux limites de type Dirichlet (premier type). Mathématiquement cela revient à imposer des conditions aux limites que la solution d'une EDP doit vérifier. Dans le cas présent, des conditions aux limites de type Dirichlet reviennent à imposer des températures (solutions de l'EDP équation de la chaleur) et l'humidité aux frontières du matériau, c'est-à-dire aux interfaces : bois\milieu extérieur. Ce choix est fait pour

des raisons de simplification du processus expérimental traité dans le chapitre suivant. De cela nous pouvons écrire les conditions aux limites suivantes :

A l'instant initial, le matériau présente une teneur en eau X_a et une température T_a soit

$$\begin{cases} T_a = T_0 = T(r, 0) \\ X_a = X_0 = X(r, 0) \end{cases} \quad (49)$$

A l'interface entre l'échantillon et l'élément chauffant, soit $r=0$, on admet que le transfert de masse est très faible et que seul le flux de chaleur généré par l'élément chauffant est transmis à l'échantillon, soit :

$$\text{à } t > 0 \text{ et } r = 0 \quad \begin{cases} \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \phi \end{cases} \quad (50)$$

A $r=d$, on admet également que le transfert de masse est très faible et que la température de l'échantillon est égale à la température ambiante.

$$\text{à } t > 0 \text{ et } r = d \quad \begin{cases} \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \\ T = T_a \end{cases} \quad (51)$$

III.2.4. Propriétés Thermiques et Physiques des essences

Il est question de proposer les propriétés physiques et thermiques requis. Cependant il est important de noter que suivant la direction de coupe ces propriétés thermiques et physiques varient. L'utilisation de paramètres dans la direction tangentielle est privilégiée car présente une meilleure réponse thermique pour le confort.

Ainsi suivant le plan tangentiel, la conductivité thermique des espèces considérée varie entre 0.1 et $0.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Elle reste constante pour ces bois suivant la direction radiale et varie considérablement suivant la direction tangentielle (Mvondo & Al, 2019). Selon ce même Auteur, la conductivité thermique de l'essence de Bilinga, elle varie entre $0.175(\text{W}.m^{-1}.k^{-1})$ et $0.252(\text{W}.m^{-1}.k^{-1})$ pour une gamme de teneur en eau allant de 11.72 à 34.14 kg/kgsec . La capacité thermique volumique, la masse volumique évoluent de façon croissante avec la teneur en eau,

Les données de simulation sont regroupées dans le Tableau ci-contre.

Tableau 2 : Données de Simulations

Cas du Bilinga .

$X(\text{kg/kgsec})$	34.14	11.72
$\lambda(\text{W}.m^{-1}.k^{-1})$	0.252	0.175
$\rho c(\text{J}.m^{-3}.k^{-1})$	$1.92^{\circ}6$	$1.30^{\circ}6$

$\rho(kg.m^{-3})$	863	715
$Cp(J.kg^{-1}.K^{-1})$	2350.17	1907.00

D'après le CIRAD la teneur en eau d'usage des bois est de 12%. Le point de saturation de fibre de point de Bilinga se situe autour de 24% .

Les valeurs de l'intensité et de résistance électrique utilisées correspondent respectivement à celle délivrée par le générateur de tension et celle de la résistance chauffante.

Tableau 3: paramètres utilisés pour la simulation cas du bois de Bilinga

Paramètres	Valeurs
Températures initiales T(°C)	28
Pression de vapeur ambiante Pva(hPa)	1013.25
La pression totale P(hPa)	1013.25
Epaisseur de l'isolant e(m)	0.01
Intensité du courant I (A)	1.8
Resistance électrique du fil chauffant	5.28

III.3. Résolution Numérique du modèle de transfert couplé

III.3.1. Discrétisation des équations du transfert couplé :

Le cas présent d'étude s'intéresse à la résolution de l'équation de la chaleur et de l'humidité par la méthode des différences finies. Le schéma choisi est le schéma explicite, c'est un choix judicieux au regard de la stabilité conditionnée du schéma car on fixe le maillage en espace et le pas en temps est choisi tels que $\Delta t \leq \frac{\Delta r^2}{2\alpha}$. On s'intéresse au cas transitoire unidirectionnel, le cas le plus simple où les caractéristiques thermo-physiques sont constantes à chaque nœud de la discrétisation. Les principales étapes de calcul sont développées ci-après :

L'indexation spatiale est représentée par i et l'indexation temporelle par n le système d'équation nous donne :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = D_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \delta D_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\rho_0}{\rho C} \Delta H_v \frac{\partial X}{\partial t} \end{cases} \quad (52)$$

Le schéma explicite en 1D est basé sur la discrétisation de la figure où ϕ_w est le flux de chaleur du fil chauffant.

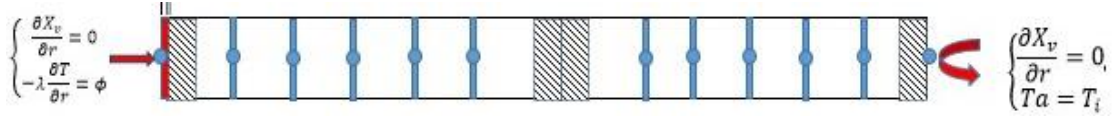


Figure 17 : Schéma de discrétisation radial 1D suivant l'épaisseur de l'échantillon

Le cas présent d'étude s'intéresse à la résolution de l'équation de la chaleur et de l'humidité par la méthode des différences finies. Le schéma choisi est le schéma explicite, c'est un choix judicieux au regard de la stabilité du schéma et des conditions aux limites. On s'intéresse au cas transitoire unidirectionnel, le cas le plus simple où les caractéristiques thermo-physiques sont constantes à chaque nœud de la discrétisation. Les principales étapes de calcul sont développées ci-après :

L'indexation spatiale est représentée par i et l'indexation temporelle par n le système d'équation nous donne :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = D_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \delta D_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\rho_0}{\rho C} \Delta H_v \frac{\partial X}{\partial t} \end{cases} \quad (53)$$

Après discrétisation du système d'équation on obtient :

$$\begin{cases} T_i^{n+1} - T_i^n = \frac{\Delta t}{\Delta r^2} a (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + a \frac{\Delta t}{r \Delta r} (T_{i+1}^n - T_i^n) \\ \quad + \frac{\rho_0}{\rho C_p} \Delta H_v (X_i^{n+1} - X_i^n) \\ X_i^{n+1} - X_i^n = \frac{\Delta t}{\Delta r^2} D_m (X_{i+1}^n - 2X_i^n + X_{i-1}^n) + \frac{D_m \Delta t}{r \Delta r} (X_{i+1}^n - X_i^n) \\ \quad + \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \delta D_m (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + \frac{\delta}{r \Delta r} D_m (T_{i+1}^n - T_i^n) \end{cases} \quad (54)$$

Bilan d'énergie

$$\begin{cases} T_0^{n+1} = T_a & \text{pour } i = 0 \\ T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta r^2} a (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + a \frac{\Delta t}{r \Delta r} (T_{i+1}^n - T_i^n) + \frac{\rho_0}{\rho C_p} \Delta H_v (X_{i+1}^n - X_i^n) \\ T_M^{n+1} = T_b & \text{pour } i = M \end{cases} \quad (55)$$

Posons : $k = \frac{\Delta t}{\Delta r^2} a$; $h = a \frac{\Delta t}{r \Delta r}$; $l = \frac{\rho_0}{\rho C_p} \Delta H_v$ on a :

$$\begin{cases} T_0^{n+1} = T_a & \text{pour } i = 0 \\ T_i^{n+1} = T_i^n + k(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + h(T_{i+1}^n - T_i^n) + l(X_{i+1}^n - X_i^n) \\ T_M^{n+1} = T_b & \text{pour } i = M \end{cases} \quad (56)$$

$$\begin{cases} T_0^{n+1} = T_a & \text{pour } i = 0 \\ T_i^{n+1} = (1 - 2k - h)T_i^n + (k + h)T_{i+1}^n + kT_{i-1}^n + lX_{i+1}^n - lX_i^n \\ T_M^{n+1} = T_b & \text{pour } i = M \end{cases} \quad (57)$$

Bilan de masse :

$$\begin{cases} X_0^{n+1} = X_a & \text{pour } i = 0 \\ X_i^{n+1} = X_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta r^2} D_m (X_{i+1}^n - 2X_i^n + X_{i-1}^n) + \frac{D_m}{r} \frac{\Delta t}{\Delta r} (X_i^{n+1} - X_i^n) \\ \quad + \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \delta D_m (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + \frac{\delta}{r \Delta r} D_m (T_{i+1}^n - T_i^n) \\ X_M^{n+1} = X_b & \text{pour } i = M \end{cases} \quad (58)$$

Posons : $\omega = \frac{\Delta t}{\Delta r^2} D_m$; $\eta = \frac{D_m}{r} \frac{\Delta t}{\Delta r}$; $z = \frac{\delta}{r \Delta r} D_m$ on a :

$$\begin{cases} X_1^{n+1} = X_a & \text{pour } i = 1 \\ X_i^{n+1} = X_i^n + \omega(X_{i+1}^n - 2X_i^n + X_{i-1}^n) + \eta(X_i^{n+1} - X_i^n) \\ \quad + \omega\delta(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + z(T_{i+1}^n - T_i^n) \\ X_M^{n+1} = X_b & \text{pour } i = M \end{cases} \quad (59)$$

$$\begin{cases} X_1^{n+1} = X_a & \text{pour } i = 1 \\ X_i^{n+1} = (1 - 2\omega - \eta)X_i^n + \omega X_{i-1}^n + (\eta + \omega)X_{i+1}^n \\ \quad + (z + \omega\delta)T_{i+1}^n - (z + 2\omega\delta)T_i^n + \omega\delta T_{i-1}^n \\ X_M^{n+1} = X_b & \text{pour } i = M \end{cases} \quad (60)$$

III.3.2. Discrétisation des conditions aux limites et initiales :

Conditions initiales de la teneur en eau et de la température deviennent :

$$\begin{cases} X_{r,1} = X_a & \text{pour } t = 0 \\ T_{r,1} = T_a & \text{pour } t = 0 \end{cases} \quad (61)$$

Les conditions aux limites s'écrivent :

Pour $r=0$

$$\begin{cases} X_{1,t}^{n+1} = X_1^n - 2\alpha_D(X_2^n - X_1^n) & \text{pour } i = 1 \\ T_1^{n+1} = T_1^n + 2\alpha_r \left(T_2^n - T_1^n - \frac{\Delta r}{\lambda} \phi \right) - 2\alpha_L(X_2^n - X_1^n) - H(T_1^n - T_{\text{ext}}^n) & \text{pour } i = 0 \end{cases} \quad (62)$$

Pour $r=d$

$$\begin{cases} X_{N,t}^{n+1} = X_N^n - 2\alpha_D(X_{N-1}^n - X_N^n) & \text{pour } i = N - 1 \\ T_{N-1}^{n+1} = T_{N-1}^n + 2\alpha_r(T_{N-2}^n - 2T_{N-1}^n + T_N^n) + \alpha_L(X_N^n - X_{N-1}^n) - H(T_N^n - T_{\text{ext}}^n) & \text{pour } i = M \end{cases} \quad (63)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, il était question de modéliser le transfert couplé de chaleur et de masse. Il ressort que :

L'équation du bilan de masse est constituée de divers potentiels d'humidité qui traduisent le mouvement des différentes phases existantes dans les pores et le comportement hygroscopique du matériau

Sous l'hypothèse de l'existence d'un équilibre thermodynamique local entre les différentes phases du milieu poreux, la conservation de l'énergie est décrite par une équation globale, combinant la loi de Fourier qui représente le transfert de chaleur par conduction à laquelle est associé le terme relatif au changement de phase.

La méthode des quadripôles est une méthode explicite exacte de représentation des systèmes linéaires. Basée sur les solutions analytiques des systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles résolus par une méthode de transformée intégrale ou de séparation des variables, elle constitue un formalisme qui permet la résolution rapide et efficace de problèmes dont la géométrie est suffisamment simple.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction :

Dans ce chapitre est présentée l'évolution de la température à une distance « d » du fil chaud. L'élévation de température simulée par le modèle couplé pour différentes valeurs de teneurs en eau est comparée au modèle des quadripôles thermiques.

IV.1. Comparaison des modèles de températures

Pour chacune des teneurs en eau présentées dans le tableau du chapitre II, les Thermogrammes à une distance « d » du thermocouple sont calculés par le modèle de transfert couplé et par le modèle des quadripôles. Pour une comparaison idéale, des simulations aux temps courts sur une durée de 1500 s, qui semble être un bon compromis afin de garantir la stabilité du programme de simulation.

IV.1.1. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11% et 34%

Les courbes des figures 18 et 22 présentent l'évolution de la température à une distance « $d=0.05\text{m}$ » de l'échantillon. Les valeurs de teneurs en eau utilisées sont de 11% et 34% pour l'essence de Bilinga. Les courbes des résidus permettent d'analyser l'écart quadratique entre les deux modèles simulés sur toute la durée de simulation.

IV.1.1.1. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11%

La courbe de figure 18 montré une évolution des deux modèles de transfert ; le modèle couplé et le modèle quadripolaire pour une teneur en eau faible de 11% du bois Bilinga.

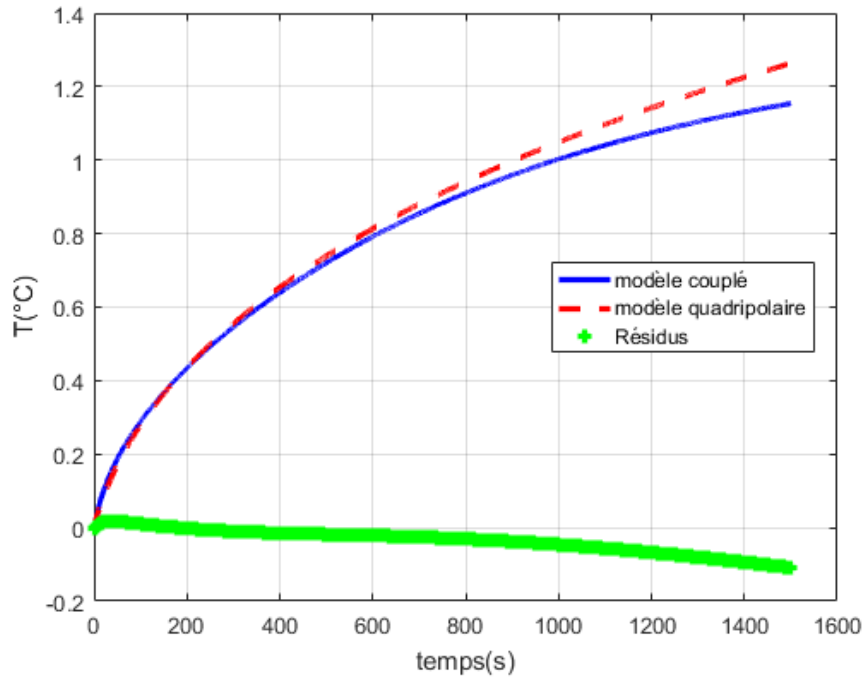
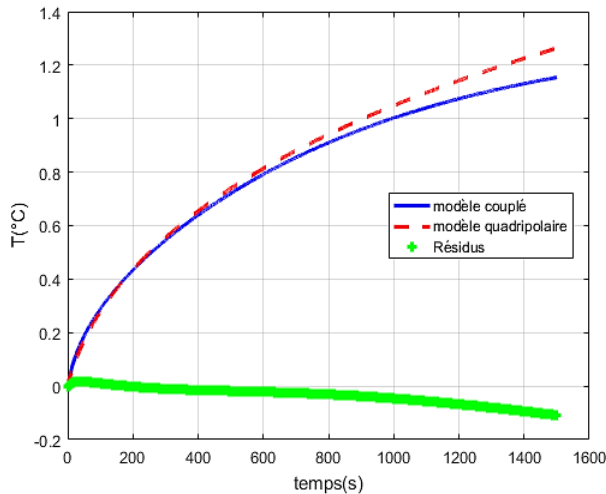


Figure 18 : Thermogrammes de températures : (a) Bilinga à X=11%

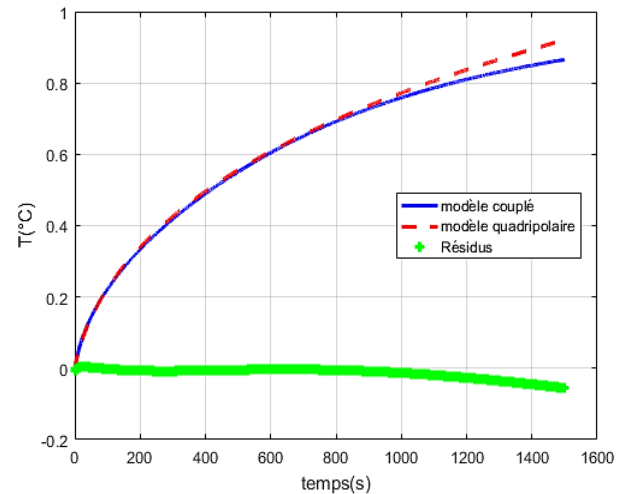
On observe que pour de faible teneur en eau la courbes des résidus reste centré en zéro pour un temps inférieur à 600s. ceci peut être dû au fait que pour des teneurs en eaux inférieurs à 11% l'eau est liée aux squelette du bois et la faible mobilité des molécules d'eaux est dû à la superposition de quelques couches d'eaux liées (Nadeau & Puiggali, 1995). Les modèles classiques de simulations restent valides pour les teneurs en eau faible et temps court (Bobda & al.,2021).

IV.1.1.2. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11% et 34% : étude comparative

Les courbes des figures 19.a et 19.b montrent une évolution des deux modèles de transfert ; le modèle couplé et le modèle quadripolaire pour une teneur en eau faible de 11% et 34%



(a)



(b)

Figure 19 : Thermogrammes de températures : : (a) Bilonga à X=11%, (b) ; Bilonga à X=34%,

On observe que pour une teneur en eau de 11% la courbe des résidus reste centrée en zéro pour un temps court de 600s et pour une teneur en eau de 34% la courbe des résidus reste centrée pour un temps plus long de 800S. Ceci peut être dû au fait que le temps de chauffage est court pour les faibles teneurs en eau ; les processus de transfert évoluent plus rapidement pour des faibles teneur eau et prennent du temps pour des teneurs en eau élevée (Mvondo & al.,2019) de même le milieu étant moins froid (teneur en eau 11%), le temps de préchauffage est plus court ; l'augmentation de teneur en eau favorise moins le transfert de chaleur pour les temps court (Carlos,2017).

IV.1.1.3. Thermogrammes simulés pour les teneurs en eau 11%

La courbe de la figure 20 montre une l'évolution des deux modèles de transfert ; le modèle couplé et le modèle quadripolaire pour une teneur en eau élevée de 35%.

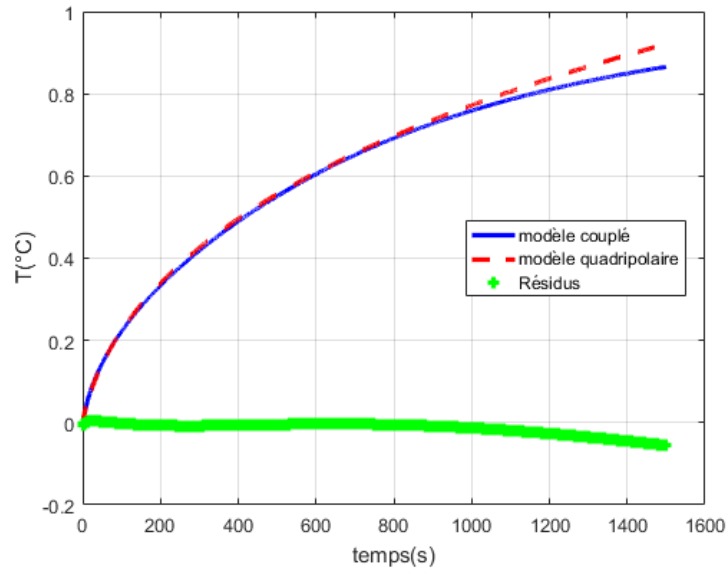
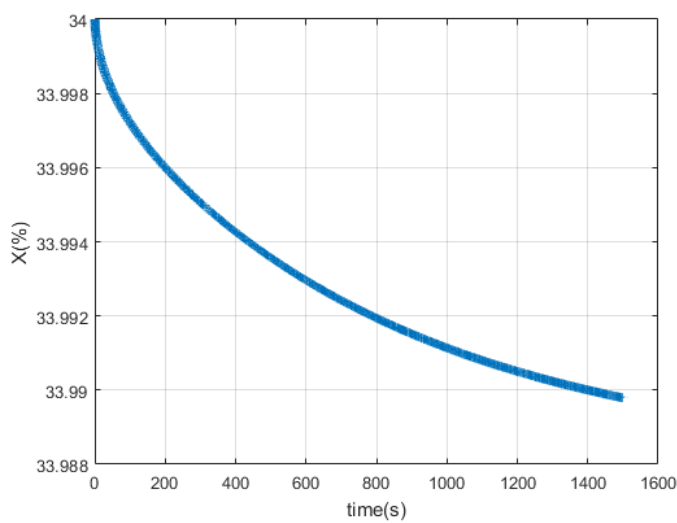


Figure 20 : Thermogrammes de températures du bilinga pour une teneur en eau de 34%

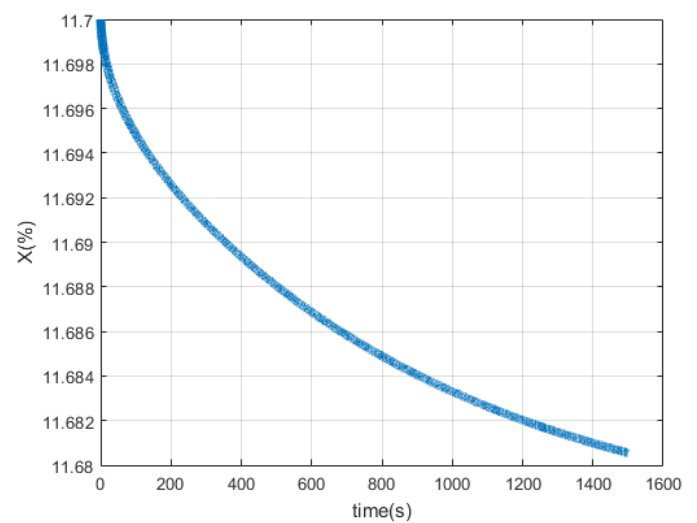
On observe pour cette teneur en eau après un certain temps les modèles en sont plus unidirectionnels. La présence des résidus montre que la teneur en eau a une influence significative sur les propriétés thermophysique du bois les résidus n'étant plus centré en 0 indique que le modèle quadripolaire développer n'est plus valide pour estimer les propriétés thermochimiques du bois (Mvondo & al.,2019).

IV.1.2. Analyse du comportement hydrique

Les figures 21 (a) et 21 (b) présentent les profils de teneur en eau du Bilinga à une distance « $d=5\text{mm}$ » du thermocouple.



(a)



(b)

Figure 21 : Humidité à la surface de bois : (a) Bilinga à $X=34\%$; (b) Bilinga à $X=11\%$

On observe de légères diminutions de la teneur en eau quelques soient le niveau de teneur en eau au sein du matériau. Ceci peut être dû au fait que le gradient en Eau est faible pour la distance considérée (Janot & Bal, 2022). Ces courbes décroissent et au bout d'un certain temps la vitesse de décroissance diminue progressivement ; probablement dû au fait que lorsque le séchage progresse, l'évaporation devient de plus en plus difficile du fait de la température qui temps vers l'équilibre.

IV.1.2.1. Analyses des coefficients de diffusions de masse

IV.1.2.1.1. Variation avec le temps

L'évolution du coefficient de diffusion de masse non isotherme sur la face chauffée du bois Bilinga est présentée par la figure 22 pour une teneur en eau de 34%. On peut observer l'évolution des coefficients de diffusion massique non isotherme en fonction du temps.

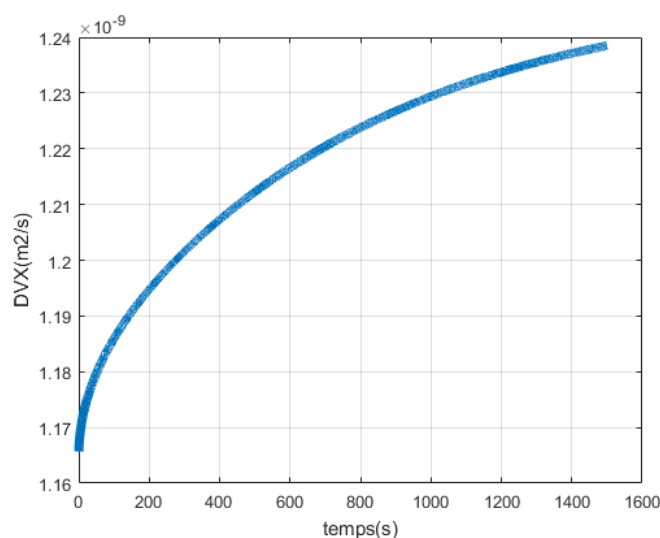


Figure 22 : Coefficients de diffusion massique non isothermes, Bilinga à X=34%

L'évolution du coefficient de diffusion de masse non isotherme sur la face chauffée est présentée par la figure 23 pour une teneur en eau : 11% pour le Bilinga. On peut observer l'évolution des coefficients de diffusion massique non isotherme en fonction du temps.

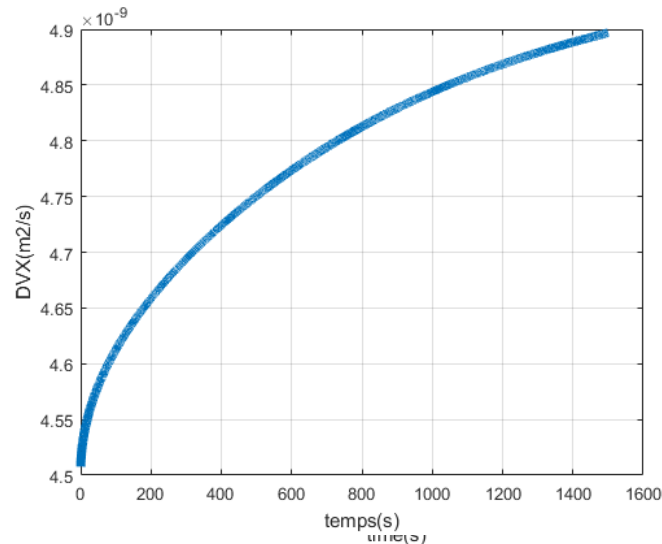


Figure 23 : Coefficients de diffusion massique non isothermes, (a) Bilinga à X=11%,

On peut observer une augmentation du coefficient de diffusion non isotherme avec le temps. Elle varie de $1,16 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à $1,24 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le Bilinga pour une teneur en eau de 34%. Pour la teneur en eau de 11% du Bilinga, le coefficient de diffusion massique non isotherme varie de $4,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à $4,9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; soit une différence $4 \cdot 10^{-10}$. En effet, le coefficient de diffusion non isotherme a pour moteur le gradient de teneur en eau qui lui-même augmente au cours du temps grâce à l'élévation de température (SAMRI, 2008). Ce qui se traduit alors par une augmentation de la vitesse de diffusion de l'eau vapeur dû au gradient de teneur en eau D_x^v (Aghahadi M. , 2018).

IV.1.2.2. Analyse des coefficients de diffusion massique isotherme

IV.1.2.2.1. Variation avec le temps

La variation du coefficient de diffusion isotherme avec le temps présenté à la figure 24 rend compte du mouvement de la phase vapeur en fonction du temps à la surface du Bilinga pour une teneur de 34% .

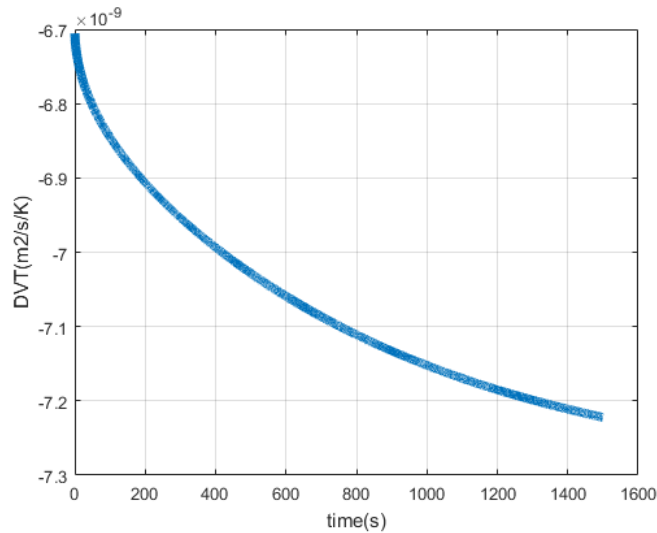


Figure 24 : Coefficients de diffusion massique isothermes, Biluga à X=34%,

La variation du coefficient de diffusion isotherme avec le temps présenté à la figure 25 rend compte du mouvement de la phase vapeur en fonction du temps à la surface du Biluga pour une teneur en eau de 11%.

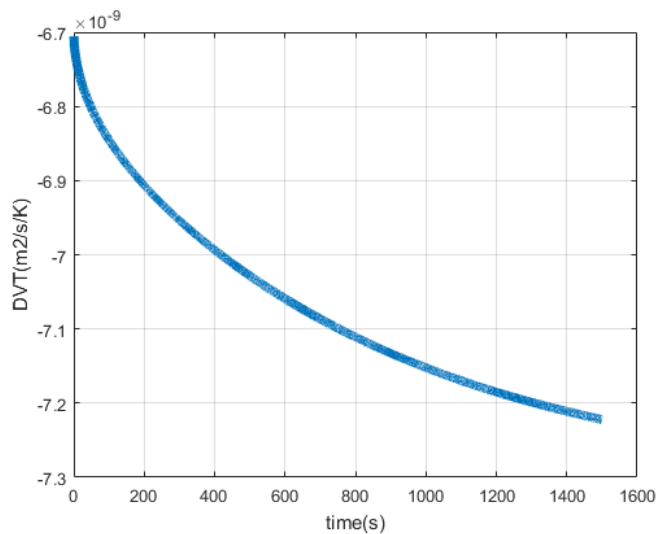


Figure 25 : coefficients de diffusion massique isothermes, (a) Biluga à X=11%

Contrairement au coefficient de diffusion non isotherme, l'évolution du coefficient de diffusion isotherme est décroissante en fonction du temps. Elle passe de $-6,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à $-7,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le Biluga avec une teneur en eau respectifs 34% et de $-6,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à $-7,2 \cdot 10^{-9}$ pour une teneur en eau de 11,2% .

On Observe une diminution importante de l'élévation du coefficient de diffusion non isotherme lorsque l'on passe de 34% à 11% de teneur en eau. Donc une baisse de la diffusivité avec la teneur en eau ; on peut conclure que l'humidité influence sur le transfert de chaleur (De Vries 1958) et (Ali, 2016).

Conclusion :

Dans ce chapitre, il était question d'analyser et de discuter suivant les résultats obtenus de la simulation du transfert couplé de chaleur et de masse. Il ressort que :

Pour des essences de bois de moins de 11% de teneurs en eau, les fibres sont occupées par l'eau lié le modèle quadripolaire reste valable pour les différentes mesures.

Les processus de transfert évoluent plus rapidement pour des faibles teneurs en eau par rapport au teneur en eau élevé.

Pour des teneurs en eau élevés, le point de saturation des fibres est atteint il devient donc plus difficile de faire des mesures ; la teneur en eau a une influence significative sur le transfert de chaleur.

le coefficient de diffusion non isotherme a pour moteur le gradient de teneur en eau qui lui-même augmente au cours du temps grâce à l'élévation de température.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux développés durant ce mémoire ont porté sur l'étude des mécanismes de transfert de chaleur et de masse au sein de matériaux poreux « le bois ». L'objectif de montrer les limites du modèle quadripolaire par rapport au modèle couplé de transfert de chaleur et de masse.

Une présentation des Généralités du bois à tout d'abord été réalisée. Ce descriptif a permis d'introduire l'ensemble des propriétés anatomique, physique, thermique et hydrique nécessaire au développement du modèle couplé. Il a été aussi montrer que la connaissance de ces différentes propriétés du bois est une étape indispensable et déterminante pour la modélisation du transfert couplé. Le choix c'est basé sur l'un des plus commercialisé et des plus utilisé des espèces ; le Bilinga (*Nauclea diderrichii*) il a une densité élevée, il est utilisé pour la construction des charpentes et clôtures. L'espèce choisi a une bonne durabilité et peut être utilisé sans traitement de préservation et se déforme difficilement pendant le séchage.

La modélisation numérique du transfert couplé chaleur-humidité appliquée à la caractérisation thermique des bois tropicaux a été conduite comme suit : dans un premier temps une modélisation en une dimension par éléments finis a permis de valider au préalable les hypothèses simplificatrices du dispositif expérimental fil chaud parallèle. Fort de cette validation, une modélisation 1D a été conduite en discrétisant les équations des transferts couplé chaleur-humidité par un schéma de différences finies puis résolu par le code MATLAB.

La Simulation numérique a révélé que le modèle couplé est un alternatif crédible aux méthodes classiques de métrologie thermique qui, en général, ne prennent pas en compte le transfert de l'humidité dans les matériaux hydrophiles alors que le transport d'humidité contribue en partie au transfert de la chaleur. Cette démarche propre à l'étude menée dans ce présent mémoire permet de tenir en compte l'influence de l'humidité sur les paramètres du modèle.

Les coefficients thermophysiques insérés dans nos équations sont ceux obtenus avec nos bois et présentés dans la littérature (Mvondo & al., 2019). Il ressort que le modèle couplé chaleur humidité est en accord avec le modèle quadripolaire pour des temps court. Elle montre aussi la nécessité de prendre en compte les phénomènes de transfert d'humidités pour optimiser les méthodes de caractérisations thermiques des matériaux humides, on peut ainsi que constaté que la prise en compte du transfert couplé chaleur humidité favorise une meilleure estimation du transfert thermique au sein des matériaux poreux et de meilleure déduction sur le matériau à utiliser pour un confort thermique de l'habitat. En perspective pour gérer efficacement le transfert de chaleur dans les habitats et utiliser moins les méthodes de refroidissement tels que ventilations, climatisation et afin de réduire toute dépense de consommation d'énergie, une étude entre les propriétés thermiques de bois Bilinga et sa microstructure s'avère nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Aburatti, & Cinzia. (2009). adaptative analysis of thermal comfort. *Building and environment*.
- Aghahadi, Mohamed. (2018). Physical modeling of heat and moisture transfert in wet bio sourced insulating materials. *American Institute of Physics*.
- Aghahadi, Mohamed. (2019). Etude expérimentale et modélisation physique des transferts couplés chaleur-humidité dans un isolant bio-sourcé. *these*.
- Abdulla & al., (2009). impact of instant controlled pressure drop treatment on moisture adsorption isotherm of cork granules. *Drying Technology*.
- Aléon & al. (1990). Séchage du bois:Guide pratique. *CTBA*.
- Ali, C. (2016). Etude du comportement thermo-hydrique des parois des batiments. influence des effets de l'etat hygrothermique et des propriétés thermo-physiques. *Thèse de Doctorat, spécialités: génie climatique, laboratoire de génie climatique, faculté des sciences de la technologie-campus Ahmed Hamani Constantine I*.
- Andrade & al. (2011). models of sorption isotherms for food vitae.
- Aquaportail. (2023). l'aquariophilie pour des aquariums modernes. *Dictionnaire*. Récupéré sur <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/636/autotrophe>
- Atom. (s.d.). J'aime pas les arbres. Récupéré sur <http://jaimepaslesarbres.blogspot.com/p/dendro-biologie.html>
- Azarfar, & Beigzadeh. (2016). Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids. *Applied Thermal Engineering*.
- Bahrani, & al. (2014). Physic-based modeling of simultaneous heat and mass transfer intensification during vacuum steaming process of starchy material. *Chemical Engineering and Processing:Process intensification*.
- Bippus, & al. (2014). Thermal conductivity of treated mesoporous silica particles. *Microporous and Mesoporous Materials*.
- Bjork, & Rasmunson. (1995). Moisture equilibrium of wood and dark in superheated steam. *Fuel(74)n°12,1887-1890*.
- Blomberg. (2006). Mechanical and physical properties of semi-isostatically densified wood. *Doctoral dissertation*.
- Bobda, Francklin. & al. (2022). Thermal properties measurement of two tropical wood species as a function of their water content using the parallel hot wire method. *Thèse de Doctorat*.

- Bohnke, I. (2013). Etude expérimentale et théorique des traitements thermiques du bois. Caractérisation physico-mécanique des bois traités. *thèse*.
- Bohnke, I. (2013). Etude expérimentale et théorique des traitements thermiques du bois. Caractérisation physico-mécanique des bois traités. *HAL Open science*, 9.
- Carlos, H. (2017). Impact de la teneur en eau et de l'épaisseur sur les propriétés thermophysiques de deux essences de Bois Tropicaux. *Master de Recherche en efficacité Energétique et Energie Renouvelable*, 74.
- Cherif, H. (2013). free vibration analysis of rotating composite blades via carrera unified formulation.
- Chugoua, & Kemajou. (2018). Etude expérimentale du comportement thermique d'un local avec enveloppe de bois 'Iroko' dans la ville de Douala au Cameroun. *revue des Energies Renouvelables Vol.21 N°2(2018)217-230*.
- Coquard, & Quenard. (2006). Experimental and theoretical study of hot-wire method applied to low-density thermal insulators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Dai, & al. (2018). A theoretical model for the effective thermal conductivity of silica aerogel composites. *Applied Thermal Engineering*.
- Damfeu, & al. (2017). Modelling and experimental determination of thermal properties of local wet building materials. *Energy and buildings*.
- Darcy, & H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon, exprime le débit Q d'un fluide incompressible qui s'écoule en régime stationnaire au travers d'un milieu poreux de section A.
- Degiovanni. (1994). Conductivité et diffusivité thermique des solides. *Techniques de l'ingénieur*.
- Desch & Dinwoodie. (196). Timber: structure, properties conversion and use. *7th ed. Macmillan press Ltd., London*.
- Djamel, G. (2014). Simulation numérique de transfert couplé de chaleur et d'humidité dans un milieu poreux.
- Djossou. (2014). Etude des variations des propriétés thermophysiques et de la durabilité, en fonction de l'humidité des éco-matériaux de construction au Bénin. *Thèse de Doctorat*.
- Ducoulombier, L. W. (2019). Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment. *thèse*.
- FAuteux, A. (2017). le mur qui respire mythes et réalités. *La maison du 21e siècle*. Récupéré sur <https://maisonsaine.ca/bioconstruction/le-mur-qui-respire-mythes-et-realites>

- Felix. (2011). caractérisation thermique de matériaux isolants légers. application à des aérogels de faibles poids moléculaire. *Thèse de doctorat en mécanique et énergétique*.
- Florent, A. (2013). Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois jusqu'à 300°C: Transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques. *Hal Open science*, 6.
- Franco. (2007). An apparatus for the routine measurement of the thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied thermal engineering*.
- FU, Q. (2019). Comportement physique, chimique et mécanique du bois suite à la compression sous l'effet de la chaleur et de l'humidité. *Québec: Université Laval, [2019]*.
- Furmaniak & al. (2007). Applicability of the generalised Darcy and Watt model to description of water sorption on pineapple and other foodstuffs. *Food engineering*.
- Geovana. (2005). Propriétés physico-mécaniques de trois bois au dessous et au-dessus de la saturation des membranes. *Memoire de maître en science, Université de laval, Avril*.
- Givoni, & Baruch. (1981). conservation and the use of integrate-passive energy systems in architecture. *Energy and buildings*. Récupéré sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778881900074>. 23
- Guo, & al. (2018). Measurement of the thermal conductivity of SiO₂nanofluids with an optimized transient hot wire method. *Thermochimica Acta*.
- Gustafsson. (1991). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of scientific instruments*.
- Gustafsson, & Karawacki. (1983). Transient hot-strip probe for measuring thermal properties of insulating solids and liquids. *Review of scientific instruments*.
- Harrington. (1998). modeling the elastic properties of softwood. (*part I : the cell lamellae*).. *Holz als Roh-und werkstoff*.
- Harrington, J. (1998). *modeling the elastic properties of softwood(Part I: The cell-wall lamellae)*. . *Holz als Roh -und werkstoff*.
- Hu, & al. (2018). Transient hot strip measures thermal conductivity of organic foam thermal insulation materials. *Experimental Thermal and fluid science*.
- Yves, Jannot , & Al. (2017). A passive guard for low thermal conductivity measurement of small samples by the hot plate method. *Measurement Science and Technology*.
- Yves, Jannot. (2003a). Isothermes de sorption: modèles et détermination. Récupéré sur www.thermique55.com/principal/sorption

- Yves, Jannot, & Al. (2004). Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip. *Measurement Science and Technology*.
- Yves, Jannot, & al. (2010). A centered hot plate method for measurement of thermal properties of thin insulating materials. *Measurement Science and Technology*.
- Yves, Jannot, & al. (2010). Thermal Conductivity measurement of insulating materials with a three layers device. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Yves, Jannot, & al. (2011). A centered hot plate method for measurement of thermal properties of thin insulating materials. *Measurement Science and Technology*.
- Yves, Jannot., & al. (2011). Measurement of the thermal conductivity of thin insulating anisotropic material with a stationary hot strip method. *Measurement Science and Technology*.
- Yves, Jannot, & al. (2017). A passive guard for low thermal conductivity measurement of small samples by the hot plate method. *Measurement Science and Technology*, 28(1),15008.
- Yves, Jannot, & al. (2017). Transfert thermique. *laboratoire Energies et Mecanique théorique et Appliquée*.
- Yves, Jannot, & Degiovanni. (2009). Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device. *International Journal of Heat an Mass Transfer*.
- Yves, Jannot, & Degiovanni. (2013). Thermal properties measurement of dry bulk materials with a cylindrical three layers device. *Review of Scientific Instruments*.
- Krapez. (2007). Mesure de l'effusivité thermique Méthodes par contact. *Techniques de l'ingénieur*.
- Laaroussi, & al. (2014). Measurement of thermal properties of brisk materials based on clay mixtures. *Construction and Building Materials*.
- Lamrani, & al. (2017). Experimental study of themal properties of a new ecological building material based on peanut shells and plaster. *Case Studies in Contruction Materials*.
- Laurent, & al. (1995). influence de la teneur en eau et de la température sur la variation de la conductivité thermique d'un beton, cellulaire autoclave. *groupe d'étude au laboratoire des transferts en hydologie et environnement*.
- Makomra, V. (2020). modélisation du comportement au séchage des contreplaqués collés à létat vert. *thèse de Doctorat*.
- Marquez, E. L. (2018). Transferts de chaleur et de masse en milieu sédimentaire et fracture: MOdélisation numérique de la convection naturelle autour du site géothermique de Soultz (Graben du Rhin). *These*.

- Mchirgui, W. (2012). modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique -Application aux matériaux cimentaires.
- Merakeb , S. (2006). Modélisation des structures en bois en environnement variable . *Thèse de Doctorat, Université de Limoges*, 26 septembre.
- Moutee Mohssine. (2006). Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage. *Thèse de Doctorat, Université de Laval*.
- Mvondo, Rachel., & al. (2019). Influence of moisture content on the thermophysical properties of tropical wood species. *springer-verlag GmbH Germany, part of Springer Nature*.
- Nabil, & Khodadadi. (2017). Computational/analytical study of the transient hot wire-based thermal conductivity measurements near phase transition. *International Journal of Heat and Mass Transfet*.
- Nadeau , & Puiggali. (1995). séchage, des processus physiques aux procédés industriels. *Paris, New york, Londres, Tec and DOc*.
- Oliva., J. P. (2001). l'isolation écologique.conception, matériaux, mise en oeuvre. *Ed, Terre vivante*.
- Othman, H. C. (2013). les écoulements dans les milieux poreux partiellement saturé. *Master en Génie Civil*, 19.
- P -Y, & Lagrée. (2010). équation de la chaleur,. *cours MECAVENIR*.
- Pakowski & al. (2007). Prédiction of sorption equilibrium both in air and superheated steam drying of energetic variety of willow salix viminalis in a wide temperature range. *Fuel*(86) 1749-1757.
- Peron, & al. (2020). Thermal properties of wood: measurements by transient plane source method in dry and wet conditions. *Journal of physics: Conference Series*.
- Poliana. (2003). Influence de la temperature sur les assemblages bois. *Thèse*, 103.
- Pont, S. D. (2004). coupling between permeability and damage in correcte. *thèse de Doctorat*.
- Qilan. (2019). Comportement physique, chimique et mecanique du bois suite à la compression sous l'effet de la chaleur et de l'humidité. *Thèse Doctorat en sciences du bois*.
- R, F. (1982). Influence de l'humidité sur la consommation énergétique d'un bâtiment en chauffage discontinu (modélisation et couplage des phénomènes). *l'humidité dans le bâtiment. Séminaire de l'UNESCO*, 147-186.
- Robert D, & Catesson AM. (1990). organization végétative. (Doin, Éd.) *volume 2 de biologie végétale*, 256.

- SAMRI, D. (2008). Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique. 2020.
- Sibile charpente. (s.d.). Charpentier des cimes. *Isolation/economie d'énergie*.
- Simpson et TenWolde. (1999). Physical properties and moisture relations of wood. *from forest products laboratory, Wood handbook*.
- Staudt, & al. (2013). A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: extension to the GAB model. *food engineering*.
- Tagne, S. (2011). Contribution à l'étude du séchage des bois tropicaux au cameroun: Aspects caractérisation, modélisation multi-échelle et simulation. le cas des bois d'Ayous et d'ébène. *thèse de Doctorat*.
- TropiX 7.0. (2017). les principales caractéristiques technologiques de 245 essences forestières tropicales. *Cirad*. Récupéré sur <https://www.tropix.cirad.fr>
- Trouy, M. (2016). Anatomie. *Fun Mooc*.
- Varnier, M. (2019). Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus: des sciences du bois à l'ingénierie. *HAL Thèse*.
- Warzoha, & al. (2004). Determining the thermal conductivity of liquids using the transient hot disk method. Part I: Establishing transient thermal-fluid constraints. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- wiki. (s.d.). Récupéré sur <http://fr.wikipedia.org/conduction.thermique>
- Yves, J. (2003a). isothermes de sorption: modèles et détermination. Récupéré sur www.thermiques55.com/principal/sorption