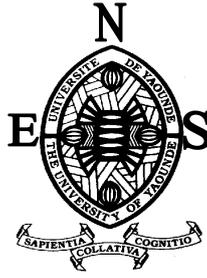


REPUBLIQUE DU CAMEROUN
PAIX-TRAVAIL-PATRIE

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEURE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON
PEACE-WORK-FATHERLAND

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER TRAINING
COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

**ÉTUDE COMPARÉE DES ISOTHERMES DE
DESORPTION DES BOIS TROPICAUX MI-LOURDS
(Sapelli, Iroko) et LOURDS (Ebène, Azobé)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur de l'Enseignement Secondaire
Deuxième grade (D.I.P.E.S. II)*

Par :

EBOUEM BOUEM JEAN STEPHANE

Licencié en Physique

Matricule : 06Y597

Sous la direction de :

Dr NSOUANDELE JEAN LUC

Chargé de cours Université de Maroua

Année académique : 2015/2016

DEDICACE

A mes regrettés parents EBOUEM JEAN ET BELANE JEANNE.

REMERCIEMENTS

Mon remerciement va tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné pour terminer ce modeste travail.

Je remercie mon encadreur Dr NSOUANDELE JEAN LUC qui m'a aidé, dirigé et orienté à la rédaction de ce mémoire.

Le chef du département de physique de l'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé, Pr BEGUIDE BONOMA, qui durant toute ma formation a toujours développé en moi, un enthousiasme pour que je sois un enseignant apte à aimer son métier.

J'adresse également mes remerciements à tous les enseignants du Département de Physique de L'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé.

Je remercie également tous les étudiants sans exception, du Département de Physique de L'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé.

A tout le personnel du LYCEE de BONIS dans le département du LOM et DJEREM dans la région de L'Est CAMEROUN.

Enfin, je remercie tous mes proches.

TABLE DE MATIERE

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DE MATIERE	iii
RESUME.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre 1 : PRESENTATION DU MATERIAU BOIS.....	2
I. Etude anatomique du matériau bois.....	2
I.1 Définition	2
I.2 Anisotropie du bois	2
I.2.1 Structure du bois	2
I.2.2 Structure ligneuse du bois et classification botanique.....	3
I.2.3 Structure anatomique du bois	4
I.2.4 Aspects microscopiques	4
I.2.5 L'eau dans le bois	6
I.2.6 Composition chimique du bois	7
I.3 Propriétés physiques du bois.....	8
I.3.1 Taux d'humidité et équilibre hygroscopique.....	8
I.3.2 Variations dimensionnelles du bois	8
I.3.3 Masse volumique.....	9
I.4 Les propriétés mécaniques du bois.....	10
I.4.1 Propriétés élastiques	10
I.4.2 Propriétés de résistance mécanique	10
I.5 Définition des notions d'isotherme et de désorption	11
I.5.1 Définition d'une isotherme	11
I.5.2 Définition de la désorption	11
Chapitre 2 : MATERIEL ET MODE EXPERIMENTAL DE DETERMINATION DES ISOTHERMES DE DESORPTION	13
II.1 Présentation du matériel utilisé.....	13

II.2 Présentation des essences tropicales.....	14
II.2.1 L'Azobé.....	14
II.2.2 L'Ebène.....	14
II.2.3 L'iroko.....	15
II.2.4 Le sapelli.....	16
II.3 Dispositif utilisé pour effectuer la désorption.....	16
II.4 Méthode utilisée pour déterminer une isotherme de désorption.....	17
II.5 Modèles mathématiques.....	18
Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	20
III.1 Présentation des résultats.....	20
III.2 Estimation des paramètres des courbes.....	25
III.3 Résultats de modélisation des isothermes de désorption des bois tropicaux.....	26
III.4 Résultats analytiques.....	29
Chapitre 4 : IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF DU SUJET.....	33
IV.1 Objectif pédagogique.....	33
IV.2 La fiche pédagogique.....	33
IV.3 Intérêt didactique.....	33
IV.4 Fiche élève.....	33
IV.5 Conclusion.....	36
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	38

RESUME

L'interaction entre la variation de l'humidité relative dans l'environnement et les caractéristiques mécaniques, physiques du bois demeurent un problème complexe dans l'utilisation et la durabilité de ce matériau dans de divers domaines de la vie courante. En dépit du fait que le bois est un matériau hygroscopique, susceptible de perdre et de reprendre de l'humidité en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant, il possède en lui des caractéristiques qui lui donnent une certaine spécificité. Cette spécificité est à l'origine de plusieurs autres phénomènes que l'on observe généralement dans ce dernier. Dans le sujet ayant fait l'objet de notre étude dans ce mémoire, il a été demandé ici de faire la comparaison des bois tropicaux mi-lourds et lourds sur leurs isothermes de désorption. Pour cela, nous avons été amenés à savoir s'il existe une particularité sur chaque type de bois, puisqu'au regard des différentes caractéristiques présentées par ces derniers, nous avons relevé à partir des expériences faites certains constats sur chacun des bois. Durant le traitement de notre sujet, nous avons fait une présentation du matériau sur ses différents aspects, à la suite desquels nous avons enrichi d'avantage nos connaissances sur ce qui se présentait comme étant quelque chose d'inexplicable sur le bois. Par la suite, nous avons possédé à une étude expérimentale des différents bois disposant d'un matériel, des appareils, et des méthodes appropriés qui nous ont permis d'avoir des premières idées sur le problème qui a été posé à savoir l'existence ou pas d'une relation entre les deux types de bois tendant ainsi vers l'objectif visé. A la suite de ce qui a été fait dès l'entame de notre sujet, nous avons pu donner une idée sur la comparaison des isothermes de désorption des bois tropicaux lourds et mi-lourds sur la base des différents résultats expérimentaux et théoriques qui en découlaient. Une justification a été faite, nous amenant ainsi à affirmer que les deux types de bois n'ayant pas les mêmes propriétés ont des isothermes de désorption différentes, conduisant par la suite à la classification de ces derniers à deux types de famille de bois, que sont les mi-lourds et lourds.

Mots clés : Humidité relative – mécaniques – physiques – hygroscopique – température - isothermes de désorption.

ABSTRACT

The interaction between the humidity of the environment and the mechanical and physical characteristics of wood remains a problem in the use and durability of this material in various aspects of life. Despite the fact that wood is a hygroscopic material liable to lose or gain humidity according to the temperature and atmospheric conditions, it has characteristics specific to it. These specific characteristics give rise to other phenomena generally noticed in wood. In this study, we set out to make a comparison between heavy and light –heavy tropical wood in its isothermal changes. In order to do this, we had to find out if there is a particularity in each wood species, given the various characteristics shown by them, we came up with results from experiments carried out on each wood. In our study, we made a presentation of the material in its various aspects and further increased our knowledge on issues which hitherto could not be explained with regard to wood. Then, we proceeded to the experimental study of various types of wood, using material, instruments and appropriate methods, which enabled us to have a basic knowledge of the problem we set out to solve, that is, if there is a relation or not between the two types of wood. Following what was done at the beginning of this study, we came up with an idea on the comparison of heavy and light –heavy tropical wood following results from theory and experiments. A justification was made; leading us to state that the two types of wood do not have the same properties, as well as different isothermal changes.

Keywords: relative humidity - mechanical - physical – hygroscopic – temperature – isothermal changes.

LISTE DES ABREVIATIONS

- L : Direction longitudinale suivant l'axe de l'arbre.
- R : Direction radiale perpendiculaire aux cernes de l'arbre.
- T : Direction tangentielle perpendiculaire aux deux autres directions formant un trièdre de référence servant à définir les mesures dans une pièce de bois.
- m_w : Masse d'eau contenue dans le bois (kg).
- m_o : Masse de bois à l'état sec (kg).
- W : Taux d'humidité d'un bois.
- β : Coefficient de retrait-gonflement du bois.
- Δl : Variable dimensionnelle du bois (m, cm, mm) .
- l : Dimension donnée du bois (m, cm, mm).
- ΔW : Variation de la teneur en eau.
- ρ : Masse volumique du bois (kg/m^3)
- M : Masse donnée du bois (kg)
- V : Volume du bois (m^3).
- M_e : Masse d'équilibre du bois (kg).
- M_s : Masse sèche du bois (kg).
- T : Température ($^{\circ}\text{C}$).
- X_{eq} : Teneur en eau d'équilibre (%).
- Hr : Humidité relative.
- Ln : Logarithme népérien.
- A et B : Paramètres des modèles et dépendant de la température.
- r : Coefficient de corrélation.
- E : Estimation moyenne des écarts entre la courbe théorique et la courbe expérimentale (%).
- N : Nombre de points expérimentaux.
- X_m : Teneur en eau expérimentale(%).
- X_{the} : Teneur en eau théorique(%).

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Plans ligneux : plan transversal, plan tangentiel, plan radial du bois.	2
Figure 1.2: Axes préférentiels (L, R, T) d'une pièce de bois : BOUSSOUGOU (2012 ,10) ...	3
Figure 1.3: Structure d'un tronc d'arbre.....	4
Figure 1.4: Structure de résineux : vue schématique (a) et vue au microscope électronique (b) à balayage (Passas 2008), NGUYEN (2014 ,8).	5
Figure 1.5: Structure de la paroi cellulaire	5
Figure 1.6: Schéma de distribution de l'eau dans la structure de bois.	6
Figure 1.7: Structure du bois à l'échelle macroscopique et à l'échelle moléculaire.	8
Figure 1.8: Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois d'après : BOUSSOUGOU (2012 ,14)	9
Figure 1.9: Relation entre masse volumique, largeur des cernes et module d'élasticité.	10
Figure 2.1: Une balance électronique	13
Figure 2.2: Un thermomètre numérique	13
Figure 2.3: Un hygromètre	13
Figure 2.4: Le bois Azobé (Ciradtropic 5, 2005)	14
Figure 2.5: Le bois Ebène (Ciradtropic 5 ; 2005).....	15
Figure 2.6: Le bois Iroko (Ciradtropic 5 ; 2005).....	15
Figure 2.7: Le bois Sapelli (Ciradtropic 5, 2005).....	16
Figure 2.8: Dispositif expérimental utilisé pour la détermination d'un point d'isotherme de désorption d'un échantillon.	16
Figure 3.1: Les isothermes de désorption de l'Ebène à différentes températures.	20
Figure 3.2: Les isothermes de désorption de l'Azobé à différentes températures.....	21
Figure 3.3: Les isothermes de désorption de l'Iroko à différentes températures.	21
Figure 3.4: Les isothermes de désorption du Sapelli à différentes températures.	22
Figure 3.5: Les isothermes de désorption des bois à la température de 20°C.....	23
Figure 3.6: Les isothermes de désorption des bois à la température de 30°C.	23
Figure 3.7: Les isothermes de désorption des bois à la température de 40°C.	24
Figure 3.8: Les isothermes de désorption des bois à la température de 50°C.	24
Figure 3.9: Isotherme de désorption de l'Ebène pour différentes températures.	27
Figure 3.10: Isotherme de désorption de l'Azobé pour différentes températures.	28
Figure 3.11: Isotherme de désorption de l'Iroko pour différentes températures.	28
Figure 3.12: Isotherme de désorption du Sapelli pour différentes températures.....	29

Figure 3.13: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à 20°C.....	30
Figure 3.14: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à ..	31
Figure 3.15: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à .	31
Figure 3.16: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à 50°C.....	32
Figure 4.1: Processus de détermination des propriétés mécaniques du bois.....	34
Figure 4.2: Comportement du bois sous l'effet de l'eau.....	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Sels et humidité relative de l'air pour la détermination des points d'équilibre. 18	
Tableau 3.1: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Ebène)..... 25	
Tableau 3.2: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Azobé)..... 25	
Tableau 3.3: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Iroko). 25	
Tableau 3.4: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Sapelli)..... 26	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le bois constitue l'une des principales ressources naturelles du globe terrestre. C'est une richesse naturelle qui revêt d'une haute importance environnementale que presque tous les pays possèdent ou qu'ils peuvent créer et renouveler indéfiniment. Sa production et sa transformation s'intègrent ainsi, dans un processus de développement durable. Il a longtemps été et reste encore l'un des matériaux de préférence que l'on retrouve dans presque tous les secteurs de la vie. De part son origine biologique, le bois est un matériau hétérogène dont la qualité est définie en fonction de son adéquation à l'usage donné. Ceci est le reflet de l'ensemble des propriétés physico-mécaniques, structurelles et chimiques du bois, découlant directement de son mode de fabrication qui dicte les modalités et variations de sa structure multi-échelles (dimension et proportion des cellules constitutives, agencement micro et nanoscopique, composition chimique). Les bois tropicaux sont utilisés généralement pour : les ouvrages portuaires, constructions hydrauliques, traverses des chemins de fer, ponts, la menuiserie, etc. ... Ces bois peuvent servir également en aménagement extérieur (portails, vérandas, pergolas) à condition de maîtriser leurs emplois présentant un risque d'humidification permanente. Au Cameroun, le Sapelli, l'Iroko, l'Ebène et l'Azobé sont des essences de bois de plus en plus prisées. Les deux premiers sont des bois tropicaux mi-lourds et les deux derniers des bois tropicaux lourds. L'utilisation efficace de ces derniers face aux difficultés d'humidification et de température nécessite la connaissance et la détermination de leurs isothermes de désorption. Dans ce mémoire, nous allons mener une étude comparée des isothermes de désorption des bois cités plus haut. Cette étude vise à établir la relation entre la teneur en eau, l'humidité relative et la température des ces bois à l'équilibre.

La première partie est consacrée à la présentation détaillée du matériau bois. Dans la deuxième partie, après avoir présenté le matériel expérimental, nous nous intéressons à la méthodologie de détermination des isothermes de désorption de nos bois tropicaux lourds et mi-lourds. La troisième partie est réservée aux résultats et à la discussion. La quatrième et dernière partie présente les implications pédagogiques de notre mémoire. Une conclusion générale achèvera le travail avec des perspectives à envisager.

Chapitre 1 : PRESENTATION DU MATERIAU BOIS

I. Etude anatomique du matériau bois

I.1 Définition

Le bois est un matériau composite d'une très grande complexité, NGUYEN (2014, 5) caractérisé par une hétérogénéité aux différentes échelles physiques et présentant un comportement fortement anisotrope. Le bois peut aussi être défini comme la matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc, les racines des arbres et des arbrisseaux. La description du matériau bois à différentes échelles de structure permet de comprendre ses caractéristiques hygroscopiques.

I.2 Anisotropie du bois

I.2.1 Structure du bois

La structure du bois peut être assimilée à un polymère complexe qui possède une organisation micro-structurale extrêmement élaborée. Le bois est anisotrope, car sa structure est différente selon la direction suivant laquelle on l'observe, nécessitant une observation sur trois plans perpendiculaires : Le plan transversal perpendiculaire à l'axe de la tige dont l'on peut observer les cernes annuels ; le plan radial passant au centre de la tige et le plan tangentiel parallèle à l'axe de la tige et tangent aux cernes annuels. Ces différents plans sont illustrés par la figure représentée ci-dessous :

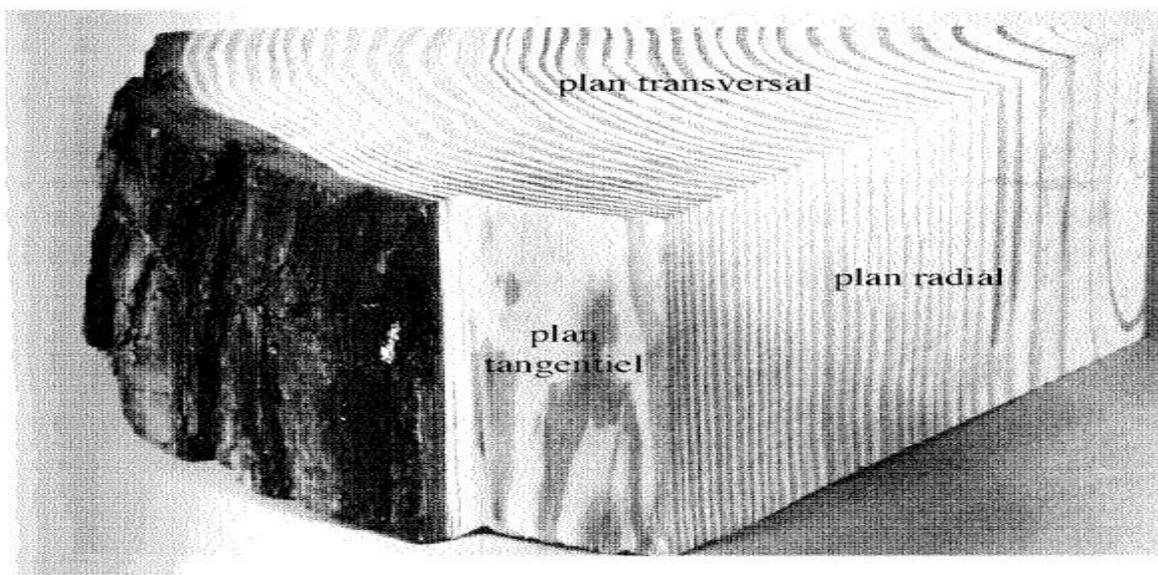


Figure 1.1: Plans ligneux : plan transversal, plan tangentiel, plan radial du bois.

Les propriétés mécaniques du bois varient suivant la direction de sollicitation considérée. En effet, le bois possède une structure cellulaire orientée principalement selon la direction de l'axe du tronc. Le bois est un matériau dont les propriétés varient suivant la direction de sollicitation considérée. (BOUSSOUGOU, 2012).

On distingue trois directions privilégiées :

- Une direction longitudinale L suivant l'axe de l'arbre.
- Une direction radiale R perpendiculaire aux cernes de croissance de l'arbre.
- Une direction tangentielle T perpendiculaire aux deux autres directions formant un trièdre de référence servant à définir les mesures dans une pièce de bois. Le schéma représente ci-dessous illustre les axes préférentiels (L ; R ; T) d'une pièce de bois.

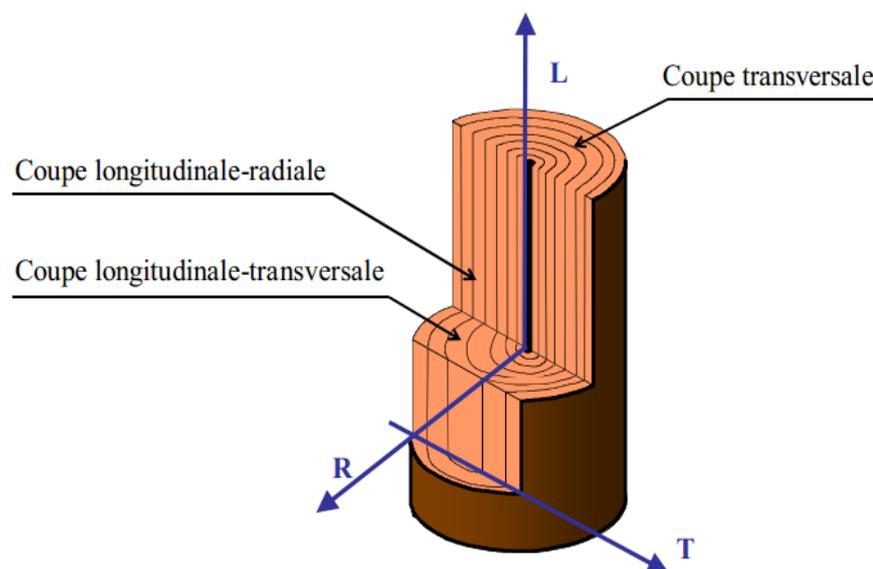


Figure 1.2: Axes préférentiels (L, R, T) d'une pièce de bois : BOUSSOUGOU (2012 ,10)

I.2.2 Structure ligneuse du bois et classification botanique

Les arbres qui fournissent du bois ont des cellules structurées en plans, appelés plans ligneux. On désigne par plans ligneux, l'ensemble de caractères de structure du bois tenant à la nature, à la forme, et au groupement des cellules constitutives. Ces caractères sont constants pour une espèce ou essence donnée. La détermination d'une essence nécessite l'étude du plan ligneux selon les trois directions d'observation. On distingue de façon simplifiée deux grandes familles d'essence :

- Les résineux ou essences résineuses.
- Les feuillus ou essences feuillues.

I.2.3 Structure anatomique du bois

La section transversale complète d'une branche ou d'un tronc d'arbre permet de mettre en évidence trois principales parties plus ou moins distinctes que sont (BOUSSOUGOU, 2012) :

-l'**écorce** : c'est la couche protectrice.

-l'**aubier** : c'est la partie partiellement vivante de l'arbre assurant l'approvisionnement en sels minéraux.

-le **duramen** : c'est le bois de cœur ou encore bois parfait qui est la partie centrale composée de cellules mortes lignifiées et imprégnées de tanin ou de colorants selon les essences.

En général le duramen se distingue de l'aubier par une couleur très foncée. Outre ces trois principales parties, on peut également distinguer :

- l'**épiderme** : c'est une fine couche au dessus de l'écorce.

-le **liber** : c'est la partie dont les cellules constituent une véritable canalisation pour la descente de la sève après élaboration.

-le **cambium** : c'est la partie dans laquelle la sève donne naissance aux cellules d'accroissement.

- le **cœur** : c'est la partie centrale que renferme le duramen.

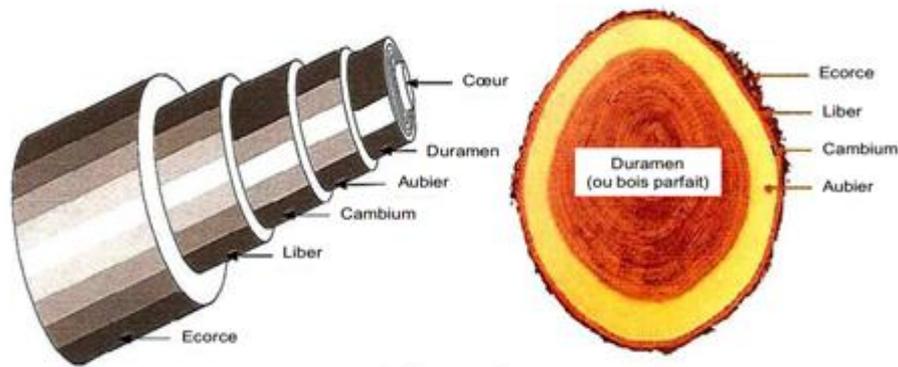


Figure 1.3: Structure d'un tronc d'arbre

I.2.4 Aspects microscopiques

Le bois est formé essentiellement de trachéides verticales, qui sont des cellules orientées dans le sens longitudinal et jouant le rôle de conduction dans l'arbre. Ces trachéides possèdent des ponctuations aréolées permettant de faire circuler la sève d'une trachéide à une autre. Les trachéides de bois ont des parois minces avec un diamètre intérieur important

permettant un plus grand passage de la sève, ce qui donne également une masse volumique faible. Les canaux résinifères sont entourés de cellules qui produisent de la résine. Ils ne sont présents que dans certaines essences et peuvent être disposés parallèlement aux trachéides.

Dans le sens radial, les rayons ligneux transportent la sève. Leur présence explique l'anisotropie dans le plan radial transversal, de retrait gonflement et de diffusion.

Le schéma ci dessous est une vue schématique et vue microscopique électronique à balayage (Passas 2008) d'après NGUYEN (2014 ,8).

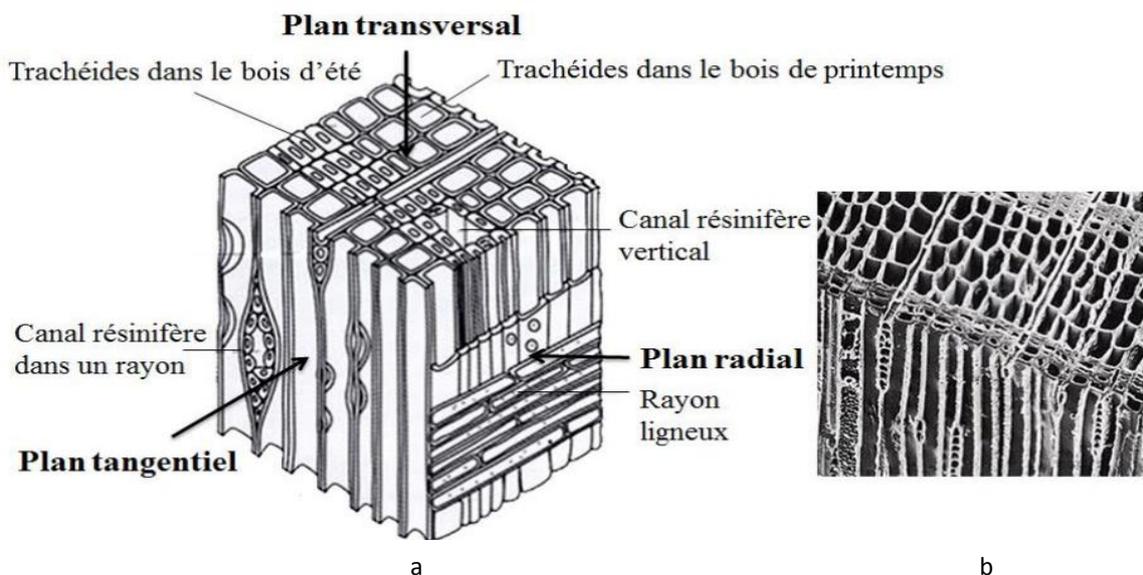


Figure 1.4: Structure de résineux : vue schématique (a) et vue au microscope électronique (b) à balayage (Passas 2008), NGUYEN (2014 ,8).

A l'échelle du micron, on observe les différentes couches de la paroi cellulaire et intercalaire (NGUYEN, 2014). La paroi cellulaire est composée de deux sous-parois : une paroi primaire entourée par la lamelle mitoyenne et une paroi secondaire interne composée de couches.

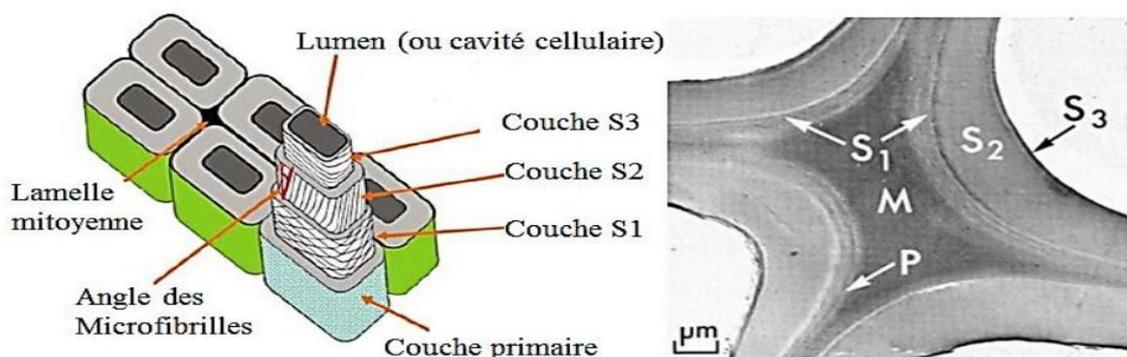


Figure 1.5: Structure de la paroi cellulaire

La lamelle mitoyenne est composée de substances pectiques et de lignine. Elle constitue le lien entre les cellules. La paroi primaire est principalement composée d'hémicellulose et de lignine. Elle est constituée de micro fibrilles orientées aléatoirement. La paroi secondaire (S) est divisée en trois couches (S₁ ; S₂ ; S₃). Elle est plus épaisse que la paroi primaire et plus rigide. Elle est composée en grande partie de cellulose cristalline. La couche S₂ constitue en moyenne jusqu'à 85% de l'épaisseur de la paroi S et se caractérise par une inclinaison des micros fibrilles par rapport à l'axe de la tige.

I.2.5 L'eau dans le bois

Le bois est un matériau qui contient de l'eau sous quatre formes :

-l'eau libre : elle remplit les vides cellulaires et est soumise aux forces capillaires et de gravité. Elle se déplace facilement dans le bois et disparaît en premier lors du séchage après abattage.

-l'eau liée : elle imprègne les membranes cellulaires et se déplace plus lentement.

-l'eau de constitution : c'est un élément chimique du bois qui ne disparaît complètement qu'après destruction du matériau.

-la vapeur d'eau : elle est présente dans la cavité cellulaire et est en équilibre avec l'eau libre et l'eau liée.

La figure suivante représente une distribution de l'eau dans la structure du matériau bois (Nabhani, 2007),d'après NGUYEN (2014 , 9) .

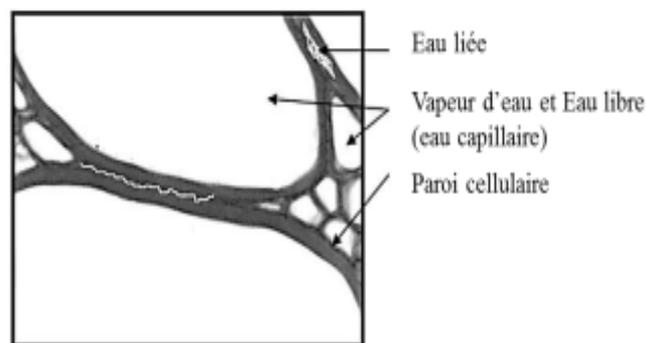


Figure 1.6: Schéma de distribution de l'eau dans la structure de bois.

I.2.6 Composition chimique du bois

La composition chimique élémentaire de la matière organique bois selon BOUSSOUGOU (2012, 8-9) varie très peu d'une espèce à l'autre. En moyenne, elle se répartit en % du poids anhydre comme suit : carbone (C: 50%), oxygène (O : 43%), hydrogène (H : 6%), azote (N : 1%) et des cendres (silice, phosphates, potassium, calcium) dont le pourcentage est inférieur à 1%.

Ainsi selon les espèces de bois, on y trouve sous forme synthétisée :

-La cellulose (40 à 50%) : polymère à haut poids moléculaire, linéaire et formé de longues chaînes offrant des possibilités de liaisons hydrogènes, ce qui lui confère un haut degré de cristallinité. C'est le principal constituant cellulaire qui contrôle les propriétés mécaniques et physico-chimiques ainsi que son pouvoir hygroscopique.

-L'hémicellulose (20 à 40%) : polymère dont la constitution est semblable à celle de la cellulose avec des chaînes plus courtes (polymère amorphe ramifié). Elle possède également des propriétés hydrophiles induisant des caractéristiques de gonflement et de retrait hydrique importantes.

-La lignine (20 à 30%) : polymère hétérogène complexe, amorphe et réticulé qui varie énormément des feuillus aux résineux. Ses chaînes latérales se rejoignent pour former un réseau tridimensionnel lui conférant la fonction de collage des fibres adjacentes.

-Les substances organiques et minérales (0 à 10%) : ce sont les substances extractibles telles que les graisses, les composés aromatiques, les huiles volatiles, les alcools à haut poids moléculaire et les acides gras sans oublier les éléments minéraux tels que le manganèse, le calcium, le potassium et le sodium.

Ainsi l'étude faite sur la structure du matériau bois partant de l'aspect macroscopique, à l'aspect moléculaire tout en passant par l'aspect microscopique est représentée à travers la figure ci-dessous (NGUYEN, 2014).

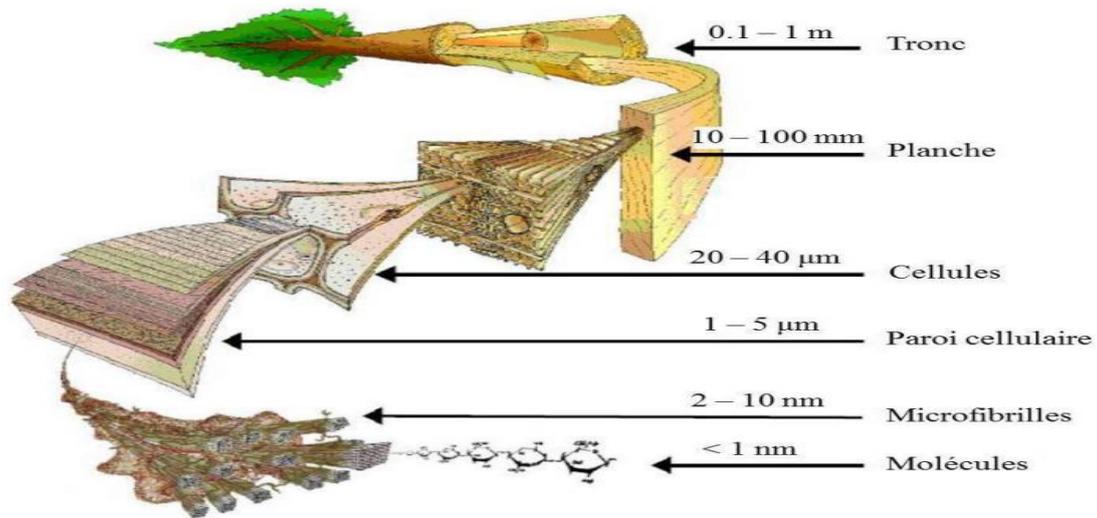


Figure 1.7: Structure du bois à l'échelle macroscopique et à l'échelle moléculaire.

I.3 Propriétés physiques du bois

Du point de vue physique, le matériau bois peut être caractérisé par des propriétés (BOUSSOUGOU, 2012) que sont : son taux d'humidité (état hygroscopique), sa capacité à se rétracter et à gonfler sous l'effet de la variation de son humidité, et sa masse volumique dépendante de son humidité.

I.3.1 Taux d'humidité et équilibre hygroscopique

On appelle degré ou taux d'humidité w d'un bois la quantité d'eau qu'il renferme. C'est le rapport entre la masse d'eau m_w contenue et la masse de bois à l'état sec m_0 tel que :

$$w = \frac{m_w}{m_0}$$

I.3.2 Variations dimensionnelles du bois

La fluctuation de la teneur en eau w peut entraîner des variations dimensionnelles appelées gonflement dans le cas d'une humidification ou retrait dans le cas d'un séchage. Ces variations dimensionnelles sont observées, en fonction des variations hygroscopiques, en dessous du point de saturation des fibres (PSF avec $w \leq 30\%$) correspondant à la venue ou au départ d'eau chimiquement liée. Au-delà, les variations dimensionnelles deviennent négligeables. La figure ci-dessous donne une représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois.

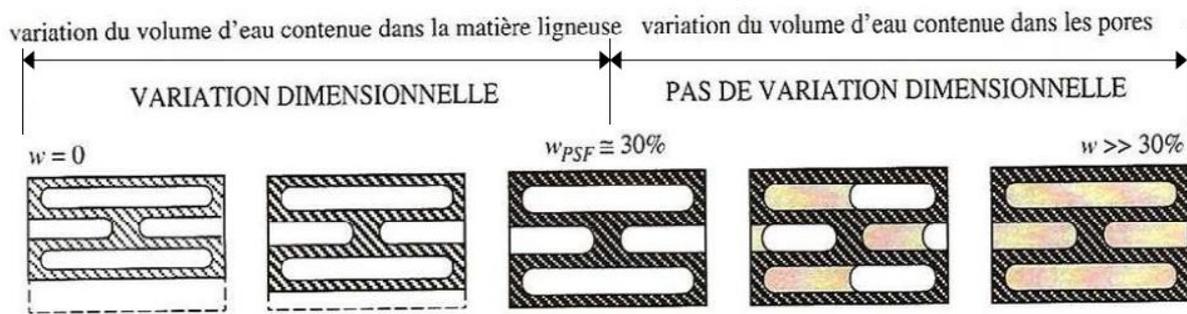


Figure 1.8: Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois d'après : BOUSSOUGOU (2012 ,14)

En dessous du point de saturation des fibres, les variations dimensionnelles apparaissent comme proportionnelles à la teneur en eau, et ce, tout en gardant le caractère orthotrope du matériau .On définit alors, pour chaque direction (L ; R ; T) un coefficient de retrait- gonflement β (coefficient de proportionnalité) qui est une fonction de la variable dimensionnelle (Δl) (dans la direction considérée) et de la variation de la teneur en eau (ΔW).Il est donne par la relation suivante :

$$\beta = \frac{\Delta l}{l \times \Delta w} \times 100$$

Il est à noter que chaque essence a des coefficients de retrait –gonflement qui lui sont propres et qui varient selon la direction considérée. En moyenne le coefficient de retrait-gonflement tangentiel est deux fois supérieur au retrait-gonflement radial. Le coefficient de retrait-gonflement longitudinal est quasiment insignifiant comparativement aux deux autres. Nous noterons, cependant, qu'en rapport au module d'élasticité longitudinal, les effets de retrait-gonflement sont à considérer.

I.3.3 Masse volumique

Elle se définit comme le rapport de la masse au volume de bois correspondant.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Cette grandeur est fortement dépendante de l'humidité interne du bois et est généralement indiquée à une humidité de référence de 12%. Plusieurs études ont montré une forte corrélation entre la masse volumique et certaines caractéristiques physiques et mécaniques telles que la largeur des cernes et le module d'élasticité. Pour une essence, cette grandeur peut varier considérablement. La figure représentée ci-dessous montre la relation entre la masse volumique, la largeur des cernes, et le module d'élasticité (BOUSSOUGOU, 2012).

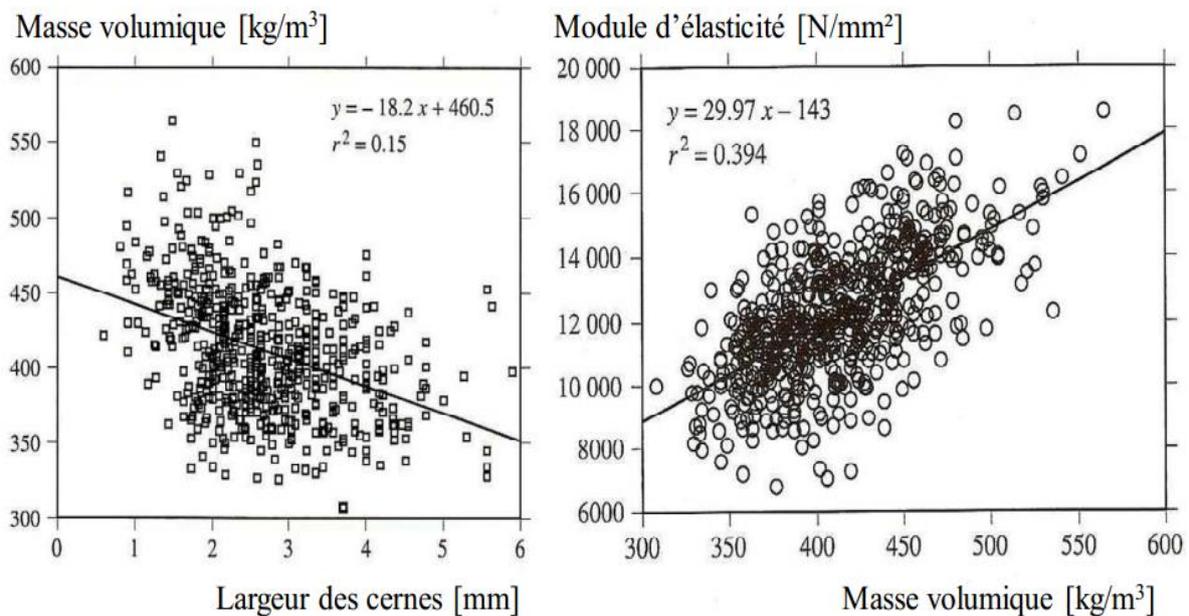


Figure 1.9: Relation entre masse volumique, largeur des cernes et module d'élasticité.

I.4 Les propriétés mécaniques du bois

Les propriétés mécaniques d'après (MOUCHOT, 2002) sont les caractéristiques d'un matériau en réponse à des forces extérieures appliquées. Elles incluent les propriétés élastiques qui caractérisent la résistance à la déformation et à la distorsion, et les propriétés de force qui caractérisent la résistance aux charges appliquées. Les valeurs des propriétés mécaniques sont données en termes de contraintes (forces par unité d'aire) et de déformations (résultantes de la contrainte appliquée).

I.4.1 Propriétés élastiques

Les propriétés élastiques relatent la résistance d'un matériau à la déformation sous une force appliquée à la capacité du matériau à revenir à ses dimensions d'origine quand la force est supprimée. Le bois n'est pas idéalement élastique mais plutôt viscoélastique.

I.4.2 Propriétés de résistance mécanique

Pour le bois, la résistance dépend significativement des essences, de la condition de charge et de sa durée et du nombre de facteurs environnementaux. Nous pouvons alors réaliser sur des échantillons de bois des tests de compression, de tension ou de mesure de flèche (charge appliquée au milieu de la planche). La compression parallèle au grain est toujours supérieure à la compression perpendiculaire au gain.

I.5 Définition des notions d'isotherme et de désorption

I.5.1 Définition d'une isotherme : c'est une courbe qui est représentée sur un diagramme reliant les points où la température moyenne de l'air est identique pour une période donnée.

I.5.2 Définition de la désorption : c'est le phénomène inverse de l'adsorption où : les liaisons ioniques entre ions, molécules, et substrat se brisent et les ions ou molécules précédemment adsorbés se détachent du substrat.

Des deux définitions précédentes, nous pouvons définir une isotherme de désorption d'un bois comme étant un graphe qui illustre le mécanisme de désorption de celui.

Plusieurs modèles ont été élaborés en physique pour présenter les différentes isothermes de désorption du bois. Le tableau suivant fait ressortir ces modèles (NSOUANDELE, 2012) :

Nom du modèle	Expression
Oswin (1946)	$X = A \left[\frac{HR}{1-HR} \right]^B$
Smith (1974)	$X = A + B \ln 1-HR$
Halsey (1948)	$X = \left[\frac{-A}{\ln HR} \right]^{\frac{1}{B}}$
Henderson (1952)	$X = \left[\frac{\ln 1-HR}{-A} \right]^{\frac{1}{B}}$
Day et Nilson (1968)	$HR = 1 - \exp -AT^B X^{CT^D}$
Chung et Pfof (1967)	$X = \ln \left[\frac{\ln HR}{-A} \right]^B$
Henderson modifié (1968)	$HR = 1 - \exp -A T + B X^C$
Kuhn (1972)	$X = \left[\frac{A}{\ln HR} \right] + B$
Cubic (1973,1978)	$X = A + B.HR + C.HR^2 + D.HR^3$
Iglesias, Chirife (1981)	$X = A \left[\frac{HR}{1-HR} \right] + B$
Schuchmann (1990)	$X = \frac{-AT \ln 1-HR}{BT + \ln 1-HR}$

Peleg (1993)	$X = A.HR^B + C.HR^D$
Isse (1993)	$\ln X = A.\ln\left(\frac{1}{1-HR}\right) + B$
Motta Lima (1999)	$X = \frac{\ln 1 - HR^A}{B \exp -C/T}$
Iglesias, Chirife ,Halsey(1976)	$X = A \left[T \ln\left(\frac{1}{HR}\right) \right]^{-B}$
Chung et Ppostmodifié (1976)	$HR = \exp\left(\frac{-A \exp -BC}{T + C}\right)$
Luikov (1978)	$X = \frac{A}{1 - B \ln HR}$
Kaleemullah (2002)	$HR = A - B \exp -C.T.X^D$

Chapitre 2 : MATERIEL ET MODE EXPERIMENTAL DE DETERMINATION DES ISOTHERMES DE DESORPTION

II.1 Présentation du matériel utilisé

Le matériel sollicité pour effectuer une désorption est celui utilisé pour les essais au laboratoire de Physique Appliquée de L'ENS DE YAOUNDE. Nous avons : une balance, un thermomètre, un hygromètre.

La balance : est un instrument servant à mesurer la masse d'un corps donné.

Le thermomètre : est un instrument servant à mesurer la température dans un milieu ambiant.

L'hygromètre : est un instrument servant à mesurer l'humidité relative dans un milieu donné.



Figure 2.1: Une balance électronique



Figure 2.2: Un thermomètre numérique

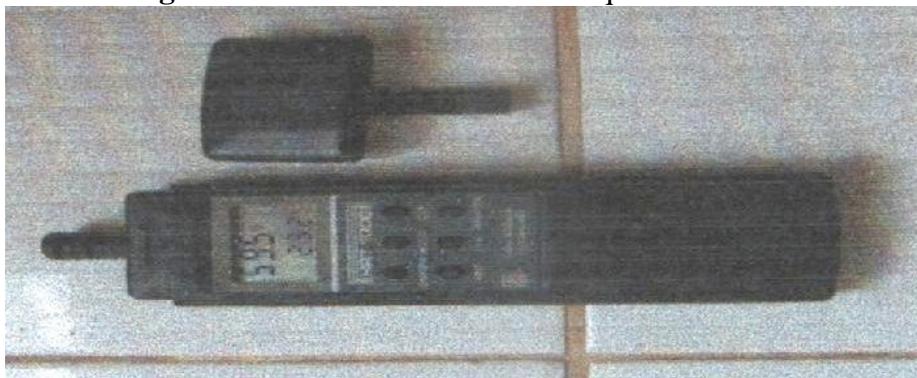


Figure 2.3: Un hygromètre

II.2 Présentation des essences tropicales

Avant tout processus de détermination des isothermes de désorption, il est utile pour nous de faire une présentation des essences tropicales qui font l'objet de notre étude, ceci pour élucider certaines propriétés évoquées dans le chapitre précédant pour une bonne compréhension.

II.2.1 L'Azobé

L'Azobé appartient à la famille des Ochnacées genre *Lophira*, espèce *Alata*. C'est un bois rouge, ayant un léger contrefil, des grains grossiers. L'aubier est bien distinct du cœur avec un dépôt blanc dans les pores. Le nom spécifique de cet arbre est le *Lophira Alata*.

Provenance : Afrique tropicale, notamment au Cameroun (BONGOSSI village au sud Cameroun dans le département du Dja et Lobo)

Caractères physiques et mécaniques : poids en grume à l'état vert : 1200 à 1300 Kg au m³. Densité à 12% d'humidité : 0,95 à 1,10. Très résistant au point de vue mécanique. Elastique, assez peu fissible, particulièrement résistant à l'usure et à la compression de flanc.



Figure 2.4: Le bois Azobé (Cirad tropic 5, 2005)

II.2.2 L'Ebène

L'Ebène appartient à la famille des Ebenaceae. C'est un bois noir, ayant un léger contrefil et des grains grossiers. Les grumes peuvent présenter différents types de défauts, notamment des piqures fines et des pourritures de cœur. Son nom spécifique est *Diospyros Crassiflora*.

Provenance : Afrique tropicale (Cameroun, Gabon, Mozambique)

Caractères physiques et mécaniques : densité à 12% d'humidité variant de 0,95 à 1,25, suivant les espèces. Bois à grain très fin, à fil généralement bien droit et très stables une fois sec.



Figure 2.5: Le bois Ebène (Ciradtropic 5 ; 2005).

II.2.3 L'iroko

C'est un bois brun jaune à brun plus ou moins foncé avec reflets dorés. Son aspect est rubané sur quartier. Il a des veines plus sombres sur le dosse et présente des concrétions blanches très dures entourées d'une teinte plus sombre. Son nom spécifique est le Chlorophora Excelsa, il appartient à la famille des Moracées.

Provenance : Afrique tropicale (Cameroun, Nigeria, Congo)

Caractères physiques et mécaniques : Poids en grume a l'état vert : 950 à 1050kg au m³, densité à 12% d'humidité : 0,55 à 0,75, rétractibilité faible, stable une fois sec, bonne résistance mécanique en compression axiale, et en flexion statique.



Figure 2.6: Le bois Iroko (Ciradtropic 5 ; 2005)

II.2.4 Le sapelli

C'est un bois qui appartient à la famille des Méliacées. Généralement, on note sur la grume du bois des piqures noires. La couleur du Sapelli est blanc jaunâtre. Son nom spécifique est l'Entandrophragmacylindricum.

Provenance : Afrique tropicale (Cote d'Ivoire, Angola, Ouganda, Ghana)

Caractéristiques physiques et mécaniques : poids en grume à l'état vert : 850 à 950kg au m³, densité à 12% d'humidité : 0,60 à 0,75. La rétractibilité est moyenne, assez stable une fois sec. Résiste bien aux efforts statiques de fil en compression et en flexion. C'est un bois souple mais cassant au choc, il est assez fendif.



Figure 2.7: Le bois Sapelli (Ciradtropic 5, 2005)

II.3 Dispositif utilisé pour effectuer la désorption

Le dispositif expérimental utilisé dans les expériences de désorption est celui des solutions salines saturées se présentant de la façon suivante :

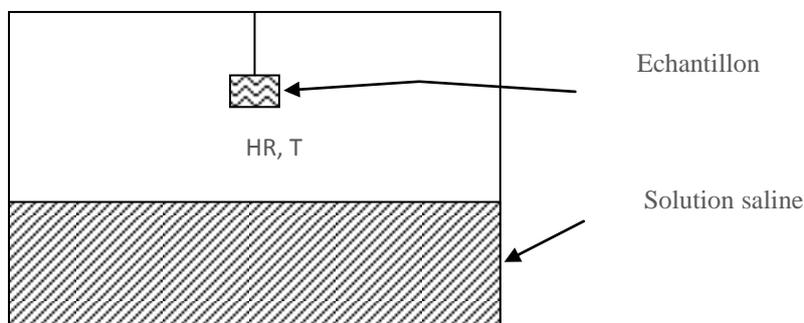


Figure 2.8: Dispositif expérimental utilisé pour la détermination d'un point d'isotherme de désorption d'un échantillon.

II.4 Méthode utilisée pour déterminer une isotherme de désorption

La méthode utilisée ici est la méthode gravimétrique statique utilisée pour les solutions salines est ainsi adoptée où sont utilisés les spécimens secs et de teneur en eau. Elle consiste à placer l'échantillon de bois humide dont on recherche les points de désorption dans une enceinte contenant des solutions de sels saturées et maintenues à température et à humidité relative constantes.

A l'aide d'une balance électronique de précision, l'échantillon est pesé à l'intervalle de temps réguliers (4 jours) jusqu'à atteindre la masse caractérisant l'équilibre thermodynamique (m_e) ou masse d'équilibre. Cet équilibre est obtenu au bout des différents jours pour la désorption des différents bois tropicaux. On procède à l'étuvage à 105°C pour l'obtention des masses anhydres (masses sèches) (m_s). Ces deux dernières masses enregistrées permettent de calculer la teneur en eau d'équilibre de l'échantillon à la température T de l'expérience et à l'humidité relative Hr imposée par la solution saline saturée par la relation (2-9) suivante :

$$X_{eq} = \frac{m_e - m_s}{m_s} \quad (2-9)$$

où X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre avec m_e et m_s représentant respectivement les masses de l'échantillon à l'équilibre et anhydre. Nous avons ainsi un point de l'isotherme ($X_{eq} : Hr$) des échantillons à la température T. L'expérience est répétée pour différentes solutions salines (différentes humidités relatives Hr) à la même température pour différents échantillons de bois humides.

Les échantillons utilisés pour les isothermes de désorption proviennent de la région du centre Cameroun. Dix échantillons de chaque essence de bois de dimensions $25 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ ont été utilisés (Jannot Y et al, 2006). Les différentes solutions salines saturées (Tableau 1) ont servi à maintenir l'humidité relative de l'air ambiant à la valeur désirée. Ces valeurs qui sont données en fonction de la température dans le tableau 1.

Tableau 2.1: Sels et humidité relative de l'air pour la détermination des points d'équilibre.

Sel \ Température de l'air	20°C	30°C	40°C	50°C
Sulfate de potassium (K ₂ SO ₄)	97.6	97	96.4	95.8
Chlorure de potassium (KCl)	85.1	83.6	82.3	81.2
Chlorure de sodium (NaCl)	75.5	75.1	74.7	74.4
Chlorure de cuivre (CuCl ₂)	68.4	68.6	68	65.5
Bromure de sodium (NaBr)	59.1	56.0	53.2	50.9
Carbonate de potassium (K ₂ CO ₃)	43.2	43.2	42.3	45.6
Chlorure de magnésium (MgCl ₂)	33.1	32.4	31.6	30.5
Ethanoate de potassium (KCH ₃ CO ₂)	20.2	20.1	20.0	19.8
Chlorure de lithium (LiCl)	11.3	11.3	11.2	11.2
Fluorure de potassium (KF)	06.6	06.3	06.1	06.1
Bromure de lithium (LiBr)	03.3	03.3	03.2	03.1

II.5 Modèles mathématiques

Les courbes de désorption dépendent de la nature, de l'état hygroscopique des bois tropicaux et la façon dont l'équilibre est atteint. Dans la littérature pour décrire la relation graphique entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température de nombreux modèles mathématiques sous forme empirique existent et sont utilisés. Après des tests effectués sur certains différents modèles, nous avons utilisé le modèle Henderson qui décrit mieux les isothermes de désorption des bois tropicaux :

$$X_{eq} = \ln \left[\frac{\ln 1-Hr}{-A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (2-10)$$

Ce modèle optimise le plus souvent le lissage des points expérimentaux pour la plupart des produits (bois) dans des domaines d'activités de l'eau assez important ($X_{\text{teneur en eau}} \leq 50\%$). A et B représentent les paramètres des modèles et dépendent de la température.

Afin d'utiliser la méthode des moindres carrés pour la détermination des coefficients A et B de l'équation (2-10), cette dernière est transformée en relation mathématique (2-11) de la manière suivante :

$$\ln X_{eq} = \frac{1}{B} \ln \left[-\ln (1-Hr) \right] - \frac{1}{B} \ln A \quad (2-11)$$

$$\ln X_{eq} = a \ln \left[-\ln (1-Hr) \right] + b$$

$$\text{Avec } a = \frac{1}{B} \text{ et } b = -\frac{1}{B} \ln A \quad (2-12)$$

Ainsi les paramètres découlent de la régression linéaire, de la droite où :

$$\ln X_{eq} = g \ln \left[-\ln (1-Hr) \right]$$

Hr n'est pas exprimé en pourcentage.

La fiabilité des paramètres A et B est estimée par le coefficient de corrélation r. Ceux-ci sont acceptables pour la valeur absolue de r comprise entre 0,87 et 1. En plus de r ; estimation moyenne des écarts E entre la courbe théorique et la courbe expérimentale est utilisée dans le même objectif. Ce paramètre statistique est calculé par la relation (2-13)

$$E \% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{mi} - X_{thei}|}{X_{mi}} \quad (2-13)$$

Avec N le nombre de points expérimentaux, X_m teneur en eau expérimentale et X_{the} teneur en eau théorique. La simulation est bonne pour les valeurs de E inférieures ou voisines de 10%.

Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Présentation des résultats

Les données expérimentales des teneurs en eau d'équilibre de désorption des bois tropicaux : Azobé, Ebène, Iroko, Sapelli pour quatre températures (20°C , 30°C , 40°C ,et 50°C) sont illustrées par les figures : 3-1, 3-2 , 3-3 , 3-4 en fonction de l'humidité relative. Le constat général est la diminution de la teneur en eau lorsque la température augmente. On remarque que plus la température augmente plus la teneur en eau diminue ce qui confirme l'influence de la température qui diminue rapidement le vide initial dans le bois. Dans les figures 3-1 et 3-2 correspondant respectivement à l'Ebène et à l'Azobé, on constate une diminution faible de la teneur en eau à l'équilibre pour différentes humidités relatives à des températures différentes par rapport à celle des figures 3-3 et 3-4 qui sont respectivement celles de l'Iroko et du Sappelli. Les points expérimentaux de l'Ebène (figure 3-1) varient entre 0% et 18% et ceux de l'Azobé (figure 3-2) entre 0% et 16% . Ces résultats attestent que la teneur en eau à l'équilibre des bois tropicaux lourds (Ebène, Azobe) varie entre 0% et 25% . Quant à la figure 3-3, les points expérimentaux de la teneur en eau à l'équilibre de l'Iroko sont compris entre 0% et 30% et ceux du Sapelli (figure 3-4) entre 0% et 35% . La teneur en eau à l'équilibre des bois tropicaux mi-lourds (Iroko, Sapelli) oscille entre 0% et 50% . Ce qui confirme que les bois lourds sont plus stables que les bois mi-lourds.

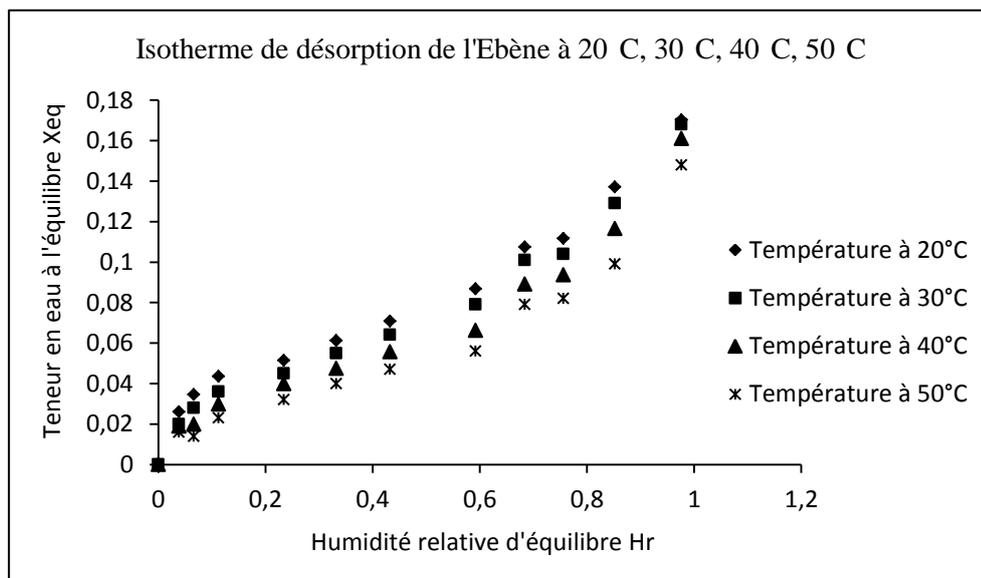


Figure 3.1: Les isothermes de désorption de l'Ebène à différentes températures.

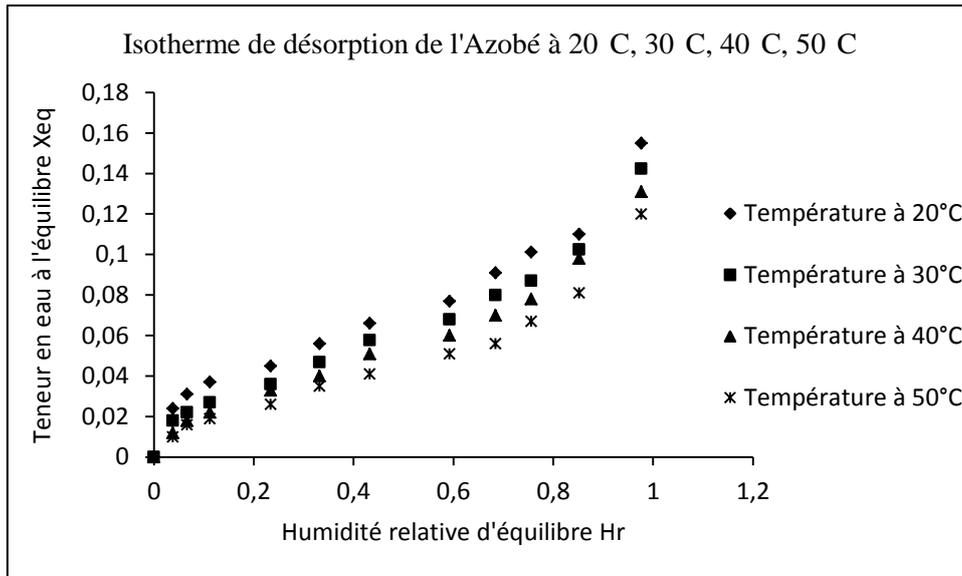


Figure 3.2: Les isothermes de désorption de l'Azobé à différentes températures.

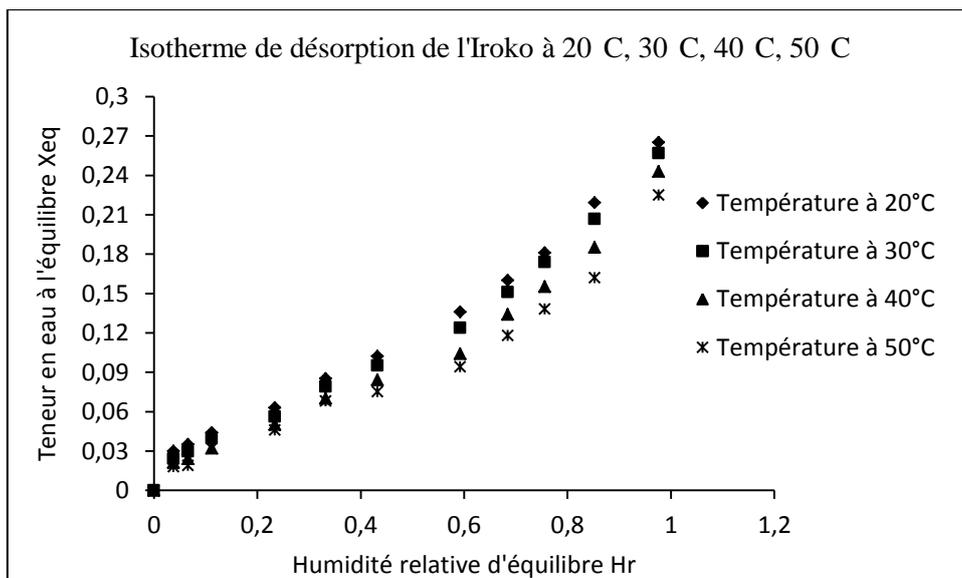


Figure 3.3: Les isothermes de désorption de l'Iroko à différentes températures.

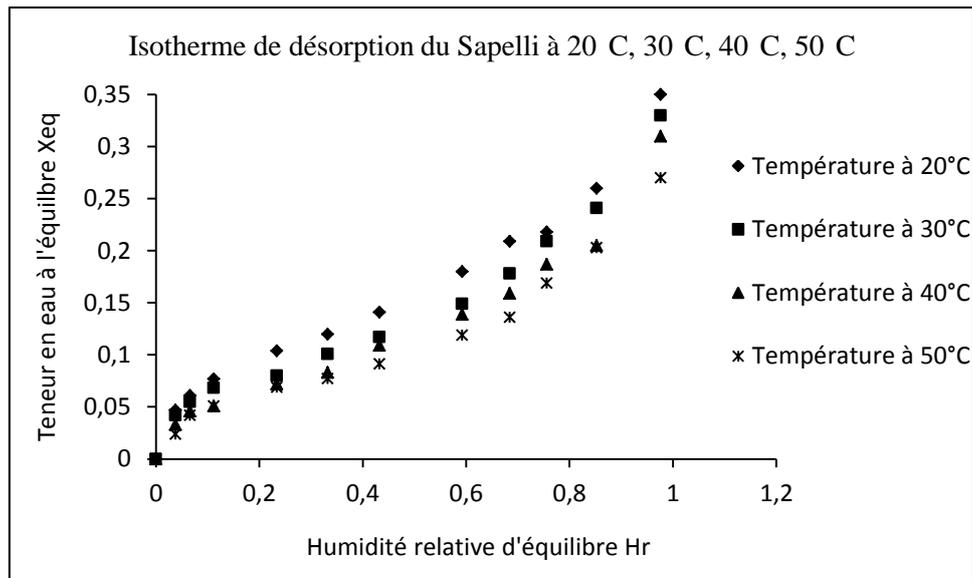


Figure 3.4: Les isothermes de désorption du Sapelli à différentes températures.

Les figures : 3-5, 3-6, 3-7, 3-8 présentent les points expérimentaux des isothermes de désorption comparées des quatre bois respectivement aux températures de 20°C, 30°C, 40°C, 50°C en fonction de l'humidité relative. On constate que dans une même ambiante, la teneur en eau à l'équilibre du Sapelli est supérieure à celui de l'Iroko qui lui contient plus d'eau que l'Ebène.

Quant à celle de l'Azobé, elle a la plus faible valeur de teneur en eau dans cette ambiante. Ceci est la conséquence de la différence dans la répartition des principaux constituants de chaque type de bois (lignine, hémicellulose, cellulose). La teneur en lignine est plus importante que la teneur en hémicellulose dans le Sapelli et l'Iroko. Le phénomène inverse est observé dans l'Ebène et l'Azobé. A 20°C (figure 3-5) on observe un écart entre les isothermes de désorption des bois à partir de 0,25 d'humidité relative qui correspond à la saturation des fibres où intervient la condensation capillaire (Thermelin, 1998). Cette observation est faite à 30°C à partir de 0,22 d'humidité relative (figure 3-6) et à partir de 0,21 et 0,19 d'humidité relative respectivement pour les températures de 40°C et 50°C (figures 3-7 et 3-8).

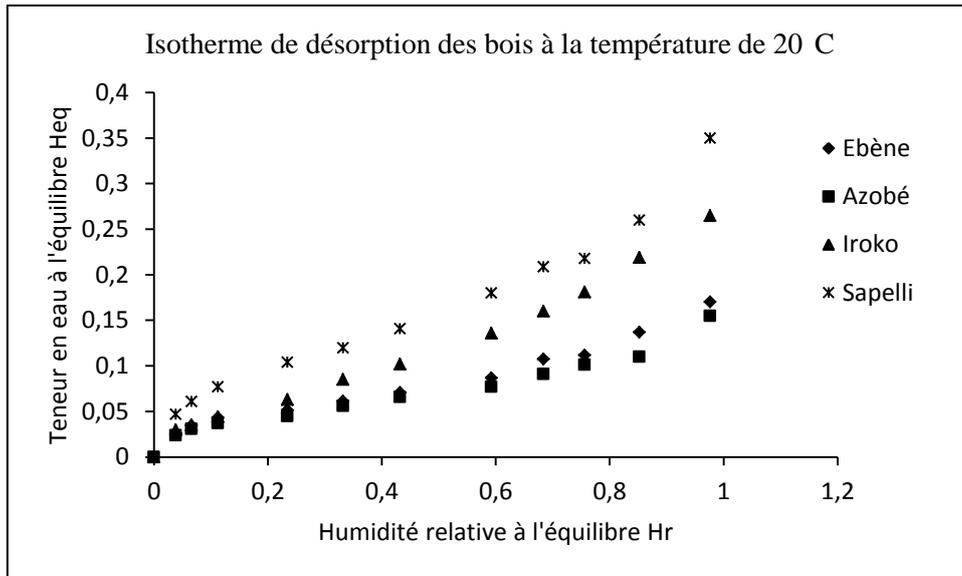


Figure 3.5: Les isothermes de désorption des bois à la température de 20°C.

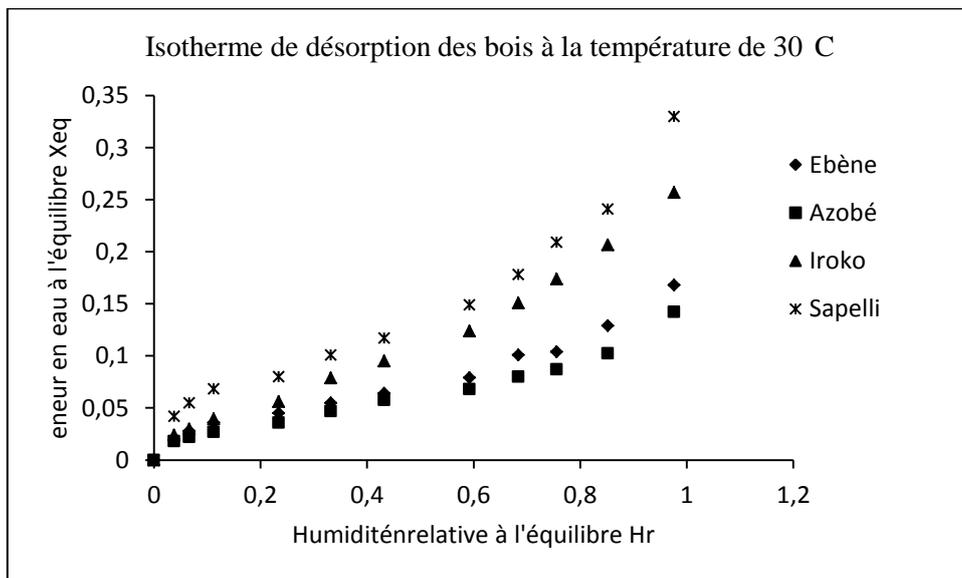


Figure 3.6: Les isothermes de désorption des bois à la température de 30°C.

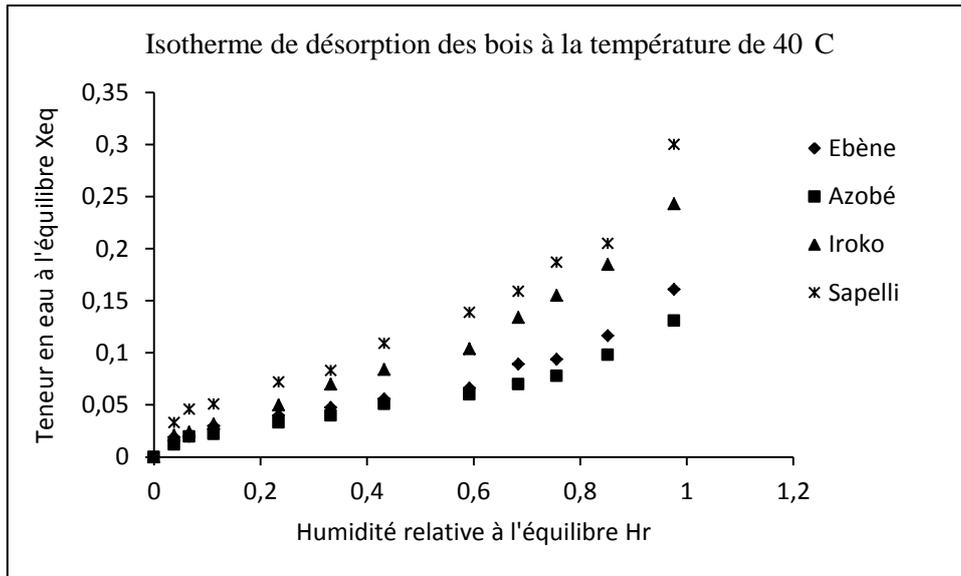


Figure 3.7: Les isothermes de désorption des bois à la température de 40°C.

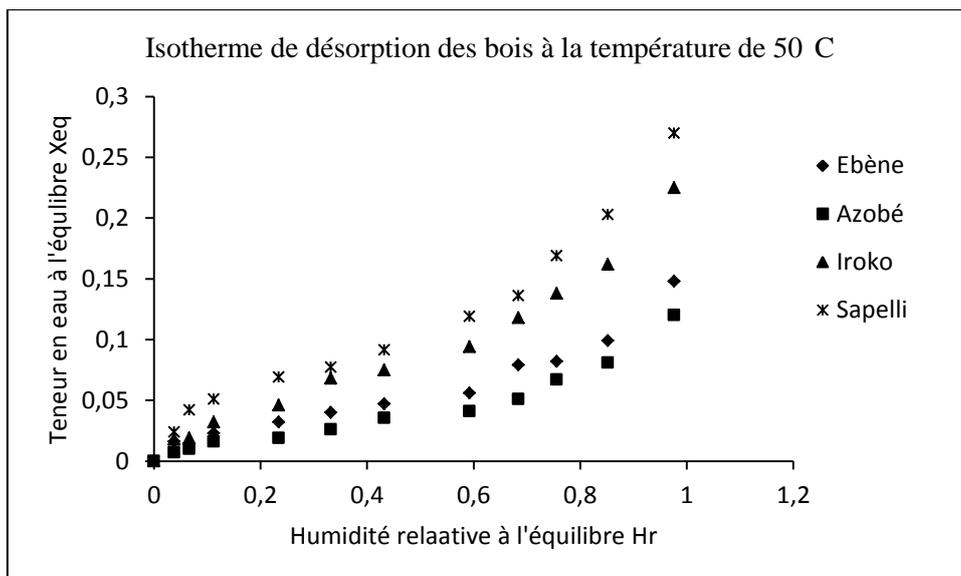


Figure 3.8: Les isothermes de désorption des bois à la température de 50°C.

Les quatre figures 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 présentent les teneurs en eau d'équilibre plus faibles pour une même valeur d'humidité relative. Ainsi après l'opération de désorption, nous remarquons une diminution du volume initial dans le produit. Ceci oblige à trouver un modèle à prendre en compte lors du processus de séchage de chaque essence à différentes températures. A et B, optimisent le plus souvent le lissage des points expérimentaux pour la plupart des bois tropicaux dans des domaines d'activité de l'eau (Monkam Simo). A partir

des résultats expérimentaux, la détermination des paramètres à base d'une méthode d'estimation appropriée est faite.

III.2 Estimation des paramètres des courbes

Les tableaux 2, 3, 4, et 5 présentent respectivement les valeurs des coefficients A et B du modèle de Henderson utilisés ainsi que l'écart relatif moyen E et le coefficient de corrélation r de l'Ebène, l'Azobé, l'Iroko, et du Sapelli. Les paramètres A et B sont fonction de la température. Les valeurs absolues des coefficients de corrélation r sont comprises entre 0,96 et 0,99. Ce modèle est celui le plus justifié pour les bois tropicaux et des meilleurs corrélations (Monkam, Simo).

Tableau 3.1: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Ebène)

T(°C)	a	b	A	B	E%	r
20	0,391	-2,338	391,736	2,554	6,075	0,991
30	0,425	-2,405	285,342	2,353	6,477	0,990
40	0,459	-2,509	236,853	2,179	8,35	0,986
50	0,483	-2,650	241,833	2,071	11,912	0,975

Tableau 3.2: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Azobé)

T(°C)	a	b	A	B	E%	r
20	0,392	-2,337	396,626	2,5365	6,075	0,992
30	0,436	-2,402	295,341	2,3228	6,477	0,98
40	0,468	-2,508	238,529	2,1371	8,35	0,985
50	0,484	-2,650	249,423	2,0792	10,871	0,974

Tableau 3.3: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Iroko).

T(°C)	a	b	A	B	E%	r
20	0,361	-1,273	351,7366	2,554365	6,451	0,960
30	0,394	-1,292	225,3415	2,353228	6,752	0,986
40	0,418	-1,308	216,8529	2,179371	7,39	0,985
50	0,442	-1,350	205,8333	2,070992	10,845	0,974

Tableau 3.4: Valeurs des paramètres du modèle de Henderson (Sapelli).

T(°C)	a	b	A	B	E%	r
20	0,3414	-1,33741	331,7366	2,554365	6,075	0,990
30	0,3948	-1,40252	216,3415	2,353228	6,477	0,995
40	0,4047	-1,50872	205,5249	2,179371	8,35	0,976
50	0,4186	-1,65006	201,452	2,070992	10,912	0,968

III.3 Résultats de modélisation des isothermes de désorption des bois tropicaux

Les figures : 3-9, 3-10, 3-11, 3-12 illustrent les courbes théoriques et les points expérimentaux de désorption des échantillons respectifs de l'Ebène, l'Azobe, l'Iroko et du Sapelli aux différentes températures de 20°C, 30°C, 40°C, 50 °C en fonction de l'humidité relative. On constate une bonne description des points expérimentaux par les courbes théoriques. Elles présentent aux basses humidités relatives (inférieures à 20%) des courbes. Celles-ci expliquent la fixation des premières couches de molécules d'eau sur les surfaces du squelette solide, l'énergie de liaison est très importante et les molécules d'eau sont mobiles. Aux humidités relatives intermédiaires (entre 25% et 85%) les courbes ont les allures des droites. Les pentes de ces droites expliquent le comportement des molécules qui se joignent à d'autres déjà fixées, l'énergie de liaison est plus faible. Enfin, les fortes humidités relatives, proches de 100% présentent des courbes convexes. Les dernières molécules d'eau se fixent sur les irrégularités de surface, d'où la condensation et l'énergie de liaison sont très faibles. Les résultats de la figure : 3-9 sur les isothermes de désorption de l'Ebène, sont conformes à ceux de Simo (2011) qui utilise le modèle de Chung et Post et Henderson. Ceux de l'Azobe (figure : 3-10) et du Sapelli (figure: 3-12) sont également conformes et semblables à ceux de d'Ayina et Noah (2006) qui ont utilisé la fonction de Harkings (Jannot Y, 2003). Le comportement de désorption d'Iroko obtenu à la figure: 3-11 est semblable à celui de Monkam (2006) qui a également utilisé la fonction de Harkings (Jannot Y, 2003). Pour les mêmes écarts de températures, les isothermes de désorption de l'Iroko (figure 3-11) sont plus resserrées que celles du Sapelli (figure 3-12) en ce qui concerne les bois mi-lourds. C'est dire que le Sapelli est plus stable à la même température que l'Iroko. Ces résultats en accord avec ceux de la littérature de (Monkam 2006), (Ayina 2006), (Simo 2010) conduisent à l'étude des différentes catégories de bois. Les figures : 3-11 et 3-12 présentent respectivement les

intervalles de [0% , 40%] pour l'Iroko et [0% , 45] pour le Sapelli plus grands que ceux de l'Ebène[0% , 25%] et de l'Azobé [0% , 20%].

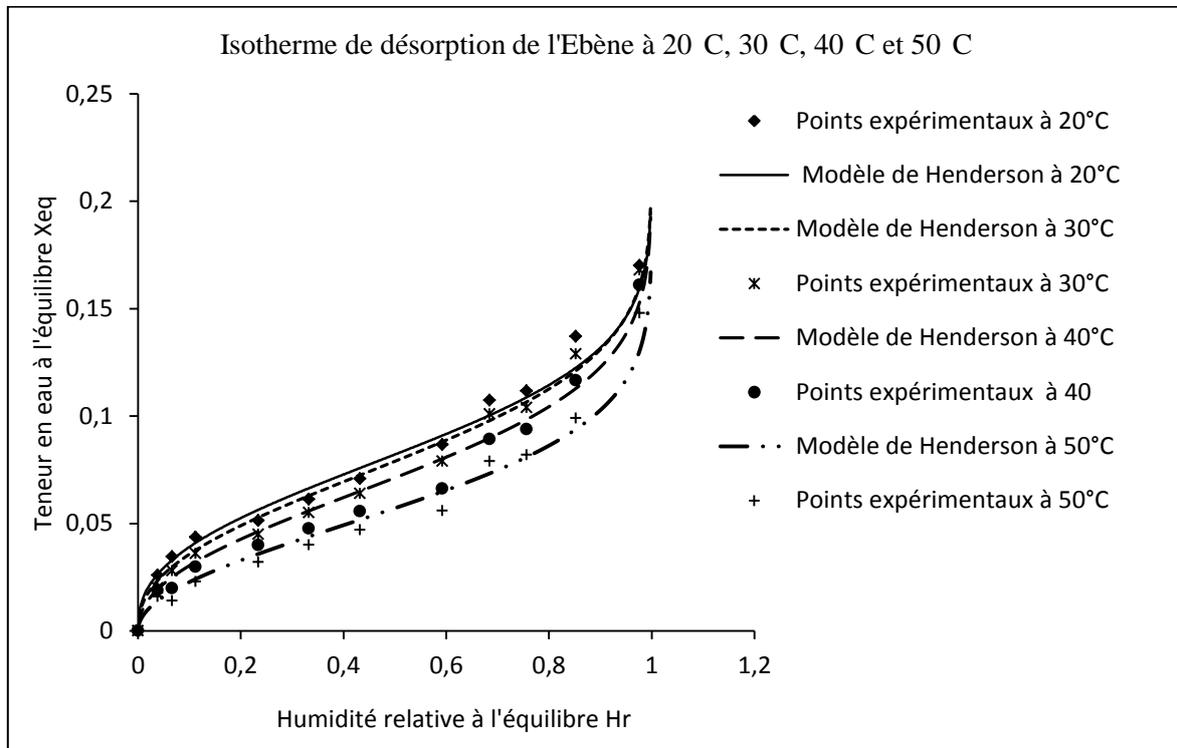


Figure 3.9: Isotherme de désorption de l'Ebène pour différentes températures.

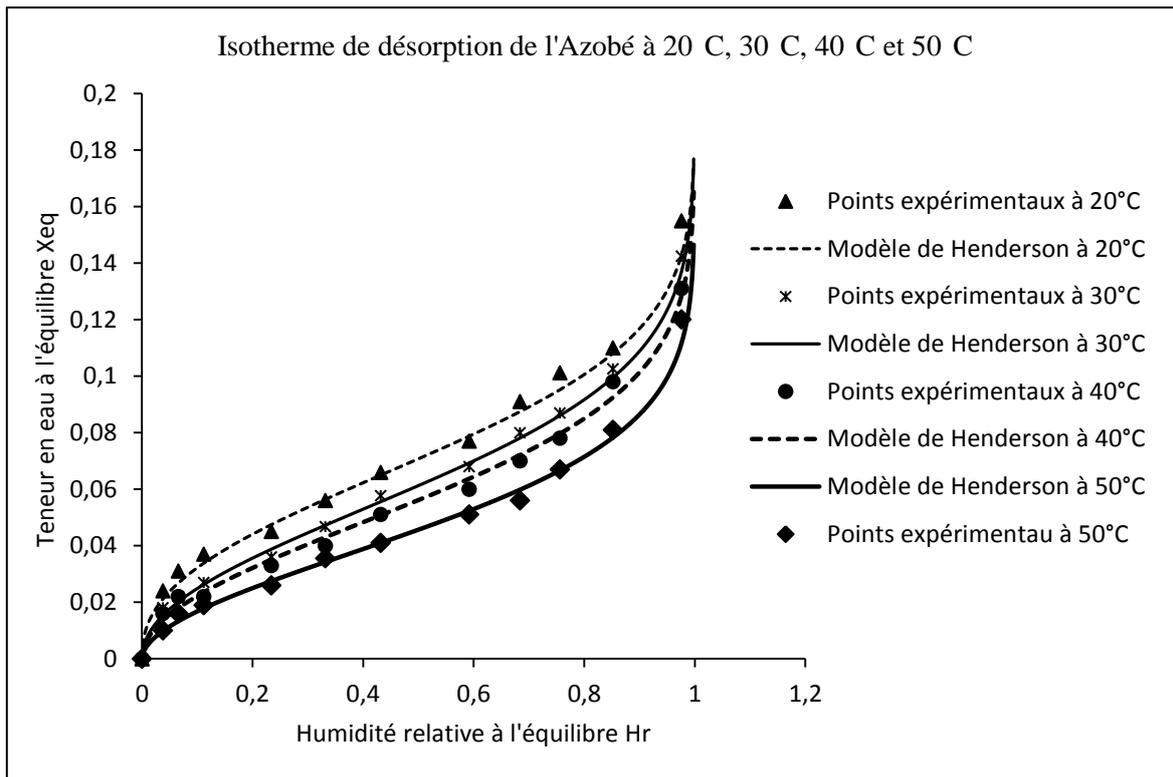


Figure 3.10: Isotherme de désorption de l'Azobé pour différentes températures.

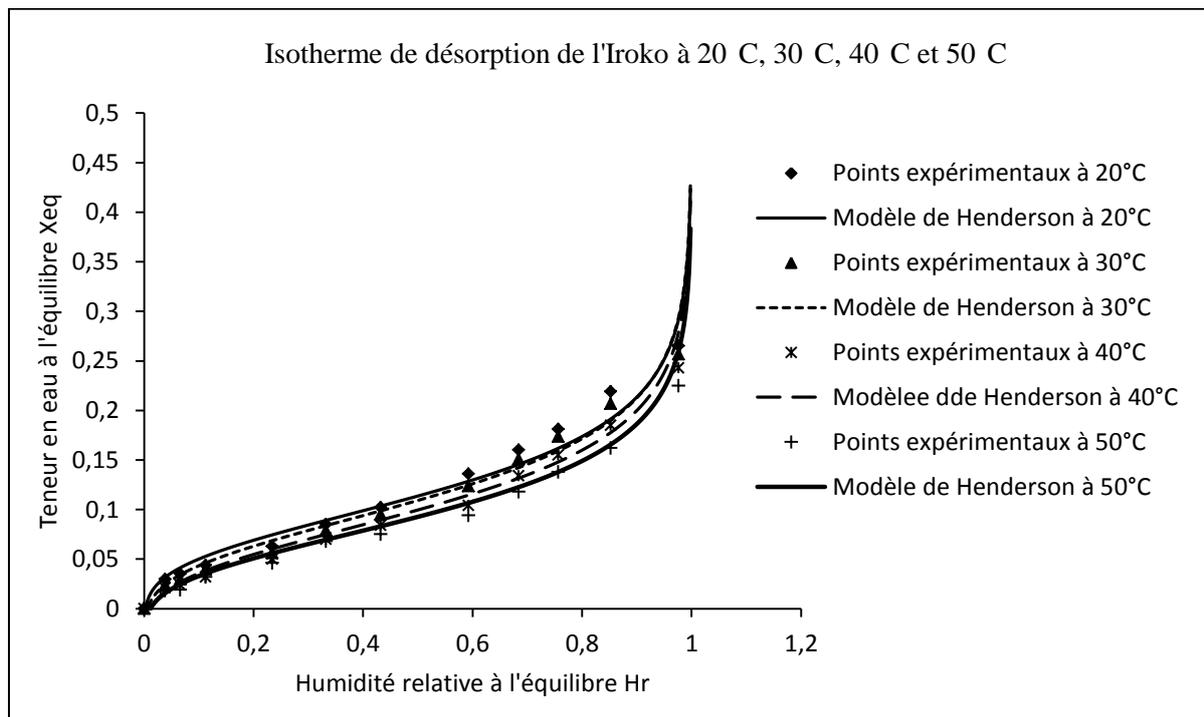


Figure 3.11: Isotherme de désorption de l'Iroko pour différentes températures.

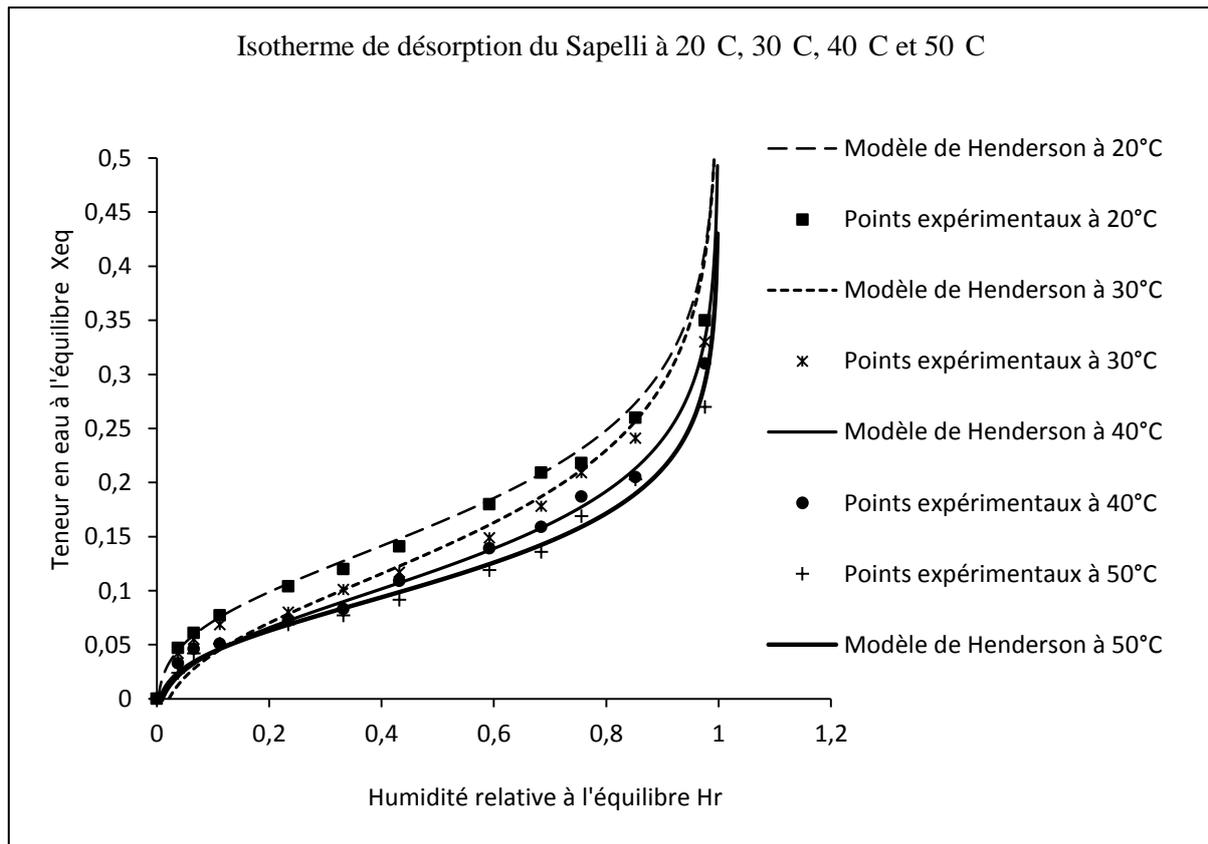


Figure 3.12: Isotherme de désorption du Sapelli pour différentes températures.

III.4 Résultats analytiques

Au vu de ces résultats l'humidité d'équilibre des bois lourds (Ebène ; Azobé) est moins variable que celui des mi-lourds (Iroko ;Sapelli). Ces résultats attestent que les bois lourds sont plus stables que les bois mi-lourds. Les figures : 3-13, 3-14, 3-15, 3-16 confirment ces résultats à différentes températures selon le modèle de Henderson. Il ressort que le comportement de l'équilibre hygroscopique des bois mi-lourds varie entre 0% et 50% d'humidité. Quant aux résultats des isothermes de désorption des bois lourds, ils sont similaires moins différents à ceux des bois mi-lourds à la seule différence qu'ils varient de 0% à 25% pour l'humidité d'équilibre. Ces résultats attestent et confirment que les bois lourds tropicaux sont appréciés pour les installations en milieu exposé (ouvrages portuaires, constructions hydrauliques, traverses des chemins de fer, ponts,etc. ...) par leur faible variation de teneur en eau à l'équilibre. Les bois mi-lourds sont appréciés pour la fabrication de menuiseries extérieures (portes, fenêtres, etc...) et intérieures (meubles, sculpture, les panneaux décoratifs etc...).

En comparant les deux catégories de bois à des températures précises (figures : 3-13, 3-14, 3-15 et 3-16) il en découle que dans une même ambiante, les mi-lourds (Iroko ; Sapelli) contiennent à l'équilibre plus d'eau que les lourds (Ebène, Azobé). Après un temps suffisamment long, et pour une même géométrie, les bois lourds (plus denses) perdent moins vite de l'eau que les bois mi-lourds. Ceci est la conséquence de la différence dans la répartition des principaux constituants de chaque type de bois (hémicellulose, cellulose, lignine). La teneur en lignine est donc plus importante dans les bois-lourds que dans les bois mi-lourds ; par contre celle en hémicellulose est plus faible dans les bois mi-lourds que dans les bois lourds.

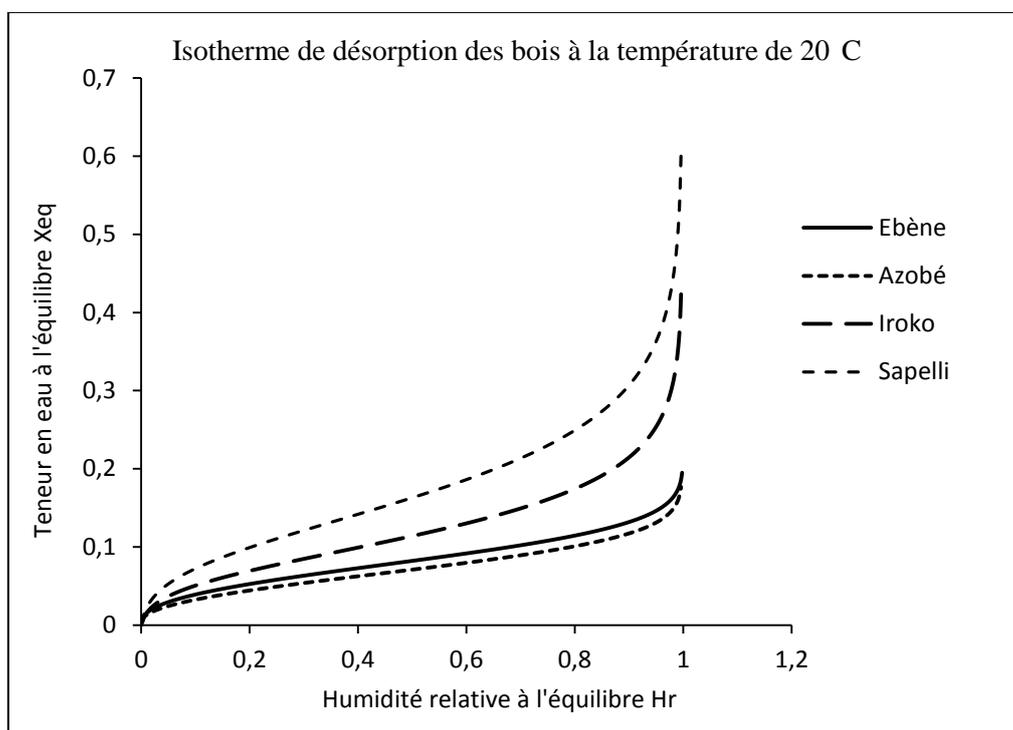


Figure 3.13: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à 20°C.

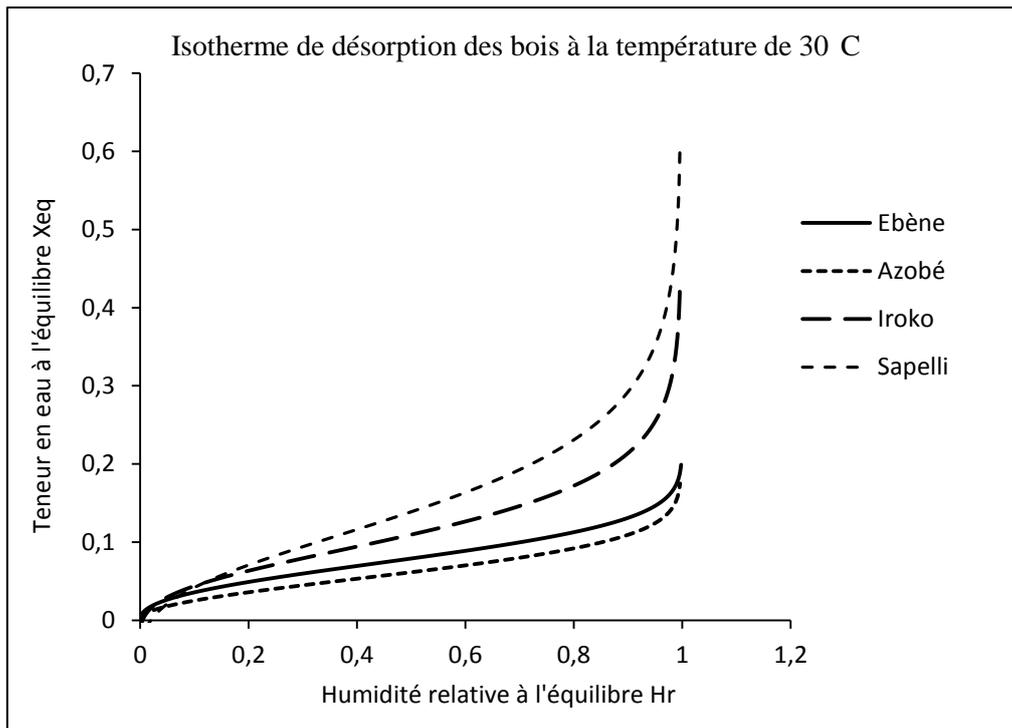


Figure 3.14: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à 30°C.

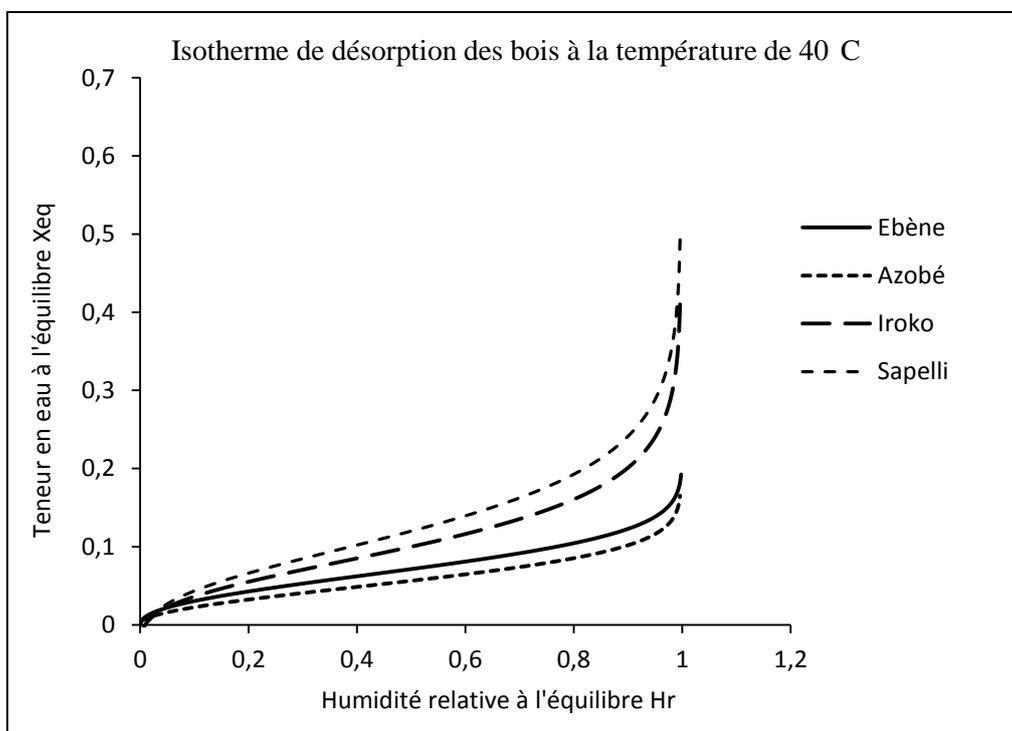


Figure 3.15: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à 40°C.

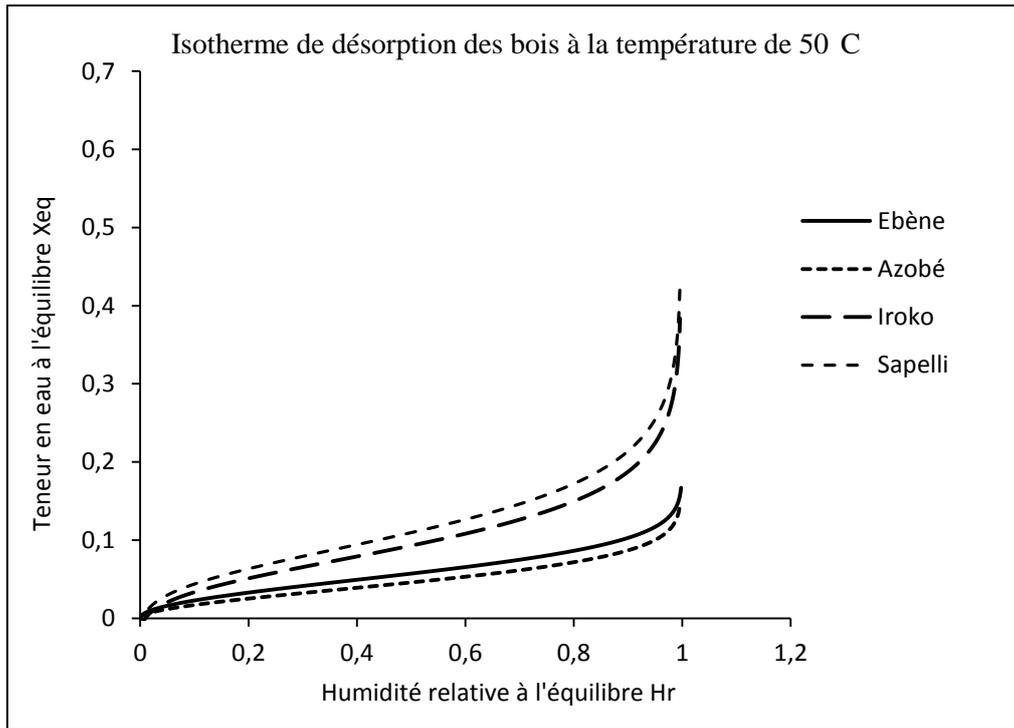


Figure 3.16: Les courbes du modèle d'Henderson des isothermes de désorption des bois à 50°C.

Chapitre 4 : IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF DU SUJET

IV.1 Objectif pédagogique

L'objectif pédagogique de cette partie du sujet est :

- de faire le lien entre la forêt, la transformation et l'utilisation des différentes essences de bois.
- de présenter l'importance du bois et de ses applications dans notre vie quotidienne.
- d'informer le jeune public sur la filière bois.
- de valoriser l'utilisation du bois afin de donner une vision proche de la réalité.

IV.2 La fiche pédagogique

La fiche pédagogique dans cette partie est consacrée à la mise en pratique de certaines notions vues dans ce mémoire par les apprenants. Elle est à la fois une fiche d'activité et de cours que nous appelons fiche élève, celle-ci va être illustrée par des différentes activités pédagogiques qui seront menées par les enseignants que l'on qualifiera : activités du professeur, ensuite par les élèves qui seront qualifiées : d'activités des élèves. Dans une fiche élève, l'enseignant pose des questions et les élèves donnent les réponses attendues. Pour les élèves, cette fiche regroupe les différentes activités à mener par l'élève qui trouvera les informations sur le bois. Pour l'enseignant, cette fiche donne les informations nécessaires pour mener à bien son activité pédagogique sur le bois.

IV.3 Intérêt didactique

Il faut avant tout noter que la didactique se présente comme l'ensemble des actions, des techniques d'enseignement applicables à tous les niveaux et à toutes les disciplines. L'exemple pris ici est la dispensation d'une leçon de notre sujet d'étude à l'intention des responsables éducatifs de notre pays pour illustrer les compétences qu'un apprenant peut développer sur le bois.

IV.4 Fiche élève

A RETENIR : Les arbres sont des espèces vivantes qui poussent dans les milieux où ils sont capables de résister. Lorsqu'on fabrique les objets avec du bois, il faut être vigilant vis-à-vis de déforestation, l'arbre comme tout organisme vivant a besoin des substances nutritives à l'exemple du dioxyde de carbone ,pour survivre et avoir du bois en abondance à fin jouer de multiples tâches qui nous sont indispensables. Il faut être vigilant vis-à-vis de la déforestation

tout simplement par le fait que, les forêts où poussent les arbres sont détenues par différents types de propriétaires : l'Etat ou le privé. Mais c'est l'Etat qui est le garant de la bonne gestion forestière. C'est ainsi que l'arbre, une fois coupé, se retrouve à la scierie où il va être transformé en poutres, planches pour la fabrication de nombreux dérivés à l'exemple des tables bancs, des charpentes.

Détermination des propriétés mécaniques du bois

Cette partie se présente comme une activité expérimentale qui est menée par les élèves sous la direction de l'enseignant. Les propriétés à démontrer ici par les élèves sont les propriétés mécaniques. Comme tâches à accomplir par les élèves :

-Pour cela les élèves découpent et plient des morceaux de caquettes de bois dans différents sens en morceau de 5 cm par 5cm, les élèves s'expriment sur ce qu'ils ont observé et constaté.

-Puis, on les interroge sur les raisons des différences observées. Pourquoi arrive-t-on à plier le bois dans certains sens et pas dans d'autres ? Ensuite, expliquer que le bois est composé de nombreux canaux qui servent à acheminer la sève. Comme ce matériau n'est pas uniforme, contrairement à d'autres (exemple : le métal), on dit qu'il est hétérogène, ce qui lui donne les propriétés particulières. Quand on essaie de plier le bois dans un sens des fibres, on remarque qu'il est flexible. En revanche, lorsqu'on essaie de le plier perpendiculairement au sens des fibres, le bois est rigide et cassant.

A RETENIR : Ces propriétés du bois très utiles quand on construit une maison ou lorsqu'on veut couper le bois. Les ébénistes font particulièrement attention à ce genre de détails .Ils peuvent deviner, en observant une planche, dans quel sens celle-ci a poussé (ou est le haut ?) et quelle partie de l'arbre elle vient. Ces connaissances sont indispensables pour réaliser les meubles.



Figure 4.1: Processus de détermination des propriétés mécaniques du bois.
L'expérience ci-dessous a pour but de démontrer les propriétés du bois en relation avec l'eau par exemple

Ici les élèves disposent comme matériel : une baguette de bois coupée en deux morceaux de même dimension, de l'eau, une bassine.

-Donner aux élèves deux morceaux de bois identiques. Les morceaux peuvent être numérotés si les élèves sont en groupe. Les élèves doivent ensuite comparer les deux morceaux et vérifier qu'ils sont bien identiques.

-Conserver l'autre bout de bois au sec et laisser le bout de tasseau dans l'eau, interroger les élèves sur leurs observations (une fois le morceau de bois dans l'eau, on se rend compte que la face sèche sur le dessus, s'humidifie peu à peu. On remarque aussi que l'eau s'infiltre facilement par les bouts sciés que par les cotés). Puis on demande aux enfants d'expliquer cette observation : pourquoi est-ce-que l'eau s'infiltre dans le bois dans certains sens et pas d'autres ? En fin on explique, s'ils n'ont pas trouvé, ou bien on reformule, s'ils n'ont pas compris : on retrouve la le caractère poreux du bois du bois. Les pores sont des petits canaux par lesquels l'eau et la sève circulent. On peut aussi le voir en observant le bois au microscope.

A RETENIR : Cette propriété du bois à absorber l'eau est très utile dans la maison pour réguler la quantité d'humidité présente dans l'air. Quand il y a trop d'humidité dans l'air, le bois absorbe, et quand l'air devient trop sec il la restitue. C'est ce que l'on appelle la régulation hygroscopique. Utiliser le bois comme parement intérieur permet donc de mieux réguler l'hygrométrie de l'air dans la maison.

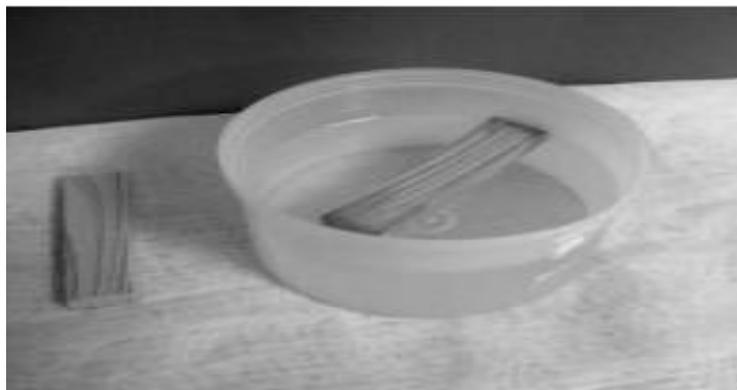


Figure 4.2: Comportement du bois sous l'effet de l'eau.

IV.5 Conclusion.

Dans cette partie consacrée à l'implication pédagogique de notre sujet, nous avons illustré avec des exemples précis, l'apport bénéfique pour les élèves, à savoir le développement des compétences chez ces derniers à mettre en œuvre pour expliquer des propriétés souvent présentées par le matériau bois qui ont toujours demeuré comme étant un obstacle à la mise sur pieds des compétences scientifiques.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les courbes de désorption de l'Ebène, de l'Azobé, de l'Iroko et du Sapelli ont été déterminées expérimentalement pour quatre températures (20°C, 30°C, 40°C, 50°C). Ces courbes sont décrites par le modèle de Henderson. On remarque que les courbes prédites par le modèle de Henderson coïncident avec les points expérimentaux dans le domaine d'activités allant de 0 à 95%. Les relations théoriques de ce modèle permettent d'estimer les valeurs des teneurs en eau à l'équilibre des essences à des humidités relatives autres que celles étudiées lors des expériences. Les résultats obtenus, nous permettent d'utiliser le modèle de Henderson dans les codes numériques afin de représenter la fonction d'humidité d'équilibre de bois mi-lourds et lourds. Il ressort de l'analyse des résultats, l'infériorité de la teneur en eau à l'équilibre des bois et l'humidité relative à l'unité. De plus, la pression de vapeur d'eau est toujours inférieure à la pression de saturation de la vapeur d'eau pour une température donnée. Signalons aussi le comportement de l'équilibre hygroscopique des bois mi-lourds qui varie entre 0% et 50% d'humidité et celui des bois lourds entre 0% et 25%.

Ce comportement qui influence les isothermes de désorption est en grande partie dû aux forces capillaires qui ont tendance à retenir l'eau en phase liquide. La teneur en eau à l'équilibre évolue dans le même sens que l'humidité relative. L'augmentation de la pression des molécules qui entraîne l'augmentation de l'humidité relative, est due à l'augmentation de la quantité de molécules d'eau qui favorisent la diminution de leur mobilité dans les pores. L'ensemble des résultats recueillis permet dans ces travaux de constituer une base des données, pour les deux groupes de bois étudiés et qui servira de support pour la modélisation et la simulation du séchage des bois tropicaux menées dans ce mémoire. Ces données permettent une interprétation physique du phénomène de sorption dans la limite des hypothèses employées. Cependant quelques critiques pourraient être soulignées. En effet, ces modèles supposent que tous les sites de sorption sont homogènes (d'affinité identique) et indépendants. Autrement dit, la probabilité d'occupation d'un site n'est pas influencée par les interactions latérales avec les autres sites.

Pour un travail prochain, nous envisageons d'étudier les isothermes d'absorption des bois tropicaux mi-lourds et lourds mentionnés ci-dessus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-**BOUSSOUGOU N. (2012)** Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement. Thèse dirigée par **Frédéric DUBOIS** de l'UNIVERSITE DE LIMOGES.

-**MOUCHOT N. (2002)** Etude expérimentale et modélisation des transports diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique des bois de hêtre et d'épica , de l'UNIVERSITE Henri Poincaré Nancy I .

-**NGUYEN N. (2014)** Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois. Thèse dirigée par **Frédéric DUBOIS**, de l'UNIVERSITE DE LIMOGES.

NSOUANDELE L. (2012) Etude des transferts couplés de masses et de chaleur lors du séchage convectif artificiel des bois tropicaux au Cameroun :Cas du SIPO (Entandrophragmautil) ,SAPELLI (Entandrophragmacylindricium), IROKO (Chlorophoraexccla), BUBINGA(Guibourtiademeusei), AZOBE (Lophiraalata) ,EBENE (Dioospyroscassiflon) P.139

-**SIMO T., BONOMA B. , MONKAM L. (2010)** Influence of Temperature and Water content on the Density and Porosity of the Tropical Woods: Ayous ,Baobab, Sapelli, Lotofa and Padouk PCN,51,P.79-83.

-**SIMO M. (2011)** Contribution à l'étude du séchage des bois tropicaux au Cameroun. Aspects caractéristiques, Modélisation multi-échelle et simulation. Le cas de bois d'Ayous et d'Ebène. Thèse de doctorat université de Yaoundé I .

-**THEMELIN A. (1998)** Comportement en sorption des produits ligno-cellulosiques. Bois en foret des tropiques.

-**Y. Jannot(2003)**. "Isothermes de sorption : Modèles et détermination", http://www.lept-ensam.u-bordeaux.fr/principal/annuaire/pages_perso/jannot.htm

-**Y.Jannot ,KanmogneA.,TallaA.,Monkam L.(2006)** experimental determination and modelling of water desorption isotherms of tropical woods : afzelia, ebony,iroko,moabi and obeche . Holzalsroh-und werkstoff 64, 121-124 .