

# UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET INGENIERIE EN MATERIAUX  
MECANIQUE ENERGETIQUE ET AERONAUTIQUE

## FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes - Axe Génie Civil et Durabilité  
(GEMH-GCD)

Thèse N° 15-2012

### THESE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES**

Discipline : Génie Civil

Présentée et soutenue par

**Nicaise MANFOUMBI BOUSSOUGOU**

Ingénieur Génie Civil de l'Université des Sciences et Technique de Masuku

Enseignant à l'Ecole Polytechnique de Masuku, Gabon

Date : 15 Juin 2012

## *Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement*

Thèse dirigée par : **Frédéric DUBOIS**

### Jury :

M. Denis BREYSSE	Professeur des Universités, Bordeaux	Président
M. Joseph GRIL	Directeur de Recherche CNRS, Montpellier	Rapporteur
M. Laurent BLERON	Maître de Conférences HDR, Cluny	Rapporteur
M. Samuel IKOGO	Maître Assistant CAMES, Libreville (Gabon)	Examineur
M. Nicolas SAUVAT	Maître de Conférences, Egletons	Examineur
M. Frédéric DUBOIS	Professeur des Universités, Egletons	Directeur de thèse



*A mes parents : Fene Scholastique et Doliphe BOUSSOUYOU.*

*A mon épouse Judith MANFOUMBI.*

*A mes bienaimés : Arlonde, Lanis, Garel, Laïska, Mwéni, Hyta, Gérémy et Yéni.*

*A mes frères et sœurs.*

*A mes amis de lutte.*





# AVANT PROPOS

Dans mon activité d'enseignant au Département Génie Civil de l'Ecole Polytechnique de Masuku, composante de l'Université des Sciences et Techniques de Masuku du Gabon, j'ai été souvent confronté à quelques difficultés, notamment dans le dimensionnement et la vérification des structures à base d'essences tropicales. Ces difficultés se sont traduites en interrogations puis en préoccupation majeure, pour la promotion de la construction bois dans notre pays, riche de cette matière première, et où le développement économique et sociale devient un impératif pour les autorités politiques locales.

Cette préoccupation s'est transformée, au fil des années, en un projet de recherche suite aux rencontres et échanges avec le Professeur Frédéric DUBOIS dont le premier contact a été établi grâce à la Coopération française par le biais du projet PAPESGA dirigé par Joël SOUMAGNE, Maître de Conférences aujourd'hui à la retraite. Je tiens ici à l'en remercier vivement.

Mes sincères remerciements iront au Professeur Frédéric DUBOIS, pour m'avoir fait confiance et avoir cru en ce projet, que j'espère mener, à terme, avec une collaboration permanente entre nos deux institutions.

Je tiens également à remercier vivement le Professeur Christophe PETIT pour m'avoir accepté dans le laboratoire GEMH-GCD (Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes axe Génie Civil et Durabilité) dont il est le responsable.

Que Nicolas SAUVAT, Maître de Conférences et Co-encadrant au début de ce travail, trouve ici ma profonde reconnaissance, pour ses conseils et sa disponibilité, malgré ses multiples occupations en tant qu'actuel Directeur de la Plate-Forme Technologique Bois Construction.

Pour avoir accepté de rapporter ce travail, je tiens à adresser ma profonde gratitude à Joseph GRIL et à Laurent BLERON, respectivement Directeur de Recherches CNRS à Montpellier et Maître de Conférences HDR à Cluny. Que le Professeur Denis BREYSSE trouve ici ma reconnaissance, pour avoir accepté de présider le jury de la soutenance de ce mémoire. Mes remerciements à Samuel IKOGOU, Maître Assistant CAMES à l'Ecole Polytechnique de Masuku, pour avoir accepté d'examiner ce travail. Vos précieux conseils ont contribué à conforter ma persévérance dans ce projet, sur lequel, votre contribution sera, sans nul doute, d'un apport considérable pour la suite.

Mes remerciements à Octavian POP et Mihai POP, respectivement Maître de Conférences et Ingénieur de Recherche, et à l'ensemble du personnel de l'atelier Génie Civil, pour leur contribution à la mise en place des essais expérimentaux au laboratoire d'Egletons.

Ce projet a eu besoin d'un coup de pouce administratif et financier. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux autorités rectorales de l'époque et actuelles, en tête desquelles, les Professeurs Jacques LEBIBI et Crépin ELLA MISSANG, Monsieur Isaac MOUARAGADJA, Maître Assistant CAMES (actuel Recteur), et le Directeur de l'Ecole Polytechnique Gaston N'TCHAYI MBOUROU, Maître Assistant CAMES. Je ne saurai oublier le Programme d'Appui Institutionnel au Développement des Ressources Humaines (PAI-DRH) du Gabon grâce auquel ce projet a pu être financé. Profonde gratitude à sa direction et à son personnel, pour leur disponibilité et leur gentillesse.

Mes remerciements particuliers à Boniface ONDO ENGOUANG, Henri NZANDI, Béatrice PAMBA et à l'ensemble du personnel de l'atelier Génie Civil de l'EPM. Qu'ils trouvent ici ma profonde reconnaissance, pour leur disponibilité, quant à l'aide apportée à la réalisation et au suivi des essais expérimentaux au Gabon.

A mes jeunes collègues Doctorants, merci pour ces échanges durant ces années passées ensemble. Je vous souhaite plein succès pour vos travaux.

Enfin, merci à mes chers collègues et amis, pour leurs encouragements, et merci à ceux qui, de près comme de loin, ont contribué à l'entame de ce vaste projet dont la poursuite nécessitera une synergie de ressources humaines et financières.

# RESUME

Le présent mémoire apporte une contribution à l'application de l'Eurocode 5 dans le dimensionnement et la vérification des constructions bois en zone tropicale. Cette approche, première du genre, nécessite la compréhension du comportement mécanique des essences tropicales en environnement variable. Dans une première phase, une étude expérimentale de découplage des phénomènes différés des éléments fléchis, sous climat contrôlé et à l'échelle centimétrique, est présentée. Ce protocole expérimental, premier du genre, a permis non seulement de dissocier les effets de retrait-gonflement transversale des effets de fluage proprement-dit et des effets mécano-sorptifs, mais également de comprendre la nature des effets mesurés selon l'emplacement des capteurs. Les effets liés au retrait-gonflement longitudinale, non négligeable, selon les conditions aux appuis et la taille des échantillons, sont également perceptibles. En deuxième phase, des essais de flexion long-terme, à l'échelle structure, ont été menés, en ambiances tropicales, à Franceville au Gabon, sur deux essences tropicales : le Moabi et l'Ozigo. A l'image de l'Eurocode 5, trois types d'environnement ont été sélectionnés : une ambiance climatisée temporairement, une ambiance extérieure abritée et une ambiance extérieure non-abritées. Les résultats obtenus et en cours d'acquisition montrent que les bois tropicaux ont un comportement différé accentué par la forte variation d'humidité pour des variations de températures peu significatives. Pour comprendre l'influence de l'humidité sur ces essences, une campagne d'essais, pour la caractérisation des isothermes de sorption et cinétiques de diffusion, a été menée, dans une troisième phase. Les paramètres de diffusion longitudinale et transversale dans les deux essences ont été déterminés. En complément, des essais de fluage et relaxation, en flexion long-terme, sous ambiance contrôlée, à l'échelle matériau de ces essences, ont été également conduits, dans une dernière phase. Cette étude, menée en basse et haute humidité, montre que le fluage est plus accentué pour les poutres humides et que la recouvrance est plus importante lorsque les poutres sont sèches. Une modélisation du fluage-recouvrance sous basse et haute humidité permet la détermination des paramètres viscoélastiques des poutres étudiées. Enfin, une étude comparative des coefficients de fluage, obtenus sur les essais en laboratoire et les essais en vrai grandeur, montre que les effets mécano-sorptifs sont prépondérants, en plus des effets du retrait-gonflement longitudinale empêchés non négligeables à l'échelle structure.

**Mots clés** : bois tropicaux, climat tropical, Eurocode 5, comportement long-terme, fluage, retrait-gonflement, viscoélasticité, mécano-sorption, isothermes de sorption, diffusion.

# ABSTRACT

The present report makes a contribution to adapt Eurocode 5 for timber constructions using tropical hardwoods in tropical climate. This approach requests to well know the mechanical behavior in variable environment. In a first time, an experimental study is presented for decoupling postponed phenomena from a longitudinal four-point creep bending, under controlled climate on small samples by measuring upper and lower deflections. The result of this original experimental protocol allows separating and illustrating different phenomena met on creep evolution of timber beams: swelling-shrinkage effects, hygro-lock effect, orthotropic mechano-sorption and viscoelasticity. In second time, longitudinal four-point creep bending tests were realised, in the scale of structure, in tropical atmosphere to Franceville in Gabon, in two tropical hardwoods: Moabi and Ozigo. The experimental device was led on three sites corresponding to three different climatic environments according to specific service classes of Eurocode 5: an atmosphere temporarily air-conditioned, a sheltered outside atmosphere and an outside atmosphere non-sheltered. The obtained results show that tropical wood have a deferred behaviour stressed by the strong variation of humidity for little significant temperature variations. To define new classes of service appropriated for the tropical atmospheres, it is important to characterize the diffusion process. Following this objective, a complete experimental device was led, in the scale of material, in order to determinate the sorption isotherms and diffusion parameters needed to study the mechano-sorptive behavior in real condition. In a last time, others tests of creep and relaxation, in the scale of material, were realized under controlled atmosphere, in the same species. This study, led in low and high relative humidity, shows that the creep is more significant for the wet beams and the recovery is more important when beams are dry. A modeling of the creep-recovery under low and high relative humidity is proposed and allows the determination of the viscoelastic parameters of the studied beams. At the end, a comparative study of creep coefficients, obtained on the laboratory samples and the beams in real environment, shows that the mechanic-sorptive effects are dominating, with an importance of longitudinal swelling-shrinkage effects, not insignificant in the scale of structure.

**Keywords:** tropical hardwood, tropical environment, Eurocode 5, long term behavior, creep, swelling-shrinkage, viscoelasticity, mechano-sorption, isotherms of sorption, diffusion.

# SOMMAIRE GENERAL

<i>INTRODUCTION GENERALE.....</i>	<i>1</i>
<i>CHAPITRE I : ETUDE EXPERIMENTALE DE DECOUPLAGE DES EFFETS DIFFERES DU MATERIAU BOIS.....</i>	<i>5</i>
<i>CHAPITRE II : ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DIFFERE DES BOIS TROPICAUX EN AMBIANCE TROPICALE : CADRE REGLEMENTAIRE ET EXPERIMENTATION.....</i>	<i>55</i>
<i>CHAPITRE III : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU TRANSFERT HYDRIQUE.....</i>	<i>99</i>
<i>CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE DIFFERE DES BOIS TROPICAUX EN AMBIANCE CONTROLEE : EXPERIMENTATION ET MODELISATION.....</i>	<i>153</i>
<i>CONCLUSION GENERALE.....</i>	<i>187</i>
<i>BIBLIOGRAPHIE.....</i>	<i>191</i>



# INTRODUCTION GENERALE

La forêt tropicale africaine, notamment tout le bassin du Congo, qui s'étend sur le Cameroun, le Gabon, Le Congo (Brazzaville), la Centrafrique, le Congo (Kinshasa), le Burundi, le Rwanda, l'Angola, la Tanzanie et la Zambie, regorge un fort potentiel ligneux. Après le bassin amazonien, le bassin du Congo est le deuxième plus grand bassin fluviale abritant une des forêts tropicales les plus riches du monde par sa biodiversité. Cette forêt compte plus de 10 000 espèces de plantes supérieures dont 3000 sont endémiques. Dans cette partie du globe, la forêt représente, à ce jour, une des sources principales de devises ; ce qui entraîne une forte pression sur cette ressource participant à l'équilibre de l'écosystème.

Pour répondre à cette préoccupation, le Gabon, qui est un pays à fort potentiel ligneux (plus de 80% du territoire est recouvert de forêt), s'est lancé dans une politique de limitation, puis d'interdiction de l'exportation de cette ressource à l'état de grumes. Cette décision vise non seulement à limiter l'exploitation anarchique de la forêt mais également à contribuer à l'industrialisation de la filière bois. Cela aura pour conséquence d'apporter une plus value financière au pays et de baisser la pression qui s'exerce sur la forêt à travers une exploitation forestière plus soutenable profitant au mieux aux populations locales. De plus, la valorisation des essences tropicales dont les applications conviennent aussi bien pour la maison individuelle que pour les superstructures vient à point nommé pour conforter cette démarche.

Le Gabon, malgré les efforts consentis ces dernières années en matière d'infrastructures, reste encore sous le seuil des pays en voie de développement. L'industrialisation de la filière bois peut apporter quelques réponses notamment dans le domaine de l'habitat socio-économique. En effet, au regard de la cherté des matériaux de construction à l'image du ciment dont la fabrication requiert des matériaux d'importation (gypse), le recourt aux matériaux locaux à l'exemple du bois, ressource naturelle et abondante, peut être salutaire. Toutefois, cela requiert une parfaite maîtrise du matériau et un savoir-faire en termes de technologie de construction.

Le bois est un matériau naturel, donc un matériau avec de fortes variabilités naturelles liées à son milieu de culture. De plus, comme nous le verrons plus loin, le bois est un matériau hygroscopique dont le comportement va varier avec sa teneur en eau en service. Dans leur utilisation, les structures en bois sont soumises, à la fois, à des sollicitations mécaniques (de courte et de longue durée) et environnementales (température et humidité). Les déformations engendrées par la combinaison de

ces deux sollicitations, peuvent, si elles sont mal estimées, conduire à la rupture différée des structures. D'ailleurs, l'expérience montre que la prise en compte des déformations limites est souvent le paramètre dimensionnant dans un calcul de structure en bois.

Dans les pays du nord, à l'exemple du Canada, des USA, de l'Allemagne, de La Norvège, la Suisse et la France pour ne citer que ceux-là, l'usage du bois comme matériau d'ingénierie s'est considérablement développé. Dans ces pays, diverses études ont été menées et ont abouti à l'établissement de normes et règles de conception, de dimensionnement et de vérification des structures en bois. Même si l'étude de la connaissance du matériau bois se poursuit, ces normes sont un socle fiable et sécuritaire pour la construction bois dans ces pays. En Europe, dans un souci d'uniformisation de la réglementation pour l'ensemble des professionnels de la construction en bois, de nouveaux codes règlementaires dans le domaine de la construction bois ont été développés à l'exemple de l'Eurocode 5. Ce dernier code, basé sur la notion de valeurs caractéristiques avec la prise en compte de coefficients modificateurs tenant compte des conditions climatiques et de la durabilité en service du matériau, a été conçu pour des essences tempérées dans leur environnement. L'application d'un tel code aux essences tropicales dans leur environnement (notamment en Afrique équatoriale, et particulièrement au Gabon) requiert une adaptation de sa version actuelle.

C'est donc dans ce contexte que se situe notre travail entamé depuis 2008 et dont l'objectif est l'étude des conditions de transfert de l'Eurocode 5 au contexte des structures en bois tropicaux dans leur environnement. Il va sans dire que l'étude est vaste et ne saurait être traitée sur 3 ou 4 années de thèse. Il sera présenté ici l'entame de la démarche qui devra se poursuivre en vue d'atteindre les objectifs fixés dans un proche avenir. La complexité du problème, eu égard aux différents domaines abordés, nous ont conduit à présenter ce travail en quatre chapitres dont chacun comporte un rappel bibliographique sur les aspects abordés.

Ainsi, le premier chapitre présente, dans sa première partie, l'état de connaissance sur le matériau bois. Outre sa structure microscopique et macroscopique, ses propriétés physiques et mécaniques y sont abordées. Le comportement mécanique instantané et différé est présenté en mettant en relief l'influence de l'environnement. Sans être exhaustif, différentes modélisations du comportement différé des éléments fléchis en bois sont également présentées et montrent la complexité d'en établir la mesure expérimentale. Dans un souci de compréhension et de maîtrise des phénomènes différés d'éléments fléchis des structures en bois, une étude expérimentale de découplage desdits phénomènes, sous climat contrôlé, menée sur des petits échantillons (échelle centimétrique), est présentée dans une seconde partie. Cette étude permet non seulement de



dissocier expérimentalement les différents effets différés mais également d'en comprendre leur importance dans la déformation finale.

Le deuxième chapitre aborde, dans sa première partie, l'approche règlementaire du comportement différé des structures bois vis-à-vis de l'Eurocode 5. En deuxième partie, un état de l'art sur le comportement différé des poutres en bois tropicaux sous ambiance tropicale est présenté. Une troisième partie présente le protocole ainsi que les résultats des essais réalisés à l'échelle de la structure, sur des poutres en Moabi et Ozigo (deux essences tropicales gabonaises), dans trois ambiances climatiques à Franceville au Gabon. Les coefficients de fluage, obtenus de ces trois environnements sur une période de deux ans, sont comparés aux coefficients proposés par l'Eurocode 5.

Dans le troisième chapitre, la première partie a trait à l'état de connaissance sur les mécanismes de sorption et de diffusion hydrique dans le bois. Ainsi, les outils numériques et méthodes expérimentales rappelées dans cette première partie sont utilisés en vue de la caractérisation des isothermes de sorption dans la deuxième partie et la caractérisation des cinétiques de diffusion dans la dernière partie. Cette étude vise la compréhension du processus de diffusion dans ces essences avec comme objectif l'étude de l'influence des paramètres climatiques sur les effets mécano-sorptifs dont la part est considérable sur le comportement différé en environnement variable.

Le dernier chapitre brosse un bref rappel, en première partie, sur les normes de classification mécanique du bois de structures et donne, en deuxième partie, l'état de connaissance sur les approches rhéologiques du comportement différé des éléments de poutres fléchis. La troisième partie du chapitre présente l'étude expérimentale. L'ensemble des résultats, obtenus en termes de caractérisation mécanique des deux essences tropicales étudiées, de comportement différé des essences sous haute et basse humidité à température constante, est présenté dans une quatrième partie. Les résultats de cette études sont ensuite comparés aux résultats obtenus à l'échelle structure en termes de coefficient de fluage.



# CHAPITRE I. ETUDE EXPERIMENTALE DE DECOUPLAGE DES EFFETS DIFFERES DU MATERIAU BOIS

<b>I.1. Généralité sur le matériau bois .....</b>	<b>8</b>
I.1.1. Structure microscopique du bois .....	8
I.1.1.1. Composition chimique du bois .....	8
I.1.1.2. Ultra-structure de la paroi cellulaire .....	9
I.1.2. Structure macroscopique du bois.....	10
I.1.2.1. Anisotropie du bois.....	10
I.1.2.2. Structure ligneuse et classification botanique.....	10
I.1.2.2.1 Plan ligneux des résineux.....	11
I.1.2.2.2 Plan ligneux des feuillus tempérés.....	11
I.1.2.2.3 Plan ligneux des feuillus tropicaux .....	12
I.1.2.3. Structure anatomique .....	13
I.1.3. Caractéristiques physiques du bois.....	13
I.1.3.1. Taux d'humidité et équilibre hygroscopique.....	14
I.1.3.2. Variations dimensionnelles du bois .....	14
I.1.3.3. Masse volumique .....	15
I.1.4. Comportement mécanique instantané du matériau bois .....	15
I.1.4.1. Loi de Hooke généralisée .....	16
I.1.4.2. Influence de l'humidité sur le comportement élastique du bois .....	16
I.1.5. Comportement mécanique différé du matériau bois.....	17
I.1.5.1. Essais fondamentaux .....	18
I.1.5.1.1 Fluage – Recouvrance .....	18
I.1.5.1.2 Relaxation – Effacement .....	19
I.1.5.2. Modèles rhéologiques .....	19
I.1.5.2.1 Modèle de Kelvin Voigt généralisé .....	20
I.1.5.2.2 Modèle de Maxwell généralisé .....	21
I.1.5.3. Effet du climat sur le comportement différé.....	22
I.1.5.3.1 Influence sous climat constant .....	22
I.1.5.3.2 Influence sous climat variable.....	23
I.1.5.4. Modélisation du comportement différé .....	24

<b>I.2. Découplage expérimental des effets différés des structures bois sous chargements thermo-hygro-mécaniques variables</b> .....	<b>26</b>
I.2.1. Justification de la géométrie .....	26
I.2.1.1. Comportement hydrique .....	26
I.2.1.2. Modes de sollicitation .....	27
I.2.2. Essai de flexion normalisé .....	28
I.2.2.1. Validation du montage retenu .....	28
I.2.2.2. Détermination du module local .....	28
I.2.2.3. Détermination du module global .....	29
I.2.3. Caractérisation physique et mécanique des éprouvettes .....	30
I.2.3.1. Echantillonnage .....	30
I.2.3.2. Anatomie des échantillons .....	30
I.2.3.3. Masse volumique anhydre des échantillons .....	31
I.2.3.4. Teneur en eau des échantillons témoins .....	31
I.2.3.5. Détermination de la résistance en flexion .....	32
I.2.3.6. Détermination du module d'élasticité .....	32
I.2.4. Description du dispositif expérimental long-terme .....	35
I.2.4.1. Description du montage .....	35
I.2.4.2. Détermination du coefficient de dilatation du PVC support des capteurs .....	36
I.2.4.3. Instrumentation .....	37
I.2.5. Histoire de chargement thermo-hygro-mécanique .....	37
I.2.6. Résultats et discussion .....	39
I.2.6.1. Evolution de la teneur en eau des éprouvettes de référence (témoins) .....	39
I.2.6.2. Teneur en eau finale des éprouvettes .....	40
I.2.6.3. Evolution générale des flèches .....	41
I.2.6.3.1. Flèche globale .....	41
I.2.6.3.2. Flèches moyennes .....	44
I.2.6.4. Mise en évidence du retrait-gonflement .....	45
I.2.6.4.1. Détermination du retrait-gonflement transversal libre .....	45
I.2.6.4.2. Détermination du retrait-gonflement par phase .....	47
I.2.6.4.3. Identification du retrait-gonflement longitudinal .....	48
I.2.6.4.4. Corrections des flèches par les effets du retrait-gonflement .....	48
I.2.6.5. Analyse des flèches .....	49
I.2.6.5.1. Identification des grandeurs mesurées .....	49

I.2.6.5.2	Détermination des modules instantanés à partir des courbes.....	51
<b>I.3.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>

---

## I.1. Généralité sur le matériau bois

Au cours des cinquante dernières années, l'intérêt porté au bois comme matériau de construction a entraîné un développement rapide de la recherche sur ce matériau. Pour sa meilleure compréhension, les chercheurs se sont intéressés autant à sa structure macroscopique que microscopique. Aujourd'hui encore, des études se poursuivent en vue d'optimiser son utilisation en tant que matériau de structure et matériau de synthèse pour certains composites fibreux.

Ce chapitre donne un aperçu de la structure microscopique et macroscopique du matériau bois en focalisant la première partie sur son comportement mécanique instantané et différé sous variations climatiques. La dernière partie présente une première approche expérimentale permettant le découplage des différents effets différés des éléments bois fléchis sous chargement thermo-hygro-mécanique variable et contrôlé.

### I.1.1. Structure microscopique du bois

Le bois peut être défini comme un amas de cellules végétales mortes, stockées au sein de l'arbre qui est le plus grand des végétaux. En d'autres termes, le bois est la matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc et les racines des arbres et des arbrisseaux. C'est donc un polymère complexe qui possède une organisation micro-structurale extrêmement élaborée dont l'étude ne sera pas abordée ici.

#### I.1.1.1. Composition chimique du bois

La composition chimique élémentaire de la matière organique bois 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 trouvera sous forme synthétisée :

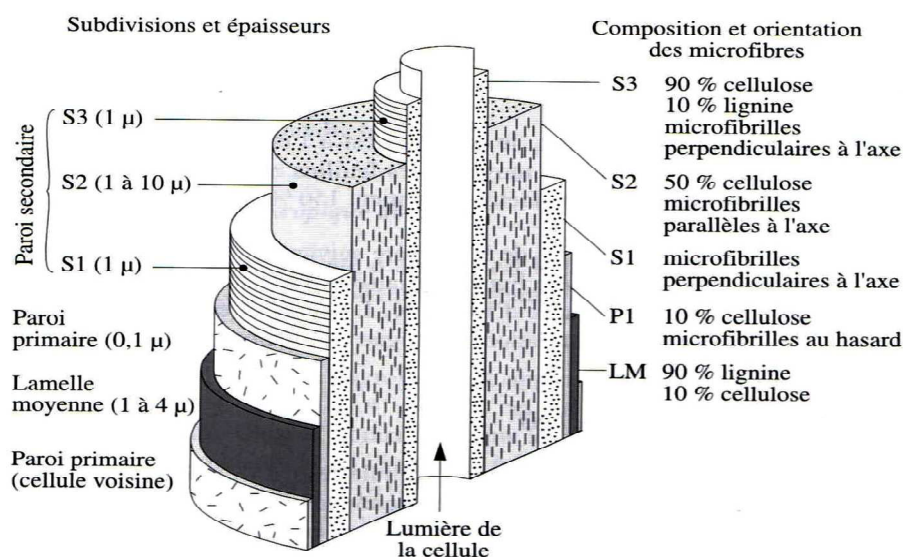
- **La cellulose** (40 à 50%) : polymère à haut poids moléculaire, linéaire et formé de longues chaînes offrant des possibilités de liaisons hydrogènes, ce qui lui confère un haut degré de cristallinité. C'est le principal constituant cellulaire qui contrôle les propriétés mécaniques et physico-chimiques ainsi que son pouvoir hygroscopique [DIR 01].
- **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 des 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.

### 1.1.1.2. Ultra-structure de la paroi cellulaire

La paroi cellulaire de la fibre de bois a une structure lamellaire, **Figure I.1.1**. Elle est constituée:

- d'une paroi primaire très fine ( $0,1 \mu\text{m}$ ) qui vient se plaquer sur la couche intercellulaire (lamelle mitoyenne). Elle contient environ 10% de cellulose dont les microfibrilles sont orientées de façon aléatoire.
- d'une couche intercellulaire ou lamelle mitoyenne ( $1 \text{ à } 4 \mu\text{m}$ ) qui est essentiellement constituée de lignine (90%). C'est la couche qui réalise le « cimentage » des cellules entre elles.
- d'une paroi secondaire subdivisée en trois couches : les couches externes S1 ( $1 \mu\text{m}$  environ dans le bois final) et S3 ( $1 \mu\text{m}$ ) qui contribuent à la stabilité dimensionnelle du bois en encadrant la couche intermédiaire S2 ( $1 \text{ à } 10 \mu\text{m}$  dans le bois final) plus susceptible d'absorber de l'eau, du fait de l'orientation des microfibrilles ( $5 \text{ à } 30^\circ$  par rapport à l'axe vertical de la cellule).



**Figure I.1.1.** Microstructure de la paroi cellulaire, Dirol et al [DIR 01]

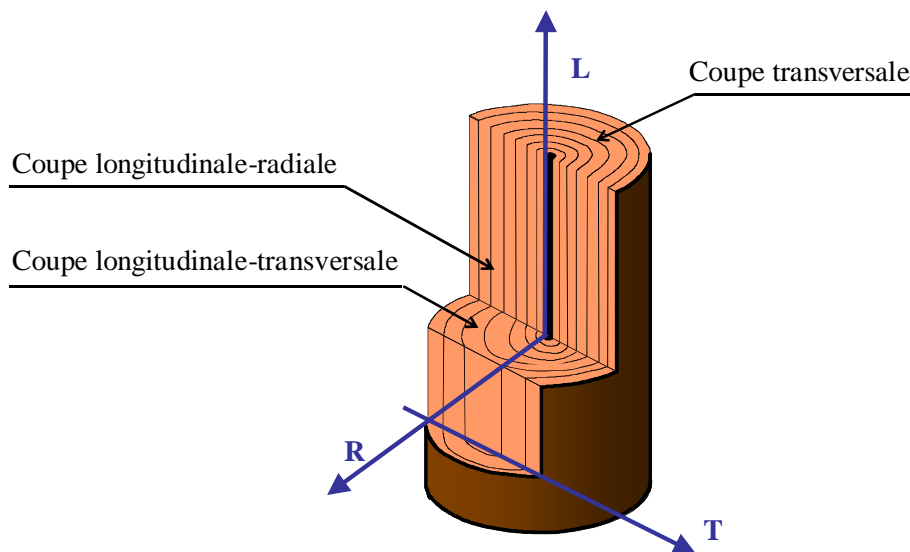
## I.1.2. Structure macroscopique du bois

### I.1.2.1. Anisotropie du bois

Le bois est un matériau anisotrope car sa structure est différente selon la direction suivant laquelle on l'observe. En effet, le bois possède une structure cellulaire orientée principalement selon la direction de l'axe du tronc. De même, d'un point de vue mécanique, à l'opposé du béton et de l'acier, le bois est un matériau dont les propriétés mécaniques varient suivant la direction de sollicitation considérée.

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 ainsi un trièdre de référence servant à définir les mesures dans une pièce de bois.



**Figure I.1.2.** Axes préférentiels (L, R, T) d'une pièce de bois

### I.1.2.2. Structure ligneuse et classification botanique

Les arbres qui fournissent du bois ont des cellules organisées en plans appelés plans ligneux. On désigne par plans ligneux l'ensemble des caractères de structure du bois tenant à la nature, à la forme et au groupement des cellules constitutives [AFN 61]. Ces caractères sont constants pour une espèce ou essence donnée. Ainsi, on désignera, par essence, l'ensemble des arbres ayant le même plan ligneux. 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'essences :

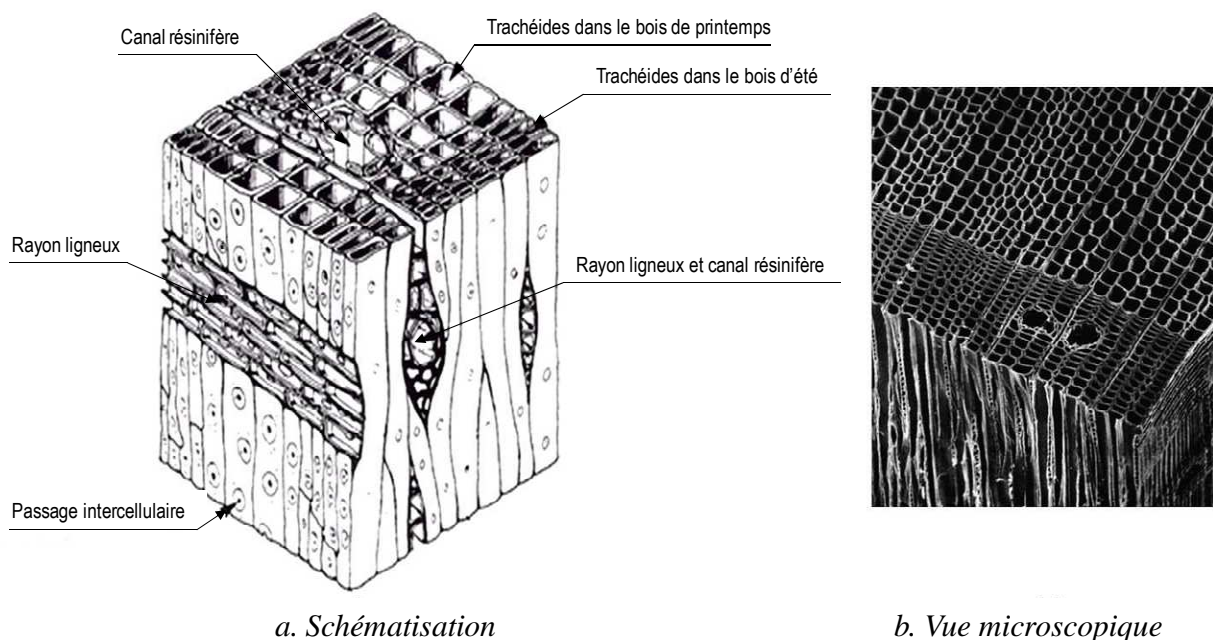


- Les résineux ou essences résineuses ;
- Les feuillus (tempérés et tropicaux) ou essences feuillues.

#### I.1.2.2.1 Plan ligneux des résineux

Ils désignent les arbres du groupe des conifères, en raison de la présence chez un grand nombre d'entre eux, de cellules ou de canaux résinifères. En effet, leur plan ligneux est simple. Le tissu est formé de trachéides qui sont des cellules fusiformes couramment appelées veines ou fibres du bois. Ces trachéides, placées dans le sens de la croissance de la plante (sens longitudinal), ont jusqu'à 5 à 6 mm de long pour 0.5 à 0.6 mm de diamètre. Exemples : l'épicéa, le sapin, le mélèze, le pin, etc.,

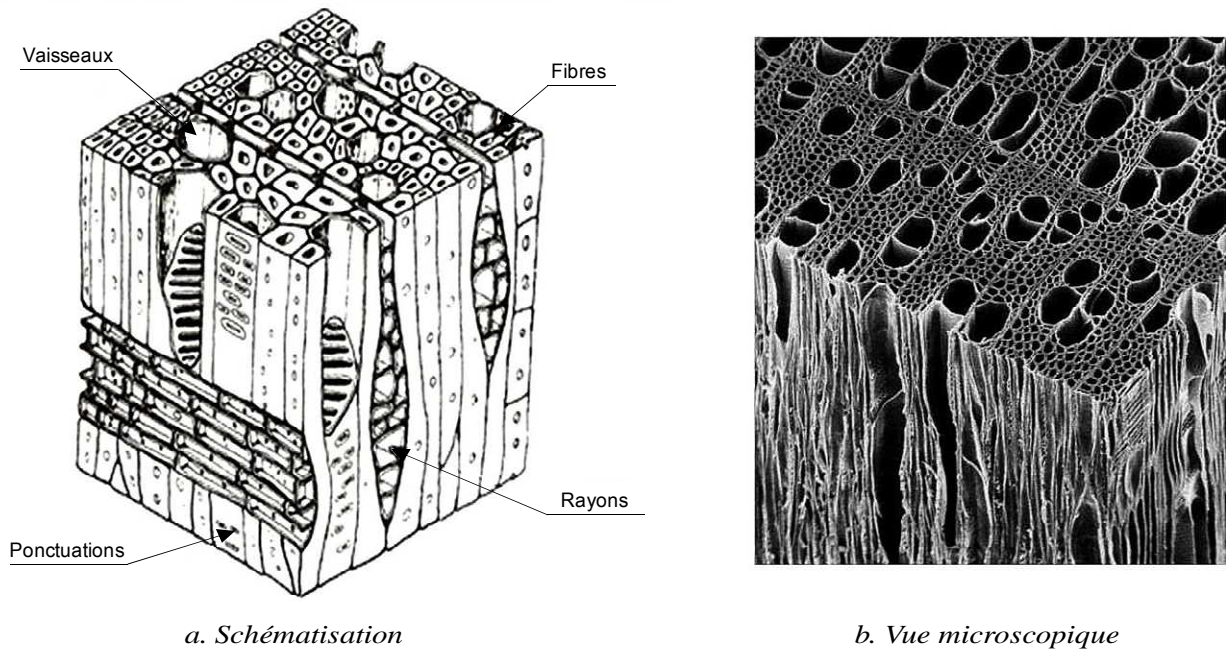
**Figure I.1.3.**



**Figure I.1.3.** Organisation du plan ligneux d'un résineux

#### I.1.2.2.2 Plan ligneux des feuillus tempérés

Ils désignent les arbres du groupe des dicotylédones en raison de leurs feuilles plates à nervation ramifiée. Leur plan ligneux est plus complexe que celle des résineux. Les tissus de fibres, placés dans le sens de la croissance, de longueur 2 à 3 mm ont une forme en fuseau rappelant les trachéides des résineux. Exemples : le chêne, le hêtre, etc., **Figure I.1.4.**

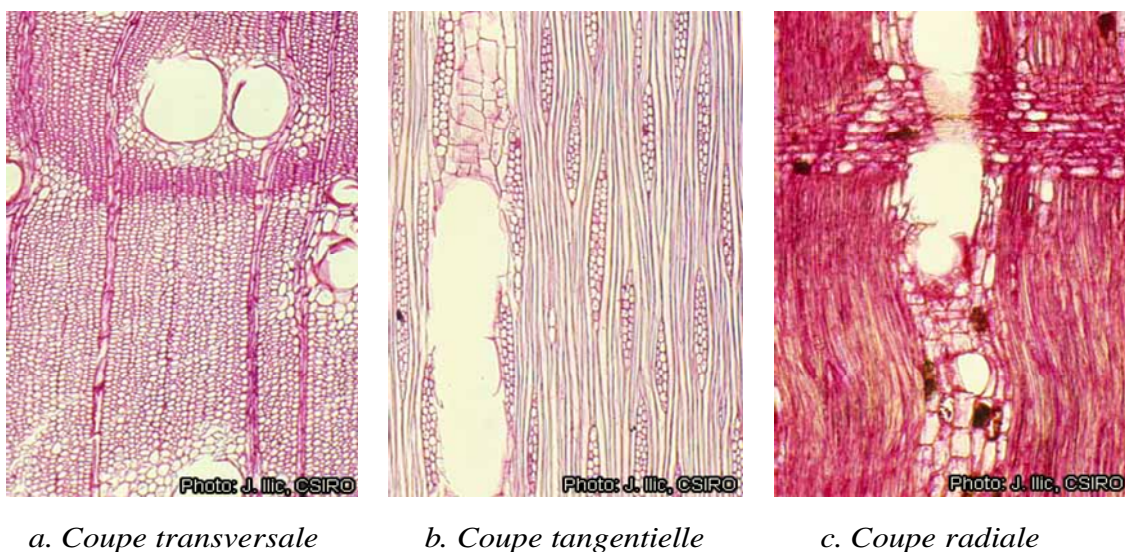


**Figure I.1.4.** Organisation du plan ligneux d'un feuillu tempéré

#### 1.1.2.2.3 Plan ligneux des feuillus tropicaux

Les éléments fondamentaux (trachéides et parenchymes), constituant le plan ligneux des essences tropicales, sont les mêmes que ceux des feuillus tempérés. Toutefois, leur nombre, leur disposition et leur forme varient largement [DIR 01], **Figure I.1.5**.

On note également que la limite des cernes annuels des feuillus tropicaux est quasiment invisible à l'œil nu sur une section transversale (exemple du Kotibé, du Framiré, de l'Iroko, l'Azobé, le Movingui, l'Okoumé etc.).



**Figure I.1.5.** Organisation du plan ligneux d'un feuillu tropical : le Framiré (*Terminalia ivorensis*), source Protabase

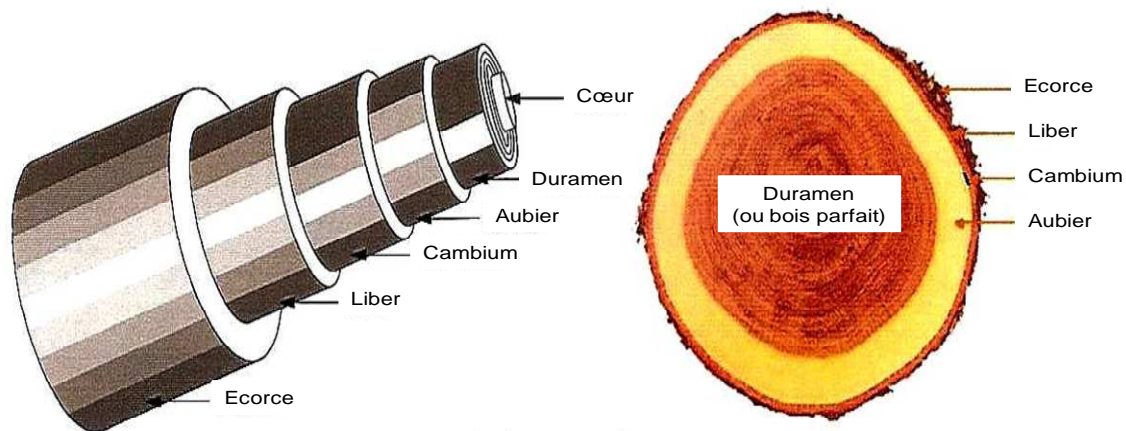
### I.1.2.3. Structure anatomique

La section transversale complète d'un tronc (**Figure I.1.6**) permet de mettre en évidence trois parties plus ou moins distinctes que sont :

- **L'écorce** : c'est la couche protectrice du tronc ;
- **L'aubier** : c'est la partie partiellement vivante de l'arbre assurant l'approvisionnement en sels minéraux ;
- **Le duramen** : « bois de cœur » ou encore « bois parfait » est la partie centrale du tronc 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 plus 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.



**Figure I.1.6.** Structure d'un tronc d'arbre

### I.1.3. Caractéristiques physiques du bois

D'un point de vue physique, le matériau bois peut être caractérisé par les propriétés essentielles 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.



1.1.3.1. Taux d'humidité et équilibre hygroscopique

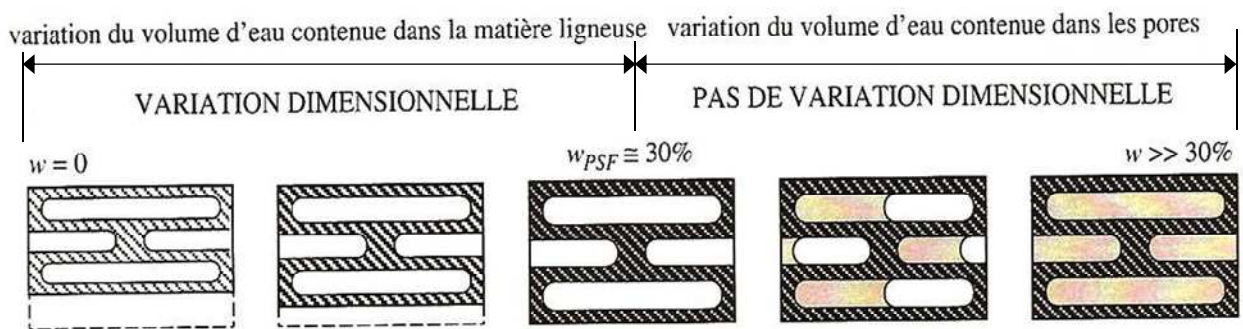
On appelle humidité, degré ou taux d'humidité  $w$  d'un bois la quantité d'eau qu'il renferme, exprimée en pour cent de la masse à l'état anhydre. En d'autre terme, c'est le rapport entre la masse d'eau  $m_w$  contenue et la masse de bois à l'état sec  $m_0$  tel que :

$$\omega = \frac{m_w - m_0}{m_0} \tag{I.1.1}$$

1.1.3.2. 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  $w \leq 30\%$ ) développé au chapitre 2, correspondant à la venue ou au départ d'eau chimiquement liée. Au-delà, les variations dimensionnelles deviennent négligeables, **Figure I.1.7**.



**Figure I.1.7.** Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois [NAT 04]

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  $\beta$  (coefficient de proportionnalité) qui est une fonction de la variation dimensionnelle ( $\Delta l$ ) (dans la direction considérée) et de la variation de teneur en eau ( $\Delta w$ ). On a alors :

$$\beta = \frac{\Delta l}{l \times \Delta w} \times 100 \tag{I.1.2}$$

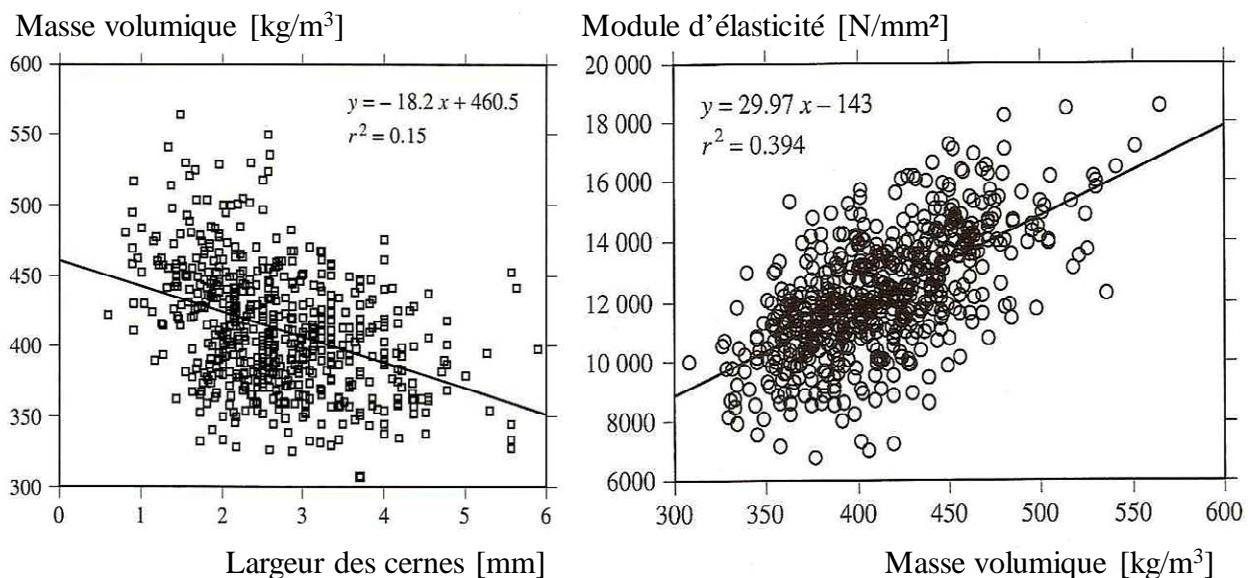
Il est à noter que chaque essence a des coefficients de retrait-gonflement qui lui sont propres et qui varient selon la direction considérée. En moyenne, le coefficient de retrait-gonflement tangentiel est deux fois supérieur au retrait-gonflement radial. Le coefficient de retrait-gonflement longitudinal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

rapport au module d'élasticité longitudinal, les effets de retrait gonflement longitudinal sont à considérer.

### 1.1.3.3. Masse volumique

Elle se définit comme le rapport de la masse au volume de bois correspondant. Cette grandeur est fortement dépendante de l'humidité interne du bois et est généralement indiquée à une humidité de référence de 12%. Plusieurs études [NAT 87] 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, **Figure I.1.8**. Pour une essence, cette grandeur peut varier considérablement.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{I.1.3})$$



**Figure I.1.8.** Relation entre masse volumique, largeur des cernes et module d'élasticité [NAT 87]

### 1.1.4. Comportement mécanique instantané du matériau bois

Soumis à des contraintes ou des déformations imposées limitées et instantanées, le matériau bois ou à base de bois présente un comportement élastique tel que l'on peut établir une relation linéaire entre les contraintes et les déformations.

La première loi traduisant le comportement du bois tel qu'énoncé ci-dessus fut identifié en 1663 par l'anglais Robert Hooke de la *Royal Society*. En effet, ses travaux sur le bois et sur d'autres matériaux (métal, verre etc.) l'ont conduit à formuler la première loi de comportement la plus simple qui puisse être. Ces travaux ont donc constitué les bases même de la mécanique.

### 1.1.4.1. Loi de Hooke généralisée

En uni-axial, la loi de Hooke s'écrit :

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (I.1.4)$$

De façon générale, chaque composante du tenseur des déformations est une fonction linéaire des composantes du tenseur des contraintes et inversement. En utilisant la convention d'Einstein sur les sommations, la loi de Hooke se généralise, dans les trois directions privilégiées, de la façon suivante :

$$\sigma_{kl} = E_{kl ij} \cdot \varepsilon_{ij} \quad \text{ou encore} \quad \varepsilon_{ij} = C_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (I.1.5)$$

$\varepsilon_{ij}$  sont les composantes du tenseur des déformations,  $E_{kl ij}$  et  $C_{ijkl}$  sont respectivement les tenseurs de rang 4 des rigidités élastiques et des complaisances élastiques. Enfin,  $\sigma_{kl}$  représente les composantes du tenseur des contraintes.

Dans le cas d'un matériau orthotrope transverse, pour lequel le plan radial (RL) et le plan transverse (RT) constituent des symétries matérielles locales, la matrice des complaisances s'exprime avec 3 modules de Young dans les axes principaux, 3 modules de cisaillement et 6 coefficients de Poisson dans les différents plans de symétrie, les autres coefficients étant nuls.

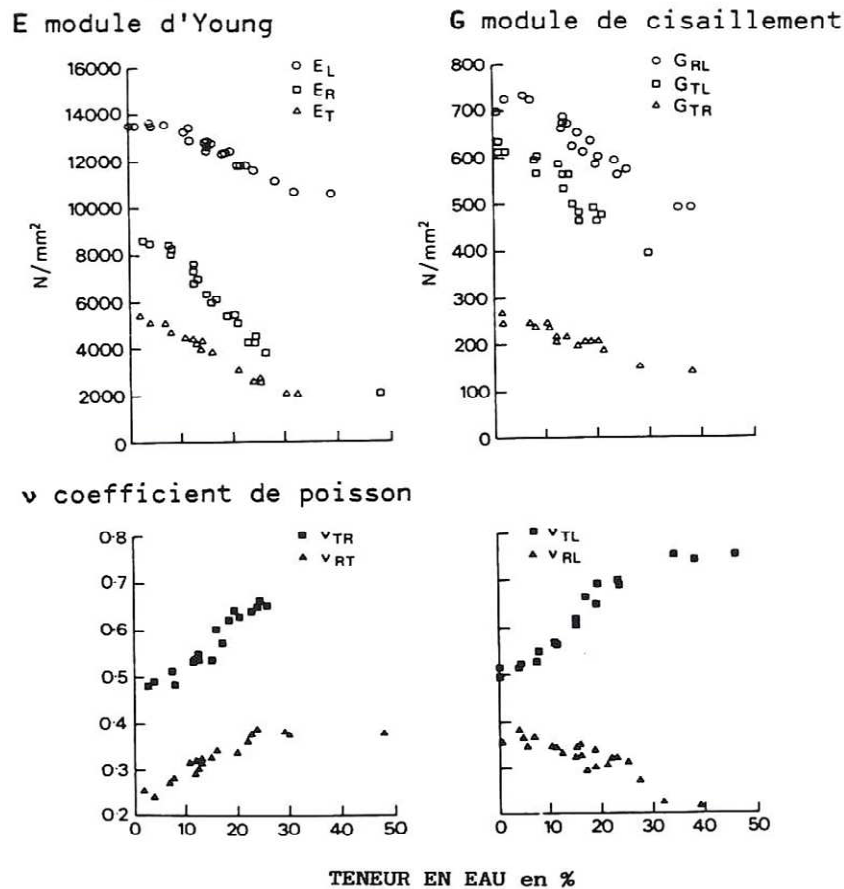
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix} \quad (I.1.6)$$

Il est à noter que ces composantes sont très variables d'une essence à une autre et dépendantes de la teneur en eau du bois soumis aux essais de caractérisation. Cependant, le tenseur de complaisance est supposé symétrique.

### 1.1.4.2. Influence de l'humidité sur le comportement élastique du bois

Plusieurs auteurs [SAL 82] [KOL 84] [GUI 87] [FEL 90] ont montré une forte influence de l'humidité interne du bois sur ses caractéristiques mécaniques, et ce, dans le domaine

hygroscopique. Cela se traduit par une variabilité des constantes élastiques pour des teneurs en eau variant entre l'état anhydre ( $w \approx 0\%$ ) et le point de saturation des fibres ( $w \approx 30\%$ ), **Figure I.1.9**.



**Figure I.1.9.** Effet de l'humidité sur les constantes élastiques de l'épicéa de Sitka, d'après Carrington [FEL 90].

### I.1.5. Comportement mécanique différé du matériau bois

Le bois et les matériaux dérivés du bois ont un comportement qui varie en fonction du temps. En effet, si l'on mesure postérieurement les déformations engendrées par une charge constante sur un élément de structure, on constate que la déformation évolue dans le temps. De même, si l'on impose une déformation constante dans la même période, on remarque également une évolution significative des contraintes. Ces deux expériences ont amené à conclure que le matériau bois et ses dérivés fluent et se relaxent. Cette évolution, dans le temps, marque donc un écoulement du matériau caractéristique des matériaux viscoélastiques. Ainsi, sous sollicitations de longue durée, le bois a un comportement viscoélastique. Ce comportement s'explique par le couplage des trois composants polymériques naturels du bois que sont la cellulose (dont les microfibrilles forment un treillis tridimensionnel élastique), l'hémicellulose (polymère amorphe très hydrophile) et la lignine (liant hygroscopique du treillis).

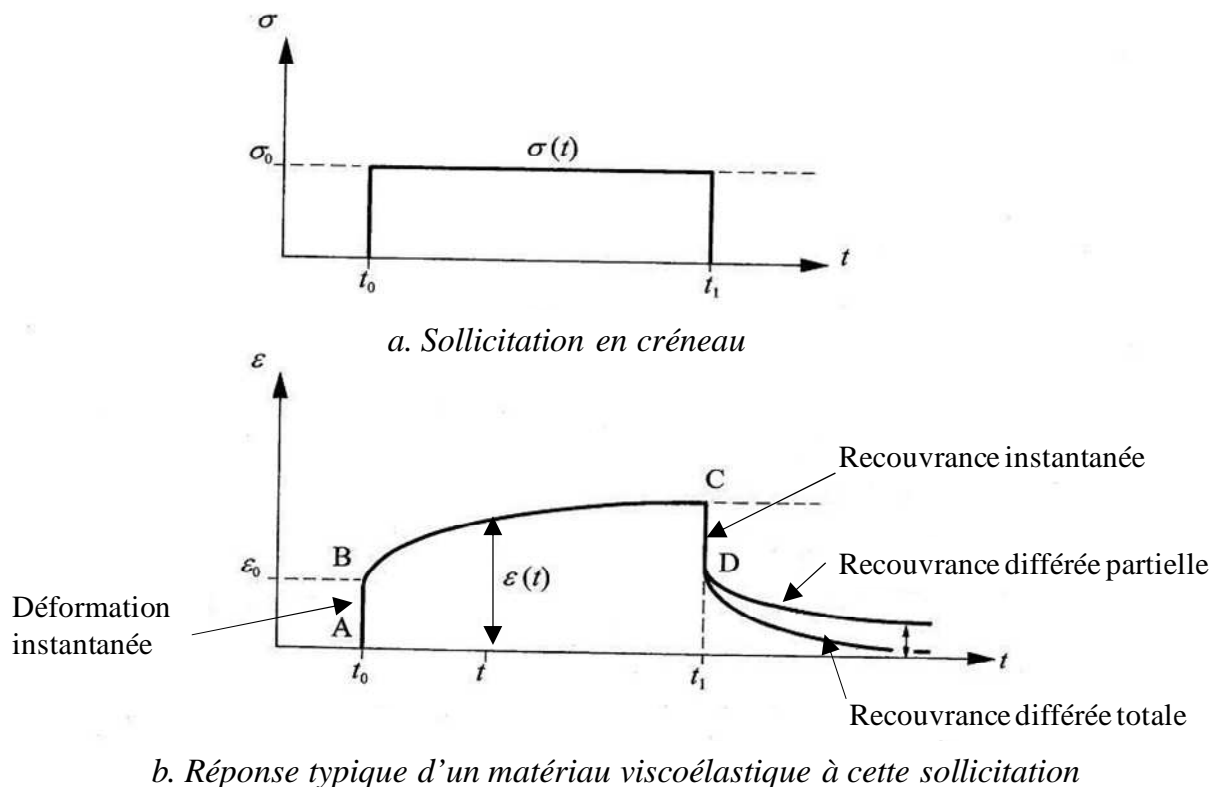
### 1.1.5.1. Essais fondamentaux

Pour caractériser l'écoulement de la matière en fonction du temps, on a recours à deux expériences fondamentales que sont : l'essai de fluage-recouvrance et l'essai de relaxation-effacement.

#### 1.1.5.1.1 Fluage – Recouvrance

On définit le fluage comme étant l'augmentation, dans le temps, des déformations d'un échantillon soumis à un créneau de charge constante, dans une atmosphère constante.

La recouvrance, quant à elle, se définit comme la diminution, avec le temps, de l'amplitude de la déformation quand la contrainte appliquée est annulée, pour des conditions climatiques constantes. Dans le cas d'un comportement linéaire, la recouvrance a tendance à voir la déformation s'annuler. Par contre, une déformation résiduelle est le signe d'une recouvrance partielle caractérisant soit un comportement non linéaire soit une variation de teneur en eau parasite durant l'essai. Pour une sollicitation uni-axiale, la **Figure I.1.10** illustre l'essai de fluage-recouvrance.



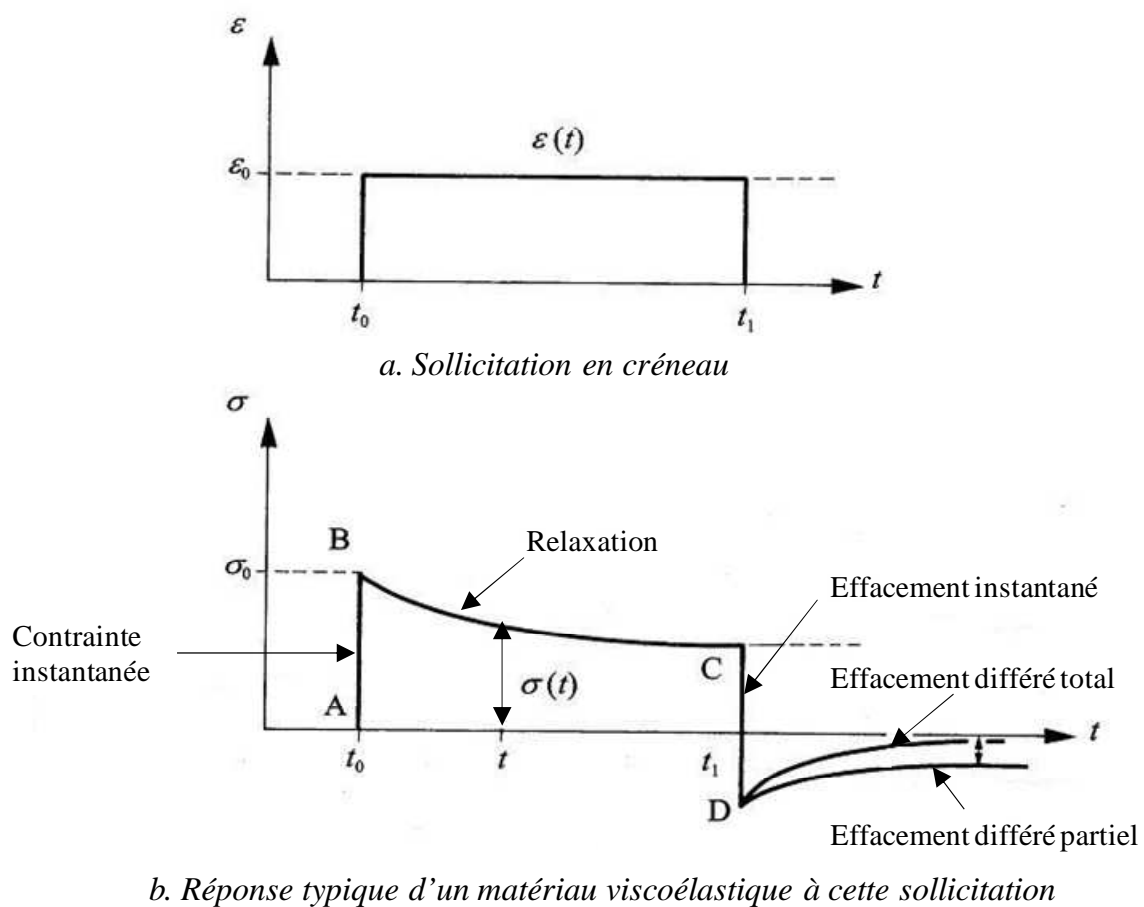
**Figure I.1.10.** Essai de fluage – recouvrance idéalisé, d'après Navi [NAV 05].



### I.1.5.1.2 Relaxation – Effacement

L'expérience de relaxation consiste à observer l'évolution, dans le temps, des contraintes d'un échantillon soumis à un créneau de déformation constante. On remarque que la contrainte décroît au cours du temps, **Figure I.1.11**. Il s'agit du phénomène de relaxation des contraintes.

Après diminution ou suppression de la déformation constante, on assiste à une réponse instantanée puis différée en contrainte allant jusqu'à effacement partiel ou total de la contrainte : c'est l'expérience d'effacement, **Figure I.1.11**. Comme pour l'essai de fluage-recouvrance, une contrainte résiduelle en fin d'effacement est le signe soit d'un comportement non linéaire soit d'une variation parasite de la teneur en eau durant l'essai.



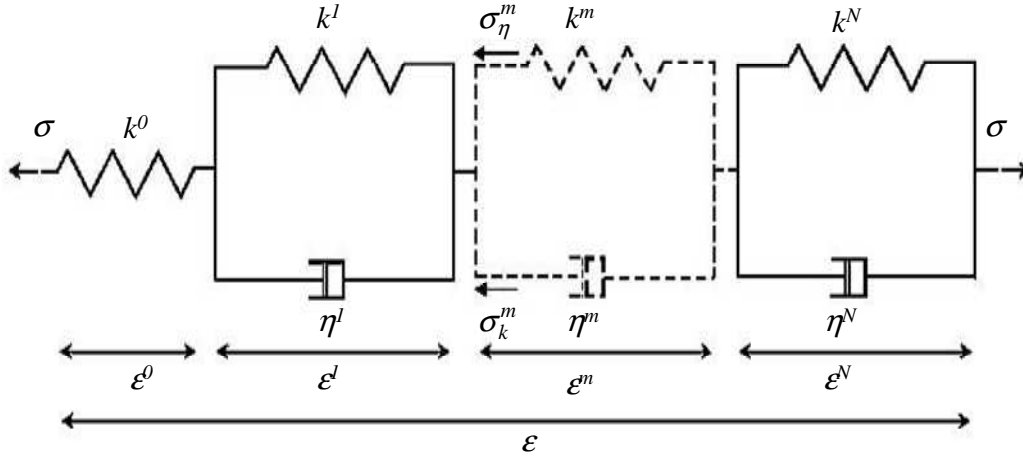
**Figure I.1.11.** Essai de relaxation – effacement idéalisé, d'après Navi [NAV 05].

### I.1.5.2. Modèles rhéologiques

Pour caractériser le comportement viscoélastique du bois, on a recours à des modèles rhéologiques combinant des ressorts et des amortisseurs décrivant respectivement le comportement élastique d'un solide et le comportement visqueux d'un fluide. Les modèles les plus couramment utilisés sont : le modèle de kelvin-Voigt généralisé et le modèle de Maxwell généralisé.

## I.1.5.2.1 Modèle de Kelvin Voigt généralisé

Particulièrement utilisé pour traduire l'essai de fluage-recouvrance, ce modèle est composé de  $N$  cellules de Kelvin-Voigt (ressort + amortisseur monté en parallèle). Un ressort de raideur  $k^0$  symbolise l'élasticité « instantanée » du matériau. Chaque cellule de Kelvin Voigt s'active selon une période temporelle caractéristique, **Figure I.1.12**.



**Figure I.1.12.** Représentation du modèle de Kelvin-Voigt généralisé [MOU 08]

Le comportement global du modèle peut se résumer comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon^{(0)} + \sum_{m=1}^N \varepsilon^{(m)} \\ \varepsilon^{(0)} = \frac{\sigma}{k^{(0)}} \\ \sigma = k^{(m)} \cdot \varepsilon^{(m)} + \eta^{(m)} \cdot \dot{\varepsilon}^{(m)} \end{cases} \quad (\text{I.1.7})$$

$\varepsilon^{(0)}$  désigne la déformation instantanée,  $\varepsilon^{(m)}$ , la déformation du  $m^{\text{ième}}$  élément de Kelvin Voigt,  $k^{(0)}$ , la raideur du ressort associé,  $k^{(m)}$  et  $\eta^{(m)}$ , respectivement la raideur et la viscosité du  $m^{\text{ième}}$  élément.

De l'équation (I.1.7), on en déduit la loi de comportement en fluage comme suit :

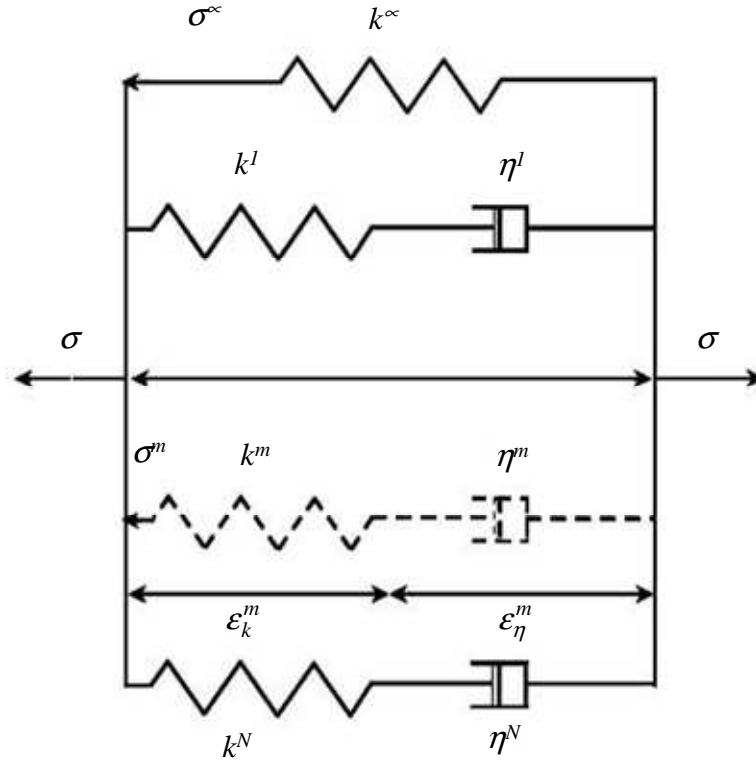
$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot \left[ \frac{1}{k^{(0)}} + \sum_{m=1}^N \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \left( 1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot t} \right) \right] \quad \text{avec} \quad \lambda^{(m)} = \frac{k^{(m)}}{\eta^{(m)}} \quad (\text{I.1.8})$$

Dans l'hypothèse d'un matériau non vieillissant, la fonction de fluage uni-axiale  $J(t)$ , qui se détermine à l'aide d'un essai de fluage expérimental, se met alors sous la forme :

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{k^{(0)}} + \sum_{m=1}^N \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \left( 1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot t} \right) \quad (\text{I.1.9})$$

## I.1.5.2.2 Modèle de Maxwell généralisé

Couramment utilisé pour traduire l'essai de relaxation-effacement, ce modèle est composé de  $M$  cellules de Maxwell (ressort + amortisseur monté en série) associés à un ressort, en parallèle. Il se représente sous la forme, **Figure I.1.13**.



**Figure I.1.13.** Représentation du modèle de Maxwell généralisé [MOU 08]

Le comportement global du modèle peut se résumer comme suit :

$$\begin{cases} \sigma = \sigma^{(\infty)} + \sum_{m=1}^N \sigma^{(m)} \\ \varepsilon = \frac{\sigma^{(0)}}{k^{(0)}} \\ \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}^{(m)}}{k^{(m)}} + \frac{\sigma^{(m)}}{\eta^{(m)}} \end{cases} \quad (\text{I.1.10})$$

$\sigma^{(\infty)}$  désigne la contrainte dans le ressort de raideur  $k^{(\infty)}$ ,  $\sigma^{(m)}$ , la contrainte dans le  $m^{\text{ième}}$  élément de Maxwell caractérisé par sa raideur  $k^{(m)}$  et sa viscosité  $\eta^{(m)}$ .

Par résolution de l'équation différentielle (I.1.10), on en déduit la réponse du modèle en contrainte pour un essai de relaxation ( $\varepsilon = \varepsilon_0$ ) telle que :

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left[ k^{\infty} + \sum_{m=1}^N k^{(m)} \cdot e^{-\lambda^{(m)} \cdot t} \right] \quad \text{avec} \quad \lambda^{(m)} = \frac{k^{(m)}}{\eta^{(m)}} \quad (\text{I.1.11})$$

Dans l'hypothèse d'un matériau non vieillissant, la fonction de relaxation uni-axiale s'écrit :

$$R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = k^\infty + \sum_{m=1}^N k^{(m)} \cdot e^{-\lambda^{(m)} \cdot t} \quad (\text{I.1.12})$$

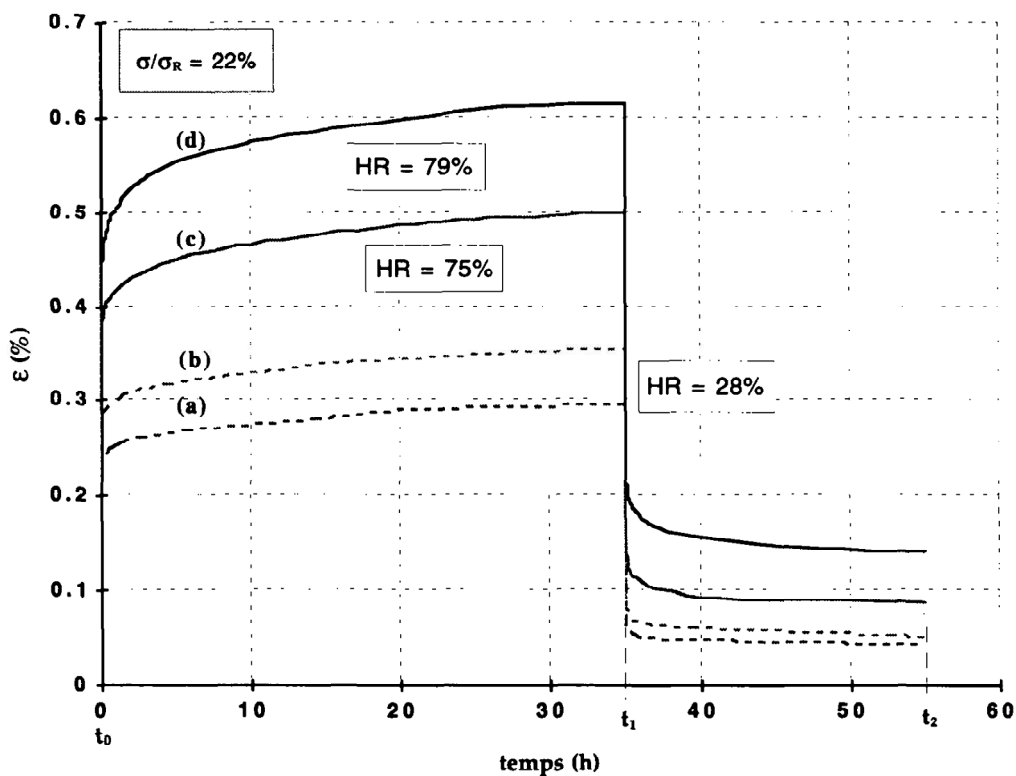
### I.1.5.3. Effet du climat sur le comportement différé

Nous avons vu que les caractéristiques mécaniques du bois varient sensiblement avec l'humidité et la température.

#### I.1.5.3.1 Influence sous climat constant

L'étude du comportement viscoélastique sous climat constant permet de déterminer l'impact des propriétés climatiques (température, humidité relative) sur les paramètres viscoélastiques d'une part, mais d'autre part, de pouvoir identifier les lois de dépendance.

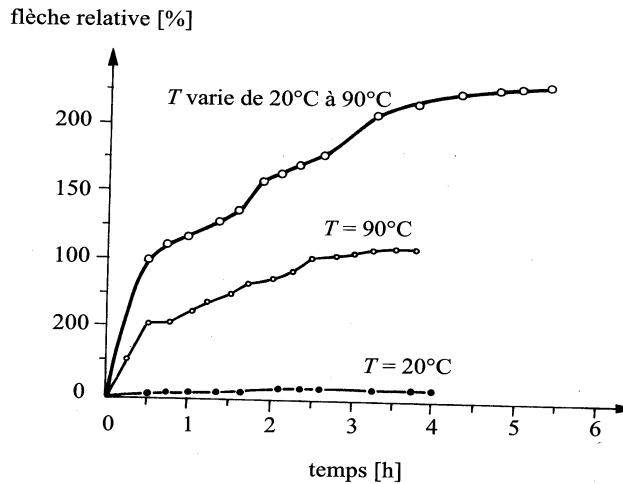
Les travaux expérimentaux de Pittet [PIT 96], réalisés sur des petites éprouvettes de bois de pin maritime ( $0,7 \times 3 \text{ mm}^2$  de section pour 30 mm de long), montrent clairement que, sous charge constante, l'amplitude des déformations est plus prononcée pour une éprouvette très humide que pour une éprouvette plus sèche, **Figure I.1.15**. Concernant la recouvrance partielle, nous observons que les phénomènes non linéaires sont accentués à haute humidité.



**Figure I.1.15.** Essais de fluage – recouvrance, en traction, pour un même niveau de charge (22%), effectués pour un niveau d'humidité relative constant de 28% (a et b), 75% (c) et 78,5 (d), [PIT 96].

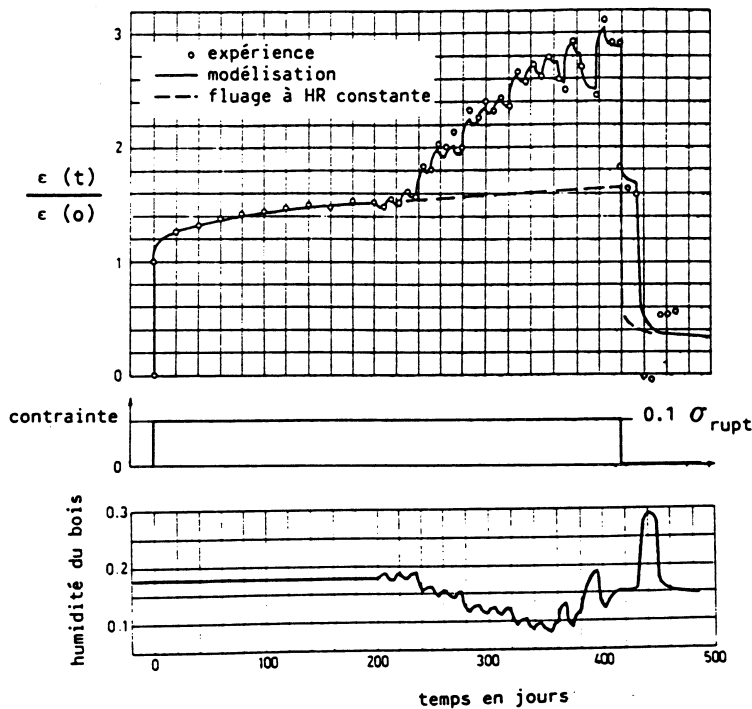
1.1.5.3.2 Influence sous climat variable

L'étude du fluage relatif en flexion trois points du Méléthiéra (essence tropicale) menée par Jouve et Sales [JOU 86] montre, **Figure I.1.16**, une influence très prononcée de la variation de la température sur la rigidité même du matériau.



**Figure I.1.16.** Fluage relative du Méléthiéra à différentes températures, Jouve et al [JOU 86].

De même, sur du contreplaqué de bouleau en flexion soumis à des cycles d'adsorption – désorption sous charge, Ranta Maunus [RAN 75] observe une amplification du fluage avec la variation d'humidité, **Figure I.1.17**. Ce phénomène est connu sous le nom de mécano-sorption.



**Figure I.1.17.** Amplification du fluage en flexion d'un contreplaqué de bouleau sous cycle de chargement hydrique, Ranta Maunus [RAN 75].

La prise en compte des variations de la teneur en eau et de la température s'avère donc indispensable, dans la mesure où les structures en conditions réelles subissent en permanence des cycles climatiques. Les recherches à ce niveau sont en cours d'évolution, pour mieux appréhender le caractère complexe du problème.

Sur des travaux effectués mettant en relief les effets de mécano-sorption, Grossman [GRO 76] a observé les phénomènes suivants :

- La déformation induite est indépendante du temps. Celle-ci dépend plutôt de la teneur en eau en dessous du point de saturation et de ses variations ;
- La déformation augmente pendant le séchage, observée également par Hearmon et *al* [HEA 64] et Pittet [PIT 96], dans leurs expérimentations ;
- La première ré-humidification provoque une augmentation de la déformation. Les ré-humidifications suivantes provoquent très peu de diminution de déformation notamment pour des contraintes faibles et l'inverse pour des contraintes appliquées élevées ;
- La déformation induite par l'effet mécano-sorptif semble linéaire jusqu'à 15 à 20% de la contrainte de rupture à court terme ;
- Selon Armstrong [ARM 72], un flux constant à travers le bois, et qui ne produit pas un changement local d'humidité, ne provoque pas de mécano-sorption ;
- Après déchargement et recouvrance élastique instantanée, une grande partie de la déformation totale est maintenue. De nouveaux cycles de ré-humidification et séchage diminuent la déformation résiduelle. Il est d'ailleurs constaté une plus grande recouvrance pendant le séchage que pendant la ré-humidification.

A ce stade de nos travaux, nous retiendrons que le matériau bois, soumis à un échelon de contrainte pendant un temps relativement long, a un comportement viscoélastique. Il subit au court du temps, selon les chargements thermo-hydriques, des transitions marquées par un assouplissement apparent de ses caractéristiques mécaniques. Pour tenter d'approcher les effets liés à ce phénomène, plusieurs modèles rhéologiques existent et sont présentés.

#### *1.1.5.4. Modélisation du comportement différé*

Les modélisations développées jusqu'à ce jour, pour la compréhension du comportement mécanique différé du bois en environnement variable, portent sur une partition de la déformation finale en une somme de déformations élémentaires. Plusieurs modèles existent à cet effet pour décrire le comportement différé du bois et peuvent être regroupés en deux grandes familles. Ainsi, on distingue les modèles à activation indépendante de Leicester [LEI 71], de Hunt et *al* [HUN 88]

ou de Toratti [TOR 92], et les modèles à activation combinée de Bazant [BAZ 85], de Hanhijarvi [HAN 95] ou de Randriambololona [RAN 03].

Les modèles à activation indépendante reposent sur une partition des déformations sous la forme :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{visc}(t) + \varepsilon_{ms}(t) + \varepsilon_{w0}(t) + \varepsilon_{w\sigma}(t) \quad (I.1.13)$$

Les modèles à activation combinée sont basés sur une partition des déformations sous la forme :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{visc+ms}(t) + \varepsilon_{w0+w\sigma}(t) \quad (I.1.14)$$

Ici,  $\varepsilon(t)$  représente la déformation résultante ou totale,  $\varepsilon_e(t)$  la déformation élastique instantanée ;  $\varepsilon_{visc}(t)$ , la déformation de fluage sous climat constant ;  $\varepsilon_{ms}(t)$ , la déformation mécano-sorptive due aux variations climatiques ;  $\varepsilon_{w0}(t)$ , la déformation engendrée par le retrait-gonflement libre ;  $\varepsilon_{w\sigma}(t)$ , la déformation due au retrait-gonflement empêché ou lié ;  $\varepsilon_{visc+ms}(t)$ , la déformation de fluage couplée à celle de la mécano-sorption et  $\varepsilon_{w0+w\sigma}(t)$ , le couplage du retrait-gonflement libre et sous charge.

Le modèle physique développé par Gril [GRI 88], basé sur la mobilité moléculaire, a donné naissance au modèle dit hygro-verrou symbolisant l'effacement des barrières de potentiel sous une variation d'humidité. Randriambololona et al [RAN 02] montrent qu'une grande partie des phénomènes appelés mécano-sorption (à l'exemple de l'hygro-verrou) sont surtout de nature viscoélastique dont les effets différés s'estompent dans le temps. Aidé par cette approche, Husson [HUS 09] a proposé une nouvelle formulation de la mémoire du matériau, identifiée sous le nom d'« effet hygro-verrou » par Gril, en développant un modèle rhéologique viscoélastique où la fonction de fluage  $J(t)$  est remplacée par une fonction spécifique prenant en compte la variation de l'humidité  $w$  et le blocage des déformations durant la phase de séchage.

Dans cette expression, les interactions des chargements mécaniques et hydriques sont concentrées dans une intégrale héréditaire avec un parfait découplage des effets de retrait-gonflement mis en évidence par les déformations libres  $\varepsilon_w$ .

Si ces partitions semblent satisfaisantes et réalistes à l'échelle des modèles (en tant qu'outil d'interprétation), elles demeurent cependant difficiles à mettre en application au niveau de l'observation expérimentable. Il est donc nécessaire de développer des protocoles expérimentaux adaptés aux découplages phénoménologiques afin de conforter ou d'invalider les différentes hypothèses intégrées aux modèles actuels.

## **I.2. Découplage expérimental des effets différés des structures bois sous chargements thermo-hygro-mécaniques variables**

L'étude de la mécano-sorption repose souvent sur des essais expérimentaux en compression et tension sur des petits échantillons permettant d'avoir des équilibres hydriques rapides sous contraintes homogènes. Or, les constructions bois font souvent appel à des pièces massives en flexion. Dans cette deuxième partie, nous proposons un protocole expérimental de fluage en flexion 4 points dont le but est le découplage des différentes déformations élémentaires : déformation élastique, retrait-gonflement, fluage viscoélastique et fluage mécano-sorptif. L'objectif final de cette étude sera de valider un protocole expérimental basé sur une histoire de chargements hydrique et mécanique couplés permettant de mettre en évidence les effets mécano-sorptifs en les dissociant des effets viscoélastiques, de fluage et des variations dimensionnelles de la section transversale engendrées par le retrait-gonflement.

Cette expérimentation se veut complète afin d'apporter une réponse scientifique simplifiée et adaptée à l'ingénieur sur la problématique de la mécano-sorption dans la conception et la construction des structure en bois. Ces essais « préliminaires » sont réalisés sur des essences tempérées (Douglas). Cette approche sera ensuite adaptée à la caractérisation du comportement différé des essences tropicales dans un environnement tropical, chapitre 2 et 4.

Dans un premier temps, une caractérisation physique et mécanique des échantillons est présentée après justification de leur géométrie. Ensuite, le protocole expérimental est exposé, suivi des résultats obtenus et de leur analyse, [MAN 09] [MAN 10] [MAN 11].

### **I.2.1. Justification de la géométrie**

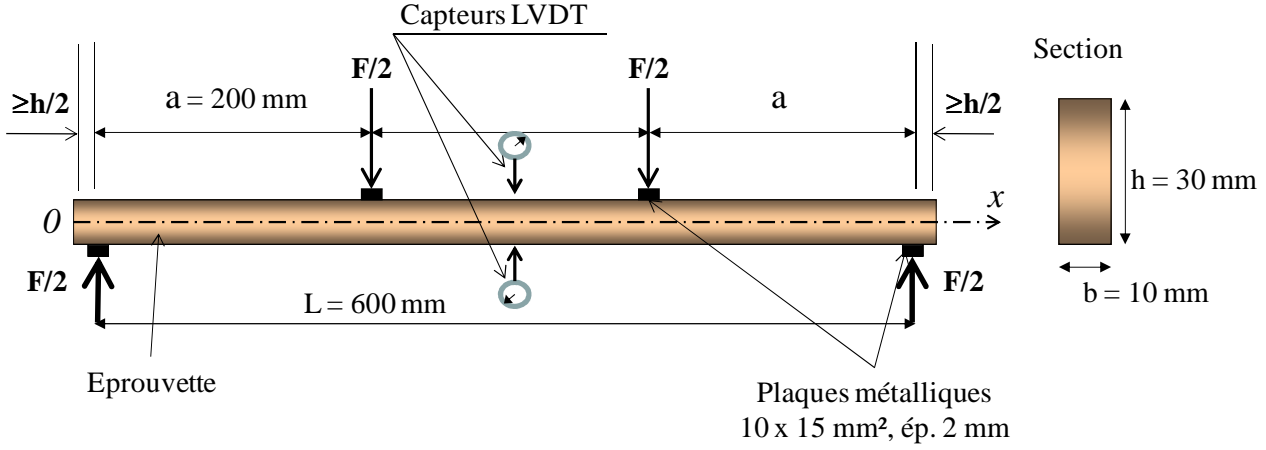
#### *I.2.1.1. Comportement hydrique*

Les échantillons expérimentaux sont des poutres de petite taille, d'une section transversale de 10 x 30 mm<sup>2</sup>. Ce choix est un compromis imposé par la représentativité du volume et de la vitesse des transferts hydriques. Selon Merakeb [MER 06], le temps de stabilisation hydrique est le paramètre qui pilote en grande partie le choix. L'auteur indique des temps de stabilisation de l'ordre de 300 h, pour des éprouvettes de 15 x 20 mm<sup>2</sup> de section et 20 mm de longueur, pour passer d'un état anhydre ou équilibré en ambiance saturée à un état d'équilibre correspondant à 30°C et 50% d'humidité relative. De plus, pour une essence telle que le Douglas, cette section permet d'avoir au minimum 2 cernes de croissance sur la largeur et 4 sur la hauteur.



### I.2.1.2. Modes de sollicitation

Les essais long-terme ainsi que les essais préliminaires destinés à caractériser les échantillons sont effectués en flexion 4 points. La **Figure I.2.1** présente la géométrie des échantillons et le principe de chargement.



**Figure I.2.1.** Géométrie et schématisation d'un essai de flexion 4 points

La flèche  $U_y$ , due au moment fléchissant  $M_z$ , est maximale dans la plage d'abscisse  $x \in \left[ \frac{L-a}{2}; \frac{L+a}{2} \right]$ . Une section de poutre située à cette abscisse est soumise à un moment fléchissant constant et s'écrit :

$$M_z(x) = \frac{F}{2} \left( \frac{L-a}{2} \right) = E_x \times I_z \times \frac{d^2 U_y}{dx^2} \quad (\text{I.2.1})$$

Il en résulte de (I.2.3), par double intégration, l'expression de la flèche en fonction de  $x$  :

$$U_y(x) = \frac{F}{4E_x \times I_z} \times \left( \frac{L-a}{2} \right) \times \left[ x^2 - Lx + \frac{1}{3} \left( \frac{L-a}{2} \right)^2 \right] \quad (\text{I.2.2})$$

Le montage étant symétrique, la flèche maximale se trouve en milieu de travée.

$$U_y(x = L/2) = \frac{-23 \times F \times L^3}{1296 \times E_x \times I_z} \quad (\text{I.2.3})$$

La flèche  $U_V$  due à l'effort tranchant  $V$  s'écrit :

$$\frac{dU_V}{dx} = -\frac{V}{G \times \omega_l} \quad (\text{I.2.4})$$

$G$  désigne le module de cisaillement et  $\omega_l$  la section réduite égale à  $\frac{5}{6} \times b \times h$  pour une section rectangulaire. D'où en intégrant (I.2.4) :

$$U_V(x = l/3) = \frac{M(x = l/3)}{G \times \omega_1} = \frac{F \times L}{5G \times b \times h} \quad (I.2.5)$$

Il est à noter que les résultats présentés sont basés sur la théorie des poutres dont le torseur résultant est calculé sur la fibre neutre. Dans ces conditions, les effets de retrait gonflement ne sont pas pris en considération, et ce, en supposant que le déplacement des sections transversales correspond à un déplacement de corps rigide (translation et rotation) selon l'hypothèse de Saint Venant.

## I.2.2. Essai de flexion normalisé

### I.2.2.1. Validation du montage retenu

La longueur des poutres de 650 mm (portée de 600 mm) se justifie par la norme PR NF EN 408 [AFN 09] qui préconise une longueur minimale de 19 fois la hauteur. Afin de minimiser le poinçonnement, une plaque métallique (10 x 15 mm, ép. 2 mm) a été placée, d'une part, entre les têtes de chargement et l'éprouvette puis, d'autre part, entre les surfaces d'appuis et l'échantillon. Les appuis simples sont garantis par des pièces métalliques cylindriques surmontées de plaques d'acier. La **Figure I.2.1** illustre le montage retenu.

Du fait de la faible rigidité du bois en cisaillement, les déformations de cisaillement peuvent devenir significatives, contrairement à l'acier ou au béton où elles sont négligeables ; d'où sa prise en compte dans le calcul de la flèche.

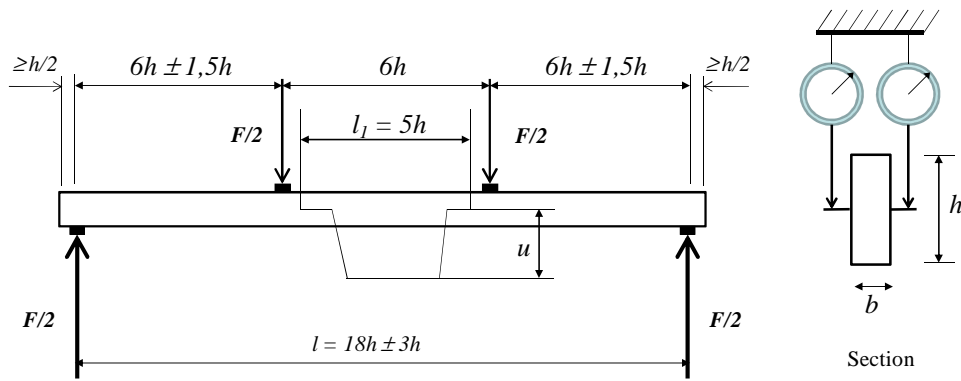
Un montage en flexion 4 points laisse libre l'installation de capteurs à mi-portée et permettra surtout de séparer les effets de cisaillement et de flexion sur la flèche.

De plus, l'utilisation, à mi-portée, de deux capteurs de déplacement, l'un en face supérieure et l'autre en face inférieure, permettra d'isoler les effets du retrait – gonflement transversal.

### I.2.2.2. Détermination du module local

La vitesse de chargement appliquée ne doit pas dépasser 0,003h mm/s soit dans notre cas une vitesse limite maximale de 0.09 mm/s. La force maximale appliquée est maintenue inférieure ou égale à 0.4 fois la force maximale (force de rupture).

La flèche  $u$  doit être prise comme la moyenne des mesures sur les deux faces au niveau de l'axe neutre. Conformément à la norme NF EN 408 [AFN 09], ces mesures doivent être prises au centre d'une longueur de référence centrale égale à cinq fois la hauteur de la section, **Figure I.2.2**. Dans notre cas, la longueur de référence centrale est prise égale à six fois la hauteur.



**Figure I.2.2.** Dispositif d'essai normalisé pour la détermination du module local d'élasticité en flexion

Les données ainsi obtenues permettent de tracer le graphe force/flèche dont la portion exploitable, pour une analyse de régression, est comprise entre  $0.1F_{max}$  et  $0.4F_{max}$ . Le module local d'élasticité en flexion est alors déterminé selon l'expression :

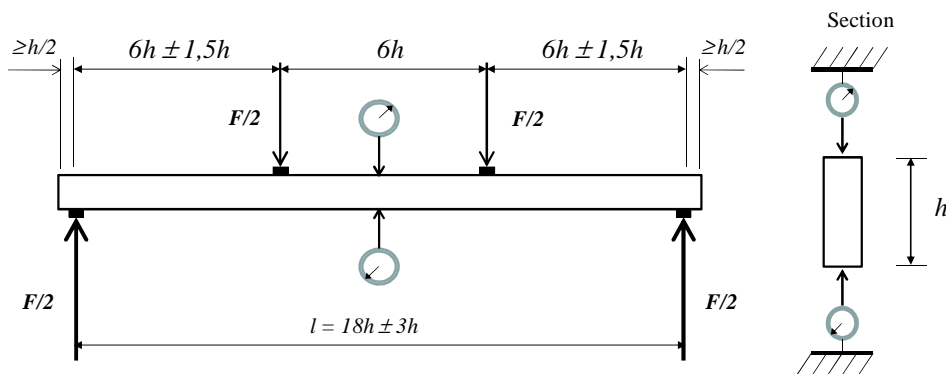
$$E_{0,l} = \frac{a \times l_1^2 \times (F_2 - F_1)}{16 \times I \times (u_2 - u_1)} \quad (I.2.6)$$

$l_1$  est la longueur de base pour la détermination du module d'élasticité,  $(F_2 - F_1)$  est l'accroissement de la force en newtons sur la ligne de régression et  $(u_2 - u_1)$  est l'accroissement de la flèche correspondant à  $(F_2 - F_1)$ .

Ce calcul permet de ne prendre en compte que l'influence du moment sur la flèche et donc sur la valeur du module.

### I.2.2.3. Détermination du module global

Le dispositif diffère au niveau de la prise de mesure des flèches. En effet, la flèche  $u$  doit être mesurée à mi-travée et au niveau des fibres tendues et comprimées, **Figure I.2.3**. Lorsque  $u$  est mesurée sur l'axe neutre, elle doit être la moyenne des mesures réalisées sur les deux faces de l'éprouvette d'essai.



**Figure I.2.3.** Principe de mesure de flèche pour déterminer le module global d'élasticité en flexion

Après le tracé du graphe force/flèche et analyse de régression, le module global d'élasticité en flexion se détermine comme suit :

$$E_{0,g} = \frac{3a \times l^2 - 4a^3}{2b \times h^3 \times \left( 2 \frac{(u_2 - u_1)}{(F_2 - F_1)} - \frac{6a}{5G \times b \times h} \right)} \quad (I.2.7)$$

### I.2.3. Caractérisation physique et mécanique des éprouvettes

#### I.2.3.1. Echantillonnage

L'essence de bois choisie pour cette expérimentation est le douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Un lot de 16 éprouvettes de mêmes dimensions (10 x 30 x 650 mm) a été utilisé comme suit :

- 6 éprouvettes pour des essais destructifs de calibration de l'effort de rupture ;
- 2 éprouvettes témoins non chargées lors de l'essai long terme, pour le suivi de l'évolution de la teneur en eau dans l'enceinte climatique, avec l'hypothèse selon laquelle l'évolution d'humidité dans une éprouvette non chargée est identique à celle d'une éprouvette chargée ;
- 8 éprouvettes pour les essais long terme (essais de fluage) avec une caractérisation non destructive préalable du module d'élasticité.

Ces 8 dernières éprouvettes ont été sélectionnées parmi celles qui présentaient le moins de singularités (nœuds, pente de fils, etc.).

#### I.2.3.2. Anatomie des échantillons

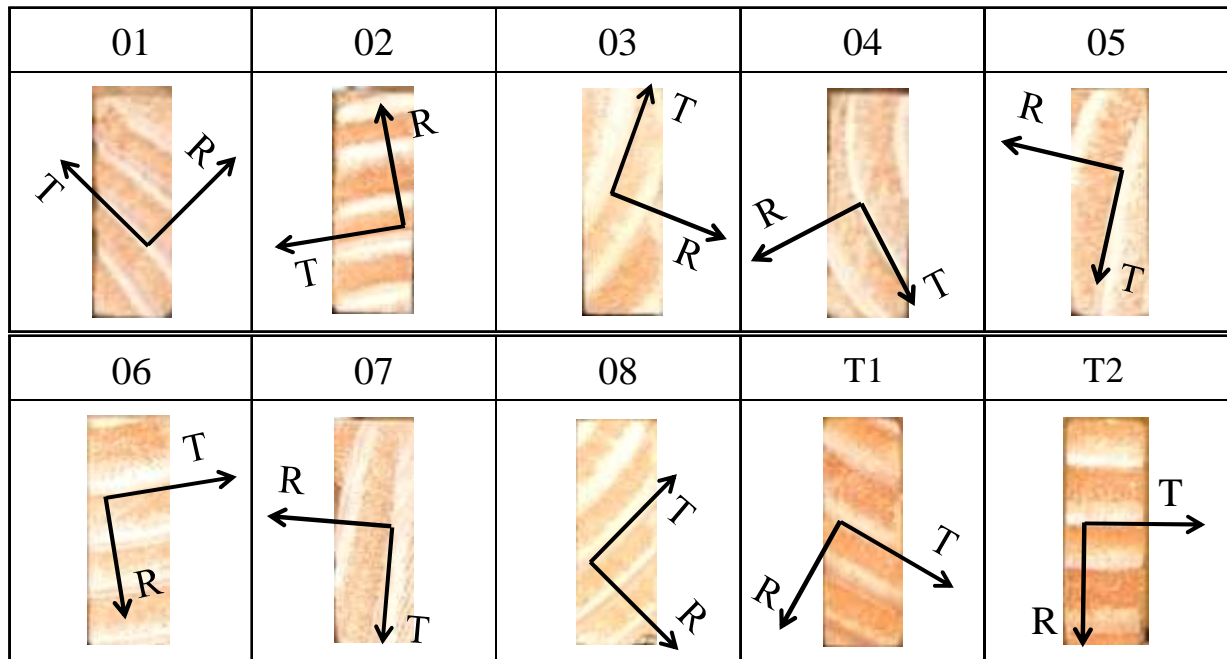
L'ensemble des échantillons retenus pour les essais à long terme et témoins présentent des sections transversales variées allant du débit sur dosse (échantillons 03, 04, 05 et 07) au pur quartier (échantillons 02, 06 et T2) en passant par des coupes intermédiaires (échantillons 01, 08 et T1),

**Figure I.2.4.** Le **Tableau I.2.1** donne la largeur moyenne des cernes pour chaque échantillon.

**Tableau I.2.1.** Largeur moyenne des cernes

Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	T1*	T2*
Largeur moyenne (mm)	6,00	6,50	6,00	6,50	6,50	6,75	5,50	5,67	6,00	6,67

\*T1 et T2 : échantillons témoins



**Figure I.2.4.** Orientation des cernes des échantillons sélectionnés pour l'expérimentation

*1.2.3.3. Masse volumique anhydre des échantillons*

La masse volumique anhydre a été déterminée a posteriori sur les 8 échantillons d'essais à long terme et les 2 témoins. Les échantillons ont été placés, après essais, dans une étuve à une température de 103°C jusqu'à stabilisation de la masse. La relation (I.2.8) permet de déterminer la masse volumique anhydre  $\rho_0$  de chaque éprouvette.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \tag{I.2.8}$$

Le **Tableau I.2.2** présente l'ensemble des valeurs obtenues. La valeur moyenne des masses volumiques anhydres des échantillons de référence pour la détermination de résistance mécanique de rupture vaut 367 kg/m<sup>3</sup> avec un écart-type de 20 kg/m<sup>3</sup>.

**Tableau I.2.2.** Masse volumique anhydre des échantillons

N° Epreuve	1	2	3	4	5	6	7	8	T1	T2	Moyenne	Ecart Type
Masse volumique anhydre (kg/m <sup>3</sup> )	397	376	358	345	351	352	385	397	352	359	367	20

*1.2.3.4. Teneur en eau des échantillons témoins*

Le taux d'humidité initiale des échantillons témoins est déterminé selon la norme NF EN 13183-1 [AFN 02], **Tableau I.2.3**. L'humidité initiale des éprouvettes chargées est supposée équivalente.

**Tableau I.2.3.** Teneur en eau initiale des échantillons témoins

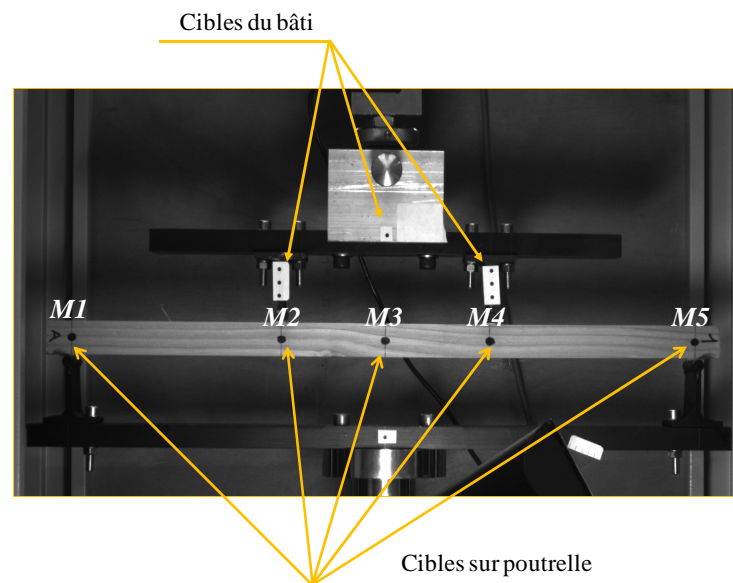
Echantillon	T 1	T 2
Taux d'humidité (%)	11,1	11,0

#### 1.2.3.5. Détermination de la résistance en flexion

Six échantillons similaires ont été soumis à des essais destructifs en flexion 4 points. Les essais ont été menés selon la norme NF EN 408 [AFN 09], **Figure I.2.1**. La vitesse de chargement a été fixée à 0,05 mm/s. La valeur moyenne de l'effort de rupture obtenu en flexion est de 551 N avec un écart type de 55 N.

#### 1.2.3.6. Détermination du module d'élasticité

Les échantillons testés en flexion à long terme ont initialement été sollicités dans le but d'obtenir le module d'élasticité en flexion. Un dispositif de mesures par suivi de marqueurs permet d'obtenir les déplacements de l'axe neutre géométrique, **Figure I.2.5**. Ces mesures, à différents points, permettent de prendre en compte l'impact du cisaillement et du tassement aux appuis sur la mesure des flèches.

**Figure I.2.5.** Flexion 4 points et mesure de la déformée par analyse d'images

Les échantillons ont été chargés par une rampe en déplacement de 0,05mm/s jusqu'à stabilisation à un effort d'environ 22% de la valeur moyenne de rupture estimée de l'échantillonnage, restant ainsi inférieure à  $0,4F_{max}$ , comme le recommande la norme PR NF EN 408 [AFNOR 09]. La **Figure I.2.6** illustre l'évolution temporelle des déplacements des marqueurs pour les échantillons 1 et 2.

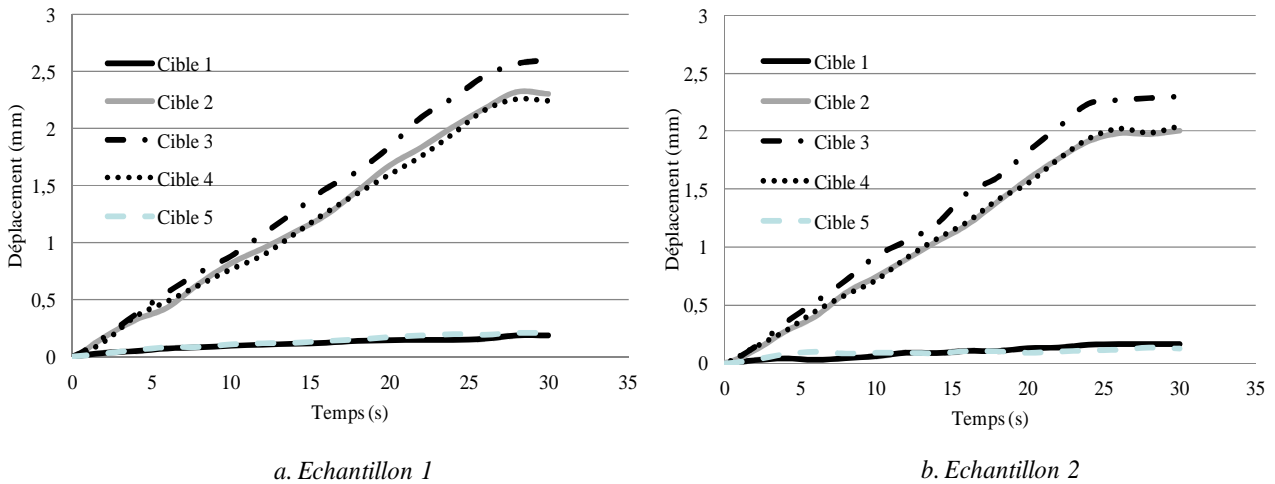


Figure I.2.6. Déplacement des marqueurs (M1 à M5)

De la Figure I.2.6, nous déduisons le déplacement de l'axe neutre, Figure I.2.7, pour des taux de chargement correspondant à 5 et 20% de la charge de rupture pour les deux échantillons. On peut noter l'effet de la compression transversale aux appuis et son asymétrie entraînant ainsi une rotation globale de la poutre. Il importe donc de tenir compte de cet effet dans l'évaluation du module longitudinal.

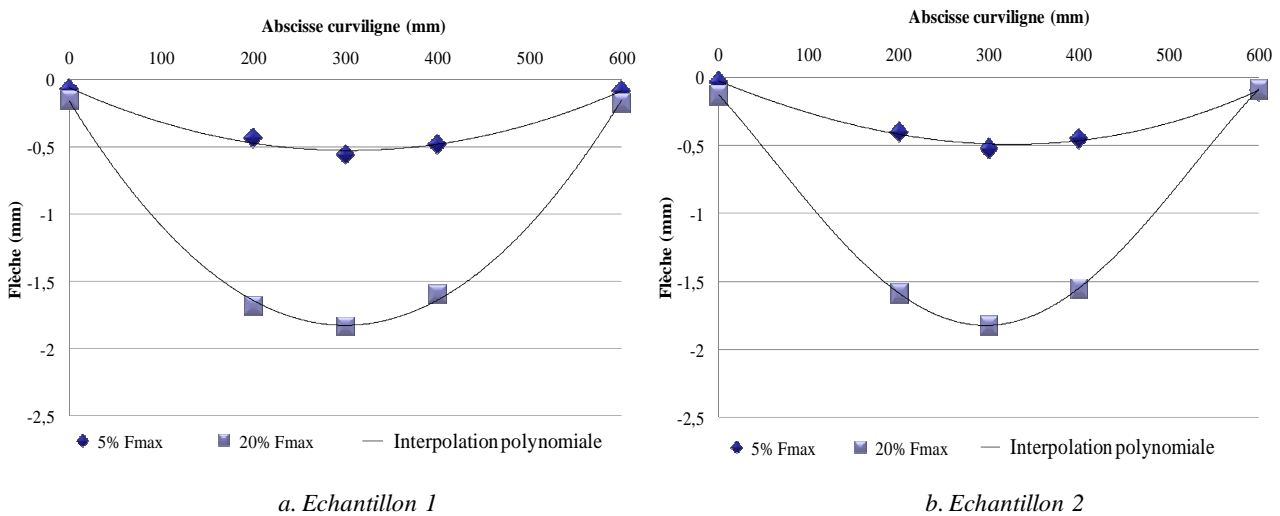


Figure I.2.7. Déplacement de l'axe neutre pour 5 et 20% de  $F_{max}$

Le calcul simplifié du module d'élasticité longitudinal néglige les effets du cisaillement et du tassement sur la flèche centrale :

$$E_{0,g}(1) = \frac{-23 \times L^3 \times (\Delta F)}{1296 \times I \times (\Delta u)} \tag{I.2.9}$$

L'expression (I.2.9) est valable pour des points d'application de charge au tiers de la portée  $L$ .  $(\Delta F)$  est l'accroissement de la force entre 0,05 à 0,2  $F_{max}$ ,  $(\Delta u)$  l'accroissement de la flèche centrale  $u_3$  par rapport au bâti dans la même plage et  $I$  l'inertie.

L'expression proposée dans la norme PR NF EN 408 [AFN 09] permet de déterminer le module global d'élasticité  $E_{0,g}$  (2) en prenant en compte les effets de cisaillement :

$$E_{0,g}(2) = \frac{3a \times L^2 - 4a^3}{2b \times h^3 \times \left( 2 \frac{(\Delta u)}{(\Delta F)} - \frac{6a}{5G \times b \times h} \right)} \quad (I.2.10)$$

$a$  est la distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche (ici un tiers de la portée),  $b$  la largeur de l'éprouvette,  $h$  la hauteur de l'éprouvette,  $(\Delta F)$  et  $(\Delta u)$  identiques à l'expression (I.3.10) et  $G$  le module de cisaillement. La norme PR NF EN 408 [AFN 09] préconise, pour des essences de bois de conifères, un module de cisaillement moyen de 650 N/mm<sup>2</sup>.

La valeur du module d'élasticité longitudinal  $E_{0,g}(3)$ , filtrant le tassement d'appuis, est calculée avec l'expression (I.2.9).  $(\Delta u)$  est déterminée par différence entre la flèche centrale  $u_3$  et la moyenne des déplacements aux appuis  $u_1$  et  $u_5$ .

Le module local d'élasticité est, quant à lui, calculé à partir de la flèche circulaire en utilisant le déplacement du marqueur  $M3$  retranché de la moyenne des déplacements de  $M2$  et  $M4$  ; à savoir :

$$E_{0,l} = \frac{a \times l_1^2 (\Delta F)}{16 \times I \times (\Delta u')} \quad (I.2.11)$$

$l_1$  est la longueur de base pour la détermination du module d'élasticité (ici  $l_1 = l - 2a$ ) ;  $(\Delta u')$  est l'accroissement de flèche centrale  $u_3$  moins la moyenne des flèches aux tiers de la portée ( $u_2$  et  $u_4$ ). Le **Tableau I.2.4** présente l'ensemble des valeurs obtenues.

**Tableau I.2.4.** Valeurs des modules d'élasticité longitudinaux en GPa, [MAN 10]

Echantillon	01	02	03	04	05	06	07	08
$E_{0,g}(1)$	9,68	11,2	8,17	9,95	8,54	8,33	8,87	10,9
$E_{0,g}(2)$	10,03	11,7	8,42	10,3	8,81	8,59	9,16	11,3
$E_{0,g}(3)$	10,6	12	8,99	10,7	9,71	8,84	10,2	11,6
$E_{0,l}$	9,5	9,91	9,90	11,9	9,79	7,85	13,5	11,6

Ces ordres de grandeur sont inférieurs à ceux obtenus dans la bibliographie [GUI 87] pour le douglas qui sont de l'ordre de 16 GPa pour le module élastique. Les valeurs des modules locaux plus faibles que les modules globaux peuvent s'expliquer par les imprécisions de la mesure réalisée,

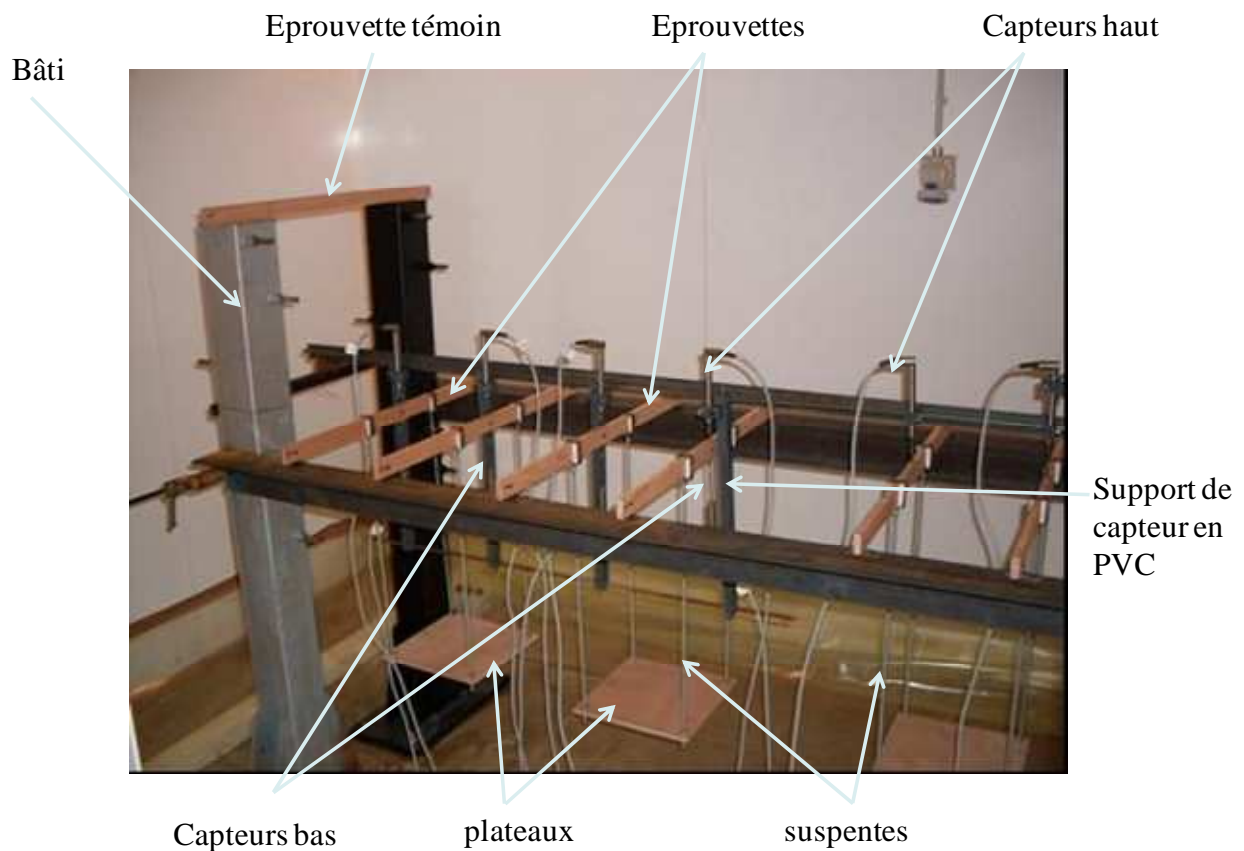


l'effet d'échelle et surtout par le taux d'humidité interne qui est de 9% pour Guitard et 11% pour nos essais (**Tableau I.2.3**).

#### I.2.4. Description du dispositif expérimental long-terme

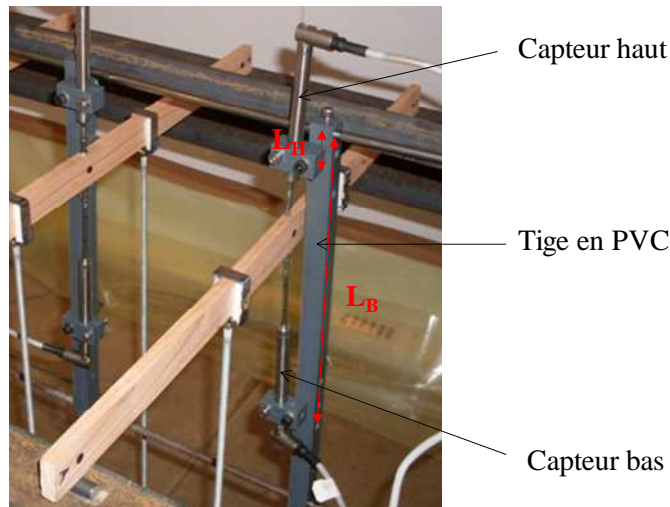
##### I.2.4.1. Description du montage

Le banc d'essai, mis en place dans une enceinte climatique, est composé de deux poutres métalliques en L fixées sur des poteaux métalliques (**Figure I.2.8**) qui sont posés sur des plots antivibratiles permettant une bonne désolidarisation entre le dispositif expérimental et le plancher intérieur de l'enceinte climatique. Le dispositif de chargement est composé d'un plateau relié à deux échantillons par l'intermédiaire de quatre suspentes métalliques. Ce choix permet d'éviter le déversement des poutres et ne perturbe pas la répartition égale du chargement, grâce au positionnement très bas des plateaux et à la souplesse des suspentes. Le chargement final est alors composé de masses métalliques, en complément du poids propre des éprouvettes, des suspentes, du plateau et des tiges métalliques supports des capteurs. Un taux de charge compris entre 15 et 18% de la charge de rupture est obtenu pour un chargement constant de 100 N.



**Figure I.2.8.** Banc d'essai en flexion 4 points disposé dans une enceinte climatique

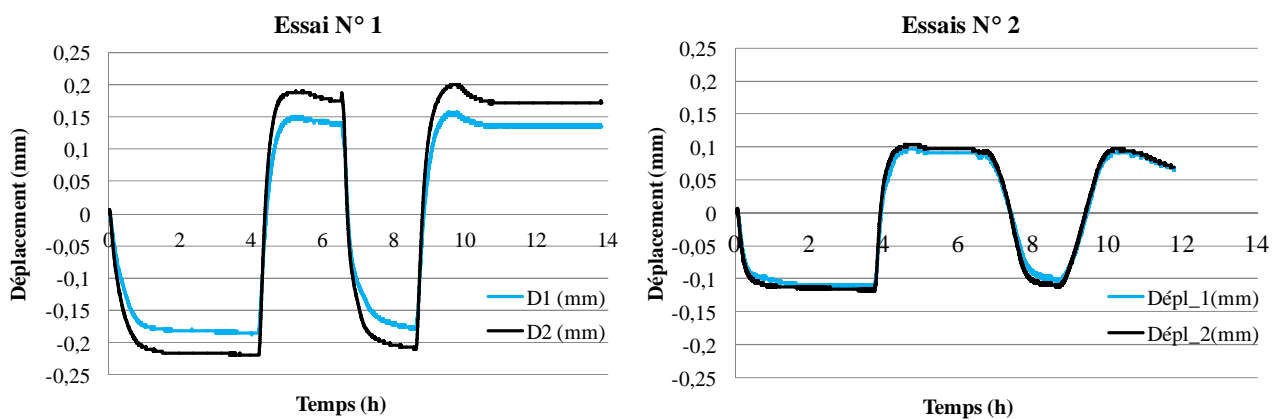
Les capteurs haut et bas des quatre premiers échantillons sont rendus solidaires par une tige en PVC (**Figure I.2.9**) dont le coefficient de dilatation thermique est déterminé en vue de filtrer son influence sur les résultats obtenus.



**Figure I.2.9.** Banc d’essai en flexion 4 points

*1.2.4.2. Détermination du coefficient de dilatation du PVC support des capteurs*

Des essais de dilatation thermique, menés dans les mêmes conditions climatiques, sur le PVC ont montré une influence sensible du montage sur l’évolution des flèches haut et bas. En faisant varier la température initiale de 20°C à 10°C puis à 30°C et en répétant le cycle, nous obtenons les courbes de la **Figure I.2.10**, au bout de deux essais.



**Figure I.2.10.** Dilatation du PVC après deux essais cycliques

Une exploitation directe des courbes a permis de déterminer le coefficient de dilatation moyen  $\alpha_T$  dudit PVC à savoir  $7.10^{-5} \text{ m/m}^\circ\text{C}$ , selon l'expression suivante :

$$\alpha_T = \frac{(\Delta \ell)}{\ell \times (\Delta T)} \tag{I.2.12}$$

$\ell$  est la longueur de la pièce,  $(\Delta\ell)$  l'allongement ou le raccourcissement de la pièce et  $(\Delta T)$  la variation de température.

Cette valeur a permis, par la suite, de corriger l'influence de la dilatation du PVC sur la mesure des flèches haut et bas à chaque changement de température. On peut constater que la dilatation se stabilise au bout de 2 heures : c'est donc un phénomène rapide dont l'influence va être perceptible dès le début de chaque phase.

#### 1.2.4.3. Instrumentation

Le système d'acquisition des données est constitué de :

- Huit capteurs de déplacement de type LVDT (**Figure I.2.11**) placés au dessus et à mi-travée des huit poutrelles. Ces capteurs sont portés par un dispositif en PVC lui-même fixé sur une lisse haute métallique liée aux poteaux par l'intermédiaire de deux cornières.
- Quatre capteurs de déplacement de même type dont les tiges sont directement collées sur la face inférieure des poutrelles à mi-travée.
- Deux centrales d'acquisition de type HBM Spyder 8 (**Figure I.2.11**) équipées de huit entrées chacune.
- Un ordinateur pour assurer la programmation des différentes séquences d'acquisition.



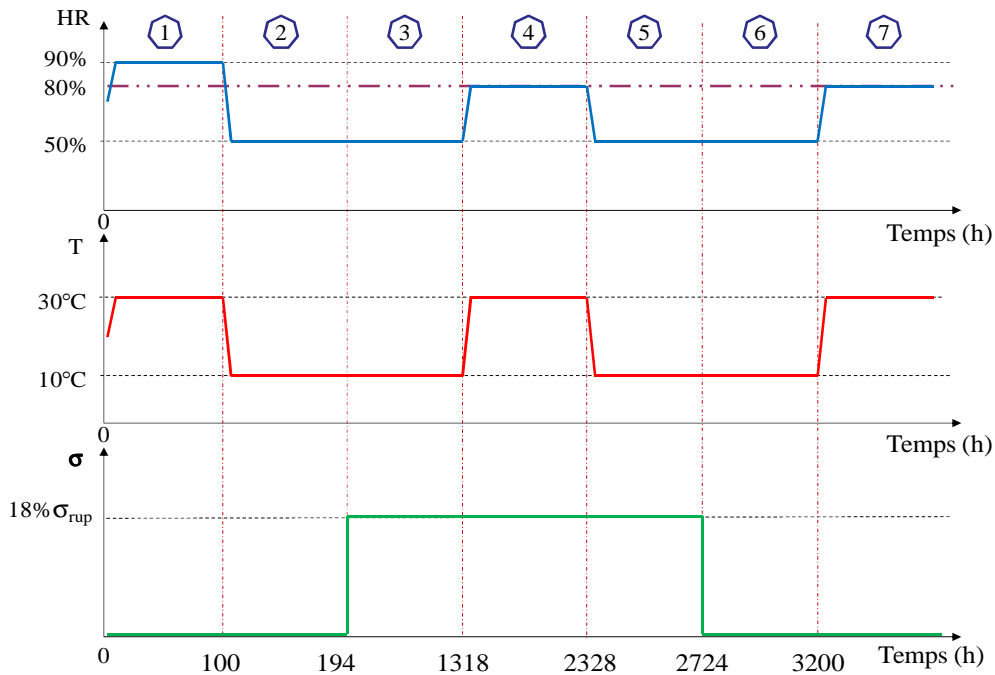
**Figure I.2.11.** Capteurs de déplacement et centrales d'acquisition

#### 1.2.5. Histoire de chargement thermo-hygro-mécanique

Les conditions climatiques initiales dans la chambre climatique sont de 20°C en température et de 65% en humidité relative.

Le scénario de chargement, présenté en **Figure I.2.12**, dont la durée (4062 heures) est pilotée par le temps de stabilisation des flèches, est décomposé en sept phases principales :

- Phase 1 ( $T = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 90\%$ ) : Une première phase de gonflement libre à haute humidité interne permet, d'une part, d'identifier le coefficient de retrait gonflement et, d'autre part, de libérer la majeure partie d'éventuelles contraintes de croissance, de sciage et thermo-hydriques (recouvrance mécano-sorptive).
- Phase 2 ( $T = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 50\%$ ) : Cette seconde phase permet de placer les échantillons à un niveau d'humidité bas et de déterminer les éventuelles hystérésis constatées lors des cycles hydriques.
- Phase 3 ( $T = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 50\%$ ) : A l'état sec, un chargement mécanique constant permet de déterminer, dans un premier temps, la réponse instantanée élastique des échantillons à basse humidité ainsi que le fluage primaire, et ce, jusqu'à l'obtention du fluage limite caractérisant un comportement viscoélastique linéaire à faible taux de charge.
- Phase 4 ( $T = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 80\%$ ) : En gardant le même taux de charge, cette phase d'humidification permet de mettre en évidence le premier effet mécano-sorptif, à savoir, le saut de la réponse instantanée et l'amplification du fluage.
- Phase 5 ( $T = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 50\%$ ) : Toujours sous charge, cette phase de séchage permet de mettre en évidence un blocage des déformations (effet hygro-verrou).
- Phase 6 ( $T = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 50\%$ ) : Cette phase de déchargement à l'état sec permet d'identifier le processus de recouvrance à l'état « sec » et la visualisation d'une déformation permanente issue de l'effet hygro-verrou.
- Phase 7 ( $T = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 80\%$ ) : En l'absence de chargement, cette phase ultime de ré-humidification permet de mettre en évidence l'effacement des déformations bloquées et donc une mise en évidence de l'effet mémoire du matériau dû à l'histoire hygro-mécanique.

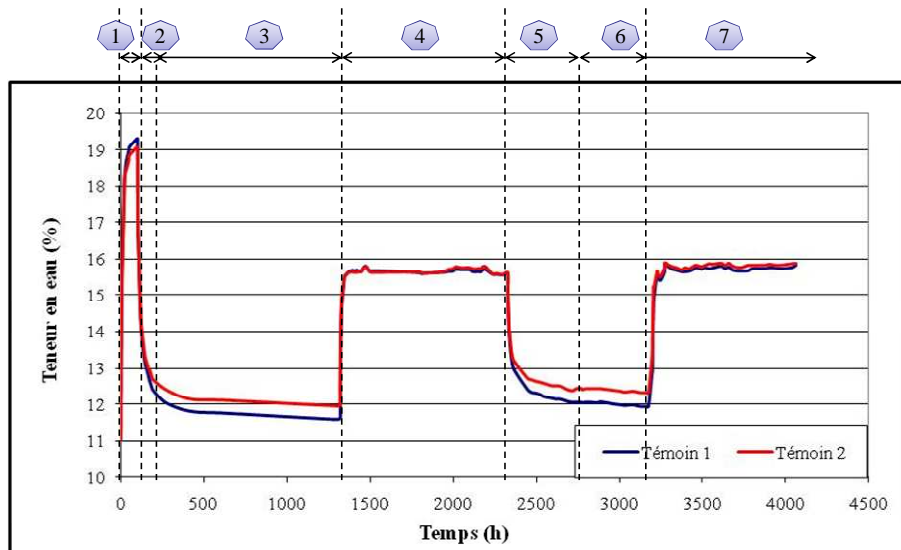


**Figure I.2.12.** Scénario de chargement thermo-hygro-mécanique

**I.2.6. Résultats et discussion**

*I.2.6.1. Evolution de la teneur en eau des éprouvettes de référence (témoins)*

La **Figure I.2.13** montre l'évolution en fonction du temps de la teneur en eau moyenne, calculée à partir de la masse relevée régulièrement, des éprouvettes témoins placées dans l'enceinte climatique. Cette évolution de teneur en eau nous permet de déterminer l'influence des phénomènes de retrait-gonflement et mécano-sorptifs sur l'évolution des flèches ainsi que les réponses retardées par le processus de diffusion, bien que limité par le choix d'une faible épaisseur des échantillons.



**Figure I.2.13.** Evolution de la teneur en eau des éprouvettes témoins T1 et T2

Au regard des courbes témoins, on peut relever les points suivants :

- Le changement de conditions climatiques s'est fait avant stabilisation pour la première phase d'humidification (\*);
- Le chargement mécanique a été effectué avant stabilisation de la teneur en eau pour la première phase de séchage (\*);
- Les deux dernières humidifications ont un bon niveau de répétabilité permettant de négliger les phénomènes d'hystérésis ;
- En comparant les cinétiques d'adsorption et de désorption, on remarque que le séchage est beaucoup plus long à stabiliser que l'humidification (non linéarité des phénomènes de diffusion).

(\*) : *La non stabilité hydrique observée en début d'essai est due à une mauvaise appréciation des vitesses d'évolution des teneurs en eau qui, si elles sont visibles sur le graphique final, n'étaient pas aisément appréciables en temps réel durant les essais.*

#### I.2.6.2. Teneur en eau finale des éprouvettes

Pour conforter les mesures des taux de variation de teneur en eau, donnés par les éprouvettes témoins pour chaque phase climatique, des essais postérieurs d'humidification jusqu'à saturation puis séchage des poutrelles ont été menés. Les résultats obtenus, **Tableau I.2.5**, montrent une bonne similitude avec les valeurs finales obtenues, par les éprouvettes témoins, à la fin de l'expérimentation.

**Tableau I.2.5.** Teneur en eau finale des échantillons

Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	T1	T2	Moy. <sup>(1)</sup>	ET <sup>(2)</sup>
Masse volumique fin essais (kg/m <sup>3</sup> )	441	417	399	386	390	389	422	432	395	398	407	20
Teneur en eau H(%)	15,8	15,8	16,0	15,8	15,6	15,7	15,6	15,5	15,7	15,7	15,7	0,15

<sup>(1)</sup>Moyenne ; <sup>(2)</sup> Ecart type.

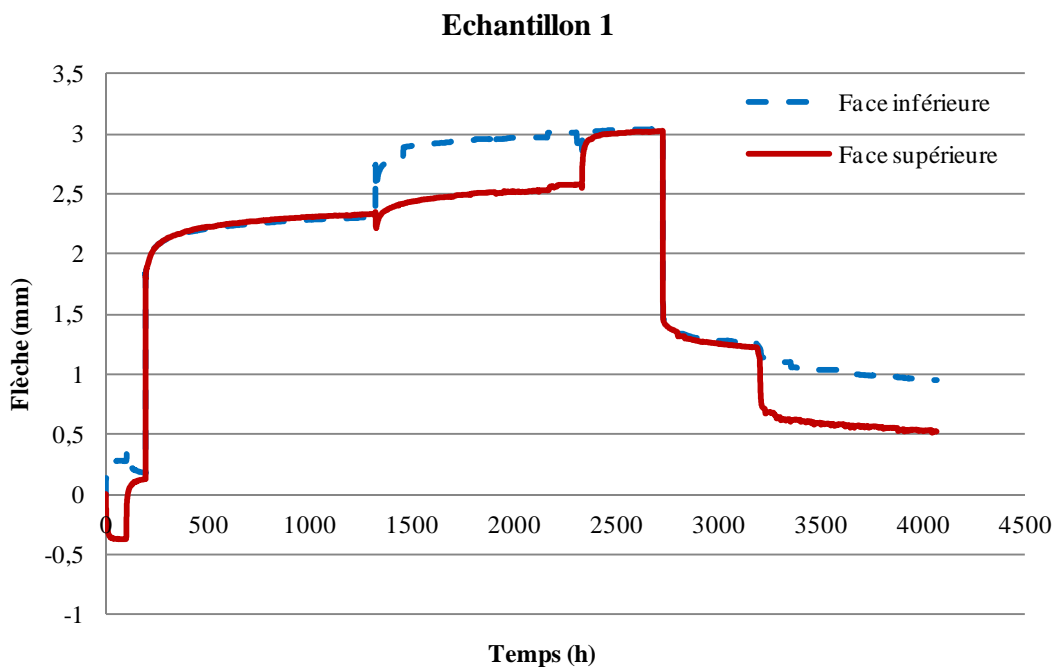
Il apparaît que la présence d'un champ de contrainte ne semble pas perturber l'équilibre hydrique final. Cependant, la question reste entière pour les phases sous chargement car des effets contradictoires sur les cinétiques de sorption ont été relevés par Merakeb [MER 06], à des échelles géométriques plus faibles, et ce, sous chargement dans le sens longitudinal.

### I.2.6.3. Evolution générale des flèches

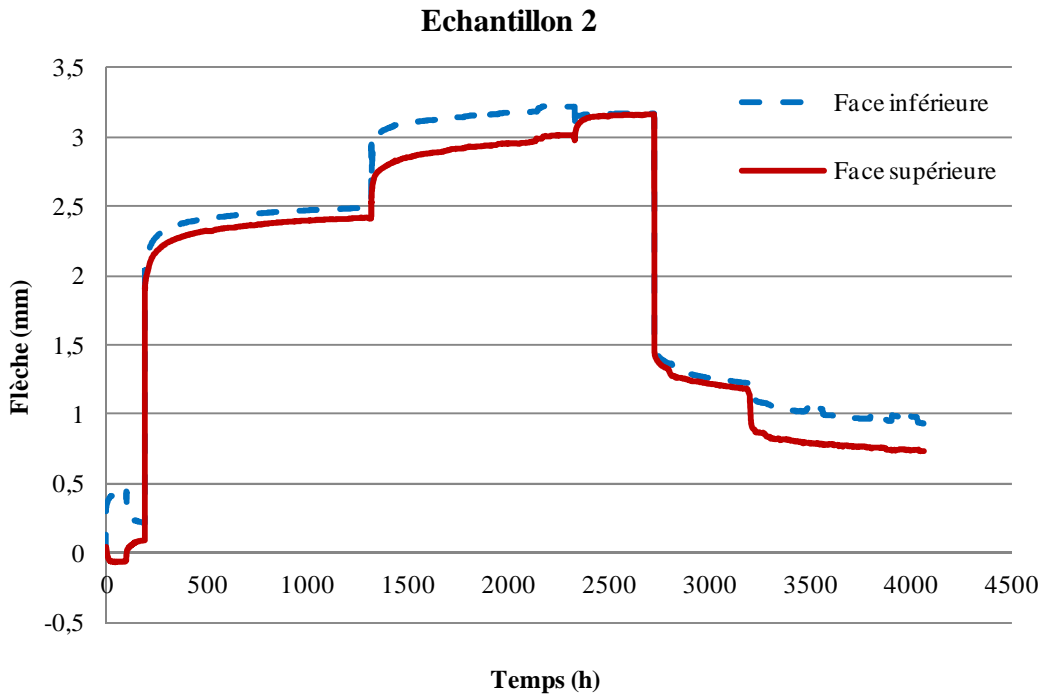
Les flèches ont été préalablement corrigées en retranchant les effets parasites dus à la dilatation thermique de la tige en PVC (support des capteurs haut et bas, **Figure I.2.9**) lors des changements de température.

#### I.2.6.3.1 Flèche globale

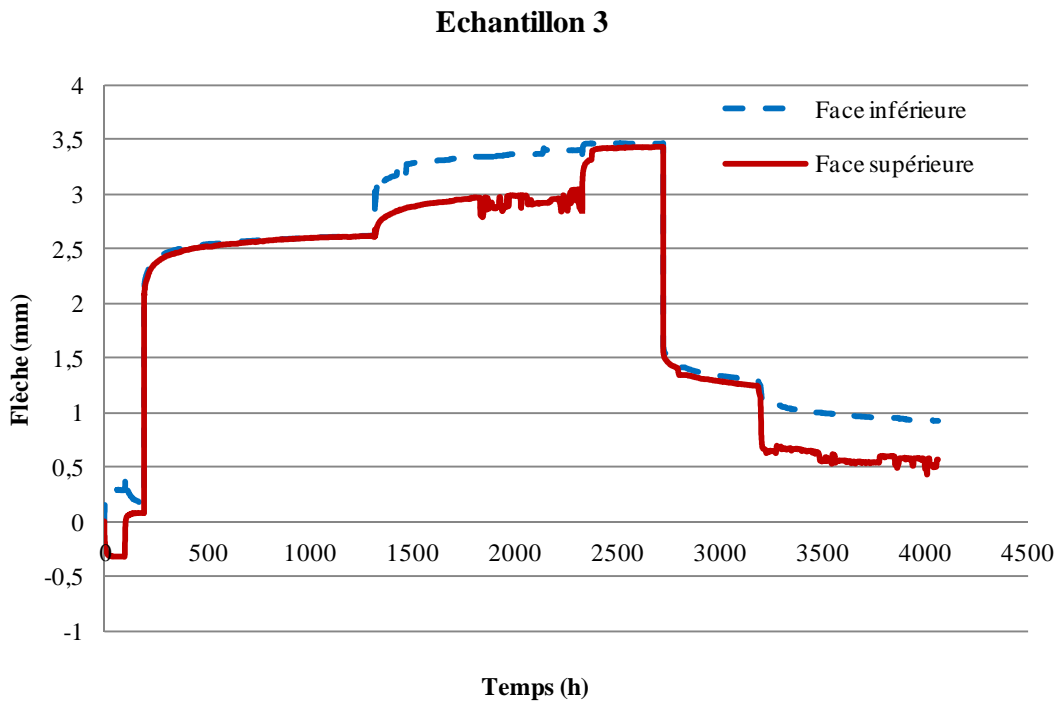
Les **Figures I.2.14 à I.2.17** présentent l'évolution temporelle des flèches obtenues pour les quatre premiers échantillons en superposant les réponses des capteurs placés en face inférieure et supérieure. La **Figure I.2.18** présente les réponses enregistrées (capteurs haut uniquement) pour les quatre autres échantillons.



**Figure I.2.14.** Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l'échantillon 1

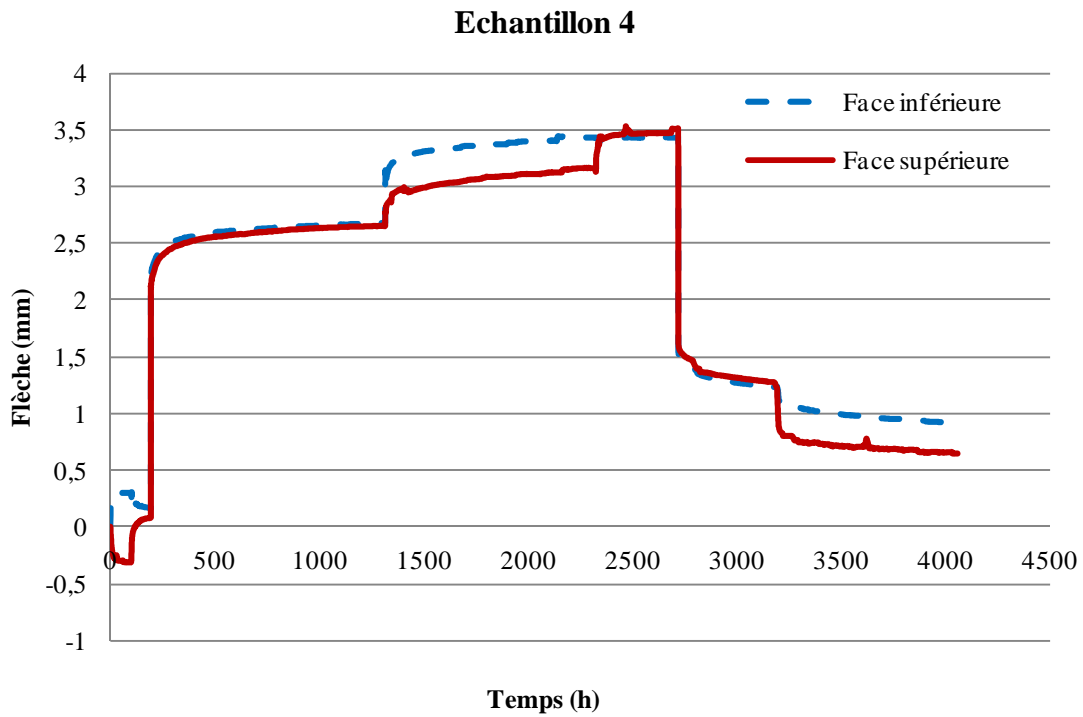


**Figure I.2.15.** Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l'échantillon 2

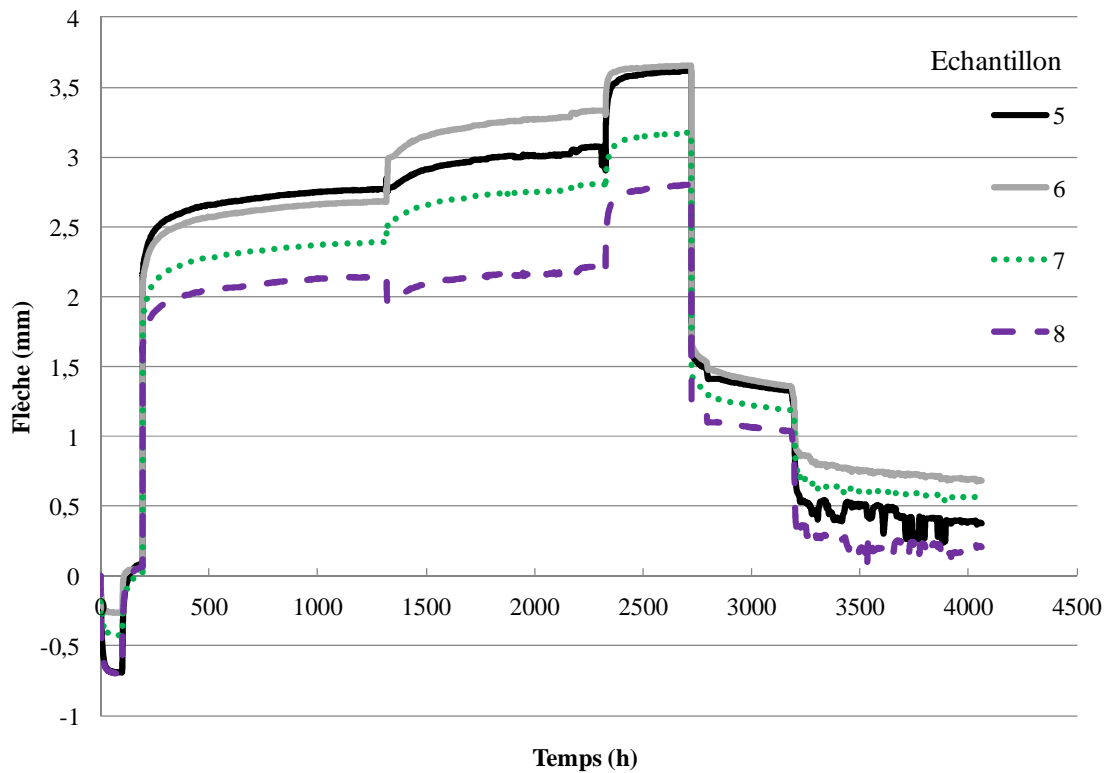


**Figure I.2.16.** Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l'échantillon 3





**Figure I.2.17.** Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l'échantillon 4

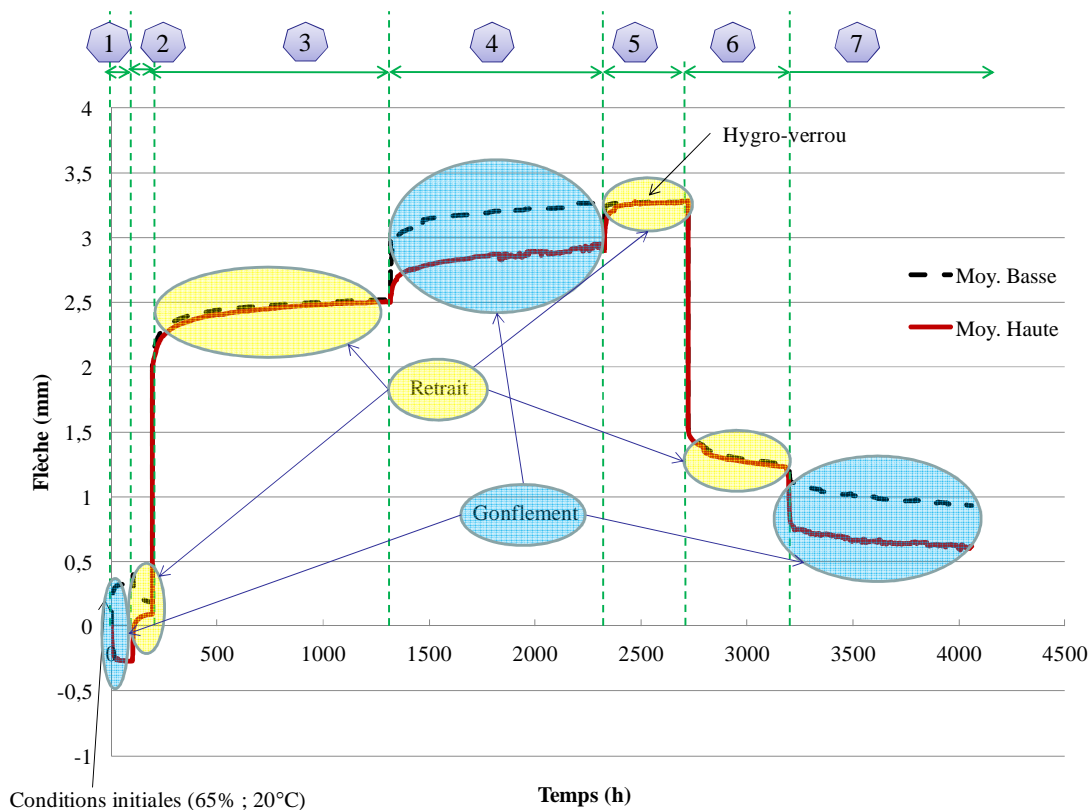


**Figure I.2.18.** Evolution des flèches en face supérieure des échantillons 5 à 8

Au regard des résultats obtenus, il apparaît des effets opposés, de même ordre de grandeur, de retrait-gonflement et de mécano-sorption notamment en phase d'humidification sous charge et en décharge. En ne considérant que la réponse haute, nous constatons que les effets mécano-sorptifs sont atténués par les effets de retrait-gonflement.

### 1.2.6.3.2 Flèches moyennes

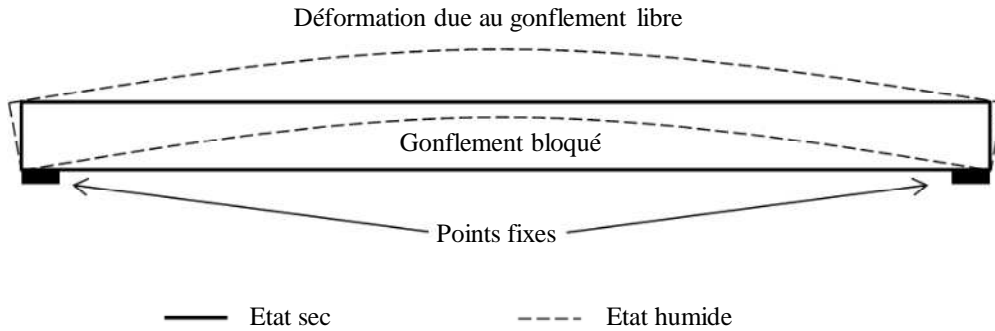
La superposition des courbes moyennes (capteur haut et bas), obtenue à partir des quatre premiers échantillons, montrent une nette différence entre les déplacements des faces hautes et basses, **Figure I.2.19**.



**Figure I.2.19.** Evolution des flèches moyennes haute et basse

En effet, on peut constater, pour les phases de séchage puis d'humidification post chargement et déchargement, une bonne répétabilité des écarts entre les deux évolutions. Les écarts de flèche, en faces supérieure et inférieure des échantillons, sont inhérents au retrait-gonflement transversal. Les mesures effectuées en partie basse sont insensibles à ce phénomène. Toutefois, la flèche en partie basse peut être légèrement perturbée par les effets du retrait axial couplé à un frottement au niveau des appuis gênant un déplacement longitudinal (effet de second ordre), **Figure I.2.20**. Avec des valeurs de  $\alpha_L$  de l'ordre de 0,01%/H, des simulations numériques par éléments finis montrent des effets du même ordre de grandeur que le retrait transversal. Ainsi, la superposition des valeurs

moyennes des flèches haute et basse, **Figure I.2.19**, permet une exploitation directe des coefficients de retrait – gonflement.



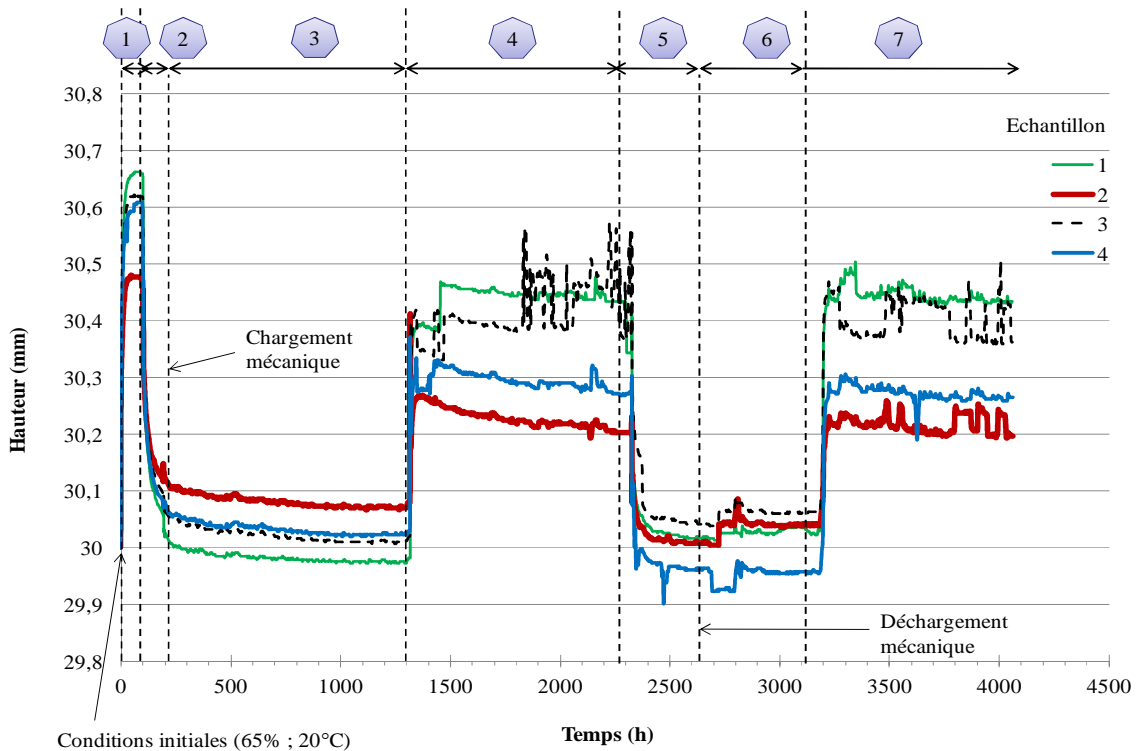
**Figure I.2.20.** Flèche induite par l’effet de gonflement longitudinal [MAN 11d]

La complexité du comportement mécano-sorptif et la forte orthotropie du phénomène de retrait-gonflement requiert une méthode adéquate de découplage desdits phénomènes.

*1.2.6.4. Mise en évidence du retrait-gonflement*

*1.2.6.4.1 Détermination du retrait-gonflement transversal libre*

Pour les quatre premières éprouvettes, la variation de hauteur se détermine en faisant la différence des flèches données par les capteurs haut et bas (**Figure I.2.21**).



**Figure I.2.21.** Variations de hauteur obtenues par différence des flèches haute et basse

Sur la base des variations de hauteur (**Figure I.2.20**, phase 1) et en supposant un taux d'humidité interne homogène sur toute la hauteur, la déformation, engendrée par le retrait-gonflement transversal libre  $\epsilon_w^{RT}$ , est calculée comme suit :

$$\epsilon_w^{RT} = \frac{\Delta h}{h_0} \tag{I.2.13}$$

Le coefficient de retrait-gonflement transversal ( $\alpha_{TR}$  courbe) des quatre premiers spécimens en est déduit, en supposant un retrait-gonflement proportionnel à l'humidité interne et en y intégrant l'histoire du chargement hydrique, **Figure I.2.13**.












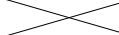
$$\alpha_{TR} = \frac{\epsilon_w^{RT}(t)}{w(t) - w_{ref}} \tag{I.2.14}$$

$w_{ref}$  est l'humidité initiale ou de référence des éprouvettes témoins qui est égale à 11%, **Tableau I.2.3**. Les valeurs de  $\alpha_{TR}$  ainsi obtenues sont présentées dans le **Tableau I.2.6**.

Pour les échantillons 5 à 8, la détermination des coefficients de retrait-gonflement se fait directement sur la première phase d'humidification en exploitant les déplacements des faces supérieures. Toutefois, ces résultats peuvent être influencés par les effets liés au gonflement longitudinal éventuellement bloqué par des forces de frottement aux appuis (conditions aux appuis).

Les essais postérieurs d'humidification (état saturé) et de séchage (état anhydre) ont également permis de déterminer des valeurs de coefficients de retrait-gonflement ( $\alpha_{TR}$  post manip), dans l'ensemble, plus faibles que celles obtenues durant les essais ( $\alpha_{TR}$  courbes), **Tableau I.2.6**.

**Tableau I.2.6.** Profils et coefficients de retrait-gonflement des échantillons, [MAN 11a]

Grandeurs / Echantillons	01	02	03	04	05
					
$\alpha_{TR}$ (post manip)	0,20 %/%	0,16 %/%	0,18 %/%	0,19 %/%	0,22 %/%
$\alpha_{TR}$ (courbes, phase1)	0,27 %/%	0,19 %/%	0,25 %/%	0,25 %/%	0,28 %/%
Grandeurs / Echantillons	06	07	08	09	10
					
$\alpha_{TR}$ (post manip)	0,11 %/%	0,22 %/%	0,19 %/%	0,10 %/%	0,11 %/%
$\alpha_{TR}$ (courbes, phase1)	0,11 %/%	0,17 %/%	0,29 %/%		

Certains travaux traitant du retrait-gonflement du douglas [AFO 97] donnent un retrait radial variant entre 0,12 à 0,18%/ % et un retrait tangentiel entre 0,21 à 0,30%/ %. Les résultats obtenus restent dans cette plage avec des profils souvent intermédiaires. En mesurant l'angle moyen  $\theta$  des cernes aux deux extrémités de chaque échantillon, nous avons calculé par approximation (critère des moindres carrés des écarts) les coefficients de retrait-gonflement radial  $\alpha_R$  et tangentiel  $\alpha_T$ , en posant pour chaque échantillon :

$$\alpha_{TR}(\theta) = \alpha_R \times \cos^2\theta + \alpha_T \times \sin^2\theta \quad (I.2.15)$$

Nous obtenons un coefficient radial moyen  $\alpha_R$  de 0,17%/ % et un coefficient tangentiel moyen  $\alpha_T$  de 0,23%/ %, [MAN 11a]. Les résultats restent conformes à ceux rencontrés dans la bibliographie [GUI 87] [AFO 97], mais la valeur de  $\alpha_T$  est plus faible que celles obtenues par les courbes expérimentales. Ces valeurs sont indicatives car très sensibles aux erreurs de mesure d'angle du repère d'orthotropie dans le plan transverse.

#### I.2.6.4.2 Détermination du retrait-gonflement par phase

Pour chaque phase climatique, le coefficient de retrait-gonflement à été déterminé en vue d'étudier son évolution. Le **Tableau I.2.7** présente l'ensemble des valeurs obtenues.

**Tableau I.2.7.** Coefficients de retrait-gonflement (en % / %) obtenus phase par phase pour chaque échantillon

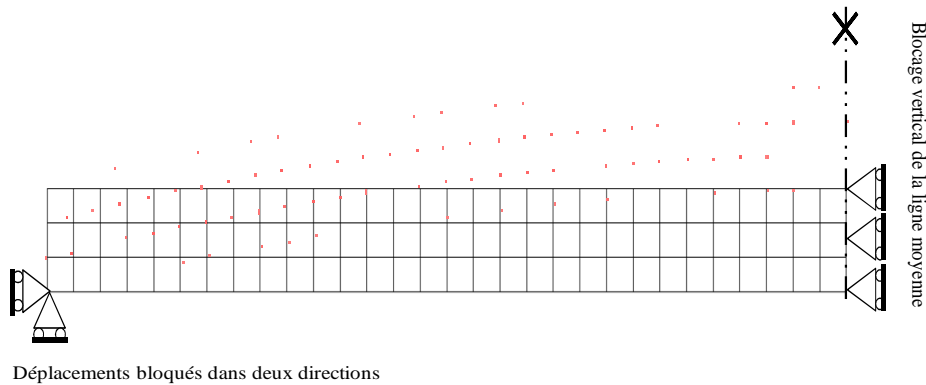
Echantillon	Phase 1	Phase 2 - 3	Phase 4	Phase 5 - 6	Phase 7
01	0,27	0,30	0,39	0,37	0,35
02	0,19	0,18	0,13	0,17	0,15
03	0,25	0,27	0,34	0,32	0,29
04	0,25	0,26	0,23	0,31	0,27
05*	0,28	0,35	-	-	-
06*	0,11	0,14	-	-	-
07*	0,17	0,20	-	-	-
08*	0,29	0,34	-	-	-

\*Ces échantillons ne disposant que d'un seul capteur, l'extraction des coefficients de retrait-gonflement pour les phases 4 à 7 n'est pas possible.

Ainsi, au regard de l'évolution des coefficients qui n'est pas la même pour l'ensemble des échantillons, il en demeure très difficile de conclure sur l'influence ou non du chargement sur les propriétés de diffusion du matériau. La question reste donc entière.

1.2.6.4.3 Identification du retrait-gonflement longitudinal

En admettant le fait que l’effet du retrait-gonflement transversal n’est perceptible que sur la flèche haute des poutres, la flèche basse serait donc nulle en l’absence de chargement mécanique pour les phases 1 et 2. Cependant, en observant les **Figures I.2.14 à I.2.18**, on remarque, en partie basse, l’apparition d’une flèche résiduelle dans le premier cycle humidification/séchage sous chargement mécanique nulle. Une simulation par éléments finis en utilisant un modèle simple (poutre isotrope) en déformation plane, **Figure I.2.22**, permet d’identifier le phénomène comme étant du retrait-gonflement longitudinal empêché par les conditions aux appuis (frottement). Par méthode inverse, nous déduisons les coefficients de retrait-gonflement longitudinal  $\alpha_L$ , pour les quatre premières poutres, **Tableau I.2.8**, avec comme données initiales : les modules élastiques  $E_{0,l}$  du **Tableau I.2.4**, le coefficient de poisson moyen étant pris égal à 0,4 et la variation d’humidité égale à 9%, **Figure I.2.13**.



**Figure I.2.22.** Simulation éléments finis des effets du retrait-gonflement longitudinal, [MAN 11d]

**Tableau I.2.8.** Valeurs coefficients de retrait-gonflement longitudinal des échantillons 1 à 4

Echantillon	1	2	3	4
$\alpha_L$ (%/%HR)	$9,74 \cdot 10^{-4}$	$12,3 \cdot 10^{-4}$	$7,80 \cdot 10^{-4}$	$9,74 \cdot 10^{-4}$

1.2.6.4.4 Corrections des flèches par les effets du retrait-gonflement

Les valeurs des coefficients de retrait-gonflement libre calculé à partir de la phase 1 sont retenues, **Tableau I.2.6** et **I.2.8**. L’effet du retrait-gonflement est déduit des valeurs des flèches supérieures sur l’ensemble de l’expérimentation de la manière suivante :

$$U_{fluage}(t) = U_{tot}(t) - U_{RT}(t, w) - U_L(t, w) \tag{I.2.16}$$

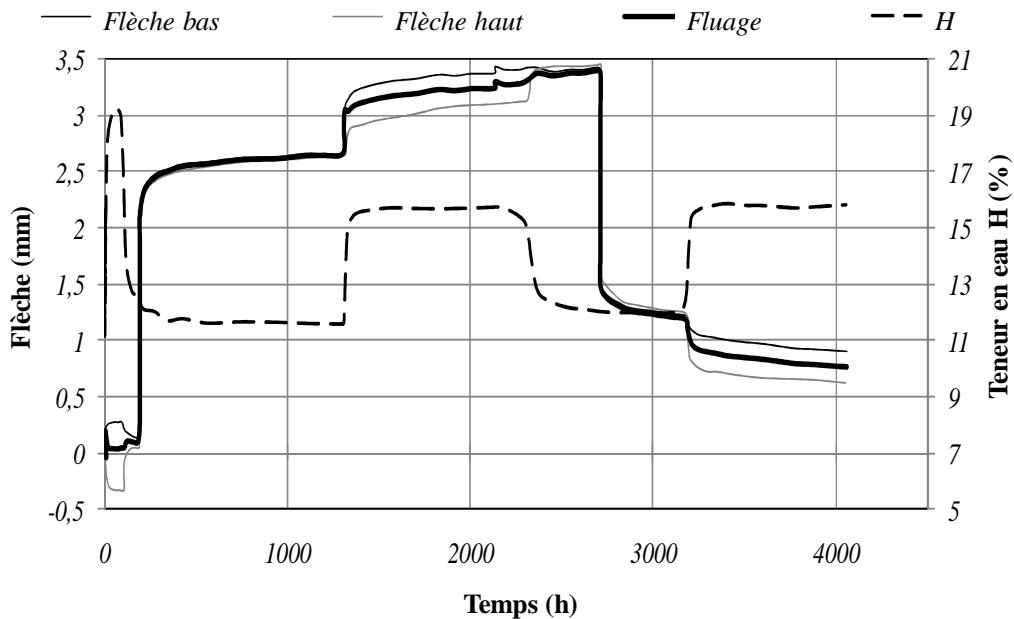
$U_{tot}$  est défini comme la flèche globale atteinte par la poutre en face supérieure ou inférieure.  $U_{RT}$  et  $U_L$  désignent respectivement les flèches induites par les effets de retrait-gonflement transversal et longitudinal de la poutre. Elles sont définies comme suit :

$$U_{RT}(t, w) = h_o \cdot \alpha_{RT} \cdot (w(t) - w_{ref}) \quad (I.2.17)$$

$$U_L(t, w) = A \cdot \alpha_L \cdot (w(t) - w_{ref}) \quad (I.2.18)$$

A est un coefficient qui prend en compte l'effet métrique ou effet structure. Il est estimé à 2,97 mm par la méthode des éléments finis pour une section de 10 x 30 mm<sup>2</sup> telle que définie pour nos échantillons.

La **Figure I.2.23** montre un exemple de correction de flèches (échantillon 4) en isolant les effets de retrait-gonflement. Cette observation est générale pour l'ensemble des échantillons.



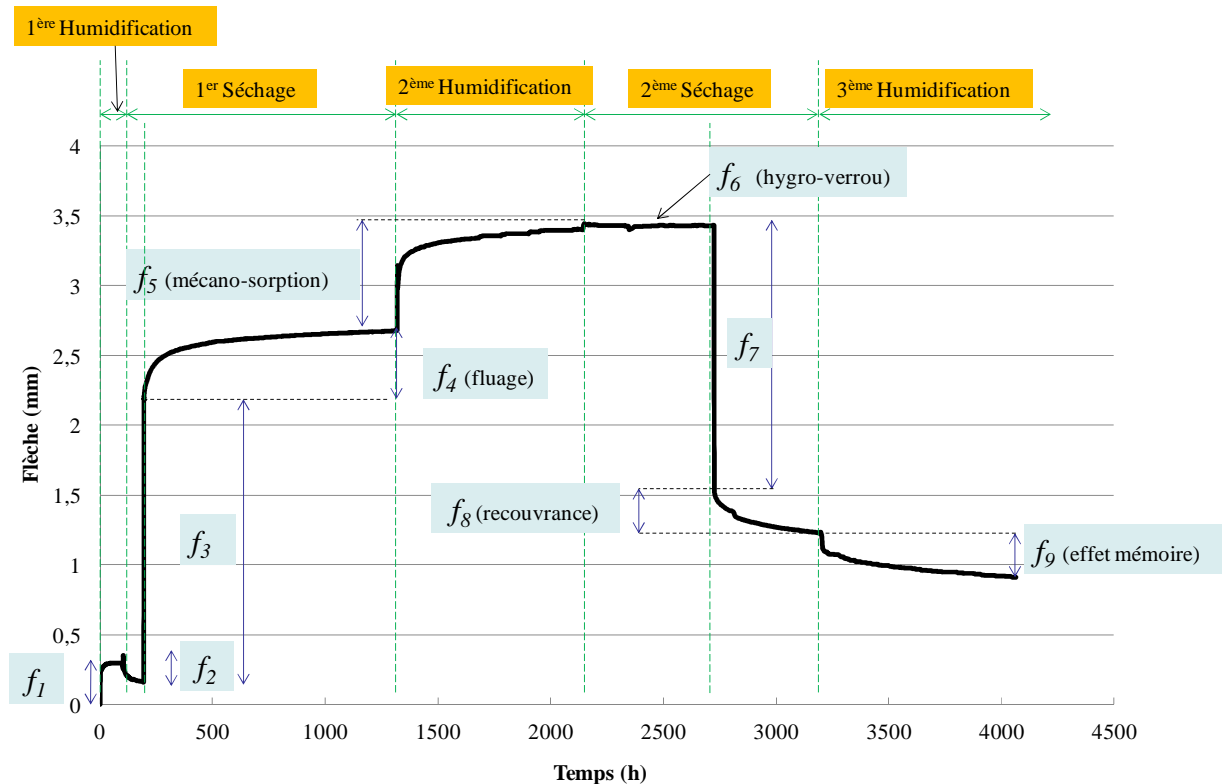
**Figure I.2.23.** Flèche différée de la poutre 4 après filtrage du retrait-gonflement en face supérieure, [MAN 11d]

Pour la suite, les filtrages vis-à-vis du retrait-gonflement transversal sont réalisés en tenant compte du coefficient de retrait-gonflement obtenu en phase 1.

### 1.2.6.5. Analyse des flèches

#### 1.2.6.5.1 Identification des grandeurs mesurées

Pour l'analyse des différents phénomènes observés, nous avons dissocié, pour chaque courbe et pour chaque phase, les flèches instantanées et différées. Conformément au paragraphe 1.2.6.4.3, cette analyse peut porter de manière indifférenciée sur la flèche mesurée en partie basse, ou sur la flèche mesurée en partie haute pour laquelle l'effet du retrait-gonflement transversal est déduit. La **Figure I.2.24** présente une proposition de découplage et d'interprétation des flèches sur l'ensemble de l'histoire de chargement.



**Figure I.2.24.** Proposition de découplage des flèches sur l'ensemble de l'histoire de chargement

Par la suite, nous proposons une interprétation des différentes flèches listées en **Figure I.2.24** :

- $f_1$  et  $f_2$  représentent les perturbations engendrées respectivement par le gonflement et le retrait longitudinal. En effet, un blocage même partiel du déplacement horizontal des appuis, par frottement acier/acier de la plaque de répartition sur l'appui cylindrique, est à même de générer des flèches significatives.
- $f_3$  représente la flèche élastique en condition sèche.
- $f_4$  représente la flèche viscoélastique en condition sèche.
- $f_5$  représente l'incrément de flèche dû à l'humidification. Les effets viennent de l'assouplissement des propriétés élastiques retardé par la diffusion du front d'humidité et de la viscoélasticité [GUI 87] [HOY 86].
- $f_6 \approx 0$  représente le blocage des déplacements par effet hygro-verrou [GRI 88] [HUS 09], qui provient de la rigidification élastique du matériau.
- $f_7$  représente la recouvrance instantanée partielle après déchargement [BOD 82], en condition sèche.
- $f_8$  représente la recouvrance différée en condition sèche.



- $f_9$  représente la recouvrance mécano-sorptive par effet mémoire. La troisième humidification permet de libérer les déformations bloquées mais sans pour autant obtenir une recouvrance complète.

#### I.2.6.5.2 Détermination des modules instantanés

Sur la base des valeurs obtenues des flèches instantanées en charge et décharge, on détermine, à partir de l'expression (I.2.10), les modules d'élasticité correspondants, **Tableau I.2.9**.

**Tableau I.2.9.** Modules instantanés en charge et en décharge (GPa) déduits des flèches en face inférieure (Bas) et supérieure (Haut)

Grandeurs mesurées		$E_{ch}$ (Charge)	$E_{déc}$ (Décharge)	$E_{0,g}(I)$
		GPa	GPa	GPa
Eprouvette 1	Bas	<b>11,3</b>	<b>11,2</b>	<b>9,68</b>
	Haut	<b>10,9</b>	<b>11,1</b>	
Eprouvette 2	Bas	<b>10,4</b>	<b>10,4</b>	<b>11,2</b>
	Haut	<b>10,2</b>	<b>10,2</b>	
Eprouvette 3	Bas	<b>9,23</b>	<b>9,40</b>	<b>8,17</b>
	Haut	<b>9,24</b>	<b>9,32</b>	
Eprouvette 4	Bas	<b>9,23</b>	<b>9,37</b>	<b>9,95</b>
	Haut	<b>9,21</b>	<b>9,37</b>	
Eprouvette 5	Haut	<b>8,44</b>	<b>8,78</b>	<b>8,54</b>
Eprouvette 6	Haut	<b>8,60</b>	<b>8,92</b>	<b>8,33</b>
Eprouvette 7	Haut	<b>9,58</b>	<b>10,1</b>	<b>8,87</b>
Eprouvette 08	Haut	<b>11,1</b>	<b>11,2</b>	<b>10,9</b>

Dans l'ensemble, les valeurs des modules en charge sont sensiblement égales à celles des modules en décharge, et ce, au regard des écarts peu significatifs (inférieurs à 5%) pour des conditions hydriques identiques. De même, les écarts de valeurs de modules (moins de 2%) entre mesures haute et basse sont peu significatifs et donc tout à fait cohérents.

En comparant les valeurs des modules d'élasticité présentées au **Tableau I.2.9** à celles des modules obtenues avant essais à long terme (**Tableau I.2.4**), on note des écarts faibles et assez dispersés allant de 1% (échantillon 5) à 13% (échantillon 1). Ces écarts, peu significatifs à l'échelle structure, peuvent se justifier par l'imprécision de la mesure. On peut donc conclure que les valeurs élastiques sont quasiment inchangées.

### I.3. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le matériau bois d'un point de vue micro et macroscopique. De part sa structure fibreuse, le bois est un matériau fortement anisotrope. Cet état de fait, lié à sa composition biochimique (formé de cellulose, d'hémicellulose et de lignine), rend son étude très complexe comparativement aux autres matériaux de construction tels que le béton et l'acier.

Le bois est un matériau dont les caractéristiques physiques et mécaniques sont fortement corrélées à son état hygroscopique. Sous charge instantanée, son comportement mécanique est viscoélastique tant que le niveau de charge reste inférieur à un certain seuil. Dû à son orthotropie cylindrique, son tenseur de complaisance (expression I.1.6) peut se ramener à 9 paramètres indépendants dont la détermination est rendue possible par des essais mécaniques de caractérisation. Sous charge de longue durée, son comportement est viscoélastique.

Dans la dernière partie, un protocole expérimental a été développé afin de découpler et de comprendre les différents effets rencontrés habituellement lors d'un essai de fluage en flexion sous variations climatiques. La réflexion expérimentale étant guidée par une modélisation des phénomènes mécano-sorptifs, elle a permis de valider les points suivants :

- Isoler les phénomènes de retrait-gonflement puis de fluage proprement dit afin d'évaluer la part de déformation propre au phénomène mécano-sorptif ;
- Faire clairement apparaître le phénomène d'hygro-verrou et l'effet mémoire du matériau bois ;
- Comprendre les phénomènes différés et leur évolution dans le temps sous conditions climatiques variables ;
- Fournir une base de données pour le calibrage des modèles de simulation existant et en cours de validation.

En effet, cette expérimentation, utilisant deux capteurs de déplacement pour partitionner les effets différés, a permis non seulement d'isoler le retrait-gonflement du fluage viscoélastique mais aussi de dissocier, par l'histoire du chargement thermo-hydrique, le phénomène mécano-sorptif. Outre le découplage du comportement différé, elle apporte une précision sur les phénomènes mesurés selon que les capteurs de déplacement sont placés en face supérieure ou inférieure d'une poutre sur appuis simples. La séparation des différents phénomènes ayant pour but la compréhension de leur évolution dans le temps afin d'en établir des fonctions prédictives, cette

expérimentation fournit une base expérimentale riche pour la compréhension des phénomènes différés et pour le calibrage des modèles de simulation s'y rapportant [HUS 09] [RAN 03].

Ce protocole expérimental peut cependant être complété des points suivants :

- Le même protocole peut être mis en œuvre en considérant la phase de chargement sous haute humidité.
- Réaliser plusieurs cycles d'humidification-séchage sous charge pour mettre en évidence l'existence ou non d'un fluage mécano-sorptif limite.
- Réaliser plusieurs cycles d'humidification-séchage après déchargement pour vérifier si la recouvrance mécano-sorptive est immédiate ou graduelle.

Enfin, les modèles mécano-sorptifs sont généralement développés à l'échelle du matériau sous des états de contraintes de compression ou de traction. Une perspective de ce travail est de développer un modèle de type poutre permettant, à faible coût de calcul, une prédiction de la réponse structurelle d'éléments fléchis en environnement variable.

La validation de ce protocole expérimental a permis de conduire les campagnes d'essais sur la caractérisation du comportement différé des bois tropicaux sous ambiance tropicale. Ce travail fait l'objet de la deuxième partie de ce mémoire.



# **CHAPITRE II. ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DIFFERE DES BOIS TROPICAUX EN AMBIANCE TROPICALE : CADRE REGLEMENTAIRE ET EXPERIMENTATION**

<b>II.1. Approche règlementaire par l’Eurocode 5.....</b>	<b>57</b>
II.1.1. Classes de service.....	57
II.1.2. Classe de durée de charge.....	58
II.1.3. Coefficients de modification de performance.....	59
II.1.4. Application de l’Eurocode 5 aux essences tropicales en climat tropical.....	60
<b>II.2. Fluage des bois tropicaux en ambiance tropicale.....</b>	<b>61</b>
II.2.1. Expérimentation à l’échelle laboratoire.....	61
II.2.2. Expérimentation à l’échelle structure et approche règlementaire.....	62
<b>II.3. Etude expérimentale du comportement mécanique différé des bois tropicaux en ambiance tropicale gabonaise.....</b>	<b>65</b>
II.3.1. Climat tropical gabonais.....	65
II.3.2. Choix des essences pour la campagne expérimentale.....	66
II.3.2.1. La forêt gabonaise.....	66
II.3.2.2. Deux essences choisies.....	66
II.3.2.2.1    Ozigo.....	67
II.3.2.2.2    Moabi.....	67
II.3.2.3. Etudes existant sur ces deux essences.....	68
II.3.3. Dispositif expérimental.....	69
II.3.4. Méthodologie.....	71
II.3.4.1. Environnements d’étude.....	71
II.3.4.2. Phases préparatoires.....	71
II.3.5. Résultats expérimentaux et analyses.....	76
II.3.5.1. Teneur en eau initiale des poutres.....	76
II.3.5.2. Ambiance intérieure climatisée.....	78
II.3.5.2.1    Evolution des conditions climatiques.....	78
II.3.5.2.2    Evolution des flèches brutes et moyennes.....	80
II.3.5.2.3    Détermination des modules instantanées.....	82

II.3.5.3. Ambiance extérieure abritée.....	83
II.3.5.3.1 Evolution des conditions climatiques .....	83
II.3.5.3.2 Evolution des flèches brutes et moyennes .....	85
II.3.5.3.3 Détermination des modules instantanées .....	87
II.3.5.4. Ambiance extérieure non-abritée .....	88
II.3.5.4.1 Evolution des conditions climatiques .....	88
II.3.5.4.2 Evolution des flèches brutes et moyennes .....	90
II.3.5.4.3 Détermination des modules instantanées .....	92
II.3.6. Rapport à l’Eurocode 5.....	93
II.3.6.1. Ambiance intérieure climatisée .....	93
II.3.6.2. Ambiance extérieure abritée.....	94
II.3.6.3. Ambiance extérieure non-abritée .....	94
<b>II.4. Conclusion .....</b>	<b>96</b>

---

## II.1. Approche règlementaire par l'Eurocode 5

Nous avons vu précédemment que le bois est un matériau hygroscopique. En d'autres termes, il adsorbe et désorbe de l'eau en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air qui l'entoure. En effet, plusieurs travaux effectués sur des grandes poutres, notamment ceux de Ranta-Maunus [RAN 75], de Gerhards [GER 88], de Toratti [TOR 95], pour ne citer qu'eux, ont montré l'effet des variations climatiques naturelles sur le fluage et la nécessité de le prendre en compte dans les codes de conception des structures. Par conséquent, le calcul des structures en bois exige une meilleure estimation de l'état hydrique, pour une connaissance suffisante de l'évolution des propriétés mécaniques sous sollicitations. De plus, dans un contexte de combinaison d'actions statistiques, la réglementation prend en compte les effets de fluage accentués pour des durées de charge importantes. Ces spécificités du matériau sont prises en compte à travers l'utilisation de coefficients modificateurs des propriétés de résistance et de rigidité.

Pour sa part, l'Eurocode 5 utilise deux coefficients modificateurs pondérés de la durée d'application des actions (classe de durée de charge) et de l'exposition à l'humidité liée aux conditions environnementales où se situe l'ouvrage (classe de service) [AFN 06]. On distingue, ainsi, les coefficients :

- $k_{mod}$  pour les propriétés de résistance : il concerne une minoration de la résistance du matériau prenant en compte les effets de fluage ;
- $k_{def}$  pour les déformations : il permet de prendre en compte une amplification des déplacements.

### II.1.1. Classes de service

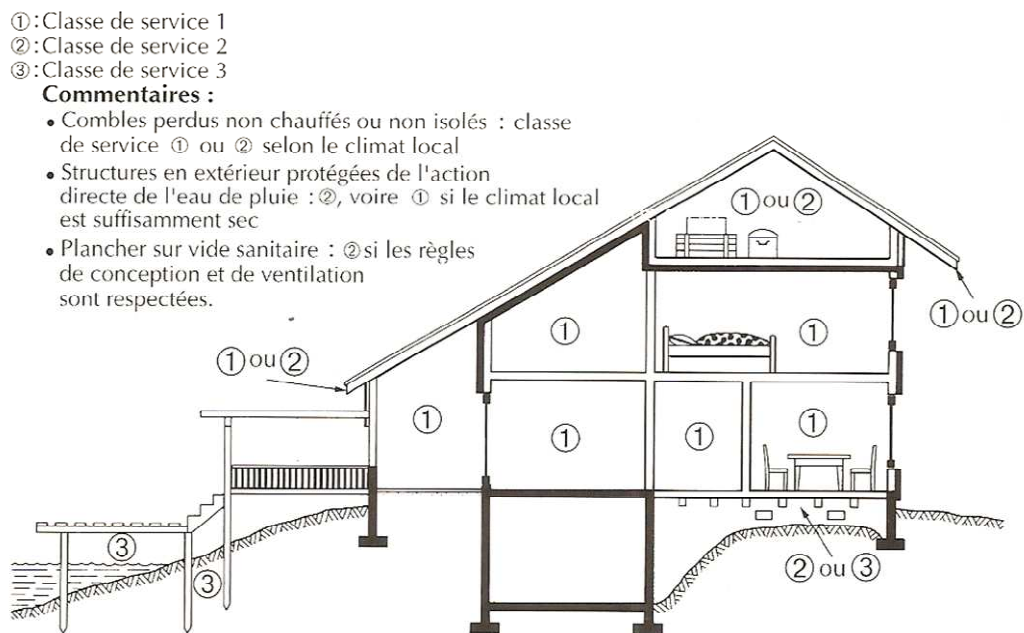
La prise en compte des conditions climatiques, dans lesquelles évoluent les structures, se fait par la notion de classes de service structurales. Dans ce contexte, l'Eurocode 5 définit trois classes de service :

- **Classe de service 1** : correspond à une température de 20°C et à une humidité relative ambiante inférieure ou égale à 65 %, et ne dépassant cette valeur que quelques semaines par an tout en restant inférieur à 85 %. Le taux d'humidité d'équilibre en masse du bois est inférieur ou égal à 12 %. C'est le cas, par exemple, des structures situées dans des locaux chauffés.
- **Classe de service 2** : correspond à une température de 20°C ainsi qu'à une humidité relative ambiante ne dépassant 85% que quelques semaines par an. Le taux d'humidité d'équilibre en

masse du bois se situe entre 12 et 20 %. C'est le cas, par exemple, des structures situées dans des locaux non chauffés en permanence ou des éléments placés en extérieur mais à l'abri des intempéries.

- **Classe de service 3** : correspond à toutes les conditions climatiques où l'humidité de l'air est supérieure à celle de la classe 2 (soit plus de 85 %). Il s'agit principalement d'éléments placés en extérieur et sous intempéries.

La **Figure II.2.1**, tirée de Natterer [NAT 04], illustre les différents états fonctionnels correspondant aux classes de service définies par l'Eurocode 5.



**Figure II.1.1.** Illustration des classes de services [NAT 04]

### II.1.2. Classe de durée de charge

L'Eurocode 5 définit cinq classes de durée d'application de charge comme l'indique le tableau II.2.1 dont le classement est dicté par une durée statistique d'application de l'action extérieure.

**Tableau II.2.1.** Définition des classes de durée de chargement selon l'Eurocode 5 [AFN 08]

Classe de durée de charge	Ordre de grandeur de la durée cumulée de l'application d'une action	Exemple d'action
Permanente	Plus de 10 ans	Poids propre
Long terme	Six mois à 10 ans	Stockage, Equipements fixes
Moyen terme	Une semaine à six mois	Charges d'exploitation, Neige H ≥ 1000 m
Court terme	Moins d'une semaine	Neige H < 1000 m
Instantané		Vent, Actions accidentelles, Neige exceptionnelle



### II.1.3. Coefficients de modification de performance

Pour prendre en compte les effets hygroscopiques et de fluage sur les propriétés de résistance et de rigidité des structures bois en service, l’Eurocode 5 utilise deux coefficients précédemment définis tels que :

- la valeur de calcul de la propriété de résistance  $R_d$  soit définie comme suit :

$$R_d = k_{mod} \times \frac{R_k}{\gamma_M} \tag{II.1.1}$$

$R_k$  est la résistance caractéristique de l’essence généralement calculée au fractile 5% et  $\gamma_M$  est le coefficient partiel de sécurité du matériau bois.

**Tableau II.2.2.** Valeur de  $k_{mod}$  pour le bois massif et le lamellé-collé selon l’Eurocode 5

Classe de durée de charge	$k_{mod}$ en fonction des Classes de Service		
	1	2	3
Permanente	0.60	0.60	0.50
Long terme	0.70	0.70	0.55
Moyen terme	0.80	0.80	0.65
Court terme	0.90	0.90	0.70
Instantanée	1.10	1.10	0.90

Le coefficient correcteur  $k_{mod}$  est considéré comme un coefficient minorant la résistance de calcul, lorsque la durée de charge augmente. Cependant, cette minoration n'est qu'un effet de fluage dont le critère de résistance en contrainte n'est pas applicable. Sur la base de critères de rupture ou d'endommagement énergétique, il faut voir, à travers les effets de fluage, une augmentation relative de la sollicitation (augmentation de l'énergie libre dans le temps) vis-à-vis de la résistance.

- la déformation finale  $\epsilon_{fin}$ , résultant des effets des actions, soit définie comme suit :

$$\epsilon_{fin} = \epsilon_{inst} + \Delta\epsilon_{diff} \quad \text{avec} \quad \Delta\epsilon_{diff} = k_{def} \times \epsilon_{inst} \tag{II.1.2}$$

$\epsilon_{inst}$  est la déformation instantanée engendrée par les charges permanentes et variables ;  $\Delta\epsilon_{dif}$  est l’accroissement différé des déformations.

**Tableau II.2.3.** Valeurs de  $k_{def}$  pour le bois massif et le lamellé-collé selon l'Eurocode 5

<i>Matériau</i>	<i><math>k_{def}</math> en fonction des classes de service</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Bois massif, lamellé-collé	0.60	0.80	2.00

Toutefois, l'Eurocode 5 préconise d'augmenter la valeur de  $k_{def}$  de 1,00 pour les bois massifs qui sont posés à un taux hygroscopique proche de la saturation et sont destinés à sécher sous charge.

#### II.1.4. Application de l'Eurocode 5 aux essences tropicales en climat tropical

L'Eurocode 5 s'appuie sur des essences résineuses tempérées car plus utilisées en construction européenne, même si des applications existent pour les feuillus tempérés. De plus, les classes de service sont définies par rapport à un environnement qui correspond à une réalité purement européenne. Peut-on directement appliquer ce code à la conception et au calcul des structures en bois évoluant dans des environnements tropicaux ?

S'il est vrai que les structures sont soumises aux mêmes types de chargements (mécaniques et climatiques), les contextes environnementaux et la structure des bois ne sont pas les mêmes. D'où les deux interrogations suivantes :

- Comment utiliser ce code pour des essences tropicales ?
- Le climat tropical s'intègre-t-il dans ce schéma ?

Pour répondre à ces questions, il importe de faire un état de l'art des travaux existant sur le comportement des bois tropicaux soumis à des sollicitations thermo-hygro-mécaniques variables.

## II.2. Fluage des bois tropicaux en ambiance tropicale

Il existe très peu de travaux traitant de ce sujet dans la littérature. Cependant, beaucoup de travaux expérimentaux ont été menés sur les bois tropicaux. On peut citer sans être exhaustif ceux du Centre de Recherches sur les Bois tropicaux de Nogent-sur-Marne devenu le Centre Technique Forestier Tropical [RBF 68], du CIRAD [CIR 03], de l'ATIBT [ATI 86], de PROTA [PRO 08] [PRO 10] dont l'objet portait sur les études anatomiques, les propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux pour le développement de l'utilisation de ces bois par les industries européennes.

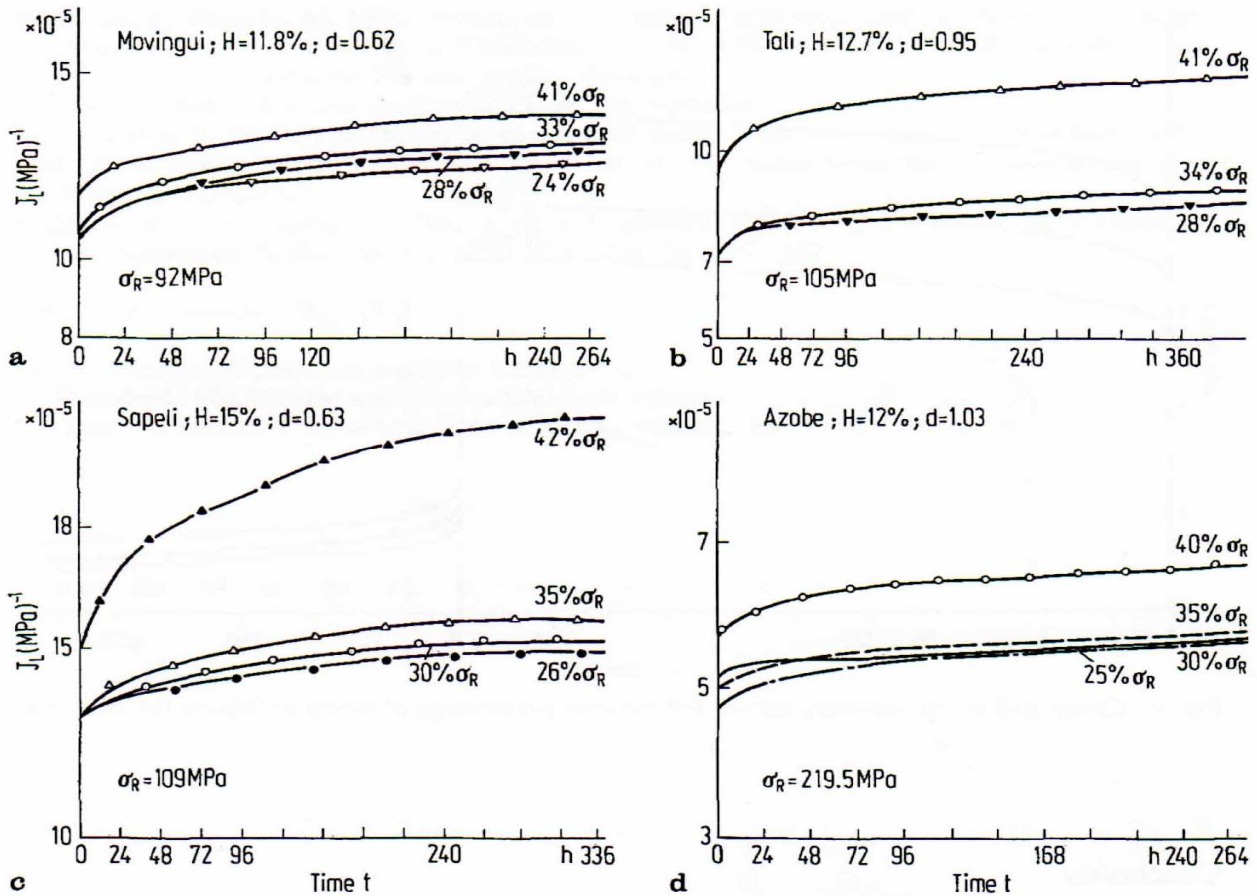
En Afrique et notamment en zone tropicale, outre les travaux de Foudjet [FOU 86] [FOU 89] et d'Ayina [AYI 98a] [AYI 98b], il existe quelques travaux menés dans le cadre des mémoires de fin de cycle (Maîtrise, DEA et Ingénieur) dont les résultats ont été très peu publiés.

### II.2.1. Expérimentation à l'échelle laboratoire

A cette échelle, on peut citer les travaux d'Ayina [AYI 98a] portant sur le « comportement en torsion du matériau bois » et ceux de Foudjet [FOU 86] [FOU 89] qui développent un modèle de comportement du Movingui, essence tropicale couramment utilisée en charpente légère, et une méthode de calcul des sections mixtes bois/béton sous charges de longue durée.

Dans ses travaux, Ayina a développé des modèles de comportement en torsion à partir d'essais réalisés sur des éprouvettes de Movingui et de Bilinga, autre essence tropicale. Ces études ont été menées sur des échantillons de petites dimensions (section carrée de 12 mm et 15 mm pour des longueurs variant de 500 à 600 mm), sur une période relativement courte (60 jours), et ce, dans des conditions climatiques constantes.

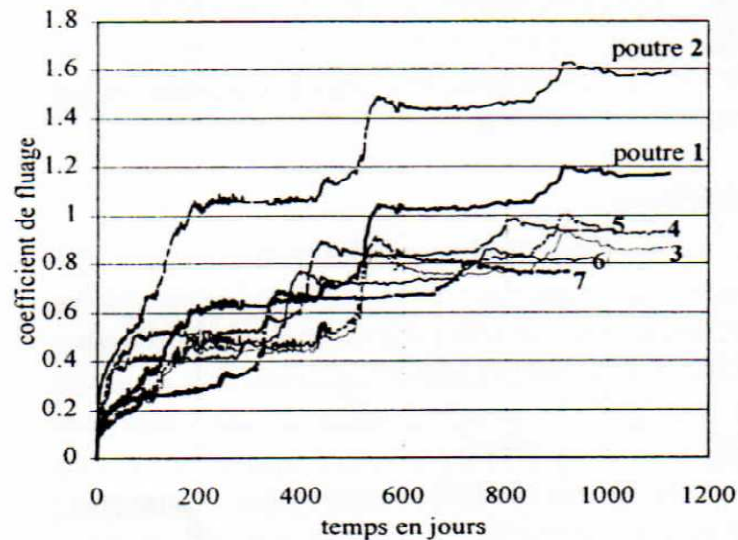
Sur l'étude du fluage en flexion proprement dite, Foudjet et *al* [FOU 89] ont mené des essais de fluage sur des poutres consoles en flexion iso-contrainte dans le domaine viscoélastique linéaire sur quatre essences tropicales (l'Azobé, le Tali, le Sapelli et le Movingui). L'objet de l'étude s'inscrit dans la compréhension du comportement différé des bois tropicaux. Les résultats obtenus montrent que sous des taux de contrainte inférieurs à 35% de la contrainte de rupture, le comportement différé reste viscoélastique linéaire. Ainsi, dans cet intervalle, le fluage relatif global reste inférieur ou égal à 35%, **Figure II.2.1**. Au-delà de cette valeur, certains essais ont montré une accélération du fluage allant parfois jusqu'à la rupture. Une fois de plus, cette étude est menée sur des petites éprouvettes (300 mm de longueur), sur un temps relativement court (11 à 18 jours) et dans des conditions climatiques constantes. Toutefois, les auteurs recommandent de prendre en considération l'effet du fluage dans la construction des structures en bois sans apporter d'indication réglementaire particulière.



**Figure II.2.1.** Fonctions de fluage pour différents taux de contraintes : a) Movingui ; b) Tali ; c) Sapelli ; d) Azobé. H : taux d'humidité du bois ; d : densité ;  $\sigma_R$  : contrainte de rupture [FOU 89]

### II.2.2. Expérimentation à l'échelle structure et approche réglementaire

Jusqu'à ce jour, les travaux d'Ayina et al [AYI 98b] restent les plus connus sur le comportement des bois tropicaux sollicités en flexion, à l'échelle structure et en région tropicale. Sur une période plus longue (2,5 ans à 3 ans), la campagne d'essais est menée sur des poutres de Movingui de section 70 x 70 mm<sup>2</sup> en climat naturel « yaoundéen » (Cameroun) avec, dans l'année, des températures et des humidités relatives variant respectivement de 18 à 33°C et de 45% (minimum en Janvier-Février) à 75% (maximum en Septembre-Octobre) [AYI 98b]. Il faut préciser que les poutres sont chargées à un taux de 15 à 23% de la contrainte de rupture et sont placées dans une pièce dont les parois permettent la circulation de l'air. Le taux d'humidité initiale des poutres est estimé entre 15% et 16%. La **Figure II.2.2** montre les résultats obtenus en termes de coefficient de fluage.



**Figure II.2.2.** Fluage des poutres bois sous climat tropical humide (Yaoundé) [AYI 98]

Dans l'analyse des résultats, les auteurs font ressortir les points suivants :

- Au bout de trois ans, le coefficient de fluage est compris entre 0,8 et 1,2 (la poutre 2 n'est pas prise en compte car son bois contient de l'aubier dégradé).
- Les poutres sont sensibles aux variations journalières d'humidité malgré la grande inertie hygrométrique présumée des bois tropicaux mi-durs et durs.
- Le fluage mécano-sorptif est réactivé en grande saison sèche après une phase transitoire. En effet, comme l'indique les auteurs, la saison sèche est marquée par une humidité relative de l'air qui oscille entre 45% et 65% alors que les températures journalières varient entre 20°C et 33°C.
- Au fil des années, l'accroissement du coefficient de fluage diminue laissant augurer l'existence d'un fluage limite.
- A l'exception de la première année, une recouvrance de la déflexion est observée à la fin de la saison sèche. Celle-ci diminue d'une année à l'autre.
- Le coefficient de fluage  $k_{def}$  prescrit par l'Eurocode 5 est pratiquement identique malgré une évolution globale du fluage spécifique sous climat tropical humide.

Même si aucune classification n'est faite vis-à-vis des classes de service de l'Eurocode 5, les conditions climatiques dans lesquelles sont menés les essais situent l'environnement expérimental en classe de service 2 (humidité interne du bois variant entre 12 et 20%). Cette classe donne un coefficient de fluage  $k_{def}$  égal à 0,8 sur une période minimum de 10 ans. Contrairement au constat des auteurs, les valeurs des coefficients de fluage obtenus au bout de 3 ans, dans le cadre de ces essais (0,8 à 1,2), sont largement supérieures à celles proposées par l'Eurocode 5 pour la classe 2 : d'où la problématique du cadre réglementaire des structures en bois tropicaux évoluant en climat tropical.

Toutefois, cette étude, première du genre, apporte des informations intéressantes sur l'étude du comportement différé des bois tropicaux en climat tropical. Elle demande à être dupliquée et complétée afin d'enrichir la base de données et d'apprécier, à leur juste valeur, les observations relevées. L'étude expérimentale à suivre se situe dans ce contexte.

## II.3. Etude expérimentale du comportement mécanique différé des bois tropicaux en ambiance tropicale gabonaise

La présente étude, première du genre, réalisée à Franceville au Gabon est menée dans le but d'apporter des informations utiles et pratiques aux professionnels du secteur de la construction bois au Gabon en particulier, et en Afrique centrale en général. Elle apporte donc une base de données complémentaire aux études réalisées par nos confrères camerounais dans l'étude de la compréhension des phénomènes mécano-sorptifs des bois tropicaux en ambiance tropicale. L'objectif final vise l'adaptation des codes de calcul actuels de la construction bois au contexte des bois tropicaux dans un environnement tropical.

### II.3.1. Climat tropical gabonais

Le Gabon est un pays d'Afrique centrale situé sur l'Equateur qui couvre une superficie de 267 667 km<sup>2</sup>. Il est limité au Nord par le Cameroun, au Nord-Ouest par la Guinée Equatoriale, à l'Ouest par le littoral atlantique (près de 800 km de côte), au Sud et à l'Est par le Congo (Brazzaville).

Le Gabon bénéficie d'une pluviométrie importante qui s'étale en général sur huit à neuf mois dans l'année. Cette caractéristique, comme l'explique Buisson [BUI 87], peut se justifier par la situation géographique du pays, par l'importance des surfaces d'eaux libres (réseau hydrographique, proximité de l'océan) et par l'étendue du couvert végétal que constitue la forêt qui couvre plus de 80% du territoire, **Figure II.3.1.**



**Figure II.3.1.** Forêt gabonaise, chute du Konga, [irimep.org]

Selon le Centre d'Echange d'Informations du Gabon [CEI 10], la combinaison d'éléments climatiques tels que la température (21-28°C en moyenne annuelle), les précipitations (2000-3800

mm/an) et l'hygrométrie (80-88%) divise les temps au Gabon en deux saisons sèches et deux saisons des pluies.

Suivant les critères de distinction des régimes climatiques du Gabon qui sont fonction de la distribution et du rythme des précipitations, on distingue trois principaux types de climats répartis en trois régions climatiques :

- Un climat équatorial pur dans la zone nord, caractérisé par quatre saisons : deux saisons pluvieuses (de septembre à décembre et de mars à juin) et deux saisons sèches qui s'intercalent aux saisons des pluies ;
- Un climat équatorial de transition de la zone centrale caractérisée par une très grande saison des pluies qui laisse peu de place à la petite saison sèche et une grande saison sèche bien marquée ;
- Un climat équatorial du sud-ouest et du littoral centre atlantique caractérisé par une longue saison sèche de 4 à 5 mois.

Franceville, ville située dans le sud-est du pays, est plutôt sujette à un climat équatorial de transition selon le découpage climatique.

### **II.3.2. Choix des essences pour la campagne expérimentale**

#### *II.3.2.1. La forêt gabonaise*

La forêt gabonaise est l'une des plus riches d'Afrique. Il existe plus de 8000 espèces de bois dont seulement 75 sont exploitées à ce jour. Le peuplement est riche en Okoumé, en Ozigo et en bois groupés sous l'appellation de « bois divers » (Azobé, Bilinga, Moabi, Movingui, Padouk (Mbel), Sapelli etc.). Le potentiel ligneux sur pied de la forêt gabonaise est estimé à 2.6 milliards de m<sup>3</sup>. Le potentiel commercialisable est, quand à lui, de 1.5 milliards de m<sup>3</sup> dont 400 millions de bois commercial et 130 millions de bois d'okoumé [MEF 05].

Jusqu'aux années 2008, l'Okoumé, essence endémique au Gabon, présentant les meilleures caractéristiques au déroulage, et l'Ozigo ont été de loin les espèces les plus exploitées et les plus commercialisées.

#### *II.3.2.2. Deux essences choisies*

Dans ce vaste panel, deux critères majeurs ont guidé notre choix : la densité (léger à lourd) et les caractéristiques mécaniques bibliographiques (moyennement résistant à très résistant) complétées, dans une moindre mesure, par l'utilisation locale.



Ainsi, deux essences ont été choisies pour la campagne expérimentale, à l'échelle structure, menée à Franceville au Gabon : l'Ozigo et le Moabi.

#### II.3.2.2.1 Ozigo

De son nom scientifique *Dacryodes buettneri*, l'Ozigo (nom pilote) fait partie de la famille des *Burseraceae*, **Figure II.3.1**. C'est un feuillu léger ( $0,59 \pm 0,05$  de densité) nécessitant des traitements de préservation contre les insectes et non conseillé en cas d'humidification permanente ou temporaire [CIR 11]. Cette essence est très utilisée, en qualité de bois d'œuvre d'exportation, pour la fabrication de contre-plaqué, pour les menuiseries intérieures, les charpentes légères et autres (caisses, emballages etc.). Dans le marché domestique gabonais, l'Ozigo est utilisé sous forme de planches, chevrons et bastings destinés à la construction.



**Figure II.3.1.** Bois d'Ozigo : sur pied et en coupe longitudinale, source CIRAD-Forêt

#### II.3.2.2.2 Moabi

De son nom scientifique *Baillonella toxisperma*, le Moabi (nom pilote) est de la famille des *Sapotaceae*, **Figure II.3.2**. C'est un feuillu dense ( $0,87 \pm 0,07$  de densité) et très dure ne nécessitant pas de traitement de préservation contre les insectes et en cas d'humidification permanente [CIR 11]. Cette essence est utilisée en qualité de bois d'œuvre d'exportation, pour les menuiseries et charpentes lourdes extérieures (portes, fenêtres, mobilier de jardin etc.), pour les parquets, pour le placage (ameublement et décoration) et pour la construction marine. Dans le marché domestique gabonais, le Moabi est plus utilisé pour les menuiseries extérieures, la sculpture et pour les charpentes lourdes.



a. Sur pied (R. Letouzey)      b. Coupe sur dosse et coupe sur quartier (CIRAD-Forêt)

**Figure II.3.2.** Bois de Moabi

*II.3.2.3. Etudes existant sur ces deux essences*

Il existe dans la littérature plusieurs études menées sur la caractérisation de ces deux essences sans toujours des précisions sur leur provenance (zone de récolte), leur taille et l'échantillonnage des échantillons testés. Parmi ces études, les plus connues sont ceux de l'ATIBT [ATI 86], de Gérard et al [GER 98], de la fondation PROTA [PRO 08] et du CIRAD-Forêt [CIR 11]. Le Tableau II.3.1 présente quelques caractéristiques physiques et mécaniques des deux essences.

**Tableau II.3.1.** Caractéristiques physiques et mécaniques du Moabi et de l'Ozigo selon les données du CIRAD [CIR 11] et de la Fondation PROTA [PRO 08]

ORGANISMES	CIRAD		PROTA	
	Ozigo	Moabi	Ozigo	Moabi
Diamètre (cm)	70 à 100	60 à 100	Jusqu'à 150	Jusqu'à 300 (500)
Densité	0,59 ± 0,05	0,87 ± 0,07	0,5 à 0,7	0,82 à 0,94
Retrait tangentiel total	7,3 % ± 0,9	8,7 %	6,3 à 9,8 %	6,9 à 8,6 %
Retrait radial total	5,2 % ± 0,5	6,5 %	5,0 à 7,4 %	5,8 à 6,5 %
Coefficient de retrait/gonflement volumique	0,42 % ± 0,08	0,64 % ± 0,01		
Point de saturation des fibres	33 %	23 %		
Contrainte moyenne de rupture en Compression (MPa)	<b>52 ± 6</b>	<b>74 ± 10</b>	<b>38 à 70</b>	<b>57 à 84</b>
Contrainte moyenne de rupture en Flexion (MPa)	<b>91 ± 11</b>	<b>143 ± 19</b>	<b>101 à 161</b>	<b>148 à 218</b>
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	<b>13820 ± 2273</b>	<b>21040 ± 2630</b>	<b>8300 à 13900</b>	<b>15100</b>

### II.3.3. Dispositif expérimental

Dans le cadre de cette thèse, nous avons souhaité caractériser le comportement en flexion d'éléments de structure dans différents environnement caractérisant des conditions climatiques courantes. Le dispositif d'essai en flexion, **Figure II.3.3**, comprend :

- 12 poutres d'ozigo de section 80 x 180 mm<sup>2</sup> pour 3200 mm de longueur.
- 12 poutres de Moabi de section 80 x 180 mm<sup>2</sup> pour 3200 mm de longueur.
- 24 traverses en bois d'Ozigo, de section 50 x 100 mm<sup>2</sup> pour 1000 mm de longueur, servant de support d'appui pour le chargement. Les poutres sont chargées en binôme de même essence.
- 48 plots cylindriques en béton de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Ces plots sont utilisés comme points d'appuis pour les essais de flexion à réaliser.
- 48 tubes cylindriques creux de 5,5 cm de diamètre intérieur et de 16 cm de long. Ces tubes cylindriques sont fixés sur la face supérieure des plots en béton.
- 48 plaques d'acier de 40 x 80 mm<sup>2</sup> et 4 mm d'épaisseur. Elles sont interposées entre les poutres et les appuis (tubes cylindriques) afin de minimiser le poinçonnement.
- 8 plaques en béton armé d'environ 1,25 kN chacune servant de charge.
- 8 blocs de béton armé d'environ 10 kN chacune servant de charge.
- Des blocs de bordures en béton armé en complément de charge.
- Une menuiserie équipée de deux machines à bois pour le sciage et rabotage des pièces, **Figure II.3.3a**.
- Une centrale à béton disponible dans l'atelier du Département Génie Civil de l'Ecole Polytechnique à l'Université des Sciences et Techniques de Masuku, **Figure II.3.3b**.
- 24 capteurs de déplacement de marque Almemo, pour les mesures des flèches, avec une précision au 1/100<sup>ème</sup> de millimètre.
- 3 capteurs thermo-hygrométriques de marque Almemo, pour les mesures de températures ambiantes et humidités relatives.
- Un pied à coulisse de type Mitutoyo à affichage digital avec une précision au 1/100<sup>ème</sup> de millimètre.
- 2 centrales d'acquisition autonomes, **Figure II.3.3c**, avec respectivement 20 entrées pour les essais extérieurs et 10 entrées pour les essais intérieurs. Elles assurent l'enregistrement en continue des données (flèches, température et humidité relative) pour les trois environnements prédéfinis (détaillés dans la section II.3.4.1).
- Un ordinateur pour la centralisation de l'ensemble des données, **Figure II.3.3c**.

- Une salle équipée d'un appareil (de type Split System) permettant de réguler la température et l'humidité dans la pièce.



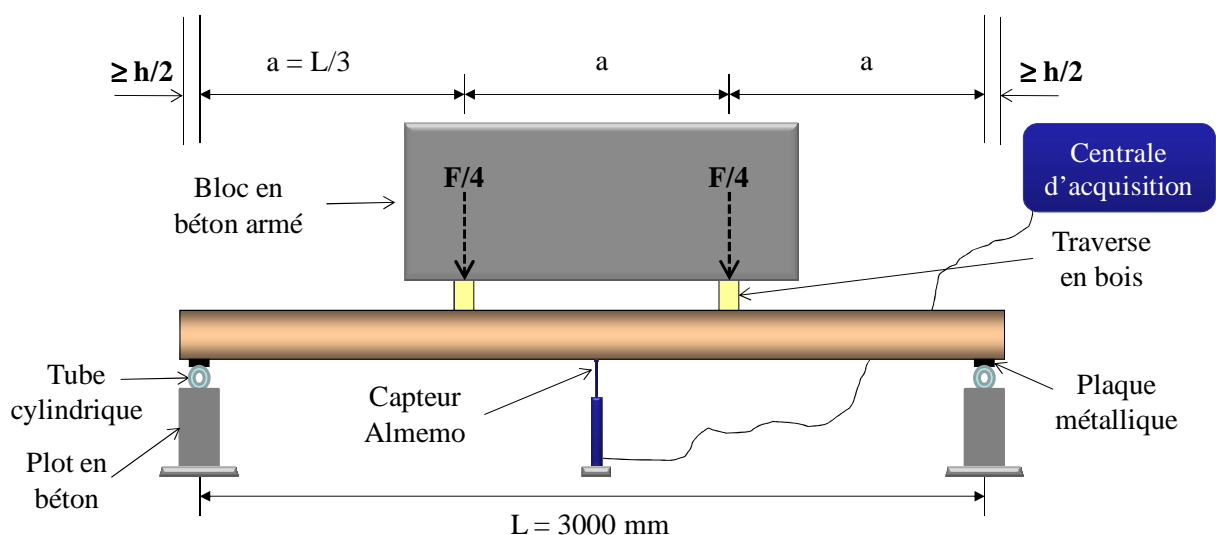
a. Machine à bois

b. Centrale à béton

c. Capteurs et centrales d'acquisition

**Figure II.3.1.** Appareillage pour la mise en œuvre des essais

Chaque paire de poutres supporte une charge de 10 kN soit une contrainte de 5,8 MPa par poutre, **Figure II.3.4.** Ce taux de chargement représente respectivement, pour le moabi et l'ozigo, moins de 5 % et 8 % de leur contrainte moyenne de rupture (pourcentages calculés à partir des données CIRAD). Ce faible niveau de chargement se justifie par, non seulement, la non-connaissance des résistances réelles en flexion des poutres, mais également par le souci de se situer dans la plage linéaire du comportement viscoélastique pendant la durée des essais.



**Figure II.3.4.** Dispositif d'essai de flexion dit « flexion huit points »

## II.3.4. Méthodologie

### II.3.4.1. Environnements d'étude

Par analogie aux classes de service de l'Eurocode 5, nous proposons de mener notre étude du fluage dans trois ambiances climatiques [MAN 11b] :

- Une ambiance climatisée en opposition au milieu chauffé. En effet, le climat équatorial étant chaud et humide, la tendance est plutôt à la climatisation dans les bâtiments administratifs, commerciaux (supermarchés) ou d'habitation.
- Une ambiance extérieure abritée à l'image des halles et hangars. Dans l'habitat traditionnel et moderne en bois, les dispositions constructives requièrent une aération permanente du bâtiment afin d'éviter les problèmes de concentration d'humidité dans les pièces, facteur favorisant la dégradation du bois d'œuvre par les champignons et insectes xylophages.
- Une ambiance extérieure non-abritée : c'est le cas des ouvrages soumis aux intempéries (structures de ponts, passerelles non-couvertes, débarcadères, ports de plaisance, etc.).

### II.3.4.2. Phases préparatoires

#### Achat des poutres

Les poutres de bois (de 3,60m de long et 80 x 180 mm<sup>2</sup> de section), au total 52 poutres, ont été confectionnées dans une scierie à Libreville au Gabon ; la seule scierie professionnelle à Franceville étant celle de Rougier qui malheureusement a une activité orientée vers l'exportation et pour des commandes conséquentes. Après achat, les poutres ont été acheminées à Franceville (650 km de Libreville) par train de marchandise. Elles ont été entreposées dans la halle d'essais de l'atelier Génie Civil. Elles y ont passé près de deux mois avant le début des essais.

#### Préparation de la plateforme extérieure

Une plateforme de 8 m de large pour 20 m de long a été aménagée derrière l'atelier du Département Génie Civil. Une dalle de 7 cm d'épaisseur, en béton armé dosée à 300 kg/m<sup>3</sup> de ciment, a été coulée pour accueillir les poutres qui devront évoluer en ambiance extérieure abritée et non-abritée, **Figure II.3.5**. Le réglage de la planéité a été assuré par le coulage d'une chape talochée de 3 cm.

#### Fabrication des plots en béton

60 éprouvettes cylindriques (16 x 32 cm) ont été fabriquées pour servir de support aux poutres. Avant prise, une réservation est faite en face supérieure de l'éprouvette pour accueillir la pièce

cylindrique. Ne disposant que de 6 moules, il a fallu donc deux semaines, pour la réalisation de l'ensemble des plots en béton. Dans la foulée, des tubes cylindriques creux de 16 cm de long ont été sciés et fixés, au fur-et-à-mesure, avec du mortier de ciment sur la partie supérieure excavée des plots.

Les vérifications à la compression à 28 jours, sur 6 éprouvettes échantillons, ont donné une valeur moyenne de 20 MPa, donc largement suffisant pour supporter chacune une charge localisée (surface d'emprise du cylindre dans le béton) de 2,5 kN.

#### Coffrage et coulage des blocs de chargement

Pour le chargement des poutres extérieures, nous avons réalisé des blocs en béton armé de 10 kN. Le dosage en ciment et les granulats étant identiques pour les bétons confectionnés, le volume de coffrage et du béton à mettre en œuvre a été calculé sur la base du poids volumique des éprouvettes 16 x 32 cm réalisées au préalable. Ainsi, des caisses de 100 x 100 x 60 cm<sup>3</sup> ont été confectionnées et posées à l'extérieur de l'atelier le long de la plateforme, **Figure II.3.5**. Pour assurer la manutention, les blocs sont munis de deux crochets en fer à béton fixés directement sur le ferrailage.

Du fait de l'exiguïté de la pièce (4,0 x 7,5 m<sup>2</sup>) devant abritée les essais sous ambiance climatisée, une autre procédure de chargement a été définie spécifiquement de façon à assurer le chargement, sans prendre le risque de perturber l'acquisition des données. C'est ainsi que nous avons opté pour un chargement progressif avec des blocs de bétons moins lourds et possible à transporter manuellement et en chaîne. Huit blocs de bétons, d'un volume de 10 x 60 x 100 cm<sup>3</sup> chacun pesant près de 1,28 kN coffrage compris, ont été réalisés dans la halle de l'atelier. Pour atteindre la charge de 10 kN par binôme de poutres, nous avons utilisé des blocs de bordures de voirie (mises à disposition par l'entreprise Sud Béton) dont le poids moyen est de 0,4 kN.

#### Fixation des plots et des supports de capteur

Les plots en béton ainsi que les supports de capteur ont été fixés au sol au moyen de mortier de ciment. A l'extérieur, les capteurs ainsi que les plots sont espacés de 1,0 m afin d'assurer de meilleures conditions de manutention, **Figure II.3.5**. A l'intérieur, nous avons également optimisé l'espacement afin d'assurer le bon déroulement du chargement.





a. Coffrage et coulage des blocs b. Fixation des plots et supports de capteurs c. Vue d'ensemble

### Figure II.3.5. Phases préparatoires

#### Préparation du bois

Après identification des poutres par essence, nous avons procédé à l'ajustement des dimensions retenues pour l'expérimentation : 8 cm de largeur, 18 cm de hauteur pour 320 cm de longueur. Ne disposant pas d'une étuve pouvant contenir des sections transversales entières pour l'ensemble des poutres, des prélèvements (échantillons cubiques  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ ) ont été réalisés à cœur et en surface pour la détermination de la teneur en eau.

Pour assurer la pose du chargement sur les poutres, des pièces en bois d'Ozigo de 1,0 m de long et de section  $50 \times 100 \text{ mm}^2$  ont été usinées. Ces pièces de bois ont subi un traitement de surface par badigeonnage au xylophène afin de les protéger des attaques d'insectes et de champignons.

#### Pose des poutres et fixation des capteurs

Les poutres ont été posées sur les plots de béton intercalés des pièces cylindriques, elles-mêmes surmontées d'une plaque d'acier qui minimise le poinçonnement localisé par la répartition de l'effort sur une surface de contact plus importante. Deux traverses d'Ozigo sont placées au tiers de la portée par rapport aux appuis pour chaque binôme de poutres, **Figure II.3.6a**.

Les capteurs de déplacement, fixés sur les supports aménagés à cet effet, sont placés à mi-portée en face inférieure des poutres. Un capteur thermo-hygrométrique a été placé dans chaque environnement. Les capteurs des sites extérieurs sont reliés à la centrale d'acquisition de 20 entrées située à l'intérieur de l'atelier. Ceux placés à l'intérieur sont reliés à la centrale de 10 entrées située à l'intérieur de la pièce climatisée.



*a. Ambiance extérieure*

*b. Ambiance intérieure*

**Figure II.3.6.** Pose des poutres et fixation des capteurs

Démarrage de l'acquisition et mise en charge

L'acquisition des mesures a démarré respectivement pour l'extérieur et l'intérieur le jeudi 28 mai 2009 à 12h58mn et à 18h58mn. Cela correspond, en termes de saison, à la fin de la petite saison des pluies qui précède la grande saison sèche.

Le chargement des poutres extérieures a été réalisé grâce à un camion porte charge loué par l'entreprise Sud-Béton, **Figure II.3.7.** La seule difficulté a été de pouvoir poser soigneusement les blocs sans engendrer des effets dynamiques entraînant ainsi une accélération inopinée de la flèche. Un décalage de 5 à 10 minutes a été enregistré entre chaque chargement.



*a. Chargement en cours*

*b. Vue d'ensemble après chargement*

**Figure II.3.7.** Pose du chargement extérieur



Dans la pièce climatisée, le chargement a été opéré à la main. Une chaîne humaine, composée de 14 personnes disposées par paire de part et d'autre des traverses, a permis ce chargement, **Figure II.3.8**. Un décalage de 30 à 40 minutes a été enregistré entre chaque chargement.



*a. Disposition*

*b. Vue d'ensemble*

**Figure II.3.8.** Pose du chargement intérieur

#### Pose de la couverture et de la clôture

La structure porteuse et la couverture ont été réalisées quelques jours après le démarrage effectif de l'expérimentation. Seule une partie du site extérieur a été couverte. L'expérimentation ayant démarré en début de la grande saison sèche, nous n'avons déploré aucune intempérie avant la pose de la couverture. Les façades sont exposées au vent laissant ainsi qu'une simple protection à la pluie, **Figure II.3.9**. Une clôture en grille a été réalisée pour circonscrire le site.



*a. Ambiance extérieure abritée*

*b. Vue d'ensemble*

**Figure II.3.9.** Pose de la couverture et de la clôture en extérieur

### II.3.5. Résultats expérimentaux et analyses

Nous présentons, outre les teneurs en eau initiale des poutres mises en œuvre, les résultats climatiques et réponses structurales obtenues pour les trois ambiances. Dans chaque cas, une première analyse est également déclinée. Les résultats présentés s'étendent du 28 mai 2009 au 10 août 2011 : soit plus de 26 mois après le démarrage des essais. Les enregistrements réalisés comportent quelques vides de données dus principalement aux pannes d'électricité récurrentes (malgré la grande autonomie des batteries des centrales d'acquisition) et la disponibilité des techniciens chargés de la maintenance et d'assurer le relevé hebdomadaire des données. Aujourd'hui, les acquisitions sont toujours opérantes.

#### II.3.5.1. Teneur en eau initiale des poutres

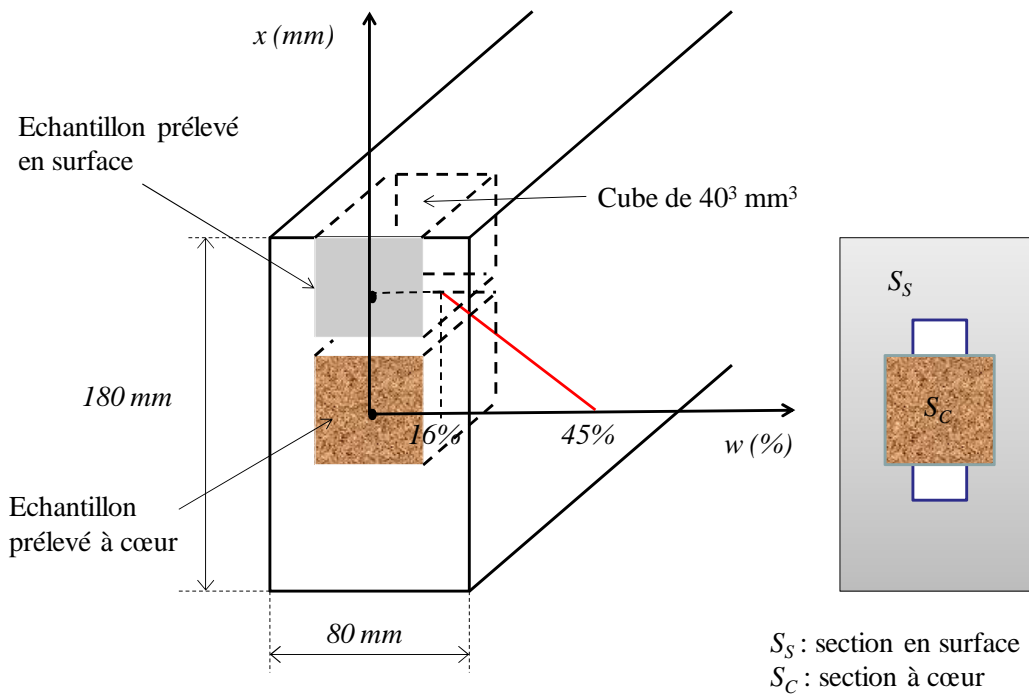
Les échantillons prélevés sur les poutres ont permis de déterminer la teneur en eau à cœur et en surface. Les essais ainsi que le calcul des teneurs en eau se sont faits conformément à la norme NF EN 408 éditée par l'AFNOR [AFN 09]. L'expression (I.1.1) permet de calculer les teneurs en eau à cœur et en surface, **Tableau II.3.2 et II.3.3**. La teneur en eau estimée est déterminée en considérant une relation linéaire (II.3.1) entre le taux à cœur et en surface.

$$w_{\text{estimée}} = \frac{w_c \times S_c + w_s \times S_s}{S} \quad (\text{II.3.1})$$

$w_c$  et  $w_s$  représentent la teneur en eau moyenne respectivement à cœur et en surface ;  $S_c$  et  $S_s$  représentent les sections respectivement à cœur et en surface ;  $S$  est la section de la poutre considérée.

En moyenne, les poutres de Moabi et d'Ozigo ont été mises en œuvre à une teneur en eau respective de  $18\% \pm 1,7$  et de  $20\% \pm 3,7$ . Les poutres sont, dans l'ensemble, très humides et vont donc sécher sous charge.

Nous noterons qu'il s'agit d'humidité moyenne pondérée des sections à cœur et en surface, **Figure III.3.10**. De plus, les poutres étant sollicitées en flexion, l'état hydrique des fibres externes ont une importance « inertielle » beaucoup plus importante que le cœur à proximité de l'axe neutre.



**Figure II.3.10.** Evolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) dans la pièce

**Tableau II.3.2.** Estimation de la teneur en eau des poutres de Moabi pour les trois ambiances

Ambiance	Code Poutre	Teneur en eau (en %)		
		à cœur	en surface	Estimée
Intérieure Climatisée	MIC1	48,9	16,8	20,4
	MIC2	44,1	16,3	19,4
	MIC3	43,5	14,7	17,9
	MIC4	44,1	11,8	15,4
	<b>Moyenne</b>	<b>45,1</b>	<b>14,9</b>	<b>18,3</b>
Extérieure Abrisée	MEA1	34,1	13,2	15,5
	MEA2	47,6	12,8	16,7
	MEA3	41,7	15,9	18,8
	MEA4	48,8	14,7	18,5
	<b>Moyenne</b>	<b>43,1</b>	<b>14,2</b>	<b>17,4</b>
Extérieure Non-Abrisée	MENA1	40,4	16,5	19,2
	MENA2	58,8	14,8	19,7
	MENA3	43,2	14,7	17,9
	MENA4	39,5	13,1	16,0
	<b>Moyenne</b>	<b>45,5</b>	<b>14,8</b>	<b>18,2</b>

**Tableau II.3.3.** Estimation de la teneur en eau des poutres d'Ozigo pour les trois ambiances

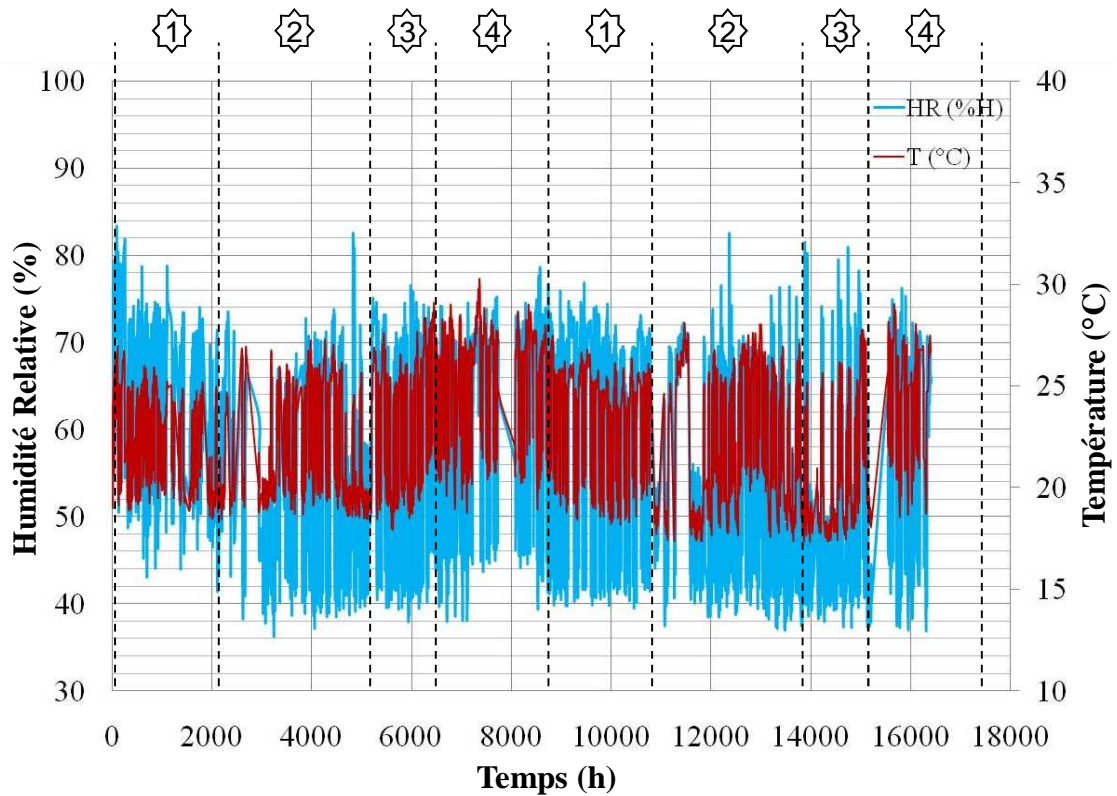
Ambiance	Code Poutre	Teneur en eau (en %)		
		à cœur	en surface	Estimée
Intérieure Climatisée	OIC1	41,4	15,2	18,1
	OIC2	72,7	16,8	23,0
	OIC3	84,6	21,2	28,2
	OIC4	72,4	12,8	19,4
	<b>Moyenne</b>	<b>67,8</b>	<b>16,5</b>	<b>22,2</b>
Extérieure Abrisée	OEA1	55,2	15,1	19,6
	OEA2	66,7	15,0	20,7
	OEA3	61,3	10,7	16,3
	OEA4	50,0	10,3	14,7
	<b>Moyenne</b>	<b>58,3</b>	<b>12,8</b>	<b>17,8</b>
Extérieure Non-Abrisée	OENA1	53,1	19,6	23,3
	OENA2	70,0	17,4	23,2
	OENA3	59,5	12,3	17,5
	OENA4	71,4	15,1	21,4
	<b>Moyenne</b>	<b>63,5</b>	<b>16,1</b>	<b>21,4</b>

### II.3.5.2. Ambiance intérieure climatisée

Les conditions imposées à cet environnement sont celles d'un bâtiment à usage de bureaux fonctionnant normalement : en matinée de 8h à 12h et en après-midi de 14h à 18h, du lundi au vendredi. Pendant les jours ouvrés, les bureaux sont en général climatisés toute la journée. La climatisation est arrêtée à la fermeture des bureaux, c'est-à-dire à 18h et pendant les périodes de congés. Dans le cas d'une habitation individuelle, les climatiseurs sont très peu utilisés la journée pour deux raisons fondamentales : l'économie d'énergie (on va préférer ouvrir les volets pour aérer la maison ou l'appartement) et la non présence des occupants (à l'école, au travail etc.). Dans ce cas de figure, le climatiseur sera plutôt utilisé la nuit en période de forte chaleur et d'humidité. Le premier cas de figure semble plus contraignant en termes de variation d'humidité relative dans les locaux : d'où notre choix. Le réglage de la température du split est de 18 à 20°C pour une humidité relative de 65% en moyenne.

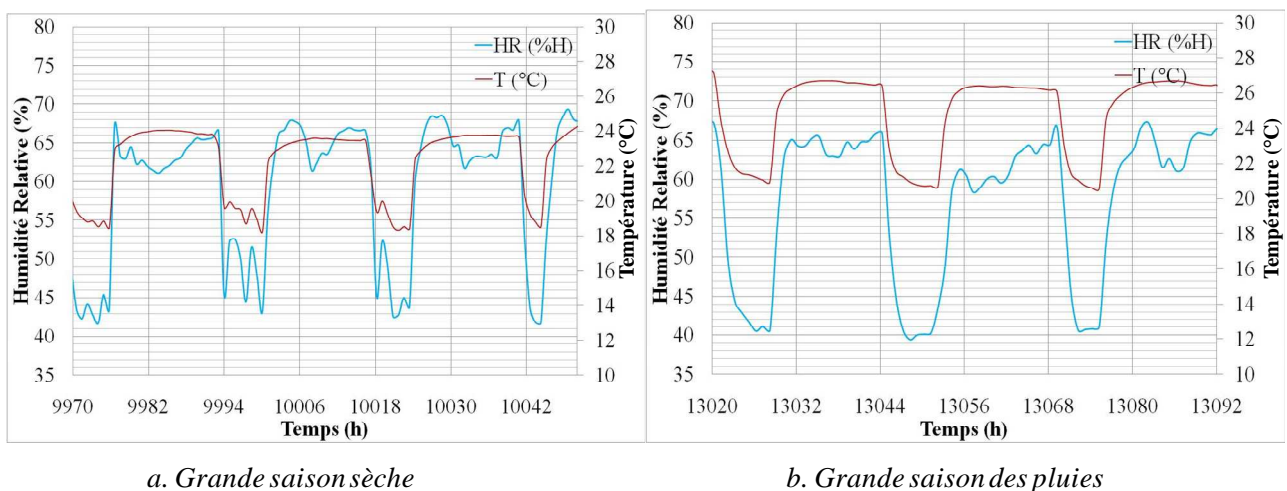
#### II.3.5.2.1 Evolution des conditions climatiques

Le capteur thermo-hygrométrique placé dans la pièce a permis l'enregistrement en continue des paramètres climatiques. La **Figure II.3.11** présente l'évolution de l'humidité relative et de la température en fonction du temps.



**Figure II.3.11.** Evolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) dans la pièce climatisée. Les chiffres 1 à 4 désignent respectivement les différentes saisons : grande saison sèche, grande saison de pluies, petite saison sèche et petite saison de pluies.

L'analyse des mesures laisse apparaître, à première vue, une bonne répétabilité des paramètres climatiques par rapport aux différentes saisons. Un zoom, **Figure II.3.12**, en zone 1 (grande saison sèche) et en zone 2 (grande saison des pluies) montre non seulement une nette variation des paramètres climatiques entre le jour et la nuit mais également une nette différence des amplitudes entre les différentes saisons.



**Figure II.3.12.** Evolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) sur 3 jours



L'étude statistique des données climatiques, synthétisée dans le **Tableau II.3.3**, montre une variation de température peu significative (entre 20 et 26°C) et une humidité relative qui ne dépasse les 65% que très rarement sur la période d'étude.

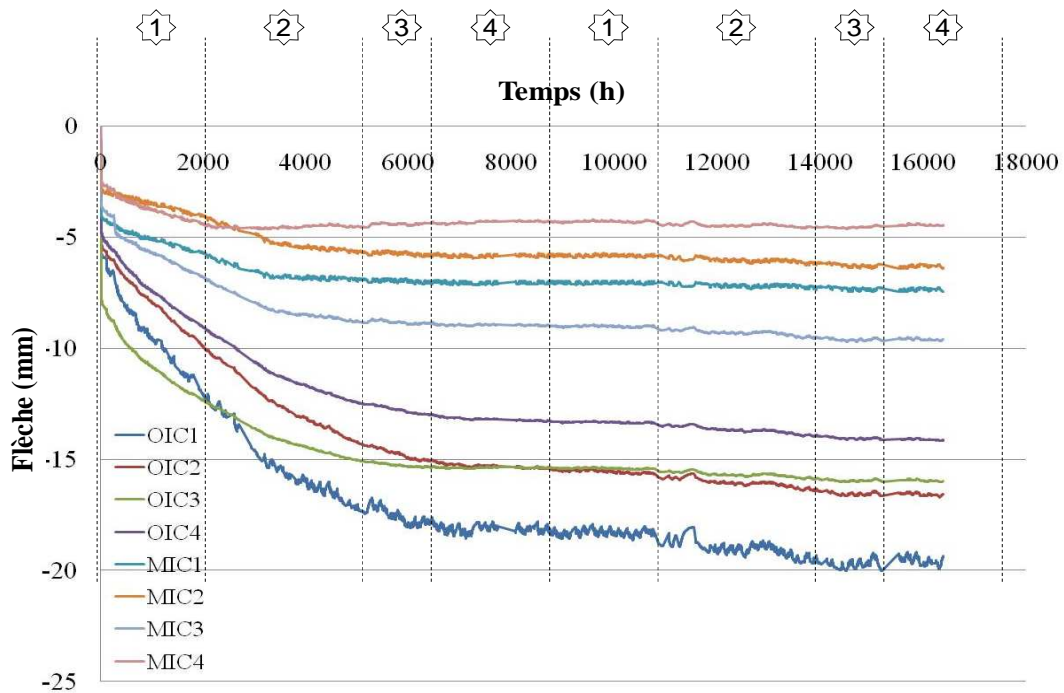
**Tableau II.3.3.** Synthèse statistique des données climatiques issues des enregistrements

Grandeurs	HR (%)	T (°C)
Valeur Maxi	83,1	30,3
Valeur Mini	36,2	17,3
Valeur Moyenne	58,7	23,3
Ecart type	11,4	3,2
Médiane	62,7	24,3
Mode	68,8	25,2

Comme le montre les données statistiques, une certaine similitude peut être faite entre la classe 1 de l'Eurocode 5 et l'ambiance intérieure climatisée. Cela reste cependant à confirmer par des essais de sorption afin d'en déterminer les équilibres hydriques des poutres correspondant à ces valeurs moyennes.

*II.3.5.2.2 Evolution des flèches brutes et moyennes*

Quatre poutres de Moabi et quatre poutres d'Ozigo ont été exposées à l'ambiance intérieure climatisée. La **Figure II.3.13** montre l'évolution générale des flèches en fonctions du temps. L'évolution par binôme de poutres et par essence est donnée en annexes A.

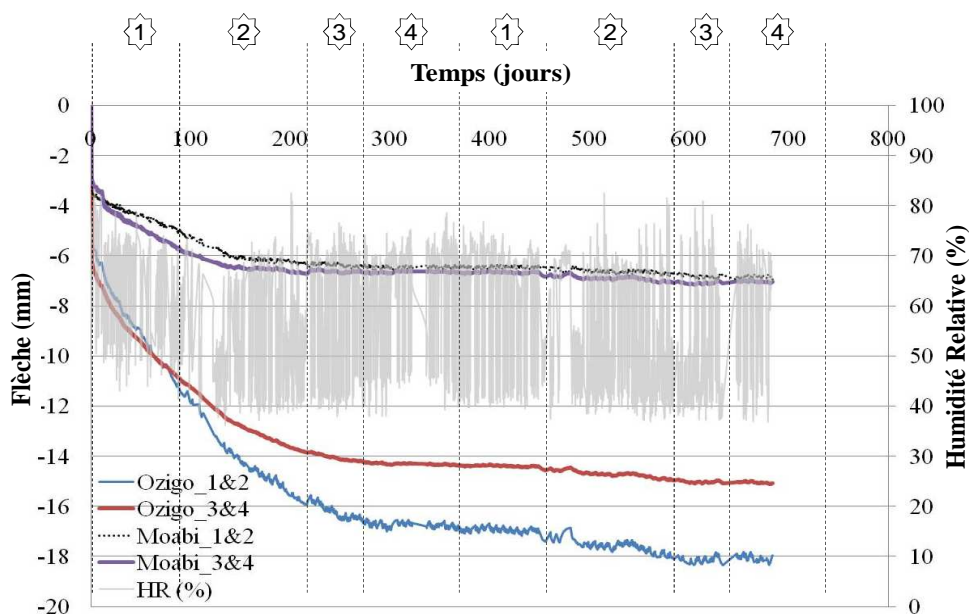


**Figure II.3.13.** Evolution des flèches brutes des poutres d'Ozigo (OIC) et de Moabi (MIC)

Pour la suite, l'analyse et le calcul des paramètres mécaniques (modules, coefficient de fluage) seront faits sur les valeurs moyennes compte tenu de l'éventuelle dissymétrie engendrée par le choix du système de chargement (jumelage). Ainsi, celles-ci sont obtenues en faisant la moyenne arithmétique des flèches de chaque couple. La **Figure II.3.14** présente l'ensemble des déflexions obtenues, et ce, couplées à la variation d'humidité relative dans la pièce.

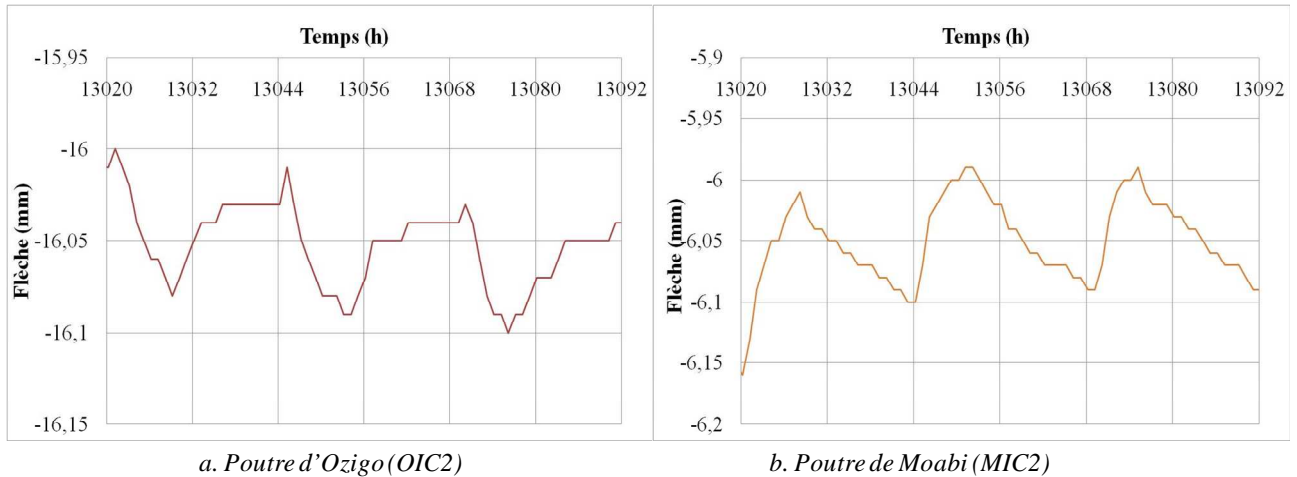
L'analyse des mesures permet de souligner les points suivants :

- On peut remarquer une nette différence de la réponse structurale des deux essences. En effet, les flèches instantanées et différées sont plus importantes pour l'Ozigo par rapport au Moabi ; ce qui est normal au regard de la différence de rigidité des deux essences.
- Les courbes, dans l'ensemble, ont une allure identique : flèche instantanée, fluage accéléré puis stabilisation.
- On note également une nette influence des saisons malgré les faibles échanges avec le milieu extérieur. En effet, il apparaît, à la fin de la première année (environ 8600 h), un début de stabilisation du fluage, puis une réactivation, de très faible amplitude, du fluage à l'entame de la seconde grande saison de pluies (à environ 11000 h).
- La poutre d'Ozigo OIC1 semble plus sensible que les autres poutres aux variations climatiques. Cette poutre présente un début d'attaque aux champignons, à une de ces extrémités, au bout de deux ans. Ceci pourrait laisser présager la présence de bois d'aubier peu distinct du bois parfait, pour cette essence sensible aux attaques biologiques (classe 5 selon le CIRAD [CIR 11]).



**Figure II.3.14.** Evolution des flèches moyennes couplées à la variation de l'humidité relative

Malgré la grande inertie des poutres, on note, comme l'ont déjà constaté Ayina et al [AYI 98b], une nette sensibilité des poutres aux variations journalières d'humidité relative. Pour les mêmes périodes d'observation (de 13020 h à 13092 h), **Figure II.3.15**, le bois de Moabi affiche une amplitude plus importante ( $10/100^{\text{ème}}$  de mm) que l'Ozigo ( $7/100^{\text{ème}}$  de mm) avec un décalage temporelle de 5 à 6 h entre les poutres OIC2 et MIC2.



**Figure II.3.15.** Influence des variations journalières de l'humidité relative sur les flèches

S'appuyant sur les conclusions de la section I.2 du chapitre I et eu égard à la quasi répétabilité des amplitudes, les oscillations journalières sont certainement liées au retrait-gonflement longitudinal bloqué par les conditions aux appuis (frottement empêchant le glissement aux appuis). Compte tenu de l'inertie importante des poutres, seules les fibres externes sont sujettes au phénomène de retrait-gonflement. Ces fibres jouent cependant un rôle prédominant dans une configuration de flexion ou de retrait-gonflement axial.

### II.3.5.2.3 Détermination des modules instantanées

Pour chaque poutre, nous avons déterminé le module élastique à partir de l'équation (I.3.10). Le **Tableau II.3.4** présente l'ensemble des résultats obtenus, et ce, pour chaque échantillon et pour chaque jumelage (surligné en jaune).

**Tableau II.3.4.** Valeurs des modules élastiques obtenues à partir des flèches instantanées

Essences	OZIGO						MOABI					
	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Code poutre	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Flèche (mm)	5,72	5,28	5,50	7,72	4,68	6,20	3,99	2,76	3,38	3,51	2,42	2,97
Module (GPa)	9,58	10,37	9,97	7,09	11,7	9,40	13,7	19,85	16,8	15,6	22,6	19,1
Module Moyen	<b>9,69 GPa</b>						<b>18,0 GPa</b>					



Il importe de rappeler que ces valeurs de module sont obtenues pour des humidités internes largement supérieures à 12% (valeur de référence). Un ajustement à 12% est effectué en utilisant les recommandations de la norme NF EN 338 [AFN 09], **Tableau II.3.5**. Pour les poutres ayant une teneur en eau supérieure à 18%, l’ajustement se fait à partir d’une teneur en eau égale à 18% et non de leur teneur en eau réelle, et ce, via l’équation suivante :

$$E_{12\%} = E_w \times [1 - (12 - w) \times 2\%] \tag{II.3.1}$$

**Tableau II.3.5.** Valeurs des modules élastiques (moyens sur la section) ajustées à 12%

Essences	OZIGO						MOABI					
	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Code poutre	18	18	18	18	18	18	18	18	18	17,9	15,4	16,6
Teneur en eau (%)	18	18	18	18	18	18	18	18	18	17,9	15,4	16,6
Module (GPa)	10,7	11,6	11,2	7,95	13,1	10,5	15,4	22,2	18,8	17,4	24,2	20,9
Module Moyen	<b>10,8 GPa</b>						<b>19,8 GPa</b>					

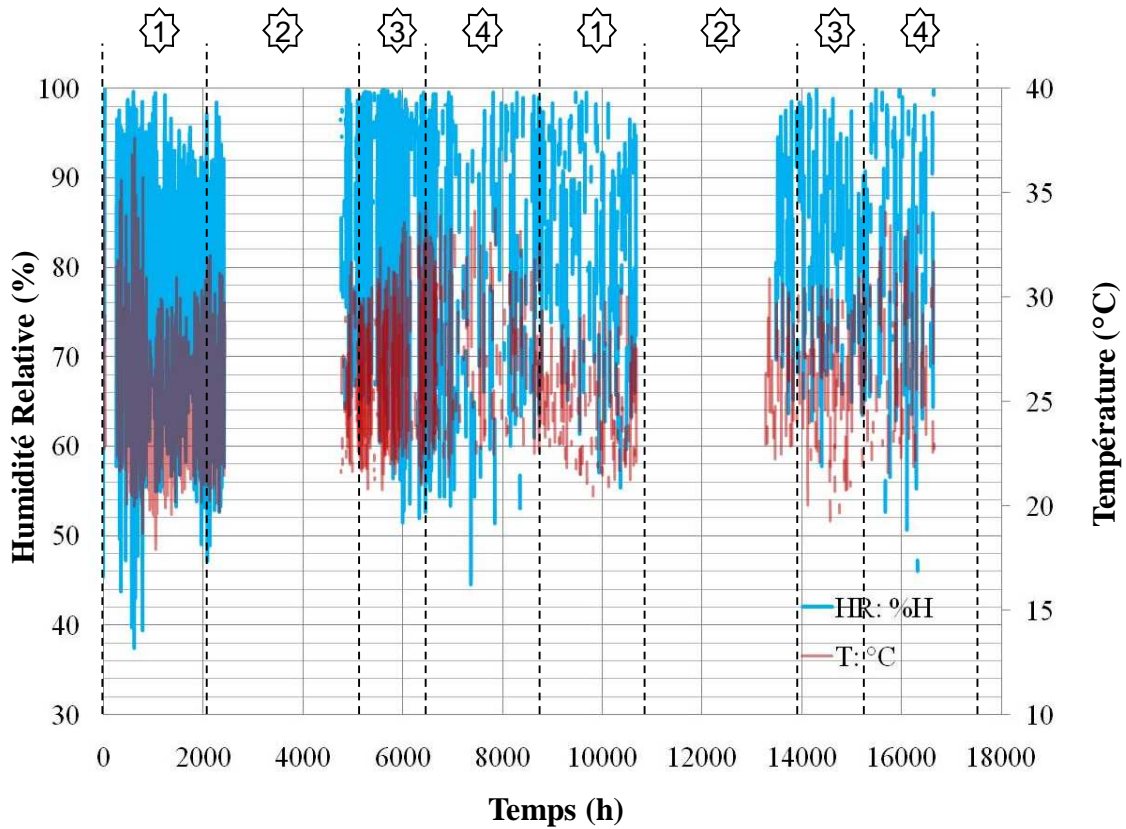
Ces valeurs sont très proches de celles présentées dans la bibliographie [CIR 11] [PRO 08] [GER 98]. D’éventuels écarts peuvent s’expliquer par la taille des échantillons et surtout la variabilité naturelle des espèces notamment liée à la situation géographique de la zone de récolte du bois.

*II.3.5.3. Ambiance extérieure abritée*

Les conditions environnementales correspondent à celles d’un bâtiment à l’abri des intempéries. Les structures sont à l’abri des pluies et de l’action directe du soleil. Elles subissent toutefois l’action du vent, de la température ambiante et de l’humidité relative de l’air.

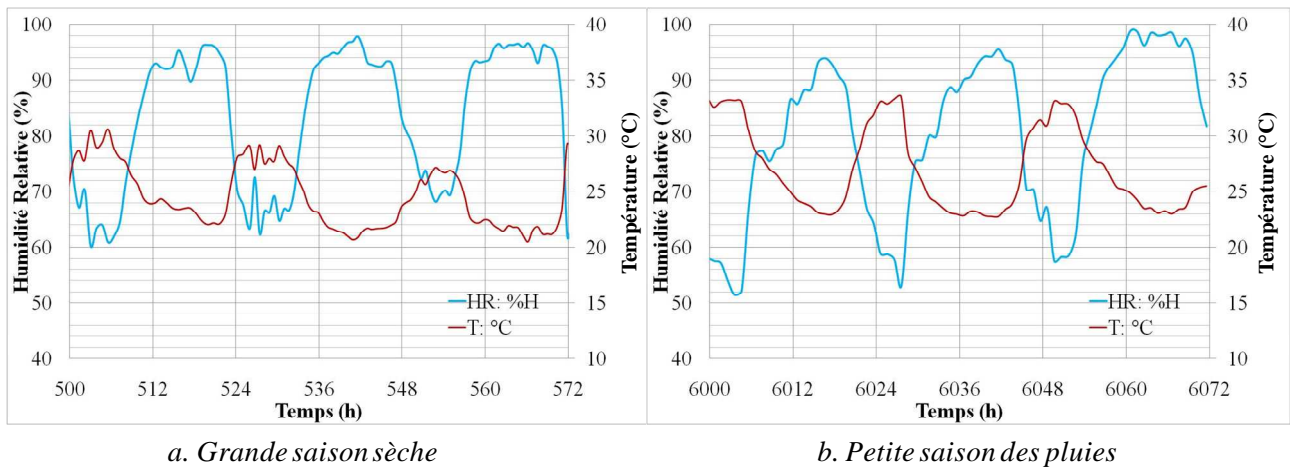
*II.3.5.3.1 Evolution des conditions climatiques*

Le capteur thermo-hygrométrique placé sous cette ambiance a connu un certain nombre de disfonctionnements qui n’ont pas permis l’enregistrement en continue des paramètres climatiques. Toutefois, la **Figure II.3.16** présente l’évolution de l’humidité relative et de la température en fonction du temps, et ce, avec quelques blancs.



**Figure II.3.16.** Evolution de l’humidité relative (RH) et de la température (T) en extérieur abrité.

Un zoom, **Figure II.3.17**, en zone 1 (grande saison sèche) et en zone 2 (grande saison de pluies) montre non seulement une nette variation des paramètres climatiques entre le jour et la nuit mais également une nette évolution des amplitudes entre les différentes saisons. En grande saison sèche, nous avons les températures les plus basses (17,9°C) donc un climat moins chaud mais plus humide. Comme le montre également cette figure, l’évolution journalière de l’humidité est inversement proportionnelle à l’évolution de la température. Les forts taux d’humidité sont enregistrés la nuit et les jours sont marqués par des températures élevées (opposition de phase).



**Figure II.3.17.** Evolution de l’humidité relative (RH) et de la température (T) sur 3 jours

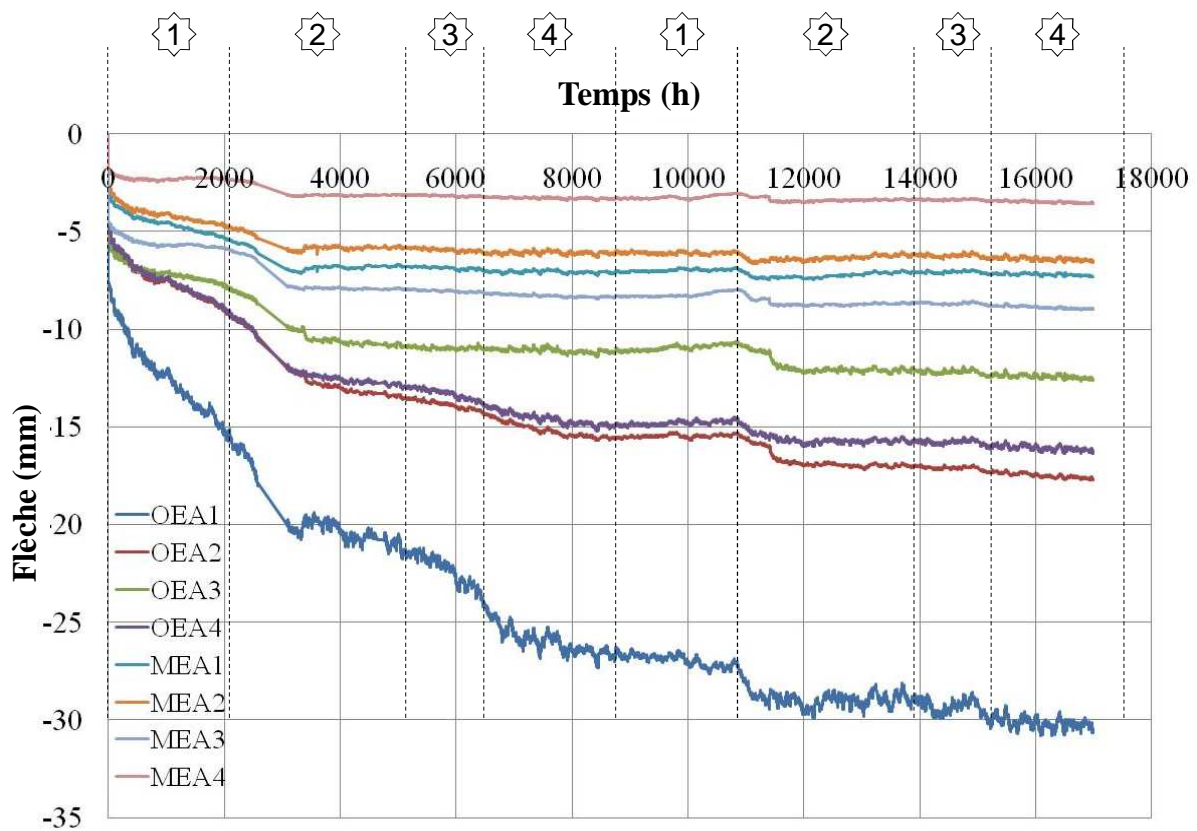
Dans l'ensemble, les températures varient peu (entre 22 et 28°C) et l'humidité relative oscille entre 68 et 93% avec une moyenne de 81%, **Tableau II.3.6.**

**Tableau II.3.6.** Synthèse statistique des données climatiques en ambiance extérieure abritée

Grandeurs	HR (%)	T (°C)
Valeur Maxi	100	37,6
Valeur Mini	37,6	17,9
Valeur Moyenne	80,8	25,3
Ecart type	12,6	3,2
Médiane	83,4	24,5
Mode	86,4	22,1

II.3.5.3.2 Evolution des flèches brutes et moyennes

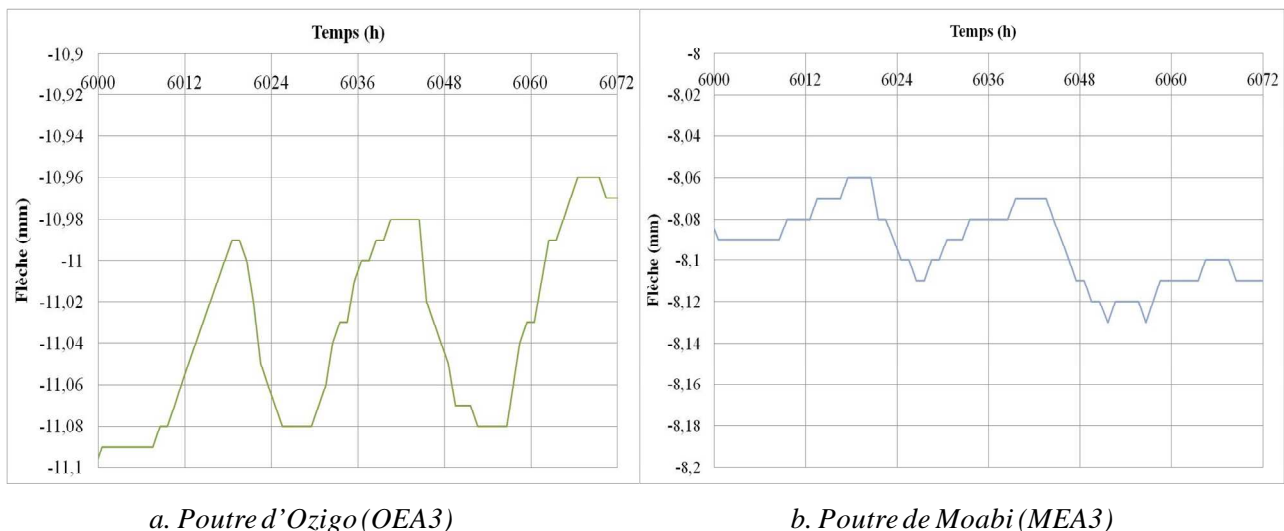
Comme pour l'ambiance intérieure climatisée, quatre poutres de Moabi et quatre poutres d'Ozigo ont été exposées à une ambiance extérieure abritée. La **Figure II.3.18** présente l'évolution des flèches en fonctions du temps.



**Figure II.3.18.** Evolution des flèches brutes des poutres d'Ozigo (OIC) et de Moabi (MIC) en extérieur abrité

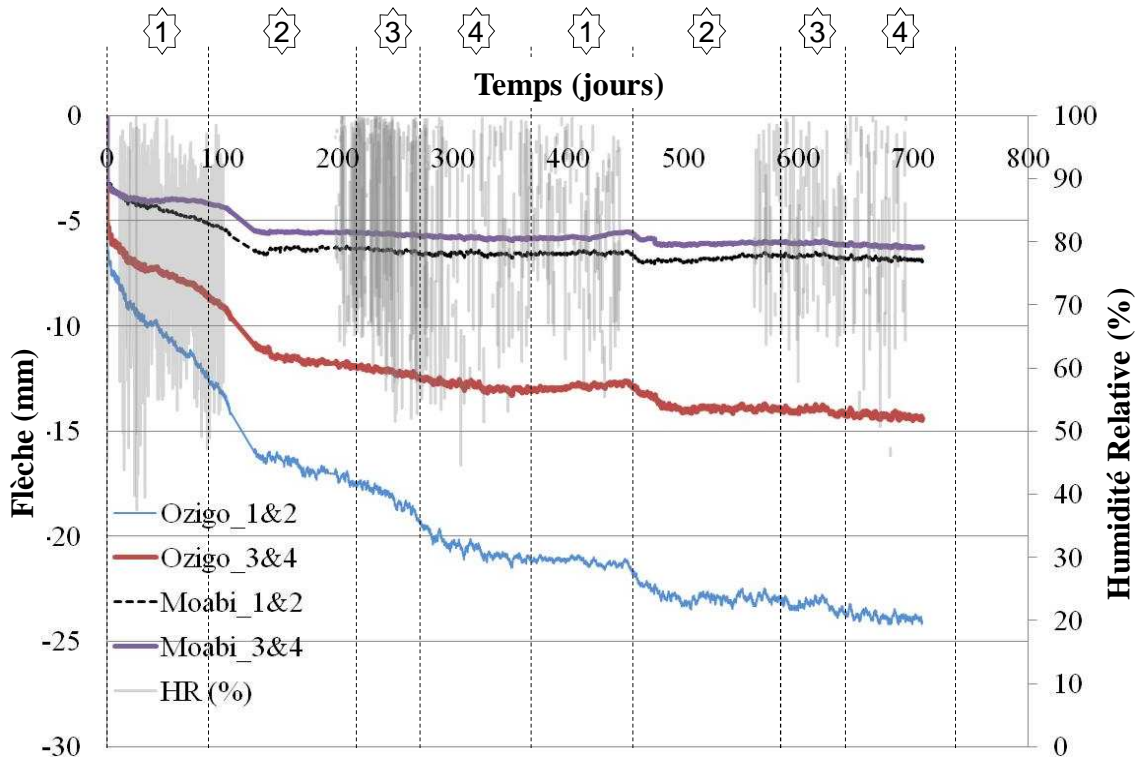
L'analyse des courbes expérimentales pour cette ambiance fait ressortir les points suivants :

- On remarque une nette différence de la réponse structurale entre les deux essences avec un écart assez particulier pour la poutre OEA1 qui se distingue du groupe.
- On note également une nette influence des saisons marquée par un début de stabilisation du fluage à la fin de la première année (8600 h). Un net blocage de l'évolution de la flèche est perceptible, entre 8000 et 10000 heures pour l'ensemble des poutres.
- A l'entame de la seconde grande saison de pluies (à environ 1100h), on constate une réactivation du fluage avec une faible amplitude, observation que nous mettons sur le compte d'une augmentation du seuil hydrique jamais atteint auparavant.
- La poutre d'Ozigo OEA1 est plus sensible que les autres poutres aux variations climatiques. Cette poutre présente les mêmes caractéristiques que la poutre OIC1. De plus, son module élastique est très faible comparativement à ceux des autres poutres d'Ozigo, **Tableau II.3.7** ; ce qui pourrait également laisser présager de la présence d'aubier. Ainsi, la poutre OEA1 peut être jugée non représentative du comportement « normal » de l'échantillonnage d'Ozigo.
- Les poutres sont sensibles aux variations journalières d'humidité relative, **Figure II.3.19.**, plus importante la nuit que le jour.



**Figure II.3.19.** Influence des variations journalières de l'humidité relative sur les flèches

De la **Figure II.3.18**, nous déduisons les courbes moyennes des flèches par binôme de poutres, **Figure II.3.20**. Les courbes laissent clairement apparaître que seule la grande saison de pluies réactive le fluage mécano-sorptif (entre 80 et 200 jours ; et entre 450 et 600 jours).



**Figure II.3.20.** Evolution des flèches moyennes couplées à la variation de l'humidité relative

*II.3.5.3.3 Détermination des modules instantanées*

Pour chaque poutre, nous avons, comme précédemment, déterminé le module élastique à partir de l'équation (I.3.10). Le **Tableau II.3.7** présente l'ensemble des résultats obtenus. L'ajustement des valeurs de modules, **Tableau II.3.8**, est également obtenu en utilisant l'expression (II.3.1).

**Tableau II.3.7.** Valeurs des modules élastiques obtenues à partir des flèches instantanées

Essences	OZIGO						MOABI					
	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Code poutre	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Flèche (mm)	7,31	4,65	5,98	4,88	4,27	4,57	2,97	2,60	2,78	4,42	1,73	3,08
Module (GPa)	7,50	11,8	9,64	11,2	12,8	12,0	18,5	21,0	19,7	12,4	31,6	22,0
Module Moyen	<b>10,8 GPa</b>						<b>20,9 GPa</b>					

**Tableau II.3.8.** Valeurs des modules élastiques (moyens sur la section) ajustées à 12%

Essences	OZIGO						MOABI					
	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Code poutre	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Teneur en eau (%)	18	18	18	16,3	14,7	15,5	15,5	16,70	16,10	18	18	18
Module (GPa)	8,40	13,2	10,8	12,2	13,5	12,9	19,8	23,0	21,4	13,9	35,4	24,6
Module Moyen	<b>11,8 GPa</b>						<b>23,0 GPa</b>					



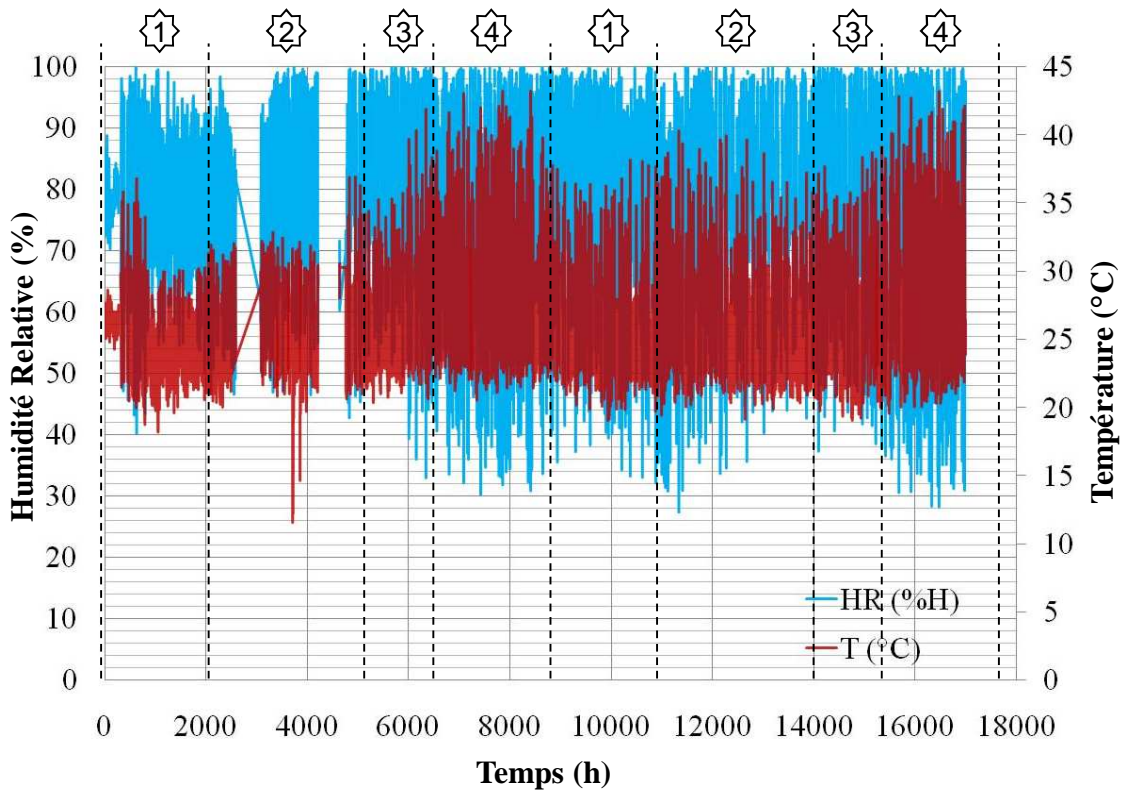
On retrouve des valeurs proches de celles des poutres en ambiance climatisée. L'écart très prononcé entre les modules élastiques des poutres de Moabi MEA3 (13,9 GPa) et MEA4 (35,4 GPa) est certainement dû à une dissymétrie du chargement.

*II.3.5.4. Ambiance extérieure non-abritée*

Dans cette ambiance, les poutres sont exposées aux intempéries à l'image des poutres de ponts ou de débarcadères (classe 3 de l'Eurocode 5).

*II.3.5.4.1 Evolution des conditions climatiques*

Le capteur thermo-hygométrique, fixé sur un poteau au milieu des poutres à 1,0 m du sol, a permis l'enregistrement en continue des paramètres climatiques malgré quelques sauts constatés dont les causes sont imputables aux orages pendant les saisons des pluies. La **Figure II.3.21** présente l'évolution de l'humidité relative et de la température en fonction du temps.

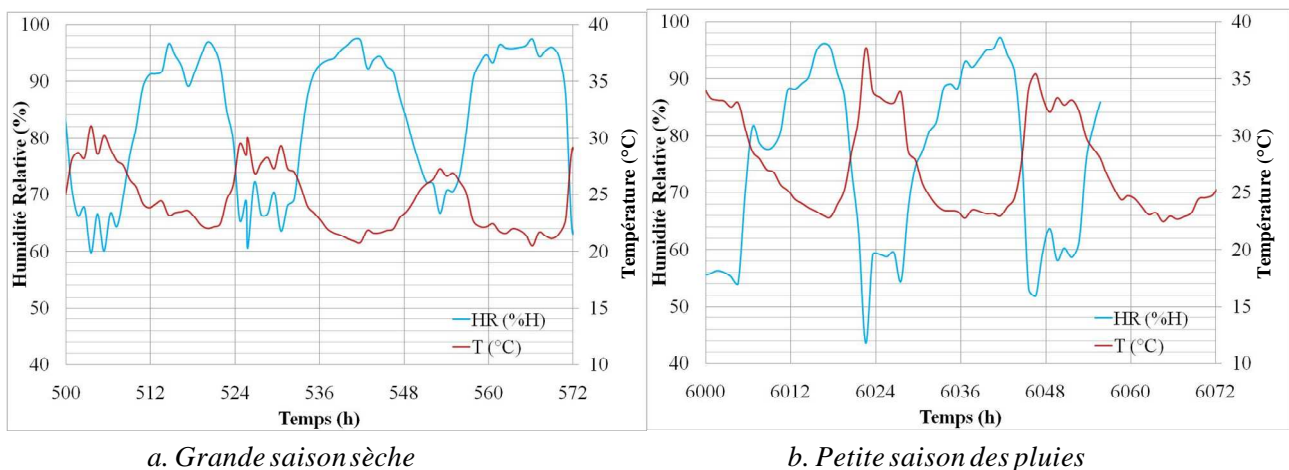


**Figure II.3.21.** Evolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) en ambiance extérieure non-abritée

L'analyse des courbes laisse apparaître les points suivants :

- Il y a une assez bonne répétabilité des paramètres climatiques par rapport aux différentes saisons.

- Les petites saisons des pluies (4) enregistrent les températures les plus élevées (en moyenne 27°C) avec des pics à 43°C, **Tableau II.3.8**. Comme l'indique les données de la Direction de la Météorologie Nationale (Gabon) [DMN 10], la petite saison de pluies (février à mai) est la plus chaude de l'année.
- Les saisons sèches, notamment la grande (1), sont marquées par des températures moyennes moins importantes (23 à 24°C) et enregistrent les températures les plus basses de l'année (grande saison sèche avec 11°C), **Tableau II.3.8**.
- L'humidité relative est en général très élevée (en moyenne 78%) avec des amplitudes variant selon les saisons, **Figure II.3.22**, et des pics atteignant 100% en période d'orage, **Tableau II.3.8**.
- Un zoom en zone 1 (grande saison sèche) et en zone 3 (petite saison de pluies), **Figure II.3.22**, montrent, non seulement, une nette variation des paramètres climatiques entre le jour et la nuit, mais également, une nette évolution des amplitudes entre les différentes saisons. En effet, les amplitudes sont plus importantes durant les saisons des pluies qu'en saisons sèches. On remarque également que les nuits sont plus humides que les jours, les températures évoluant inversement.



**Figure II.3.22.** Evolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) sur 3 jours

L'étude statistique des données climatiques, synthétisée dans le **Tableau II.3.9**, montre que nous sommes en présence d'un climat chaud et humide marqué par de faibles écarts de température (entre 24 et 30°C) et une humidité relative moyenne autour de 78 % dans l'année.

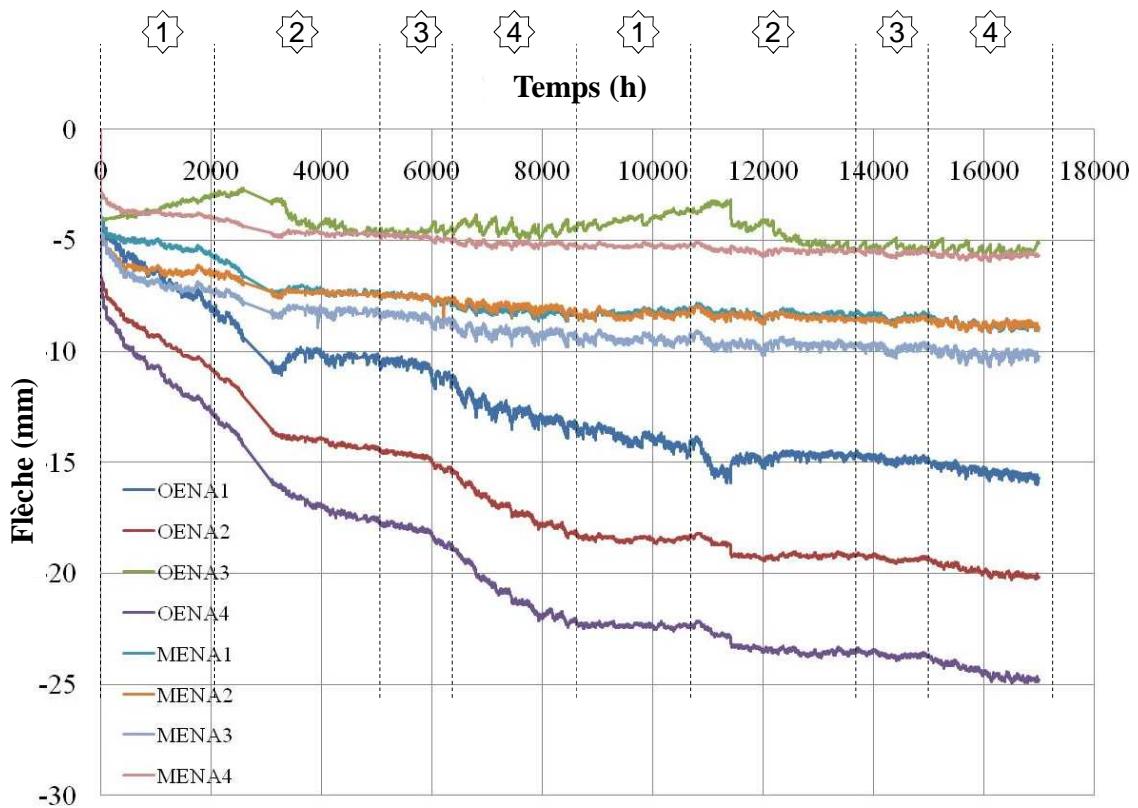
**Tableau II.3.9.** Synthèse statistique des données climatiques issues des enregistrements

Grandeurs	HR (%)	T (°C)
Valeur Maxi	100	43,2
Valeur Mini	27,4	11,9
Valeur Moyenne	78	26
Ecart type	15,1	3,8
Médiane	80	25
Mode	76	27

Une certaine similitude peut être faite entre les deux ambiances extérieures. En effet, les températures moyennes sont quasiment identiques même si l’ambiance extérieure abritée semble plus humide. Toutefois, les écarts étant peu significatifs, on peut prédire des équilibres hydriques moyens équivalents par essence pour les deux ambiances.

*II.3.5.4.2 Evolution des flèches brutes et moyennes*

Quatre poutres de Moabi et quatre poutres d’Ozigo ont été exposées à l’ambiance extérieure non-abritée. La **Figure II.3.23** montre l’évolution des flèches enregistrées en fonctions du temps.

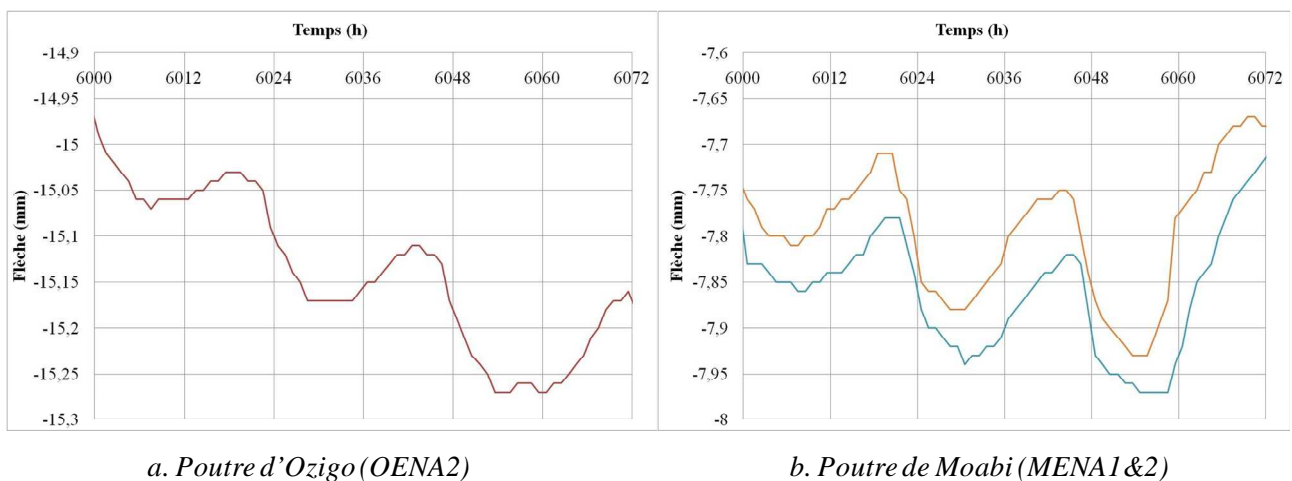


**Figure II.3.23.** Evolution des flèches brutes des poutres d’Ozigo (OIC) et de Moabi (MIC) en extérieur non-abrité



De l'analyse des déflexions expérimentales, il en découle les points suivants :

- La réponse structurale entre les deux essences est distincte à l'exception de la poutre OENA3.
- A l'exception de la poutre OENA3, les courbes, dans l'ensemble, ont une allure identique. En effet, l'allure de l'OENA3 est plutôt à l'opposé de celle de son binôme OENA4. Ici, le dispositif de chargement semble dissymétrique provoquant ainsi un déséquilibre de la charge de la poutre OENA3 vers la poutre OENA4. On assiste donc à une augmentation du chargement de la poutre OEN4 au détriment de la poutre OENA3.
- L'influence des saisons est très marquée. En effet, les saisons des pluies (grande saison (2) et petite saison (4)) sont caractérisées par une réactivation du fluage avec des amplitudes qui se réduisent au fil des années. A l'exception de la première grande saison sèche qui correspond à la période de chargement, les saisons sèches (grande saison (1) et petite saison (3)) sont marquées par une stabilisation du fluage. Pendant cette période, les poutres sèchent entraînant ainsi un blocage du fluage mécano-sorptif.
- Dans l'ensemble, les poutres sont sensibles aux variations journalières d'humidité relative, **Figure II.3.24**. La réponse structurale à ces variations journalières est différée d'environ 12 à 13 heures en moyenne.



**Figure II.3.24.** Influence des variations journalières de l'humidité relative sur les flèches

De la **Figure II.3.23**, on déduit les courbes des valeurs moyennes par binôme, **Figure II.3.25**. Dans l'ensemble, les poutres de Moabi ont un comportement plus homogène que les poutres d'Ozigo.

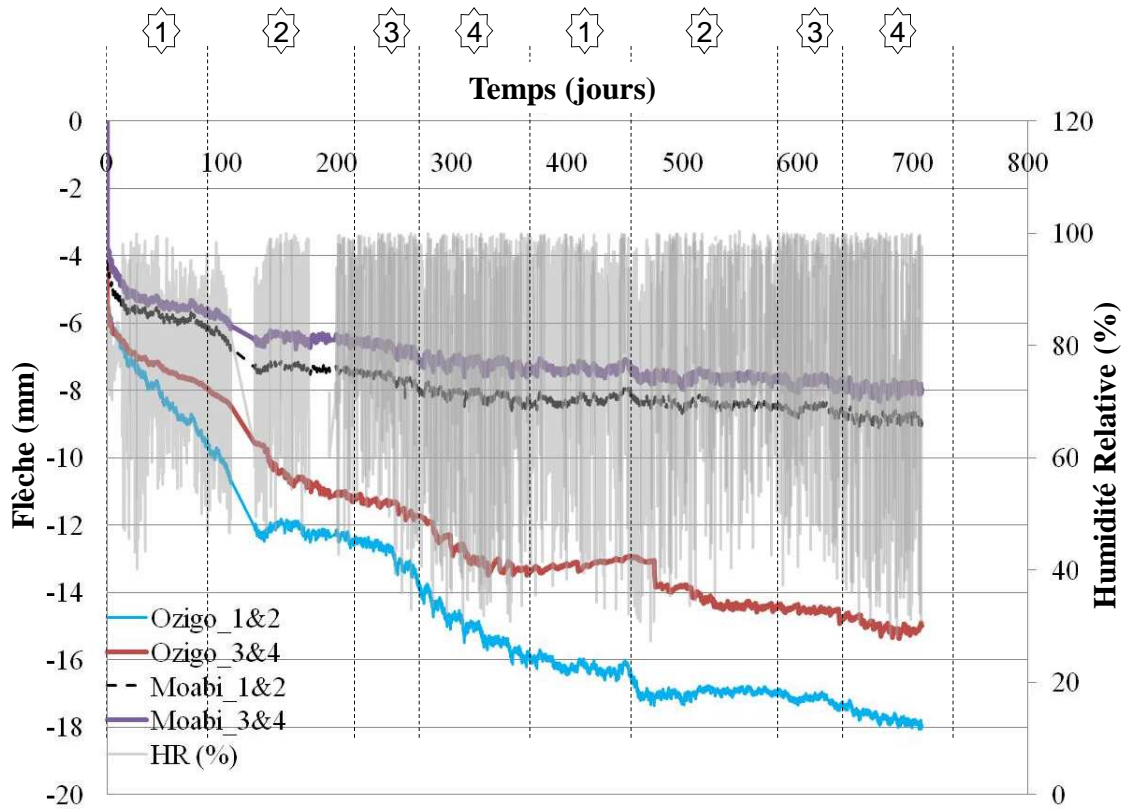


Figure II.3.25. Evolution des flèches moyennes couplées à la variation de l'humidité relative

II.3.5.4.3 Détermination des modules instantanées

Pour chaque poutre, nous avons déterminé le module élastique à partir de l'équation (I.3.10). Le **Tableau II.3.10** présente l'ensemble des résultats obtenus. Un ajustement à 12% est effectué en utilisant les recommandations de la norme NF EN 338 [AFN 09] selon l'expression (II.3.1).

Tableau II.3.10. Valeurs des modules élastiques obtenues à partir des flèches instantanées

Essences	OZIGO						MOABI					
	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Code poutre	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Flèche (mm)	4,14	6,43	5,29	3,9	6,76	5,33	4,21	4,70	4,46	4,77	2,77	3,77
Module (GPa)	13,2	8,52	10,9	14,0	8,10	11,1	13,0	11,6	12,3	11,5	19,8	15,6
Module Moyen	<b>11,0 GPa</b>						<b>14,0 GPa</b>					

Tableau II.3.11. Valeurs des modules élastiques (moyens sur la section) ajustées à 12%

Essences	OZIGO						MOABI					
	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Code poutre	1	2	1&2	3	4	3&4	1	2	1&2	3	4	3&4
Teneur en eau (%)	18	18	18	17,5	18	17,7	18	18	18	17,9	16,0	16,9
Module (GPa)	14,8	9,5	12,2	15,6	9,07	12,3	14,6	13,0	13,8	12,8	21,4	17,2
Module Moyen	<b>12,3 GPa</b>						<b>15,5 GPa</b>					

### II.3.6. Rapport à l'Eurocode 5

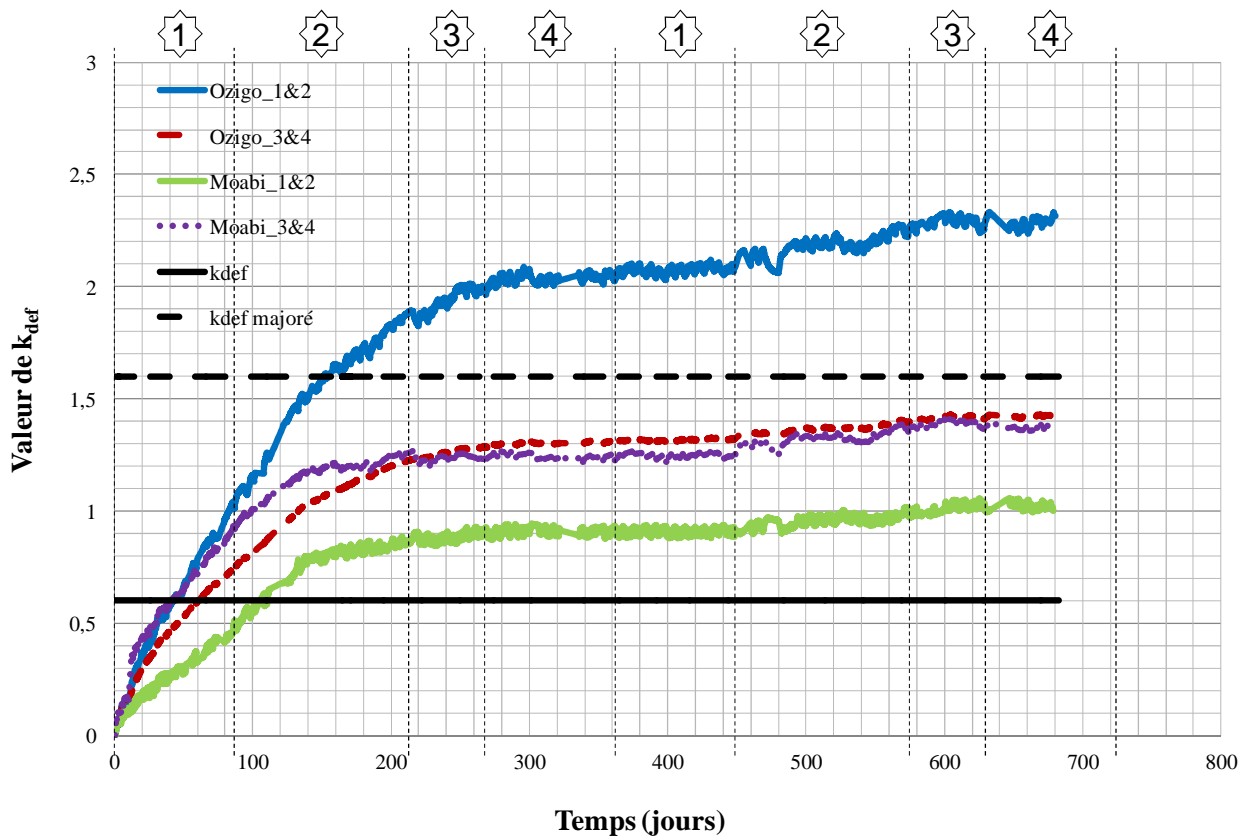
Nous limitons notre approche aux évolutions de flèches via la définition du coefficient  $k_{def}$ . Son expression est obtenue par la relation (II.3.2). Les **Figures II.3.26 à II.3.28** superposent les évolutions de  $k_{def}$  mesurées aux valeurs de références proposées par l'Eurocode 5. Sa détermination expérimentale repose sur la formulation suivante :

$$k_{def}(t) = \frac{u(t)}{u_{inst}} - 1 \quad \text{avec} \quad u(t) = u_{inst} + \Delta u_{diff} \quad (II.3.2)$$

$u(t)$  est la flèche finale,  $u_{inst}$  la flèche instantanée et  $\Delta u_{diff}$  la variation de la flèche différée.

#### II.3.6.1. Ambiance intérieure climatisée

De la **Figure II.3.14**, nous déduisons les courbes de  $k_{def}$  pour l'ambiance intérieure climatisée.



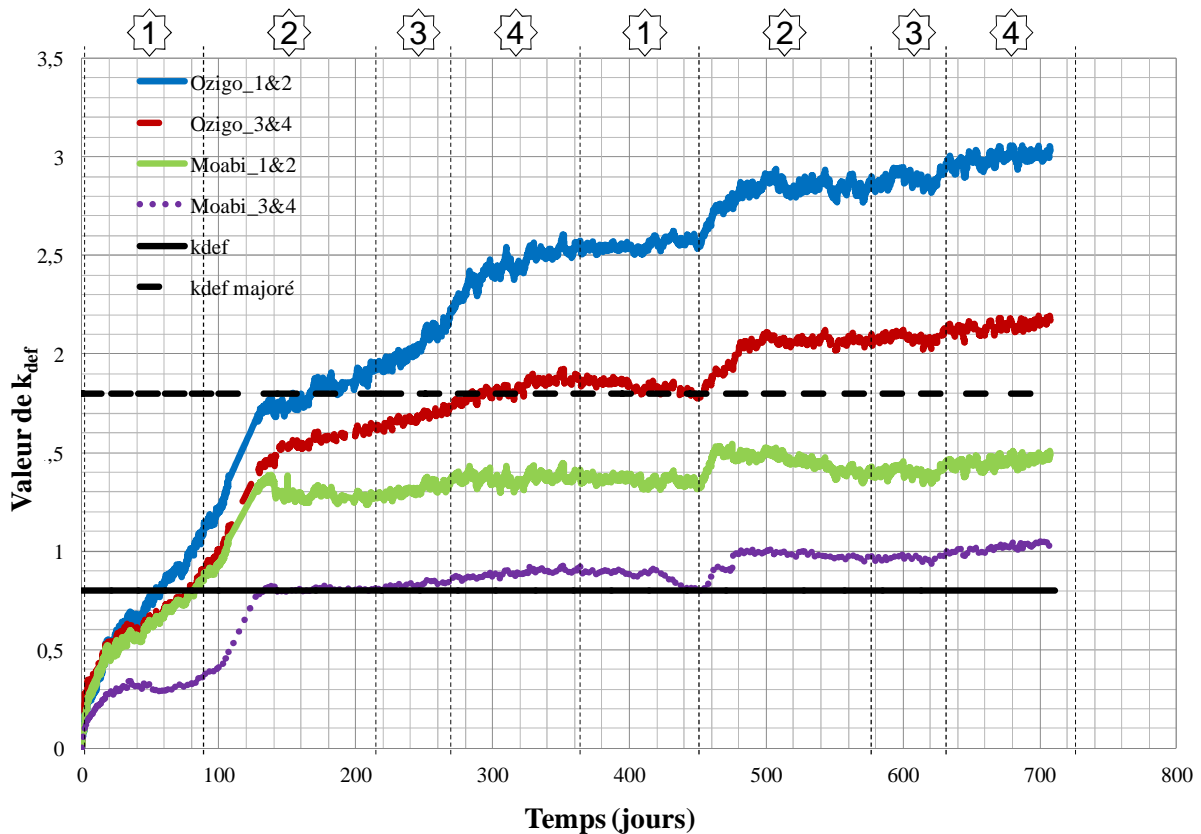
**Figure II.3.26.** Comparaison des évolutions des coefficients de fluage en fonction du temps

Comme le montre l'évolution des coefficients  $k_{def}$ , la valeur proposée par l'Eurocode 5 en classe de service 1 (à savoir 0,6) est largement sous-estimée par les mesures expérimentales, et ce, dès 120 jours pour l'ensemble des poutres. Toutefois, eu égard à la forte humidité interne initiale des poutres, l'Eurocode 5 recommande de majorer d'une unité la valeur de  $k_{def}$ . Outre la paire Ozigo

1&2, la valeur ajustée de  $k_{def}$  pour la classe 1 semble convenir tout en présageant un possible dépassement des valeurs expérimentales avant 10 ans. La comparaison des valeurs de  $k_{def}$  en classe de service 1 aux valeurs obtenues en ambiance climatisée montre, en plus de la correspondance affichée en termes de température et d'humidité relative, une possible similitude (à quelques ajustements près), à confirmer avec une analyse des états hydriques des essences étudiées.

### II.3.6.2. Ambiance extérieure abritée

De la **Figure II.3.20**, nous déduisons les courbes de  $k_{def}$  pour l'ambiance extérieure abritée.

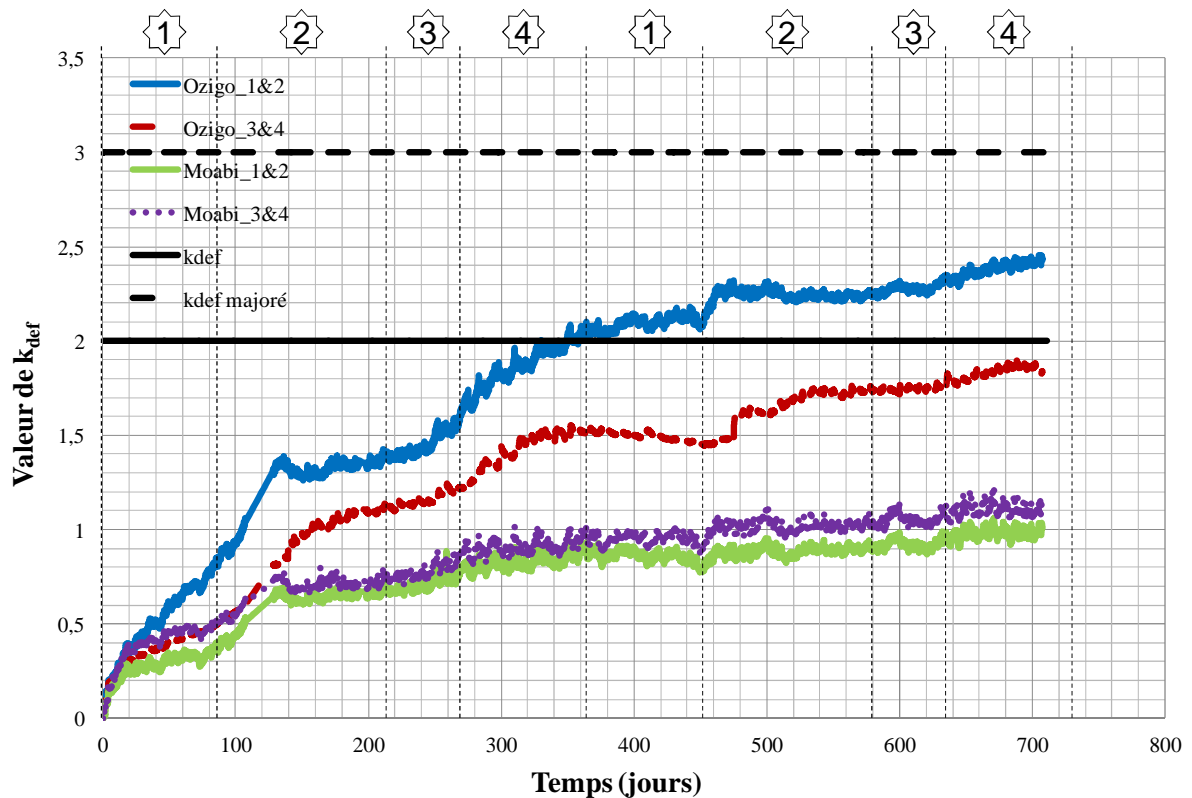


**Figure II.3.27.** Comparaison des évolutions des coefficients de fluage en fonction du temps

La valeur proposée par l'Eurocode 5 pour la classe de service 2 (à savoir 0,8) est également dépassée au bout de 80 jours pour l'ensemble des poutres à l'exception du couple Moabi\_3&4 (valeur atteinte au bout de 120 jours). En prenant en compte une majoration de  $k_{def}$ , suite à la forte teneur en eau initiale des poutres, seules les valeurs expérimentales des poutres de Moabi semblent convenir. De cette analyse, il ressort que cette ambiance ne saurait correspondre à la classe de service 2 de l'Eurocode 5. Les coefficients proposés demandent donc à être réévalués.

### II.3.6.3. Ambiance extérieure non-abritée

De la **Figure II.3.25**, nous déduisons les courbes de  $k_{def}$  pour l'ambiance extérieure non-abritée.



**Figure II.3.28.** Comparaison des évolutions des coefficients de fluage en fonction du temps

De l'analyse des courbes, il ressort le constat suivant :

- La valeur de  $k_{def}$  (EC5) semble sécuritaire vis-à-vis des valeurs expérimentales obtenues pour les poutres de Moabi.
- Les coefficients de fluage des poutres d'Ozigo sont largement au dessus de la valeur proposée par l'Eurocode 5. Toutefois, celle-ci reste sécuritaire si l'on tient compte de l'ajustement préconisé pour les poutres très humides (humidité proche de la saturation).
- Dans l'ensemble, les valeurs expérimentales de  $k_{def}$  obtenues pour cette ambiance sont moins importantes que celles obtenues dans les deux précédentes ambiances.

En somme, malgré la sensible correspondance, la valeur  $k_{def}$  (EC5) pour la classe 3 demande à être réévaluée pour des poutres de bois tropicaux évoluant en extérieur et soumises aux intempéries.

## II.4. Conclusion

Dans cette partie, nous avons examiné l'approche réglementaire de l'Eurocode 5 pour le calcul des propriétés de résistance et des déformations. La prise en compte des paramètres influençant le comportement mécanique des éléments de structures en bois se fait par le biais de deux coefficients  $k_{mod}$  et  $k_{def}$ . Si cette approche est plutôt globalisante parce que non explicite sur la part de chaque paramètre d'influence (retrait-gonflement, mécano-sorption etc.) sur la déformée finale, par exemple, elle reste cependant sécuritaire pour les essences tempérées en environnement tempéré.

Les travaux expérimentaux présentés dans ce chapitre sont toujours en cours d'acquisition et d'analyse. Les premiers résultats (deux ans d'acquisition), montrent la réelle nécessité d'adapter les classes de service proposées par Eurocode 5 au contexte de la construction bois en ambiance tropicale. Nous avons identifié trois classes de service à travers les données climatiques.

Les écarts entre les observations expérimentales et les données Eurocode 5 sont à mettre sur le compte d'un climat différent avec des pics hydriques plus marqués induisant plus de séquences mécano-sorptives que dans les régions tempérées européennes. Cependant, et pour relativiser nos conclusions, la réponse différée des éléments de structures, si elle dépend de l'environnement climatique, doit intégrer le comportement mécanique des essences testées en termes de comportement au fluage, d'une part, mais également en terme de diffusion hydrique définissant les gradients d'humidité dans le matériau. A l'échelle du matériau, des éléments de réponse à ces remarques sont présentés dans le troisième chapitre.

# CHAPITRE III. CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU TRANSFERT HYDRIQUE

<b>III.1. Etude bibliographique .....</b>	<b>100</b>
III.1.1. L'eau dans le bois .....	100
III.1.1.1. Les différentes formes d'eau présentes dans le bois .....	100
III.1.1.2. Point de saturation des fibres .....	101
III.1.1.3. Etat hydrique du bois .....	101
III.1.1.4. Les méthodes de mesure .....	102
III.1.2. Hygroscopie du bois.....	102
III.1.2.1. Les phénomènes d'adsorption et de désorption .....	103
III.1.2.2. Equilibre hygroscopique .....	105
III.1.2.3. Modèles mathématiques et thermodynamique des isothermes de sorption .....	105
III.1.2.3.1 Modèles B.E.T. et G.A.B. ....	106
III.1.2.3.2 Modèle Dent.....	106
III.1.2.3.3 Modèles de Hailwood-Horrobin [HAI 46].....	107
III.1.2.3.4 Théorie d'Anderson-Mc Carthy et modèles dérivés.....	107
III.1.2.3.5 Modèle thermodynamique de Merakeb [MER 06].....	108
III.1.3. Diffusion hydrique dans le bois .....	110
III.1.3.1. Définition .....	110
III.1.3.2. Échanges convectifs.....	111
III.1.3.3. Détermination expérimentale des coefficients de diffusion.....	112
III.1.3.3.1 Régime permanent .....	113
III.1.3.3.2 Régime transitoire .....	114
III.1.3.3.3 Autres méthodes expérimentales .....	114
<b>III.2. Caractérisation expérimentale des isothermes de sorption.....</b>	<b>115</b>
III.2.1. Expérimentation .....	115
III.2.1.1. Essences et géométrie des échantillons.....	115
III.2.1.2. Choix des sels, préparation des solutions salines et validation.....	116
III.2.1.3. Plan d'expérience .....	118
III.2.1.4. Protocole de mesure .....	118
III.2.2. Résultats expérimentaux .....	119

III.2.2.1. Sapin.....	120
III.2.2.2. Hêtre.....	120
III.2.2.3. Moabi .....	121
III.2.2.4. Ozigo.....	121
III.2.2.5. Observations.....	122
III.2.3. Simulation numérique et identification des paramètres .....	122
III.2.3.1. Sapin.....	123
III.2.3.2. Hêtre.....	124
III.2.3.3. Moabi .....	125
III.2.3.4. Ozigo.....	126
III.2.3.5. Récapitulatif.....	127
<b>III.3. Caractérisation expérimentale des cinétiques de diffusion .....</b>	<b>128</b>
III.3.1. Expérimentation .....	128
III.3.1.1. Essences, géométrie et échantillonnage .....	128
III.3.1.2. Dispositif expérimental .....	128
III.3.1.3. Plan d'expérience .....	129
III.3.1.4. Préparation des échantillons et protocole des mesures .....	130
III.3.2. Résultats expérimentaux .....	131
III.3.2.1. Teneur en eau d'équilibre .....	132
III.3.2.1.1 Sapin.....	132
III.3.2.1.2 Hêtre.....	133
III.3.2.1.3 Moabi .....	134
III.3.2.1.4 Ozigo.....	135
III.3.2.1.5 Observations.....	136
III.3.2.2. Cinétique de diffusion.....	136
III.3.2.2.1 Sapin.....	136
III.3.2.2.2 Hêtre.....	137
III.3.2.2.3 Moabi .....	137
III.3.2.2.4 Ozigo.....	138
III.3.2.2.5 Observations.....	138
III.3.3. Identification des paramètres de diffusion .....	138
III.3.3.1. Hypothèse de calcul .....	138
III.3.3.2. Direction longitudinale .....	140
III.3.3.2.1 Sapin.....	140



III.3.3.2.2	Hêtre.....	141
III.3.3.2.3	Moabi .....	142
III.3.3.2.4	Ozigo.....	143
III.3.3.3.	Direction transversale .....	144
III.3.3.3.1	Sapin.....	144
III.3.3.3.2	Hêtre.....	145
III.3.3.3.3	Moabi .....	146
III.3.3.3.4	Ozigo.....	147
III.3.3.4.	Synthèse .....	148
<b>III.4.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>150</b>

---

### III.1. Etude bibliographique

L'arbre sur pied ou fraîchement abattu contient une grande quantité d'eau sous plusieurs formes que nous développerons ci-dessous. Nous avons vu dans les chapitres précédents que les propriétés mécaniques varient fortement avec l'humidité interne du bois qui, elle-même, est dépendante des conditions climatiques environnementales. En effet, le bois peut se définir comme un biomatériau hygroscopique dont l'état hydrique dépend des conditions d'humidité et de température de l'environnement dans lequel il évolue [MER 06]. Ainsi, une meilleure connaissance de l'état hydrique et des processus de migration de l'eau dans le bois sous environnement variable apporte une bonne appréciation de l'évolution de ses caractéristiques mécaniques.

#### III.1.1. L'eau dans le bois

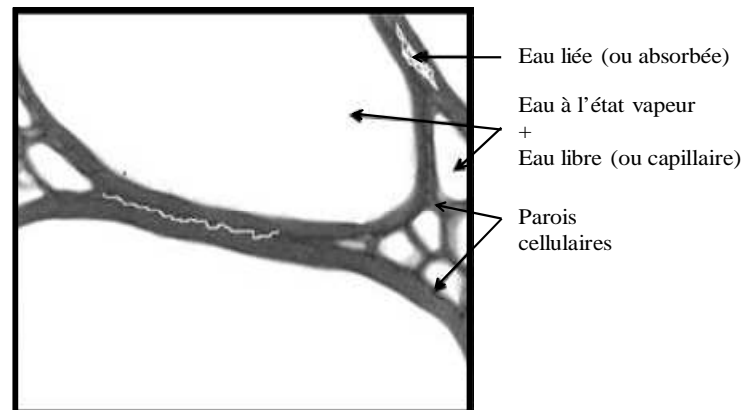
Le bois à l'état vert contient non seulement de la matière ligneuse mais également de l'eau indispensable à l'acheminement des sels minéraux qui participent à l'élaboration de la sève substance vitale à la croissance de l'arbre. La quantité d'eau contenue dans le bois dépend significativement des essences et du lieu de la récolte. Son taux d'humidité peut atteindre et même dépasser les 200% à l'exemple du peuplier [DUL 98].

##### III.1.1.1. Les différentes formes d'eau présentes dans le bois

L'eau est présente dans le bois sous quatre formes, **Figure III.1.1**, en fonction de l'état (liquide ou gazeux) et en fonction de l'énergie qui caractérise les liaisons moléculaires de l'eau et des parois cellulaires :

- **L'eau libre ou capillaire** : elle est à l'état liquide et remplit en tout ou parti les cavités cellulaires. Elle est soumise aux forces capillaires et de gravité qui sont responsables du transport respectivement de la sève brute et de la sève élaborée. Selon Perré [PER 94], de nombreuses propriétés du bois telles que les dimensions, la résistance mécanique etc., sont peu sensibles à la quantité d'eau capillaire.
- **L'eau liée ou adsorbée** : Cette eau est liée, par des liaisons hydrogènes (appelées encore liaisons de Van der Waals), aux molécules de celluloses et d'hémicelluloses des parois cellulaires. Elle a une grande influence sur les caractéristiques physiques (retrait-gonflement, variations dimensionnelles...) et mécaniques (résistance, rigidité) du bois. Le mouvement de l'eau liée s'effectue par diffusion et nécessite des échanges énergétiques (chaleur latente de vaporisation ou d'adsorption).

- **L'eau à l'état vapeur** : Elle se situe dans les cavités cellulaires et dans les micropores lorsqu'ils ne sont pas saturés en eau liée. En l'absence d'eau libre, la vapeur d'eau est en équilibre hygroscopique avec l'eau liée.
- **L'eau de constitution** : elle fait partie intégrante de la composition chimique des principales molécules constitutives du bois.



**Figure III.1.1.** Différentes formes d'eau présentes dans le bois en plus de l'eau de constitution présente dans la structure moléculaire

#### III.1.1.2. Point de saturation des fibres

Il correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée dont le départ lors du séchage engendre les phénomènes de retrait à l'origine des déformations et des variations dimensionnelles. A ce stade, il n'existe plus théoriquement d'eau libre dans le bois.

Le point de saturation des fibres (PSF) est un paramètre important pour la connaissance de l'essence, car il situe le seuil en deçà duquel les propriétés physico-mécaniques sont sensibles aux variations d'humidité dans le bois. Il dépend de plusieurs paramètres : température, masse volumique etc. Son taux d'humidité correspondant varie de 20% à 40% d'une espèce à une autre. En pratique, on prend une valeur d'humidité qui se situe aux environs de 30%.

#### III.1.1.3. Etat hydrique du bois

Pour déterminer l'état hydrique ou la quantité de l'eau dans un échantillon, trois variables différentes peuvent être utilisées :

- **La concentration  $c$**  : elle définit la quantité d'eau présente dans une unité de volume. Elle est très usitée dans l'étude des solutions aqueuses.

- **La teneur en eau  $w$**  : comme définit dans le premier chapitre, elle se rapporte à la quantité d'eau présente dans une unité de masse, soit anhydre (la teneur en eau est dite de base sèche), soit saturée (la teneur en eau est dite de base humide).
- **La saturation  $S$**  : elle se définit comme le taux de remplissage des volumes des vides. Cette variable est surtout utilisée pour l'étude des géomatériaux.

#### III.1.1.4. Les méthodes de mesure

Pour quantifier l'état hydrique du bois, il existe diverses méthodes expérimentales dont les principales sont :

- **La double pesée** : Elle consiste à déterminer la quantité d'eau d'un échantillon en effectuant une pesée avant et après étuvage à 103°C. Cette méthode normalisée est très simple et précise mais comporte trois inconvénients : elle est destructive ; elle ne peut pas s'appliquer sur des structures en service et elle ne peut s'appliquer que sur des petits échantillons (à l'échelle laboratoire). Enfin, elle ne permet qu'une mesure d'humidité moyenne. En pratique, le suivi de la teneur en eau d'un élément en bois se fait en procédant à des pesées régulières d'échantillons témoins placés dans le même environnement climatique.
- **Les méthodes électriques basées sur les propriétés électriques du bois** : ces méthodes ont été développées pour une utilisation in-situ et sont basées sur la résistivité électrique du bois qui varie en fonction de la teneur en eau. Ainsi, en connaissant la résistance électrique ou la conductivité du bois, on peut en déduire son taux d'humidité. Ces méthodes sont simples d'utilisation et non destructives. Toutefois, elles sont moins précises car elles nécessitent une calibration permettant de relier résistivité et teneur en eau. De plus, la relation résistivité-teneur en eau est une fonction exponentielle limitant ainsi la mesure pour des humidités inférieures à 10%.
- **La gammamétrie** : c'est une technique de mesure in-situ et non destructive pour la détermination de l'humidité d'un matériau en utilisant une source radioactive de rayons gamma. Cette méthode est également facile à mettre en œuvre mais difficile à exploiter.

### III.1.2. Hygroscopie du bois

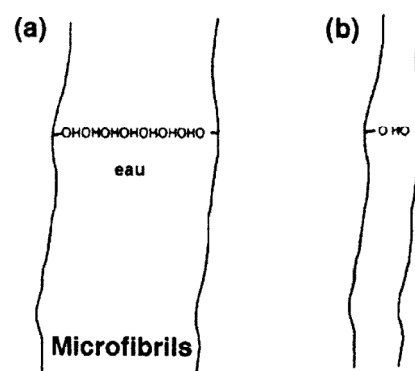
Par définition, le bois est un matériau hydrophile car il présente certaines affinités avec l'eau. En effet, un échantillon de bois mis dans des conditions climatiques bien définies (température et humidité) voit sa masse évoluer pour se stabiliser à une valeur d'équilibre. Il s'est donc produit entre

le milieu extérieur et la pièce de bois des phénomènes d'échanges d'humidité par des mécanismes dits de diffusion jusqu'à atteinte d'un équilibre dit « équilibre hygroscopique ».

### III.1.2.1. Les phénomènes d'adsorption et de désorption

Ces deux phénomènes régissent les mouvements de l'eau dans le bois et en conditionnent l'état d'équilibre finale.

L'adsorption est définie comme un phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides d'une matière adsorbante. Dans le cas de l'adsorption de l'eau par le bois, le phénomène se produit dans les zones amorphes et/ou sur les surfaces cristallines par la formation de ponts ou liaisons hydrogènes sur les groupes hydroxyles disponibles des chaînes polymériques du bois (cellulose, hémicellulose et lignine). La première couche d'eau adsorbée, qui se fait à basse humidité relative, est caractérisée par une forte énergie de liaison. A un niveau d'humidité plus élevé, les molécules d'eau adsorbées sont liées aux molécules d'eau déjà existantes formant ainsi des zones d'adsorption multicouches [BOU 03], **Figure III.1.2.**



**Figure III.1.2.** Molécules d'eau adsorbées suivant les liaisons : a) multicouches ; b) monocouche, [BOU 03]

A l'inverse, le phénomène de désorption est le phénomène par lequel les molécules adsorbées sur les fibres s'en détachent, notamment sous l'action de l'élévation de la température ou d'une baisse de pression.

Ainsi, en dessous de la limite dite de saturation des fibres (PSF), l'équilibre hydrique s'établit en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air ambiant. Cet état d'équilibre est décrit par des courbes expérimentales appelées isothermes de sorption qui expriment l'état hydrique d'équilibre du bois à partir des conditions hygrométriques ambiantes à température constante. Les courbes isothermes d'adsorption et de désorption ne coïncident pas, **Figure III.1.3** ; elles forment

une zone d'hystérésis vraisemblablement induite par une réhydratation incomplète des sites de sorption, [BOU 03].

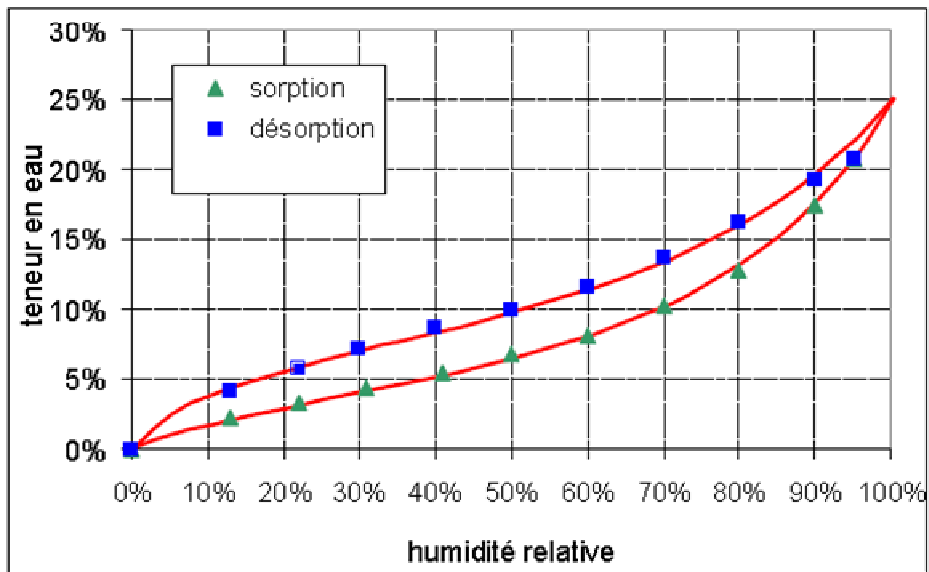


Figure III.1.3. Exemple de courbes de sorption, tiré de Merakeb [MER 06]

Les équilibres hygroscopiques sont fortement influencés par la température. En effet, les travaux de l'union suisse en faveur du bois [LIG 60], Figure III.1.4, montrent que la quantité d'eau adsorbée diminue lorsque la température augmente et ceci pour une même humidité relative.

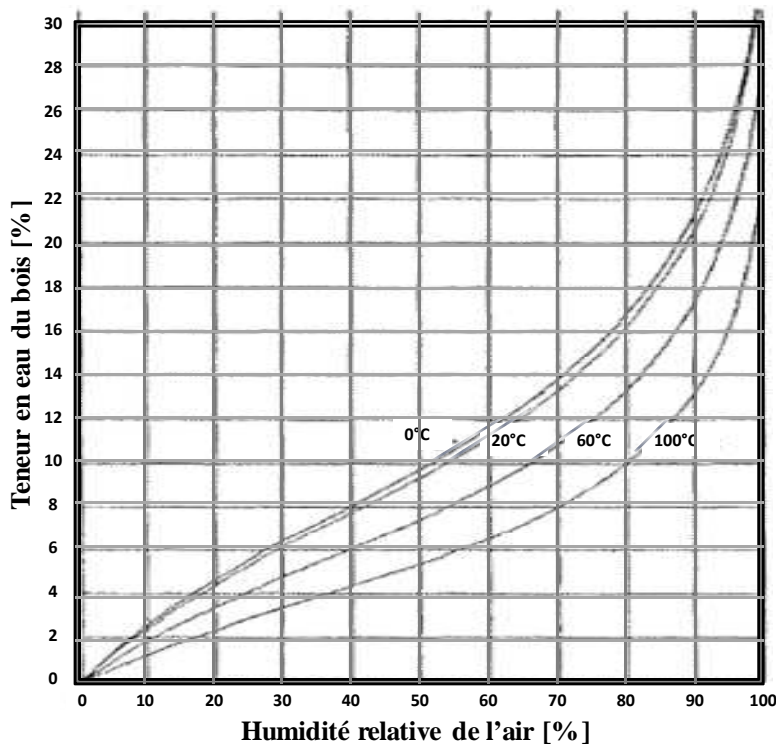
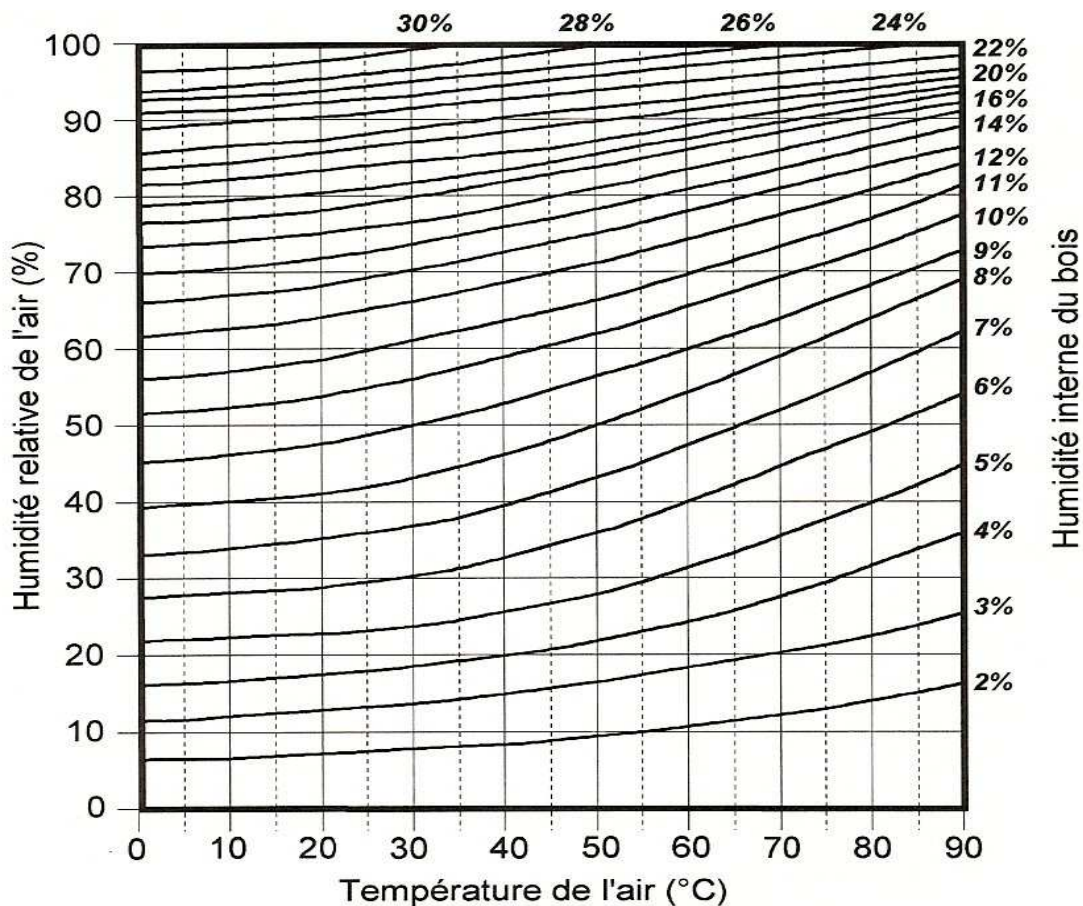


Figure III.1.4. Effet de la température sur l'équilibre hygroscopique de l'épicéa, [LIG 60]

### III.1.2.2. Equilibre hygroscopique

Au moment de l'abattage, le bois vert est très humide. Cette humidité va décroître naturellement ou artificiellement (principe du séchage) jusqu'à atteindre un taux d'humidité de près de 30% qui correspond au point de saturation des fibres. Soumis à un environnement chaud ou humide, à l'image de l'éponge, le bois cherche toujours à se mettre en équilibre avec le milieu dans lequel il est exposé jusqu'à stabilisation de son humidité interne appelée « humidité d'équilibre » ou « équilibre hygroscopique ». Cette humidité dépend essentiellement de deux paramètres que sont : l'humidité relative de l'air et la température ambiante. A titre indicatif, les courbes ci-après, **Figure III.1.5**, permettent de déterminer l'équilibre hygroscopique des bois résineux mis en œuvre [AFN 08].



**Figure III.1.5.** Courbes d'équilibre hygroscopique des bois résineux

### III.1.2.3. Modèles mathématiques et thermodynamique des isothermes de sorption

Plusieurs modèles mathématiques existent pour la représentation des isothermes de sorption de l'eau dans le bois. Ces modèles permettent de mettre en relation la teneur en eau d'un matériau hygroscopique avec la température et l'humidité relative de l'environnement.

### III.1.2.3.1 Modèles B.E.T. et G.A.B.

Le modèle B.E.T. tient son nom aux scientifiques Brunauer, Emmett et Teller [BRU 38]. Ce modèle est basé sur l'adsorption surfacique. Schématiquement, cela correspond à la formation de couches successives de film d'eau pendant l'adsorption. C'est le stade précurseur de la condensation ; le nombre limite des couches serait de 6 ou 7. Ce modèle pose l'hypothèse que les propriétés thermodynamiques de l'eau absorbée sur les couches secondaires sont identiques à celles de l'eau libre, c'est-à-dire que l'apport de la chaleur latente de vaporisation est suffisant pour évaporer les molécules d'eau des couches secondaires.

L'humidité du bois à l'équilibre  $w$  est donnée en fonction de l'humidité relative  $h$  de l'air par la relation ci-dessous :

$$W = \frac{w_0 \times b \times h}{1-h} \times \frac{1-(n+1)h^n + nh^{n+1}}{1+(b-1)h + bh^{n+1}} \quad (\text{III.1.1})$$

$w_0$  désigne l'humidité du bois correspondant à la première couche,  $b$  est une constante reliée à l'énergie de liaison des molécules d'eau avec le support et  $n$  est le nombre de couches adsorbées.

L'isotherme de sorption décrit par ce modèle est limitée aux basses activités, c'est-à-dire pour des humidités relatives comprises entre 0 et 50%. Pour pallier à cette limite, Guggenheim, Anderson et Boer, cités par Van Den Berg [VAN 84], proposent le modèle GAB (1966) qui est une amélioration du modèle BET en étendant le domaine d'activité de l'eau.

### III.1.2.3.2 Modèle Dent

Ce modèle est une version améliorée du modèle de BET en considérant que les propriétés thermodynamiques des molécules d'eau secondaires sont différentes de celles de l'eau libre. La théorie de Dent [DEN 77] stipule que l'eau est adsorbée sous deux formes : la première sous forme de molécules d'eau primaire directement liées aux sites de sorption avec une grande énergie de liaison et la deuxième sous forme de molécules secondaires liées aux sites de sorption déjà occupés par les molécules primaires.

L'humidité du bois à l'équilibre est donnée par la relation :

$$W = \frac{w_0 \times b_1 \times h}{[(1-b_2 h)(1+b_1 h - b_2 h)]} \quad (\text{III.1.2})$$

$b_1$  et  $b_2$  sont des constantes d'équilibre liées respectivement à l'énergie de liaison des couches primaires et secondaires.

Dans le cas où  $b_2 = 0$ , l'équation (III.1.2) correspond au modèle de Langmuir et s'écrit :



$$W = \frac{w_0 \times b_1 \times h}{(1 + b_1 h)} \quad (\text{III.1.3})$$

Et dans le cas où  $b_2 = 1$  (cas où l'énergie de liaison de l'eau sous sa forme secondaire est la même que celle de l'eau libre), l'équation (III.1.2) se ramène au modèle de BET :

$$W = \frac{w_0 \times b_1 \times h}{(1-h)(1+b_1 h-h)} \quad (\text{III.1.4})$$

### III.1.2.3.3 Modèles de Hailwood-Horrobin [HAI 46]

Ce modèle a été appliqué au bois et aux textiles qui ont des isothermes de sorption en forme de sigmoïde. Il considère la sorption comme une réaction chimique entre le bois sec et l'eau libre (réactants) pour donner en fin de réaction le bois hydraté (produit ou hydrate).

L'humidité du bois à l'équilibre est donnée par la relation :

$$W = \frac{18}{M_p} \times \left[ \frac{Kh}{1-Kh} + \frac{\sum_{i=1}^n i(Kh)^i \prod_{i=1}^n K_i}{1 + \sum_{i=1}^n i(Kh)^i \prod_{i=1}^n K_i} \right] \quad (\text{III.1.5})$$

$M_p$  est la masse molaire de l'unité de polymère formant les hydrates,  $K$  est la constante d'équilibre entre l'eau vapeur et l'eau liquide,  $K_i$  est la constante d'équilibre entre l'eau liquide et l'hydrate de la couche  $i$  et  $n$  est le nombre de couche.

Beaucoup de similitudes existent entre ce modèle et le modèle de Dent. Notamment l'isotherme d'adsorption, obtenue par la relation précédente, est assez proche de celle donnée par le modèle de Dent. Cependant, les paramètres empiriques des deux modèles ne permettent pas de différencier une phase d'adsorption et de désorption [MER 06]. De plus, ces modèles ne prennent pas en compte l'état hydrique initial du matériau, le sens de variation de l'humidité et l'influence de la température.

### III.1.2.3.4 Théorie d'Anderson-Mc Carthy et modèles dérivés

C'est une théorie semi-empirique. Le modèle d'Anderson-Mc Carthy [AND 63] stipule que l'humidité du bois à l'équilibre est reliée à l'énergie de liaison de la molécule absorbée dont la valeur dépend de l'humidité relative de l'air. Ce modèle sera ensuite complété par Nelson [NEL 83] en reliant l'humidité du bois à l'équilibre à l'humidité relative de l'air par la relation :

$$\frac{h}{100} = \exp - \left\{ \left[ \frac{M_e}{RT} \times \Delta G_0 \right]^{1 - \frac{w}{w_s}} \right\} \quad (\text{III.1.6})$$

$M_e$  est la masse molaire de l'eau,  $\Delta G_0$  est l'enthalpie libre d'adsorption quand  $w$  tend vers 0,  $w_s$  est l'humidité du bois pour  $h = 100\%$ .

III.1.2.3.5 *Modèle thermodynamique de Merakeb [MER 06]*

Ce modèle est basé sur une approche thermodynamique de l'équilibre de phases de l'eau. L'eau, à l'état liquide, est caractérisée par une pression de vapeur d'équilibre appelée pression de vapeur saturante et par une chaleur latente de vaporisation, les deux variant uniquement avec la température [MER 06]. Théoriquement, Bruhat [BRU 68] lie ces deux propriétés par la formule de Clapeyron suivante :

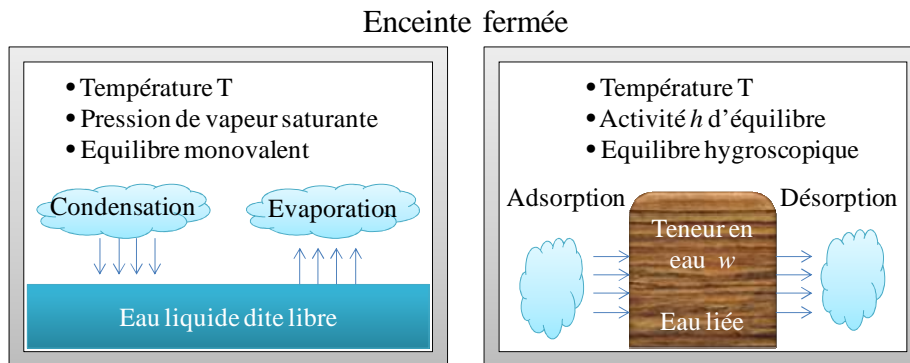
$$L = \frac{RT^2}{MP_s} \times \frac{dP_s}{dT} = \frac{RT^2}{M} \times \frac{d \ln P_s}{dT} \tag{III.1.7}$$

Cet équilibre de l'eau avec sa pression de vapeur saturante est interprété comme une égalisation des potentiels chimiques des deux phases. A l'état d'équilibre, la vitesse d'évaporation de l'eau liquide est égale à la vitesse de condensation de la vapeur d'eau.

Ainsi, par analogie à l'eau liquide (**Figure III.1.6**), l'auteur interprète l'équilibre hygroscopique comme une propriété thermodynamique de l'eau liée dans le bois sachant qu'il n'est pas différent de l'équilibre de l'eau libre avec sa pression de vapeur saturante. L'adsorption et la désorption de l'eau liée dans le bois correspondent respectivement à la condensation et la vaporisation de l'eau libre à une différence près. A une température donnée constante, l'eau liquide dite libre s'équilibre toujours avec une pression de vapeur fixe contrairement à l'eau liée dont la chaleur de sorption dépend de l'état hydrique du matériau [MER 06]. L'équilibre de l'eau liée dans le bois est alors caractérisé par sa pression de vapeur sèche selon l'équation :

$$L' = \frac{RT^2}{MP_v} \times \frac{dP_v}{dT} = \frac{RT^2}{M} \times \frac{d \ln P_v}{dT} \tag{III.1.8}$$

$L'$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau liée et  $P_v$  la pression de vapeur sèche.



**Figure III.1.6.** Représentation des équilibres de l'eau libre et liée avec l'environnement extérieur

La différence entre les chaleurs de vaporisation de l'eau libre et de celle de l'eau liée donne l'enthalpie molaire  $\Delta H_s$  qui n'est autre que la chaleur de sorption.

$$\Delta H_s = L' - L = \frac{RT^2}{M} \times \frac{d \ln h}{dT} \quad \text{avec} \quad h = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{III.1.9})$$

$h$  est définie comme le rapport de la pression de vapeur  $P_v$  à une température donnée par la pression de vapeur saturante  $P_s$  à la même température. Cette grandeur est assimilable à un potentiel chimique d'une espèce en équilibre dont l'expression dépend d'une fonction d'état qui est la pression (équation III.1.10).

$$H^g = H_s^g + RT \times \ln h \quad \text{avec} \quad h = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{III.1.10})$$

$H^g$  est l'enthalpie molaire de la vapeur d'eau,  $H_s^g$  l'enthalpie molaire à la pression de vapeur saturante  $P_s$ , et ce, à la même température.

D'un point de vue physique, Merakeb [MER 06] propose une nouvelle expression de la chaleur de sorption (potentiel hygroscopique) qui est une fonction logarithmique de la teneur en eau  $w$ .

$$\Delta H_s = \frac{dQ}{dw} = A \times \ln \frac{w}{w_s} \quad (\text{III.1.11})$$

$A$  est une constante liée à la chaleur totale de mouillage (énergie totale dégagée lorsque le bois passe d'un état parfaitement anhydre à l'état de saturation des fibres).

De ce modèle, il ressort que la chaleur de désorption est supérieure à celle d'adsorption. De plus, la courbe de désorption passe au dessus de la courbe d'adsorption. Enfin, les courbes de sorption sont établies sur une plage complète de l'humidité relative (0 à 100%). Toutefois, le point d'équilibre à  $h = 100\%$  doit être commun en adsorption et en désorption lors de l'identification du paramètre  $A$ .

Ainsi, en posant le principe thermodynamique de l'équilibre des phases en égalisant les potentiels chimiques de l'eau liée et de la vapeur d'eau exprimés à l'aide des équations (III.1.10) et (III.1.11), l'auteur obtient une relation logarithmique entre la teneur en eau et l'humidité relative qu'il pondère par une fonction exponentielle de l'humidité symbolisant une non linéarité du processus vis-à-vis de l'humidité relative.

$$\ln \frac{w}{w_s} = \varphi \ln h \times e^{a.h} \quad (\text{III.1.12})$$

$\varphi$  est un paramètre thermodynamique et  $a$  une constante de calibration.

En environnement variable, Merakeb [MER 06] propose l'équation (III.1.13) qui permet de déterminer les isothermes de sorption quelles que soient les conditions hydriques initiales du bois.

$$\ln \frac{w}{w_s} = \varphi \ln h \times e^{a.h} + \Delta\varphi \ln h e^{\alpha h} \quad (\text{III.1.13})$$

$\Delta\varphi$  permet alors de prendre en compte l'écart entre l'isotherme de sorption partielle et totale ( $0\% \leq h \leq 100\%$ ). Pour la suite, ce modèle sera utilisé pour la modélisation des isothermes de sorption obtenues expérimentalement dans la section III.2. Ces isothermes de sorption sont nécessaires à la connaissance de l'état hydrique en surface des éléments en bois. Toutefois, la connaissance de l'état hydrique total nécessite le calcul du champ d'humidité au cœur de ces ouvrages : d'où l'étude du processus de diffusion.

### III.1.3. Diffusion hydrique dans le bois

Dans le domaine hygroscopique, la diffusivité massique est une des propriétés de transfert de matière qui caractérise la migration de l'eau liée et de la vapeur dans le bois. La détermination des coefficients de diffusion s'avère donc nécessaire, non seulement, pour la connaissance du champ d'humidité au cœur du matériau, mais également, pour le calcul des flux d'eau évacués, dans les opérations de séchage.

Dans la littérature, plusieurs auteurs tels que Jensen [JEN 85], Perré [PER 96], Zohoun [ZOH 98], Agoua [AGO 01], Mouchot [MOU 02], et Kouchade [KOU 04], pour ne citer qu'eux, ont développé des techniques et méthodes fiables et rapides pour la mesure de la diffusivité et la détermination des coefficients de diffusion. Dans cette partie, nous présentons, sans être exhaustif, quelques méthodes de détermination des coefficients de diffusion de l'eau dans le matériau bois.

#### III.1.3.1. Définition

La diffusivité massique est la propriété physique d'un corps qui permet de caractériser l'aptitude de l'eau d'y migrer des zones les plus humides vers les zones les plus sèches. Dans le cas du bois et dans le domaine hygroscopique, il s'agit de la migration de la vapeur d'eau dans les vides cellulaires et de l'eau liée dans les parois cellulaires, et ce, sous l'effet d'un gradient de teneur en eau. La loi de diffusion, appelée première loi de Fick, établit une relation entre le gradient de teneur en eau et le flux induit. Dans sa forme uni-axiale, elle s'écrit sous la forme :

$$J = -\lambda \frac{dw}{dx} \quad (\text{III.1.14})$$

$J$  est le flux massique ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ ) ;  $\lambda$  est le coefficient de diffusion ( $\text{kg/m.s}$ ) ;  $w$  est la teneur en eau ( $\text{kg/kg}$ ) et  $x$  la direction de la diffusion (m).

Cette loi se généralise à trois dimensions selon l'expression :

$$\vec{J} = -\bar{\lambda} \vec{\nabla} w \quad (\text{III.1.15})$$

$\bar{\lambda}$  est le tenseur de diffusion d'ordre 2 et  $\vec{j}$  le vecteur flux massique.

Afin de mettre en évidence l'évolution en temps du flux induit, Fick a établi une seconde loi en utilisant la conservation de la masse. Celle-ci stipule que la somme des flux massiques entrant et sortant d'un volume quelconque, délimité par une surface fermée, est égale au taux de variation de la quantité de matière présente dans le volume. Développée et traduite en termes de teneur en eau, cette loi peut s'écrire comme suit :

$$\frac{dw}{dt} = \text{div}(\overline{\overline{D_w}} \cdot \vec{\nabla} w) \quad (\text{III.1.16})$$

Avec  $\overline{\overline{D_w}} = \frac{\bar{\lambda}}{\rho_s}$  le tenseur de diffusion hydrique ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ), diagonal dans le repère associé aux directions principales d'orthotropie.  $D_w^L$ ,  $D_w^R$  et  $D_w^T$  sont les composantes du tenseur dans les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T).

$$\overline{\overline{D_{w\{L,R,T\}}}} = \begin{bmatrix} D_w^L & 0 & 0 \\ 0 & D_w^R & 0 \\ 0 & 0 & D_w^T \end{bmatrix} \quad (\text{III.1.17})$$

Il est à noter que cette loi (III.1.16) peut être écrite avec différentes forces motrices autre que la teneur en eau, à l'exemple du gradient de la concentration d'humidité ou de la pression de vapeur d'eau. Le choix de la teneur en eau réside dans sa simplicité de mesure.

La non-linéarité du phénomène peut-être introduite comme suit :

$$D_w^\alpha(w) = D_0^\alpha \cdot \exp(k_\alpha \cdot w), \quad \alpha \in \{L, R, T\} \quad (\text{III.1.18})$$

$D_0^\alpha$  est le coefficient de diffusion à l'état anhydre du matériau et  $k_\alpha$  un paramètre de non linéarité.

Aujourd'hui, il est admis que le processus de diffusion est fortement couplé au transfert de chaleur; la température demeurant une autre force motrice. L'étude actuelle étant la détermination des propriétés de diffusion d'espèces tropicales, l'ensemble des caractérisations se fera à température constante. Nous écarterons donc ce couplage de notre étude.

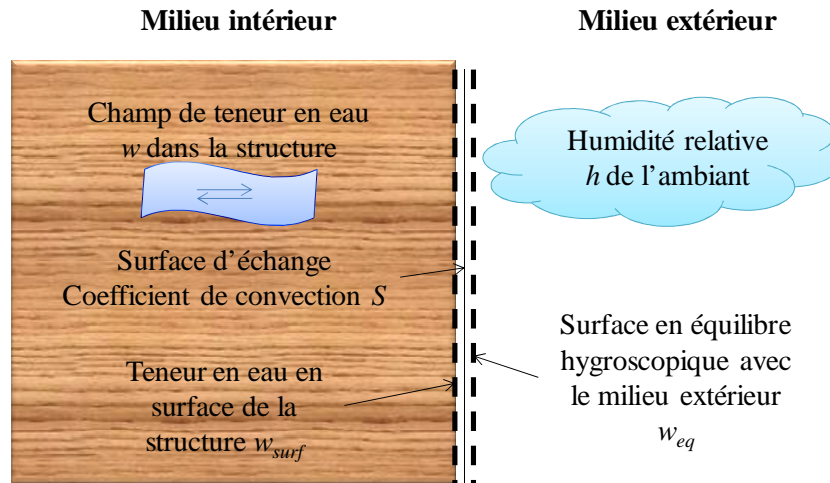
### III.1.3.2. Échanges convectifs

La convection hydrique traduit les échanges qui se produisent entre le matériau et le milieu extérieur à travers une interface d'échange. Les flux hydriques qui règnent sur cette interface s'établissent soit par condensation (milieu extérieur plus humide) soit par évaporation (milieu intérieur plus humide). Ainsi, en service, l'état hydrique à cœur est conditionné par l'équilibre hygroscopique régnant à la surface d'échange, **Figure III.1.7**.

Le flux hydrique se calcule via un coefficient de convection qui établit une proportionnalité entre l'équilibre hygroscopique en surface et l'humidité relative de l'air ambiant [MER 06].

$$J = S \cdot (w_{surf} - w_{eq}) \quad (III.1.19)$$

S est le coefficient d'échange surfacique ou de convection,  $w_{surf}$  la teneur en eau qui règne en surface du bois et  $w_{eq}$  la teneur en eau d'équilibre hygroscopique équivalent à l'humidité relative de l'air ambiant. Cette dernière teneur en eau se déduit des isothermes de sorption.



**Figure III.1.7.** Echange convectif à l'interface d'une pièce de bois

Yéo [YEO 02] cité par Merakeb [MER 06] rappelle que le transport de l'eau dans le bois est finalement gêné par deux résistances :

- Une résistance interne qui se développe dans le corps des structures et qui peut être décrit par le coefficient de diffusion  $D_w^\alpha$  ;
- Une résistance externe qui se développe à l'interface entre la peau des structures et l'ambiance externe : celle-ci peut être décrite par le coefficient d'échange surfacique S.

Ainsi, ces deux paramètres conditionnent l'évolution de l'humidité dans le bois. Il importe donc de les relier par une relation mathématique utile à la détermination des paramètres de diffusion. Dans une écriture uni-axiale, les expressions (III.1.14) et (III.1.19) permettent d'écrire :

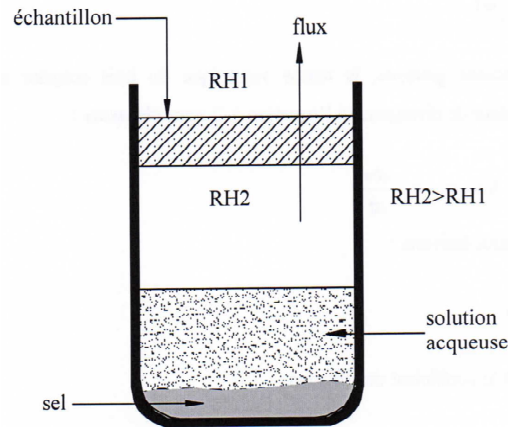
$$D_w^\alpha \cdot \frac{\partial w}{\partial x} = S \cdot (w_{eq} - w) \quad (III.1.20)$$

### III.1.3.3. Détermination expérimentale des coefficients de diffusion

On distingue dans la littérature deux familles de mesure de diffusivité massique : une mesure en régime permanent et une mesure en régime transitoire.

### III.1.3.3.1 Régime permanent

La méthode consiste à mesurer, d'une façon continue jusqu'à l'équilibre, l'évolution de la masse d'un échantillon de bois soumis de part et d'autre de ses faces à un gradient d'humidité. Après une période transitoire, il en découle un flux constant de vapeur d'eau transféré entre les deux milieux. C'est le principe du vaporimètre dont le schéma de principe est donné dans la **Figure III.1.8**.



**Figure III.1.8.** Schéma de principe d'un vaporimètre

Le verre contenant le dispositif est placé sur une balance dans une enceinte climatique à humidité relative contrôlée. Comme le montre la **Figure III.1.8**, l'humidité relative dans le verre est assurée par une solution saturée en sel. Il existe dans la littérature (exemple recommandation de l'Organisation Internationale de Métrologie Légale), les modes d'utilisation de divers sels pour la réalisation des solutions salines saturées en fonction des humidités relatives recherchées à des températures fixées.

Ainsi, la connaissance de ce flux, associé à une modélisation du transport de l'eau au sein de l'échantillon, permet d'estimer le coefficient de diffusion de l'eau dans le bois. L'équation (III.1.21) permet de calculer la diffusivité  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{J}{\Delta w} e \quad (\text{III.1.21})$$

Où  $e$  est l'épaisseur de l'échantillon considéré et  $\Delta w = w_2 - w_1$  représente la différence d'humidité interne entre la face inférieure ( $w_1$ ) et la face supérieure ( $w_2$ ). Ces humidités internes sont obtenues grâce aux courbes d'isothermes de sorption.

Le flux massique  $J$  est calculé en mesurant la variation du poids du vaporimètre ou le débit de vapeur d'eau  $Q$  qui traverse l'échantillon, connaissant la surface  $A$  des faces exposées de l'échantillon.

$$J = \frac{Q}{A} \quad (\text{III.1.22})$$

Outre le principe du vaporimètre, il existe d'autres méthodes à l'exemple de la méthode non destructive (donc répétitive) et directe qui consiste à mesurer la teneur en eau en surface d'une pièce en bois traitée en utilisant le contraste de luminosité d'une surface à teneur en eau de référence par rapport à celle de la même surface dont on mesure la teneur en eau [YEO 02].

#### III.1.3.3.2 Régime transitoire

Il existe plusieurs méthodes similaires répertoriées dans divers travaux [SKA 88] [WAD 94] [ZOH 98] [AGO 01]. Le principe consiste à suivre la teneur en eau d'un échantillon subissant une variation brusque et contrôlée de l'humidité relative de l'ambiance dans lequel il est placé. L'échantillon est préalablement mis en équilibre hygroscopique dans une enceinte climatique dont l'humidité relative et la température sont contrôlées afin d'obtenir un état hydrique initial. Après obtention de cet état d'équilibre initial, est opéré le changement brutal de conditions climatiques (augmentation ou diminution de l'humidité relative à température constante). L'évolution de la teneur en eau moyenne est mesurée par la technique de pesée successive ou par gravimétrie. Les principales méthodes rencontrées dans la littérature résident dans la maîtrise de l'humidité relative. Certains scientifiques [WAD 94] [KOC 02] ont recours à l'utilisation des solutions salines saturées et d'autres [ZOH 98] [AGO 01] [MOU 02] préfèrent des systèmes de régulation à l'exemple du cryothermostat [KOU 04]. Un séchage final à 103°C permet de déterminer la masse anhydre et donc de relier la mesure de la masse à la teneur en eau moyenne. Cette phase ultime entraîne généralement une destruction de l'échantillon.

#### III.1.3.3.3 Autres méthodes expérimentales

Il existe d'autres méthodes qui ont été développées ces dernières années.

On peut citer celle développée par Mouchot et al [MOU 02] pour mesurer de façon indirecte la diffusivité de la vapeur d'eau dans le bois grâce à la diffusion de gaz inertes. Kouchade [KOU 04], quant à lui, a développé une méthode de détermination de la diffusivité massique par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire. Cette méthode s'articule sur trois étapes complémentaires à savoir : l'expérimentation qui s'appuie sur la mesure de la résistance électrique d'un échantillon de bois en régime transitoire, l'analyse des données expérimentales à partir du code aux volumes finis *TransPore* (code de simulation de transferts couplés de chaleur et de masse en milieux poreux) et la détermination du coefficient de diffusion par minimisation de l'écart entre les données expérimentales et celles simulées (minimisation de l'erreur par l'algorithme du simplexe).



Outre les méthodes évoquées ci-dessus, de nouvelles techniques non destructives ont été développées et d'autres sont en cours de développement. Sans être exhaustif, on peut citer la mesure de la diffusivité par ultrason [MIN 94], la méthode par atténuation des rayons gamma [DAV 93], la tomographie [PET 02], etc.

Dans l'ensemble, ces dernières méthodes, généralement non destructives, restent assez onéreuses et leur mise au point demande un certain savoir-faire. Ces écueils limitent encore leur utilisation.

## III.2. Caractérisation expérimentale des isothermes de sorption

Dans cette partie, nous présentons les essais expérimentaux de caractérisation des isothermes de sorption des essences étudiées au chapitre II. L'objet de cette expérimentation vise la caractérisation de l'influence de l'environnement sur l'état hydrique de ces essences dont l'impact est important sur leur comportement mécanique. Pour cela, les isothermes d'adsorption et de désorption sont tracées après obtention de différents états d'équilibres hygroscopiques. La simulation numérique a permis par la suite d'identifier les paramètres hydriques du modèle choisi.

### III.2.1. Expérimentation

#### III.2.1.1. Essences et géométrie des échantillons

Outre le Moabi (*Baillonella toxisperma*) et l'Ozigo (*Dacryodes buettneri*), essences tropicales objets de cette étude, nous avons tenu à associer deux autres essences tempérées à savoir le Hêtre (*Fagus sylvatica*) et le Sapin (*Abies alba*). L'objectif de cette initiative est, non seulement, de valider le protocole expérimental (il existe dans la littérature des données pour ces deux essences tempérées), mais également, de mener une étude comparative en vue de mieux cerner le comportement des bois tropicaux.

Des échantillons de 20 x 20 mm<sup>2</sup> pour 2 mm d'épaisseur ont été réalisés pour les quatre essences précitées, **Figure III.2.1**. Le choix de cette géométrie résulte d'un compromis entre les difficultés d'usinage et le temps nécessaire à l'obtention des équilibres hygroscopiques pour chaque condition climatique prédéfinie.

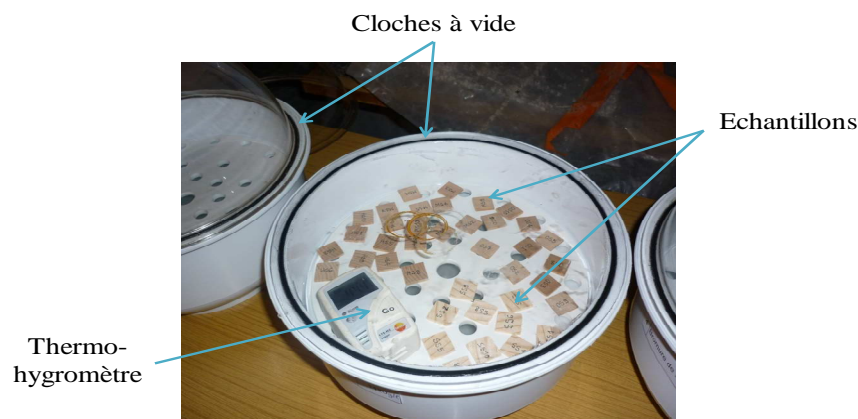


**Figure III.2.1.** Echantillons des quatre essences

### III.2.1.2. Choix des sels, préparation des solutions salines et validation

En fonction des humidités relatives recherchées, huit sels ont été sélectionnés, dans le panel proposé par les normes NF EN 14114 et ASTM, et dans les « Recommandations de l'OIML » (Organisation Internationale de la Métrologie Libre). Le **Tableau III.2.1** présente l'ensemble des sels et les humidités relatives correspondant à chaque solution pour une température ambiante de 20°C.

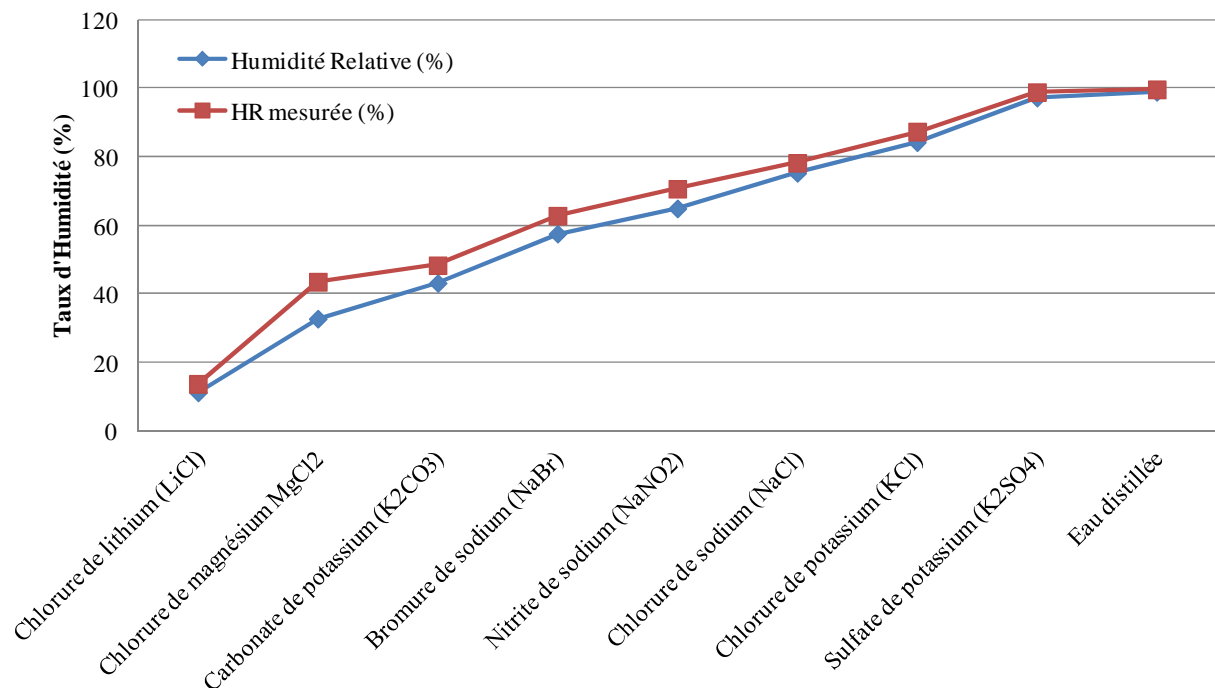
Chaque solution saline est préparée dans une cloche étanche contenant de l'eau distillée saturée du sel correspondant avec un précipité ne dépassant pas 1 cm (normes NF EN 14114, ASTM E 104-85). Un contrôle de l'humidité relative et de la température a été réalisé au moyen d'un capteur thermo-hygrométrique de type Testo, **Figure III.2.2**. Un écart moyen de 4% est obtenu entre les humidités relatives indiquées et celles mesurées à 20°C, **Figure III.2.3**. Cet écart correspond plus ou moins à la précision du capteur utilisé ( $\pm 3\%$  en HR). Ainsi, nous avons validé le dispositif expérimental avant de démarrer les essais de sorption. La solution de chlorure de magnésium a été supprimée au regard de l'écart très important entre la valeur mesurée et celle indiquée à 20°C.



**Figure III.2.2.** Dispositif expérimental pour la détermination des isothermes de sorption

**Tableau III.2.1.** Choix des sels et vérification des humidités relatives à 20°C

Solutions aqueuses	Solubilité dans l'eau (g/l)	Humidité Relative Indiquée (%)	Humidité Relative mesurée (%)
Chlorure de Lithium (LiCl)	769	11,3	13,8
Chlorure de Magnésium (MgCl <sub>2</sub> )	542	32,8	43,6
Carbonate de Potassium (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	1120	43,2	48,4
Bromure de Sodium (NaBr)	733	57,6	62,9
Nitrite de Sodium (NaNO <sub>2</sub> )	820	65	70,7
Chlorure de Sodium (NaCl)	357	75,3	78,3
Chlorure de Potassium (KCl)	340	84,3	87,4
Sulfate de Potassium (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	120	97,3	98,9
Eau distillée		99	99,7

**Figure III.2.3.** Contrôle des humidités relatives dans les cloches avant démarrage des essais

Pour réduire le temps de stabilisation de l'humidité relative dans les cloches, nous avons remplacé le couvercle concave par un couvercle plat. Ce dispositif, **Figure III.2.2**, a permis de limiter le volume d'échange dans les cloches et donc de réduire le temps expérimental.

### III.2.1.3. Plan d'expérience

Deux cycles d'humidification d'amplitude croissante et décroissante ont été choisis de manière à balayer plus ou moins l'ensemble du domaine hygroscopique (de l'état saturé à l'état sec).

- Premier cycle : HR = 11% à 99% par rampe de 10% ;
- Deuxième cycle : HR = 99% à 11% par rampe de 10%.

Chaque rampe, qui correspond à la mise en conditionnement dans une cloche contenant une solution saline différente, est maintenue le temps nécessaire pour obtenir l'équilibre hydrique sur l'ensemble des échantillons.

Nous disposons de 10 échantillons par essence et par cycle, soit un total de 80 échantillons.

### III.2.1.4. Protocole de mesure

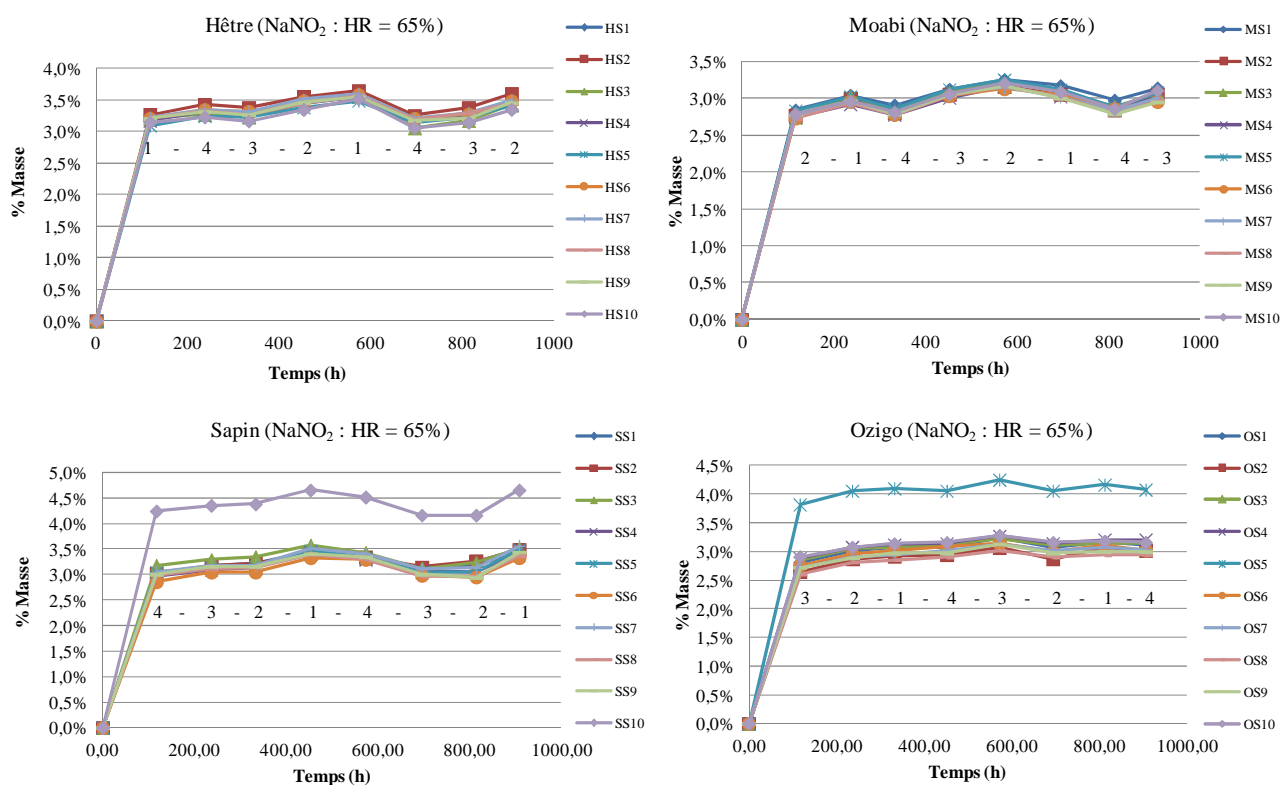
Des essais préliminaires ont permis de relever quelques points de faiblesse dans le protocole expérimental et d'en établir le protocole de mesure qui suit afin de pallier ces difficultés.

- Première mesure prise 8 jours après début de l'essai : Cette durée permet une stabilisation de l'humidité relative dans la cloche (24h à 72h selon les solutions salines) et d'assurer plus ou moins l'équilibre hydrique des échantillons avant la première mesure.
- Espacement d'au moins 5 jours entre les mesures suivantes : L'ouverture de la cloche induit une perturbation des équilibres hydriques lors de la prise de mesure. Il importe donc que l'équilibre soit rétabli avant la mesure suivante.
- Permutation de la mesure par essence : Le temps moyen pour une prise de mesure est de 20 mn par cloche contenant 40 échantillons. L'ordre de mesure de la masse, pour chaque lot d'échantillons, joue un rôle significatif sur l'état hydrique final lors de la pesée. Les échantillons étant de petites épaisseurs, leur exposition à l'humidité ambiante de la pièce (différente de celle de la cloche) entraîne une perturbation de l'état hydrique acquise dans la cloche. La **Figure III.2.4** montre un exemple de perturbation lors de l'essai préliminaire pour les quatre essences. On voit que l'ordre de mesure par essence est primordial pour la mesure de la masse à l'état d'équilibre. L'ordre de la pesée dans l'échantillonnage d'une essence (10 unités) reste aléatoire car la perturbation est jugée moins significative entre le premier et le 10<sup>ème</sup> échantillon.
- Mesure par permutation circulaire : Sur l'ensemble du temps expérimental, il est réalisé au moins 8 mesures par essence et par échantillon en s'imposant un cycle de permutation

circulaire, dans l'ordre de mesure, pour chaque essence. Ce protocole permet de s'assurer d'une bonne répétabilité des mesures pour une même essence.

Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance dont la précision est de  $10^{-3}$ g.

Après passage dans les neuf solutions aqueuses, les échantillons ont été séchés à l'étuve à une température de  $103^{\circ}\text{C}$  pour la détermination de la masse sèche, paramètre nécessaire au calcul des teneurs en eau équivalente à chaque humidité relative imposée.



**Figure III.2.4.** Essai préliminaire : les chiffres 1, 2, 3 et 4 désignent l'ordre, par essence, dans la mesure de la masse des échantillons.

### III.2.2. Résultats expérimentaux

Les essais ont duré plus de huit mois. Les teneurs en eau, aux différents états d'équilibre hydrique, sont données, par essence et par échantillon, dans les tableaux présentés en annexes B. Les **Figures III.2.4 à III.2.7** donnent l'évolution des teneurs en eau moyenne en fonctions des humidités relatives pour chaque échantillonnage.

III.2.2.1. Sapin

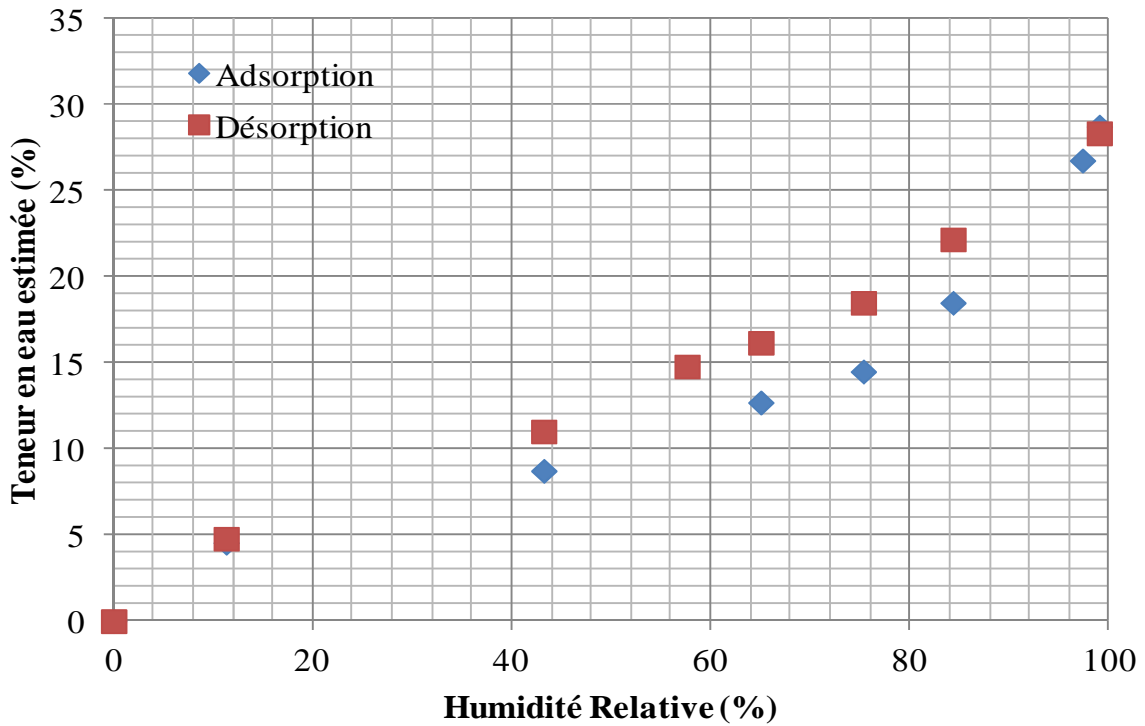


Figure III.2.4. Hystérésis de sorption du Sapin pour un cycle complet

III.2.2.2. Hêtre

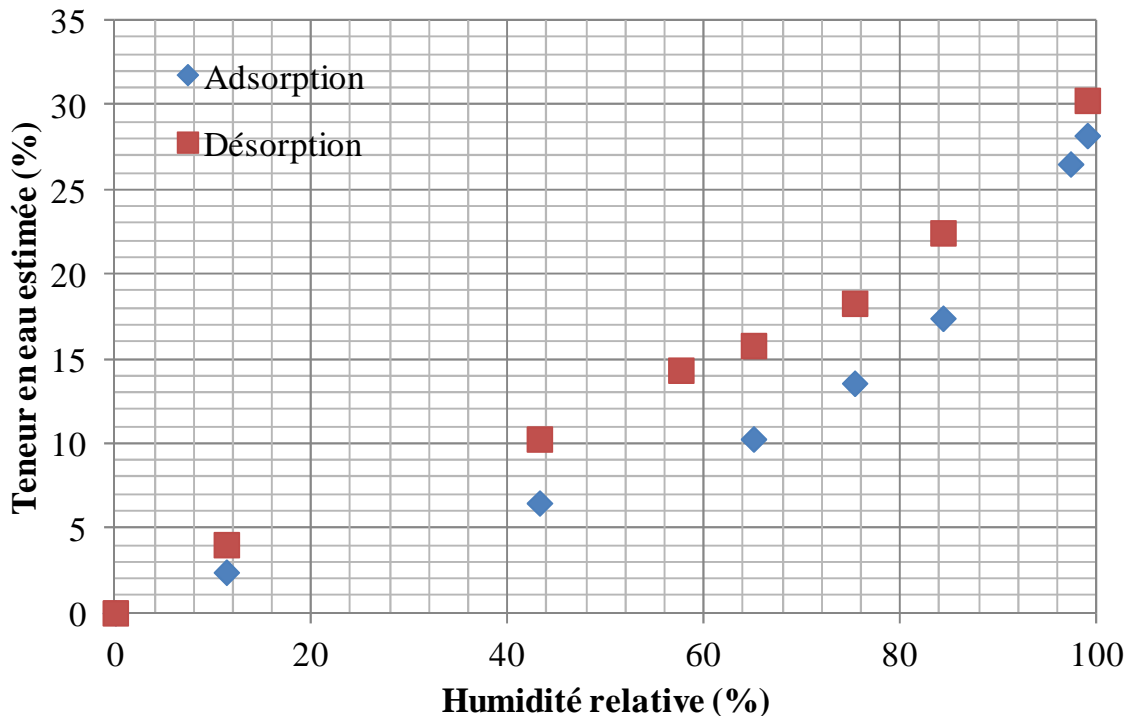


Figure III.2.5. Hystérésis de sorption du Hêtre pour un cycle complet

III.2.2.3. Moabi

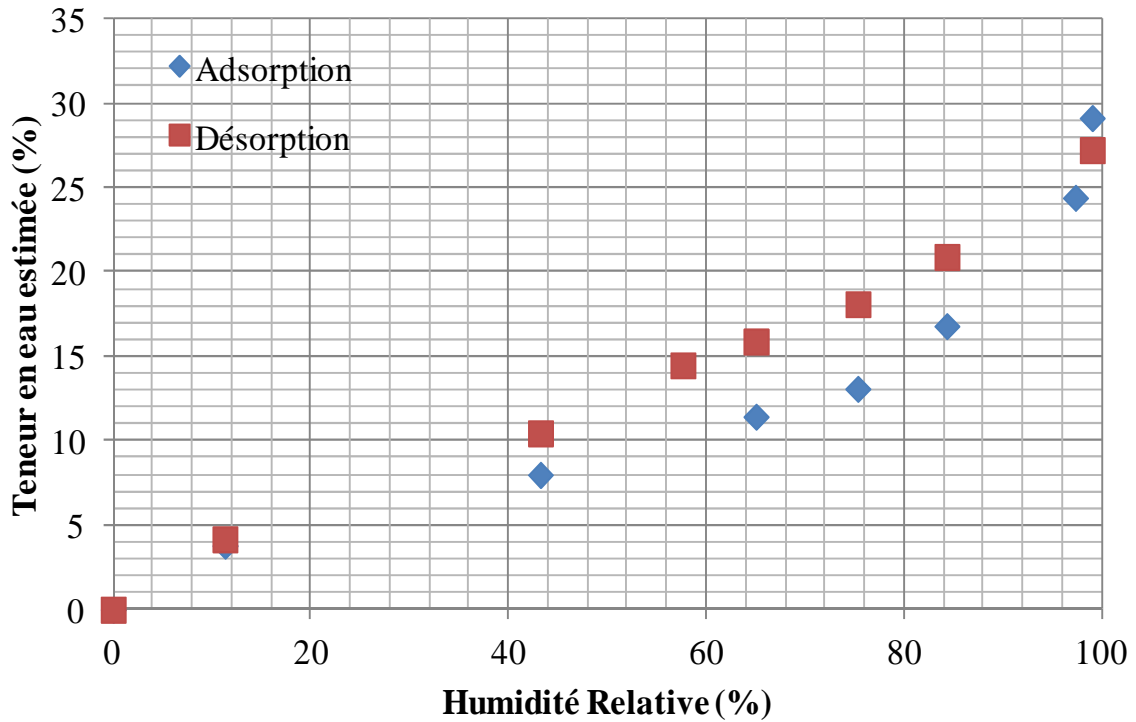


Figure III.2.6. Hystérésis de sorption du Moabi pour un cycle complet

III.2.2.4. Ozigo

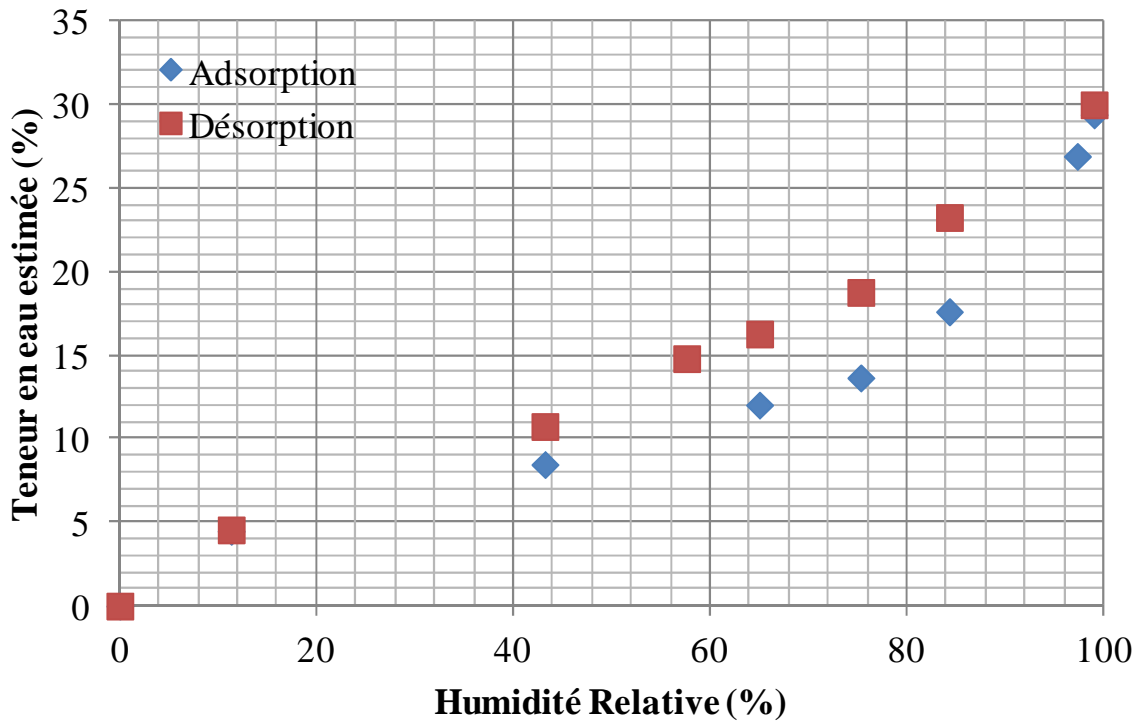


Figure III.2.7. Hystérésis de sorption de l'Ozigo pour un cycle complet

### III.2.2.5. Observations

On remarque que les hystérésis de sorption sont bien distinctes pour les deux phases (désorption et adsorption). Les courbes de désorption restent toujours au dessus de celles d'adsorption. Pour les basses humidités relatives (inférieures à 40%), ces écarts sont moins nets voire confondus, dans l'ensemble (à l'exception du Hêtre). Cette situation peut être tributaire aux perturbations des états hydriques pendant les prises de masse. En effet, celles-ci sont très importantes pour des humidités relatives proches de zéro. Notre protocole ne permet pas de minimiser ces perturbations, pour les basses humidités, malgré la procédure de permutation opérée lors des mesures.

### III.2.3. Simulation numérique et identification des paramètres

Le modèle d'hystérésis est basé sur l'approche thermodynamique développée par Merakeb [MER 06] et présentée dans la section III.1.2.3.5. De l'équation (III.1.12), on en déduit les expressions correspondant aux phases d'adsorption et de désorption.

$$\ln \frac{w}{w_s} = \varphi_a \ln h \times e^{a_a \cdot h} \quad (\text{III.2.1})$$

$$\ln \frac{w}{w_s} = \varphi_d \ln h \times e^{a_d \cdot h} \quad (\text{III.2.2})$$

$\varphi_a$  et  $\varphi_d$  sont les paramètres thermodynamique,  $a_a$  et  $a_d$  sont les constantes de calibration correspondant respectivement aux phases d'adsorption et de désorption.  $w_s$  désigne la teneur en eau pour une humidité relative de 100%. Sa valeur est commune aux deux phases.

Les sections qui suivent présentent, pour chaque essence, les valeurs des paramètres et les courbes analytiques obtenues. Deux approches sont testées :

- Détermination des paramètres à partir de la teneur en eau de chaque échantillon pour en déduire leur valeur moyenne (Simulation 1) ;
- Détermination des paramètres à partir de la teneur en eau moyenne des échantillons (Simulation 2).

Le calcul des paramètres thermodynamiques est réalisé en utilisant la méthode de minimisation de Newton-Raphson qui permet de minimiser une fonction en l'approchant par son développement de Taylor au deuxième degré (approximation quadratique).



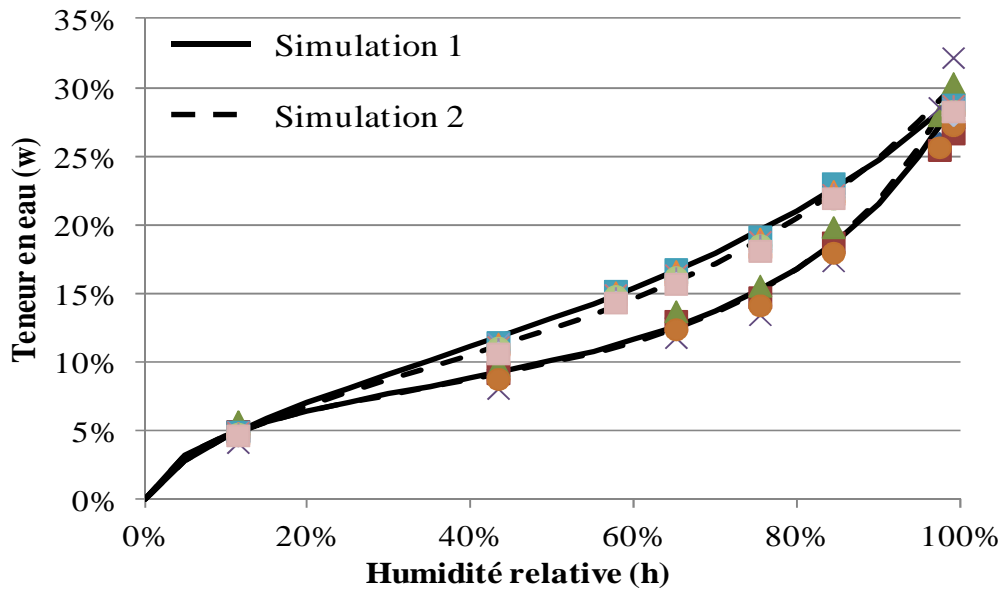
III.2.3.1. Sapin

**Tableau III.2.2.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en adsorption pour le Sapin

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>29%</b>	2,18%	<b>31%</b>	0,79%
$\varphi_a$	<b>0,68</b>	0,05	<b>0,69</b>	0,01
$a_a$	<b>1,63</b>	0,13	<b>1,71</b>	0,05

**Tableau III.2.3.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en désorption pour le Sapin

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>29%</b>	0,29%	<b>31%</b>	0,79%
$\varphi_d$	<b>0,74</b>	0,01	<b>0,75</b>	0,01
$a_d$	<b>0,90</b>	0,05	<b>1,09</b>	0,05



**Figure III.2.8.** Simulation des courbes hystérésis du Sapin pour un cycle total

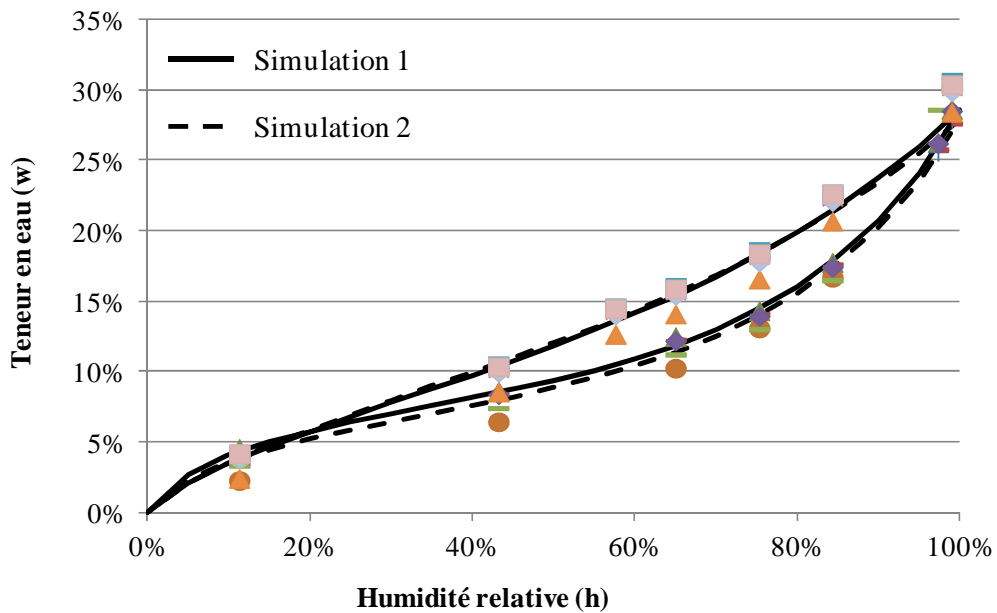
III.2.3.2. Hêtre

**Tableau III.2.4.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en adsorption pour le Hêtre

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>29%</b>	0,43%	<b>28%</b>	0,47%
$\varphi_a$	<b>0,73</b>	0,02	<b>0,77</b>	0,03
$a_a$	<b>1,59</b>	0,05	<b>1,53</b>	0,04

**Tableau III.2.5.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en désorption pour le Hêtre

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>29%</b>	0,00%	<b>28%</b>	0,47%
$\varphi_d$	<b>0,85</b>	6,79%	<b>0,83</b>	0,01
$a_d$	<b>0,82</b>	3,10%	<b>0,76</b>	0,04



**Figure III.2.9.** Simulation des courbes hystérésis du Hêtre pour un cycle total

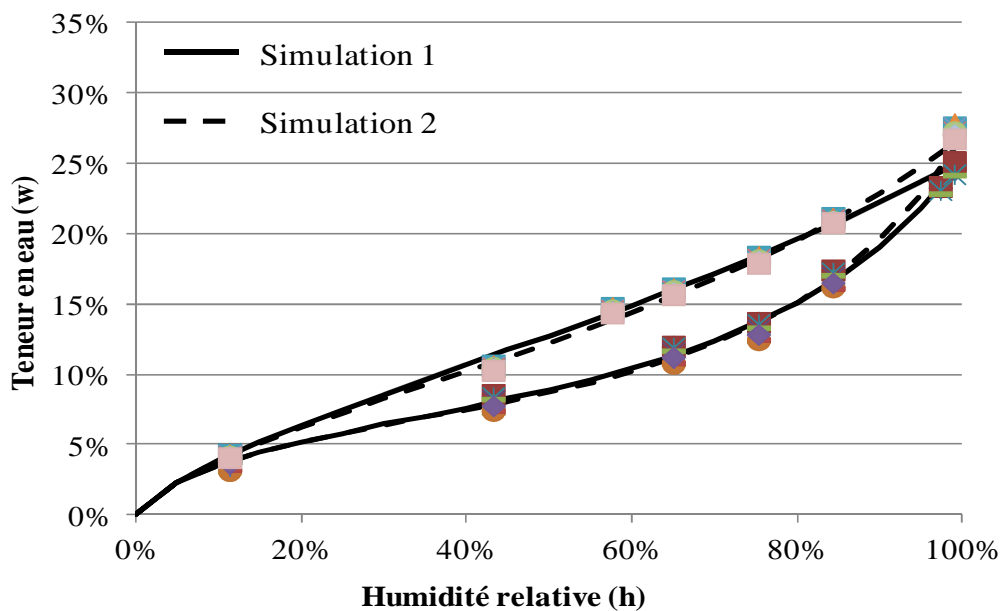
III.2.3.3. Moabi

**Tableau III.2.6.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en adsorption pour le Moabi

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>25%</b>	0,64%	<b>27%</b>	1,19%
$\varphi_a$	<b>0,74</b>	4,94%	<b>0,76</b>	0,01
$a_a$	<b>1,41</b>	6,99%	<b>1,53</b>	0,09

**Tableau III.2.7.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en désorption pour le Moabi

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>25%</b>	0,00%	<b>27%</b>	1,19%
$\varphi_d$	<b>0,78</b>	0,80%	<b>0,79</b>	0,00
$a_d$	<b>0,46</b>	1,96%	<b>0,74</b>	0,20



**Figure III.2.10.** Simulation des courbes hystérésis du Moabi pour un cycle total

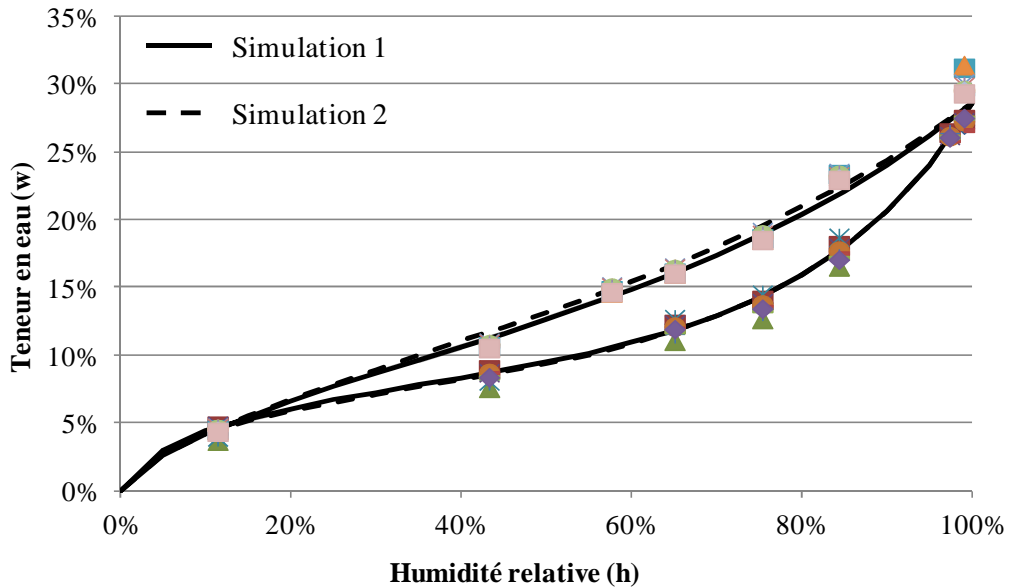
III.2.3.4. Ozigo

**Tableau III.2.8.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en adsorption pour l’Ozigo

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>29%</b>	0,30%	<b>29%</b>	0,02%
$\varphi_a$	<b>0,69</b>	0,02	<b>0,71</b>	0,01
$a_a$	<b>1,67</b>	0,04	<b>1,65</b>	0,01

**Tableau III.2.9.** Valeurs moyennes des paramètres thermodynamiques en désorption pour l’Ozigo

Paramètre	Simulation 1		Simulation 2 (Moyenne)	Ecart Type
	Moyenne	Ecart type		
$w_s$	<b>29%</b>	0,00%	<b>29%</b>	0,28%
$\varphi_d$	<b>0,77</b>	0,01	<b>0,77</b>	0,00
$a_d$	<b>0,85</b>	0,02	<b>0,74</b>	0,08



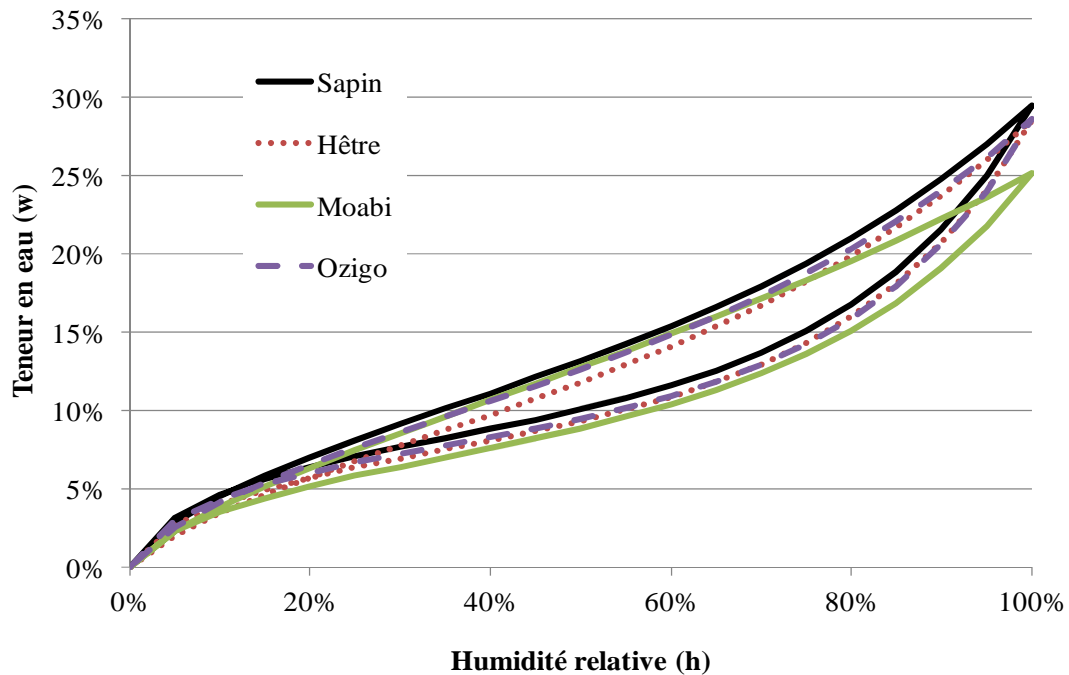
**Figure III.2.11.** Simulation des courbes hystérésis de l’Ozigo pour un cycle total

### III.2.3.5. Récapitulatif

On remarque que la différence entre les deux approches est peu significative. Nous retenons alors les valeurs obtenues à partir de la première approche (simulation 1).

**Tableau III.2.10.** Valeurs des paramètres thermodynamiques par essence

Paramètres	Sapin	Hêtre	Moabi	Ozigo
$w_s$	29%	29%	25%	29%
$\varphi_a$	0,68	0,73	0,74	0,69
$a_a$	1,63	1,59	1,41	1,67
$\varphi_d$	0,74	0,85	0,78	0,77
$a_d$	0,90	0,82	0,46	0,85



**Figure III.2.12.** Ensemble des isothermes de sorption pour les 4 essences testées

Dans ensemble, les hystérésis du Sapin, du Hêtre et de l'Ozigo sont presque superposables avec une meilleure affinité entre le Hêtre et l'Ozigo. La teneur en eau saturante  $w_s$  du Moabi est plus faible (25%) que celles des autres essences (29% pour l'ensemble) et très proche de son point de saturation de fibre (23% d'après le CIRAD-Forêt).

### III.3. Caractérisation expérimentale des cinétiques de diffusion

Dans cette dernière partie, nous présentons le protocole expérimental ayant conduit à la caractérisation des cinétiques de diffusion ainsi qu'à la détermination des coefficients de diffusion et d'échange surfacique des deux essences gabonaises.

#### III.3.1. Expérimentation

##### III.3.1.1. Essences, géométrie et échantillonnage

A la caractérisation du Moabi et de l'Ozigo, nous avons également associé le Hêtre et le Sapin.

Deux types de géométrie, **Figure III.3.1**, ont été choisis afin d'obtenir deux rapports distincts entre volume (diffusion massique) et surface (échanges surfaciques) afin d'en faciliter leurs caractérisations:

- Echantillons cubiques de  $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$  ;
- Echantillons cubiques de  $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$ .

Le choix de ces géométries résulte d'un compromis entre, d'une part, la vitesse de diffusion qui ne doit pas être trop rapide afin de pouvoir relever les masses à intervalles de temps réguliers et bien espacés et, d'autre part, le temps nécessaire à l'expérimentation qui ne doit pas être non plus trop long. Le rapport entre le volume et la surface d'échange va du simple au double entre les deux géométries.



**Figure III.3.1.** Photographie des échantillons (Hêtre, Moabi, Ozigo et Sapin)

##### III.3.1.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, **Figure III.3.2**, comprend :

- 96 échantillons en  $15 \times 15 \times 15$  des quatre essences.
- 96 échantillons en  $30 \times 30 \times 30$  des quatre essences.

- Une enceinte climatique, d'une capacité volumique de 120 litres, régulée en température et en humidité relative.
- Une balance pour la mesure des masses avec une précision au centième de gramme.
- Une étuve pour le séchage des échantillons à la fin des essais de diffusion.



a. Enceinte climatique

b. Balance

c. Echantillons disposés en étagère

**Figure III.3.2.** Dispositif expérimental

### III.3.1.3. Plan d'expérience

L'objectif de ces essais est de caractériser le processus de diffusion en régime transitoire des essences tropicales étudiées dans des conditions d'humidité et de température contrôlées. De ce fait, il importe que celui-ci (processus de diffusion) soit étudié dans le cas de l'humidification (adsorption) et du séchage (désorption). L'étude sera menée dans deux directions : transversale et longitudinale. La première confond les directions radiale et tangentielle pour la simple raison que la connaissance de cette donnée est largement suffisante pour la caractérisation des phénomènes mécano-sorptifs de nos poutres à l'échelle structure (chapitre II). L'étude de la diffusion longitudinale permet de prendre en compte les effets de bords (abouts) dans les structures réelles.

Le choix des conditions climatiques est inspiré de la campagne d'essais réalisée in-situ à Franceville au Gabon. Des premiers relevés climatologiques réalisés (II.3.5), il ressort que les valeurs extrêmes de température et d'humidité dans l'ensemble des trois environnements climatiques étudiés (climatisé, abrité et non-abrité) oscillent respectivement de 12 à 43°C et de 27 à 100%. Pour des raisons techniques (contraintes dues à la machine) et pratiques (vis-à-vis de la réglementation), nous avons opté pour trois conditions d'humidité à température constante 20°C (température règlementaire de référence) :

- HR = 30% pour avoir un état sec : Cette valeur est quasiment atteinte dans les trois environnements étudiés.

- HR = 65% (valeur de référence) : Ce palier permet de vérifier la linéarité ou la non-linéarité du phénomène de diffusion sur la plage de mesure.
- HR = 90% pour avoir un état humide le plus proche possible (selon la capacité de l'enceinte climatique) de la valeur haute atteinte (100%).

Les difficultés, rencontrées pour réaliser cet essai avec des solutions salines, nous ont contraints à opter pour une enceinte climatique avec les difficultés connexes à la régulation de l'humidité pour des valeurs extrêmes.

Le plan d'expérience est résumé dans le **Tableau III.3.1** pour l'ensemble de la campagne d'essais de diffusion. Les conditions hygrométriques de l'ambiance sont fixées pour un régime transitoire jusqu'à obtention de l'équilibre hygroscopique de l'ensemble des échantillons quelque soit la géométrie.

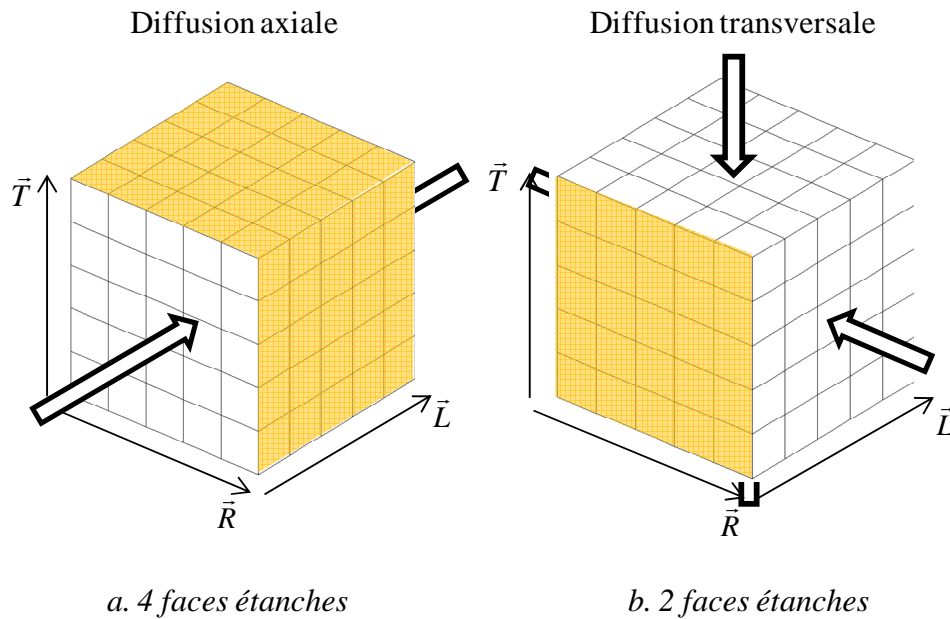
**Tableau III.3.1.** Plan d'expérience pour les essais de diffusion

Essence	Direction	Géométrie (mm)	Humidité Relative (%)					Nombre	Total
			30	65	90	65	30		
Sapin	L	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	48
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	
	TR	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	
Hêtre	L	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	48
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	
	TR	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	
Moabi	L	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	48
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	
	TR	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	
Ozigo	L	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	48
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	
	TR	15 x 15 x 15	30	65	90	65	30	12	
		30 x 30 x 30	30	65	90	65	30	12	

#### III.3.1.4. Préparation des échantillons et protocole des mesures

Au total, 24 échantillons ont été réalisés par géométrie et par essence. Répartis en deux groupes, les échantillons ont été pesés puis étanchés à l'aide d'une fine couche de paraffine de façon à imposer une direction de diffusion par groupe : longitudinale (*L*) ou transversale (*RT*), **Figure III.3.3.**





**Figure III.3.3.** Conditionnement des échantillons

Après une deuxième prise de masse, les échantillons ont été conditionnés dans l'enceinte climatique à une température de 20°C pour une humidité relative de 30% jusqu'à atteindre l'équilibre hydrique. Les échantillons sont placés sur quatre plateaux grillagés disposés en étagère dans l'enceinte climatique. Seules les faces non participantes au processus de diffusion sont en contact avec la grille.

La balance étant positionnée hors de l'enceinte climatique, les différentes prises de masse, tout au long de l'expérimentation, ont été réalisées à l'extérieur. Pour cela, chaque plateau est retiré de l'enceinte à tour de rôle. L'opération dure en moyenne 15 mn par plateau soit une heure pour l'ensemble des échantillons. Ces derniers étant assez massifs, l'ouverture de l'enceinte et l'opération de pesée engendre très peu de perturbation des états hydriques, au regard des résultats des tests préliminaires.

Les essais ont duré près de 10 mois et ont été interrompus suite à une panne de l'enceinte. L'arrêt s'est produit à la dernière condition du cycle (HR = 30% et T = 20°C) en phase de désorption, juste avant l'obtention des équilibres hygroscopiques des échantillons. Ces derniers ont ensuite été séchés à l'étuve pour la détermination des masses sèches utiles au calcul des teneurs en eau.

### III.3.2. Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons, par direction de diffusion, les courbes des cinétiques de diffusion pour les différents échantillons ainsi que les teneurs en eau obtenues aux différents équilibres hygroscopiques.

III.3.2.1. Teneur en eau d'équilibre

Pour chaque essence, les valeurs des différentes teneurs en eau, obtenues à l'équilibre, sont synthétisées dans des tableaux en annexes B. Ces valeurs ont été insérées dans les hystérésis de sorption obtenues dans la section III.2, afin de vérifier si elles sont comprises dans le domaine délimité par le cycle complet adsorption-désorption. Les sections qui suivent présentent, pour chaque essence, les courbes obtenues.

III.3.2.1.1 Sapin

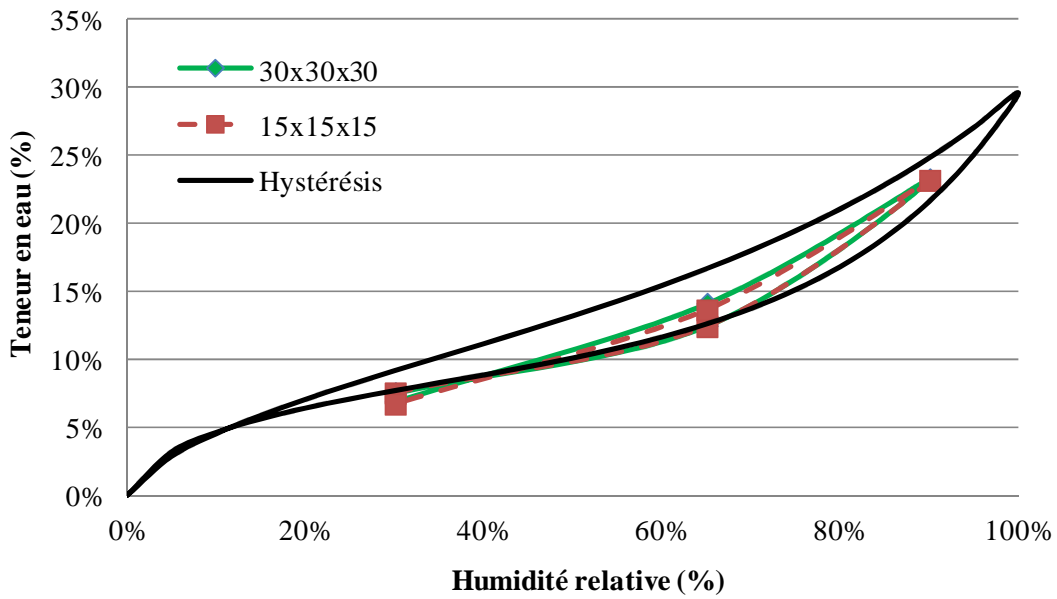


Figure III.3.4. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction longitudinale

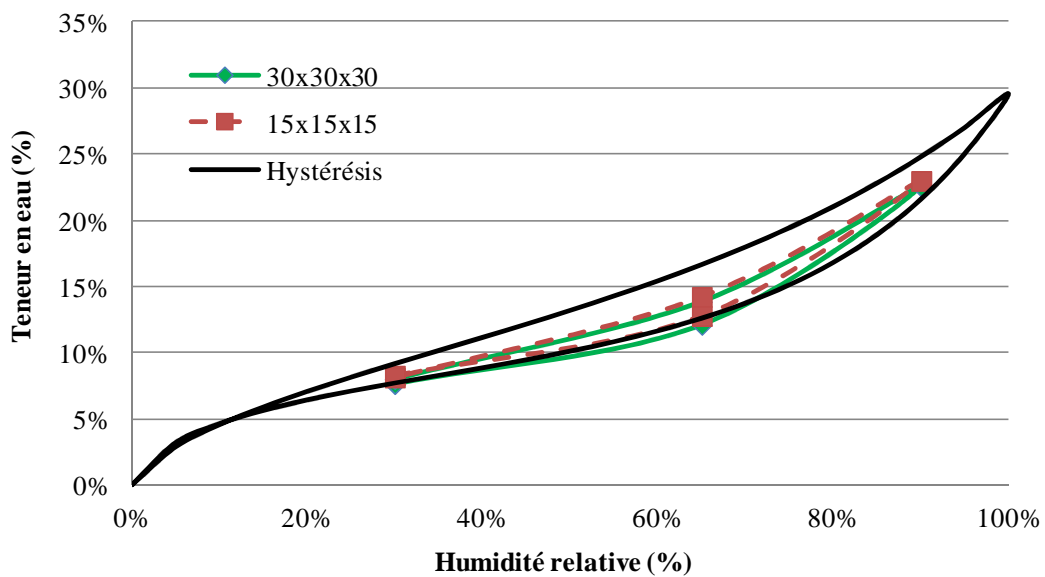


Figure III.3.5. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction transversale

III.3.2.1.2 Hêtre

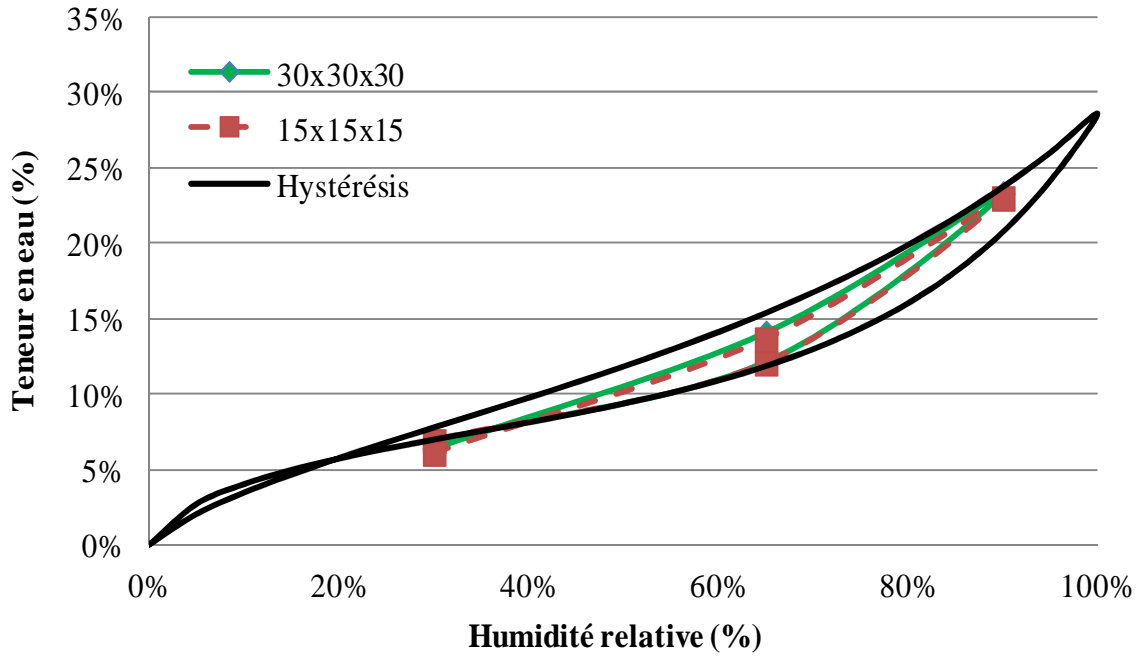


Figure III.3.6. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction longitudinale

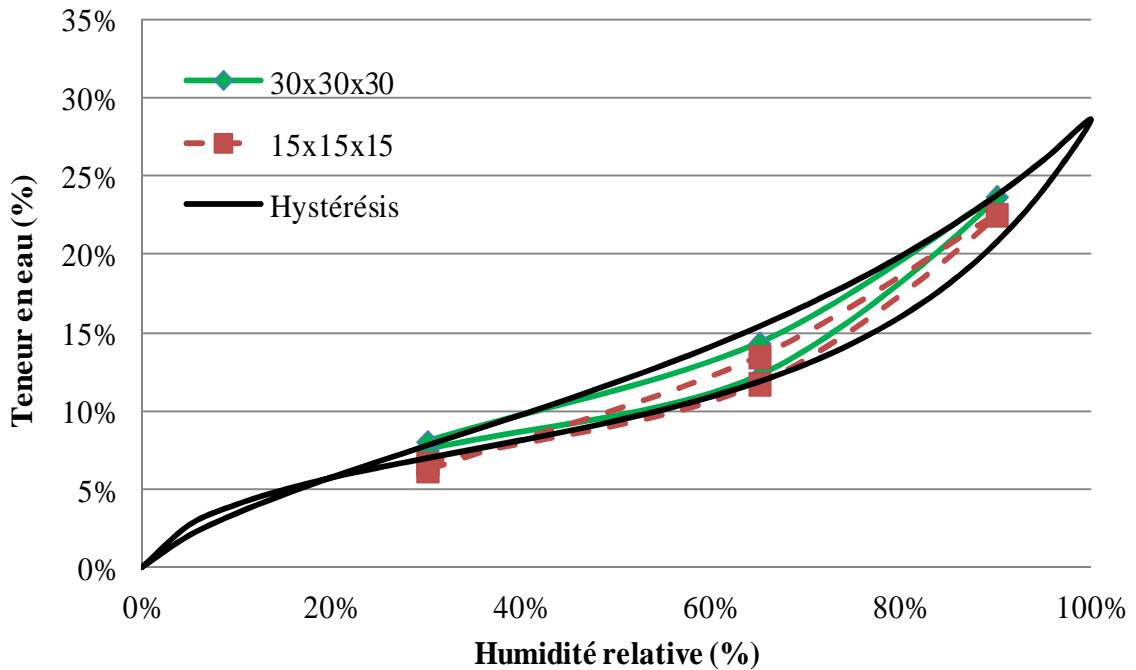


Figure III.3.7. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction transversale

III.3.2.1.3 Moabi

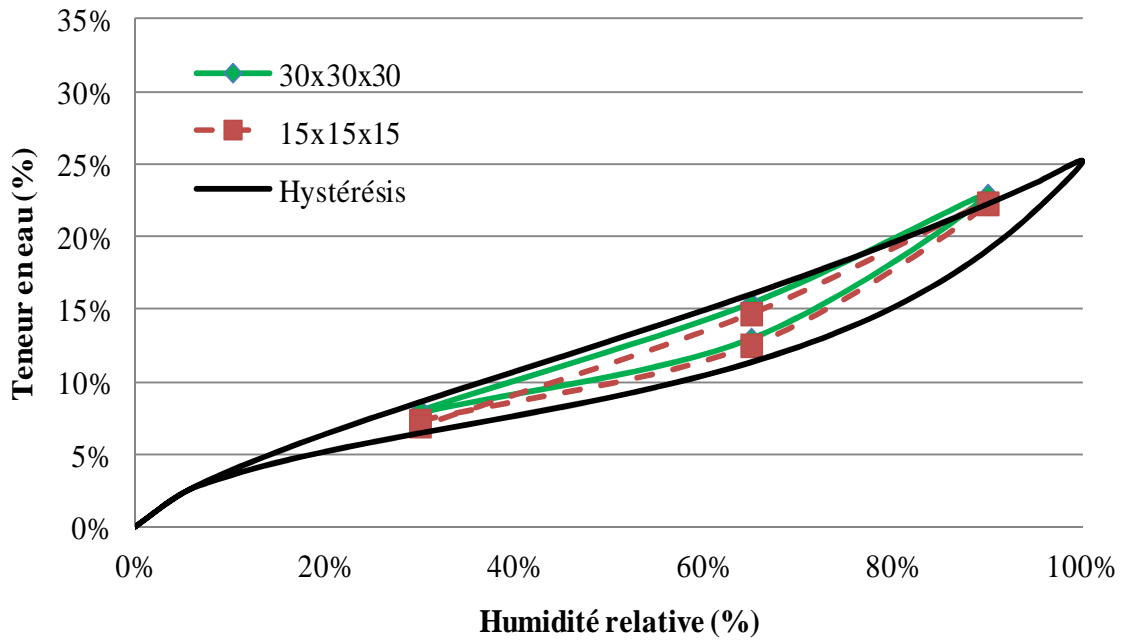


Figure III.3.8. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction longitudinale

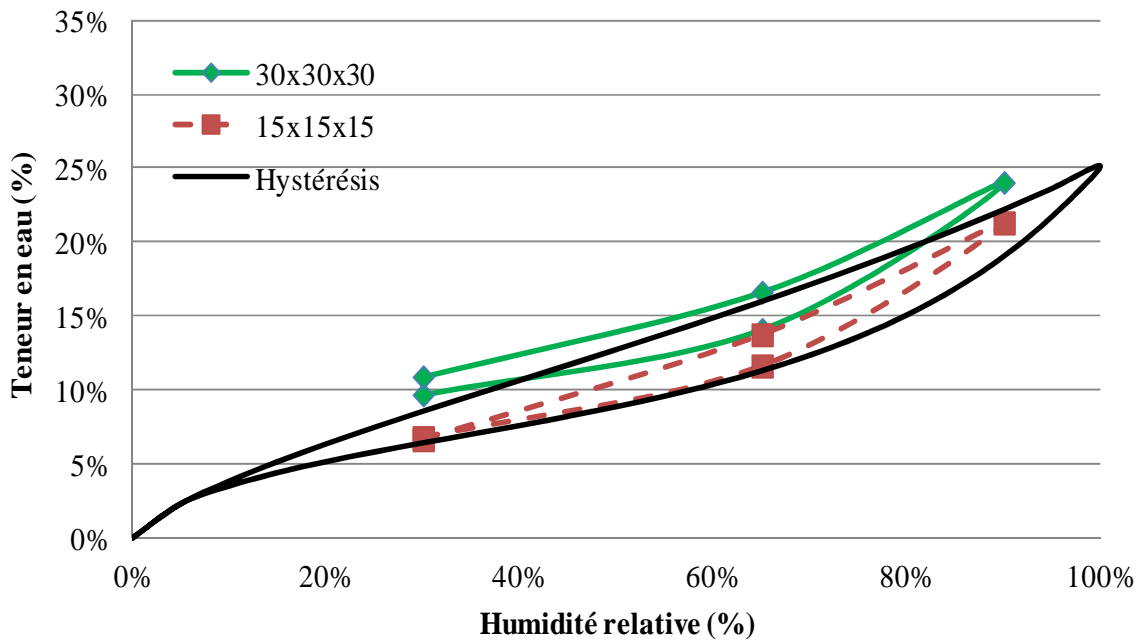


Figure III.3.9. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction transversale

III.3.2.1.4 Ozigo

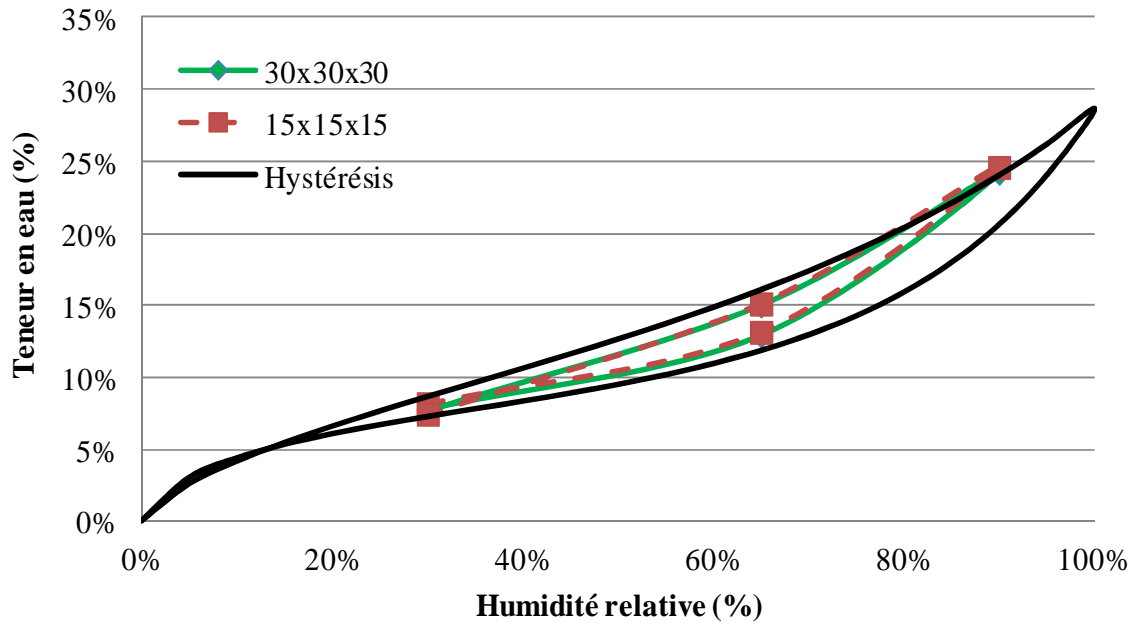


Figure III.3.10. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction longitudinale

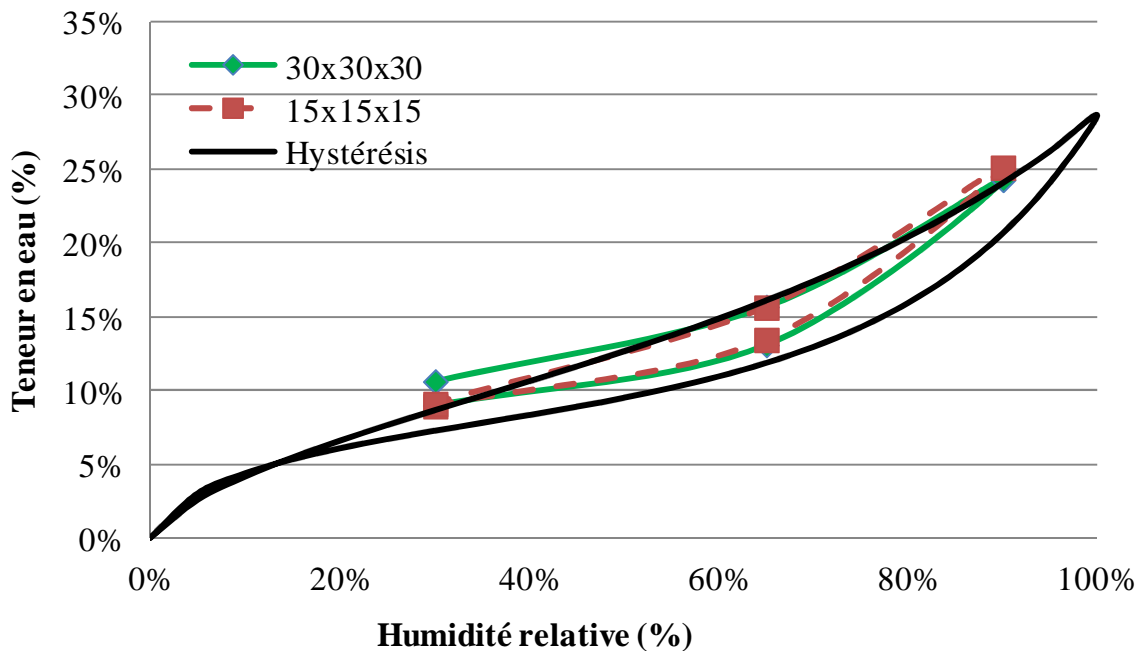


Figure III.3.11. Teneur en eau d'équilibre et hystérésis suivant la direction transversale

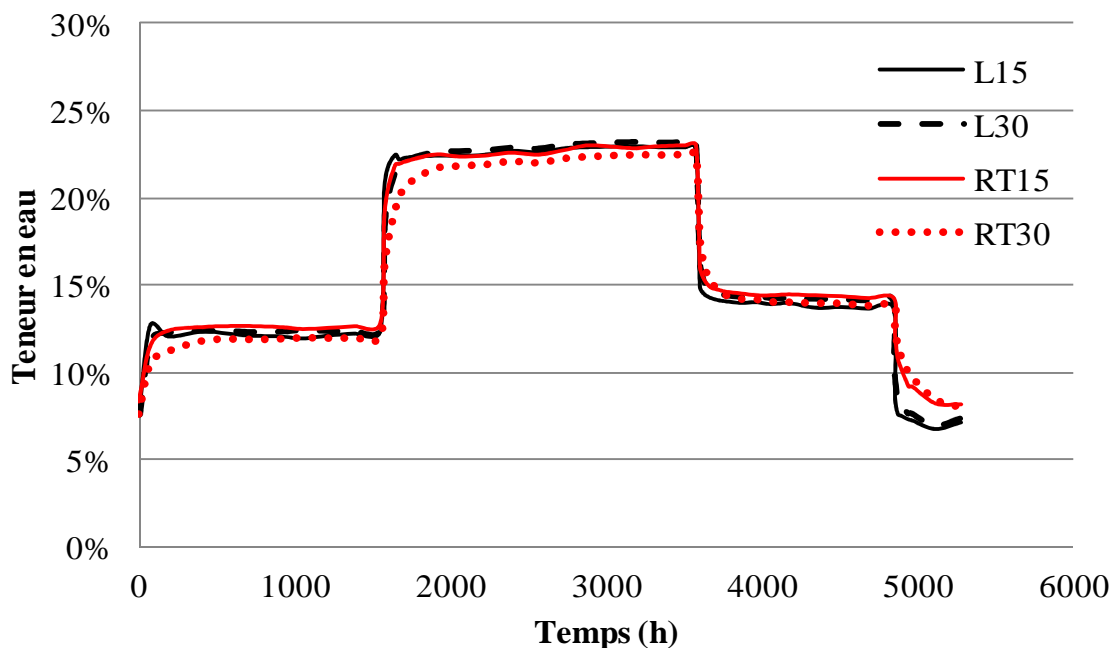
### III.3.2.1.5 Observations

Dans l'ensemble, les hystérésis sont toutes incluses dans le domaine délimité par le cycle complet pour chaque essence, à l'exception du Moabi et dans une moindre mesure de l'Ozigo dans la direction transversale. Si l'on considère que les teneurs eau à 30% d'humidité relative en désorption sont erronées à cause de l'arrêt brutal de l'expérimentation, le décalage de l'hystérésis du Moabi pour les échantillons 30 x 30 x 30 suscite quelques interrogations sur la pertinence du résultat ; d'autant plus que les échantillons de 15 x 15 x 15 donnent une hystérésis moyenne qui s'inscrit parfaitement dans la courbe enveloppe. N'a-t-on pas atteint les équilibres hydriques avant changement de condition ? Cette hypothèse semble invraisemblable au regard de l'allure des cinétiques (section III.3.2.2).

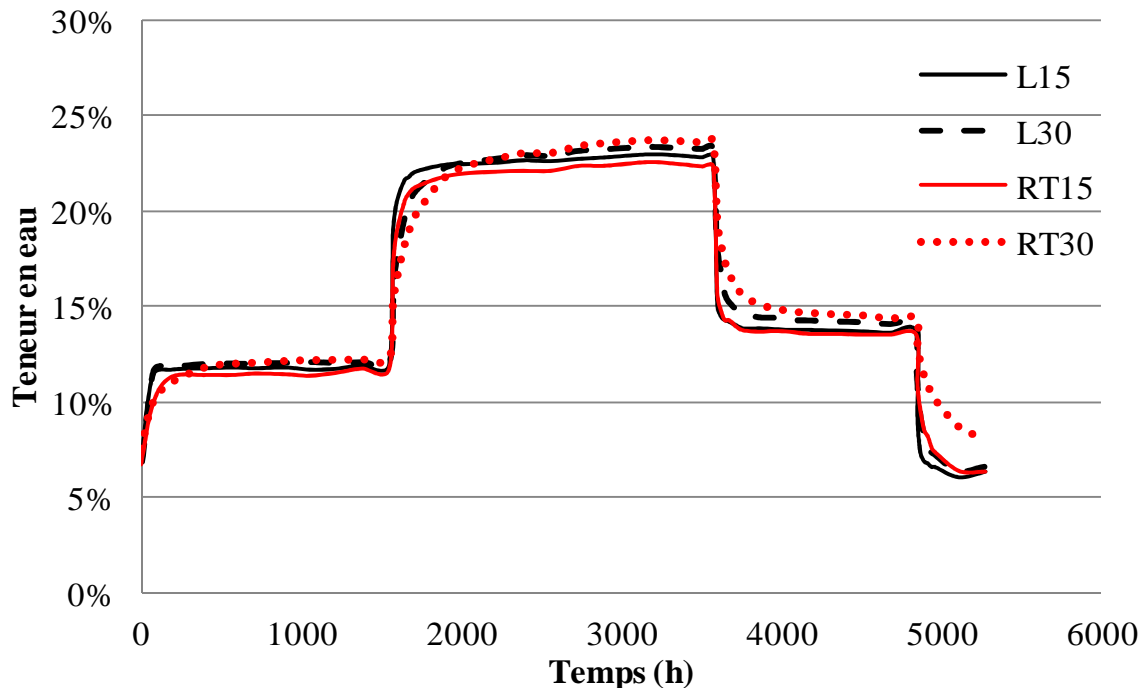
### III.3.2.2. Cinétique de diffusion

L'ensemble des courbes est présenté en annexes B. Ci-dessous, nous présentons les courbes moyennes obtenues par direction et par géométrie pour chaque essence.

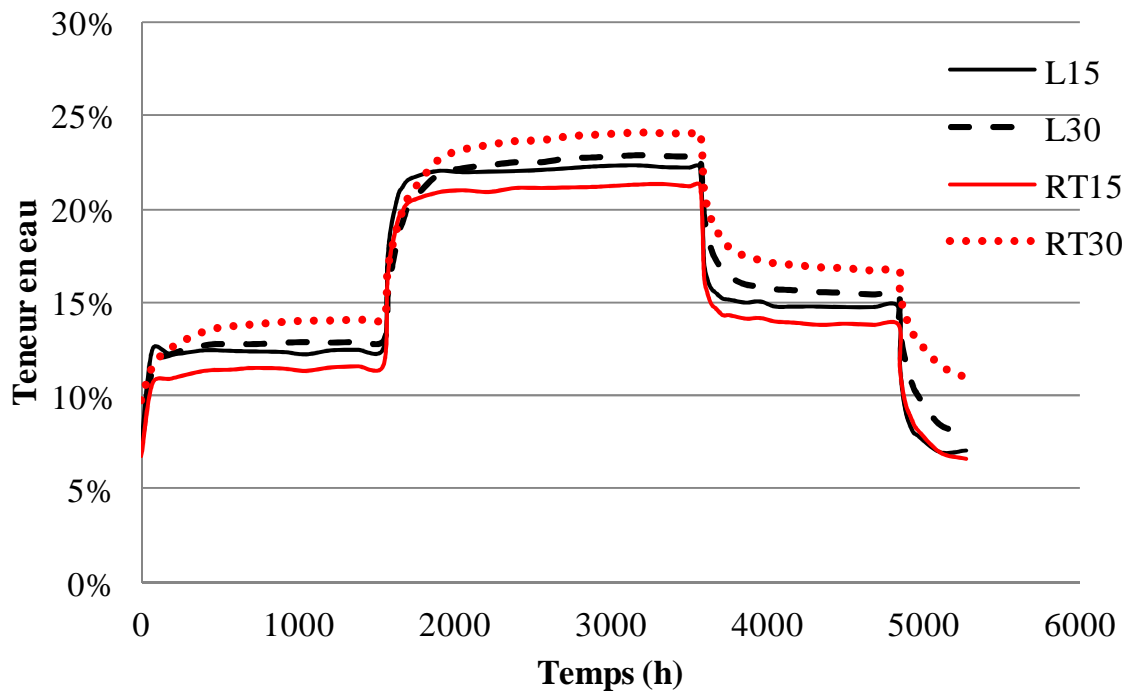
#### III.3.2.2.1 Sapin



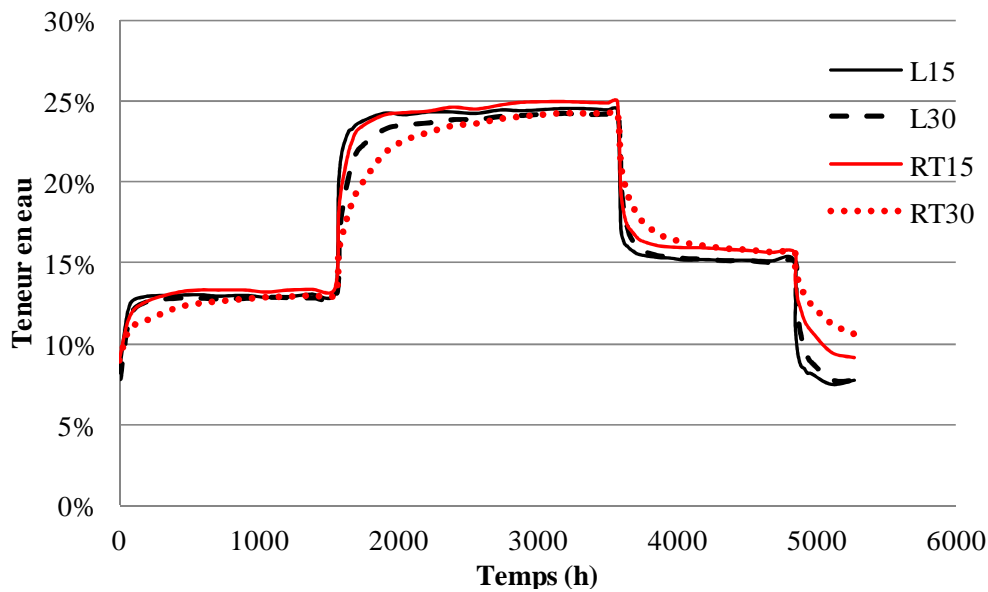
**Figure III.3.12.** Cinétique de diffusion dans le bois de Sapin (L : direction longitudinale ; RT : direction transversale)

III.3.2.2.2 *Hêtre*

**Figure III.3.13.** Cinétique de diffusion dans le bois de Hêtre (L : direction longitudinale ; RT : direction transversale)

III.3.2.2.3 *Moabi*

**Figure III.3.15.** Cinétique de diffusion dans le bois de Moabi (L : direction longitudinale ; RT : direction transversale)

III.3.2.2.4 *Ozigo*

**Figure III.3.14.** Cinétique de diffusion dans le bois d'Ozigo (L : direction longitudinale ; RT : direction transversale)

III.3.2.2.5 *Observations*

Au regard des **Figures III.3.12 à III.3.15**, les observations suivantes peuvent être relevées :

- L'allure des courbes est dans l'ensemble identique.
- La cinétique de diffusion est plus lente dans la direction transversale que dans la direction longitudinale.
- L'effet des hystérésis est perceptible entre les deux phases du cycle. En effet, la désorption se distingue bien de l'adsorption avec des valeurs de teneur en eau à l'équilibre plus élevées.
- Dans l'ensemble, les échantillons (notamment les feuillus) n'ont pas atteint leur équilibre hydrique pour la dernière condition hygroscopique.
- Dans la direction transversale, la courbe des échantillons de Moabi est décalée par rapport à l'allure générale.

### III.3.3. Identification des paramètres de diffusion

#### III.3.3.1. Hypothèse de calcul

Comme dit précédemment, les essais de diffusion sont réalisés dans deux directions : longitudinale (*L*) et transversale (*RT*). Dans la direction transversale, on pose l'hypothèse expérimentale selon laquelle il existe un rapport d'orthotropie de deux entre la direction tangentielle



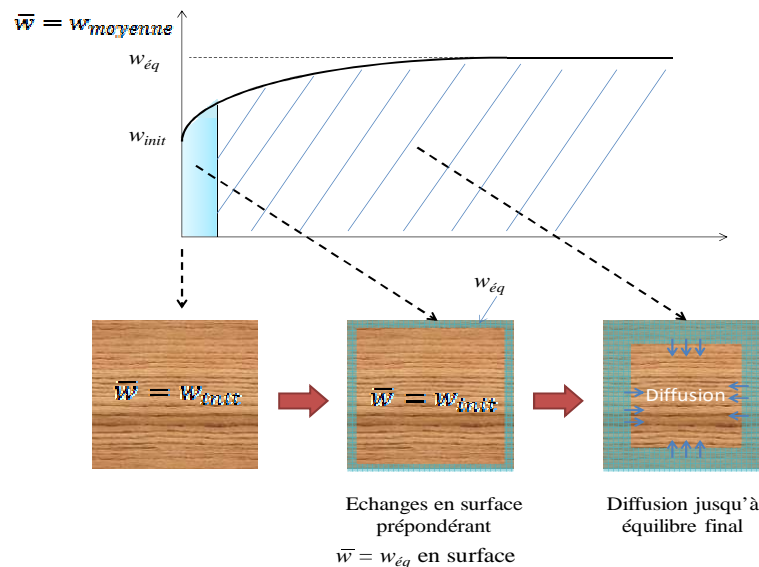
( $T$ ) et la direction radiale ( $R$ ). Cette hypothèse est tirée des données expérimentales [AGO 01] [MOU 02] [KOU 04] qui donnent un rapport situé entre 1,5 et 2. Ainsi, l'équation (III.1.18) écrite dans les trois directions se présente comme suit :

$$D_w^L(w) = D_0^L \cdot \exp(k_L \cdot w) \quad (\text{III.3.1})$$

$$D_w^T(w) = D_0^T \cdot \exp(k_T \cdot w) \quad (\text{III.3.2})$$

$$D_w^R(w) = 2D_w^T \quad (\text{III.3.3})$$

La détermination du coefficient d'échange surfacique est effectuée à partir des premiers instants du processus d'adsorption pour lesquels les effets de diffusion mettent en jeu principalement les échanges surfaciques (entre l'air et le matériau) afin d'humidifier les premières fibres de bois. Une fois que ces premières fibres ont atteint leur équilibre hydrique, nous considérons que l'évolution de l'humidité moyenne n'est qu'un effet de diffusion massique, **Figure III.3.16**.



**Figure III.3.16.** Schématisation du processus de transfert hydrique dans le cas d'une adsorption

Ainsi, à partir de l'équation (III.1.20), nous avons calé par minimisation de l'erreur entre la courbe expérimentale et la modélisation, le coefficient d'échange surfacique  $S$  à  $10^{-5} \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ , pour l'ensemble de l'expérimentation. Nous supposons alors que ce paramètre est intrinsèque au flux d'air et ne dépend ni de l'essence choisie, ni du sens de diffusion.

La détermination de  $D_w^\alpha$  et de  $K_\alpha$  est indifférenciée vis-à-vis du sens de la diffusion (désorption ou adsorption). Ce choix simplificateur se justifie par l'utilisation postérieure de ces données dans le cas des structures réelles évoluant sous conditions climatiques naturelles et variables. Il s'impose alors, dans la modélisation, de faire un compromis entre les deux phases de manière à avoir la meilleure approximation possible du modèle par rapport aux données expérimentales.

III.3.3.2. Direction longitudinale

Les courbes simulées (Modèles) sont réalisées à partir de la moyenne des paramètres de diffusion obtenues pour les deux géométries par essence.

III.3.3.2.1 Sapin

Tableau III.3.2. Valeurs moyennes des paramètres de diffusion longitudinale pour le Sapin

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_L$ (m <sup>2</sup> .s-1)	8,72E-10	2,61E-11	1,2E-09	0	<b>1,04E-09</b>	1,69E-10
$K_L$	0	0	0	0	<b>0</b>	0

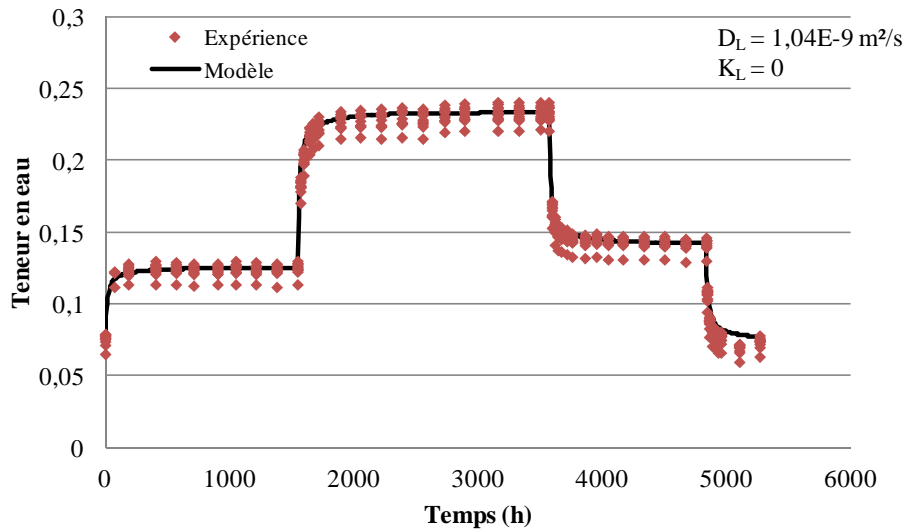


Figure III.3.17. Simulation de la diffusion longitudinale du Sapin en 30 x 30 x 30

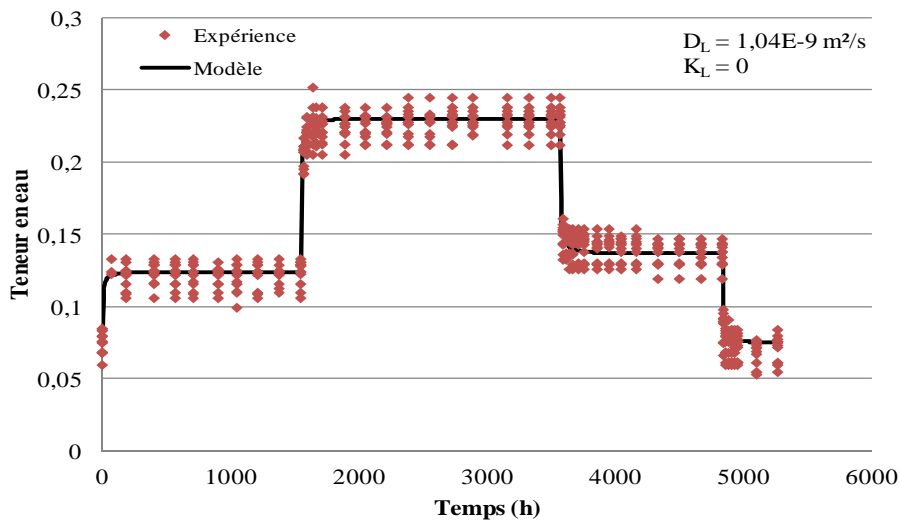


Figure III.3.18. Simulation de la diffusion longitudinale du Sapin en 15 x 15 x 15

III.3.3.2.2 Hêtre

Tableau III.3.3. Valeurs moyennes des paramètres de diffusion longitudinale pour le Hêtre

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_L$	4,29E-10	3,09E-11	6,19E-10	6,13E-11	<b>5,24E-10</b>	1,08E-10
$K_L$	0	0	0	0	<b>0</b>	0

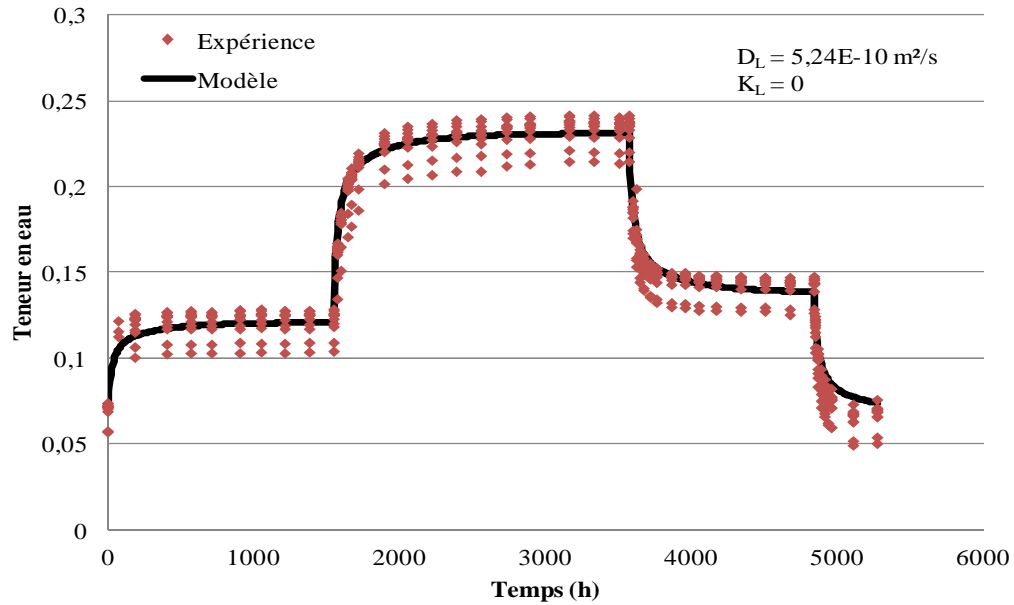


Figure III.3.19. Simulation de la diffusion longitudinale du Hêtre en 30 x 30 x 30

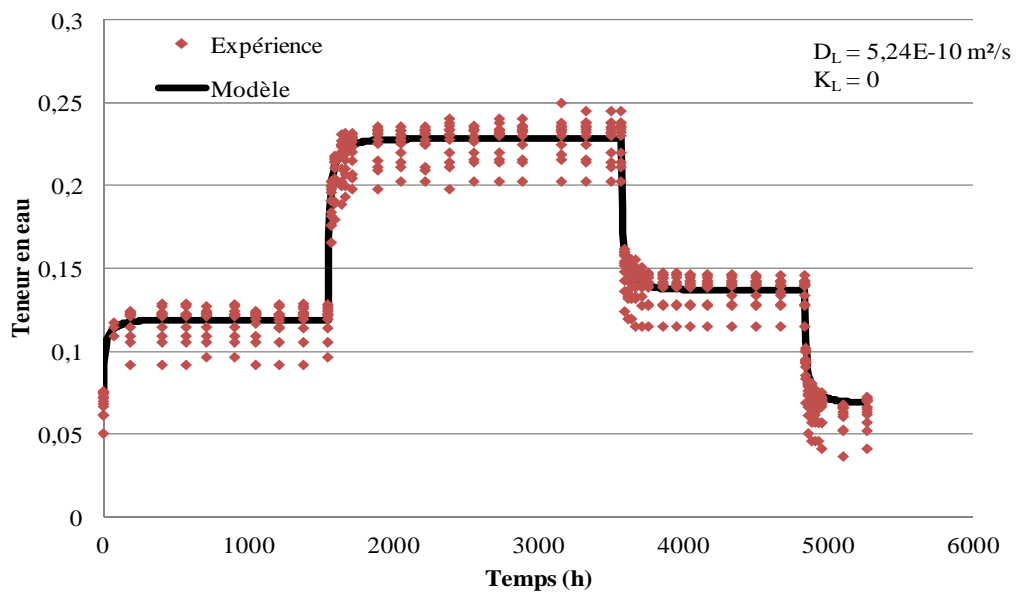
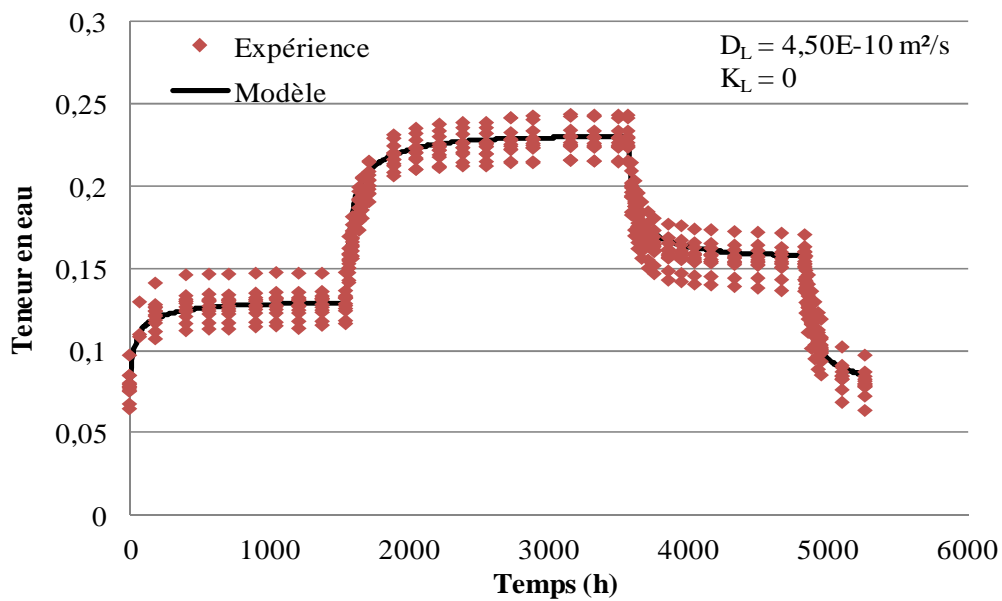


Figure III.3.20. Simulation de la diffusion longitudinale du Hêtre en 15 x 15 x 15

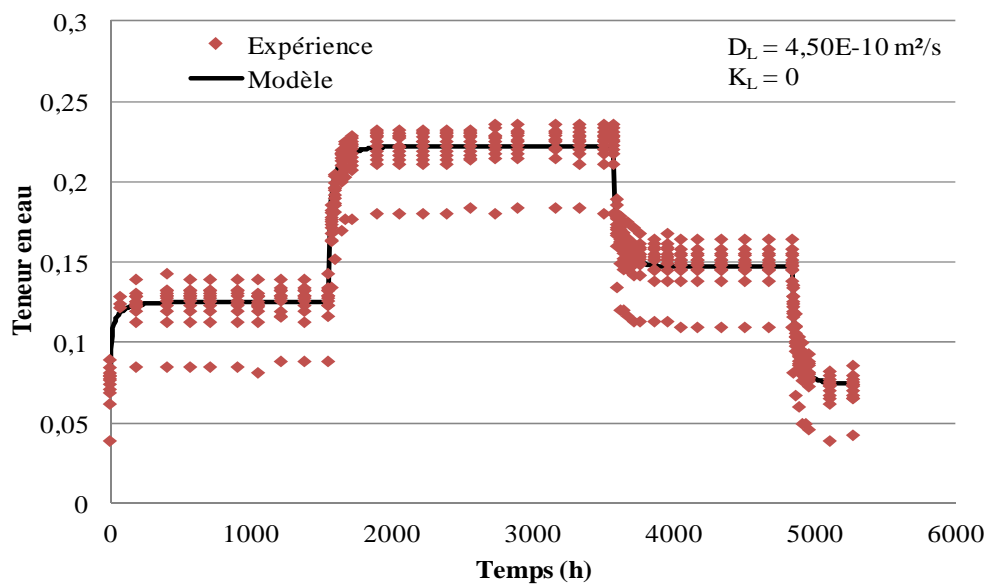
III.3.3.2.3 Moabi

**Tableau III.3.4.** Valeurs moyennes des paramètres de diffusion longitudinale pour le Moabi

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_L$	4,68E-10	2,74E-10	4,33E-10	5,36E-11	<b>4,50E-10</b>	1,947E-10
$K_L$	0	0	0	0	<b>0</b>	0



**Figure III.3.21.** Simulation de la diffusion longitudinale du Moabi en 30 x 30 x 30

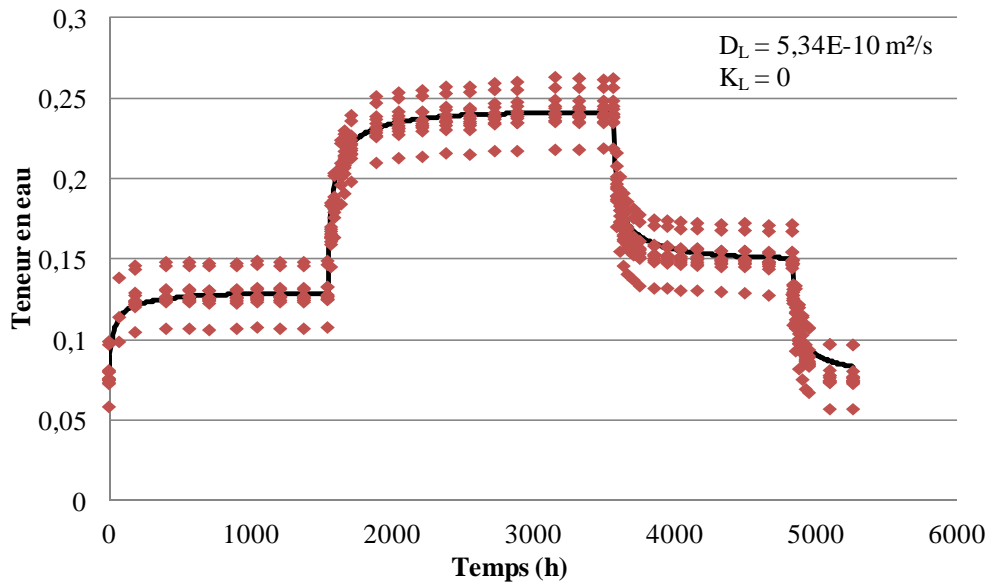


**Figure III.3.22.** Simulation de la diffusion longitudinale du Moabi en 15 x 15 x 15

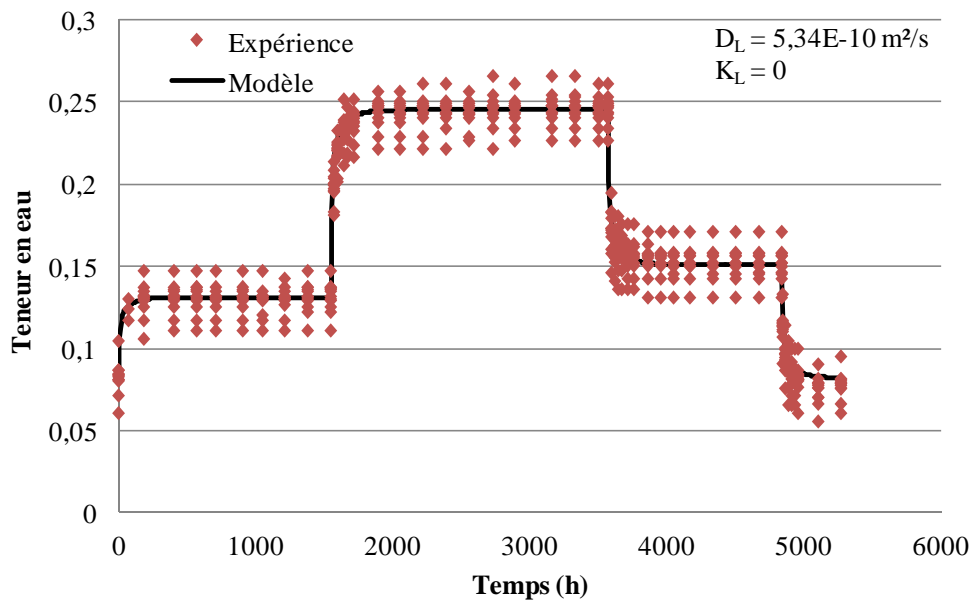
III.3.3.2.4 *Ozigo*

**Tableau III.3.5.** Valeurs moyennes des paramètres de diffusion longitudinale pour l’Ozigo

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_L$	4,95E-10	8,36E-11	5,73E-10	2,38E-11	<b>5,34E-10</b>	7,20E-11
$K_L$	0	0	0	0	<b>0</b>	0



**Figure III.3.23.** Simulation de la diffusion longitudinale de l’Ozigo en 30 x 30 x 30



**Figure III.3.24.** Simulation de la diffusion longitudinale de l’Ozigo en 15 x 15 x 15

III.3.3.3. Direction transversale

Comme précédemment, les courbes simulées (Modèles) sont réalisées à partir de la moyenne des paramètres de diffusion obtenues pour les deux géométries par essence.

III.3.3.3.1 Sapin

Tableau III.3.6. Valeurs moyennes des paramètres de diffusion transversale pour le Sapin

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne Sapin	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_T$	1,12E-10	1,97E-11	1,35E-10	0	<b>1,24E-10</b>	1,84E-11
$K_T$	2,48E-01	8,29E-03	2,50E-01	0	<b>2,49E-01</b>	6,12E-03

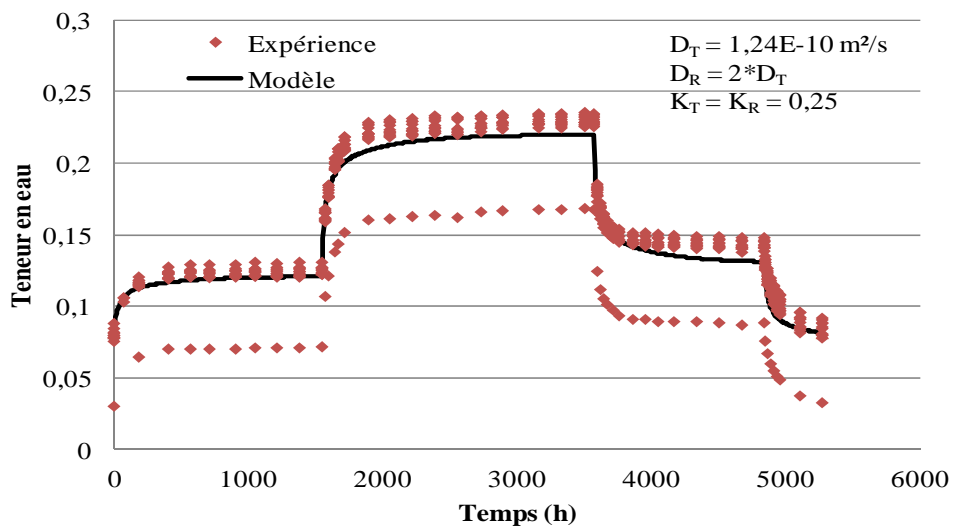


Figure III.3.25. Simulation de la diffusion transversale pour le Sapin en 30 x 30 x 30

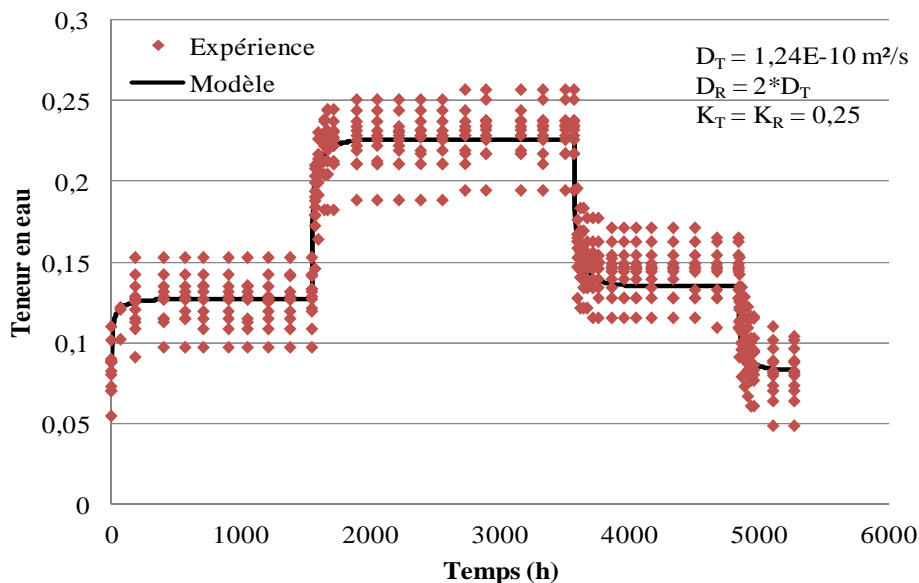


Figure III.3.26. Simulation de la diffusion transversale pour le Sapin en 15 x 15 x 15

III.3.3.3.2 Hêtre

Tableau III.3.7. Valeurs moyennes des paramètres de diffusion transversale pour le Hêtre

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_T$	8,00E-11	0	9,92E-11	1,51E-11	<b>8,96E-11</b>	1,43E-11
$K_T$	2,48E-01	8,66E-03	2,48E-01	8,66E-03	<b>2,48E-01</b>	8,47E-03

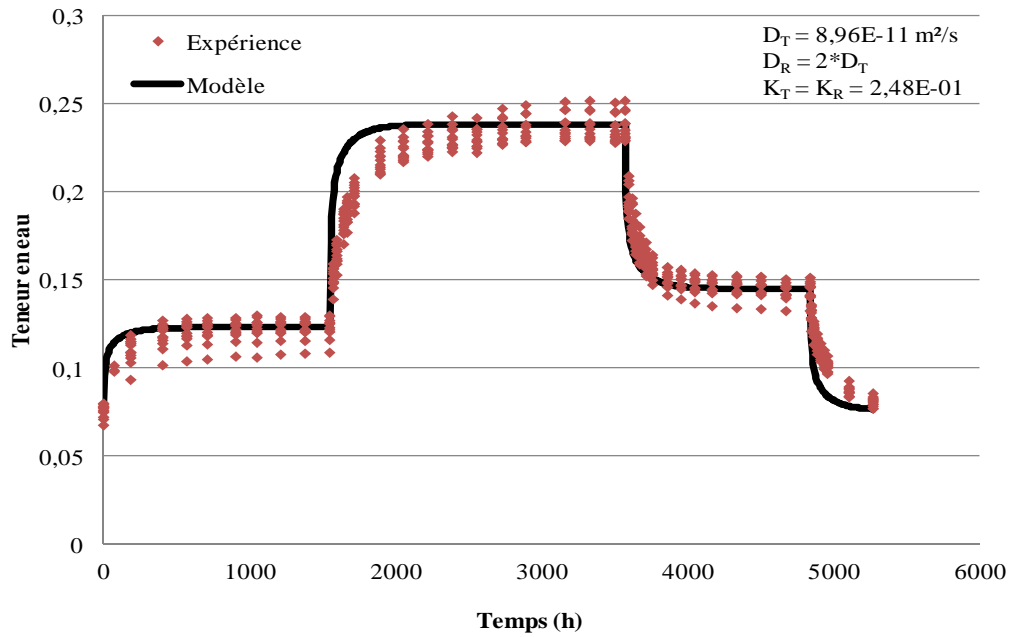


Figure III.3.27. Simulation de la diffusion transversale pour le Hêtre en 30 x 30 x 30

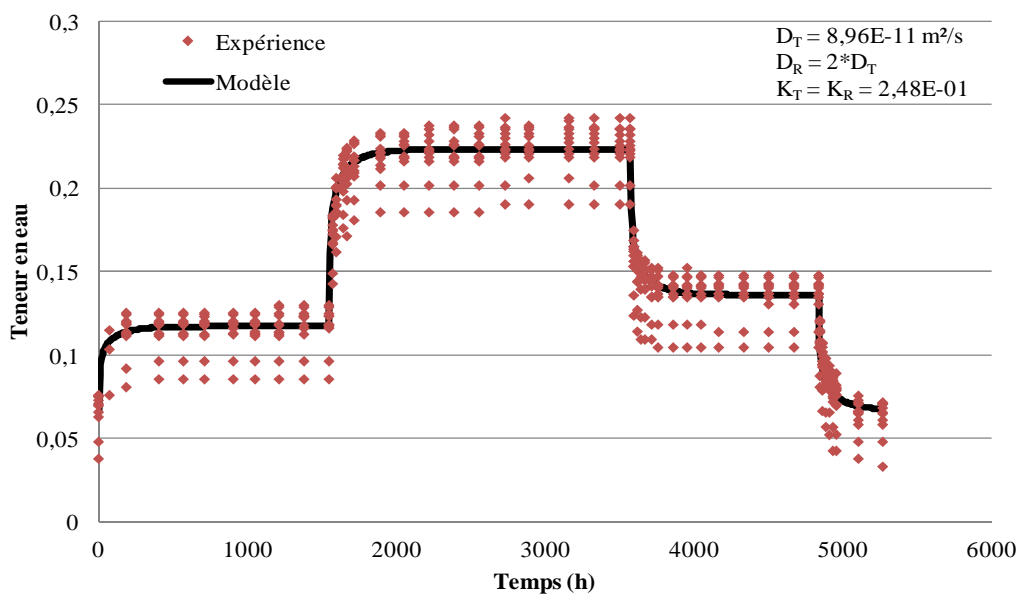
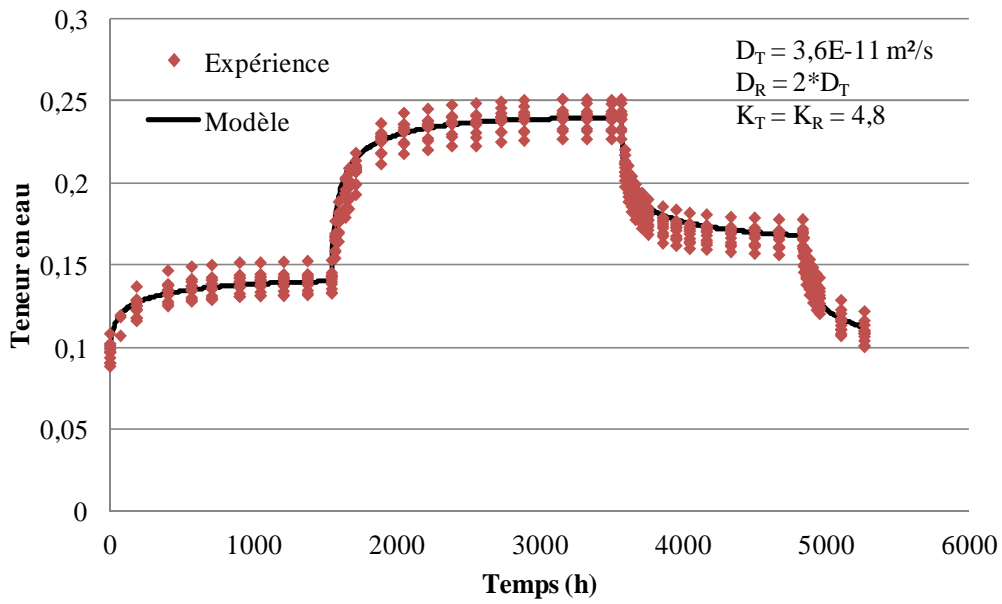


Figure III.3.15. Simulation de la diffusion transversale pour le Hêtre en 15 x 15 x 15

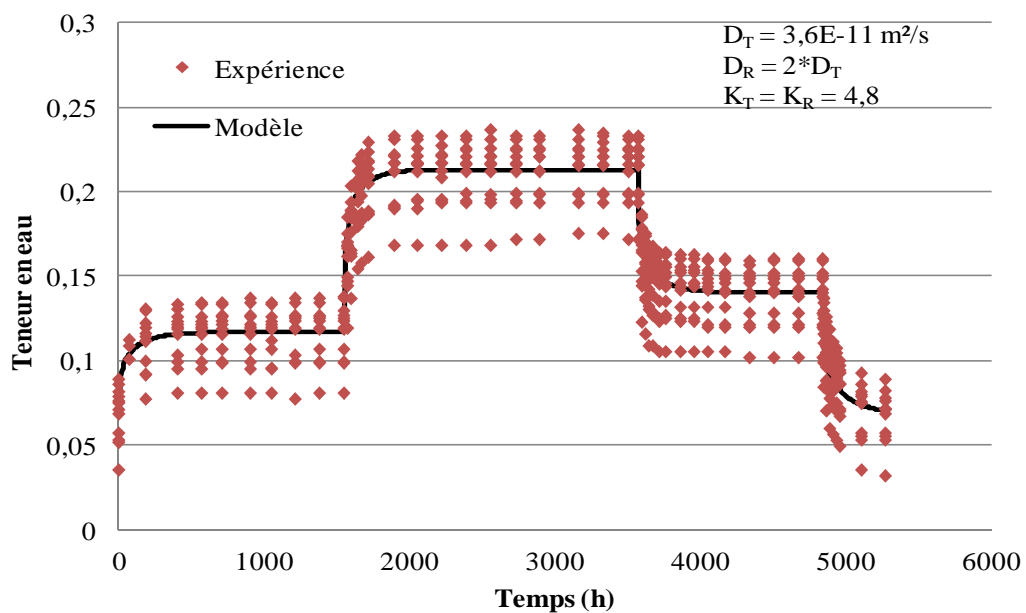
III.3.3.3 Moabi

**Tableau III.3.8.** Valeurs moyennes des paramètres de diffusion transversale pour le Moabi

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_T$	3,60E-11	0	3,60E-11	0	<b>3,60E-11</b>	0
$K_T$	4,80	0	4,80	0	<b>4,80</b>	0



**Figure III.3.28.** Simulation de la diffusion transversale pour le Moabi en 30 x 30 x 30



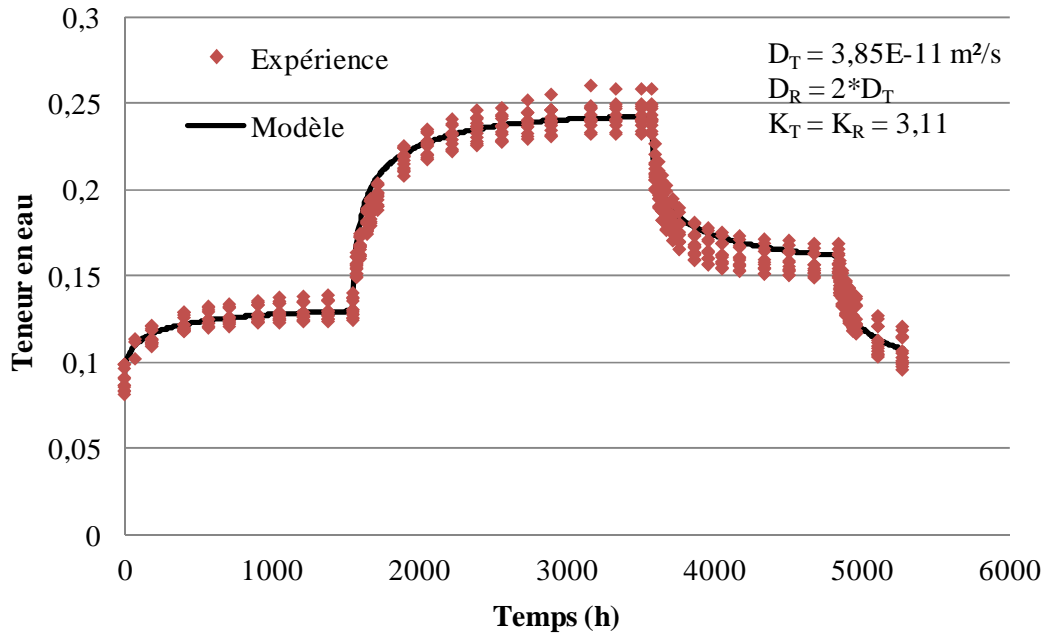
**Figure III.3.15.** Simulation de la diffusion transversale pour le Moabi en 15 x 15 x 15



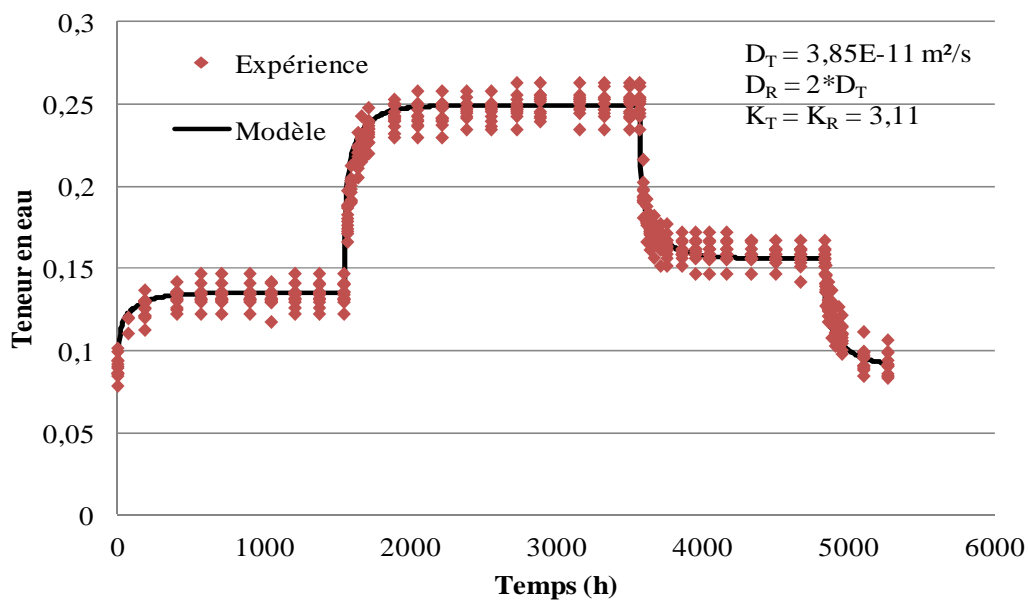
III.3.3.3.4 Ozigo

**Tableau III.3.9.** Valeurs moyennes des paramètres de diffusion transversale pour l’Ozigo

Paramètres	Echantillons 15 x 15 x 15		Echantillons 30 x 30 x 30		Moyenne	Ecart type
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
$D_T$	3,61E-11	7,66E-12	4,09E-11	1,01E-11	<b>3,85E-11</b>	9,51E-12
$K_T$	2,80	0	3,43	6,88E-01	<b>3,11</b>	5,91E-01



**Figure III.3.29.** Simulation de la diffusion transversale pour l’Ozigo en 30 x 30 x 30



**Figure III.3.30.** Simulation de la diffusion transversale pour l’Ozigo en 15 x 15 x 15

## III.3.3.4. Synthèse

**Tableau III.3.10.** Tableau récapitulatif des paramètres de diffusion pour les quatre essences avec un coefficient d'échange surfacique  $S = 10^{-5}$  kg/sm<sup>2</sup>.

Essence	Direction	Géométrie	Paramètres					
			$K_L$	$K_T$	$K_R$	$D_L$	$D_T$	$D_R$
Sapin	L	15 x 15 x 15	0			8,72E-10		
		30 x 30 x 30	0			1,20E-09		
	RT	15 x 15 x 15		2,48E-01	2,48E-01		1,12E-10	2,24E-10
		30 x 30 x 30		2,50E-01	2,50E-01		1,35E-10	2,70E-10
	<b>Moyenne</b>		<b>0</b>	<b>2,49E-01</b>	<b>2,49E-01</b>	<b>1,04E-09</b>	<b>1,24E-10</b>	<b>2,47E-10</b>
	<b>Ecart type</b>		<b>0</b>	<b>6,12E-03</b>		<b>1,69E-10</b>	<b>1,84E-11</b>	
Hêtre	L	15 x 15 x 15	0			4,29E-10		
		30 x 30 x 30	0			6,19E-10		
	RT	15 x 15 x 15		2,48E-01	2,48E-01		8,00E-11	1,60E-10
		30 x 30 x 30		2,48E-01	2,48E-01		9,92E-11	1,98E-10
	<b>Moyenne</b>		<b>0</b>	<b>2,48E-01</b>	<b>2,48E-01</b>	<b>5,24E-10</b>	<b>8,96E-11</b>	<b>1,79E-10</b>
	<b>Ecart type</b>		<b>0</b>	<b>8,47E-03</b>		<b>1,08E-10</b>	<b>1,43E-11</b>	
Moabi	L	15 x 15 x 15	0			4,68E-10		
		30 x 30 x 30	0			4,33E-10		
	RT	15 x 15 x 15		4,80E+00	4,80E+00		3,60E-11	7,20E-11
		30 x 30 x 30		4,80E+00	4,80E+00		3,60E-11	7,20E-11
	<b>Moyenne</b>		<b>0</b>	<b>4,80E+00</b>	<b>4,80E+00</b>	<b>4,50E-10</b>	<b>3,60E-11</b>	<b>7,20E-11</b>
	<b>Ecart type</b>		<b>0</b>	<b>0</b>		<b>1,94E-10</b>	<b>0</b>	
Ozigo	L	15 x 15 x 15	0			4,95E-10		
		30 x 30 x 30	0			5,73E-10		
	RT	15 x 15 x 15		2,80E+00	2,80E+00		3,61E-11	7,22E-11
		30 x 30 x 30		3,43E+00	3,43E+00		4,09E-11	8,18E-11
	<b>Moyenne</b>		<b>0</b>	<b>3,11E+00</b>	<b>3,12E+00</b>	<b>5,34E-10</b>	<b>3,85E-11</b>	<b>7,70E-11</b>
	<b>Ecart type</b>		<b>0</b>	<b>5,91E-01</b>		<b>7,20E-11</b>	<b>9,51E-12</b>	

Les résultats synthétisés dans le **Tableau III.3.10** nous permettent de ressortir les points suivants :

- L'effet de la direction de diffusion est bien mis en évidence, à savoir le bois diffuse plus vite dans la direction longitudinale avec  $D_L \gg D_R > D_T$ .
- L'effet lié à l'essence est également observé : il correspond, pour chaque essence, à des paramètres spécifiques. En général, les bois résineux diffusent plus vite que les bois feuillus : on peut le constater pour le Sapin qui a des coefficients de diffusion beaucoup plus élevés que les trois autres essences. Une similitude peut être faite entre le Hêtre et l'Ozigo dans la

direction longitudinale. En somme, on peut établir l'ordre suivant :  $D_{\text{Sapin}} > D_{\text{Hêtre}} \geq D_{\text{Ozigo}} > D_{\text{Moabi}}$ .

- Les valeurs de coefficient de diffusion dans la direction transversale pour le Hêtre et le Sapin sont quasiment dans le même ordre de grandeur que celles rencontrées dans la bibliographie [AGO 01] [MOU 02] [KOU 04]. Par exemple, Agoua [AGO 01] obtient des coefficients moyens d'environ  $10^{-10}$  et  $2.10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s respectivement dans la direction tangentielle et radiale sur des échantillons de Hêtre de 12 à 15 mm d'épaisseur. En revanche, dans la direction longitudinale, nos valeurs sont deux à trois fois moins importantes.
- Dans la direction longitudinale, le coefficient  $K_L$  est nulle quel que soit l'essence. Cette constatation nous amène à conclure que le processus de diffusion est linéaire dans cette direction car il ne dépend pas du taux d'humidité dans le bois.

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement hygroscopique et le processus de diffusion de deux feuillus tropicaux (le Moabi et l'Ozigo) en les comparant à deux essences tempérées (le Hêtre : feuillu ; le Sapin : résineux).

Les isothermes de sorption ont été obtenues en utilisant des solutions salines dans des cloches à vide maintenues dans une pièce à température constante. Le modèle d'hystérésis, basé sur l'approche thermodynamique développée par Merakeb [MER 06], permet une bonne simulation de l'ensemble des isothermes de sorption. Celles-ci sont quasiment superposables pour le Hêtre et l'Ozigo, voire pour le Sapin. Aux basses humidités, le phénomène d'hystérésis est peu prononcé pour l'ensemble des isothermes.

L'étude des processus diffusifs et la détermination des paramètres diffusifs montrent que les trois essences feuillues diffusent beaucoup moins vite que le Sapin (essence résineuse). On observe une bonne affinité entre l'Ozigo et le Hêtre. Le processus de diffusion dans la direction longitudinale est largement plus important que dans les autres directions. On note, pour les deux feuillus tropicaux, un facteur supérieur à 12 entre la direction longitudinale et la direction tangentielle. Du fait que le paramètre de non-linéarité dans la direction longitudinale  $K_L$  soit nul, on peut supposer que la diffusion longitudinale a un comportement diffusif linéaire, et donc ne dépend pas de la teneur en eau du bois.

Les structures bois en service sont non seulement soumises aux variations hygroscopiques aléatoires mais également aux contraintes mécaniques. Celles-ci ont notamment un impacte sur le comportement hydrique qui affecte la réponse mécanique du matériau. Ainsi, la connaissance des paramètres diffusifs couplés aux charges mécaniques sous basse et haute humidité permettra de mieux circonscrire le comportement mécanique des structures bois. Le chapitre suivant s'intéressera à l'étude du comportement différé sous basse et haute humidité.

# **CHAPITRE IV. COMPORTEMENT MECANIQUE DIFFERE DES BOIS TROPICAUX EN AMBIANCE CONTROLEE :**

## **EXPERIMENTATION ET MODELISATION**

<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>153</b>
<b>IV.2. Classification mécanique des bois d'œuvre vis-à-vis de l'Eurocode 5 .....</b>	<b>154</b>
IV.2.1. Notion de valeurs caractéristiques .....	154
IV.2.2. Notion de classes de résistance mécanique.....	155
IV.2.3. Affectation à une classe de résistance.....	155
<b>IV.3. Approche rhéologique du comportement différé .....</b>	<b>156</b>
IV.3.1. Approche rhéologique du fluage.....	156
<b>IV.4. Expérimentation .....</b>	<b>158</b>
IV.4.1. Caractérisation physique et mécanique des deux essences.....	158
IV.4.2. Description du dispositif expérimental long-terme .....	159
IV.4.2.1. Echantillonnage .....	159
IV.4.2.2. Anatomie des échantillons .....	159
IV.4.2.3. Masse volumique humide des échantillons .....	160
IV.4.2.4. Teneur en eau initiale des échantillons .....	160
IV.4.2.5. Description du montage .....	161
IV.4.2.6. Instrumentation .....	162
IV.4.3. Histoire de chargement thermo-hygro-mécanique .....	163
<b>IV.5. Résultats et discussion .....</b>	<b>165</b>
IV.5.1. Caractérisation physique et mécanique des essences .....	165
IV.5.1.1. Valeurs moyennes et écarts types .....	165
IV.5.1.2. Valeurs caractéristiques et classes de résistance.....	165
IV.5.2. Evolution de la teneur en eau des éprouvettes.....	166
IV.5.3. Evolution générale des flèches .....	168
IV.5.3.1. Flèches brutes .....	168
IV.5.3.1.1 Moabi .....	168
IV.5.3.1.2 Ozigo.....	170
IV.5.3.1.3 Observations.....	171

IV.5.4. Détermination des coefficients de retrait-gonflement transversal .....	172
IV.5.5. Analyse des flèches.....	173
IV.5.5.1. Détermination des modules instantanés.....	173
IV.5.5.2. Fluage-recouvrance.....	174
IV.5.5.2.1 Expérience de fluage .....	175
IV.5.5.2.2 Expérience de recouvrance .....	176
IV.5.6. Modélisation du fluage-recouvrance .....	176
IV.5.6.1. Extrapolation des courbes expérimentales en fluage.....	176
IV.5.6.2. Identification des paramètres en fluage .....	177
IV.5.6.3. Modélisation du fluage-recouvrance .....	179
<b>IV.6. Etude comparative du fluage relatif des essais en laboratoire et en conditions naturelles réelles .....</b>	<b>181</b>
IV.6.1. Etude comparative (expérience, simulation) .....	181
IV.6.2. Discussions et perspectives.....	182
<b>IV.7. Conclusion .....</b>	<b>184</b>

---

## IV.1. Introduction

Dans le cadre de la construction bois, la prédiction correcte des déformations des structures, outre le calcul de résistance lors de la conception, est une exigence fondamentale pour l'ingénieur. Ceci s'explique d'autant plus que le fluage du matériau bois est très élevé et que le rapport résistance-module du bois est bien supérieur aux autres matériaux de construction. Après avoir étudié le comportement mécanique différé des deux essences tropicales à l'échelle structure et en environnement variable ainsi que leur comportement hygroscopique, nous nous proposons, dans ce chapitre, de mener une étude de caractérisation mécanique vis-à-vis de l'Eurocode 5 (NF EN 384) et une étude du comportement mécanique différé à l'échelle laboratoire.

Dans une première partie, nous présentons les outils règlementaires ayant permis la classification mécanique des essences. Les outils de modélisation du fluage et de la recouvrance des deux essences tropicales étudiées sont présentés en deuxième partie. La troisième partie est consacrée à la présentation des essais de flexion long terme. Enfin, l'ensemble des résultats obtenus ainsi que leur analyse est présenté.

## IV.2. Classification mécanique des bois d’œuvre vis-à-vis de l’Eurocode 5

### IV.2.1. Notion de valeurs caractéristiques

L’Eurocode 0 [AFN 03] définit la valeur caractéristique d’une propriété matériau comme la valeur qui a une probabilité donnée de ne pas être atteinte lors d’une hypothétique série d’essais limitée. Cette valeur correspond généralement à un fractile spécifié de la distribution statique supposée de la propriété concernée du matériau ou du produit.

Comme l’indique Breysse [BRE 09], la série d’essais illimitée est bien plus hypothétique en pratique car elle est impossible. Ainsi, l’estimation d’un fractile ou d’une valeur caractéristique impose d’estimer non seulement la valeur moyenne mais également la dispersion de la propriété étudiée en se donnant un niveau de confiance.

Pour le calcul de la valeur caractéristique d’une propriété  $X_k$ , l’Eurocode 0 [AFN 03] propose l’expression ci-dessous :

$$X_k = m(x) - k_n \cdot s_n(x) \tag{IV.2.1}$$

$m(x)$  est la valeur moyenne de la propriété.  $k_n$  est un coefficient dont la valeur (**Tableau IV.2.1**) dépend du niveau de confiance (estimé de 75% d’après l’annexe D de l’Eurocode 0), du nombre d’essais, du fractile visé (ici 5%) et du fait que l’écart type  $s_n$  est supposé connu (ou que l’on connaît une borne supérieure réaliste).  $s_n$  est l’écart type estimé à partir de l’échantillonnage.

**Tableau IV.2.1.** Valeurs du coefficient  $k_n$  pour trois fractiles, extrait de Breysse [BRE 09]

Fractile	10%	5%	0,10%	10%	5%	0,10%
Nombre d’essais	Ecart-type connu			Ecart-type inconnu		
1	1,81	2,31	4,36	-	-	-
2	1,57	2,01	3,77	3,77	7,73	-
3	1,48	1,89	3,56	2,18	3,37	-
4	1,43	1,83	3,44	1,83	2,63	11,4
5	1,4	1,8	3,37	1,68	2,33	7,85
6	1,38	1,77	3,33	1,56	2,18	6,36
8	1,36	1,74	3,27	1,51	2	5,07
10	1,34	1,72	3,23	1,45	1,92	4,51
20	1,31	1,68	3,16	1,36	1,76	3,64
30	1,3	1,67	3,13	1,33	1,73	3,44
∞	1,28	1,64	3,08	1,28	1,64	3,08



### IV.2.2. Notion de classes de résistance mécanique

Dans sa version de 2008, la norme NF EN 338 définit, pour les bois feuillus tempérés, huit classes de résistance mécanique allant de D18 à D70. Le nombre associé à la lettre D indique la valeur de la résistance à la flexion en MPa. Les valeurs données dans le **Tableau IV.2.2** sont compatibles avec des bois feuillus tempérés dont la teneur en eau résulte d'une température de 20°C et d'une humidité relative de 65%.

**Tableau IV.2.2.** Définition des classes de résistance pour les feuillus tempérés selon NF EN 338 [AFN 08]

Essence		Feuillus (tempérés)							
Classe mécanique		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriétés de résistance (en N/mm <sup>2</sup> )									
Flexion	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5
Propriétés de rigidité (en kN/mm <sup>2</sup> )									
Module moyen d'élasticité axiale	$E_{0,mean}$	10	11	12	12	13	14	17	20
Module d'élasticité axiale (au 5 <sup>ème</sup> percentile)	$E_{0,05}$	8,4	9,2	10,1	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Module moyen d'élasticité transversale	$E_{90,mean}$	0,67	0,73	0,8	0,8	0,86	0,93	1,13	1,33
Module moyen de cisaillement	$G_{mean}$	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Masse volumique (en kg/m <sup>3</sup> )									
Masse volumique	$\rho_k$	500	520	530	540	550	620	700	900
Masse volumique moyenne	$\rho_{mean}$	610	630	640	650	660	750	840	1080

Il faut préciser que les valeurs de résistance à la traction, à la compression, au cisaillement et les valeurs du module d'élasticité axiale au 5<sup>ème</sup> percentile, du module moyen d'élasticité transversale et du module moyen de cisaillement sont calculées en utilisant des équations dont les expressions sont données en Annexe A de la norme NF EN 338 [AFN 08].

### IV.2.3. Affectation à une classe de résistance

La norme EN NF 338 indique qu'une population de bois peut être affectée à une classe de résistance si ses valeurs caractéristiques de résistance à la flexion et de masse volumique sont égales ou supérieures aux valeurs indiquées pour chaque classe de résistance mécanique du **Tableau**

**IV.2.1.** et si la valeur moyenne de son module d'élasticité en flexion est égale ou supérieure à 95% de la valeur indiquée pour cette classe de résistance [AFN 08].

Ces trois paramètres sont donc essentiels pour l'affectation d'une classe mécanique à un échantillonnage en vue d'un calcul de dimensionnement ou de vérification d'une structure en bois.

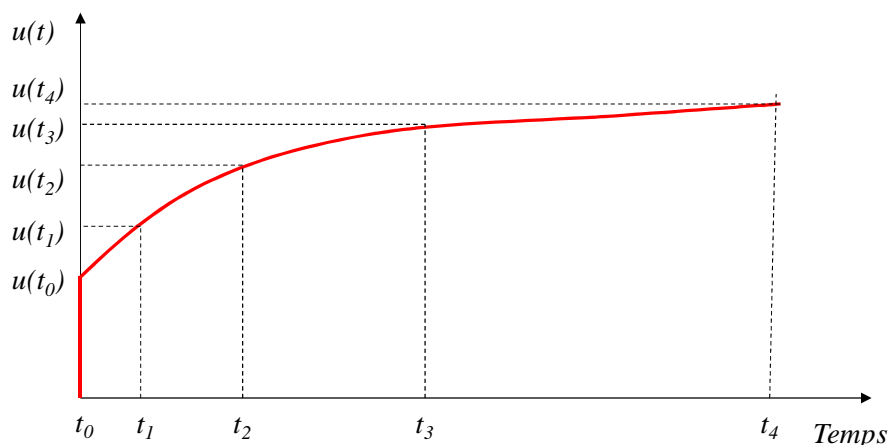
### IV.3. Approche rhéologique du comportement différé

Nous avons vu dans le chapitre I (§ I.1.5) que la déformation totale sous climat variable est la somme des déformations instantanées et des déformations différées induites par le fluage proprement dit (mécano-sorption, retrait-gonflement libre et le niveau de contrainte appliquée), équations (I.1.13) et (I.1.14). Si la déformation instantanée peut être dissociée aisément, les déformations liées au fluage et à la mécano-sorption par exemple sont difficilement dissociables du fait de la forte interaction entre les deux phénomènes.

L'approche réglementaire qui est plus pragmatique propose un coefficient  $k_{def}$ , défini au chapitre 2 (§ II.1.2), qui intègre tous les paramètres interagissant dans l'augmentation de la déformation dans le temps. Mais comment ce paramètre est-il calculé ? Quelle est la part (pourcentage d'influence) de chaque paramètre dans l'expression finale de la déformée ?

#### IV.3.1. Approche rhéologique du fluage

Dans la partie qui suit, nous proposons une approche rhéologique du coefficient  $k_{def}$ . L'idée, comme le montre la **Figure IV.3.1**, est de déterminer, pour chaque classe de durée de charge, une fonction de fluage dépendant d'un modèle rhéologique de Kelvin-Voigt généralisé.



**Figure IV.3.1.** Evolution de la flèche  $u(t)$  en fonction du temps

Les temps  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  et  $t_4$  sont choisis conformément aux classes de durée de chargement définies par l'Eurocode 5. Le **Tableau IV.3.1** précise les durées choisies pour la suite de la modélisation.

**Tableau IV.3.1.** Durée de charge définie par l’Eurocode 5

Classe de charge	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
t	t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>
Durée (heures)	0	24 (1 jour)	164 (1 semaine)	4320 (6 mois)	87600 (10 ans)

La relation (I.2.2), exprimée vis-à-vis de la flèche, s’écrit :

$$u(t_i) = u(t_0) \times (1 + k_{def}^i) \quad \text{avec} \quad i \geq 1 \quad (IV.3.1)$$

On en déduit alors :

$$k_{def}^i = \frac{u(t_i)}{u_{inst}} - 1 \quad (IV.3.2)$$

On peut ensuite définir une fonction  $J(t)$  qui est une fonction de  $k_{def}$  telle que :

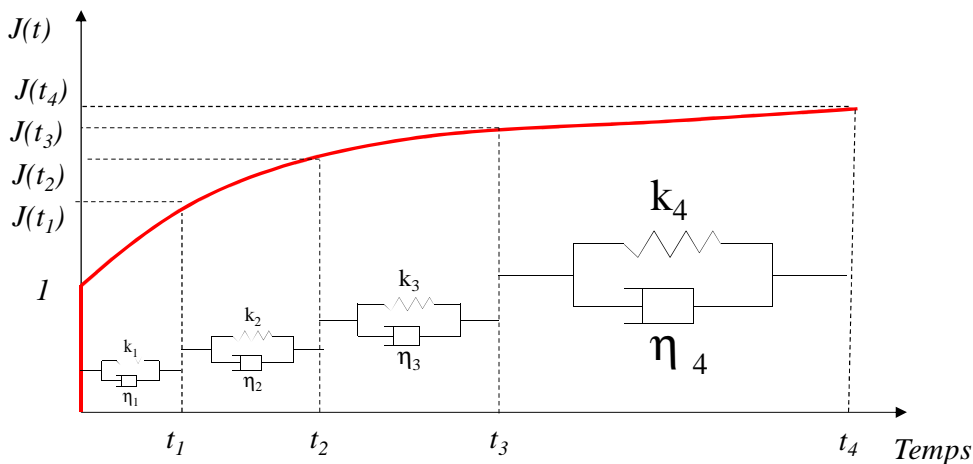
$$u(t) = u_{inst} \times J(t) \quad \text{avec} \quad u_{inst} = u(t_0) \quad (IV.3.3)$$

Ainsi, on se propose, pour chaque intervalle de temps correspondant à un tronçon de la courbe (**Figure IV.3.2**), de définir une fonction de fluage de type exponentiel (modèle de Kelvin-Voigt généralisé) telle que :

$$J(t) = 1 + \sum_{i=1}^n A_i (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t)) \quad \text{avec} \quad \lambda_i = \frac{k_i}{\eta_i} \quad \text{et} \quad A_i > 0 \quad (IV.3.4)$$

Où  $n = 4$  correspond aux 4 intervalles de temps des cinq classes de durée de charge définies dans l’Eurocode 5,  $k_i$  et  $\eta_i$  sont respectivement la raideur et l’amortissement du  $i^{\text{ème}}$  élément de Kelvin-Voigt.

Ainsi, il correspond un  $k_{def}$  à chaque fonction de fluage pour un intervalle de temps donné.



**Figure IV.3.2.** Evolution de la fonction  $J(t)$  en fonction du temps

Soit  $\xi$ , le pourcentage d'ouverture du  $i^{\text{ème}}$  Kelvin Voigt au temps  $t_i$  tel que :

$$1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i) = 1 - \xi$$

$$\exp(-\lambda_i \cdot t_i) = \xi$$

$$\text{On a :} \quad \lambda_i = -\frac{1}{t_i \cdot \ln \xi} \quad (\text{IV.3.5})$$

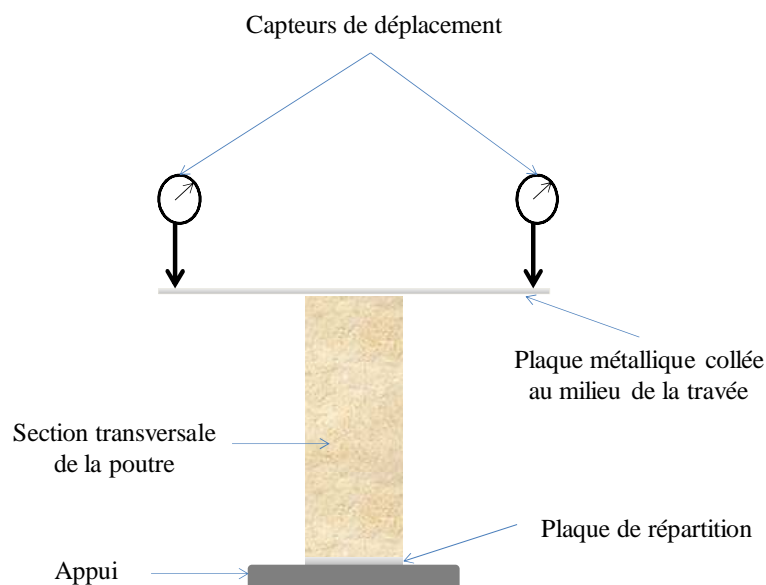
## IV.4. Expérimentation

### IV.4.1. Caractérisation physique et mécanique des deux essences

Des essais destructifs en compression et en flexion quatre points ont été conduits à Egletons, selon la norme NF EN 408 [AFN 09], pour la détermination des modules d'élasticité et des résistances mécaniques en vue d'une classification mécanique vis-à-vis de l'Eurocode 5.

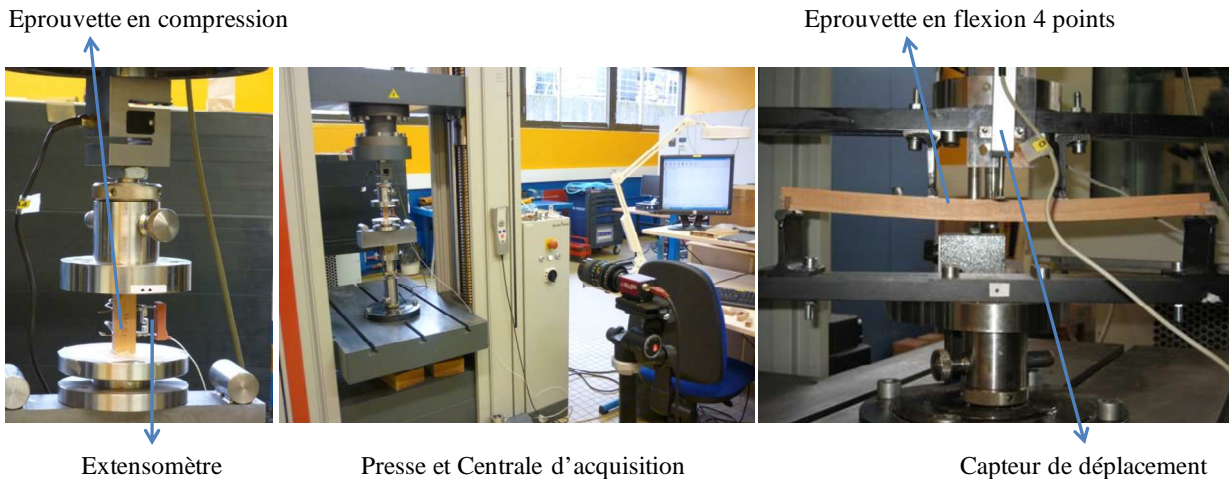
Les essais de compression ont été réalisés sur un échantillonnage de 60 pièces de bois par essence sur une presse hydraulique de type Zwick équipée d'un extensomètre, **Figure IV.4.2**. Les dimensions des pièces sont : 20 x 20 x 60 mm<sup>3</sup>. Ces essais ont permis, non seulement, de déterminer la résistance moyenne à la compression mais également d'en déduire le module d'élasticité axiale.

L'échantillonnage de flexion a été préalablement conditionné à 65% d'humidité relative (HR) et à une température de 20°C (T°). Il est composé de 40 pièces de bois par essence de section 10 x 20 mm<sup>2</sup> pour 400 mm de longueur. Pour des raisons d'encombrement, la mesure de la flèche est déportée à l'aide de deux capteurs de déplacement de type LVDT. La flèche mesurée est donc la moyenne fournie par ces deux capteurs, **Figure IV.4.1**. Les capteurs reposent sur une barre métallique collée à mi-travée en face supérieure de la poutre. Nous avons également déduit le module d'élasticité axiale à partir de ces essais.



**Figure IV.4.1.** Schéma de montage des deux capteurs

Outre les essais de caractérisation mécanique, d'autres essais ont été conduits pour la détermination de certaines propriétés physiques telles que la teneur en eau, la masse volumique et les coefficients de retrait-gonflement. Ces essais, menés conformément aux normes NF EN 384 et NF EN 408, ont été réalisés sur les échantillons de compression et de flexion.



**Figure IV.4.2.** Dispositif expérimental en compression et en flexion 4 points

#### IV.4.2. Description du dispositif expérimental long-terme

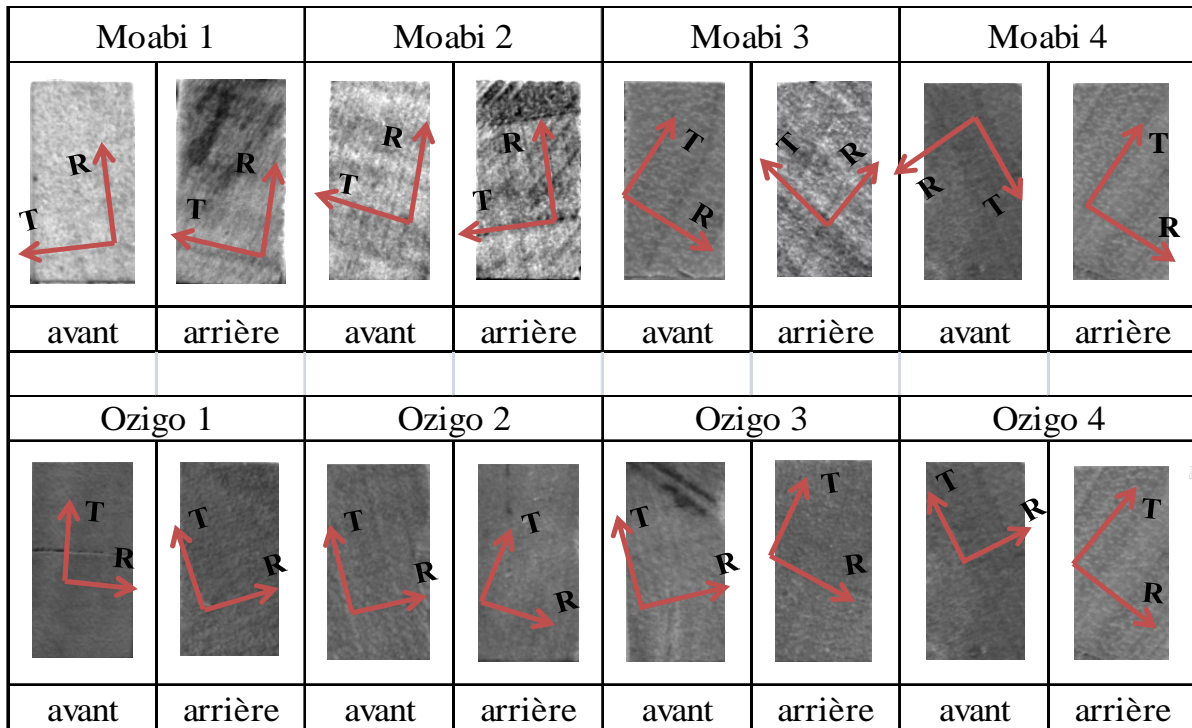
##### IV.4.2.1. Echantillonnage

Un lot de 12 éprouvettes ( $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ ) a été usiné et réparti comme suit :

- 8 éprouvettes (4 Moabi et 4 Ozigo) pour des essais de fluage-relaxation ;
- 4 éprouvettes témoins non chargées (2 Moabi et 2 Ozigo) pour le suivi de l'évolution de la teneur en eau dans l'enceinte climatique, avec l'hypothèse selon laquelle l'évolution d'humidité dans une éprouvette non chargée est équivalente à celle d'une éprouvette chargée.

##### IV.4.2.2. Anatomie des échantillons

Pour l'ensemble des sections transversales des échantillons, la position des cernes va du débit sur dosse (Moabi 3 ; Ozigo 1, 2 et 3), du pur quartier (Moabi 1 et 2) aux coupes intermédiaires (Moabi 4 et Ozigo 4), **Figure IV.4.3**.



**Figure IV.4.3.** Anatomie des échantillons sélectionnés pour les essais long terme (R : direction radiale ; T : direction tangentielle)

*IV.4.2.3. Masse volumique humide des échantillons*

La masse volumique humide des éprouvettes est déterminée après leur conditionnement en chambre climatique (HR = 65% et T = 20°C) avant le démarrage des essais de fluage-recouvrance.

**Tableau IV.4.1.** Masse volumique humide des échantillons de Moabi

Eprouvette	M.1	M.2	M.3	M.4	TM1	TM2	Moyenne	Ecart Type
Masse volumique humide (65% ; 20°C) [kg/m <sup>3</sup> ]	747	778	899	861	915	878	846	68

*TM1 et TM2 : éprouvettes témoins de Moabi*

**Tableau IV.4.2.** Masse volumique humide des échantillons d'Ozigo

Eprouvette	O.1	O.2	O.3	O.4	TO1	TO2	Moyenne	Ecart Type
Masse volumique humide (65% ; 20°C) [kg/m <sup>3</sup> ]	640	581	584	592	606	576	597	24

*TO1 et TO2 : éprouvettes témoins d'Ozigo*

*IV.4.2.4. Teneur en eau initiale des échantillons*

Le taux d'humidité initiale des échantillons est déterminé, à la fin de l'essai, selon la norme NF EN 13183-1 [AFN 02], **Tableau IV.4.3 et IV.4.4**. L'humidité initiale des éprouvettes chargées est supposée équivalente. Les éprouvettes témoins TM1 et TO1 ont été conditionnées avec l'ensemble

des éprouvettes d'essais long terme. Par contre, les éprouvettes témoins TM2 et TO2 n'ont pas subi de conditionnement : d'où la différence de teneur en eau initiale.

**Tableau IV.4.3.** Teneur en eau initiale des échantillons de Moabi

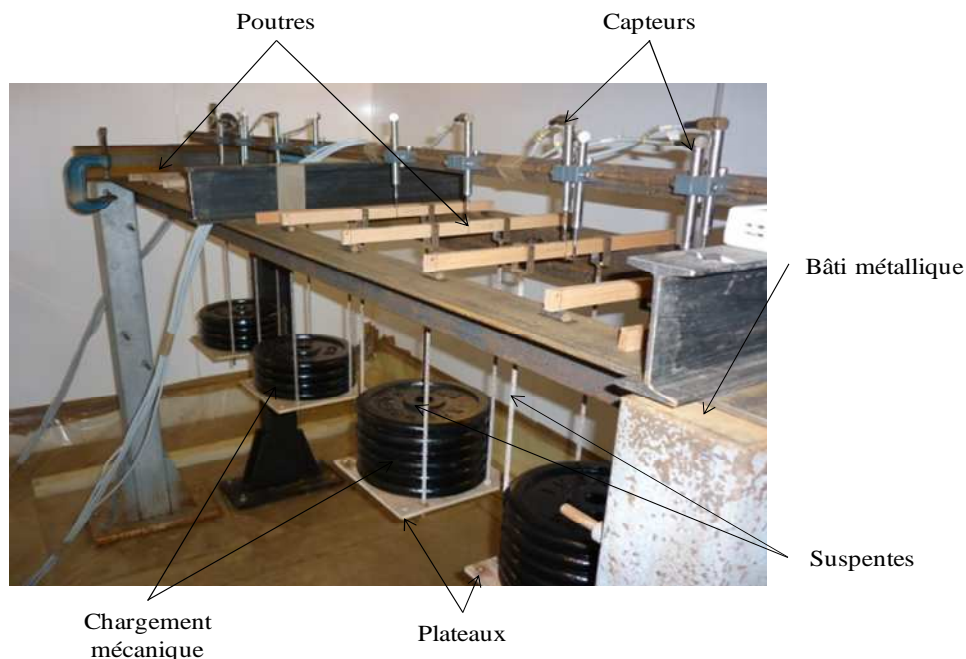
Echantillon	M.1	M.2	M.3	M.4	TM1	TM2	Moyenne	Ecart Type
Teneur en eau initiale	13,7%	13,4%	13,7%	13,5%	13,6%	11,9%	13,3%	0,69%

**Tableau IV.4.4.** Teneur en eau initiale des échantillons d'Ozigo

Echantillon	O.1	O.2	O.3	O.4	TO1	TO2	Moyenne	Ecart Type
Teneur en eau initiale	13,5%	13,7%	13,0%	13,6%	13,2%	11,8%	13,1%	0,7%

*IV.4.2.5. Description du montage*

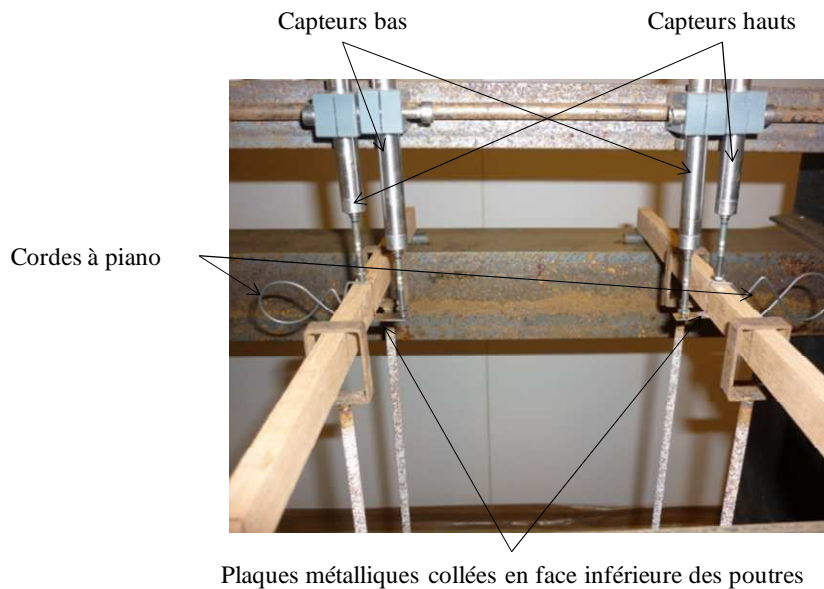
Le banc d'essais est identique à celui de la section I.2.3 du chapitre I, à deux exceptions près : les poutres métalliques servant d'appuis aux poutrelles sont positionnées au dessus des poteaux et le dispositif de montage des capteurs a été modifié, **Figure IV.4.4.** Outre le chargement extérieur, les éprouvettes subissent également leur poids propre, le poids des suspentes, du plateau et celui des tiges métalliques supports des capteurs. Des taux de charge de 12% et 14% de la charge de rupture respectivement pour le Moabi et l'Ozigo sont obtenus pour des chargements constants respectifs de 150N et de 100N par poutre.



**Figure IV.4.4.** Banc d'essai en flexion 4 points disposé dans une enceinte climatique de 12 m<sup>3</sup>



Les capteurs haut et bas des quatre premiers échantillons sont fixés sur une barre métallique située au dessus des poutres dans le sens de la longueur du bâti, **Figure IV.4.5**. Une plaque métallique, collée en face inférieure des poutres et maintenue par une corde à piano, sert de support à la partie mobile des capteurs bas (noyau). Ce dispositif a finalement été retenu après les écueils rencontrés avec les dispositifs antérieurs : l'utilisation d'une tige PVC (Figure I.2.8) et le collage simple du noyau du capteur au début de cet essai.



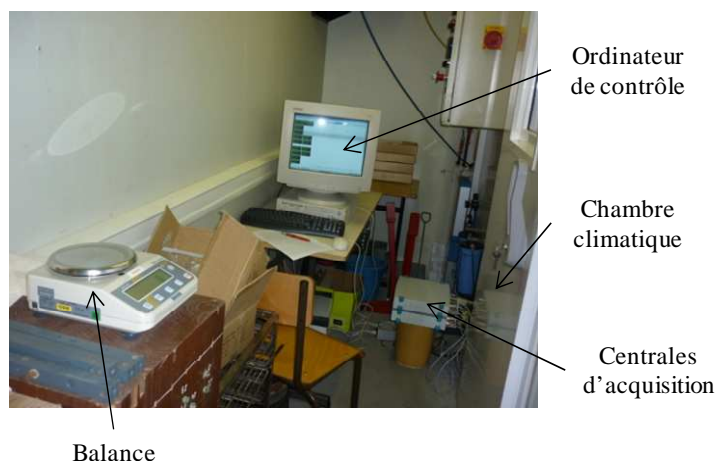
**Figure IV.4.5.** Banc d'essai en flexion 4 points disposé dans une enceinte climatique

#### IV.4.2.6. Instrumentation

Le système d'acquisition est constitué de :

- 12 capteurs de déplacement de type potentiométrique (**Figure IV.4.6**) fixés sur une cornière en L positionnée au dessus des huit poutres.
- 2 centrales d'acquisition de données de type Spyder (**Figure IV.4.6**) équipées de huit entrées chacune.
- 1 balance avec une précision au 100<sup>ème</sup> de gramme pour la prise de masse des poutres témoins.
- 1 ordinateur pour assurer la programmation des différentes séquences d'acquisition.





**Figure IV.4.6.** Appareillage de mesures

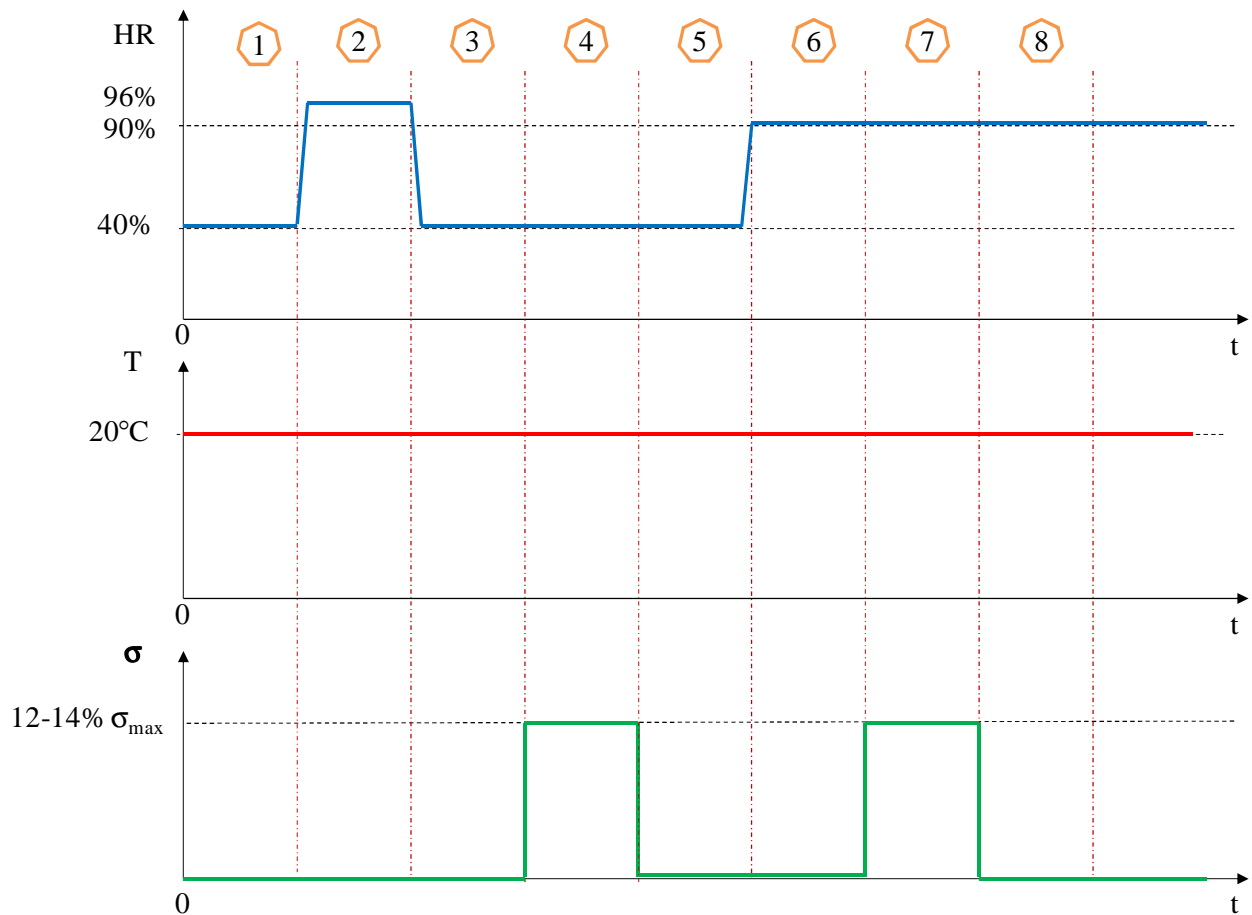
#### IV.4.3. Histoire de chargement thermo-hygro-mécanique

Les conditions climatiques sont imposées par le retour d'expérience in-situ de Masuku (Gabon). Le choix des humidités relatives extrêmes tient compte également des contraintes techniques au niveau de la chambre climatique. Ainsi, suite à ce compromis, les valeurs de 40% et 90% en humidité relative ont été choisies comme valeurs extrêmes représentatives des conditions climatiques à Masuku.

Le scénario de chargement, **Figure IV.4.7**, étalé sur près de 17 mois, est décomposé en huit phases principales :

- Phase 1 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 40\%$ ) : Mise en conditionnement à basse humidité pour permettre au matériau, en service, d'atteindre sa valeur extrême en désorption.
- Phase 2 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 96\%$ ) : Cette seconde phase permet, non seulement, de libérer d'éventuelle contrainte de croissance, mais surtout, d'évaluer le gonflement global que subissent les poutres en service lorsqu'elles balaient le cycle complet.
- Phase 3 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 40\%$ ) : Les poutres sont séchées à nouveau jusqu'à stabilisation. Cela permet d'évaluer les effets du retrait global avant chargement et de retrouver les phénomènes d'hystérésis.
- Phase 4 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 40\%$ ) : A l'état sec, un chargement mécanique constant permet, non seulement, de déterminer la réponse instantanée élastique des échantillons à basse humidité, mais également, d'évaluer le fluage, et ce, jusqu'à l'obtention du fluage limite caractérisant un comportement viscoélastique linéaire à faible taux de charge.

- Phase 5 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 40\%$ ) : Après stabilisation du fluage viscoélastique, on procède au déchargement des poutres. Les recouvrances instantanée et différée sont évaluées jusqu'à stabilisation.
- Phase 6 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 90\%$ ) : A vide, les poutres sont à nouveau humidifiées avant chargement. Cela permet de filtrer les effets de gonflement avant chargement et d'effectuer une recouvrance totale afin d'éliminer les effets mécano-sorptifs éventuels de la première mise en charge.
- Phase 7 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 90\%$ ) : Cette phase permet d'évaluer uniquement les effets du chargement mécanique sous haute humidité.
- Phase 8 ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 90\%$ ) : En l'absence de chargement, cette phase ultime permet d'étudier la recouvrance instantanée et différée sous haute humidité.



**Figure IV.4.7.** Scénario de chargement thermo-hygro-mécanique

## IV.5. Résultats et discussion

### IV.5.1. Caractérisation physique et mécanique des essences

#### IV.5.1.1. Valeurs moyennes et écarts types

Les résultats des différents essais de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques sont synthétisés dans le **Tableau IV.5.1**. Ces résultats permettent de déterminer les valeurs caractéristiques des essences étudiées et donc d'en déterminer un classement selon l'Eurocode 5.

**Tableau IV.5.1.** Propriétés physiques et mécaniques de bois de Moabi et d'Ozigo [MAN 11b]

Essai Mécanique	Flexion 4 points		Compression	
	<i>Ozigo</i>	<i>Moabi</i>	<i>Ozigo</i>	<i>Moabi</i>
Humidité moyenne à l'essai	13,3% ± 0,8%	13,4% ± 0,7%	8,4% ± 0,4%	7,9% ± 0,4%
Masse volumique à l'essai en kg/m <sup>3</sup>	608 ± 18	832 ± 21	583 ± 33	747 ± 23
Coefficient retrait/gonflement transversal (RT)	0,18% ± 0,06	0,26 % ± 0,02	0,22% ± 0,03	0,29% ± 0,02
Coefficient retrait/gonflement longitudinal (L)	0,03% ± 0,01	0,02% ± 0,01	0,03% ± 0,01	0,02% ± 0,01
Coefficient retrait/gonflement volumique	0,48% ± 0,05	0,61% ± 0,04	0,47% ± 0,06	0,61% ± 0,04
Contrainte moyenne de rupture en MPa	69 ± 9	121 ± 5	54 ± 5	76 ± 5
Module moyen d'élasticité longitudinal en GPa	10,7 ± 1,55	15,7 ± 0,78	12,7 ± 3,45	18,3 ± 4,33
<b>Valeurs ajustées à 12% d'humidité selon la norme NF EN 384</b>				
Masse volumique en kg/m <sup>3</sup>	605 ± 19	826 ± 19	600 ± 27	761 ± 19
Contrainte moyenne de rupture en MPa	69 ± 9	121 ± 5	48 ± 4	67 ± 3
Module moyen d'élasticité longitudinal en GPa	11 ± 1,54	16,1 ± 0,8	11,8 ± 3,16	16,7 ± 3,95

#### IV.5.1.2. Valeurs caractéristiques et classes de résistance

Les valeurs caractéristiques de résistance à la flexion, de module d'élasticité axiale ainsi que de masse volumique ont été déterminées à partir de l'expression (IV.2.1). Le nombre d'éprouvettes normalisées confectionnées à cet effet étant supérieur à 40, la valeur du coefficient  $k_n$  a été prise égale à 1,64 pour un écart-type inconnu. Les résultats obtenus sont consignés dans le **Tableau IV.5.2**.

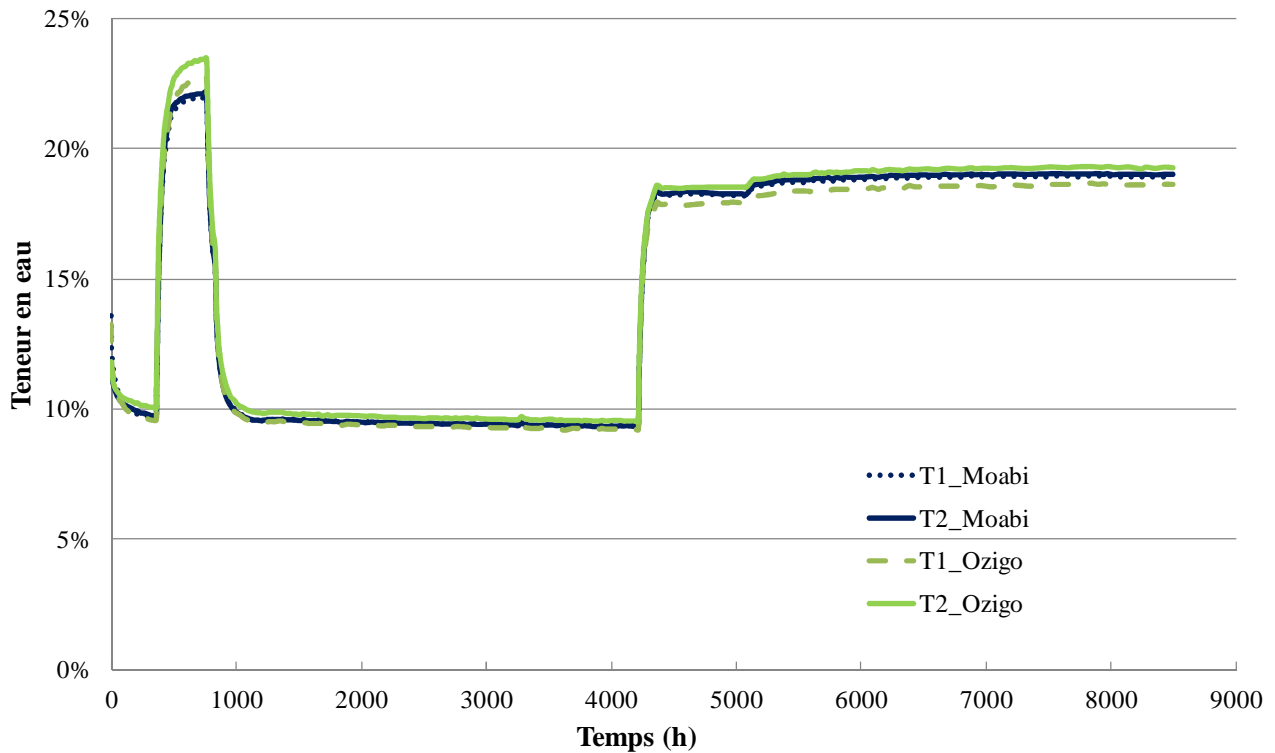
**Tableau IV.5.2.** Valeurs caractéristiques des propriétés physiques et mécaniques de bois de Moabi et d'Ozigo

Essence / Classe		Moabi	Ozigo	D24	D60
Contrainte caractéristique en flexion (MPa)	$f_{m,k}$	113	54	24	60
Module caractéristique d'élasticité longitudinale [GPa]	$E_{0,05}$	13,6	9,24	9,2	14,3
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_k$	801	582	520	700

La valeur caractéristique de résistance en flexion du bois de Moabi est deux fois plus élevée que celle du bois d'Ozigo. En référence à la section IV.2.1.3, le Moabi peut être affecté à la classe mécanique D60, en dépit de sa grande valeur caractéristique en flexion (113 MPa). Beaucoup plus ambigu, le bois d'Ozigo, au regard de ses valeurs caractéristiques en flexion et en masse volumique, peut être affecté à la classe D40. Mais la faible valeur caractéristique de son module d'élasticité en flexion (11000 MPa), conduit plutôt à un classement en D24. Nous donnons ici une priorité sur le module d'élasticité car, usuellement, le dimensionnement des éléments massifs en flexion se fait, le plus souvent, à l'état limite de service.

#### IV.5.2. Evolution de la teneur en eau des éprouvettes

Le relevé périodique des masses des éprouvettes témoins ont permis de tracer l'évolution de la teneur en eau pour les différentes conditions climatiques, **Figure VI.5.1**. A la fin de l'essai, la teneur en eau finale de l'ensemble des échantillons a été déterminée après passage à l'étuve. Pour tracer l'évolution de teneur en eau, les échantillons témoins ont été retirés de l'enceinte puis placés en étuve (103°C), 5 mois avant la fin de l'essai, pour la détermination de la masse sèche. L'hypothèse selon laquelle la charge mécanique influe peu sur le profil de la teneur en eau est de mise et permet ainsi de considérer que la teneur en eau dans les poutres témoins est identique à celles des poutres chargées.



**Figure IV.5.1.** Evolution de la teneur en eau des éprouvettes témoins (T : Témoin)

**Tableau IV.5.1.** Teneur en eau finale des échantillons de Moabi

Echantillon	M.1	M.2	M.3	M.4	TM1	TM2	Moyenne	Ecart Type
Teneur en eau initiale (rappel)	13,7%	13,4%	13,9%	13,6%	13,6%	11,9%	13,4%	0,73%
Teneur en eau finale	18,5%	18,4%	18,8%	18,7%	18,9%	19,0%	18,7%	0,24%

**Tableau IV.5.2.** Teneur en eau finale des échantillons d'Ozigo

Echantillon	O.1	O.2	O.3	O.4	TO1	TO2	Moyenne	Ecart Type
Teneur en eau initiale (rappel)	13,5%	13,7%	13,0%	13,6%	13,2%	11,8%	13,1%	0,71%
Teneur en eau finale	19,0%	19,0%	18,4%	19,0%	18,6%	19,3%	18,9%	0,31%

Au regard des courbes témoins (**Figure IV.5.1**), on peut relever les points suivants :

- Le changement de conditions climatiques s'est fait avant stabilisation de la teneur en eau pour les deux premières phases (séchage / humidification), malgré une durée d'au moins trois semaines chacune ;
- Le chargement mécanique a été effectué après stabilisation de teneur en eau en basse humidité (phase de séchage) ;

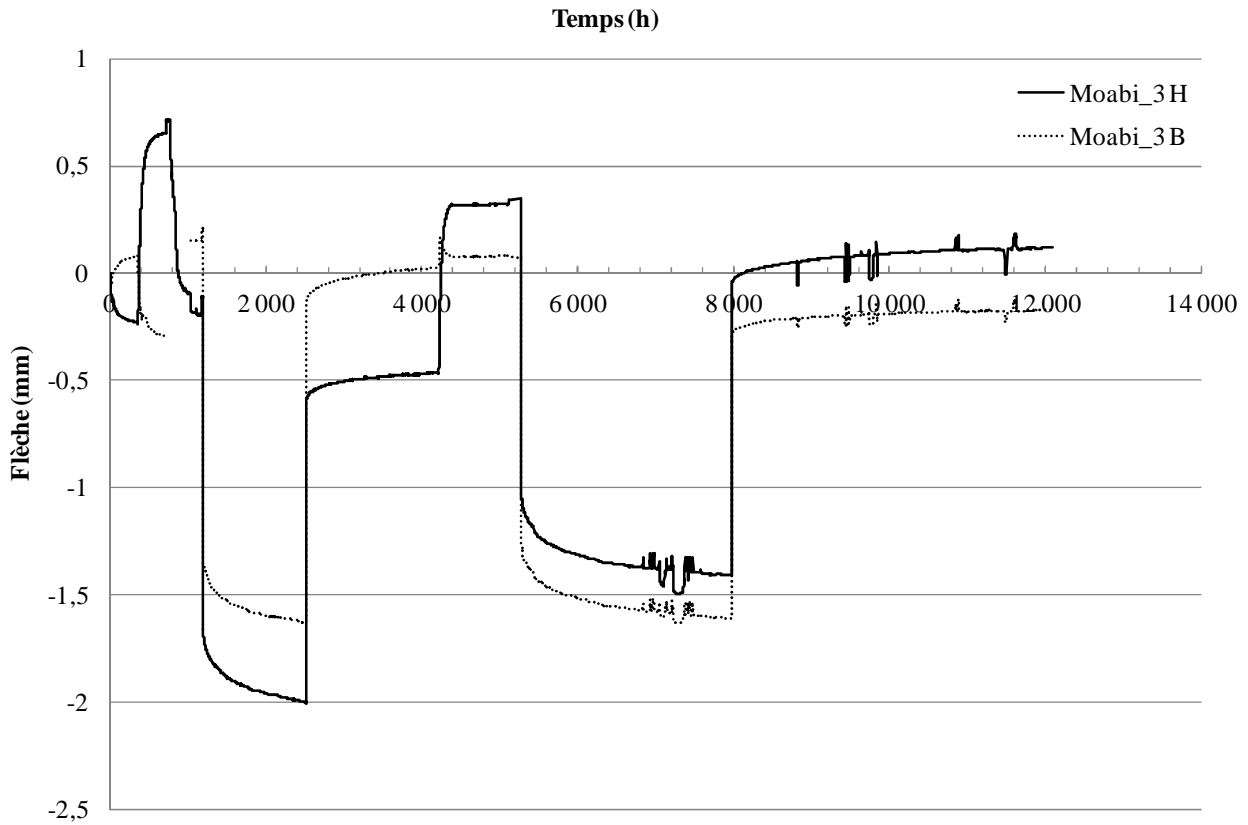
- La deuxième et dernière humidification s’est accompagnée d’une panne de la chambre climatique avant chargement mécanique entraînant ainsi des perturbations ;
- En termes de cinétique d’adsorption et de désorption, l’observation, selon laquelle le séchage est beaucoup plus long à stabiliser que l’humidification, est confirmée.

**IV.5.3. Evolution générale des flèches**

*IV.5.3.1. Flèches brutes*

*IV.5.3.1.1 Moabi*

Les **Figure IV.5.2** à **IV.5.3** présente l’évolution temporelle des déplacements obtenus pour les poutres de Moabi équipées de capteurs placés en face inférieure et supérieure. La **Figure IV.5.4** présente les réponses des deux autres poutres.



**Figure IV.5.2.** Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l’échantillon 3 de Moabi

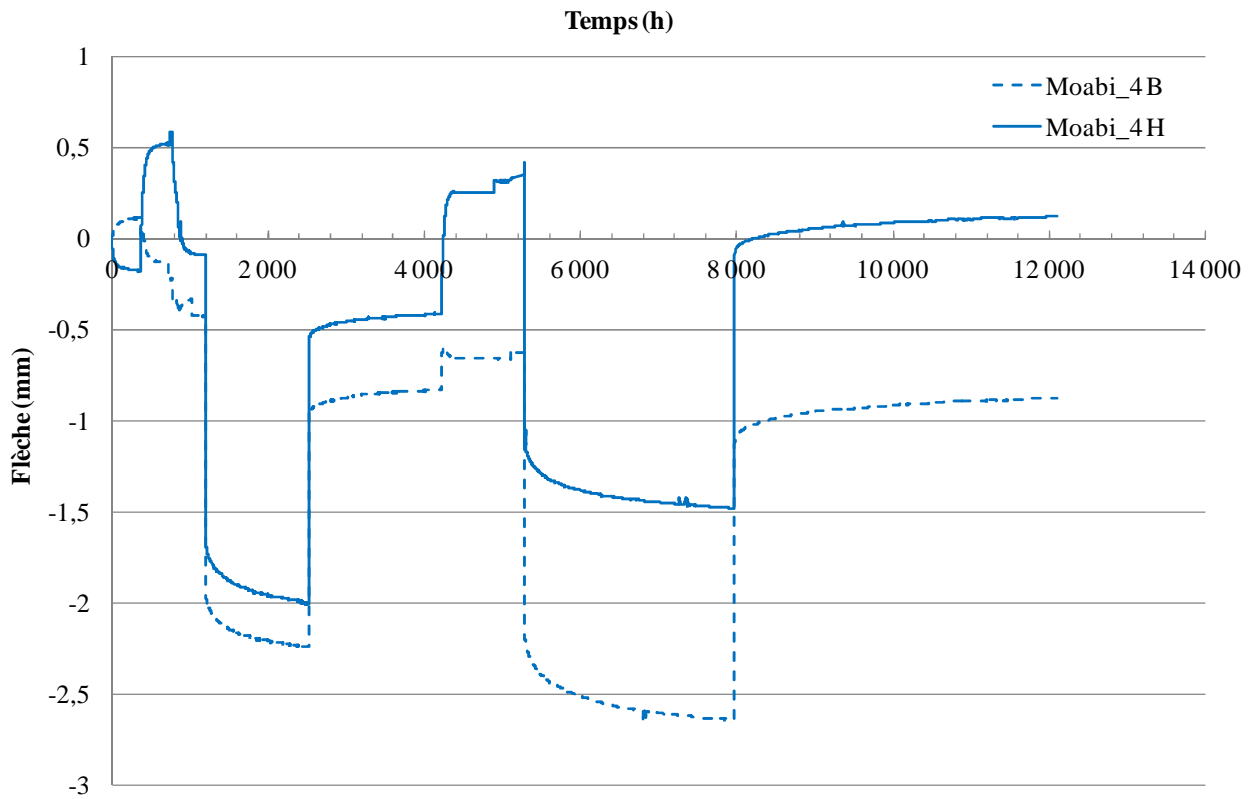


Figure IV.5.3. Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l'échantillon 4 de Moabi

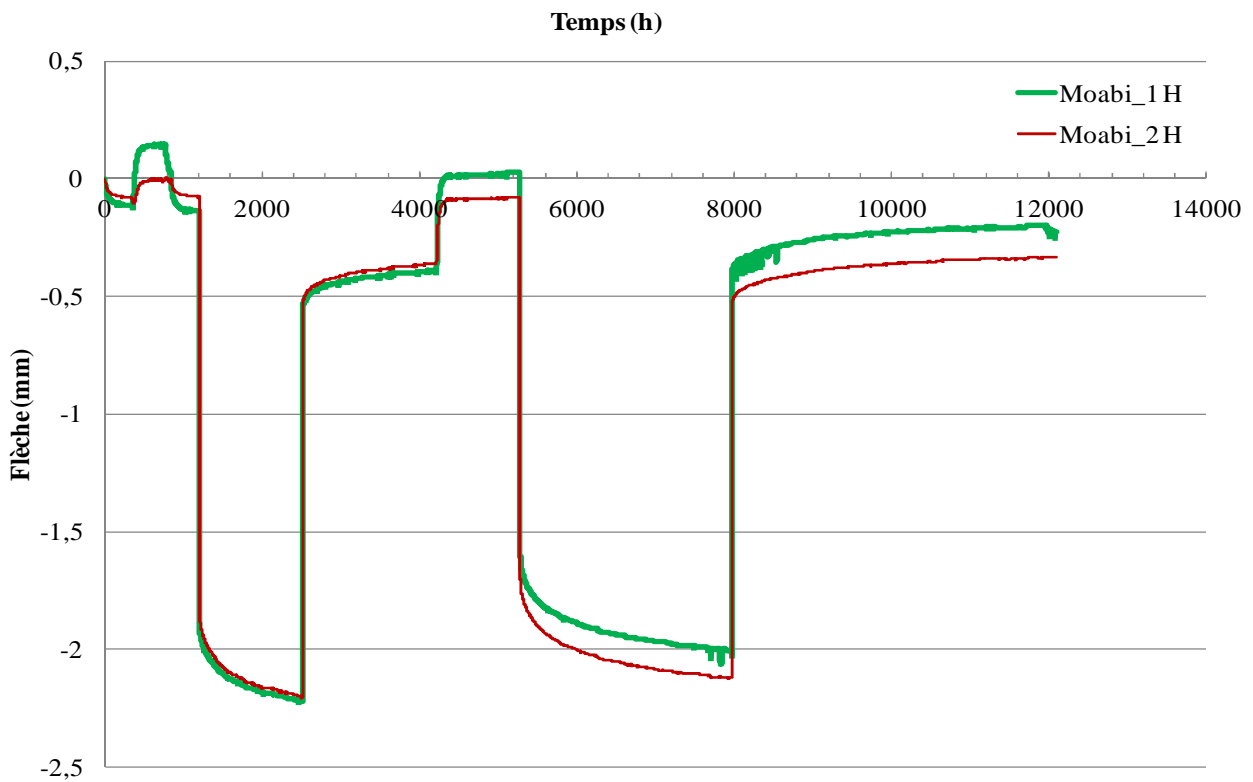
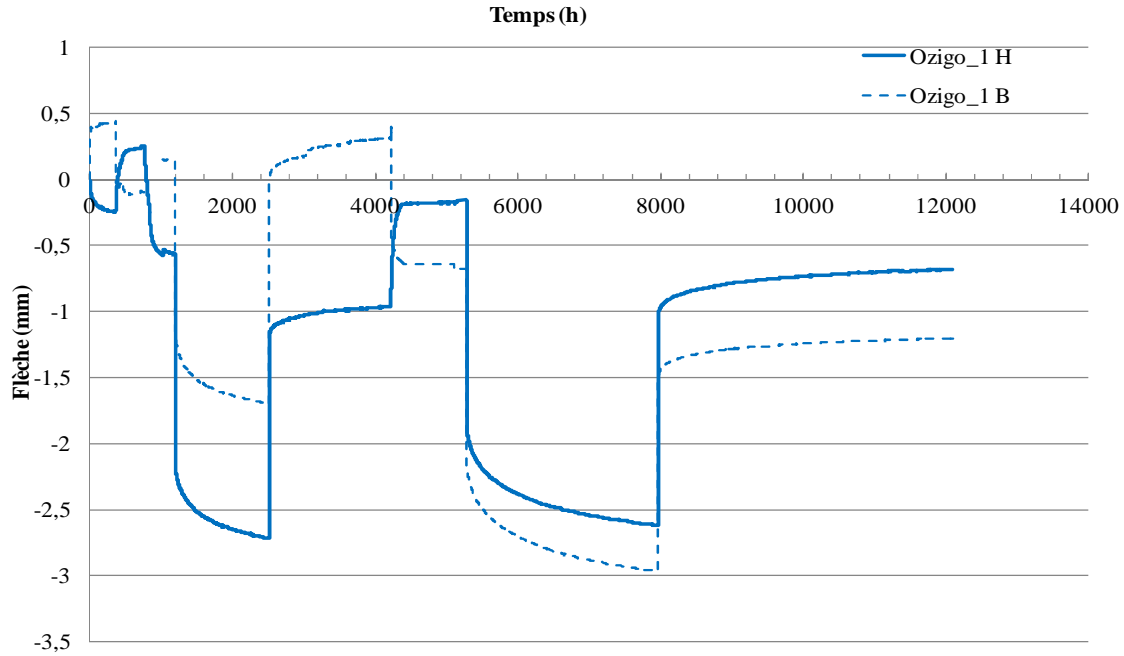


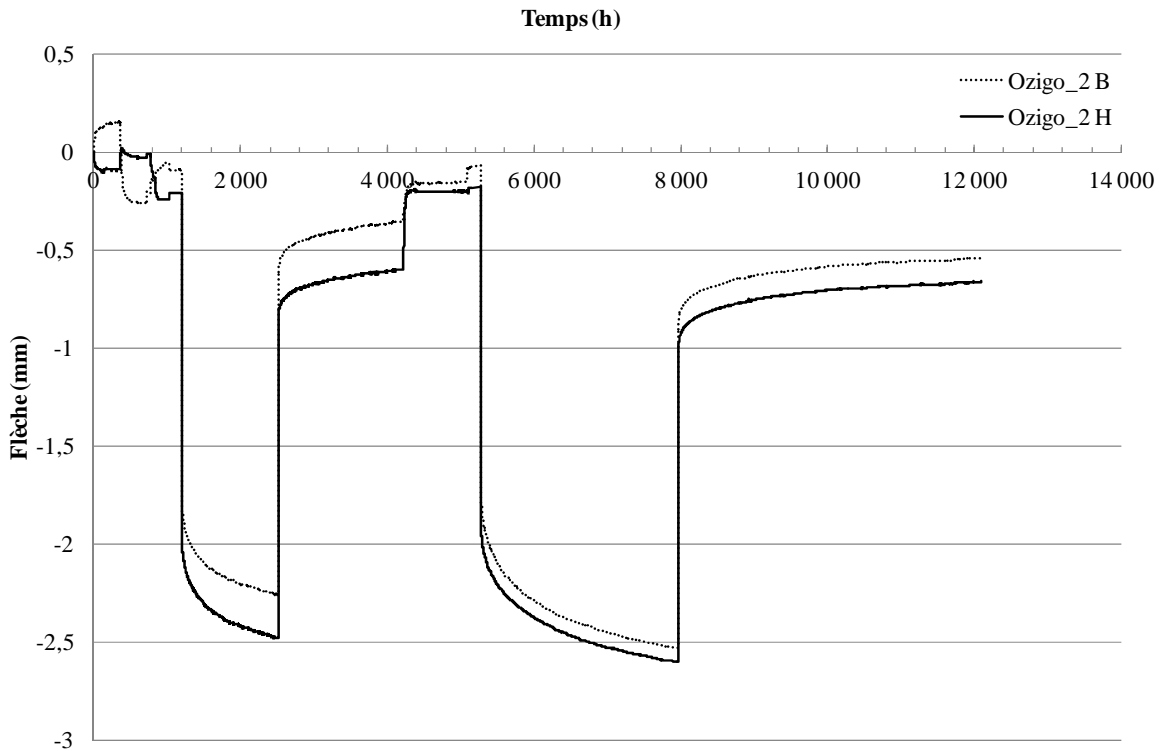
Figure IV.5.4. Evolution des flèches en faces supérieure des échantillons 1 et 2 de Moabi

IV.5.3.1.2 *Ozigo*

Les **Figure IV.5.5** à **IV.5.6** présente l'évolution temporelle des déplacements obtenus pour les poutres d'Ozigo équipées de capteurs placés en face inférieure et supérieure. La **Figure IV.5.7** présente les réponses des deux autres poutres.

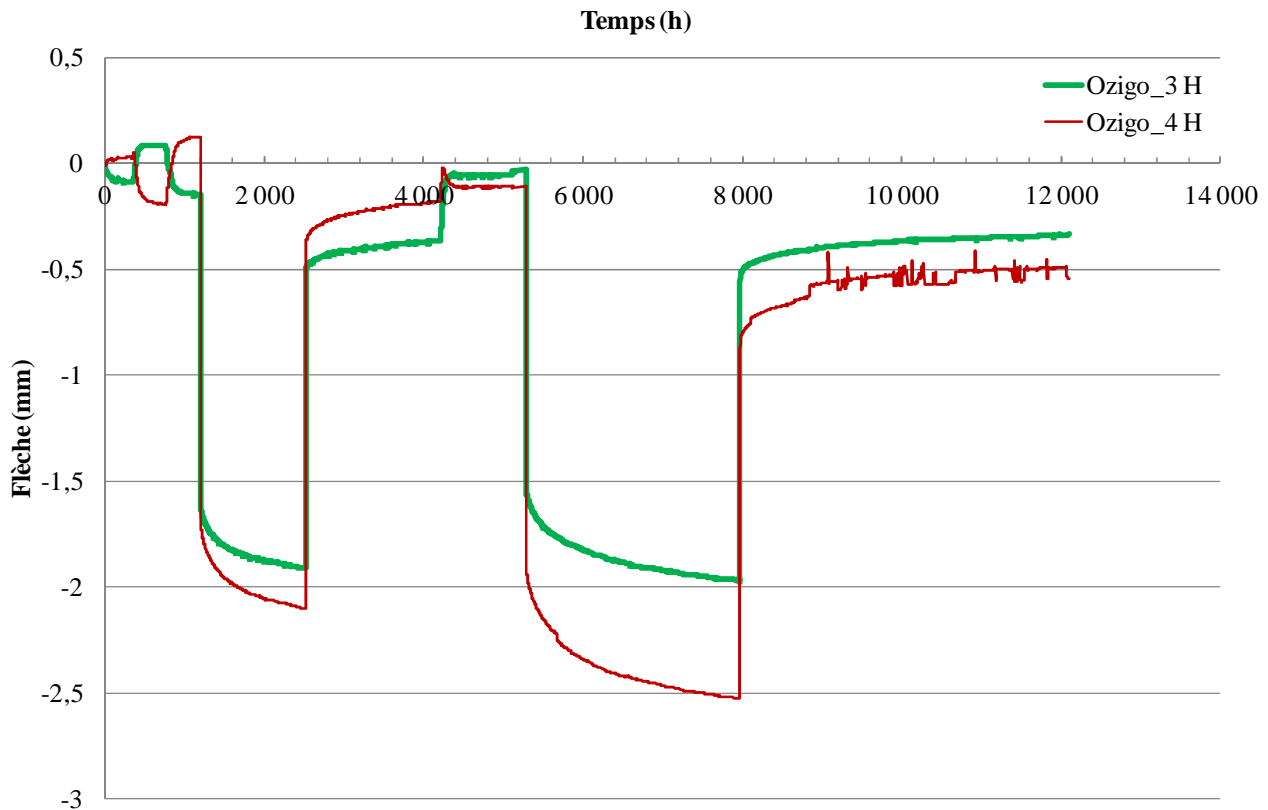


**Figure IV.5.5.** Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l'échantillon 1 d'Ozigo



**Figure IV.5.6.** Evolution des flèches en faces supérieure et inférieure de l'échantillon 2 d'Ozigo





**Figure IV.5.7.** Evolution des flèches en faces supérieure des échantillons 3 et 4 d'Ozigo

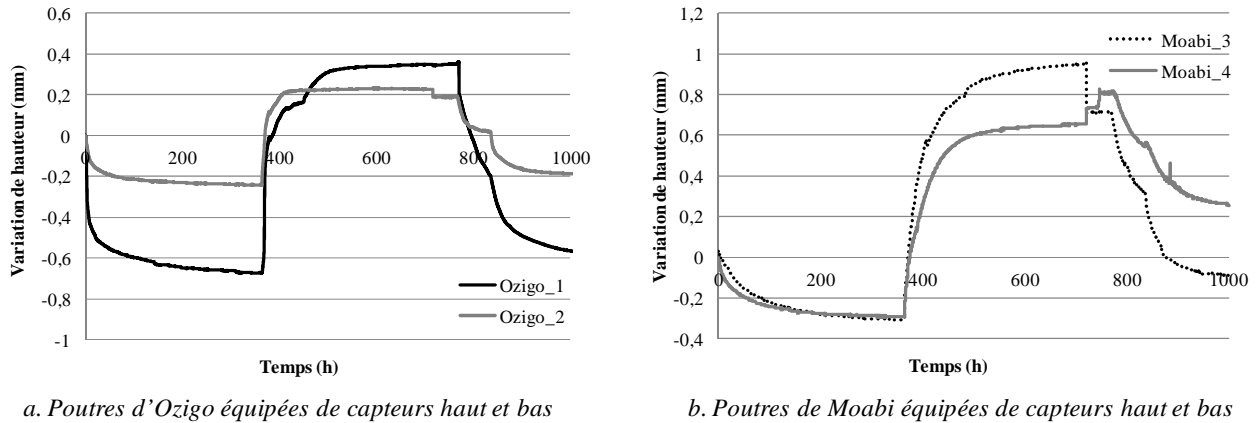
#### IV.5.3.1.3 Observations

Au regard des graphiques, il apparaît les observations suivantes :

- La première phase d'humidification a été fortement perturbée notamment pour les capteurs bas dans l'ensemble. En effet, le système de fixation par colle n'a pas tenu suite aux variations d'humidité. La fixation des plaques a été renforcée à l'aide de pinces métalliques en corde à piano.
- La réponse haute de la poutre Ozigo 3, en phase de retrait et gonflement, est contraire aux autres réponses hautes. On peut supposer que cette poutre présentait une contre-flèche qui n'a pas été décelée après le conditionnement et avant le positionnement des poutres.
- Des perturbations, dues certainement à des dysfonctionnements de capteurs, sont également relevés, notamment dans la deuxième phase d'humidification. Certaines de ces perturbations ont fait l'objet de correction dans la suite de l'étude.
- Dans l'ensemble, on note une bonne distinction entre réponse haute et basse avec des écarts répétitifs.

**IV.5.4. Détermination des coefficients de retrait-gonflement transversal**

Le retrait-gonflement est mis en évidence en superposant les réponses haute et basse des poutres équipées de deux capteurs. La variation de hauteur, comme dans la section I.2.6.4 du chapitre I, est obtenue en faisant la différence des réponses haute et basse notamment pour les deux premières phases, **Figure IV.5.8**.



**Figure IV.5.8.** Variations de hauteur obtenue par différence des flèches haute et basse

Les courbes de variation de hauteur montrent des perturbations importantes en phase d’humidification et dans la deuxième phase de séchage. Celles-ci sont, en partie, imputables à la colle utilisée qui n’a pas résisté aux variations d’humidité. De plus, la poutre Ozigo\_1 a subi des déformations importantes (distorsion de la poutre) pendant les deux premières phases entraînant ainsi une perturbation sur le taux réel de variation de hauteur à cause d’un effet bras de levier. Le début de décollement des plaques a donc justifié l’utilisation de pinces métalliques en corde à piano bien avant la phase de chargement.

**Tableau IV.5.3.** Coefficients de retrait-gonflement des échantillons dotés de deux capteurs

Moabi	Phase 1 : Séchage			Phase 2 : Humidification		
Eprouvette	$\Delta h$ (mm)	$\Delta w$	$\alpha_{RT}$	$\Delta h$ (mm)	$\Delta w$	$\alpha_{RT}$
3	-0,309	-3,93%	0,40%/%	1,028	12,40%	0,42%/%
4	-0,294	-3,93%	0,38%/%	1,103	12,40%	0,45%/%

Ozigo	Phase 1 : Séchage			Phase 2 : Humidification		
Eprouvette	$\Delta h$ (mm)	$\Delta w$	$\alpha_{RT}$	$\Delta h$ (mm)	$\Delta w$	$\alpha_{RT}$
1	-0,672	-3,66%	0,92%/%	1,022	13,33%	0,38%/%
2	-0,244	-3,66%	0,33%/%	0,434	13,33%	0,16%/%

$\Delta h$  : variation de hauteur ;  $\Delta w$  : variation du taux d’humidité ;  $\alpha_{RT}$  : coefficient de retrait/gonflement dans la direction transversale.

L’ensemble des valeurs obtenues reste supérieur aux valeurs obtenues sur les échantillons de compression et de flexion destructives. Si les valeurs des coefficients de retrait-gonflement des

éprouvettes de Moabi peuvent paraître cohérentes puisque répétitives, celles des éprouvettes d'Ozigo semblent aller dans tous les sens et montrent bien l'impossibilité de leur exploitation. On s'en tiendra donc aux valeurs moyennes de retrait-gonflement données dans le **Tableau IV.5.1**.

#### IV.5.5. Analyse des flèches

Les chargements et déchargements étant effectués après stabilisation de la flèche suite aux changements de conditions hydriques, on estime que les flèches analysées sous haute et basse humidité sont filtrées des effets de retrait-gonflement (Annexes C).

##### IV.5.5.1. Détermination des modules instantanés

L'exploitation directe des flèches instantanées, en charge et en décharge, a permis, à l'aide de l'équation (I.2.10), la détermination des modules élastiques des deux essences sous basse et sous haute humidité.

**Tableau IV.5.4.** Modules d'élasticité en charge et en décharge des échantillons de Moabi à partir des flèches instantanées

Condition	Sous basse humidité (HR = 40%)				Sous haute humidité (HR = 90%)			
	En charge		En décharge		En charge		En décharge	
Grandeur	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)
Moabi_1 H	1,37	16,1	1,52	14,5	1,58	13,9	1,57	14,1
Moabi_2 H	1,37	15,8	1,54	14,0	1,58	13,7	1,55	13,9
Moabi_3 H	1,33	16,6	1,25	17,7	1,31	16,9	1,32	16,7
Moabi_3 B	1,35	16,3	1,33	16,6	1,27	17,4	1,30	17
Moabi_4 B	1,47	15,2	1,17	19	1,47	15,2	1,45	15,3
Moabi_4 H	1,40	15,9	1,35	16,6	1,33	16,8	1,37	16,3
<b>Moyenne</b>	<b>1,38</b>	<b>16</b>	<b>1,36</b>	<b>16,4</b>	<b>1,42</b>	<b>15,6</b>	<b>1,43</b>	<b>15,5</b>

$\Delta u$  : variation de flèche ;  $E$  : module élastique longitudinal.

**Tableau IV.5.5.** Modules d'élasticité en charge et en décharge des échantillons d'Ozigo à partir des flèches instantanées

Condition	Sous basse humidité (HR = 40%)				Sous haute humidité (HR = 90%)			
	En charge		En décharge		En charge		En décharge	
Grandeur	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)	$\Delta u$ (mm)	$E$ (GPa)
Ozigo_1 H	1,46	9,95	1,47	9,85	1,57	9,26	1,55	9,39
Ozigo_1 B	1,17	12,4	1,42	10,2	1,31	11,1	1,43	10,2
Ozigo_2 B	1,52	9,58	1,63	8,91	1,55	9,39	1,63	8,94
Ozigo_2 H	1,58	9,21	1,62	9,01	1,61	9,03	1,58	9,22
Ozigo_3 H	1,27	11,4	1,33	10,9	1,35	10,7	1,39	10,4
Ozigo_4 H	1,57	9,29	1,63	8,93	1,60	9,11	1,64	8,88
<b>Moyenne</b>	<b>1,43</b>	<b>10,3</b>	<b>1,52</b>	<b>9,63</b>	<b>1,50</b>	<b>9,76</b>	<b>1,54</b>	<b>9,50</b>

$\Delta u$  : variation de flèche ;  $E$  : module élastique longitudinal.

L'étude comparative des valeurs de modules en basse et haute humidité montre que, sous haute humidité, les modules sont plus faibles que ceux en basse humidité. Cette observation reste cohérente du fait que des études antérieures ont montré que la valeur du module baisse avec l'augmentation de l'humidité interne du bois.

En se projetant sur nos courbes d'isothermes en adsorption et en désorption, et ce pour une estimation des teneurs en eau de nos deux essences respectives (Moabi et Ozigo), on note, qu'à 40% d'humidité relative (en désorption), nos éprouvettes de Moabi et d'Ozigo ont respectivement une humidité interne moyenne correspondante de 10% et de 11%. A 90% d'humidité relative, les humidités relatives moyennes correspondantes (en adsorption) sont respectivement de 19% et 20%. Cela équivaut donc à une variation de teneur en eau de 9%. En calculant le rapport module élastique humide (à 90% de HR) et module élastique sec (à 40% de HR), il ressort un taux moyen de diminution de 4% pour le Moabi et 3% pour l'Ozigo. Au regard des recommandations de la norme NF EN 384 concernant les ajustements des modules d'élasticité longitudinal (2% pour toute différence de pourcentage de teneur en eau), nos taux de variation de modules semblent assez faibles pour les variations de teneur en eau obtenues pour nos deux feuillus. Cette constatation mérite une étude approfondie sur les bois feuillus tropicaux en vue d'en tirer une relation caractéristique appropriée entre teneur en eau et variation des propriétés mécaniques.

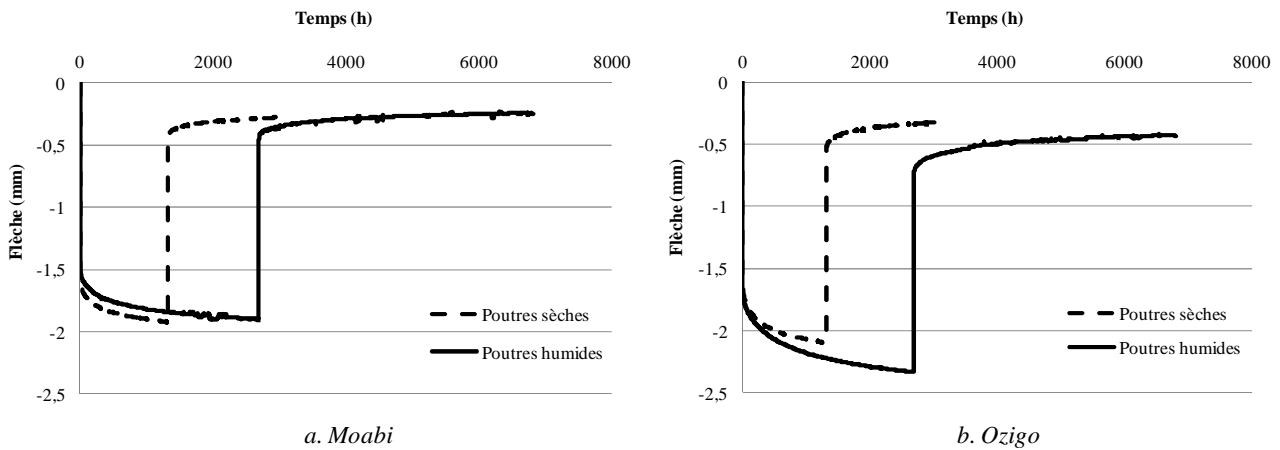
L'analyse des modules d'élasticité en charge et en décharge montrent, dans l'ensemble, des valeurs plus faibles en décharge qu'en charge. Cette constatation laisse présager un comportement plutôt non linéaire malgré le taux de chargement peu élevé (moins de 15% de la charge moyenne de rupture). Une exception est cependant faite pour quelques échantillons dont les modules en décharge sont supérieurs aux modules en charge.

Enfin, les valeurs des modules obtenues restent assez faibles à celles déterminées à partir des essais destructifs notamment en basse humidité.

#### *IV.5.5.2. Fluage-recouvrance*

Dans cette partie, nous avons superposé les réponses des poutres en fluage-recouvrance en basse et haute humidité afin d'apprécier l'influence de l'humidité sur le comportement des deux essences.

La présente analyse porte de manière indifférenciée sur la flèche mesurée en partie basse, ou sur la flèche mesurée en partie haute étant donné que les effets de retrait – gonflement transversal sont déduits. Pour cela, nous travaillons en termes de valeur moyenne. La **Figure IV.5.9** présente les courbes obtenues à partir des valeurs moyennes des flèches déduites par les capteurs haut et bas pour les deux essences.

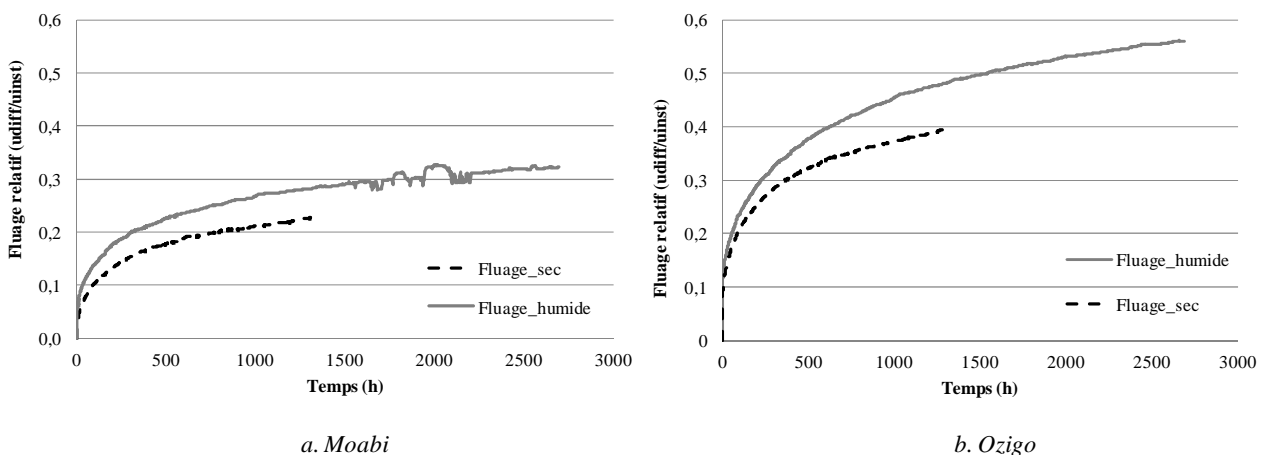


**Figure IV.5.9.** Expérience du fluage-recouvrance en basse et haute humidité

Dans l'ensemble, les observations suivantes peuvent être relevées :

- La recouvrance instantanée n'est pas égale à la flèche instantanée en charge. Ce constat est plutôt caractéristique des matériaux vieillissants et endommagés ou fissurés au cours de la sollicitation.
- La recouvrance est non complète (partielle).
- L'expérience de fluage-recouvrance semble plus prononcée pour les poutres humides que pour les poutres sèches. Une analyse plus fine des deux expériences (**Figures IV.5.10 et IV.5.11**) permet d'apprécier à juste titre cette observation.

IV.5.5.2.1 *Expérience de fluage*

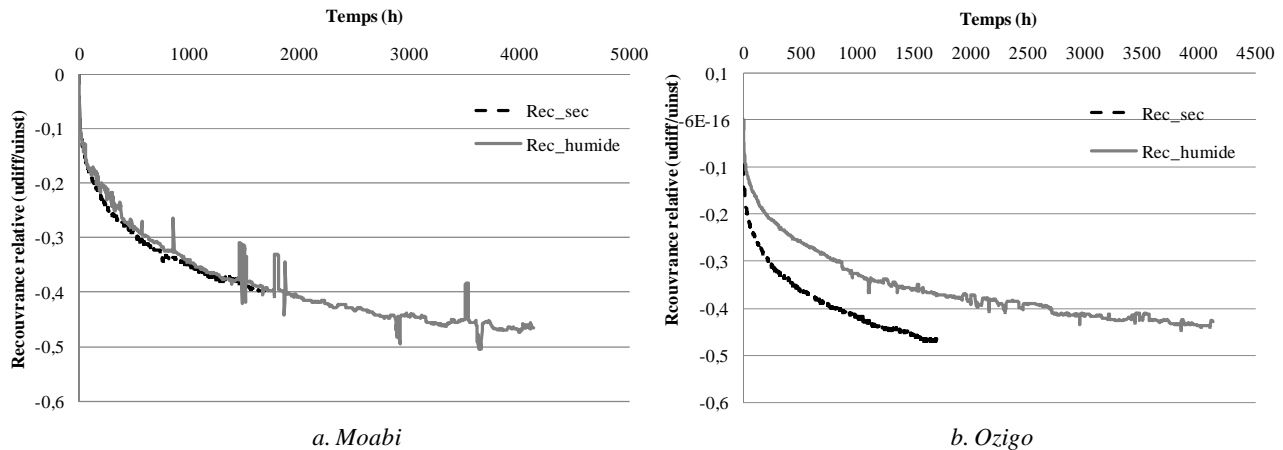


**Figure IV.5.10.** Fluage relatif moyen en basse et haute humidité relative

Dans l'ensemble, quoique les temps de fluage ne soient pas identiques, on peut constater que le fluage humide est plus accentué que le fluage à basse humidité. Ce constat vient confirmer les

résultats d'un grand nombre de travaux expérimentaux notamment ceux de Hoffmeyer [HOF 90], de Dinwoodie *et al* [DIN 91], de Morlier [MOR 94] pour ne citer que ceux-là. Ici, le fluage des poutres d'Ozigo est plus important que celui des poutres de Moabi ; ce qui semble logique au regard des valeurs de modules des deux essences.

#### IV.5.5.2.2 Expérience de recouvrance



**Figure IV.5.11.** Recouvrance relative moyenne en basse et haute humidité relative

A l'inverse du fluage, la recouvrance est plus accentuée pour les poutres sèches que pour les poutres humides. Cette observation est plus prononcée pour les poutres d'Ozigo que pour les poutres de Moabi.

Cependant, si nous abordons la recouvrance comme étant la superposition d'un effet de fluage « positif » et d'un effet de fluage « négatif » après déchargement, la recouvrance représente au final un fluage relatif. Ainsi, plus le matériau aura un comportement viscoélastique marqué (à forte humidité), plus les effets de recouvrance seront différés et amortis donnant l'impression d'avoir des variations de flèche plus lentes.

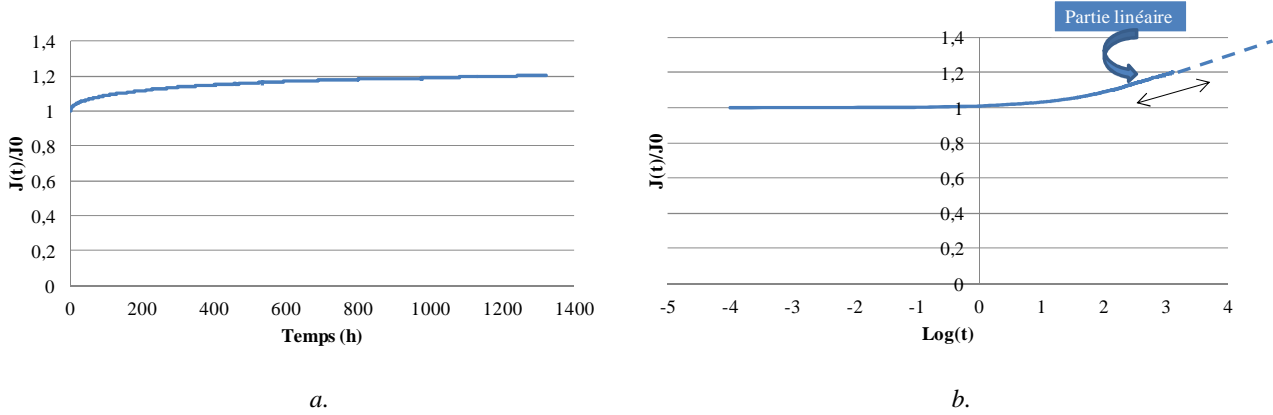
#### IV.5.6. Modélisation du fluage-recouvrance

En utilisant le modèle rhéologique proposé dans la section IV.2, les courbes expérimentales permettent l'identification des paramètres du modèle que sont les termes en  $A_i$  et  $\lambda_i$  reliés à la rigidité et à la viscosité du matériau.

##### IV.5.6.1. Extrapolation des courbes expérimentales en fluage

L'expérience de fluage étant limitée dans le temps (quelques milliers d'heures sous basse et haute humidité relative), **Figure IV.5.12**, une extrapolation de la courbe expérimentale est réalisée en posant l'hypothèse d'un comportement linéaire du fluage (sous basse et sous haute humidité

relative) au cours du temps. En effet, le tracé de la courbe  $J(t)/J_0$  en fonction du logarithme du temps  $t$  montre que le comportement présente une asymptote linéaire dont les coefficients de régression sont à déterminer. Ainsi, la courbe expérimentale peut être extrapolée jusqu'à 10 ans permettant d'en déterminer les paramètres du modèle.



**Figure IV.5.12.** Exemple d'une courbe de fluage d'une poutre de Moabi sous basse humidité

IV.5.6.2. Identification des paramètres en fluage

L'équation (IV.3.4) peut s'écrire comme suit :

$$J(t_j) = 1 + \sum_{i=1}^n A_n f(t_j, \lambda_i) \quad \text{avec} \quad f(t_j, \lambda_i) = 1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_j) \quad (IV.5.1)$$

Ainsi pour  $t = t_1$ , avec  $n = 4$  correspondant au nombre de cellules de kelvin-Voigt, l'équation (IV.4.1) s'écrit :

$$J(t_1) - 1 = A_1 f(t_1, \lambda_1) + A_2 f(t_1, \lambda_2) + A_3 f(t_1, \lambda_3) + A_4 f(t_1, \lambda_4) \quad (IV.5.2)$$

D'où pour  $t = t_1$  à  $t_4$ , l'équation (IV.4.1) devient sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} J(t_1) - 1 \\ J(t_2) - 1 \\ J(t_3) - 1 \\ J(t_4) - 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(t_1, \lambda_1) & \dots & f(t_1, \lambda_4) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(t_4, \lambda_1) & \dots & f(t_4, \lambda_4) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} \quad (IV.5.3)$$

En posant l'équation (IV.5.3) sous la forme :

$$[J] = [F] \times [A] \quad (IV.5.4)$$

Les paramètres  $A_i$  sont déterminés en résolvant l'équation :

$$[A] = [F]^{-1} \times [J] \quad (IV.5.5)$$

Les paramètres  $\lambda_i$  sont déterminés, pour chaque intervalle de temps  $t_j$ , à partir de l'équation (IV.3.5) en procédant à une minimisation de l'écart moyen entre les données expérimentales et le modèle. Le paramètre d'ajustement est alors l'erreur  $\xi$ .

Dans le cas d'une poutre de Moabi (exemple de la poutre Moabi\_1H) on a :

**Sous basse humidité**

**Tableau IV.5.6.** Identification des paramètres rhéologiques pour une poutre de Moabi sous basse humidité

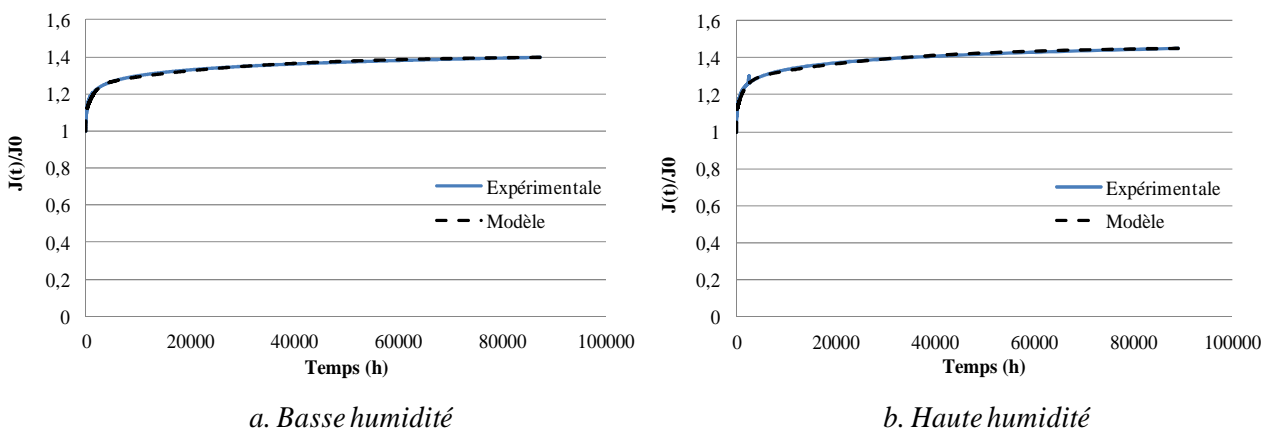
$t_j$	$\xi$	$\lambda_i$	$A_i$
24	1,28E-02	1,25E-01	2,E-02
168		1,78E-02	7,28E-02
4320		6,93E-04	1,49E-01
87600		3,42E-05	1,59E-01

**Sous haute humidité**

**Tableau IV.5.7.** Identification des paramètres rhéologiques pour une poutre de Moabi sous haute humidité

$t_j$	$\xi$	$\lambda_i$	$A_i$
24	9,74E-03	1,25E-01	3,25E-02
168		1,78E-02	7,68E-02
4320		6,93E-04	1,68E-01
87600		3,42E-05	1,82E-01

La **Figure IV.5.13** présente un exemple de résultat obtenu pour la même poutre sous basse et sous haute humidité.



**Figure IV.5.13.** Exemple de modélisation du fluage d’une poutre de Moabi

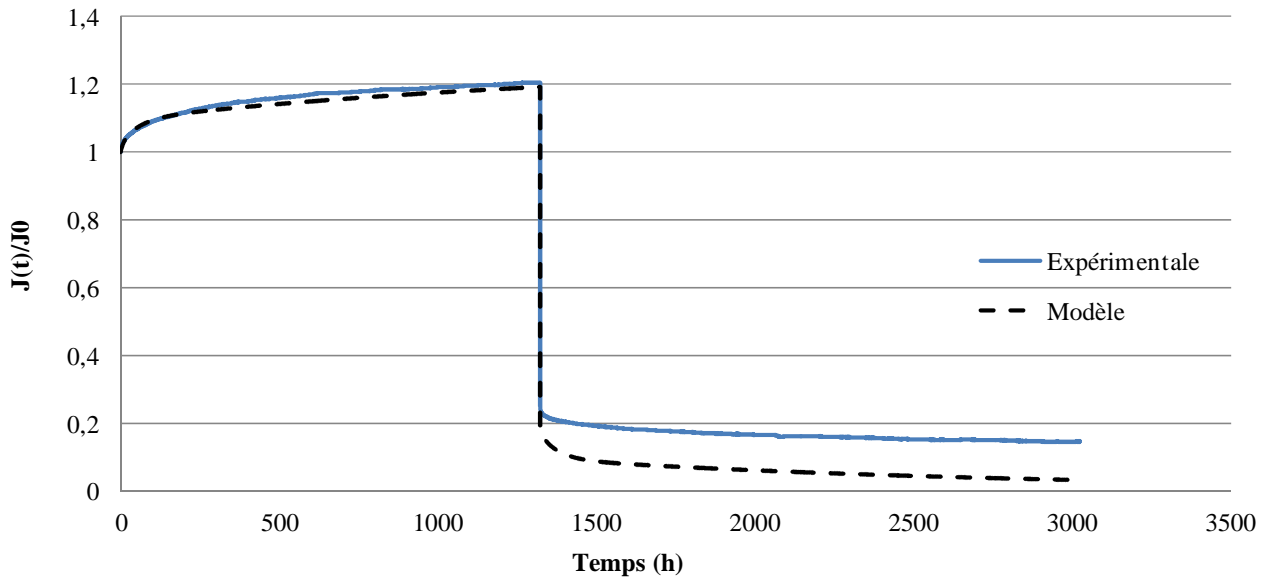


IV.5.6.3. Modélisation du fluage-recouvrance

La fonction de fluage-recouvrance  $J(t)$  est obtenue comme suit :

$$J(t) = \sum_{i=1}^n A_i (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t)) - \sum_{i=1}^n A_n (1 - \exp(-\lambda_i \cdot (t - t'))) \tag{IV.5.6}$$

Sur la base de la courbe expérimentale, on définit alors les paramètres viscoélastiques du modèle. La **Figures IV.5.14** montre le résultat obtenu en termes de modélisation.



**Figure IV.5.14.** Modélisation du fluage-recouvrance d’une poutre de Moabi sous basse humidité

Il apparaît clairement que le modèle semble surestimer la recouvrance du matériau. La recouvrance instantanée n’étant pas identique à la flèche instantanée en charge, le phénomène est donc non-linéaire. Il importe d’introduire dans l’expression du fluage un paramètre  $g$  de non-linéarité.

Ainsi pour  $t \leq t'$ , on peut écrire :

$$u(t) = g \times J(t) \quad \text{avec } g \geq 1 \quad \text{et} \quad J(t) = A_0 + \sum_{i=1}^4 A_i (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t)) \tag{IV.5.7}$$

Pour  $t > t'$ , on a alors :

$$u(t) = g \times [J(t) - J(t - t')] \tag{IV.5.8}$$

Cette dernière équation permet alors de déterminer, moyennant le coefficient de non-linéarité  $g$ , les paramètres viscoélastiques de chaque poutre.

**Sous basse humidité**

**Tableau IV.5.6.** Paramètres viscoélastiques, pour une poutre de Moabi, sous basse humidité

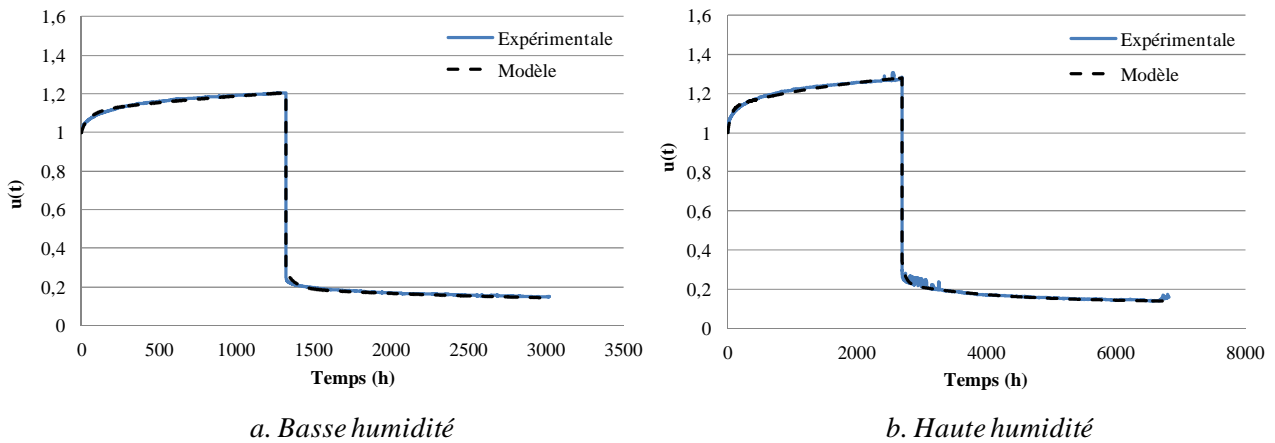
$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda_i$	$A_0$	$A_i$
24	1,10	3,19E-03	1,11E-01	9,12E-01	1,75E-02
168			1,58E-02		8,40E-02
4320			6,16E-04		1,47E-01
87600			3,04E-05		1,45E-01

**Sous haute humidité**

**Tableau IV.5.7.** Paramètres viscoélastiques, pour une poutre de Moabi, sous haute humidité

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda_i$	$A_0$	$A_i$
24	1,08E+00	5,70E-03	1,25E-01	9,29E-01	5,33E-03
168			1,78E-02		1,15E-01
4320			6,93E-04		1,10E-01
87600			3,42E-05		5,24E-01

La **Figure IV.5.15** ci-dessous présente un exemple de modélisation réalisé, pour une poutre de Moabi, sous basse et haute humidité.



**Figure IV.5.15.** Exemple de modélisation du fluage-recouvrance d’une poutre de Moabi

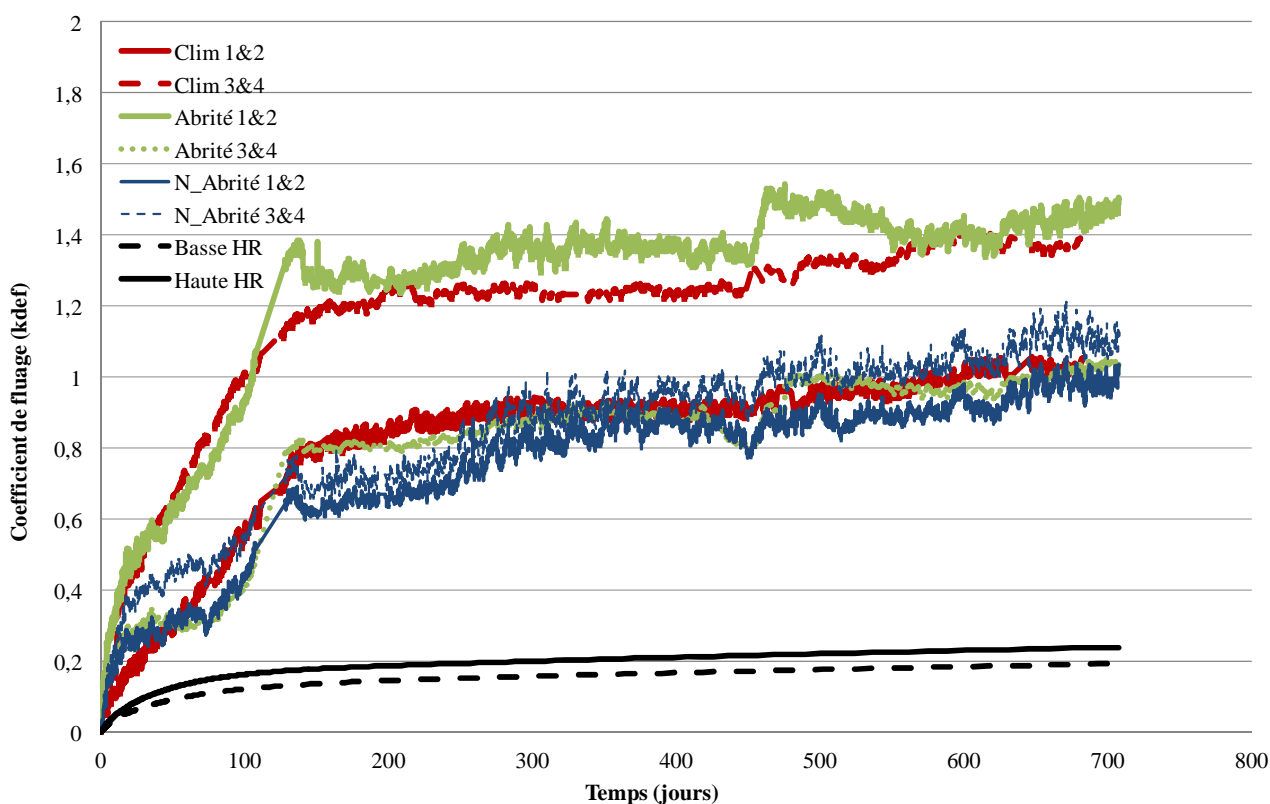
L’ensemble des résultats pour les huit poutres est donné en annexes C.

## IV.6. Etude comparative du fluage relatif des essais en laboratoire et en conditions naturelles réelles

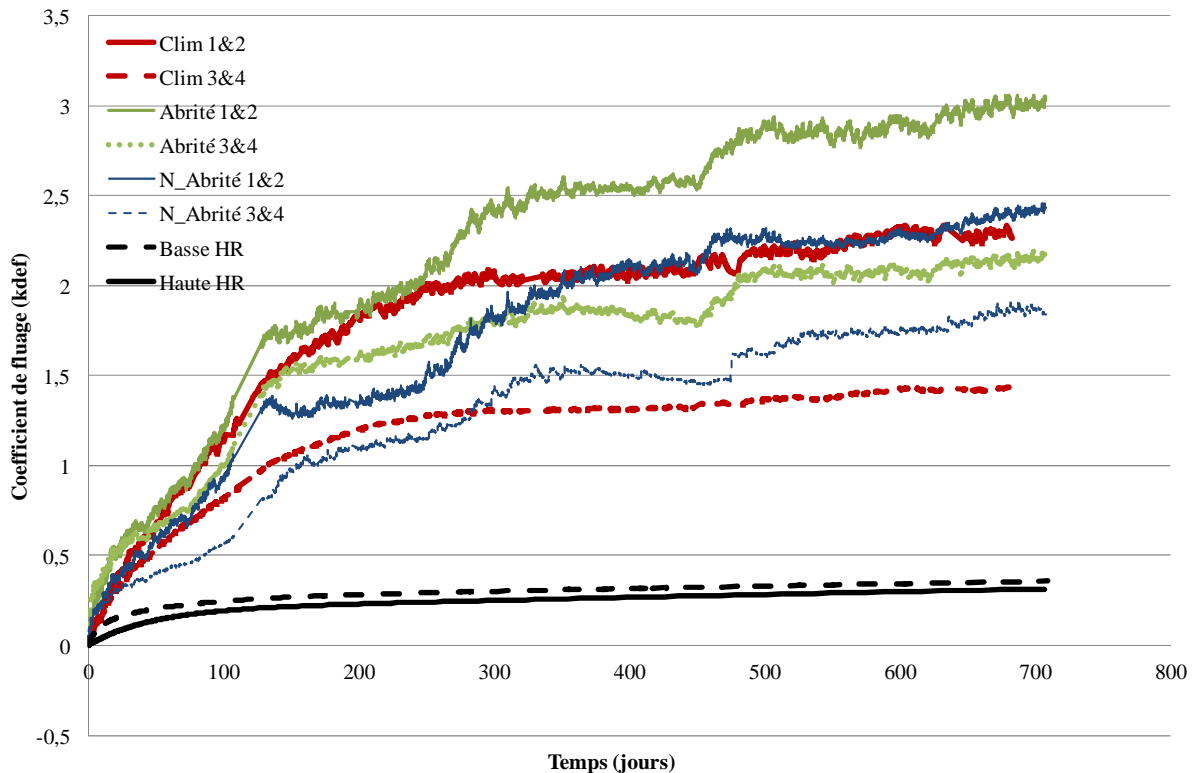
### IV.6.1. Etude comparative (expérience, simulation)

Dans cette partie, nous avons, par le biais de la modélisation, extrapolé le fluage relatif en basse et haute humidité à deux ans afin de comparer les valeurs du fluage relatif de cette expérimentation à celles obtenues en conditions naturelles réelles. Les **Figures IV.6.1** et **IV.6.2** présentent les courbes obtenues en termes de valeurs moyennes.

Dans l'ensemble, les résultats sont sans appel et confirment les résultats expérimentaux de Dinwoodie *et al* [DIN 91] cités par Navi [NAV 05] sur des panneaux de particules MUF sollicités sous humidité relative constante et cyclique. On peut donc, sans risque de se tromper, affirmer, non seulement, que la variation d'humidité relative entre des valeurs maximale et minimale augmente le fluage du bois et de ses dérivées, mais également, que cette augmentation est beaucoup plus grande que celle que le fluage peut atteindre sous la plus haute humidité relative.



**Figure IV.6.1.** Etude comparative des coefficients de fluage pour le bois de Moabi



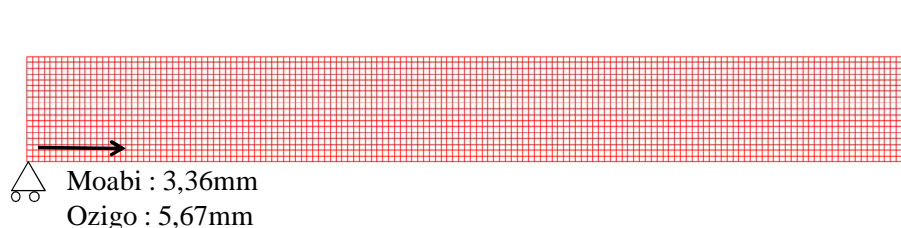
**Figure IV.6.2.** Etude comparative des coefficients de fluage pour le bois d'Ozigo

#### IV.6.2. Discussions et perspectives

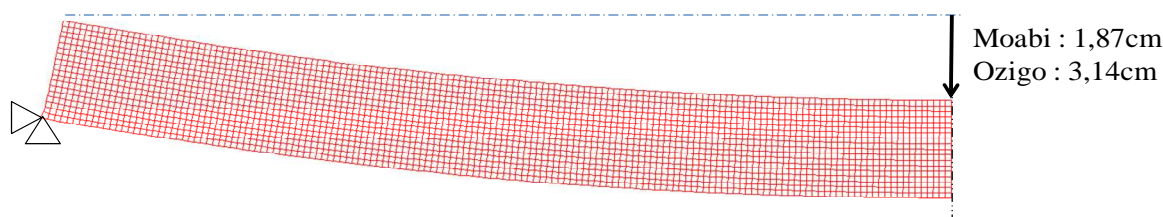
Les résultats présentés précédemment doivent cependant être modérés en y intégrant les conditions expérimentales réelles. Lors de la mise en œuvre des corps d'épreuve, des échantillons de bois ont été prélevés afin d'en mesurer l'humidité initiale. Dans un second temps, les isothermes de sorption permettent d'estimer les humidités d'équilibre correspondantes aux variations d'humidité relative durant les essais (entre 90%HR et 40%HR). Ainsi, concernant le Moabi, l'humidité d'origine moyenne est estimée à 18%. Pour une humidité relative de 40%HR, l'humidité interne est estimée à 10%. Nous estimons donc que durant l'essai, la plage d'humidité interne varie de 18% à 10%. Concernant l'Ozigo, l'humidité initiale est estimée à 20% tandis que l'humidité d'équilibre à 40%HR est d'environ 11%.

Durant la première année, les variations hydriques sont particulières. En effet, durant les 100 premiers jours d'essai, les échantillons initialement humides sont chargés dans une ambiance sèche (grande saison sèche). Les poutres vont donc subir une grande période de séchage. N'ayant pas à ce jour modélisé les histoires hydriques (processus de diffusion), nous ne pouvons pas précisément prédire la distribution hydrique dans les sections. Cependant, en se plaçant dans des conditions extrêmes, nous pouvons étudier l'effet d'un séchage homogène des sections. Ainsi, pour le Moabi, nous estimons une diminution de 8% d'humidité interne et 9% pour l'Ozigo.

Une simulation par éléments finis nous permet d'étudier les effets de cette première phase de séchage en prenant en compte une incertitude des conditions aux limites au niveau des appuis. Deux calculs ont donc été menés. Le premier considère un glissement parfait des appuis, **Figure IV.6.3**. Le second considère un blocage horizontal total, **Figure IV.6.4**. Nous pensons que la réalité se trouve entre ces deux états extrêmes. Les calculs sont menés pour le Moabi en introduisant un module d'élasticité de flexion de 16000 MPa et un coefficient de retrait-gonflement axiale de  $2.10^{-4}\%/%$ . Concernant l'Ozigo, le module de flexion est de 9900 MPa pour un coefficient de retrait-gonflement axial de  $3.10^{-4}\%/%$ .



**Figure IV.6.3.** Déplacement horizontal de retrait longitudinal : glissement parfait des appuis



**Figure IV.6.4.** Flèche de retrait longitudinal : blocage horizontal des appuis

Si nous reprenons les graphiques des **Figures IV.6.1 et IV.6.2**, nous remarquons que les différences entre les mesures expérimentales et les flèches de fluage sont, respectivement, de 1,2cm pour le Moabi et 2,6cm pour l'Ozigo, et ce, pour les essais en extérieur abrité (conditions les plus défavorables). Ces différences se trouvent dans les mêmes ordres de grandeurs que les flèches calculées induites par un blocage total des déplacements horizontaux au voisinage des appuis (1,87cm pour le Moabi et 3,14cm pour l'Ozigo). Cette réflexion nous permet, aujourd'hui, de proposer des axes d'amélioration de notre protocole expérimental et numérique; à savoir :

1. Mesurer le déplacement horizontal en équipant les appuis de capteurs de déplacement.
2. Développer une simulation numérique du retrait-gonflement longitudinal empêchés couplée à la modélisation de la diffusion hydrique pour en recalculer les flèches correspondantes.

## IV.7. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, des essais de fluage-recouvrance ont été réalisés sur des poutres de bois de Moabi et d'Ozigo sollicitées en flexion 4 point à l'échelle laboratoire. Les conditions climatiques imposées à l'étude ont été inspirées des relevés climatiques des essais de flexion menés à l'échelle structure sur les mêmes essences à Franceville au Gabon. Afin d'évaluer l'influence des conditions hygrométriques, les poutres ont été soumises, sous basse et haute humidité relative (correspondant aux valeurs minimale et maximale de l'histoire du chargement hydrique des poutres à l'échelle structure), à un cycle de chargement et déchargement mécanique.

Les résultats obtenus montrent que le fluage est plus accentué pour les poutres humides et que la recouvrance est plus importante lorsque les poutres sont sèches. En terme de module, au regard des valeurs obtenues sous basse et sous haute humidité relative, l'influence de l'humidité relative est très peu marquée malgré sa forte variation (de 40% à 90% soit environ 9% de variation de teneur en eau du matériau). Une modélisation du fluage-recouvrance sous basse et haute humidité permet de déterminer les paramètres viscoélastiques des poutres.

Une étude comparative des deux essais (à l'échelle laboratoire et à l'échelle structure) montre, malgré les effets d'échelle, que les effets mécano-sorptifs sont déterminants pour l'évaluation du comportement différé des structures bois. En effet, l'étude montre que les effets différés sont plus importants pour une structure soumise, sous charge mécanique, à des cycles de variations hygroscopiques que pour la même structure soumise, sous la même charge mécanique, à une humidité relative maximale constante.

Eu égard à ce qui précède, il est clair que la détermination des coefficients de fluage ne peuvent être déduite d'une étude à l'échelle laboratoire sous climat constant. Une telle étude n'a de sens que pour le découplage des épiphénomènes différés indispensables à la compréhension de leurs interactions. Dans le contexte d'un calcul d'ingénieur, une approche globalisante semble plus cohérente. Les études des paramètres de fluage doivent donc être menées sur une base expérimentale à l'échelle structure dans un environnement naturel en vue de prendre en compte l'effet aléatoire des variations des paramètres climatiques.

Enfin, nous souhaitons mettre un accent sur le soin à apporter aux conditions d'appuis des éléments fléchis. Plus précisément, des outils de conceptions doivent prendre en compte des conditions réalistes et non théoriques généralement utilisées dans les codes de calcul. Cette question mérite aujourd'hui d'être approfondie.

## CONCLUSION GENERALE

L'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales, évoluant dans des environnements tropicaux, reste l'objectif majeur à atteindre à long terme pour le travail qui vient d'être mené. Les travaux, présentés dans ce mémoire, n'aborde qu'un aspect de l'ensemble du domaine traité dans ce code en vue du dimensionnement des structures bois : à savoir l'étude du comportement différé des structures bois sous sollicitations mécaniques de long terme en ambiance variable, et l'établissement des coefficients de sécurité qui prennent en compte l'influence de l'environnement.

Dans ce mémoire, un protocole expérimental, premier du genre, permettant de découpler les effets différés des éléments bois sollicités en flexion long terme, a été réalisé en utilisant deux capteurs de déplacement situés à mi-travée en face supérieure et inférieure des poutres. Cela a permis, non seulement, de dissocier les effets de retrait-gonflement transversale des effets de fluage proprement-dit et des effets mécano-sorptifs, mais également, de comprendre la nature des effets mesurés selon l'emplacement des capteurs. A cela s'ajoute les effets liés au retrait-gonflement longitudinale, non négligeable : selon les conditions aux appuis (bloqué ou libre) et la taille des échantillons mis en œuvre.

La validation de ce protocole a permis de réaliser les essais de flexion long terme à l'échelle de la structure à Franceville, sur des poutres de Moabi et d'Ozigo, dans les trois ambiances prédéfinies : ambiance climatisée (au regard du climat chaud et humide), ambiance extérieure abritée et ambiance extérieure exposée aux intempéries. Un suivi permanent, et en cours d'acquisition des flèches et des variations climatiques (en température et en humidité), permet de réaliser une véritable base de données utile à la poursuite des objectifs fixés. Ainsi, l'analyse des résultats montrent que les bois tropicaux ont un comportement différé accentué dont les effets sont favorisés par la forte variation d'humidité (40% à 100%) pour des températures quasiment constante (autour de 25°C) dans l'année pour la zone étudiée. Il en résulte que le paramètre clé, dans le comportement différé de ces essences en environnement tropical, est l'humidité. Comment cette humidité évolue-t-elle dans ces essences ? Comment influence-t-elle le comportement mécanique différé de ces essences ?

Pour répondre à ces interrogations, nous avons réalisé une campagne d'essais pour la caractérisation des isothermes de sorption et des cinétiques de diffusion. L'utilisation de solutions salines dans des cloches installées dans une pièce maintenue à température ambiante constante

permet d'obtenir les différents états d'équilibre hydrique. Une modélisation par l'approche thermodynamique développée par Merrakeb [MER 06] assure une bonne simulation des hystérésis obtenues. L'étude des cinétiques de diffusion a été réalisée dans une enceinte climatique en intégrant les humidités extrêmes obtenues dans des mesures in-situ à Franceville au Gabon. Pour valider le protocole expérimental, deux essences tempérées ont été associées à la caractérisation : le Hêtre et le Sapin. Ainsi, nous avons pu caractériser, dans les deux essences, les paramètres de diffusion longitudinale et transversale utiles à la modélisation des gradients d'humidité sous contraintes mécaniques. L'étude des processus diffusifs et la détermination des paramètres diffusifs montrent que les trois feuillus diffusent beaucoup moins vite que le sapin (résineux). On observe une bonne affinité entre l'Ozigo et le Hêtre. Le processus de diffusion dans la direction longitudinale est pratiquement douze fois plus rapide que dans la direction tangentielle, pour nos deux essences tropicales.

Dans la dernière partie, une étude du fluage-recouvrance, à l'échelle centimétrique, sous basse et haute humidité (respectivement 40% et 90% d'humidité relative), à température constante, a été présentée. Similaire à la première campagne expérimentale présentée dans le chapitre I, cette étude a eu pour objectif de mieux cerner les effets isolés de l'humidité sur le comportement mécanique différé de ces essences. Les conditions climatiques imposées à l'étude ont été inspirées des relevés climatiques des essais de flexion menés à l'échelle structure sur les mêmes essences à Franceville au Gabon. Il en résulte que le fluage est plus accentué pour les poutres humides et que la recouvrance est plus importante lorsque les poutres sont sèches. Une modélisation du fluage-recouvrance sous basse et haute humidité est proposée et permet la détermination des paramètres viscoélastiques des poutres étudiées. En termes de module élastique, on note des écarts peu marqués entre l'état sec et l'état humide malgré la forte variation d'humidité. Il importe, là aussi, d'apporter un ajustement sur les relations existantes [GUI 87] [AFN 02] qui mettent en relief l'influence de l'humidité sur le module élastique.

L'étude comparative des deux essais (à l'échelle laboratoire et à l'échelle structure), sous réserve d'un effet d'échelle, montre que les effets mécano-sorptifs sont prépondérants sur l'état hydrique du matériau pour l'évaluation du comportement différé des structures bois. Outre cet aspect, une simulation des effets du retrait-gonflement longitudinale, pour les poutres de structures, a montré que la flèche engendrée à cette échelle n'est plus négligeable et pourrait expliquer, au-delà des effets mécano-sorptifs, l'écart considérable entre les coefficients de fluage obtenus sur les échantillons de laboratoire et les tests en vraie grandeur.



En perspective, une modélisation du comportement mécanique différé des structures bois, sous contraintes mécaniques, intégrant des gradients d'humidité engendrés par les variations climatiques aléatoires, permettra probablement de mieux évaluer les coefficients de fluage à prendre en compte pour le dimensionnement et la vérification des structures bois en zone tropicale. Un accent doit être porté sur les effets, non négligeables du retrait-gonflement longitudinal trop souvent négligé. Or, ce travail révèle un comportement atypique remettant largement en cause la modélisation des appuis et des liaisons cachant ainsi des effets d'hyperstaticité se traduisant, dans la réalité, par du retrait-gonflement longitudinal plus ou moins gêné. Cet effet, se reflète, au mieux, par des modifications de flèche mais peut cacher des sur-contraintes hydriques pouvant déclencher de la mécano-sorption additionnelle.



## BIBLIOGRAPHIE

- [AFN 61] AFNOR, NF B 50-002 « Bois, Vocabulaire », *Edition AFNOR*, 1961.
- [AFN 85] AFNOR, NF B 50-003 « Bois, Vocabulaire (seconde liste) », *Edition AFNOR*, 1985.
- [AFN 02] AFNOR, NF EN 13183-1 « Teneur en humidité d'une pièce de bois scié – Partie 1 : Détermination par la méthode par dessiccation », *Edition AFNOR*, 2002.
- [AFN 06] AFNOR, NF EN 1995-1-1 « Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments », *Edition AFNOR*, 2006.
- [AFN 08] AFNOR, NF EN 1995-1-1/NA « Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments », Annexe nationale à la NF EN 1995-1-1 : 2005, *Edition AFNOR*, 2008.
- [AFN 08] AFNOR, NF EN 338 « Bois de structure – Classes de résistance », *Edition AFNOR*, 2008.
- [AFN 08] AFNOR, NF EN 384 « Structures en bois – Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique », *Edition AFNOR*, 2008.
- [AFN 09] AFNOR, NF EN 408 « Structures en bois – Bois de structure et bois lamellé-collé – Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques », *Edition AFNOR*, 2009.
- [AFO 97] AFOCEL, « Le Douglas », Chap. 5, p. 250, *Edition AFOCEL*, 1997, 416p.
- [AGO 01] Agoua E., « Diffusivité et perméabilité du bois : validation de méthodologies expérimentales et prise en compte de paramètres morphologiques simples pour la modélisation physique », Thèse de doctorat en Sciences Forestières et du Bois, Ecole Nationale de Génie Rural des Eaux et Forêts, Nancy, 2001, 173 p.
- [AND 63] Anderson N. T., Mc Carty J. L., « Two parameters isotherm equation for fiber-water systems », *Ind. Eng. Chem. Process Design Develop.*, Vol. 2, 1963, pp. 103-105.
- [ARM 72] Armstrong L. D., Grossmann P. U. A., « The behavior of particle board and hardboard beams during moisture cycling », *Wood Science and Technology*, Vol. 6, 1972, pp. 128-137.
- [ATI 86] ATIBT, « Atlas des bois tropicaux », Tome 1 – Afrique, *Edition ATIBT/CTFT*, 1986, 208 p.

- [AYI 98a] **Ayina O., Morlier P.**, « Comportement en torsion du matériau bois », *Matériau et Construction*, Vol. 31, 1998, pp. 405-410.
- [AYI 98b] **Ayina O., Eloundou J. P., Ntede H.**, « Un modèle viscoélastique simplifié de fluage à long-terme des poutres en bois sous climat tropical humide », *Annales GC Bois*, Vol. 3, 1998, pp. 11-17.
- [BAZ 85] **Bazant Z. P.**, « Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature », *Wood Science and Technology*, Vol. 19, 1985, pp. 159-177.
- [BOD 82] **Bodig J., Jayne B. A.**, « Mechanic of wood and wood composites », *Van Nostrand Reinhold Company*, New York, 1982, 712 p.
- [BOU 03] **Bou Saïd E.**, « Contribution à la modélisation des effets différés du bois et du béton sous conditions climatiques variables – Application aux structures mixtes bois-béton », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003, 172 p.
- [BRE 09] **Breysse D.**, « Maîtrise du risque en génie civil. Volume 3 : Sécurité des constructions et réglementation », *Hermes Science Publications*, Paris, 2009.
- [BRU 38] **Brunauer S., Emmet P. H., Teller E.**, « Adsorption of gases in multimolecular layers », *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 60, 1938, pp. 309-319.
- [BRU 68] **Bruhat G., Kastler A., Vichniesky R.**, « Cours de physique générale – thermodynamique », 6<sup>ème</sup> édition, *Masson et Cie*, Paris, 1968.
- [BUI 87] **Buisson A.**, « Situation climatique en 1986 durant la grande saison sèche au Gabon », Institut de Recherche pour le Développement, Ministère de la Coopération, France, *Veille Climatique Satellitaire*, n° 16, Février 1987, pp. 59-67.
- [CEI 10] **C.E.I.G.** (Centre d'Echange d'Informations du Gabon), <http://ga.chm-cbd.net/gabondef/Default.htm>.
- [CHA 06] **Chassagne P.**, « Contribution à la prédiction des conséquences mécaniques des phénomènes thermo-hydriques couplés : Application au bois », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006, 163 p.
- [CIR 03] **CIRAD, Département Forêts**, « TROPIX 5.0 : Caractéristiques technologiques de 215 essences tropicales », *Edition CIRAD*, 2003.
- [CIR 11] **CIRAD, Département Forêts**, « TROPIX 7 : Caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées », *Edition CIRAD*, 2011.

- [DAV 93] **Davis J. R., Ilic J., Wells P.**, « Moisture content in drying wood using direct scanning gamma-ray densitometry », *Wood and Fiber Science*, Vol. 25, n° 2, 1993, pp. 153-162.
- [DEN 77] **Dent R. W.**, « A multilayer theory for gas sorption – Part I: Sorption for a single gas », *Textile Research Journal*, Vol. 47, pp. 145-152.
- [DIN 91] **Dinwoodie J. M., Higgins J. A., Paxton B. H., Robson D. J.**, « Quantifying predicting and understanding the mechanism of creep in board materials », In *Fundamental Aspect on Creep in Wood*, (eds), Matensson A., Ranta-Maunus A., Seoane I., Commission of the European Communities, *COST 508*, 1991, pp. 99-119.
- [DIR 01] **Dirol D., Déglise X.**, « Durabilité des bois », *Edition Hermès Sciences Europe Ltd*, 2001, 416 p.
- [DMN 10] **D.M.N. : Direction de la Météorologie National**, « Rapport 2010 de la pluviométrie et des températures minimales et maximales absolues », Direction de la Météorologie National, Gabon, 2010.
- [DUB 11] **Dubois F., Manfoumbi N., Ulmet L., Sauvat N.**, « Decoupling of surface and massif heat transfer process: Modeling and experimental aspect », *COST Actions IE0601*, Paris, France, November 14-15, 2011.
- [FEL 90] **Félix B.**, « Eléments de rhéologie du bois », *Edition CTBA*, 1990, 143p.
- [FOU 86] **Foudjet A. E.**, « Contribution à l'étude rhéologique du matériau bois », Thèse de Doctorat d'Etat, Université Claude Bernard, Lyon I, 1986.
- [FOU 89] **Foudjet A., Bremond C.**, « Creep of four tropical hardwoods from Cameroon », *Wood Science and Technology*, Vol. 23, 1989, pp. 335-341.
- [GER 88] **Gerhards C. C.**, « Effect of grade on load duration of Douglas fir lumber in bending », *Wood Science and Technology*, Vol. 20, n° 1, 1988, pp. 146-161.
- [GER 98] **Gérard J., Edi Kouassi A., Daigremont C., Détienne P., Fouquet D., Vernay M.**, « Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains », *CIRAD-Forêt*, 1988, 185 p.
- [GRI 88] **Gril J.**, « Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Université de Paris VI, 1988.
- [GRO 76] **Grossmann P. U. A.**, « Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour », *Wood Science and Technology*, Vol. 10, 1975, pp. 163-168.

- [GUI 87] **Guitard D.**, « Mécanique du matériau bois et composites », *Edition Cépaduès*, 1987, 238 p.
- [HAI 46] **Hailwood A. J., Horrobin S.**, « Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model », *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 42B, 1946, pp. 84-102.
- [HAN 95] **Hanhijarvi A.**, « Modelling of creep strain mechanism in wood », Ph.D. Thesis, Espoo University, Finland, 1995, 182 p.
- [HEA 64] **Hearmon R., Paton J.**, « Moisture content changes and creep of wood », *Forest Products Journal*, Vol. 8, 1964, pp. 357-359.
- [HOY 86] **Hoyle R., Hani R. Y., Eckard J. J.**, « Creep of Douglas-fir beams due to cyclic humidity fluctuations », *Wood and Fiber Science*, Vol. 18, 1986, pp. 376-392.
- [HUN 88] **Hunt D. G., Shelton C. F.**, « Longitudinal moisture-shrinkage coefficients of softwood at the mechano-sorptive creep limit », *Wood Science and Technology*, Vol. 22, n° 3, 1988, pp. 199-210.
- [HUS 09] **Husson J. M.**, « Loi de comportement élastique avec effet mémoire », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2009, 120 p.
- [irimep.org] **I.R.M.E.P.** : Institut de Recherche International pour une Médiation Economique et Politique.
- [JEN 85] **Jensen K. F., Reyes S.**, « Estimation of effective transport coefficients in porous solids based on percolation concepts », *Chemical Engineering Science*, Vol. 40, 1985, pp. 1723-1734.
- [JOU 86] **Jouve J. H., Salès C.**, « Influence de traitements physico-chimiques sur le fluage du matériau bois et la relaxation des contraintes », GS Rhéologie du bois CNRS, France, Séminaire interne 22-24 sept. 1996.
- [KOC 02] **Koc P., Houska M.**, « Characterization of the sorptive properties of spruce wood by the inverse identification method », *Holz als Roh und Werkstoff*, Vol. 60, n° 4, 2002, pp. 265-270.
- [KOL 84] **Kolmann F.F.P., Côté W. A.**, « Principles of Wood Science and Technology », Solid Wood, Vol. I, *Springer-Verlag Edition*, 1984, 592 p.
- [KOU 04] **Kouchade A. C.**, « Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire », Thèse de doctorat en Sciences Forestières et du Bois, Ecole Nationale de Génie Rural des Eaux et Forêts, Nancy, 2004, 137 p.

- [LEI 71] **Leicester R. H.**, « A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams », *Wood Science and Technology*, Vol. 5, 1971, pp. 211-220.
- [LIG 60] **LIGNUM**, Union Suisse en faveur du bois, Service de consultations, Zurich, 1960.
- [MAN 09a] **Manfoumbi N., Sauvat N., Dubois F.**, « Vers une méthode expérimentale de découplage des phénomènes hydriques et différés des structures bois en flexion », *XXVIème Rencontres Universitaire de Génie Civil*, Saint Malo, 3-5 juin, 2009.
- [MAN 09b] **Manfoumbi N., Sauvat N., Dubois F.**, « Découplage expérimental des phénomènes hydriques et différés en ambiance contrôlée », *19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Marseille, 24-28 Août, 2009.
- [MAN 10] **Manfoumbi N., Sauvat N., Dubois F.**, « Experimental decoupling of hydric and postponed phenomena of timber structures in controlled climate conditions », *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*, Trentino, Italy, June 20-24, 2010.
- [MAN 11a] **Manfoumbi N., Dubois F., Sauvat N.**, « Découplage expérimental des déformations d'éléments bois sous chargements hydrique et mécanique variables », *European Journal of Environment and Civil Engineering EJECE*, 2011, accepté avec corrections.
- [MAN 11b] **Manfoumbi N., Dubois F., Sauvat N.**, « Comportement mécanique différé des essences tropicale en ambiances tropicales : Expérimentation et cadre réglementaire », *20<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Besançon, 29 Août au 2 septembre, 2011.
- [MAN 11c] **Manfoumbi N., Dubois F., Sauvat N.**, « Decoupling of timber structure deformations under variable hydric and mechanical loadings: experimental aspects », *COST Actions IE0601*, Paris, France, November 14-15, 2011.
- [MAN 11d] **Manfoumbi N., Dubois F., Sauvat N.**, « Decoupling of timber structure deformations under variable hydric and mechanical loadings: experimental aspects », *soumis à Wood Science and Technology*, 2011.
- [MEF 05] **M.E.N. : Ministère des Eaux et Forêts**, « Mémoire de politique économique et financière pour 2004-2005 », Ministère des Eaux et Forêts, Gabon, 2005, 13 p.
- [MER 06] **Merakeb S.**, « Modélisation des structures en bois en environnement variable », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2006, 146 p.
- [MIN 94] **Minamisawa A., Ozawa A.**, « Measurement of moisture diffusivity in woods using ultrasounds », *Mokuzai Gakkaishi, Journal of Japan Wood Research Society*, vol. 40, n° 10, 1994, pp. 1052-1058.

[MOU 02] Mouchade N., « Etude expérimentale et modélisation des transports diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique des bois de hêtre et d'épicéa », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2002, 140 p.

[MOU 08] Moutou Pitti R., « Découplage des modes mixtes de rupture dans les matériaux viscoélastiques orthotropes : modélisation et expérimentation », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008, 146 p.

[NAT 04] Natterer J., Sandoz J.-L., Rey M. « Construction en Bois : Matériaux, technologie et dimensionnement », Traité de génie civil, vol. 13, *Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, 2004.

[NAV 05] Navi P., Heger F., « Comportement thermo-hydrromécanique du bois », *Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, 2005.

[NEL 83] Nelson R.M. Jr., « A model for sorption of water vapor by cellulosic materials », *Wood and Fiber Science*, Vol. 15, 1983, pp. 8-22.

[PER 94] Perré P., « Le séchage du bois » dans « Le bois, matériau d'ingénierie », Ed. Ph. Jodin, *ARBOLOR*, 1994, pp. 201-286.

[PER 96] Perré P., « Mesure en régime permanent de la diffusivité massique dans le domaine hygroscopique : présentation du système PVC - CHA », *Cahier d'ARBOLOR*, 1996, pp. 201-286.

[PET 02] Petutschnigg A. J., Flach M., Katz H., « Decay recognition for spruce in CT-Images », *Holz als Roh und Werkstoff*, Vol. 60, n° 3, 2002, pp. 219-223.

[PIT 96] Pittet V., « Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée », Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1996, 284 p.

[PRO 08] P.R.O.T.A. (Plant Ressources Of Tropical Africa), « Ressources végétale de l'Afrique tropicale 7(1) : Bois d'œuvre 1 », *PROTA, Backhuys Publishers, CTA*, Pays-Bas, 2008, 785 p.

[PRO 10] P.R.O.T.A. (Plant Ressources Of Tropical Africa), « Bois d'œuvre de l'Afrique tropicale – Conclusions et recommandations basées sur PROTA 7(1) : Bois d'œuvre 1 », *Fondation PROTA*, Nairobi, Kenya, 2010, 92 p.

[RAN 02] Randriambololona H., Dubois F., Petit C., « Modélisation du comportement mécanique différé du bois en environnement variable », *Revue Française de Génie Civil*, Vol. 6, n° 7-8, 2002, pp. 1347-1371.



- [**RAN 03**] **Randriambololona H.**, « Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable », Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 2003, 143 p.
- [**RAN 75**] **Ranta-Maunus A.**, « The viscoelasticity of wood at varying moisture content », *Wood Science and Technology*, Vol. 9, 1975, pp. 189-205.
- [**RBF 68**] **RBFT**, « 50ème anniversaire du Centre de Recherche sur les Bois Tropicaux de Nogent-Sur-Marne 1917-1967 », *Colloque sur le rôle des recherches techniques dans le développement de l'emploi des Bois Tropicaux en Europe, RBFT*, 25-27 Octobre, 1967.
- [**SAL 82**] **Salmén N. L.**, « Temperature and water induced softening behavior of wood fiber based materials », Ph.D. Thesis, KTH, Stockholm, 1982, 120 p.
- [**SKA 88**] **Skaar C.**, « Wood-water relations », *Springer-Verlag, New York*, 1988, 283 p.
- [**TOR 92**] **Toratti T.**, « Creep of timber beams in variable environment », Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology, Finland, 1992, 182 p.
- [**TOR 95**] **Toratti T., Morlier P.**, « Fluage à long terme du bois fléchi en grandeur structurale », *Materials and Structures*, Vol. 28, 1995, pp. 284-292.
- [**VAN 84**] **Van Den Berg C.**, « Description of water activity of food for engineering purposes by means of GAB model of sorption », *International Engineering and foods*, 1984, pp. 119-131.
- [**WAD 94**] **Wadso L.**, « Unsteady-state water vapor adsorption in wood: an experimental study », *Wood and Fiber Science*, Vol. 26, n° 1, 1994, pp. 36-50.
- [**YEO 02**] **Yeo H., Smith W. B., Hanna R. B.**, « Mass transfer in wood evaluation with a calorimetric technique and numerical analysis », *Wood and Fiber Science*, Vol. 34, n° 4, 2002, pp. 657-665.
- [**ZOH 98**] **Zohoun S.**, « Détermination de la diffusivité massique dans le domaine hygroscopique du bois : comparaison de mesures en régimes permanent et transitoire », Thèse de Doctorat en Mécanique et Energétique, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1998, 110 p.





## RESUME

Le présent mémoire apporte une contribution à l'application de l'Eurocode 5 dans le dimensionnement et la vérification des constructions bois en zone tropicale. Cette approche, première du genre, nécessite la compréhension du comportement mécanique des essences tropicales en environnement variable. Dans une première phase, une étude expérimentale de découplage des phénomènes différés des éléments fléchis, sous climat contrôlé et à l'échelle centimétrique, est présentée. Ce protocole expérimental, premier du genre, a permis non seulement de dissocier les effets de retrait-gonflement transversale des effets de fluage proprement-dit et des effets mécano-sorptifs, mais également de comprendre la nature des effets mesurés selon l'emplacement des capteurs. Les effets liés au retrait-gonflement longitudinale, non négligeable, selon les conditions aux appuis et la taille des échantillons, sont également perceptibles. En deuxième phase, des essais de flexion long-terme, à l'échelle structure, ont été menés, en ambiances tropicales, à Franceville au Gabon, sur deux essences tropicales : le Moabi et l'Ozigo. A l'image de l'Eurocode 5, trois types d'environnement ont été sélectionnés : une ambiance climatisée temporairement, une ambiance extérieure abritée et une ambiance extérieure non-abritées. Les résultats obtenus et en cours d'acquisition montrent que les bois tropicaux ont un comportement différé accentué par la forte variation d'humidité pour des variations de températures peu significatives. Pour comprendre l'influence de l'humidité sur ces essences, une campagne d'essais, pour la caractérisation des isothermes de sorption et cinétiques de diffusion, a été menée, dans une troisième phase. Les paramètres de diffusion longitudinale et transversale dans les deux essences ont été déterminés. En complément, des essais de fluage et relaxation, en flexion long-terme, sous ambiance contrôlée, à l'échelle matériau de ces essences, ont été également conduits, dans une dernière phase. Cette étude, menée en basse et haute humidité, montre que le fluage est plus accentué pour les poutres humides et que la recouvrance est plus importante lorsque les poutres sont sèches. Une modélisation du fluage-recouvrance sous basse et haute humidité permet la détermination des paramètres viscoélastiques des poutres étudiées. Enfin, une étude comparative des coefficients de fluage, obtenus sur les essais en laboratoire et les essais en vrai grandeur, montre que les effets mécano-sorptifs sont prépondérants, en plus des effets du retrait-gonflement longitudinale empêchés non négligeables à l'échelle structure.

**Mots clés :** bois tropicaux, climat tropical, Eurocode 5, comportement long-terme, fluage, retrait-gonflement, viscoélasticité, mécano-sorption, isothermes de sorption, diffusion.

## ABSTRACT

The present report makes a contribution to adapt Eurocode 5 for timber constructions using tropical hardwoods in tropical climate. This approach requests to well know the mechanical behavior in variable environment. In a first time, an experimental study is presented for decoupling postponed phenomena from a longitudinal four-point creep bending, under controlled climate on small samples by measuring upper and lower deflections. The result of this original experimental protocol allows separating and illustrating different phenomena met on creep evolution of timber beams: swelling-shrinkage effects, hygro-lock effect, orthotropic mechano-sorption and viscoelasticity. In second time, longitudinal four-point creep bending tests were realised, in the scale of structure, in tropical atmosphere to Franceville in Gabon, in two tropical hardwoods: Moabi and Ozigo. The experimental device was led on three sites corresponding to three different climatic environments according to specific service classes of Eurocode 5: an atmosphere temporarily air-conditioned, a sheltered outside atmosphere and an outside atmosphere non-sheltered. The obtained results show that tropical wood have a deferred behaviour stressed by the strong variation of humidity for little significant temperature variations. To define new classes of service appropriated for the tropical atmospheres, it is important to characterize the diffusion process. Following this objective, a complete experimental device was led, in the scale of material, in order to determinate the sorption isotherms and diffusion parameters needed to study the mechano-sorptive behavior in real condition. In a last time, others tests of creep and relaxation, in the scale of material, were realized under controlled atmosphere, in the same species. This study, led in low and high relative humidity, shows that the creep is more significant for the wet beams and the recovery is more important when beams are dry. A modeling of the creep-recovery under low and high relative humidity is proposed and allows the determination of the viscoelastic parameters of the studied beams. At the end, a comparative study of creep coefficients, obtained on the laboratory samples and the beams in real environment, shows that the mechanic-sorptive effects are dominating, with an importance of longitudinal swelling-shrinkage effects, not insignificant in the scale of structure.

**Keywords:** tropical hardwood, tropical environment, Eurocode 5, long term behavior, creep, swelling-shrinkage, viscoelasticity, mechano-sorption, isotherms of sorption, diffusion.

# UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET INGENIERIE EN MATERIAUX  
MECANIQUE ENERGETIQUE ET AERONAUTIQUE

## FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes - Axe Génie Civil et Durabilité  
(GEMH-GCD)

Thèse N° 15-2012

### THESE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline : Génie Civil

Présentée et soutenue par

### Nicaise MANFOUMBI BOUSSOUGOU

Ingénieur Génie Civil de l'Université des Sciences et Technique de Masuku

Enseignant à l'Ecole Polytechnique de Masuku, Gabon

Date : 15 Juin 2012

## *Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement*

### ANNEXES

Thèse dirigée par : **Frédéric DUBOIS**

#### Jury :

M. Denis BREYSSE	Professeur des Universités, Bordeaux	Président
M. Joseph GRIL	Directeur de Recherche CNRS, Montpellier	Rapporteur
M. Laurent BLERON	Maître de Conférences HDR, Cluny	Rapporteur
M. Samuel IKOGOU	Maître Assistant CAMES, Libreville (Gabon)	Examineur
M. Nicolas SAUVAT	Maître de Conférences, Egletons	Examineur
M. Frédéric DUBOIS	Professeur des Universités, Egletons	Directeur de thèse



# **SOMMAIRE ANNEXES**

## *ANNEXES A*

Mesures de flèche : Poutres de Moabi et d'Ozigo en flexion à Franceville au Gabon

## *ANNEXES B*

Isothermes de sorption et cinétiques de diffusion : Sapin, Hêtre, Moabi et Ozigo

## *ANNEXES C*

Caractérisation des propriétés viscoélastiques en flexion : Moabi et Ozigo





## ANNEXES A

*Mesures de flèche : Poutres de Moabi et d'Ozigo en flexion à Franceville au Gabon*



## A.1 Ambiance intérieure climatisée

Evolution temporelle des flèches par binôme de poutres et par essence.

### A.1.1 Moabi

#### Poutre 1 & 2

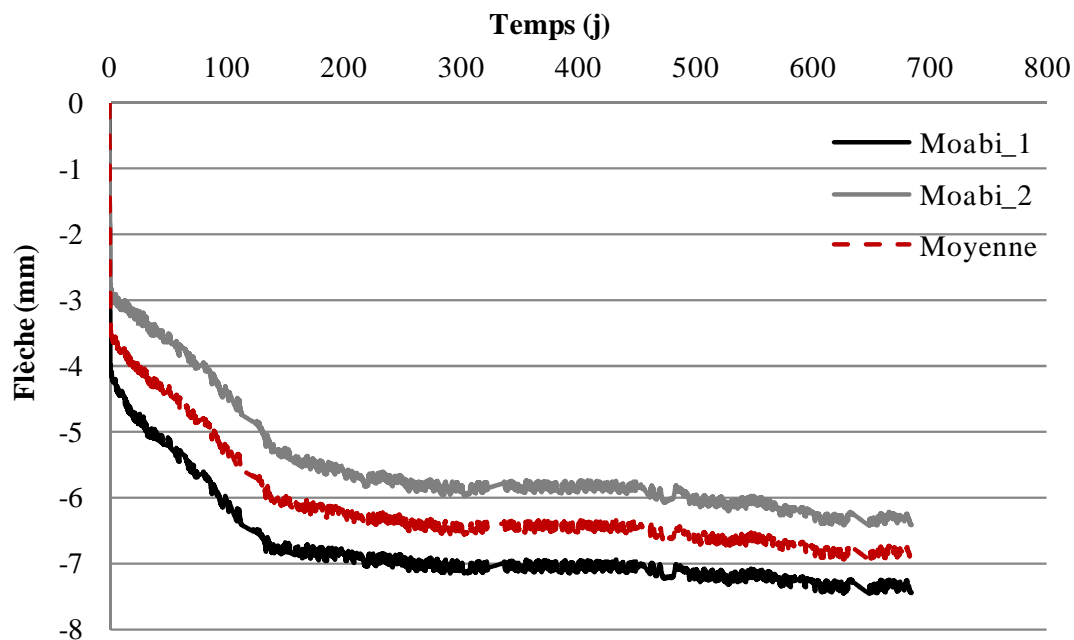


Figure A.1.1. Evolution des flèches, en face inférieure, des poutres 1 et 2

#### Poutre 3 & 4

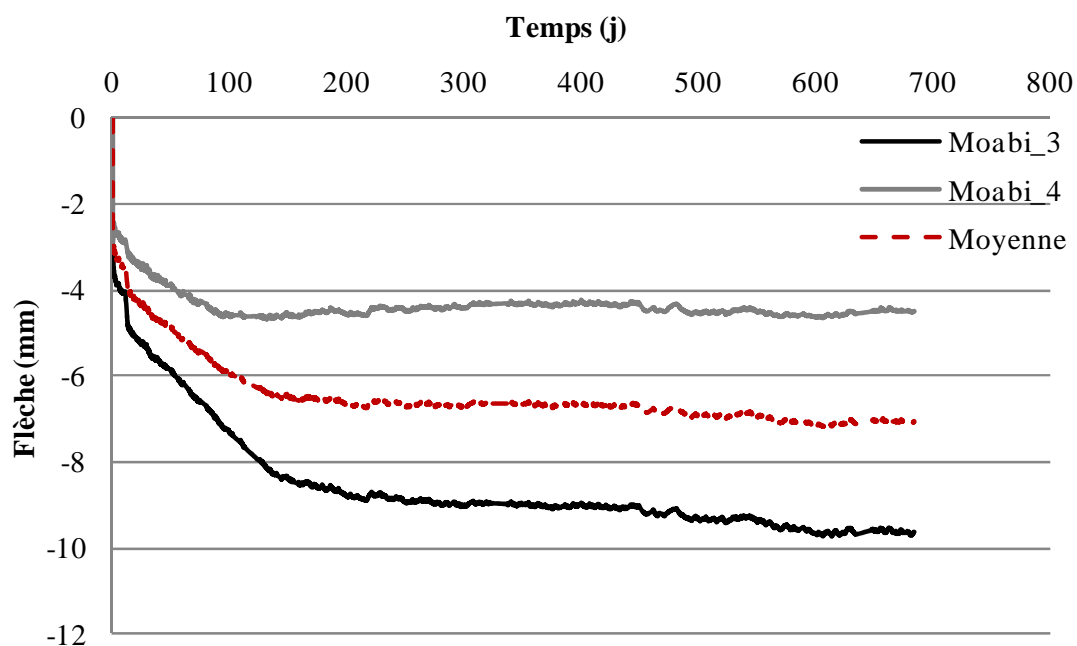


Figure A.1.2. Evolution de la flèche en face inférieure

### A.1.2 Ozigo

#### Poutre 1 & 2

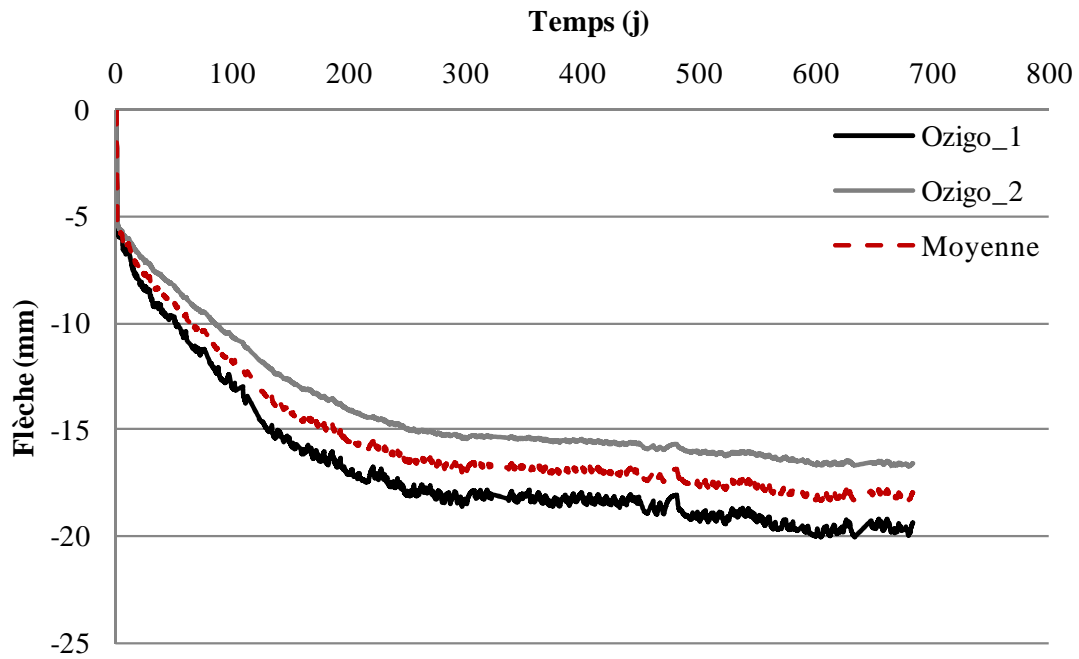


Figure A.1.3. Evolution de la flèche en face supérieure

#### Poutre 3 & 4

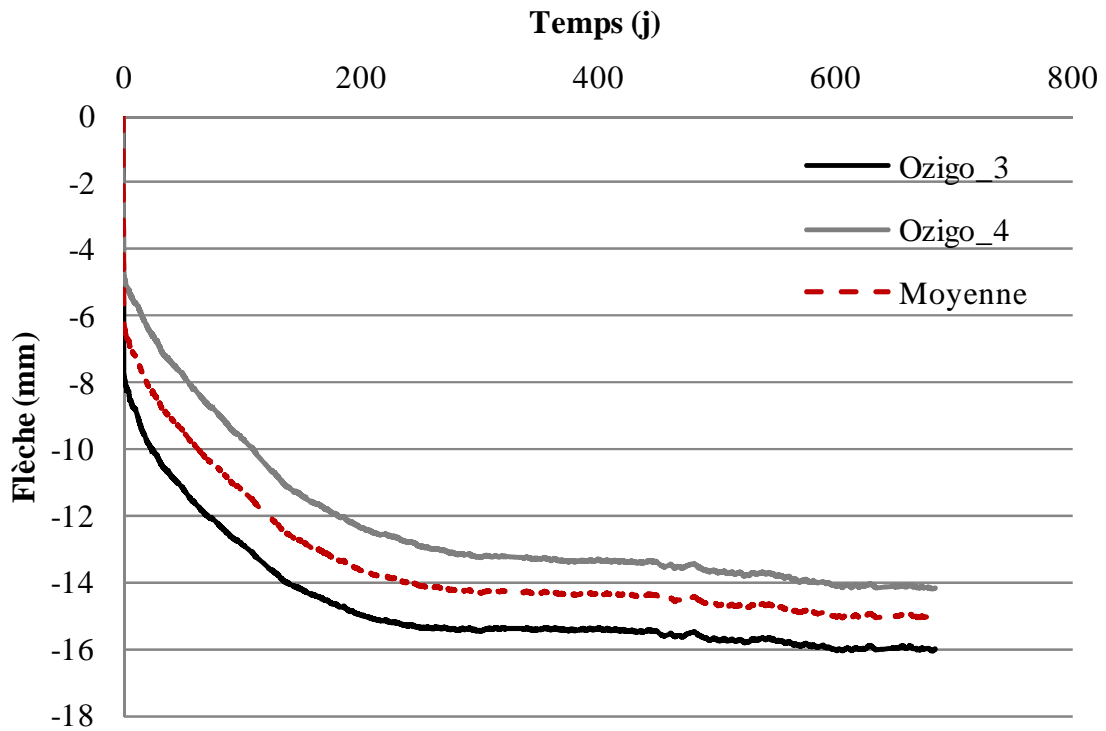


Figure A.1.4. Evolution de la flèche en face inférieure

## A.2 Ambiance extérieure abritée

Evolution temporelle des flèches par binôme de poutres et par essence.

### A.2.1 Moabi

#### Poutre 1 & 2

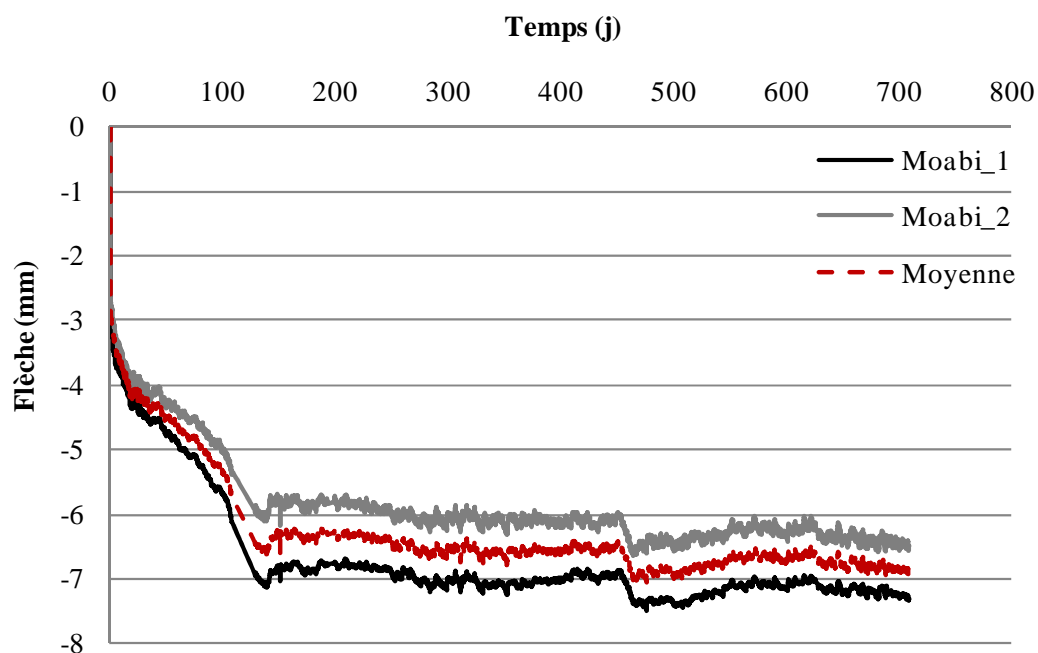


Figure A.2.1. Evolution des flèches, en face inférieure, des poutres 1 et 2

#### Poutre 3 & 4

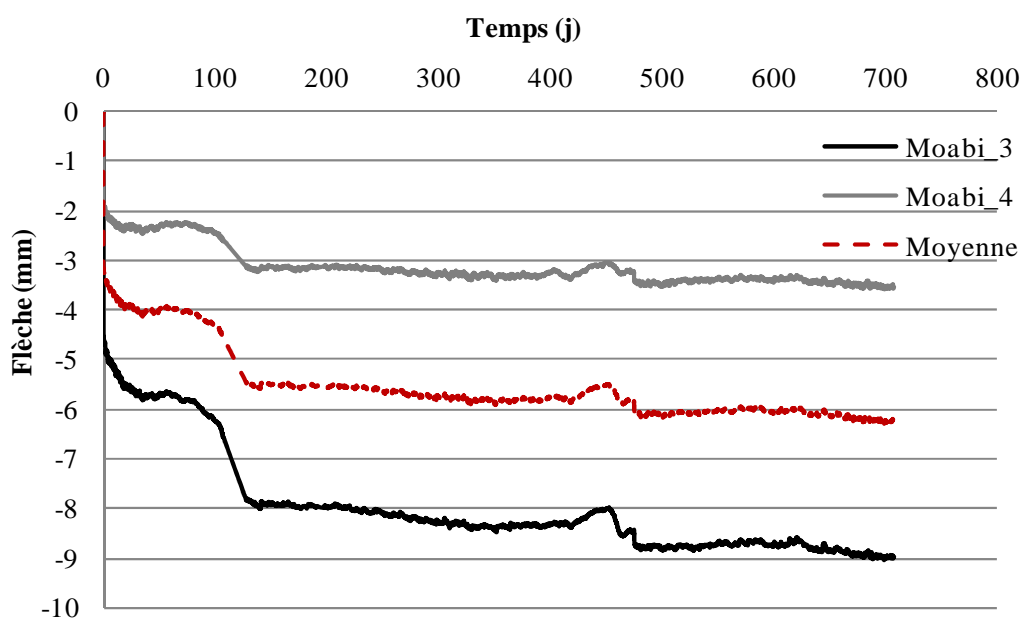


Figure A.2.2. Evolution de la flèche en face inférieure

## A.2.2 Ozigo

### Poutre 1 & 2

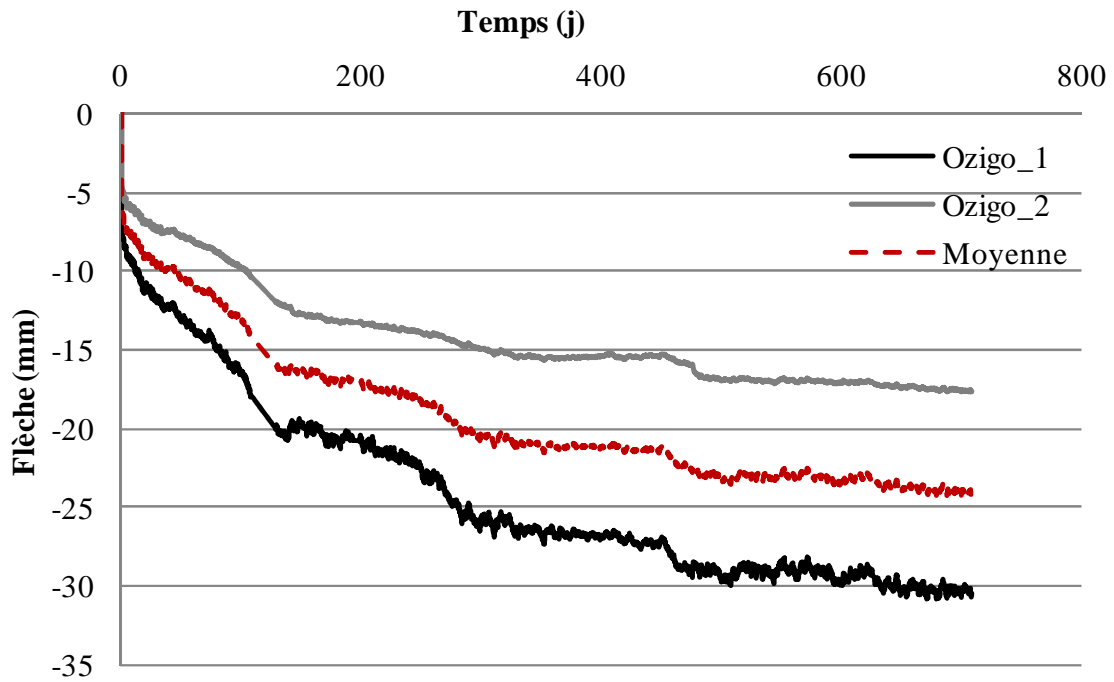


Figure A.2.3. Evolution de la flèche en face supérieure

### Poutre 3 & 4

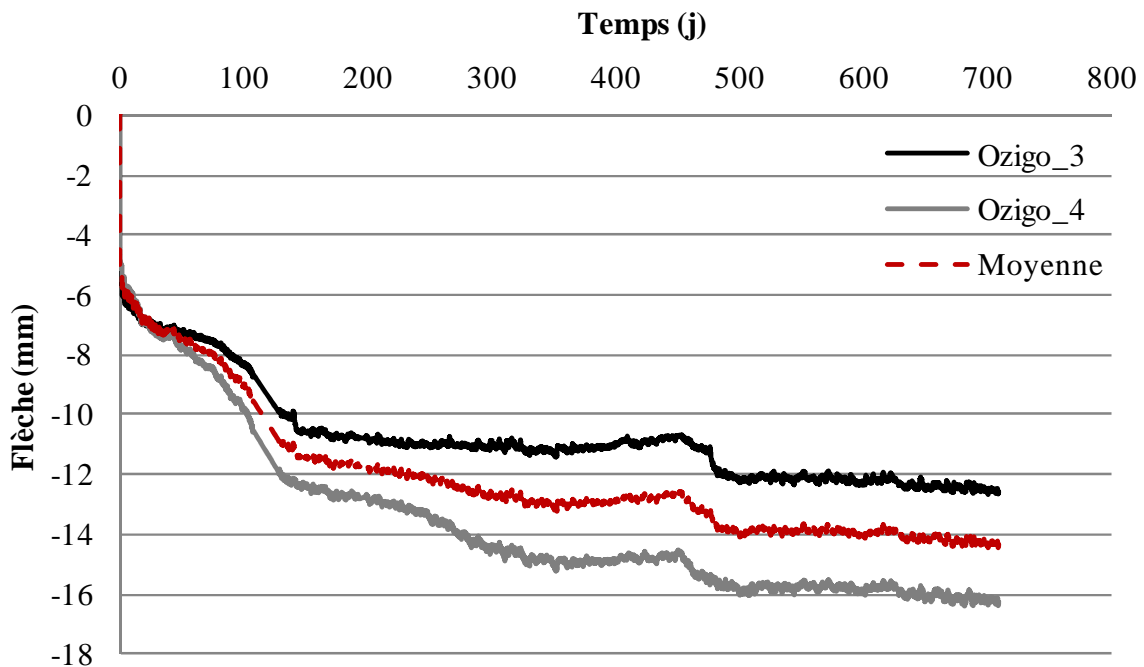


Figure A.2.4. Evolution de la flèche en face inférieure

### A.3 Ambiance extérieure non-abritée

Evolution temporelle des flèches par binôme de poutres et par essence.

#### A.3.1 Moabi

##### Poutre 1 & 2

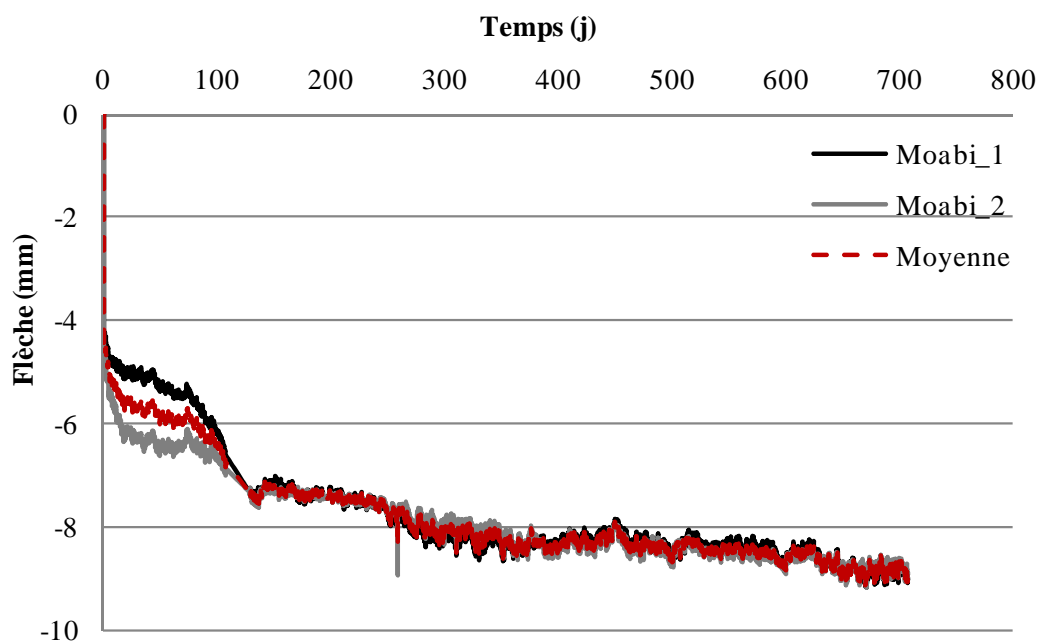


Figure A.3.1. Evolution des flèches, en face inférieure, des poutres 1 et 2

##### Poutre 3 & 4

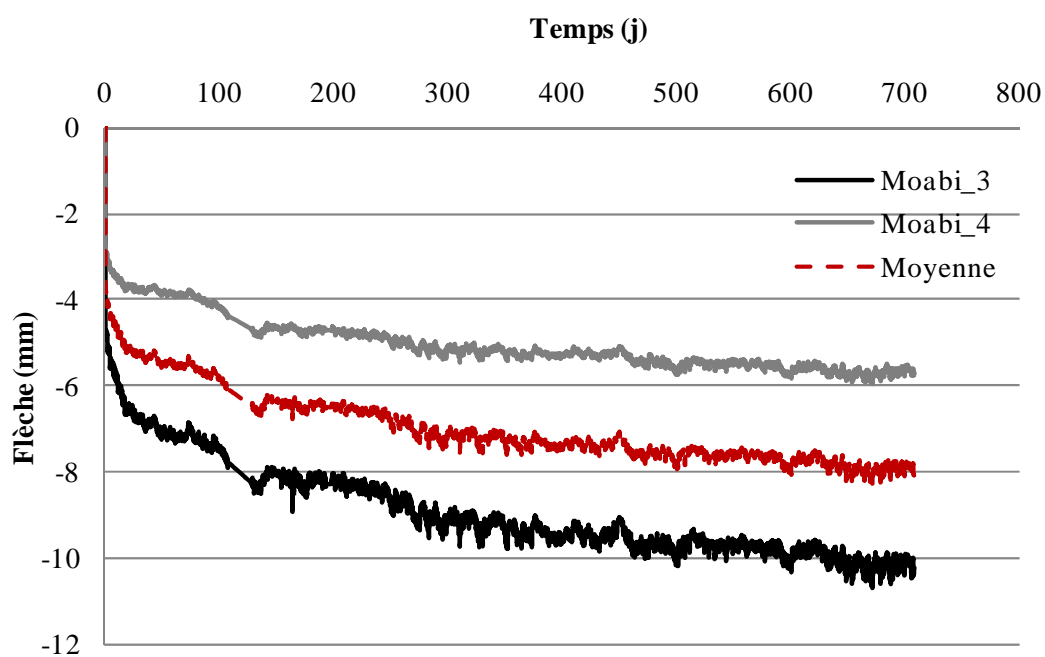


Figure A.3.2. Evolution de la flèche en face inférieure

### A.3.2 Ozigo

#### Poutre 1 & 2

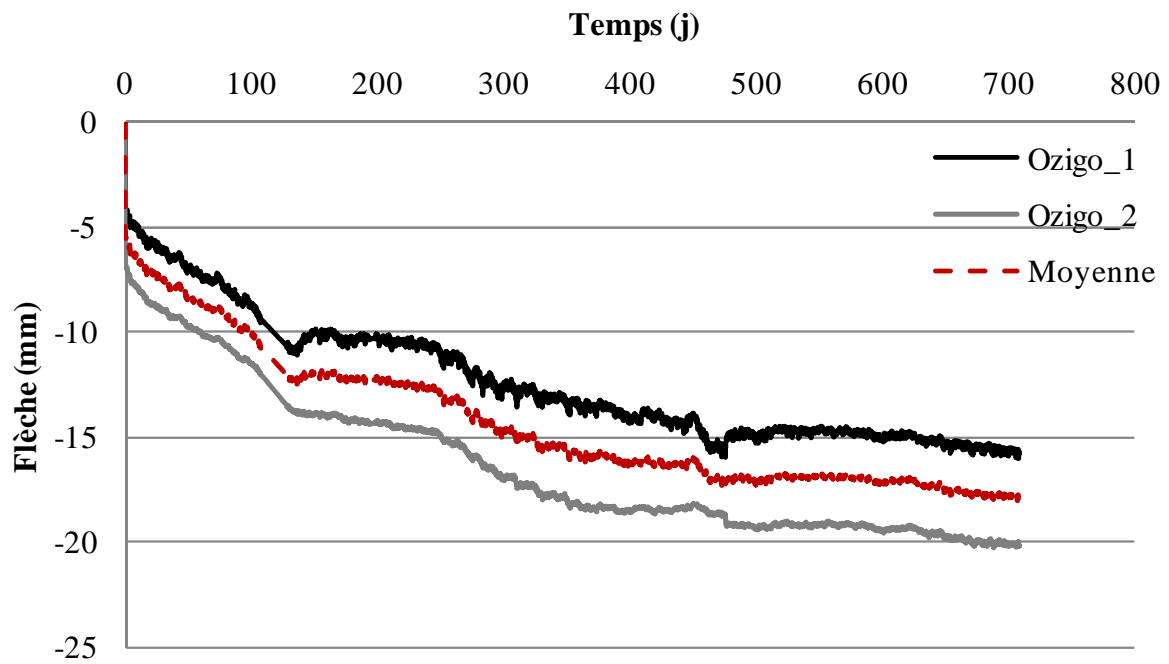


Figure A.3.3. Evolution de la flèche en face supérieure

#### Poutre 3 & 4

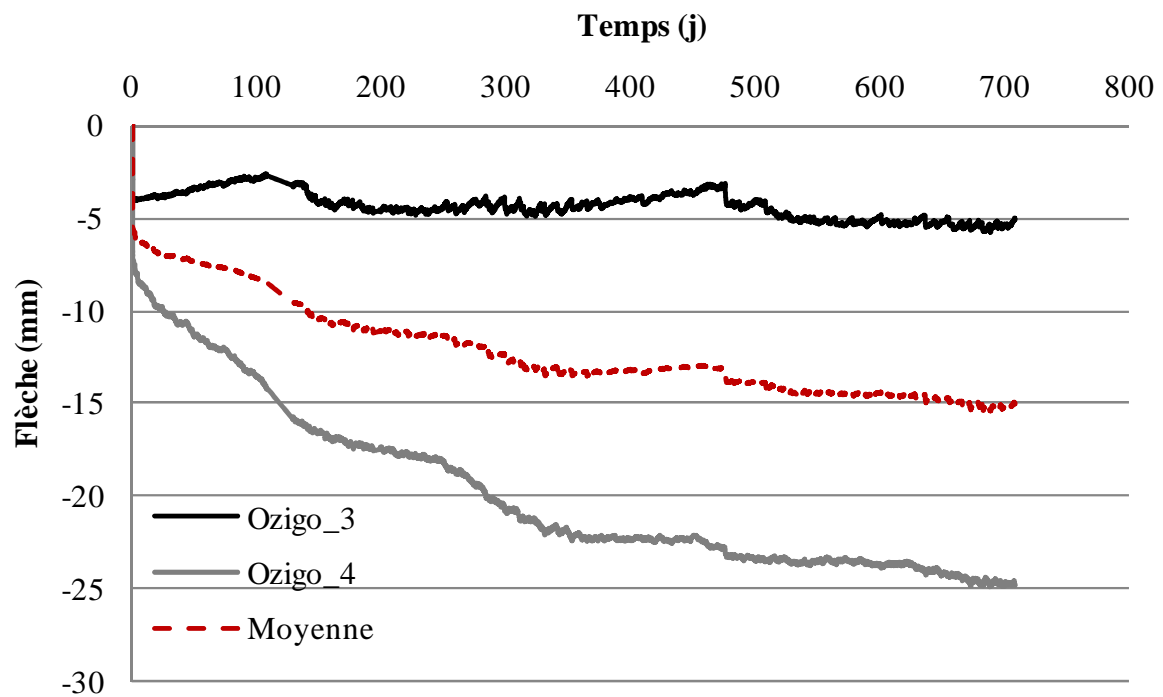


Figure A.3.4. Evolution de la flèche en face inférieure



## ANNEXES B

*Isothermes de sorption et cinétiques de diffusion : Sapin, Hêtre, Moabi et Ozigo*



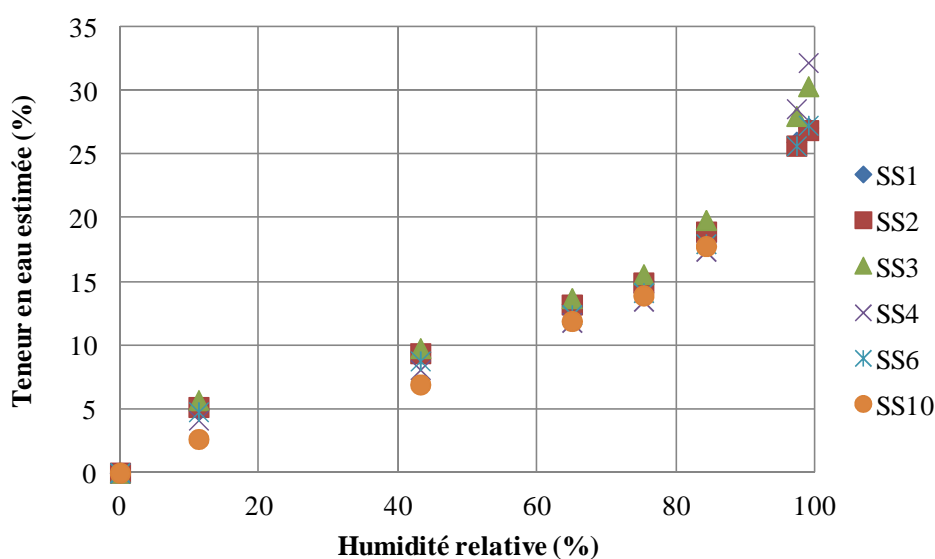
## B.1 Caractérisation expérimentale des isothermes de sorption

Les teneurs en eau aux différents états d'équilibre hydrique sont données, par essence et par échantillon, dans les **Tableaux B.1.1 à B.1.8**. Les cellules comportant un '-' correspondent à des valeurs aberrantes provenant soit d'un incident pendant les prises de masse (échantillons éclaboussés par la solution aqueuse), soit d'échantillons dont les valeurs sont trop dispersées de la valeur moyenne de l'échantillonnage.

### B.1.1 Sapin

**Tableau B.1.1.** Teneur en eau en adsorption pour les différents états d'équilibre hydrique

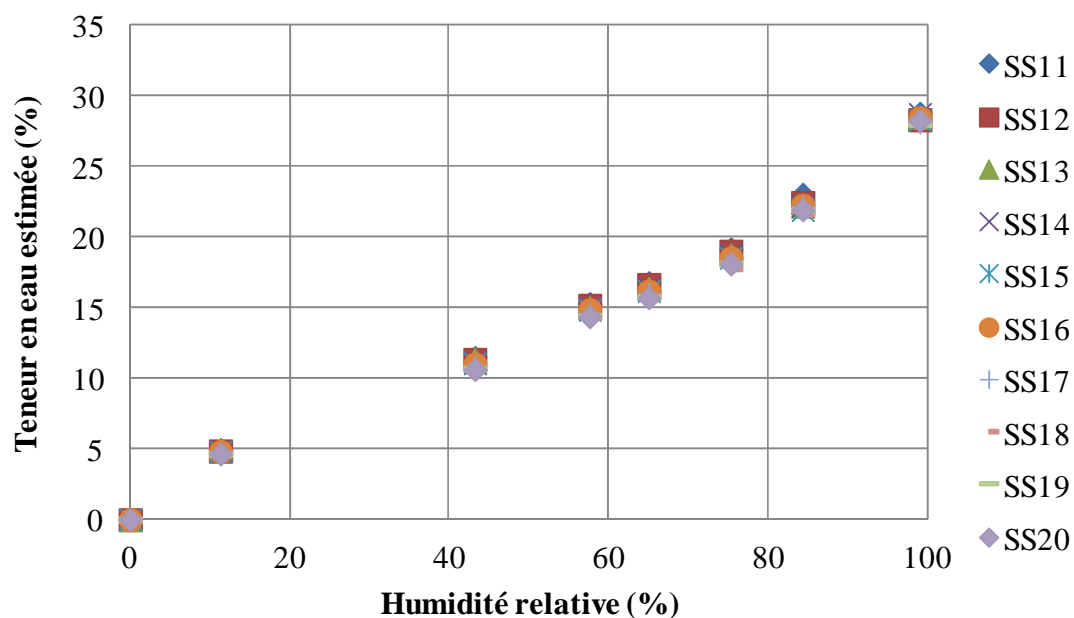
Adsorption									
HR(%)	0	11,3	43,2	65	75,3	84,3	97,3	99	
SS1	0	5,0	9,5	13,2	15,0	19,1	26,0	27,1	
SS2	0	5,2	9,4	13,2	14,9	18,9	25,7	26,9	
SS3	0	5,7	9,8	13,7	15,6	19,8	28,0	30,3	
SS4	0	4,1	8,1	11,8	13,4	17,4	28,6	32,2	
SS5	0	-	-	-	-	-	-	-	
SS6	0	4,8	8,8	12,4	14,1	18,0	25,6	27,3	
SS7	0	-	-	-	-	-	-	-	
SS8	0	-	-	-	-	-	-	-	
SS9	0	-	-	-	-	-	-	-	
SS10	0	2,6	6,9	11,9	13,9	17,8	-	-	
Moyenne	0,0	4,6	8,7	12,7	14,5	18,5	26,8	28,7	



**Figure B.1.1.** Résultats expérimentaux en adsorption pour les échantillons de Sapin

**Tableau B.1.2.** Teneur en eau en désorption pour les différents états d'équilibre hydrique

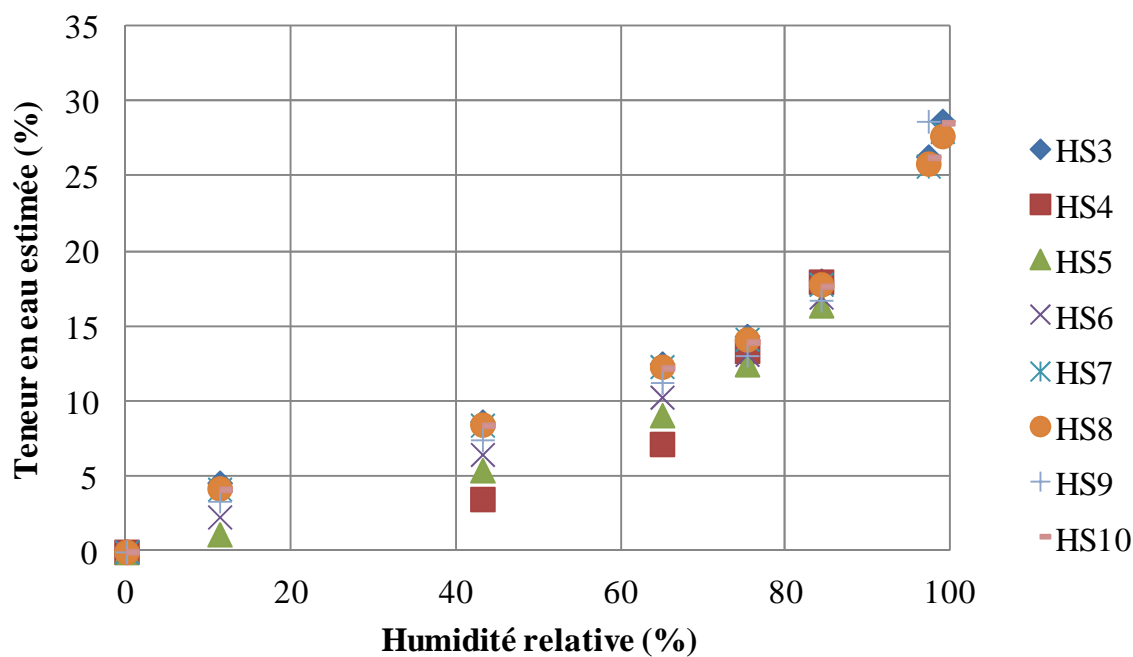
Désorption								
HR(%)	0	11,3	43,2	57,6	65	75,3	84,3	99
SS11	0	4,9	11,5	15,3	16,8	19,2	23,0	28,8
SS12	0	4,9	11,3	15,2	16,6	19,0	22,5	28,3
SS13	0	5,0	11,4	15,0	16,4	18,7	22,2	28,5
SS14	0	4,9	11,1	15,0	16,4	18,8	22,2	28,7
SS15	0	4,8	11,1	14,9	16,2	18,5	21,9	28,3
SS16	0	4,8	11,0	14,9	16,2	18,5	22,3	28,5
SS17	0	4,6	10,8	14,6	16,0	18,2	22,2	28,1
SS18	0	4,7	10,7	14,3	15,8	17,8	21,7	28,1
SS19	0	4,6	10,7	14,4	15,8	18,1	21,9	28,0
SS20	0	4,7	10,6	14,4	15,7	18,1	21,9	28,3
<b>Moyenne</b>	<b>0</b>	<b>4,8</b>	<b>11,0</b>	<b>14,8</b>	<b>16,2</b>	<b>18,5</b>	<b>22,2</b>	<b>28,4</b>

**Figure B.1.2.** Résultats expérimentaux en désorption pour les échantillons de Sapin

## B.1.2 Hêtre

**Tableau B.1.3.** Teneur en eau en adsorption pour les différents états d'équilibre hydrique

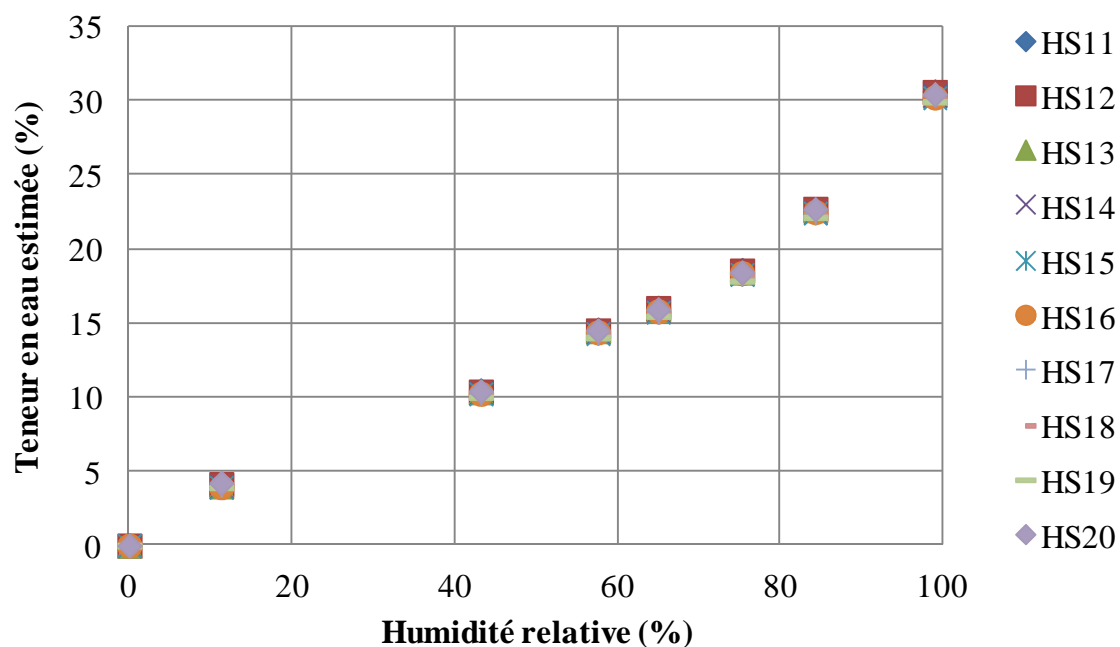
Adsorption									
HR (%)	0	11,3	43,2	65	75,3	84,3	97,3	99	
HS1	0	-0,1	3,8	7,5	-	-	-	-	-
HS2	0	0,5	4,3	8,1	-	-	-	-	-
HS3	0	4,6	8,7	12,5	14,4	18,0	26,3	28,7	
HS4	0	-0,3	3,5	7,2	13,4	18,0	-	-	
HS5	0	1,2	5,4	9,1	12,5	16,4	-	-	
HS6	0	2,3	6,5	10,3	13,1	16,9	-	-	
HS7	0	4,2	8,4	12,3	14,1	17,8	25,7	28,0	
HS8	0	4,2	8,5	12,3	14,1	17,8	25,8	27,7	
HS9	0	3,4	7,5	11,3	13,1	16,7	28,6	-	
HS10	0	4,2	8,4	12,2	14,0	17,7	26,2	28,5	
<b>Moyenne</b>	<b>0</b>	<b>2,4</b>	<b>6,5</b>	<b>10,3</b>	<b>13,6</b>	<b>17,4</b>	<b>26,5</b>	<b>28,2</b>	



**Figure B.1.3.** Résultats expérimentaux en adsorption pour les échantillons de Hêtre

**Tableau B.1.4.** Teneur en eau en désorption pour les différents états d'équilibre hydrique

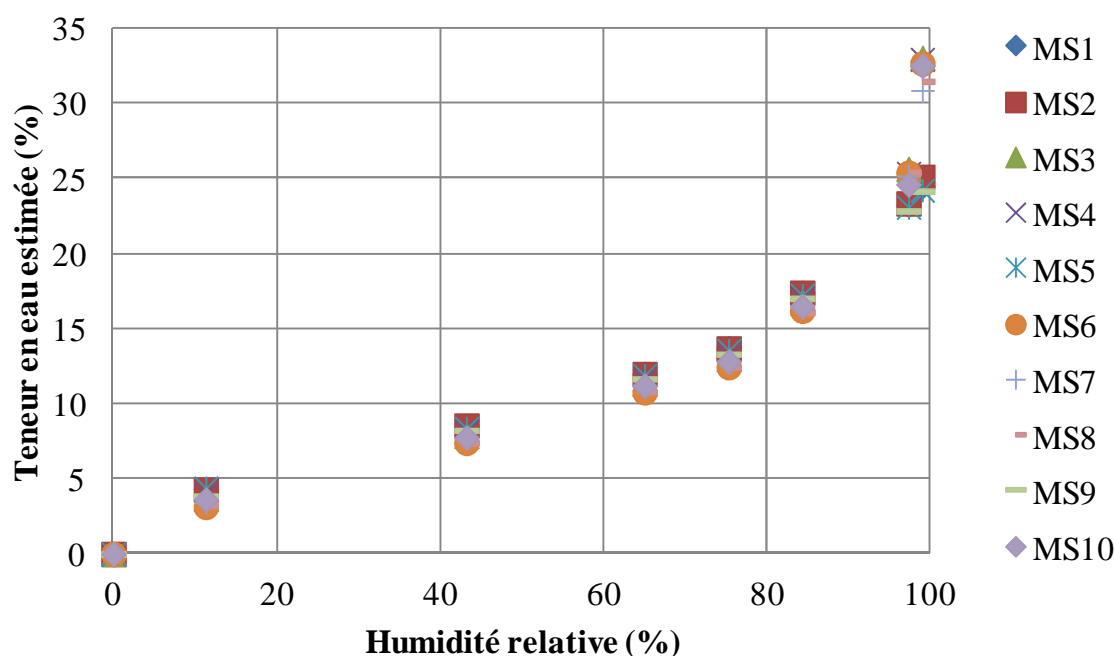
Désorption								
HR(%)	0	11,3	43,2	57,6	65	75,3	84,3	99
HS11	0	4,1	10,5	14,6	16,0	18,6	22,7	30,6
HS12	0	4,1	10,4	14,5	16,0	18,5	22,7	30,6
HS13	0	4,0	10,3	14,5	15,9	18,4	22,6	30,4
HS14	0	4,0	10,3	14,4	15,8	18,3	22,5	30,3
HS15	0	3,9	10,2	14,3	15,7	18,3	22,4	30,2
HS16	0	3,9	10,2	14,4	15,8	18,4	22,5	30,2
HS17	0	4,1	10,3	14,3	15,7	18,3	22,4	30,4
HS18	0	4,0	10,2	14,1	15,6	18,0	22,2	30,0
HS19	0	3,9	10,0	14,0	15,5	17,8	22,1	29,9
HS20	0	4,2	10,4	14,5	15,9	18,4	22,7	30,4
<b>Moyenne</b>	<b>0</b>	<b>4,0</b>	<b>10,3</b>	<b>14,4</b>	<b>15,8</b>	<b>18,3</b>	<b>22,5</b>	<b>30,3</b>

**Figure B.1.4.** Résultats expérimentaux en adsorption pour les échantillons de Hêtre

### B.1.3 Moabi

**Tableau B.1.5.** Teneur en eau en adsorption pour les différents états d'équilibre hydrique

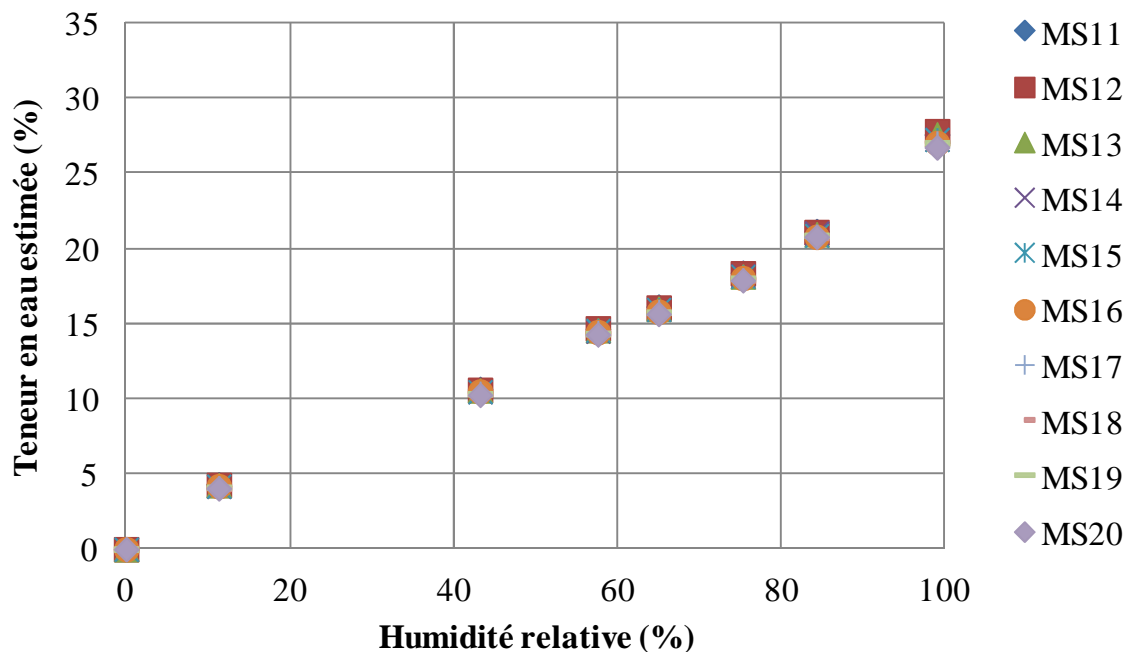
Adsorption									
HR (%)	0	11,3	43,2	65	75,3	84,3	97,3	99	
MS1	0	4,3	8,5	12,0	13,7	17,4	23,2	24,5	
MS2	0	4,3	8,6	12,0	13,7	17,4	23,3	25,1	
MS3	0	3,7	7,9	11,3	13,0	16,7	25,6	33,0	
MS4	0	4,0	8,1	11,6	13,2	16,9	25,3	32,9	
MS5	0	4,4	8,4	11,9	13,6	17,2	23,1	24,2	
MS6	0	3,1	7,4	10,8	12,4	16,2	25,4	32,6	
MS7	0	3,4	7,7	11,1	12,8	16,5	25,2	30,8	
MS8	0	3,2	7,4	10,8	12,4	16,1	25,4	31,5	
MS9	0	3,8	8,2	11,7	13,3	17,0	22,8	24,1	
MS10	0	3,6	7,7	11,2	12,8	16,5	24,6	32,5	
<b>Moyenne</b>	<b>0</b>	<b>3,8</b>	<b>8,0</b>	<b>11,4</b>	<b>13,1</b>	<b>16,8</b>	<b>24,4</b>	<b>29,1</b>	



**Figure B.1.5.** Résultats expérimentaux en adsorption pour les échantillons de Moabi

**Tableau B.1.6.** Teneur en eau en désorption pour les différents états d'équilibre hydrique

<b>Désorption</b>								
<b>HR(%)</b>	<b>0</b>	<b>11,3</b>	<b>43,2</b>	<b>57,6</b>	<b>65</b>	<b>75,3</b>	<b>84,3</b>	<b>99</b>
MS11	0	4,3	10,6	14,6	16,1	18,4	21,1	27,6
MS12	0	4,3	10,6	14,7	16,1	18,4	21,1	27,8
MS13	0	4,3	10,6	14,6	16,0	18,1	20,9	27,6
MS14	0	4,2	10,5	14,5	15,9	18,2	21,0	27,3
MS15	0	4,2	10,5	14,5	15,9	18,1	20,9	27,2
MS16	0	4,2	10,5	14,4	15,8	18,0	20,8	27,0
MS17	0	4,1	10,4	14,4	15,8	17,9	20,8	27,0
MS18	0	4,0	10,3	14,4	15,8	17,9	20,7	27,0
MS19	0	4,1	10,3	14,3	15,8	18,0	20,9	27,0
MS20	0	4,0	10,3	14,3	15,6	17,9	20,8	26,7
<b>Moyenne</b>	<b>0</b>	<b>4,2</b>	<b>10,5</b>	<b>14,5</b>	<b>15,9</b>	<b>18,1</b>	<b>20,9</b>	<b>27,2</b>

**Figure B.1.6.** Résultats expérimentaux en désorption pour les échantillons de Moabi



## B.1.4 Ozigo

Tableau B.1.7. Teneur en eau en adsorption pour les différents états d'équilibre hydrique

Adsorption									
HR (%)	0	11,3	43,2	65	75,3	84,3	97,3	99	
OS1	0	4,8	8,8	12,3	13,9	17,9	26,1	27,0	
OS2	0	4,8	9,0	12,3	14,1	18,1	26,4	27,4	
OS3	0	3,7	7,6	11,1	12,7	16,6	-	-	
OS4	0	4,8	8,7	12,3	13,9	18,0	26,2	27,2	
OS5	0	4,0	8,1	12,7	14,5	18,7	28,6	31,7	
OS6	0	4,5	8,7	12,1	13,8	17,7	26,2	27,3	
OS7	0	4,2	8,2	11,6	13,2	17,2	26,4	27,5	
OS8	0	4,8	8,7	12,0	13,6	17,5	25,9	26,6	
OS9	0	4,6	8,4	11,8	13,3	17,2	26,1	27,5	
OS10	0	4,4	8,4	11,9	13,4	17,1	26,1	27,5	
Moyenne	0	4,5	8,5	12,0	13,6	17,6	26,9	29,4	

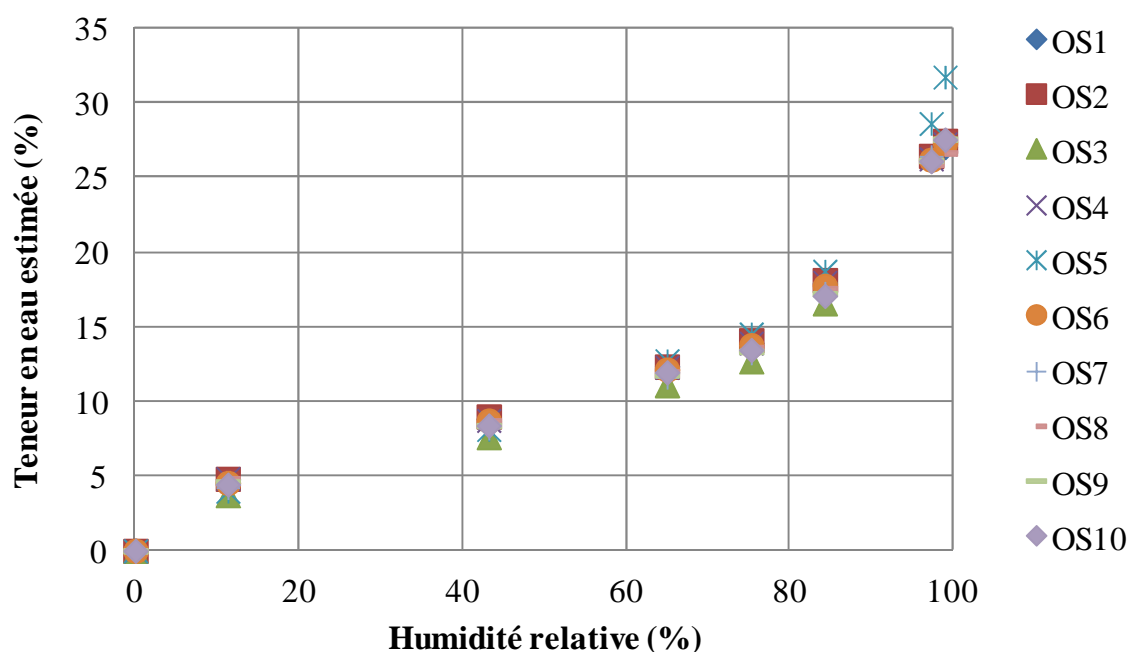
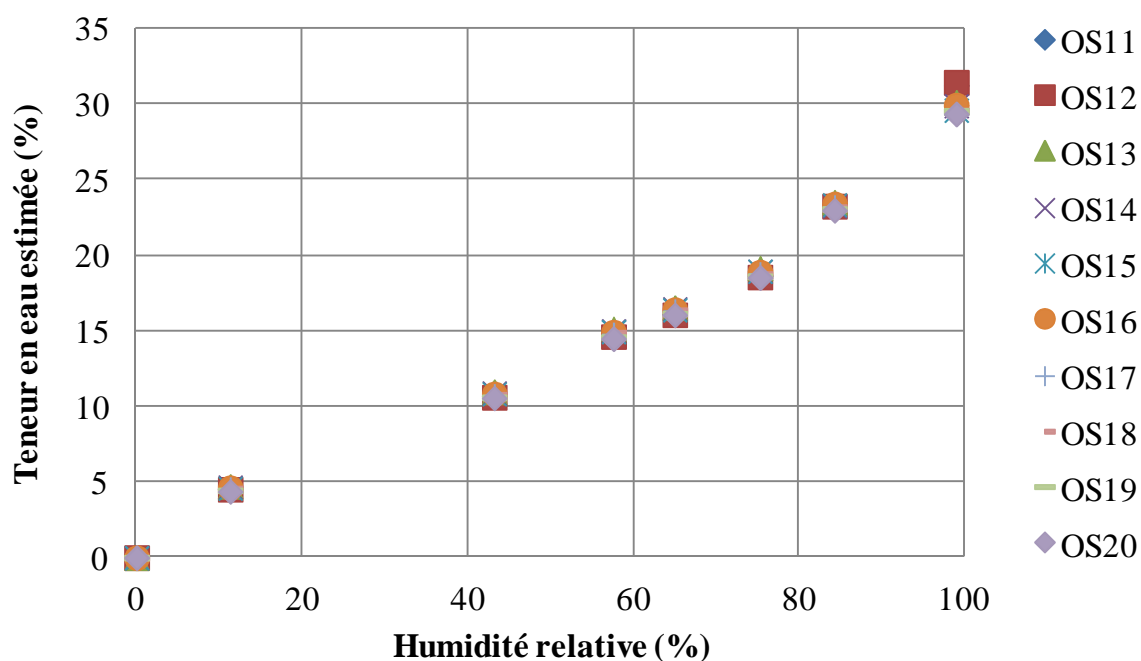


Figure B.1.7. Résultats expérimentaux en adsorption pour les échantillons d'Ozigo

**Tableau B.1.8.** Teneur en eau en désorption pour les différents états d'équilibre hydrique

Désorption								
HR (%)	0	11,3	43,2	57,6	65	75,3	84,3	99
OS11	0	4,5	10,7	14,7	16,1	18,6	23,4	31,2
OS12	0	4,5	10,6	14,6	16,1	18,5	23,2	31,4
OS13	0	4,7	11,0	15,1	16,5	19,1	23,5	30,1
OS14	0	4,7	10,9	15,0	16,5	18,9	23,2	29,9
OS15	0	4,6	10,8	14,9	16,4	18,9	23,3	29,6
OS16	0	4,6	10,8	14,9	16,4	18,9	23,4	29,9
OS17	0	4,6	10,7	14,8	16,3	18,8	23,2	29,3
OS18	0	4,6	10,8	14,9	16,4	18,7	23,2	29,6
OS19	0	4,4	10,6	14,6	16,1	18,6	23,0	29,5
OS20	0	4,4	10,6	14,5	16,0	18,5	23,0	29,3
<b>Moyenne</b>	<b>0</b>	<b>4,6</b>	<b>10,7</b>	<b>14,8</b>	<b>16,3</b>	<b>18,8</b>	<b>23,2</b>	<b>30,0</b>

**Figure B.1.8.** Résultats expérimentaux en désorption pour les échantillons d'Ozigo

## B.2 Simulation numérique et identification des paramètres thermodynamiques

Deux approches sont proposées pour la simulation numérique et l'identification des paramètres thermodynamiques des isothermes de sorption :

- Simulation 1 : La détermination des paramètres est faite à partir des teneurs en eau d'équilibre de chaque échantillon aux humidités relatives des cloches. On en déduit ensuite la valeur moyenne de l'échantillonnage.
- Simulation 2 : La détermination des paramètres est faite à partir des teneurs en eau moyenne d'équilibre des échantillons aux humidités relatives des cloches.

Les cellules comportant un '-' correspondent à des valeurs aberrantes non prises en compte pour le calcul de la valeur moyenne.

### B.2.1 Sapin

#### B.2.1.1 Simulation 1

**Tableau B.2.1.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en adsorption, par échantillon de Sapin

Paramètre	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SS9	SS10	Moyenne	Ecart type
$w_s$	28%	27%	31%	32%	-	28%	-	-	-	-	<b>29%</b>	2,18%
$\varphi_a$	0,670	0,661	0,643	0,771	-	0,674	-	-	-	-	<b>0,68</b>	0,05
$a_a$	1,501	1,482	1,742	1,768	-	1,680	-	-	-	-	<b>1,63</b>	0,13

**Tableau B.2.2.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en désorption, par échantillon de Sapin

Paramètre	SS11	SS12	SS13	SS14	SS15	SS16	SS17	SS18	SS19	SS20	Moyenne	Ecart type
$w_s$	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	28%	29%	29%	<b>29%</b>	0,29%
$\varphi_a$	0,741	0,744	0,729	0,738	0,741	0,740	0,756	0,748	0,749	0,749	<b>0,74</b>	0,01
$a_a$	0,828	0,826	0,834	0,933	0,916	0,928	0,892	0,896	0,935	0,974	<b>0,90</b>	0,05

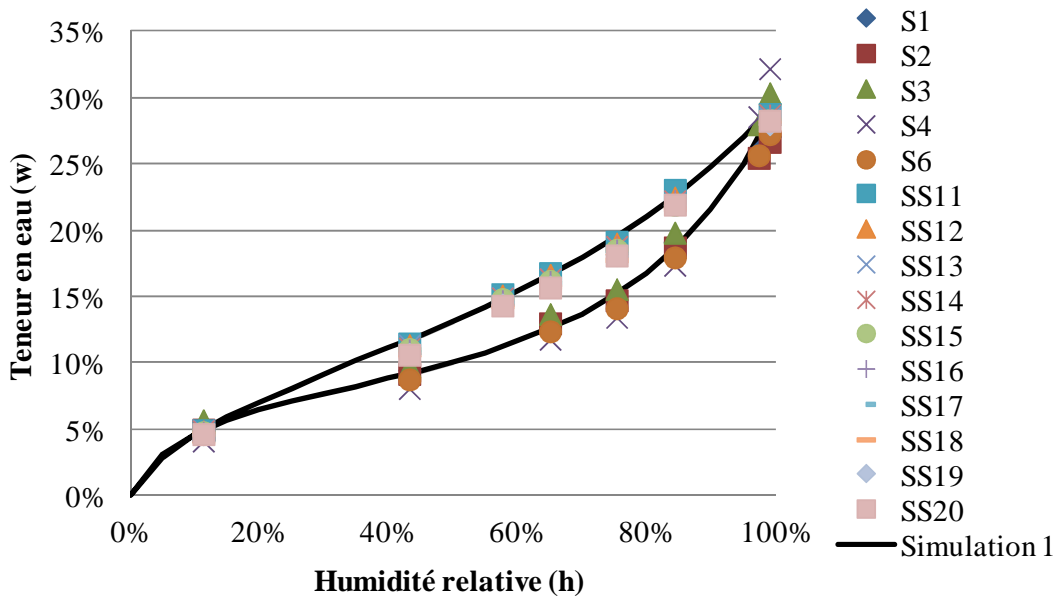


Figure B.2.1. Modélisation des courbes d’hystérésis du Sapin pour un cycle total

B.2.1.2 Simulation 2

Tableau B.2.3. Teneur en eau moyenne d’équilibre en adsorption et en désorption pour les échantillons de Sapin

HR	11,30%	43,20%	57,60%	65%	75,30%	84,30%	97,30%	99%
Moyenne (Adsorption)	5%	9%		13%	15%	19%	27%	29%
Moyenne (désorption)	5%	11%	15%	16%	18%	22%		28%

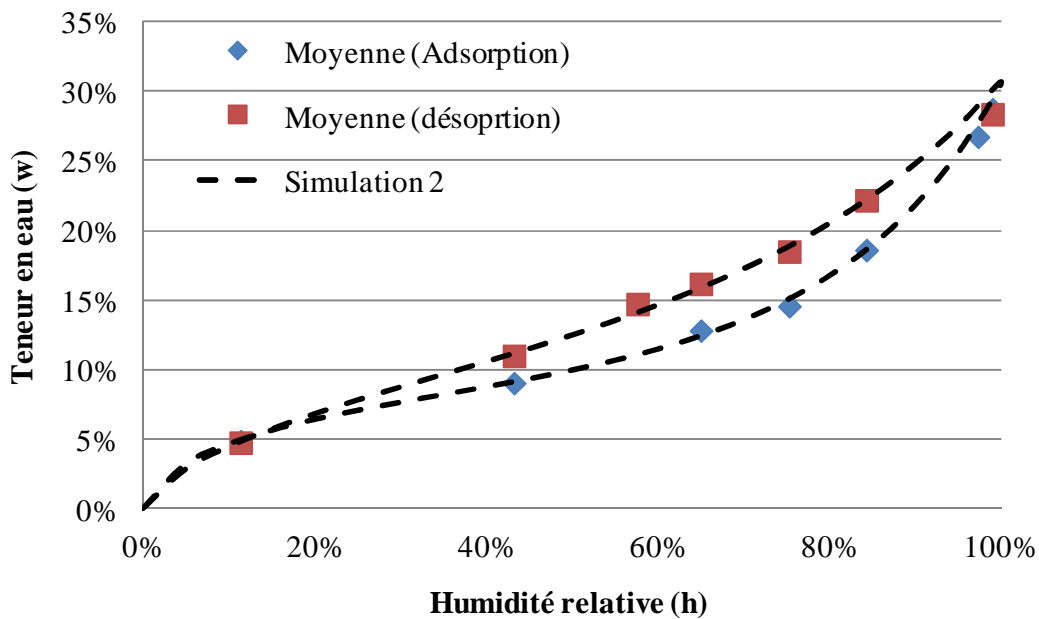


Figure B.2.2. Modélisation des courbes d’hystérésis du Sapin pour un cycle total

## B.2.2 Hêtre

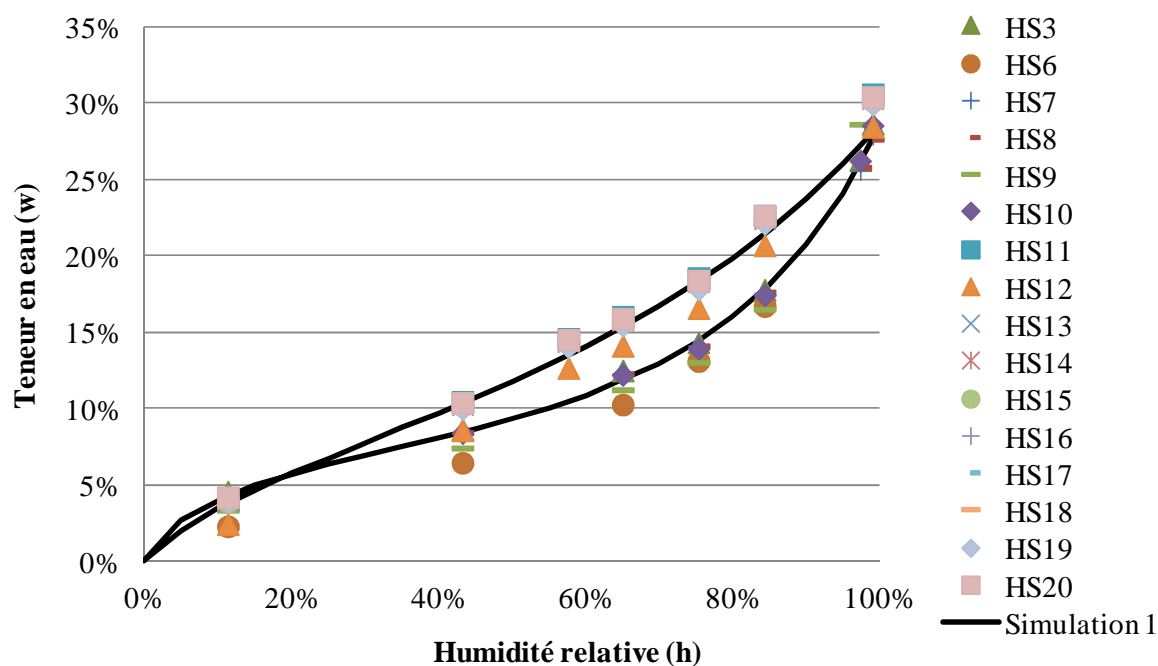
### B.2.2.1 Simulation 1

**Tableau B.2.4.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en adsorption, par échantillon de Hêtre

Paramètre	HS1	HS2	HS3	HS4	HS5	HS6	HS7	HS8	HS9	HS10	Moyenne	Ecart type
$w_s$	30%	30%	29%	-	-	28%	28%	28%	-	29%	<b>29%</b>	0,43%
$\varphi_a$	0,881	0,894	0,700	-	-	0,983	0,735	0,731	-	0,744	<b>0,73</b>	0,02
$a_a$	1,502	1,531	1,670	-	-	1,319	1,549	1,569	-	1,573	<b>1,59</b>	0,05

**Tableau B.2.5.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en désorption, par échantillon de Hêtre

Paramètre	HS11	HS12	HS13	HS14	HS15	HS16	HS17	HS18	HS19	HS20	Moyenne	Ecart type
$w_s$	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	<b>29%</b>	0,00%
$\varphi_a$	0,817	1,038	0,830	0,829	0,836	0,836	0,824	0,824	0,832	0,803	<b>0,85</b>	6,79%
$a_a$	0,801	0,760	0,799	0,817	0,814	0,805	0,808	0,858	0,860	0,849	<b>0,82</b>	3,10%

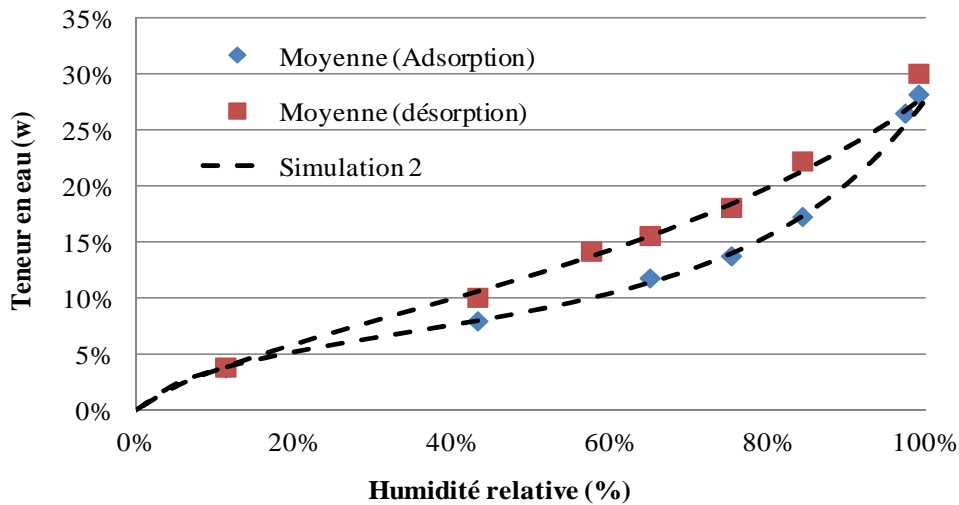


**Figure B.2.3.** Modélisation des courbes d'hystérésis du Hêtre pour un cycle total

## B.2.2.2 Simulation 2

**Tableau B.2.6.** Teneur en eau moyenne d'équilibre en adsorption et en désorption pour les échantillons de Hêtre

HR	11,30%	43,20%	57,60%	65%	75,30%	84,30%	97,30%	99%
Moyenne (Adsorption)	4%	8%		12%	14%	17%	27%	28%
Moyenne (désorption)	4%	10%	14%	16%	18%	22%		30%

**Figure B.2.4.** Modélisation des courbes d'hystérésis du Hêtre pour un cycle total

## B.2.3 Moabi

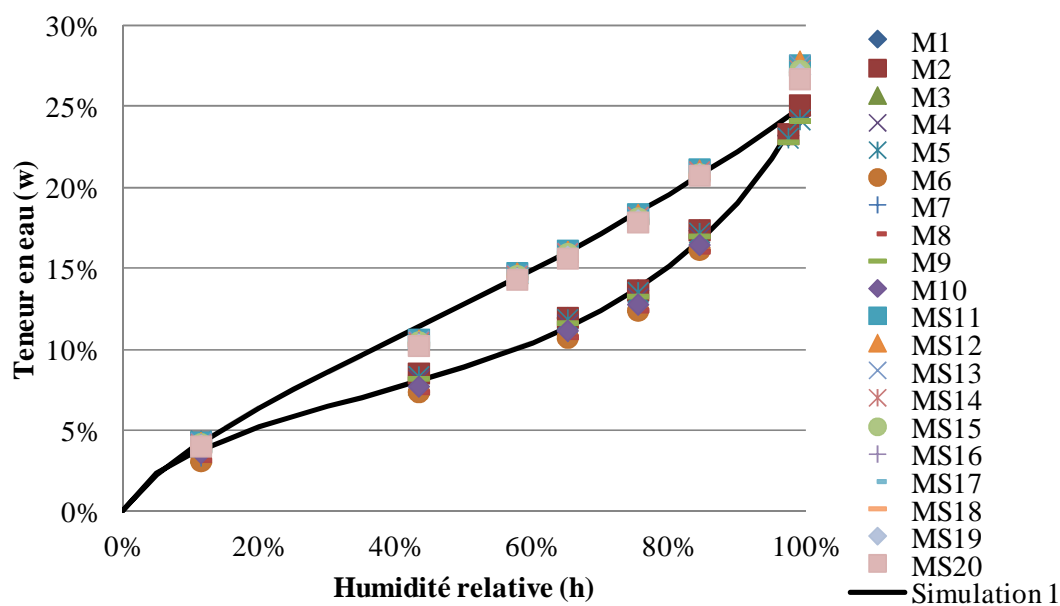
## B.2.3.1 Simulation 1

**Tableau B.2.7.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en adsorption, par échantillon de Moabi

Paramètre	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	MS8	MS9	MS10	Moyenne	Ecart type
$w_s$	25%	25%	26%	26%	25%	25%	25%	25%	25%	24%	<b>25%</b>	0,64%
$\varphi_a$	0,684	0,690	0,761	0,731	0,675	0,816	0,781	0,803	0,734	0,751	<b>0,74</b>	4,94%
$a_a$	1,482	1,451	1,464	1,503	1,466	1,334	1,354	1,333	1,351	1,345	<b>1,41</b>	6,99%

**Tableau B.2.8.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en désorption, par échantillon de Moabi

Paramètre	MS11	MS12	MS13	MS14	MS15	MS16	MS17	MS18	MS19	MS20	Moyenne	Ecart type
$w_s$	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	<b>25%</b>	0,00%
$\varphi_a$	0,768	0,771	0,771	0,782	0,779	0,779	0,785	0,793	0,784	0,789	<b>0,78</b>	0,80%
$a_a$	0,432	0,440	0,457	0,445	0,446	0,446	0,470	0,464	0,465	0,500	<b>0,46</b>	1,96%

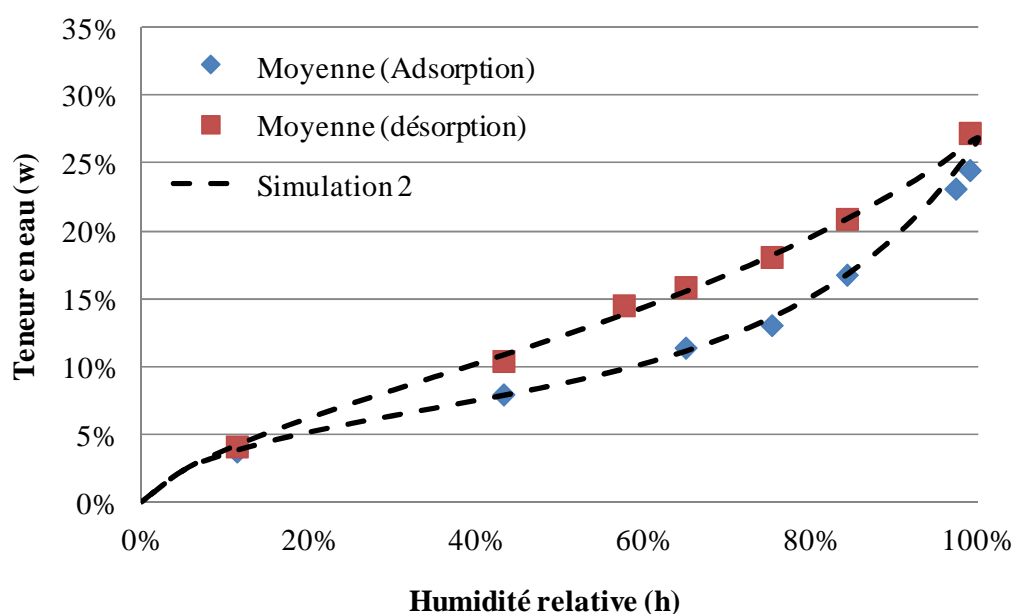


**Figure B.2.5.** Modélisation des courbes d'hystérésis du Moabi pour un cycle total

### B.2.3.2 Simulation 2

**Tableau B.2.9.** Teneur en eau moyenne d'équilibre en adsorption et en désorption pour les échantillons de Moabi

HR	11,30%	43,20%	57,60%	65%	75,30%	84,30%	97,30%	99%
Moyenne (Adsorption)	4%	8%		11%	13%	17%	23%	24%
Moyenne (désorption)	4%	10%	15%	16%	18%	21%		27%



**Figure B.2.6.** Modélisation des courbes d'hystérésis du Moabi pour un cycle total

## B.2.4 Ozigo

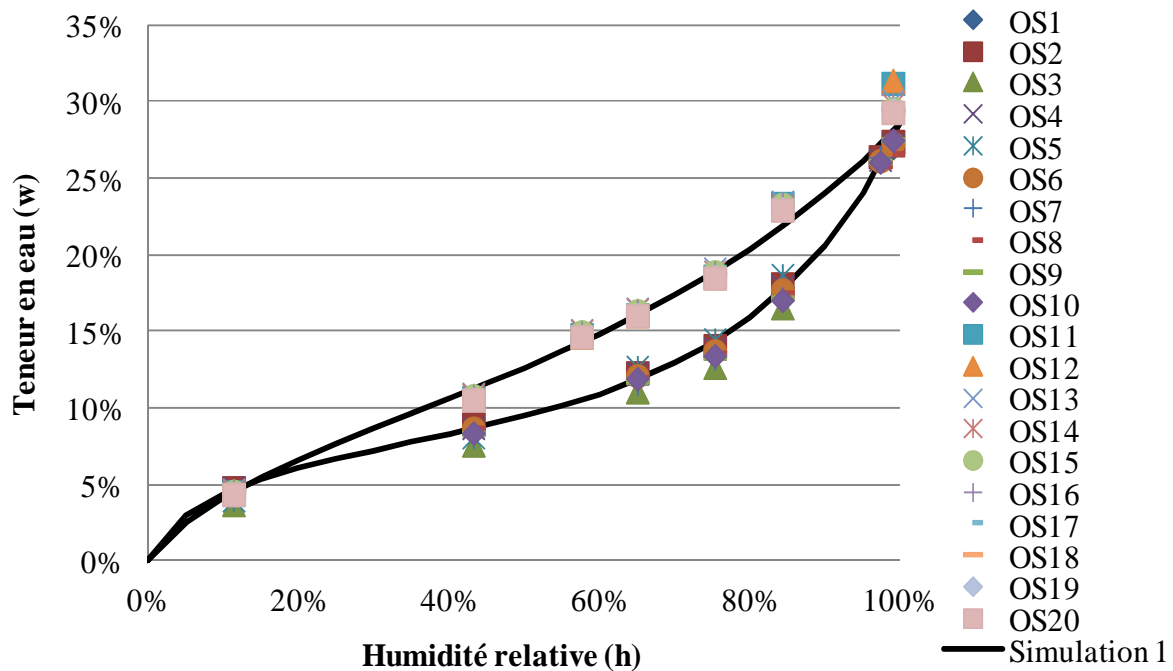
### B.2.4.1 Simulation 1

**Tableau B.2.10.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en adsorption, par échantillon d'Ozigo

Paramètre	OS1	OS2	OS3	OS4	OS5	OS6	OS7	OS8	OS9	OS10	Moyenne	Ecart type
$w_s$	29%	29%	27%	29%	-	28%	-	-	-	-	<b>29%</b>	0,30%
$\varphi_a$	0,681	0,684	0,764	0,677	-	0,698	-	-	-	-	<b>0,69</b>	0,02
$a_a$	1,659	1,655	1,602	1,666	-	1,612	-	-	-	-	<b>1,67</b>	0,04

**Tableau B.2.11.** Valeurs des paramètres thermodynamiques, en désorption, par échantillon d'Ozigo

Paramètre	OS11	OS12	OS13	OS14	OS15	OS16	OS17	OS18	OS19	OS20	Moyenne	Ecart type
$w_s$	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	<b>29%</b>	0,00%
$\varphi_a$	0,770	0,771	0,759	0,762	0,770	0,766	0,771	0,771	0,781	0,788	<b>0,77</b>	0,01
$a_a$	0,881	0,887	0,835	0,841	0,836	0,842	0,844	0,839	0,857	0,857	<b>0,85</b>	0,02



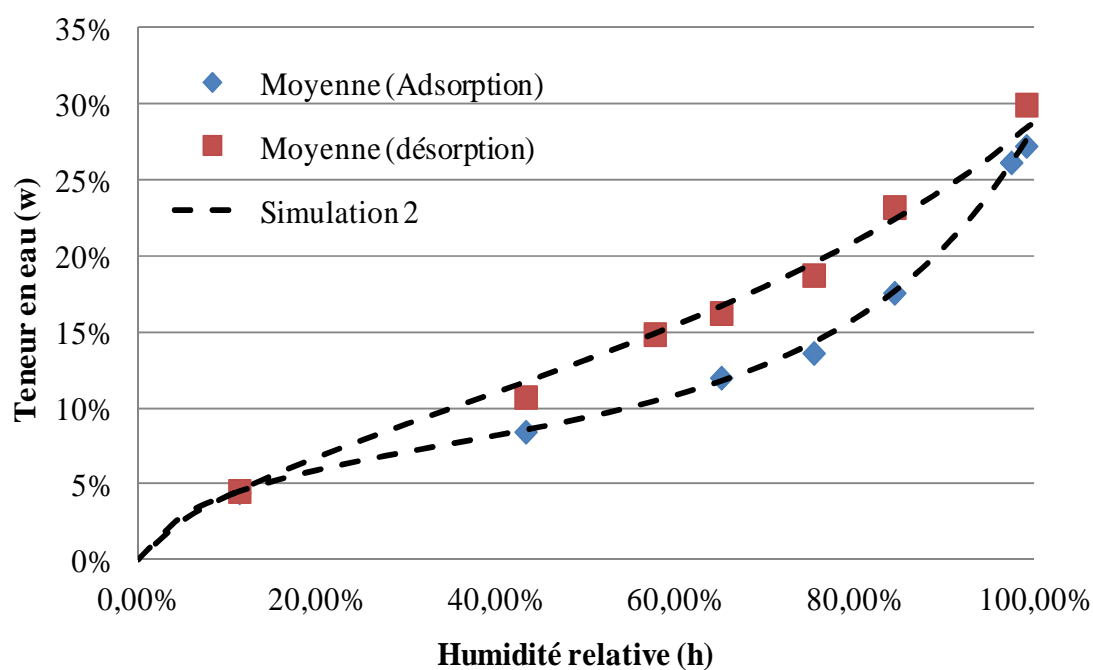
**Figure B.2.7.** Modélisation des courbes d'hystérésis de l'Ozigo pour un cycle total



## B.2.4.2 Simulation 2

**Tableau B.2.12.** Teneur en eau moyenne d'équilibre en adsorption et en désorption pour les échantillons d'Ozigo

HR	11,30%	43,20%	57,60%	65%	75,30%	84,30%	97,30%	99%
Moyenne (Adsorption)	4%	8%		12%	14%	18%	26%	27%
Moyenne (désorption)	5%	11%	15%	16%	19%	23%		30%

**Figure B.2.8.** Modélisation des courbes d'hystérésis de l'Ozigo pour un cycle total

## B.3 Caractérisation expérimentale des cinétiques de diffusion

### B.3.1 Teneur en eau d'équilibre

Pour chaque essence et pour chaque échantillon, la teneur en eau d'équilibre a été déterminée et consignée dans les **Tableaux B.3.1 à B.3.8**.

#### B.3.1.1 Sapin

**Tableau B.3.1.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction longitudinale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		<i>Humidité relative (%)</i>				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	SD31	7,6%	12,6%	23,3%	14,1%	7,1%
	SD32	6,5%	11,3%	22,1%	12,9%	5,9%
	SD33	7,6%	12,8%	24,0%	14,4%	6,9%
	SD34	7,9%	13,0%	23,7%	14,5%	7,0%
	SD35	7,4%	12,3%	23,3%	14,1%	6,9%
	SD36	7,7%	12,5%	23,5%	14,4%	7,2%
	SD37	7,8%	12,8%	23,9%	14,3%	7,1%
	SD38	7,1%	12,2%	23,1%	13,9%	6,6%
	SD39	7,9%	12,7%	23,7%	14,4%	7,2%
	SD40	7,5%	12,3%	22,8%	14,0%	7,1%
	SD43	7,8%	12,5%	22,8%	14,2%	7,2%
	SD44	7,7%	12,4%	22,9%	14,1%	6,7%
	<b>Moyenne</b>	<b>7,5%</b>	<b>12,5%</b>	<b>23,3%</b>	<b>14,1%</b>	<b>6,9%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,40%</i>	<i>0,42%</i>	<i>0,54%</i>	<i>0,43%</i>	<i>0,35%</i>
15 x 15 x 15	Sd31	8,4%	13,3%	24,5%	14,7%	7,7%
	Sd32	7,6%	12,4%	22,8%	13,8%	7,6%
	Sd33	7,9%	12,8%	22,6%	13,4%	6,7%
	Sd34	8,5%	13,1%	23,5%	14,4%	7,2%
	Sd35	8,3%	13,1%	23,2%	14,3%	7,1%
	Sd36	8,0%	12,9%	23,3%	14,1%	7,4%
	Sd37	6,8%	12,2%	25,2%	12,9%	6,1%
	Sd38	6,8%	11,6%	22,4%	12,9%	5,4%
	Sd39	7,6%	12,4%	22,8%	13,8%	6,9%
	Sd40	6,0%	11,3%	21,9%	11,9%	5,3%
	Sd43	7,5%	12,9%	23,8%	14,3%	7,5%
	Sd44	6,8%	11,0%	21,9%	13,0%	5,5%
	<b>Moyenne</b>	<b>7,5%</b>	<b>12,4%</b>	<b>23,2%</b>	<b>13,6%</b>	<b>6,7%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,78%</i>	<i>0,77%</i>	<i>0,99%</i>	<i>0,81%</i>	<i>0,89%</i>

**Tableau B.3.2.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction transversale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		Humidité relative (%)				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	SD11	8,1%	12,6%	22,9%	14,2%	8,6%
	SD12	7,6%	12,3%	22,9%	13,8%	8,0%
	SD13	8,1%	12,6%	23,1%	14,3%	8,1%
	SD14	3,0%	7,2%	16,9%	8,7%	3,3%
	SD15	8,0%	12,7%	23,4%	14,6%	8,9%
	SD16	7,8%	12,3%	23,3%	14,1%	8,5%
	SD17	8,0%	12,4%	22,7%	14,1%	8,0%
	SD18	8,8%	13,1%	22,9%	14,8%	9,1%
	SD19	8,2%	12,6%	23,6%	14,6%	8,8%
	SD20	8,5%	12,7%	23,3%	14,5%	9,2%
	SD48	7,8%	12,2%	22,6%	14,1%	7,8%
	SD49	7,8%	12,5%	23,1%	14,3%	8,1%
	<b>Moyenne</b>	<b>7,6%</b>	<b>12,1%</b>	<b>22,5%</b>	<b>13,9%</b>	<b>8,0%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>1,49%</i>	<i>1,57%</i>	<i>1,82%</i>	<i>1,65%</i>	<i>1,57%</i>
15 x 15 x 15	Sd11	7,0%	10,8%	21,7%	12,7%	6,4%
	Sd12	8,9%	13,3%	23,4%	14,6%	8,9%
	Sd13	11,0%	15,2%	25,6%	16,5%	10,4%
	Sd14	5,5%	9,7%	19,4%	10,9%	4,8%
	Sd15	9,0%	14,1%	23,7%	15,4%	9,6%
	Sd16	8,2%	13,3%	22,8%	14,6%	8,2%
	Sd17	8,7%	13,1%	23,1%	14,4%	8,7%
	Sd18	7,0%	12,1%	21,7%	12,7%	7,0%
	Sd19	7,3%	11,9%	22,5%	13,2%	7,9%
	Sd20	10,1%	14,2%	25,0%	16,2%	10,1%
	Sd48	8,8%	12,8%	23,6%	14,9%	8,1%
	Sd49	8,0%	12,7%	23,3%	14,7%	7,3%
	<b>Moyenne</b>	<b>8,3%</b>	<b>12,8%</b>	<b>23,0%</b>	<b>14,2%</b>	<b>8,1%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>1,49%</i>	<i>1,51%</i>	<i>1,62%</i>	<i>1,58%</i>	<i>1,59%</i>

## B.3.1.2 Hêtre

**Tableau B.3.3.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction longitudinale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		<i>Humidité relative (%)</i>				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	HD31	7,3%	12,7%	24,1%	14,5%	7,3%
	HD32	6,9%	12,3%	23,5%	14,3%	6,8%
	HD33	7,4%	12,8%	23,7%	14,4%	6,6%
	HD34	5,7%	10,4%	21,4%	12,5%	4,9%
	HD35	7,1%	12,6%	23,7%	14,4%	6,8%
	HD36	7,2%	12,6%	23,6%	14,4%	6,7%
	HD37	7,2%	12,6%	23,8%	14,7%	6,9%
	HD38	7,1%	12,5%	23,8%	14,5%	6,6%
	HD39	5,7%	10,9%	22,1%	12,8%	5,2%
	HD40	7,2%	12,5%	24,0%	14,4%	6,7%
	HD43	7,0%	11,8%	22,9%	13,9%	6,3%
	HD44	7,1%	12,0%	23,3%	14,2%	6,3%
	<b>Moyenne</b>	<b>6,9%</b>	<b>12,1%</b>	<b>23,3%</b>	<b>14,1%</b>	<b>6,4%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,58%</i>	<i>0,77%</i>	<i>0,82%</i>	<i>0,69%</i>	<i>0,70%</i>
15 x 15 x 15	Hd31	6,7%	12,0%	22,5%	13,4%	6,2%
	Hd32	6,2%	11,4%	21,9%	12,9%	5,2%
	Hd33	7,6%	12,9%	23,8%	14,3%	6,7%
	Hd34	7,0%	12,6%	23,8%	14,0%	6,1%
	Hd35	7,3%	12,3%	23,6%	13,6%	6,8%
	Hd36	7,2%	12,6%	23,4%	14,0%	6,8%
	Hd37	7,6%	12,9%	23,6%	14,2%	6,7%
	Hd38	7,5%	12,7%	23,2%	14,0%	6,6%
	Hd39	6,2%	10,6%	21,6%	12,8%	5,3%
	Hd40	5,1%	9,7%	20,3%	11,5%	3,7%
	Hd43	6,9%	12,3%	23,0%	14,2%	6,4%
	Hd44	7,5%	12,7%	25,0%	14,6%	6,6%
	<b>Moyenne</b>	<b>6,9%</b>	<b>12,0%</b>	<b>23,0%</b>	<b>13,6%</b>	<b>6,1%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,76%</i>	<i>1,01%</i>	<i>1,25%</i>	<i>0,87%</i>	<i>0,92%</i>

**Tableau B.3.4.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction transversale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		Humidité relative (%)				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	HD11	7,6%	12,5%	23,5%	14,5%	8,4%
	HD12	7,2%	12,0%	23,0%	14,0%	7,8%
	HD13	8,0%	12,9%	24,6%	14,5%	7,9%
	HD14	7,7%	12,2%	24,6%	14,7%	8,6%
	HD15	7,6%	12,1%	22,9%	14,0%	8,2%
	HD16	7,8%	12,7%	23,9%	14,6%	8,2%
	HD17	7,7%	12,6%	23,9%	14,8%	8,3%
	HD18	7,6%	12,5%	23,3%	14,6%	8,1%
	HD19	7,1%	11,6%	23,1%	14,1%	7,7%
	HD20	6,8%	10,9%	23,3%	13,2%	7,7%
	HD48	7,5%	12,3%	23,0%	14,1%	7,9%
	HD49	7,9%	13,0%	25,1%	15,0%	8,1%
	<b>Moyenne</b>	<b>7,5%</b>	<b>12,3%</b>	<b>23,7%</b>	<b>14,3%</b>	<b>8,1%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,36%</i>	<i>0,59%</i>	<i>0,75%</i>	<i>0,49%</i>	<i>0,26%</i>
15 x 15 x 15	Hd11	7,5%	12,4%	23,0%	14,2%	7,1%
	Hd12	6,3%	11,7%	22,1%	13,1%	5,9%
	Hd13	7,6%	13,0%	24,2%	14,8%	7,2%
	Hd14	7,6%	12,9%	23,6%	14,7%	6,7%
	Hd15	7,6%	12,5%	23,7%	14,3%	7,1%
	Hd16	7,3%	12,3%	23,3%	13,7%	6,8%
	Hd17	7,1%	12,3%	22,7%	14,2%	6,6%
	Hd18	7,0%	12,3%	22,4%	14,0%	6,6%
	Hd19	4,8%	9,6%	20,6%	11,4%	4,8%
	Hd20	7,0%	11,6%	21,9%	13,5%	6,5%
	Hd48	3,8%	8,6%	19,0%	10,5%	3,3%
	Hd49	6,6%	11,8%	24,1%	13,7%	6,1%
	<b>Moyenne</b>	<b>6,7%</b>	<b>11,8%</b>	<b>22,5%</b>	<b>13,5%</b>	<b>6,2%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>1,20%</i>	<i>1,33%</i>	<i>1,50%</i>	<i>1,30%</i>	<i>1,12%</i>

## B.3.1.3 Moabi

**Tableau B.3.5.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction longitudinale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		<i>Humidité relative (%)</i>				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	MD31	7,5%	12,5%	22,4%	15,0%	7,8%
	MD32	7,6%	12,7%	22,4%	15,1%	7,8%
	MD33	7,7%	13,2%	23,0%	15,6%	7,9%
	MD34	8,5%	13,6%	24,2%	16,3%	8,4%
	MD35	6,7%	11,8%	21,6%	14,3%	7,2%
	MD36	7,8%	12,4%	22,5%	15,2%	8,1%
	MD37	7,9%	13,2%	23,0%	15,4%	8,0%
	MD38	6,5%	11,6%	21,6%	13,6%	6,4%
	MD39	7,8%	12,8%	22,6%	15,3%	8,3%
	MD40	8,5%	13,3%	23,4%	16,0%	8,7%
	MD43	9,7%	14,7%	24,4%	17,0%	9,7%
	MD44	8,0%	13,2%	23,0%	15,7%	8,0%
	<b>Moyenne</b>	<b>7,8%</b>	<b>12,9%</b>	<b>22,8%</b>	<b>15,4%</b>	<b>8,0%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,84%</i>	<i>0,83%</i>	<i>0,87%</i>	<i>0,88%</i>	<i>0,80%</i>
15 x 15 x 15	Md31	7,7%	12,8%	22,6%	15,0%	7,3%
	Md32	8,5%	13,2%	23,2%	15,4%	7,7%
	Md33	7,9%	13,4%	23,4%	15,8%	7,6%
	Md34	7,7%	12,9%	22,5%	15,1%	7,0%
	Md35	7,4%	12,6%	22,6%	14,8%	7,4%
	Md36	8,0%	13,3%	23,1%	15,5%	8,0%
	Md37	7,1%	12,3%	22,0%	14,6%	6,7%
	Md38	6,9%	12,3%	22,1%	14,5%	6,5%
	Md39	6,2%	11,6%	21,5%	13,8%	6,2%
	Md40	3,9%	8,8%	18,4%	11,0%	3,9%
	Md43	8,1%	12,9%	22,9%	14,8%	7,4%
	Md44	8,9%	14,3%	23,6%	16,4%	8,2%
	<b>Moyenne</b>	<b>7,4%</b>	<b>12,5%</b>	<b>22,3%</b>	<b>14,7%</b>	<b>7,0%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>1,31%</i>	<i>1,34%</i>	<i>1,38%</i>	<i>1,37%</i>	<i>1,14%</i>

**Tableau B.3.6.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction transversale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		<i>Humidité relative (%)</i>				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	MD11	10,1%	14,6%	24,1%	16,9%	11,4%
	MD12	8,8%	13,3%	22,7%	15,6%	10,0%
	MD13	9,7%	14,3%	24,3%	17,0%	10,8%
	MD14	9,0%	13,6%	23,3%	16,1%	10,1%
	MD15	9,7%	13,9%	23,9%	16,6%	11,0%
	MD16	9,0%	13,3%	23,2%	16,0%	10,8%
	MD17	9,4%	14,0%	24,0%	16,1%	10,4%
	MD18	10,0%	14,4%	24,2%	16,7%	10,9%
	MD19	10,2%	14,4%	24,4%	17,1%	11,6%
	MD20	10,8%	15,3%	25,1%	17,8%	12,2%
	MD48	9,9%	14,1%	24,3%	16,7%	10,7%
	MD49	9,7%	14,3%	25,1%	17,1%	11,0%
	<b>Moyenne</b>	<b>9,7%</b>	<b>14,1%</b>	<b>24,1%</b>	<b>16,6%</b>	<b>10,9%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,57%</i>	<i>0,57%</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,61%</i>	<i>0,61%</i>
15 x 15 x 15	Md11	7,6%	12,6%	22,0%	14,8%	7,6%
	Md12	6,8%	11,8%	21,5%	14,0%	6,8%
	Md13	8,1%	12,9%	22,9%	15,1%	7,7%
	Md14	8,6%	13,8%	23,4%	15,6%	8,2%
	Md15	7,1%	11,9%	21,6%	13,8%	7,1%
	Md16	8,9%	13,7%	23,6%	15,9%	8,9%
	Md17	3,5%	8,0%	17,5%	10,1%	3,1%
	Md18	5,7%	10,6%	19,9%	12,8%	5,7%
	Md19	5,1%	9,9%	19,8%	12,1%	5,5%
	Md20	5,3%	9,8%	19,3%	11,9%	5,3%
	Md48	7,5%	12,3%	22,0%	14,2%	7,1%
	Md49	7,8%	12,5%	22,4%	14,9%	7,1%
	<b>Moyenne</b>	<b>6,8%</b>	<b>11,7%</b>	<b>21,3%</b>	<b>13,8%</b>	<b>6,7%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>1,61%</i>	<i>1,72%</i>	<i>1,85%</i>	<i>1,72%</i>	<i>1,55%</i>

## B.3.1.4 Ozigo

**Tableau B.3.7.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction longitudinale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		<i>Humidité relative (%)</i>				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	OD31	5,8%	10,7%	21,9%	12,7%	5,7%
	OD32	7,4%	12,7%	23,8%	14,8%	7,6%
	OD33	8,0%	13,3%	24,9%	15,4%	7,7%
	OD34	7,3%	12,8%	24,4%	14,8%	7,2%
	OD35	8,1%	13,3%	24,5%	15,4%	8,0%
	OD36	7,3%	12,5%	23,5%	14,4%	7,3%
	OD37	7,5%	12,5%	23,6%	14,5%	7,4%
	OD38	7,5%	12,7%	24,1%	14,8%	7,4%
	OD39	7,6%	12,5%	23,9%	14,7%	7,4%
	OD40	8,0%	12,7%	24,0%	14,7%	7,6%
	OD43	9,7%	14,6%	25,6%	16,7%	9,7%
	OD44	9,9%	14,9%	26,3%	17,1%	9,6%
	<b>Moyenne</b>	<b>7,8%</b>	<b>12,9%</b>	<b>24,2%</b>	<b>15,0%</b>	<b>7,7%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>1,08%</i>	<i>1,07%</i>	<i>1,11%</i>	<i>1,11%</i>	<i>1,07%</i>
15 x 15 x 15	Od31	8,2%	12,9%	24,2%	14,9%	7,7%
	Od32	8,6%	13,0%	24,3%	14,6%	7,6%
	Od33	8,4%	13,7%	25,3%	15,8%	7,9%
	Od34	8,3%	13,5%	25,0%	15,6%	7,8%
	Od35	8,6%	13,7%	25,4%	15,7%	8,1%
	Od36	8,4%	13,6%	25,1%	15,2%	7,9%
	Od37	8,1%	13,1%	24,7%	15,2%	7,6%
	Od38	10,4%	14,7%	26,5%	17,1%	9,0%
	Od39	8,0%	13,0%	24,0%	14,5%	7,0%
	Od40	6,0%	11,1%	22,6%	13,1%	5,5%
	Od43	7,1%	12,2%	23,4%	14,2%	6,6%
	Od44	8,1%	13,4%	24,7%	15,6%	7,0%
	<b>Moyenne</b>	<b>8,2%</b>	<b>13,2%</b>	<b>24,6%</b>	<b>15,1%</b>	<b>7,5%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>1,02%</i>	<i>0,90%</i>	<i>1,02%</i>	<i>0,99%</i>	<i>0,87%</i>



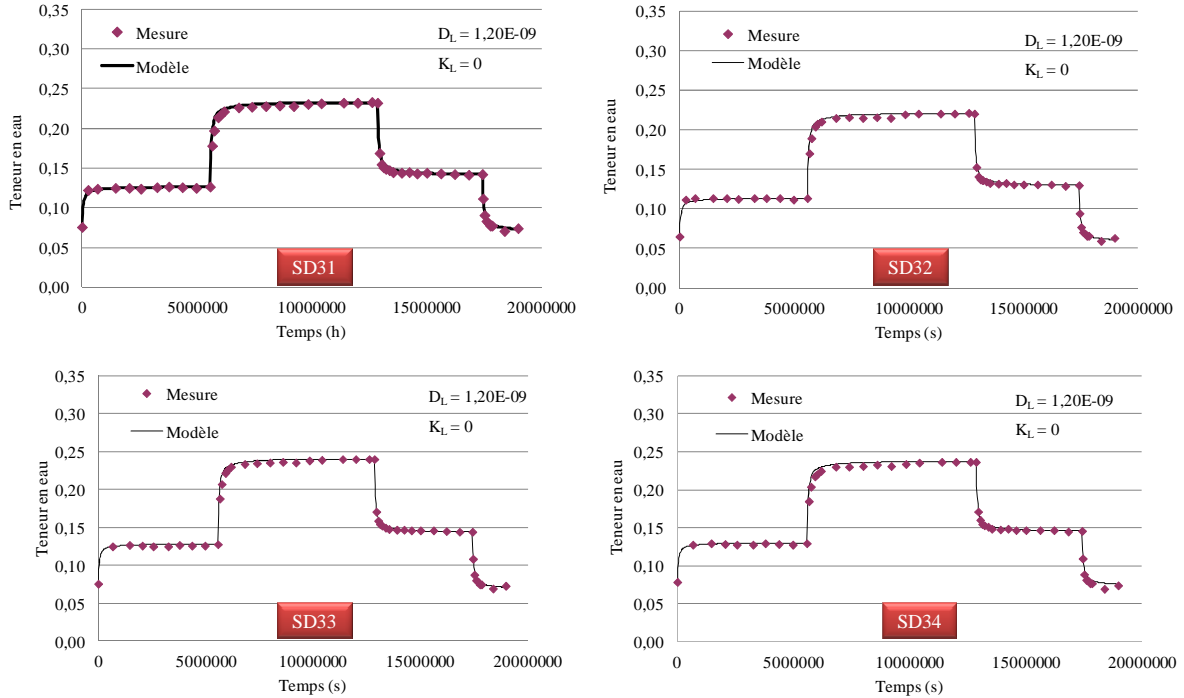
**Tableau B.3.8.** Teneur en eau par échantillon aux différents états d'équilibre hydrique dans la direction transversale

Géométrie	Echantillon	Teneur en eau (%)				
		<i>Humidité relative (%)</i>				
		30	65	90	65	30
30 x 30 x 30	OD11	8,4%	12,6%	23,4%	15,0%	10,0%
	OD12	9,9%	13,8%	24,9%	16,3%	11,5%
	OD13	8,2%	12,8%	24,0%	15,2%	9,6%
	OD14	8,7%	13,1%	24,3%	15,7%	10,1%
	OD15	8,7%	12,8%	24,0%	15,3%	10,3%
	OD16	9,1%	13,1%	24,1%	15,7%	10,7%
	OD17	8,6%	12,6%	23,8%	15,2%	9,8%
	OD18	9,1%	12,9%	24,1%	15,5%	10,5%
	OD19	9,7%	13,6%	24,7%	16,2%	11,4%
	OD20	8,3%	12,5%	23,2%	14,9%	9,9%
	OD48	9,9%	13,7%	25,0%	16,6%	12,1%
	OD49	9,9%	14,0%	26,1%	16,9%	11,9%
	<b>Moyenne</b>	<b>9,0%</b>	<b>13,1%</b>	<b>24,3%</b>	<b>15,7%</b>	<b>10,7%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,66%</i>	<i>0,53%</i>	<i>0,77%</i>	<i>0,66%</i>	<i>0,87%</i>
15 x 15 x 15	Od11	9,4%	13,5%	25,5%	16,1%	9,4%
	Od12	9,3%	14,0%	25,4%	16,1%	9,8%
	Od13	8,5%	13,1%	25,1%	15,6%	9,0%
	Od14	8,9%	13,4%	25,2%	15,8%	8,4%
	Od15	10,1%	14,6%	26,3%	16,7%	10,6%
	Od16	9,1%	14,0%	25,3%	15,6%	9,1%
	Od17	9,9%	14,1%	26,0%	16,1%	9,9%
	Od18	8,5%	13,1%	24,6%	15,1%	8,5%
	Od19	7,8%	12,2%	23,9%	14,1%	8,3%
	Od20	9,0%	13,5%	25,0%	15,5%	9,0%
	Od48	8,6%	12,9%	24,4%	15,3%	9,1%
	Od49	8,4%	13,2%	24,7%	15,8%	8,4%
	<b>Moyenne</b>	<b>9,0%</b>	<b>13,5%</b>	<b>25,1%</b>	<b>15,7%</b>	<b>9,1%</b>
	<i>Ecart type</i>	<i>0,65%</i>	<i>0,65%</i>	<i>0,66%</i>	<i>0,64%</i>	<i>0,70%</i>

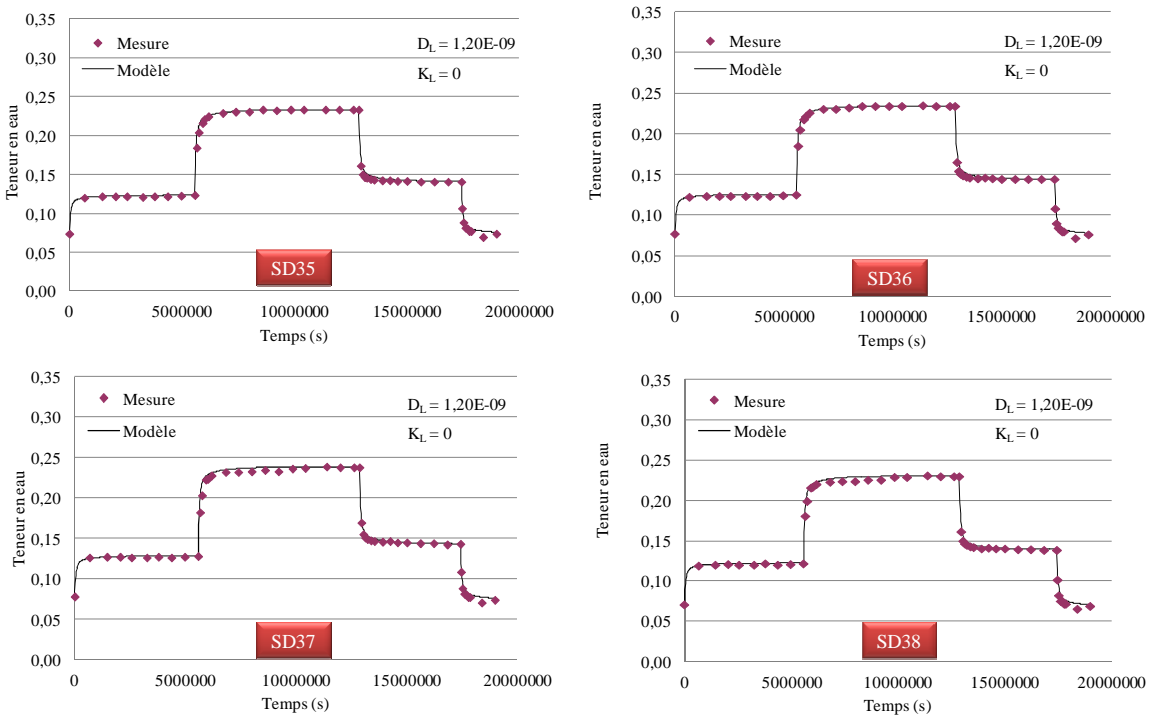
## B.3.2 Modélisation et identification des paramètres de diffusion

### B.3.2.1 Sapin

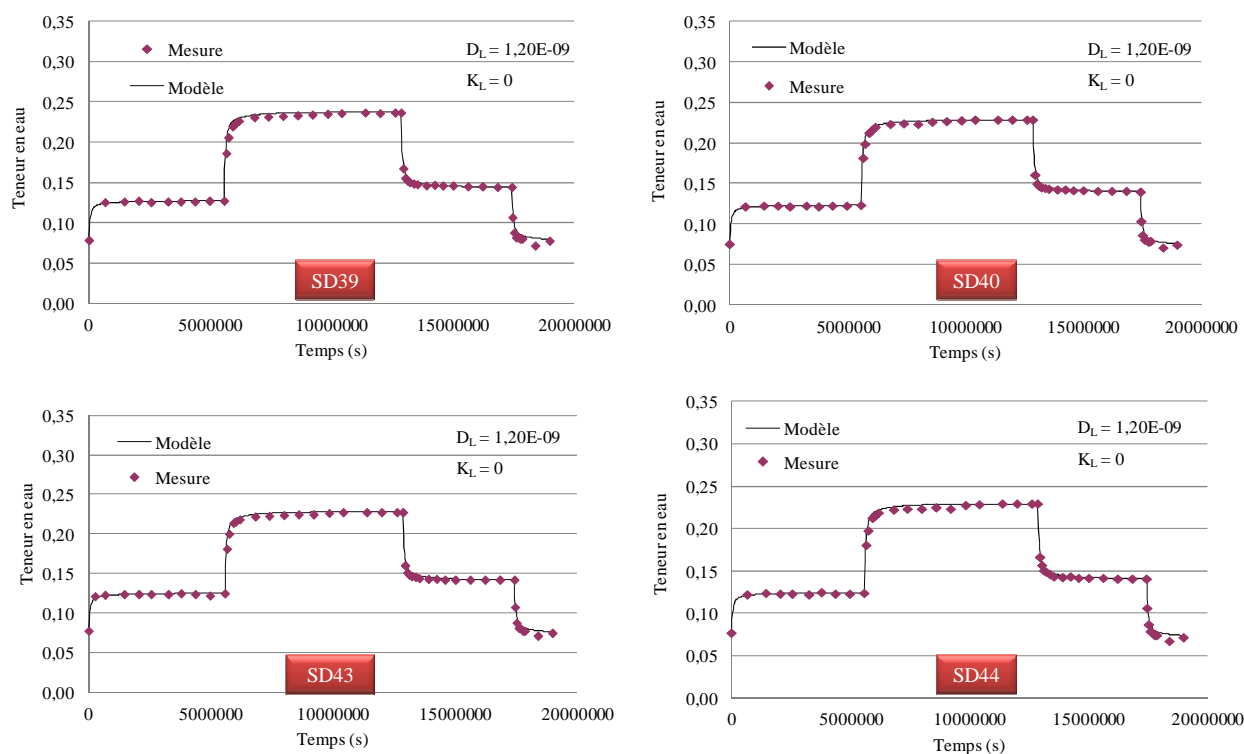
Direction longitudinale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)



**Figure B.3.1.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons SD31 à SD34 (30x30x30)



**Figure B.3.2.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons SD35 à SD38 (30x30x30)



**Figure B.3.3.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons SD39 à SD44 (30x30x30)

**Tableau B.3.9.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 30x30x30 dans la direction longitudinale pour le Sapin

Coef.	SD31	SD32	SD33	SD34	SD35	SD36	SD37	SD38	SD39	SD40	SD43	SD44	Moy.	E.T.
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	0

### Direction longitudinale (cube de $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$ )

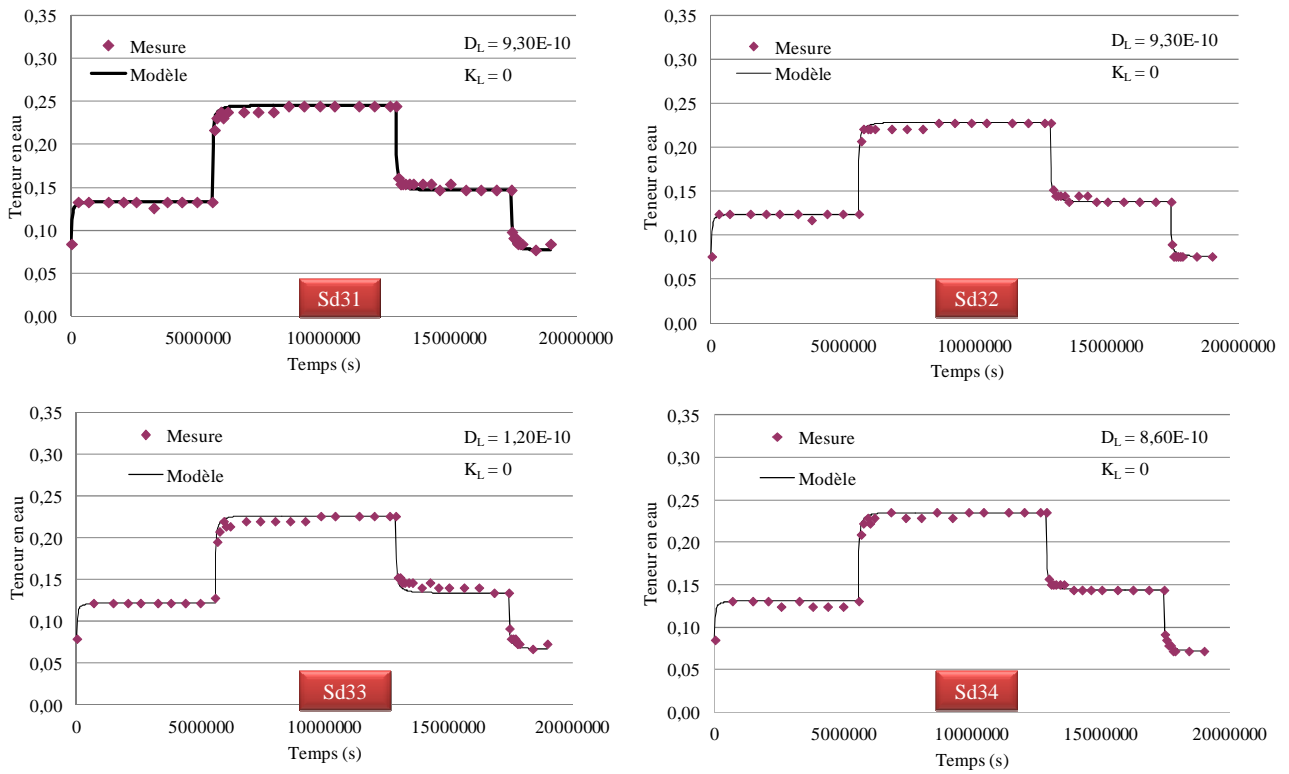


Figure B.3.4. Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Sd31 à Sd34 (15x15x15)

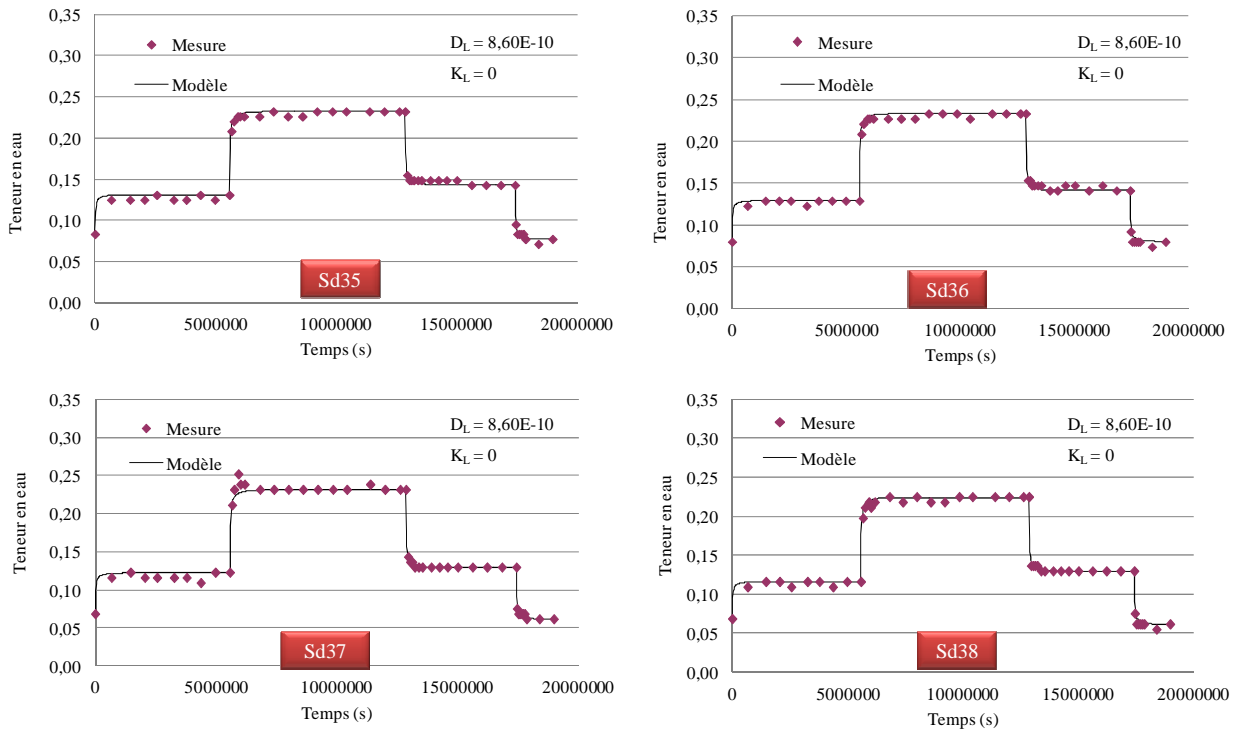
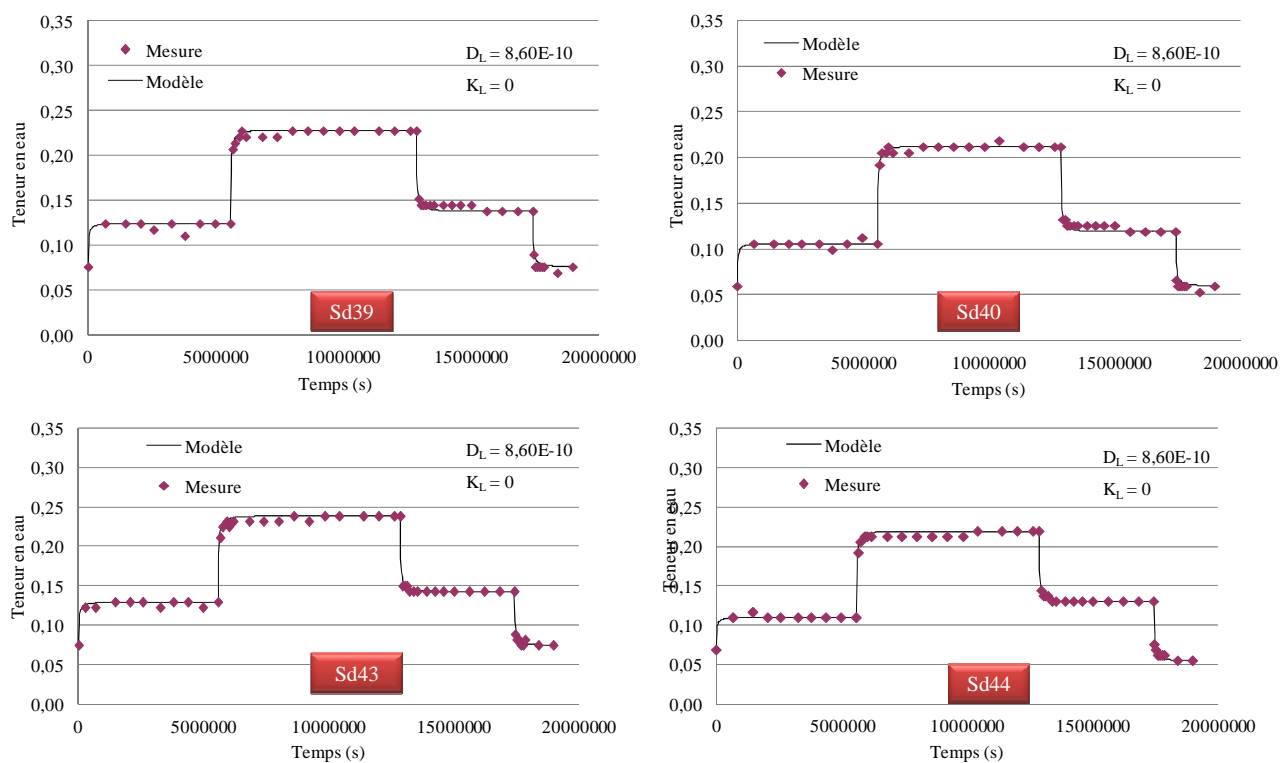


Figure B.3.5. Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Sd35 à Sd38 (15x15x15)



**Figure B.3.6.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Sd39 à Sd44 (15x15x15)

**Tableau B.2.10.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 15x15x15 dans la direction longitudinale pour le Sapin

Coef.	Sd31	Sd32	Sd33	Sd34	Sd35	Sd36	Sd37	Sd38	Sd39	Sd40	Sd43	Sd44	Moy.	E.T.
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	9,3E-10	9,3E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,6E-10	8,72E-10	2,61E-11

### Direction transversale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)

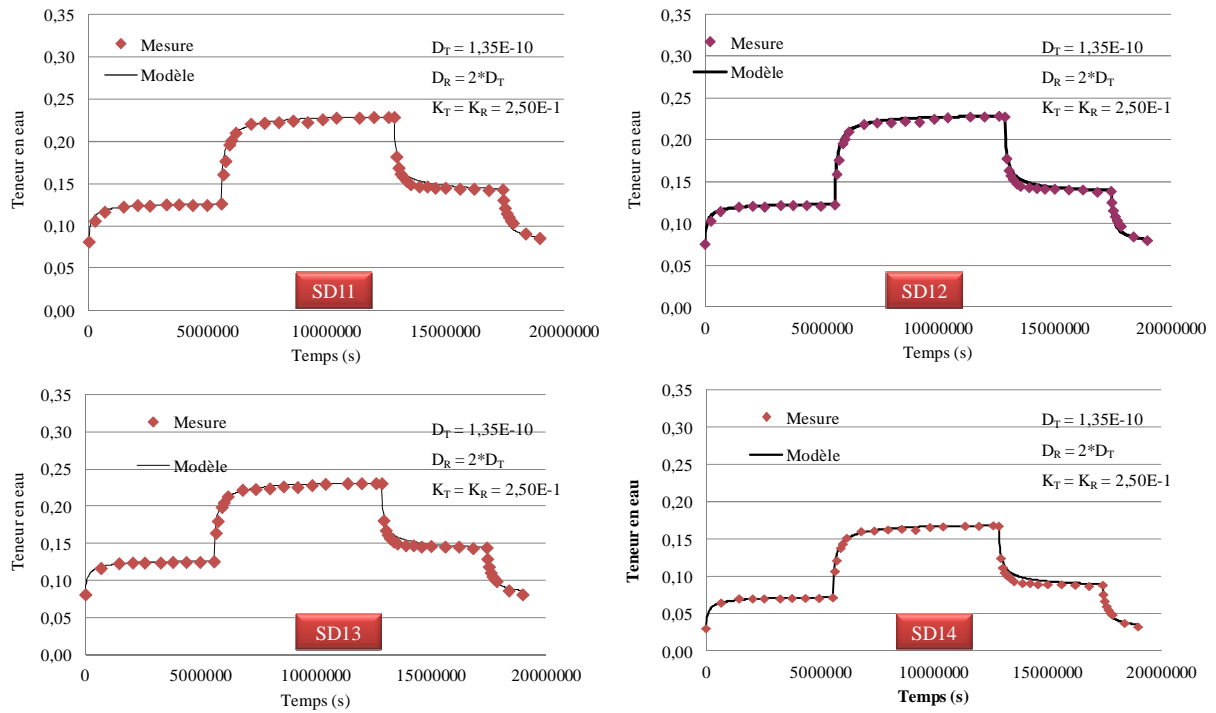


Figure B.3.7. Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons SD11 à SD14 (30x30x30)

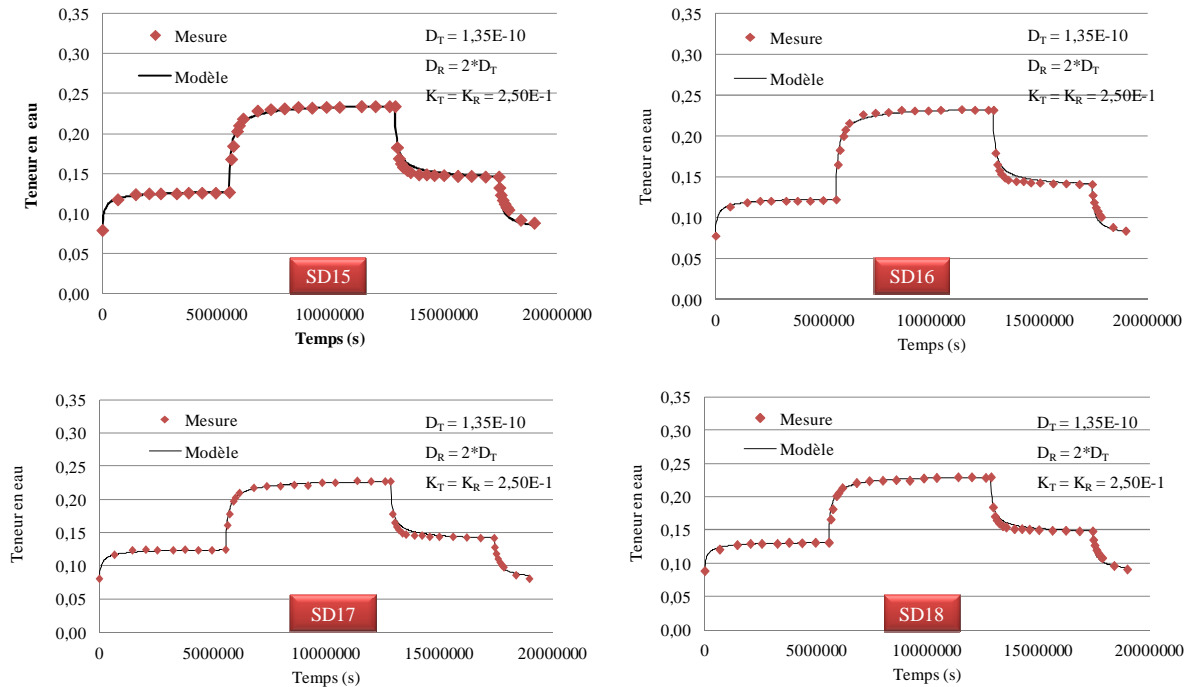
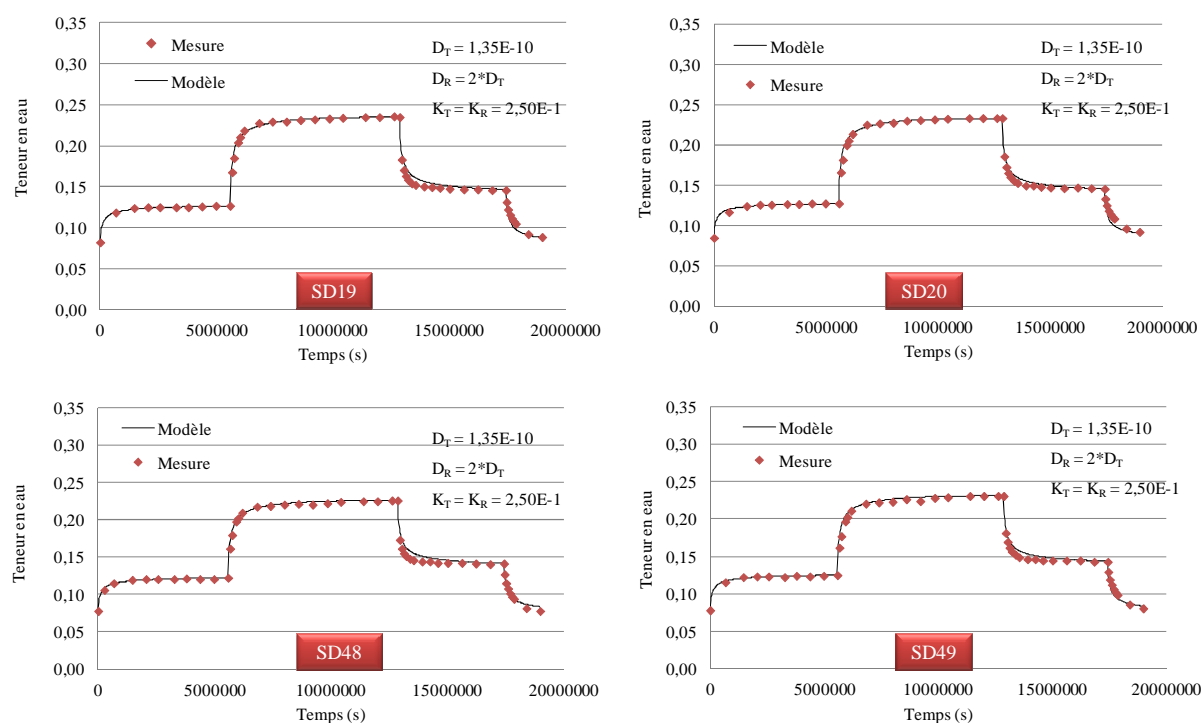


Figure B.3.8. Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons SD15 à SD18 (30x30x30)

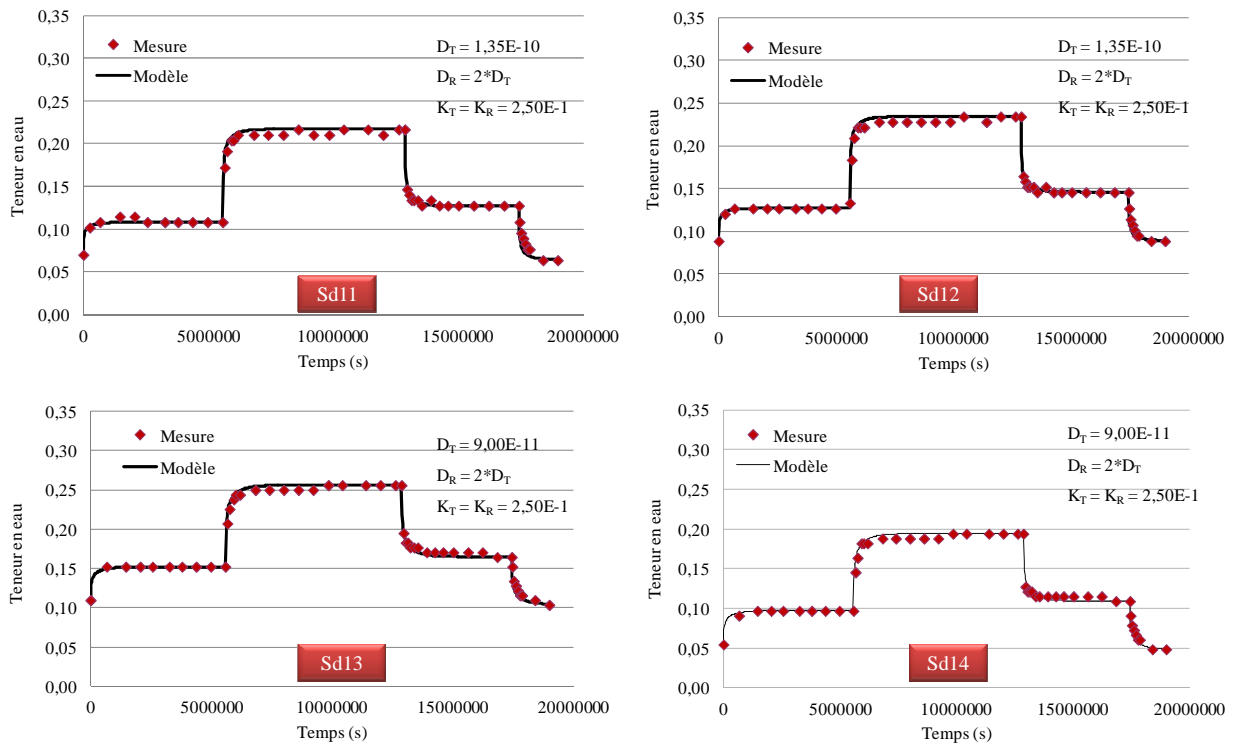


**Figure B.3.9.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons SD19, SD20, SD48 et SD49 (30x30x30)

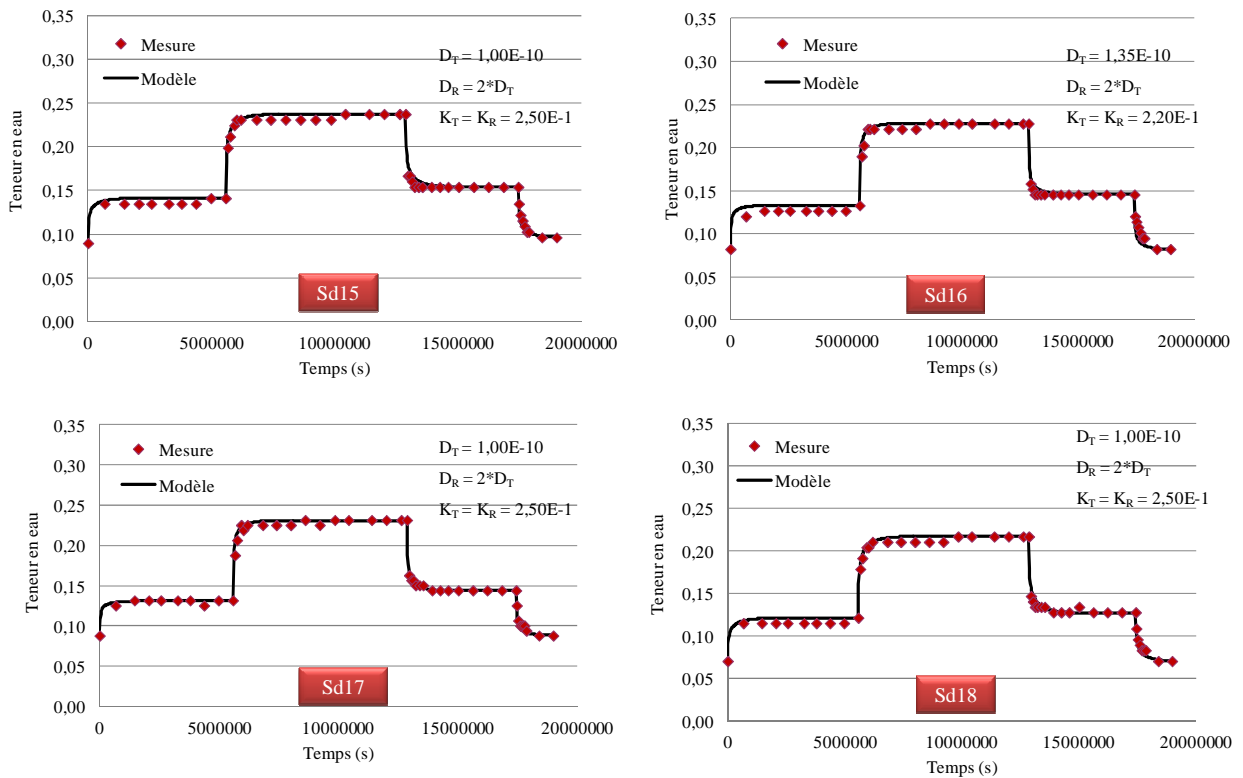
**Tableau B.3.11.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 30x30x30 dans la direction transversale pour le Sapin

Coef.	SD11	SD12	SD13	SD14	SD15	SD16	SD17	SD18	SD19	SD20	SD48	SD49	Moy.	E.T.
$K_T$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	<b>0,25</b>	<b>0</b>
$D_T$	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	<b>1,35E-10</b>	<b>2,58E-26</b>

Direction transversale (cube de 15x15x15 mm<sup>3</sup>)

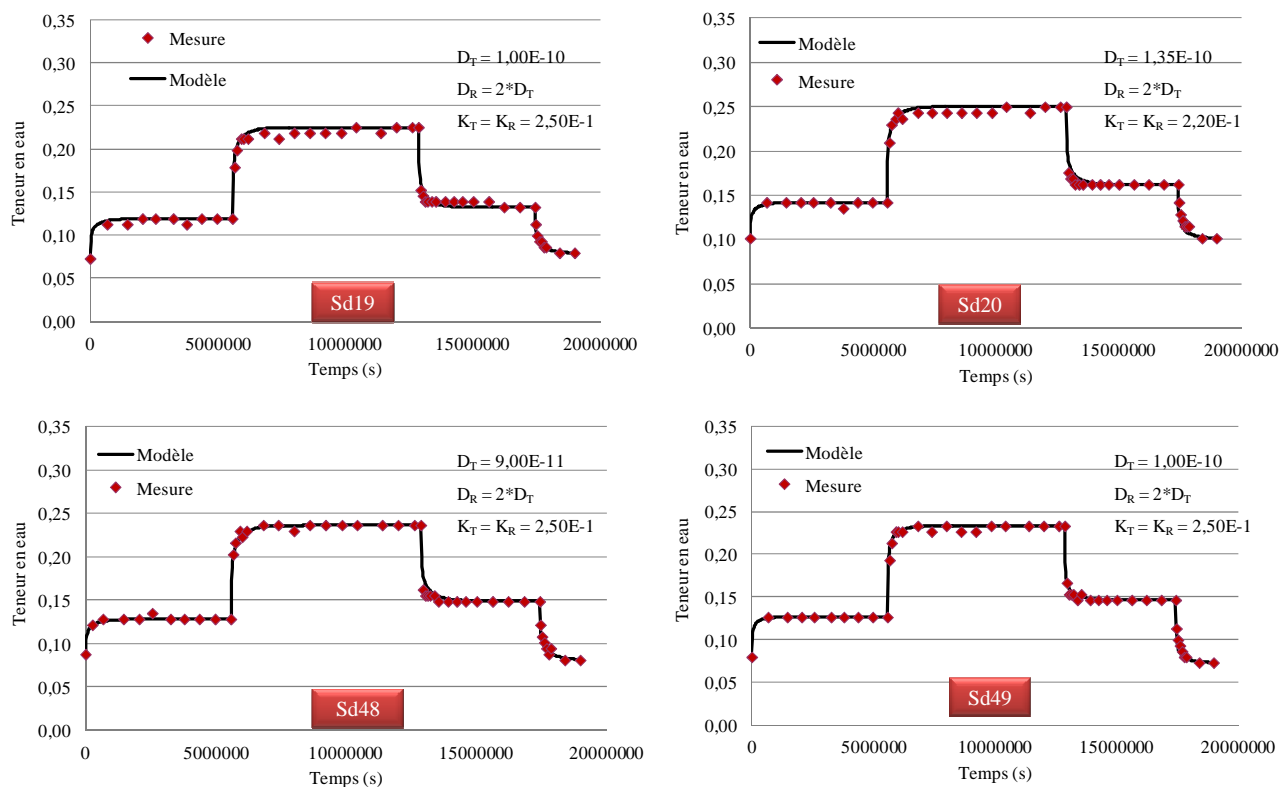


**Figure B.3.10.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Sd11 à Sd14 (15x15x15)



**Figure B.3.11.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Sd15 à Sd18 (15x15x15)





**Figure B.3.12.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Sd19, Sd20, Sd48 et Sd49 (15x15x15)

**Tableau B.3.12.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 15x15x15 dans la direction transversale pour le Sapin

Coef.	Sd11	Sd12	Sd13	Sd14	Sd15	Sd16	Sd17	Sd18	Sd19	Sd20	Sd48	Sd49	Moy.	E.T.
$K_T$	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,20E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	<b>2,48E-01</b>	<b>8,29E-03</b>
$D_T$	1,35E-10	1,35E-10	9,00E-11	9,00E-11	1,00E-10	1,35E-10	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10	1,35E-10	9,00E-11	1,35E-10	<b>1,12E-10</b>	<b>1,97E-11</b>

## B.3.3.2 Hêtre

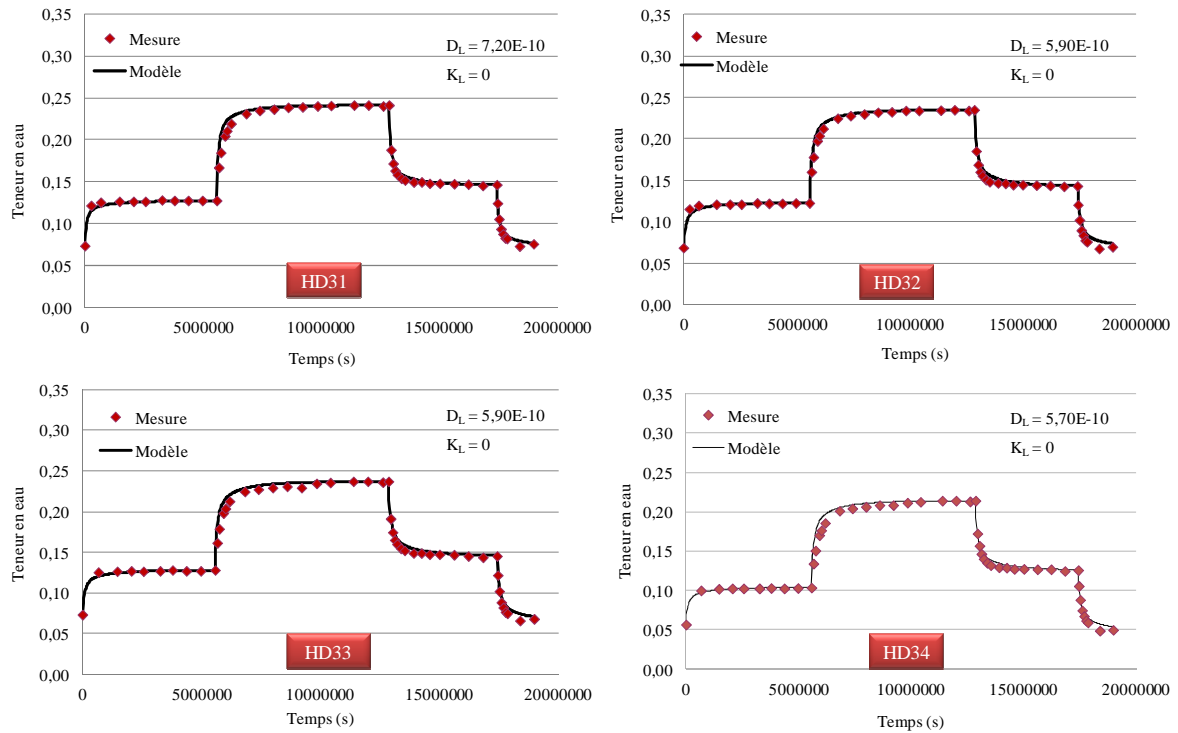
Direction longitudinale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)

Figure B.3.13. Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons HD31 à HD34

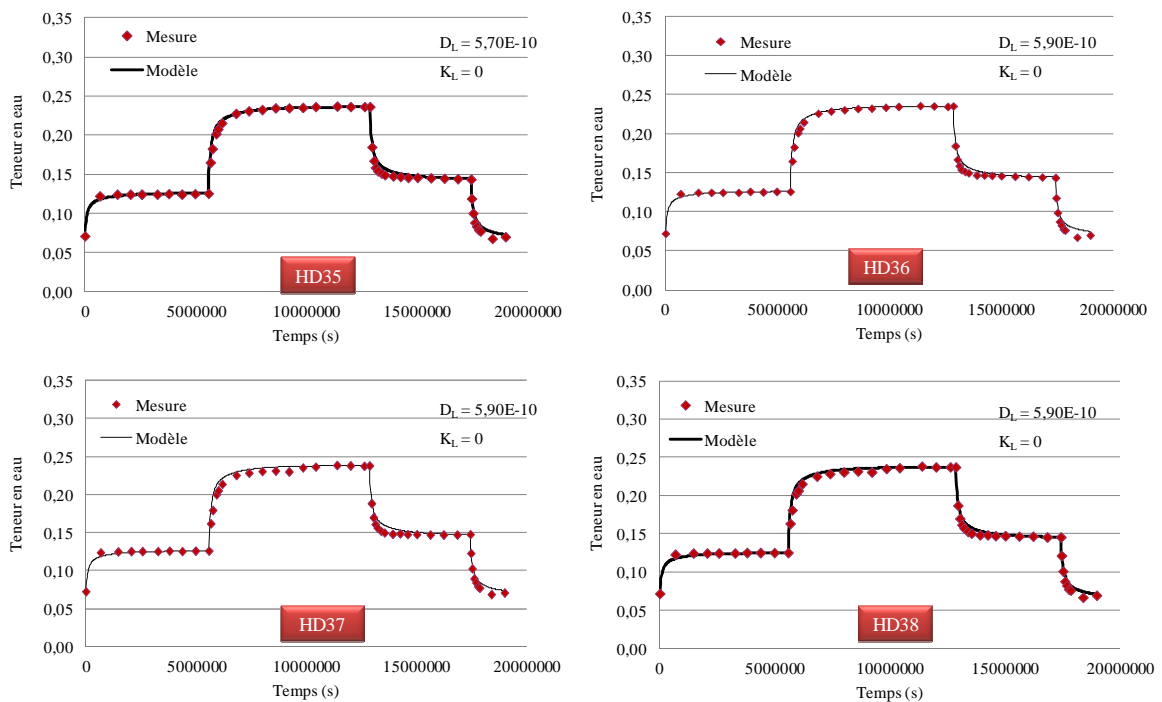
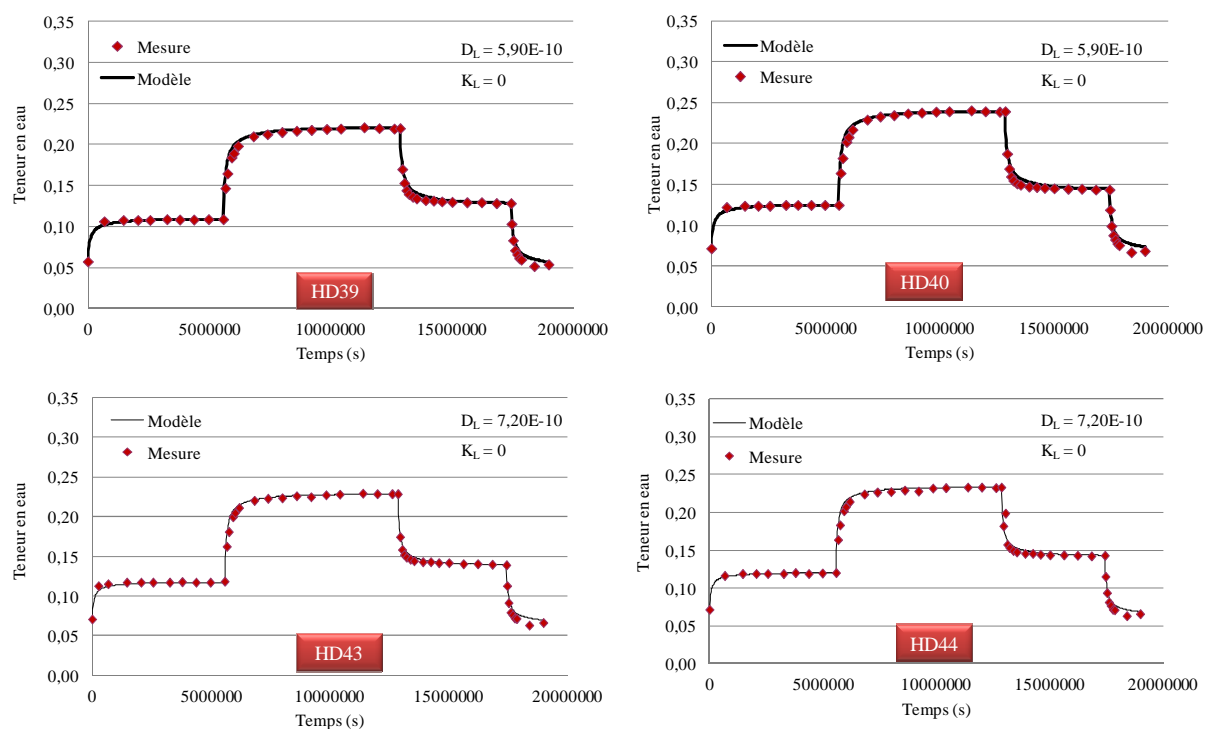


Figure B.3.14. Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons HD35 à HD38

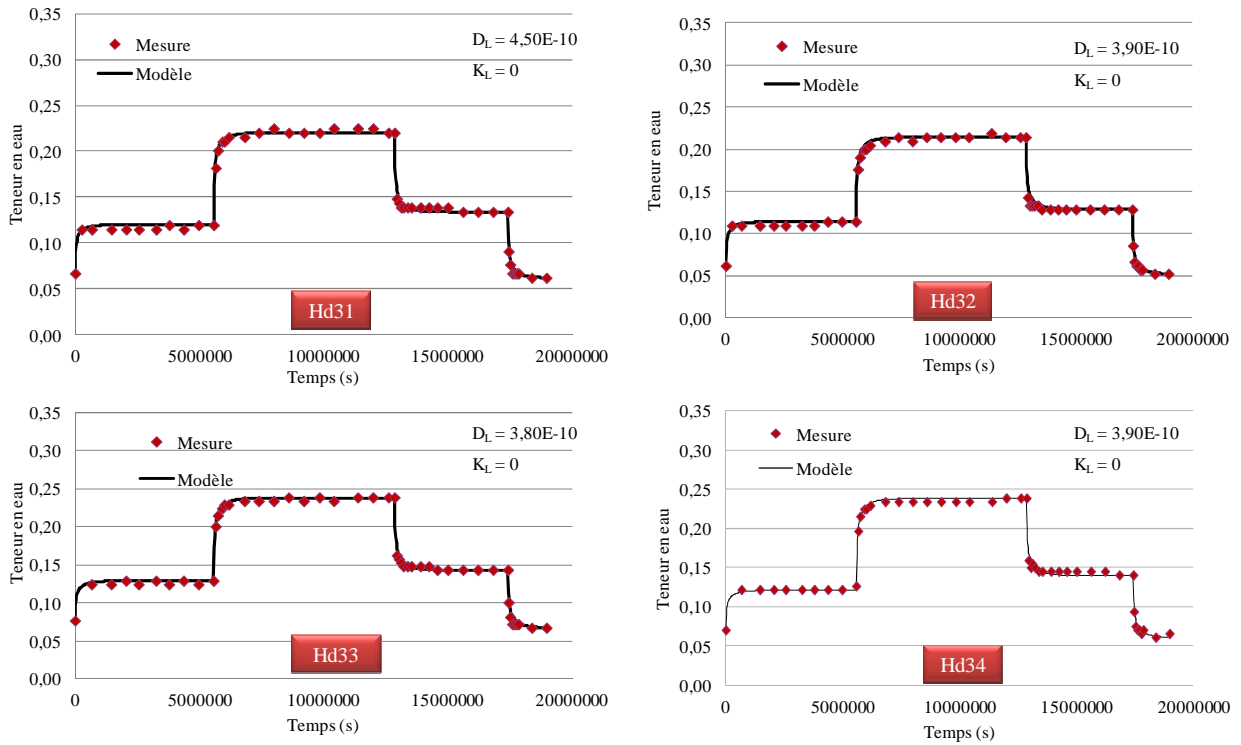


**Figure B.3.15.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons HD39, HD40, HD43 et HD44

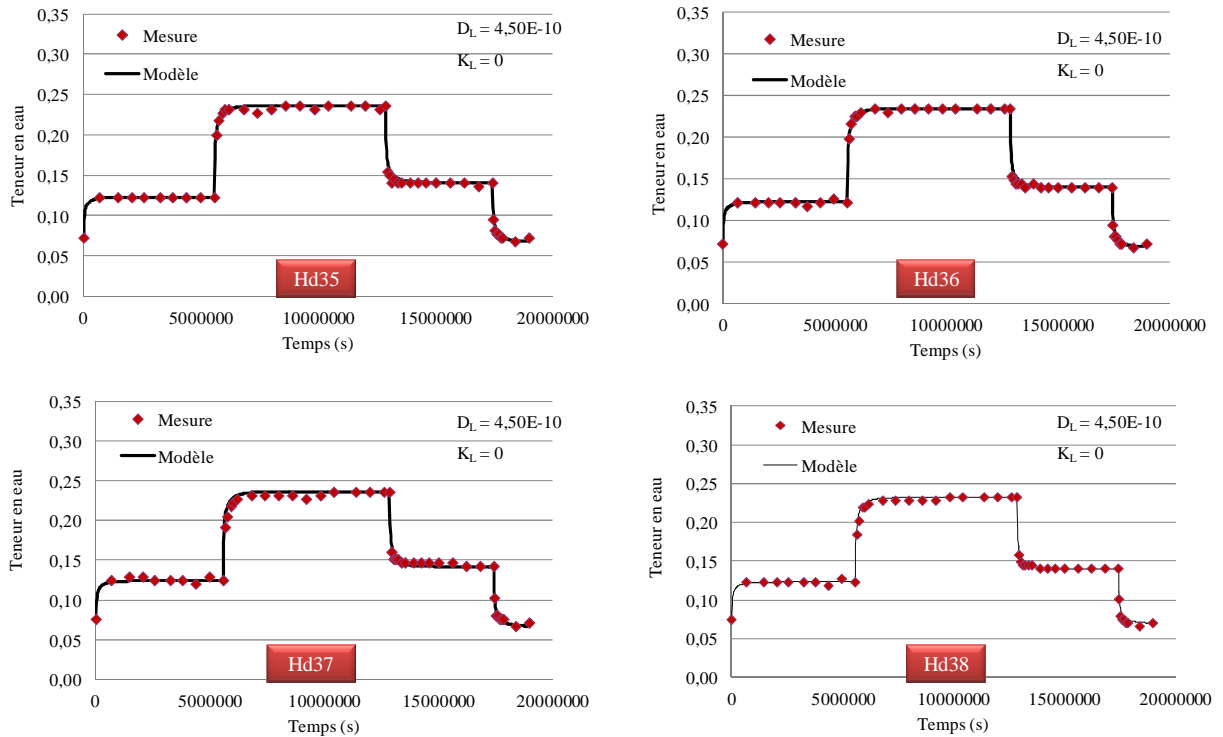
**Tableau B.3.13.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 30x30x30 dans la direction longitudinale pour le Hêtre

Coef.	HD31	HD32	HD33	HD34	HD35	HD36	HD37	HD38	HD39	HD40	HD43	HD44	Moy.	ET
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	7,2E-10	5,9E-10	5,9E-10	5,7E-10	5,7E-10	5,9E-10	5,9E-10	5,9E-10	5,9E-10	5,9E-10	7,2E-10	7,2E-10	<b>6,19E-10</b>	<b>6,13E-11</b>

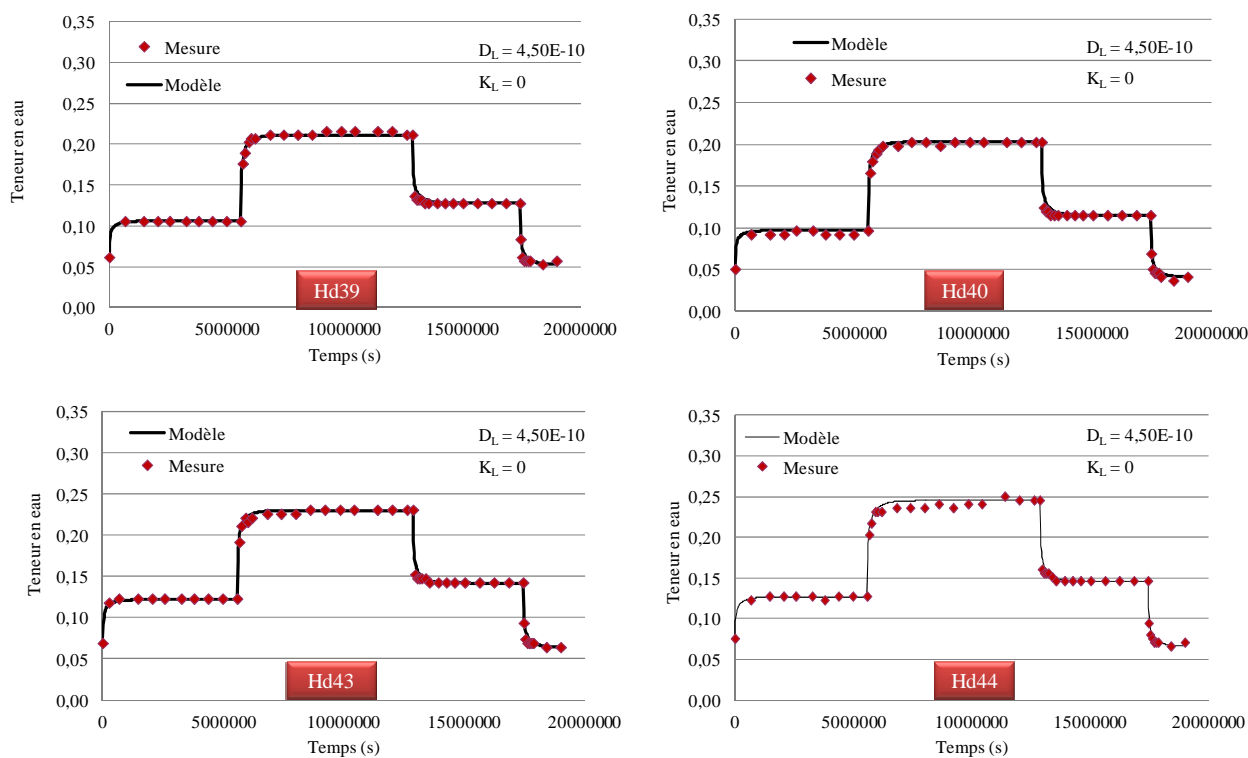
Direction longitudinale (cube de 15x15x15 mm<sup>3</sup>)



**Figure B.3.16.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Hd31 à Hd34



**Figure B.3.17.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Hd35 à Hd38

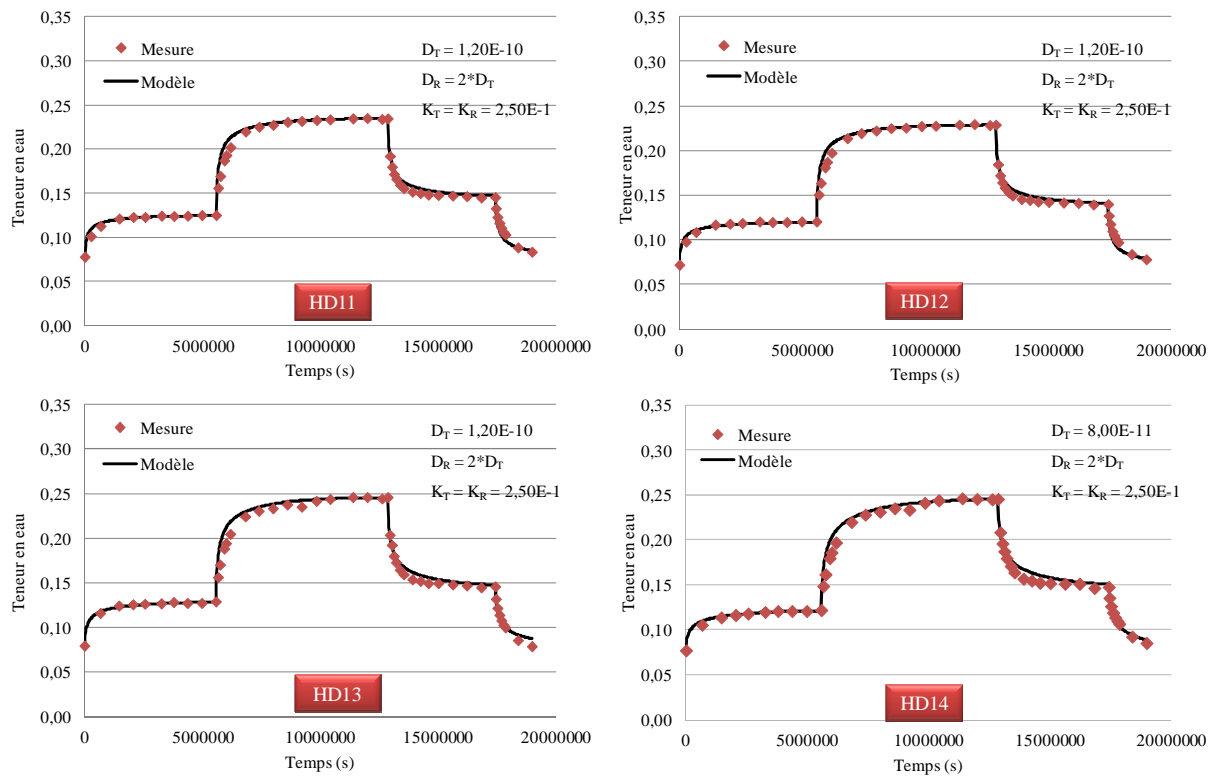


**Figure B.3.18.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Hd39, Hd40, Hd43 et Hd44

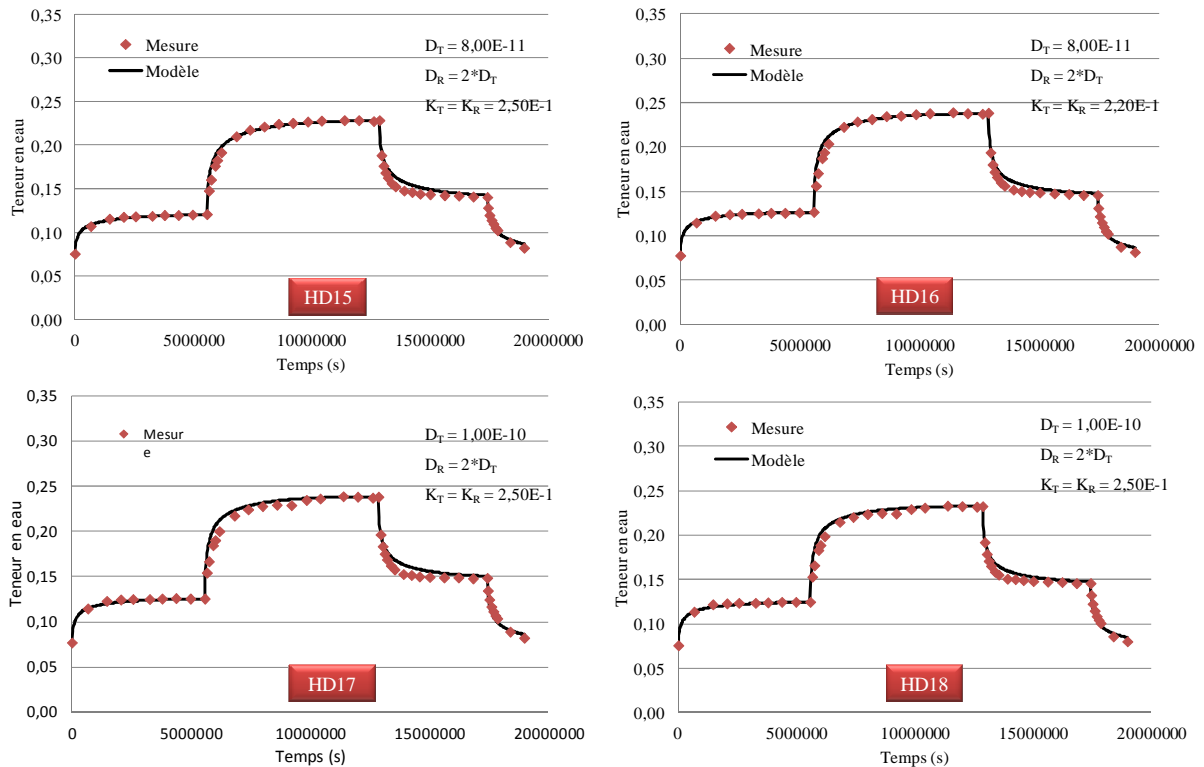
**Tableau B.3.14.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 15x15x15 dans la direction longitudinale pour le Hêtre

Coef.	Hd31	Hd32	Hd33	Hd34	Hd35	Hd36	Hd37	Hd38	Hd39	Hd40	Hd43	Hd44	Moy.	ET
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	4,5E-10	3,9E-10	3,8E-10	3,9E-10	4,5E-10	4,5E-10	4,5E-10	4,5E-10	4,5E-10	4,5E-10	4,5E-10	3,9E-10	4,29E-10	3,09E-11

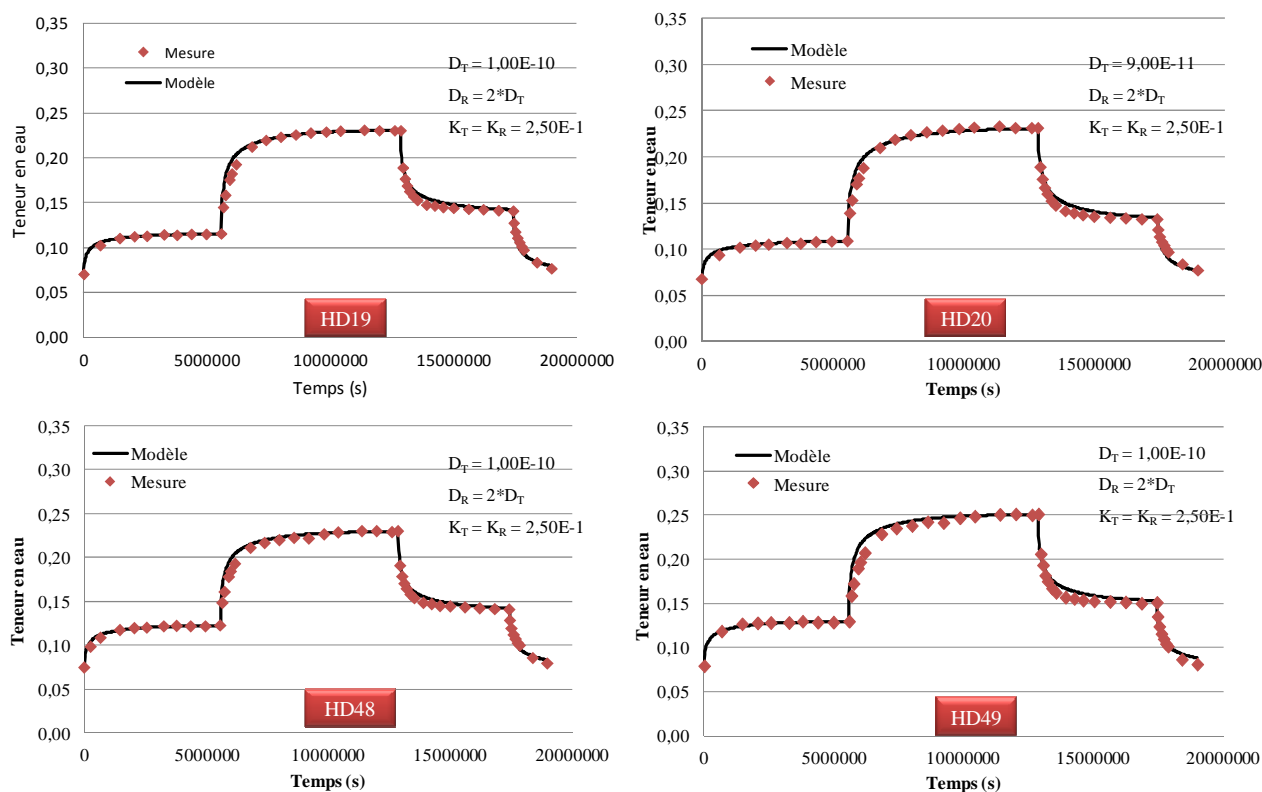
Direction transversale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)



**Figure B.3.19.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons HD11 à HD14



**Figure B.3.20.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons HD15 à HD18

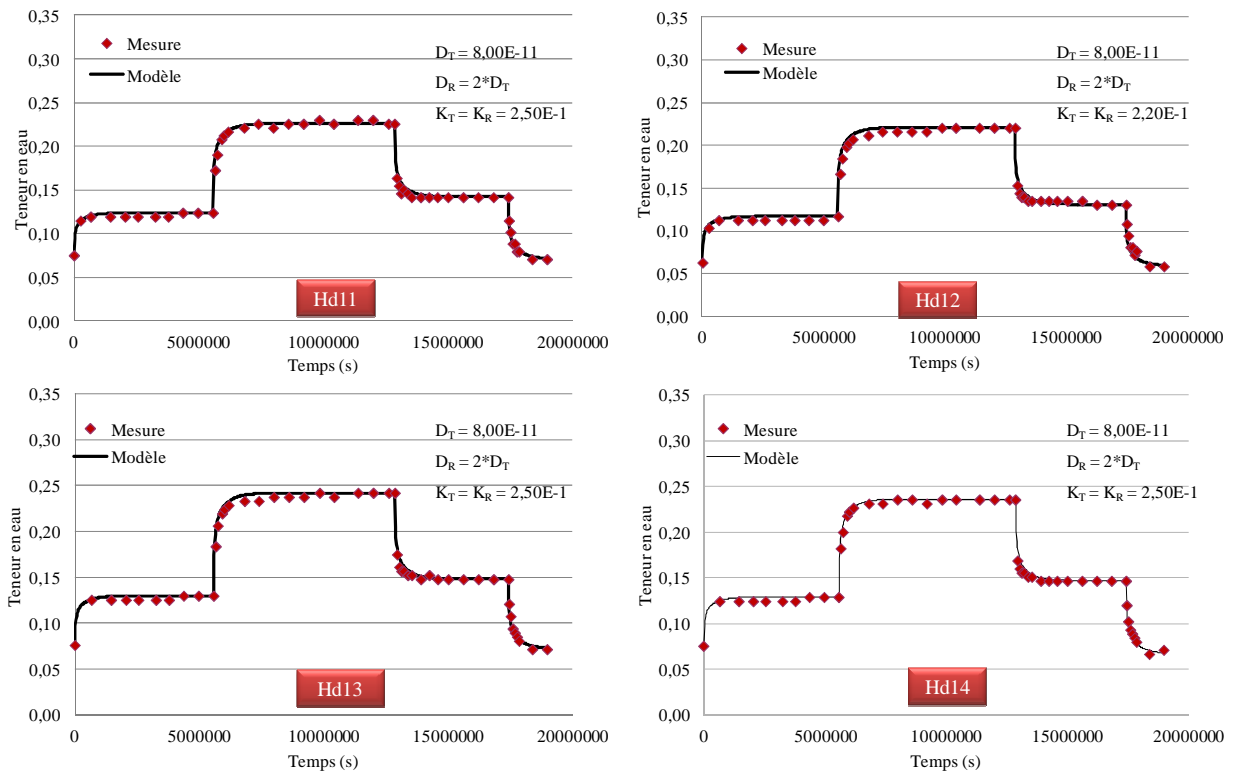


**Figure B.3.21.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons HD19, HD20, HD48 et HD49

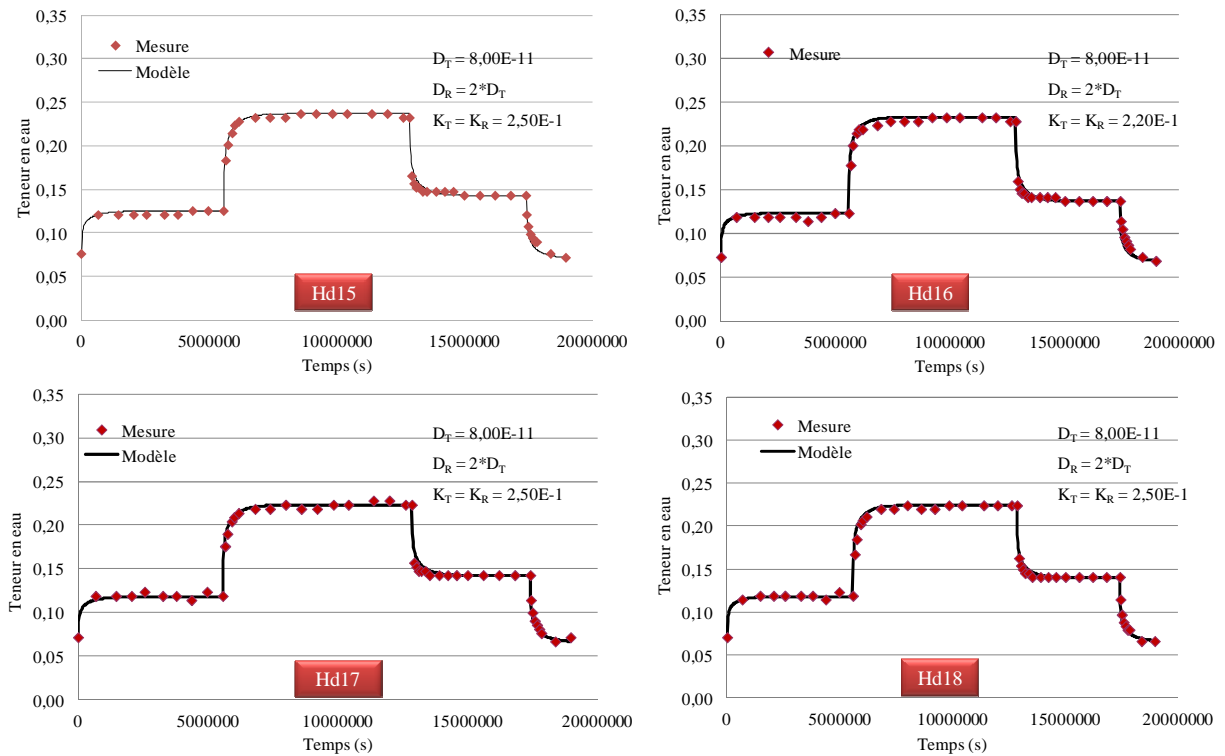
**Tableau B.3.15.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 30x30x30 dans la direction transversale pour le Hêtre

Coef.	HD11	HD12	HD13	HD14	HD15	HD16	HD17	HD18	HD19	HD20	HD48	HD49	Moy.	ET
$K_T$	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,20E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	<b>2,48E-01</b>	<b>8,66E-03</b>
$D_T$	1,20E-10	1,20E-10	1,20E-10	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10	9,00E-11	1,00E-10	1,00E-10	<b>9,92E-11</b>	<b>1,51E-11</b>

Direction transversale (cube de  $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$ )

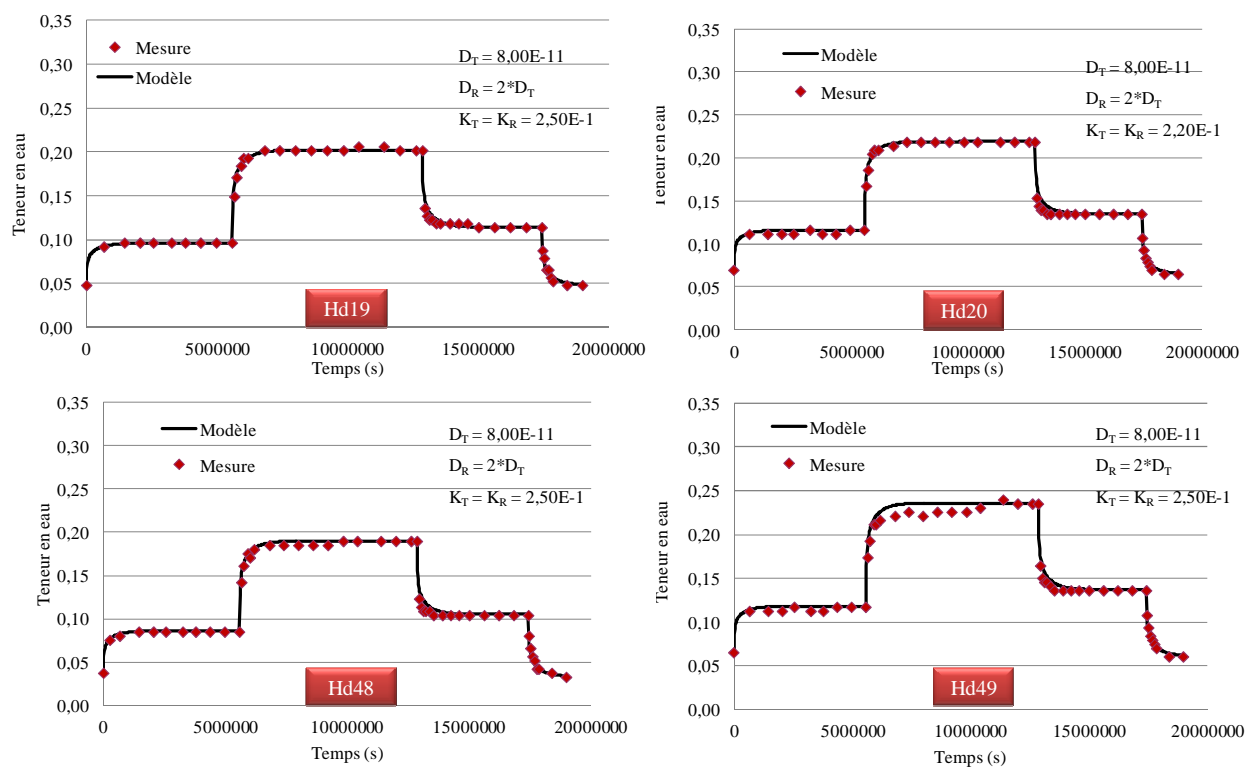


**Figure B.3.22.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Hd11 à Hd14



**Figure B.3.23.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Hd15 à Hd18



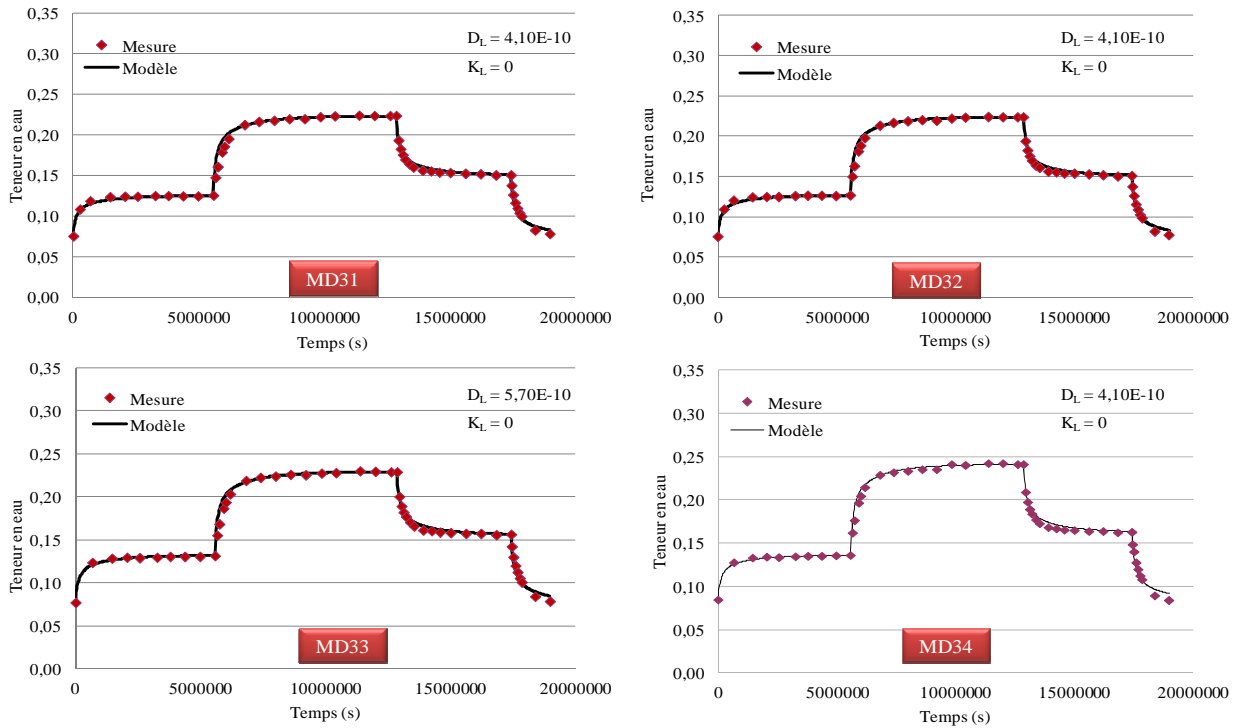


**Figure B.3.24.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Hd19, Hd20, Hd48 et Hd49

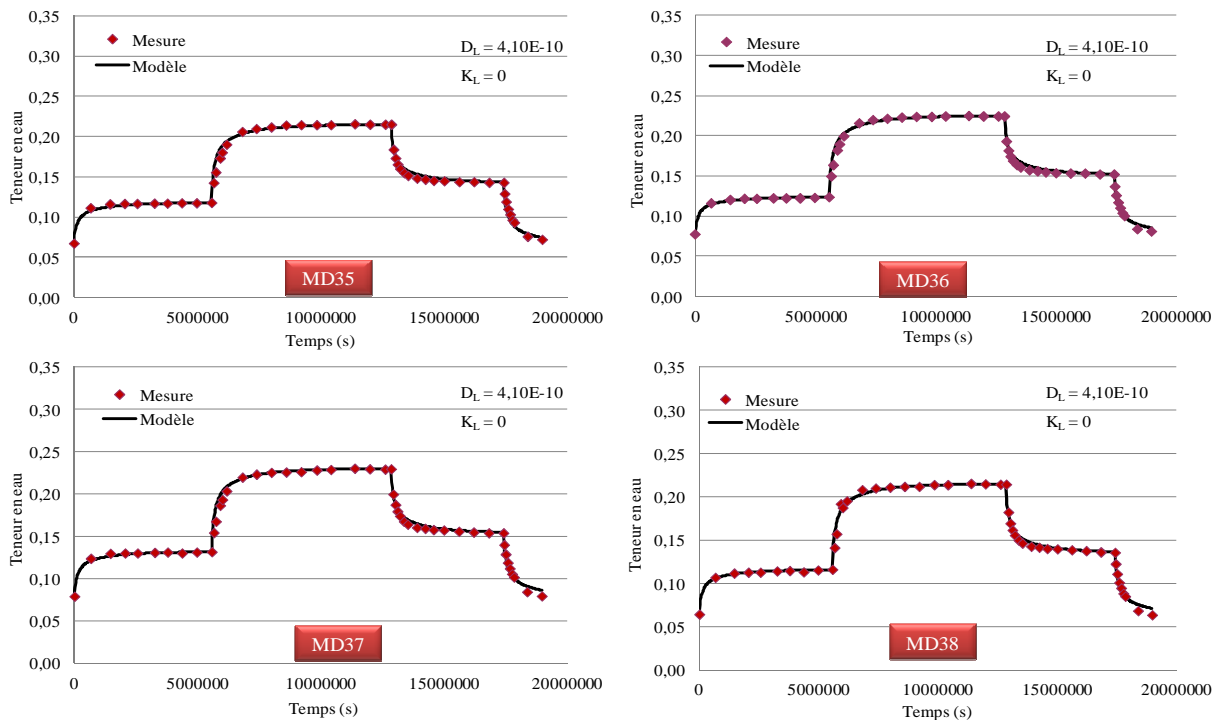
**Tableau B.3.16.** Valeurs des paramètres de diffusion par échantillon de 15x15x15 dans la direction transversale pour le Hêtre

Coef.	Hd11	Hd12	Hd13	Hd14	Hd15	Hd16	Hd17	Hd18	Hd19	Hd20	H48	Hd49	Moy.	ET
$K_T$	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,20E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	2,50E-01	<b>2,48E-01</b>	<b>8,66E-03</b>
$D_T$	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	8,00E-11	<b>8,00E-11</b>	<b>0</b>

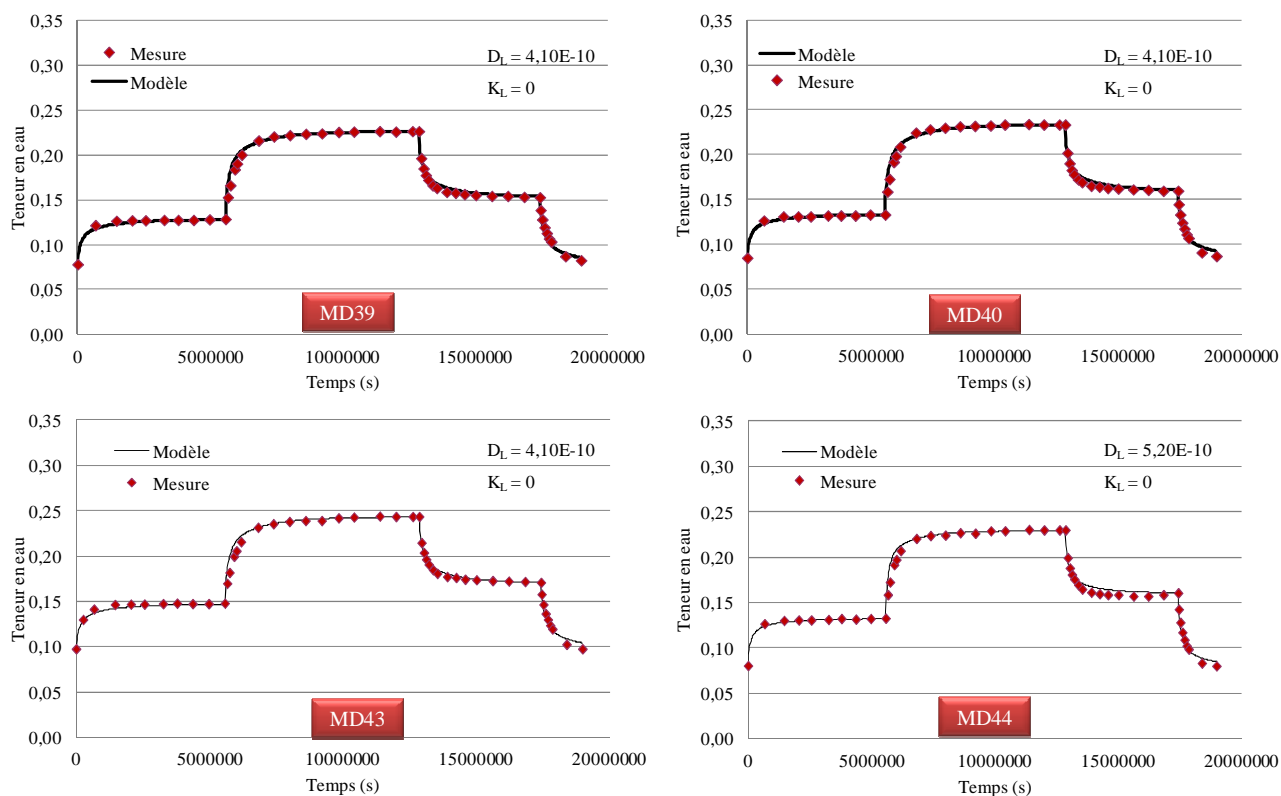
## B.3.2.3 Moabi

Direction longitudinale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)

**Figure B.3.25.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons MD31 à MD34 (30x30x30)



**Figure B.3.26.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons MD35 à MD38 (30x30x30)

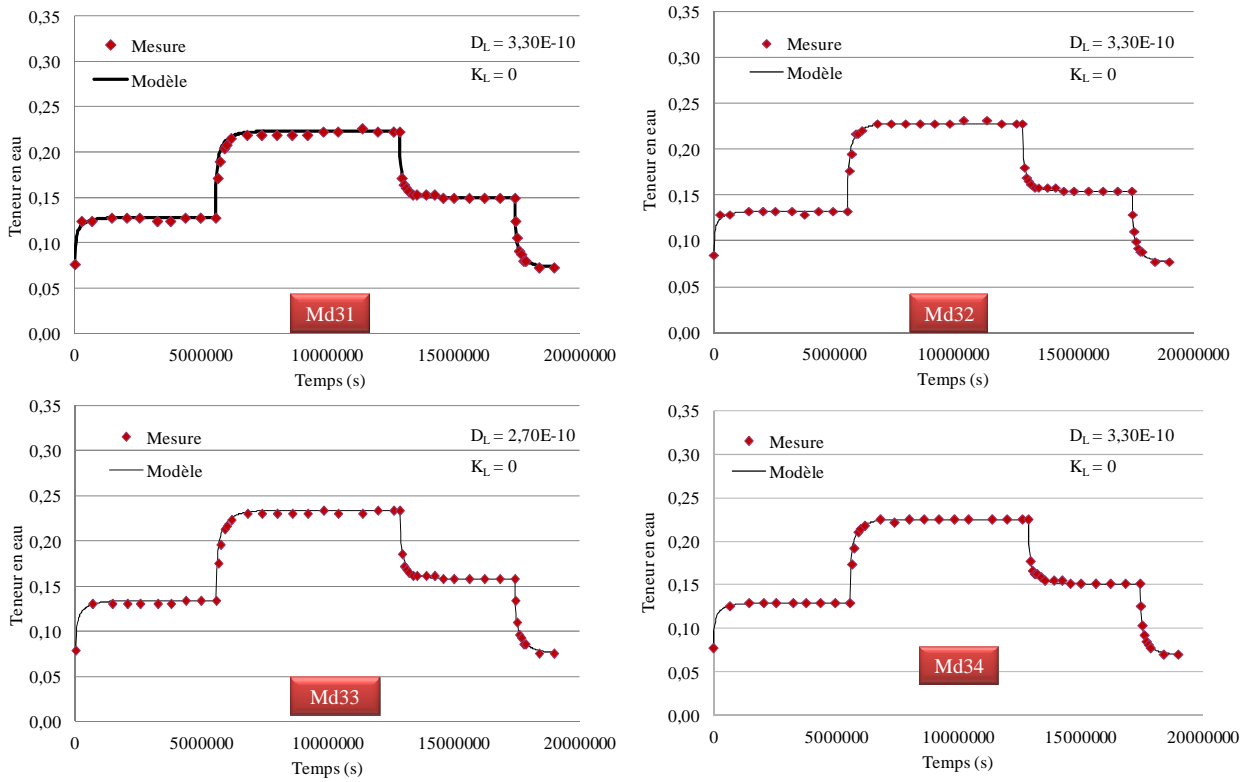


**Figure B.3.27.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons MD39, MD40, MD43 et MD44 (30x30x30)

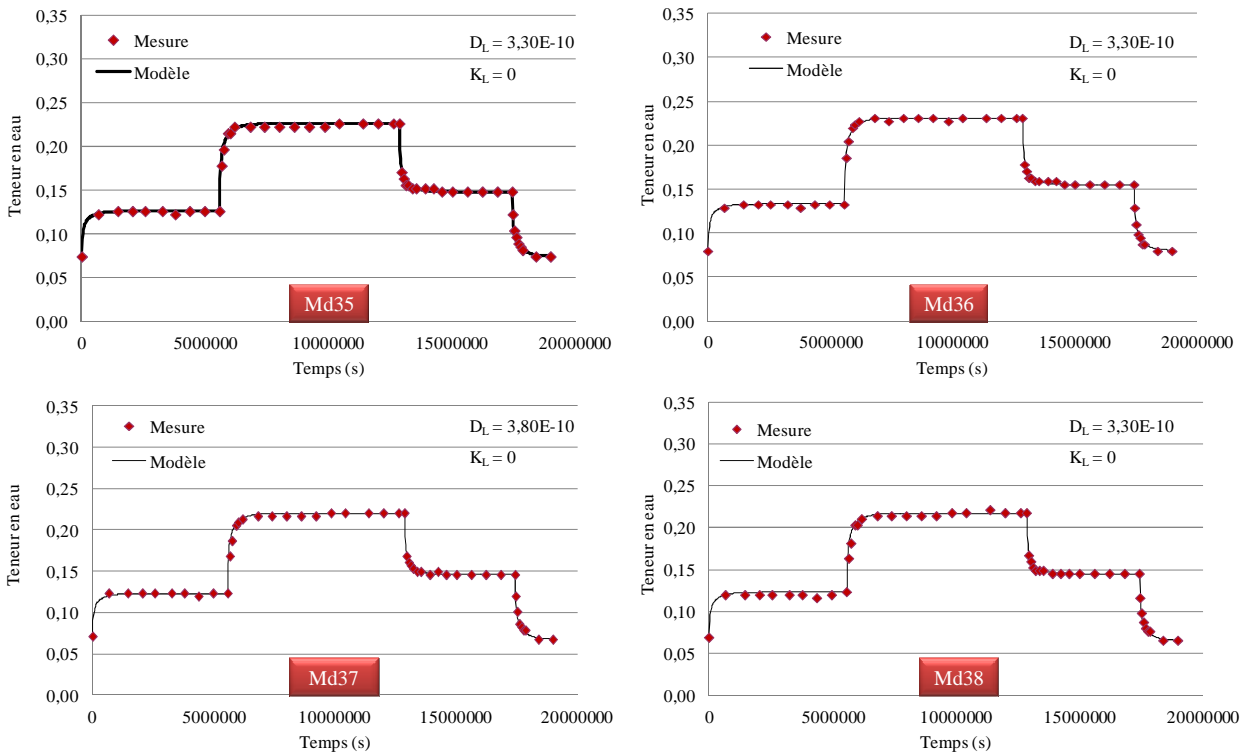
**Tableau B.3.17.** Valeurs des paramètres de diffusion longitudinale en 30 x 30 x 30 pour le Moabi

Coef.	MD31	MD32	MD33	MD34	MD35	MD36	MD37	MD38	MD39	MD40	MD43	MD44	Moy.	E.T.
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	4,1E-10	4,1E-10	5,7E-10	4,1E-10	4,1E-10	4,1E-10	4,1E-10	4,1E-10	4,1E-10	4,1E-10	4,1E-10	5,2E-10	4,33E-10	5,36E-11

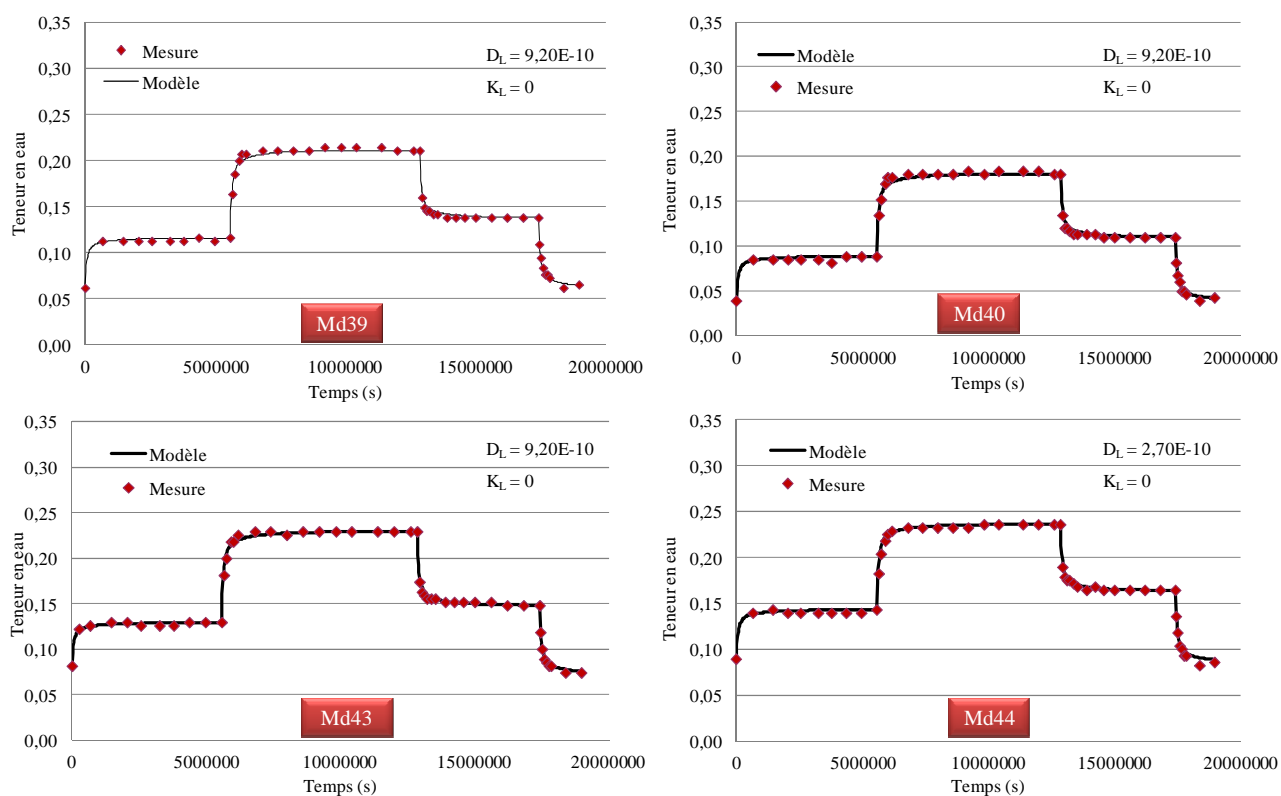
Direction longitudinale (cube de 15x15x15 mm<sup>3</sup>)



**Figure B.3.28.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Md31 à Md34



**Figure B.3.29.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Md35 à Md38

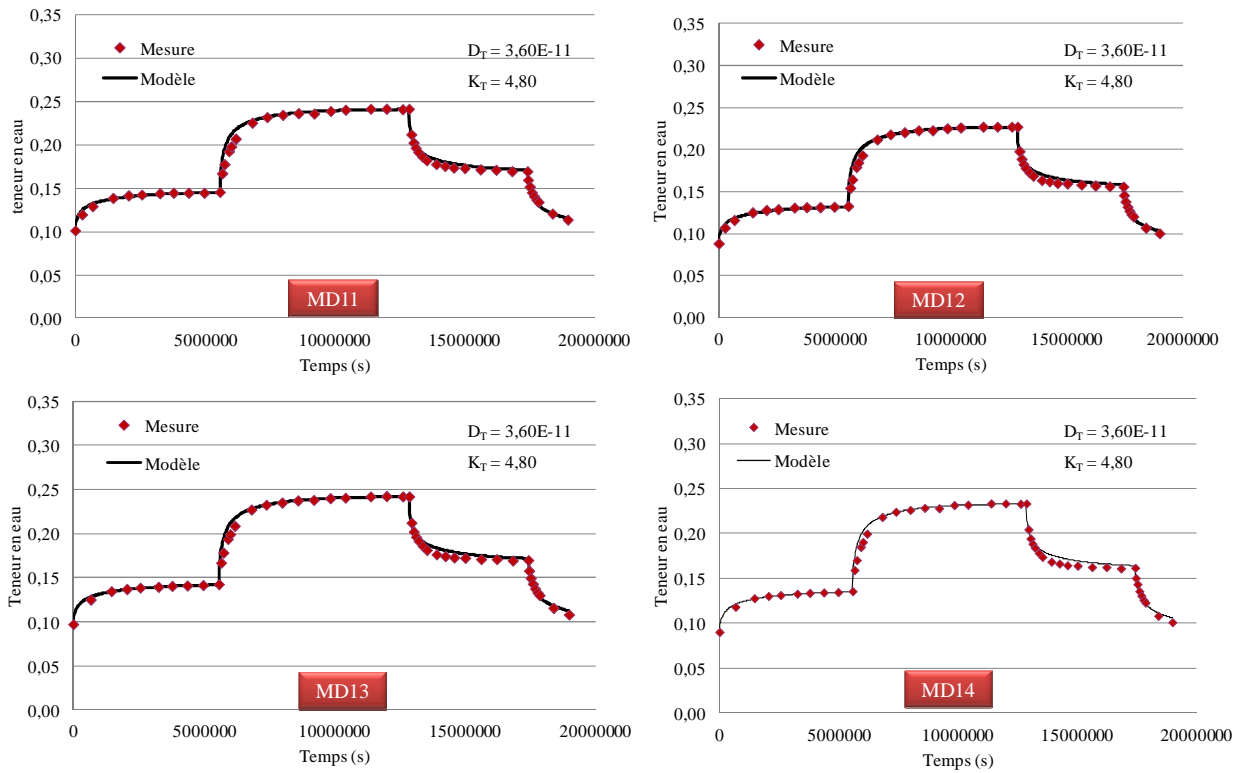


**Figure B.3.30.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Md39, Md40, Md43 et Md44

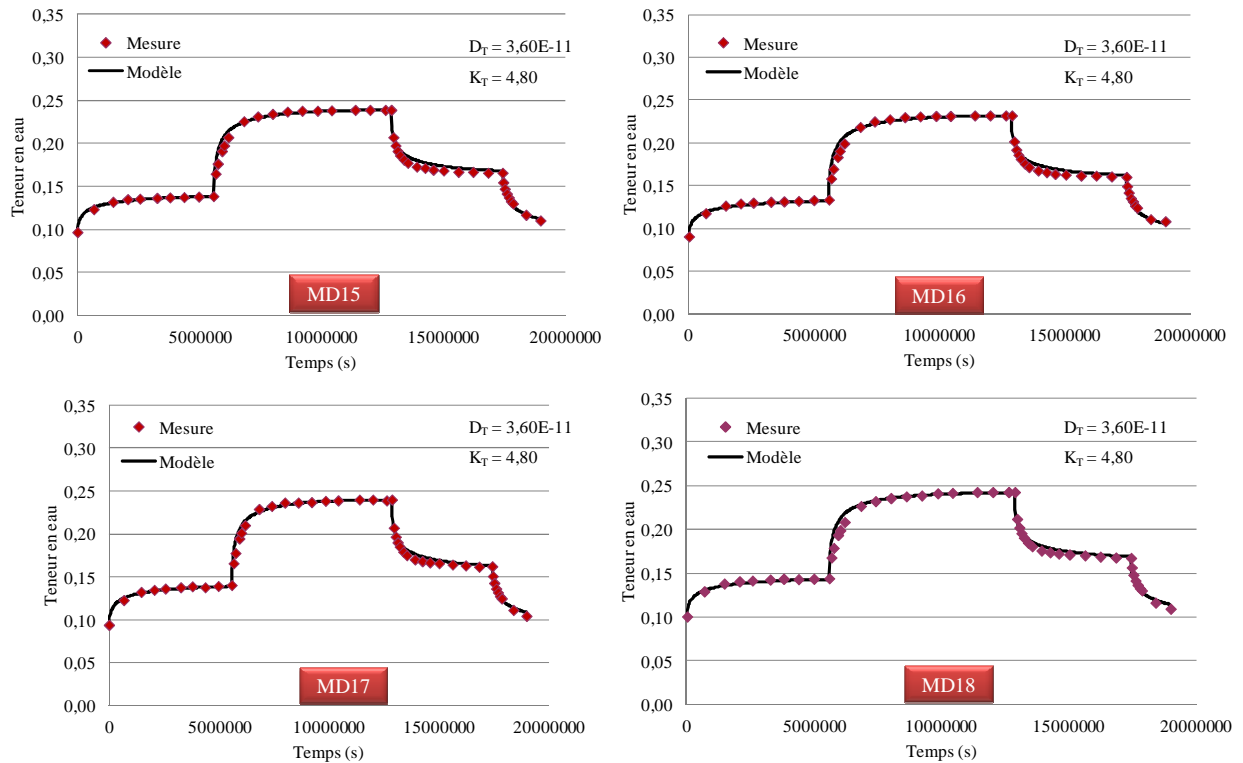
**Tableau B.3.18.** Valeurs des paramètres de diffusion longitudinale en 15 x 15 x 15 pour le Moabi

Coef.	Md31	Md32	Md33	Md34	Md35	Md36	Md37	Md38	Md39	Md40	Md43	Md44	Moy.	E.T.
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	3,3E-10	3,3E-10	2,7E-10	3,3E-10	3,3E-10	3,3E-10	3,3E-10	3,3E-10	9,2E-10	9,2E-10	9,2E-10	2,7E-10	4,68E-10	2,74E-10

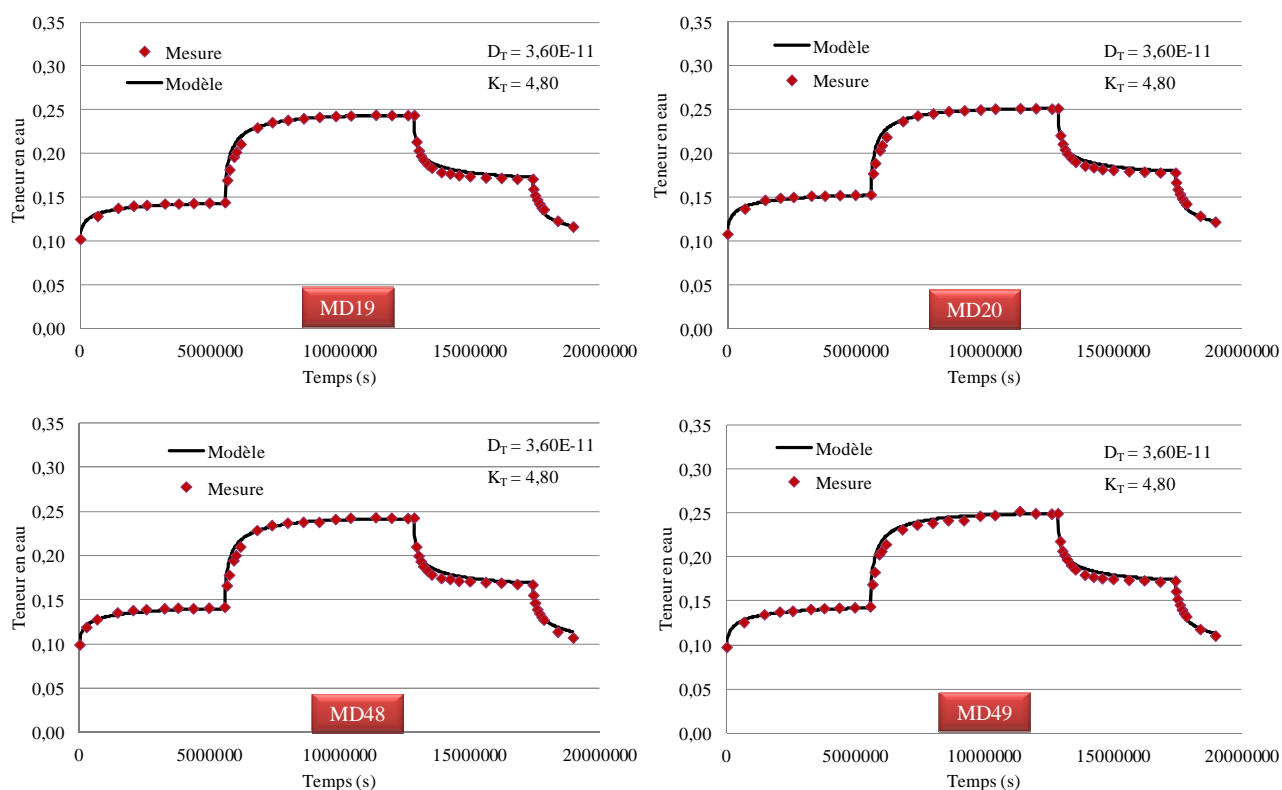
Direction transversale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)



**Figure B.3.31.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons MD11 à MD14



**Figure B.3.32.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons MD15 à MD18

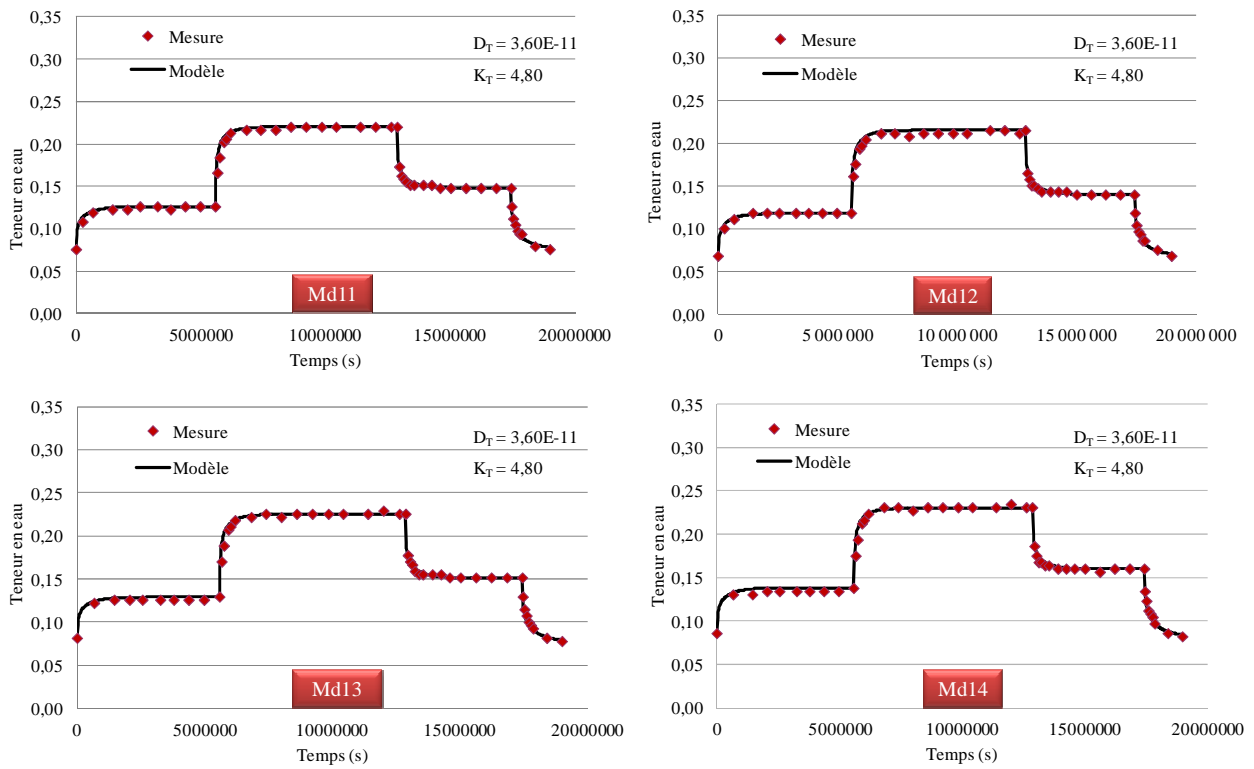


**Figure B.3.33.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons MD19, MD20, MD48 et MD49

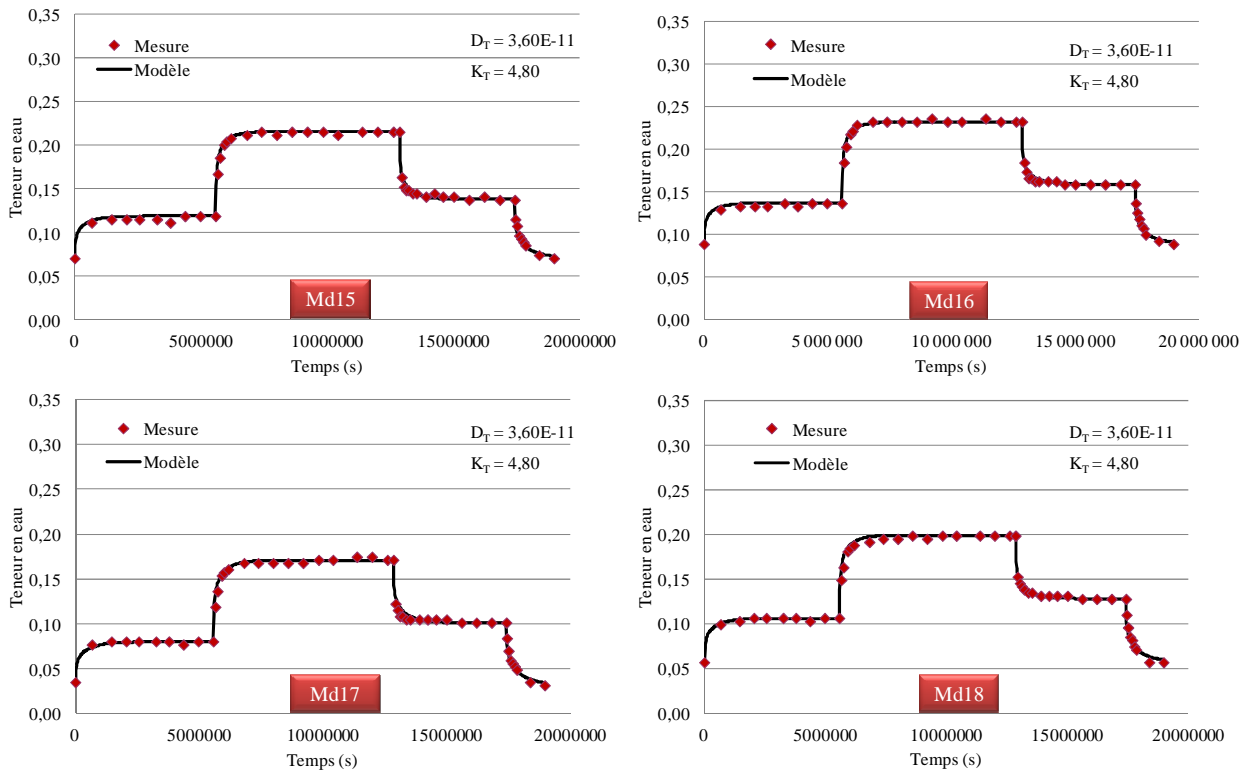
**Tableau B.3.19.** Valeurs des paramètres de diffusion transversale en 30 x 30 x 30 pour le Moabi

Coef.	MD11	MD12	MD13	MD14	MD15	MD16	MD17	MD18	MD19	MD20	MD48	MD49	Moy.	E.T.
$K_T$	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	<b>4,80</b>	<b>0</b>
$D_T$	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	<b>3,60E-11</b>	<b>0</b>

### Direction transversale (cube de $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$ )

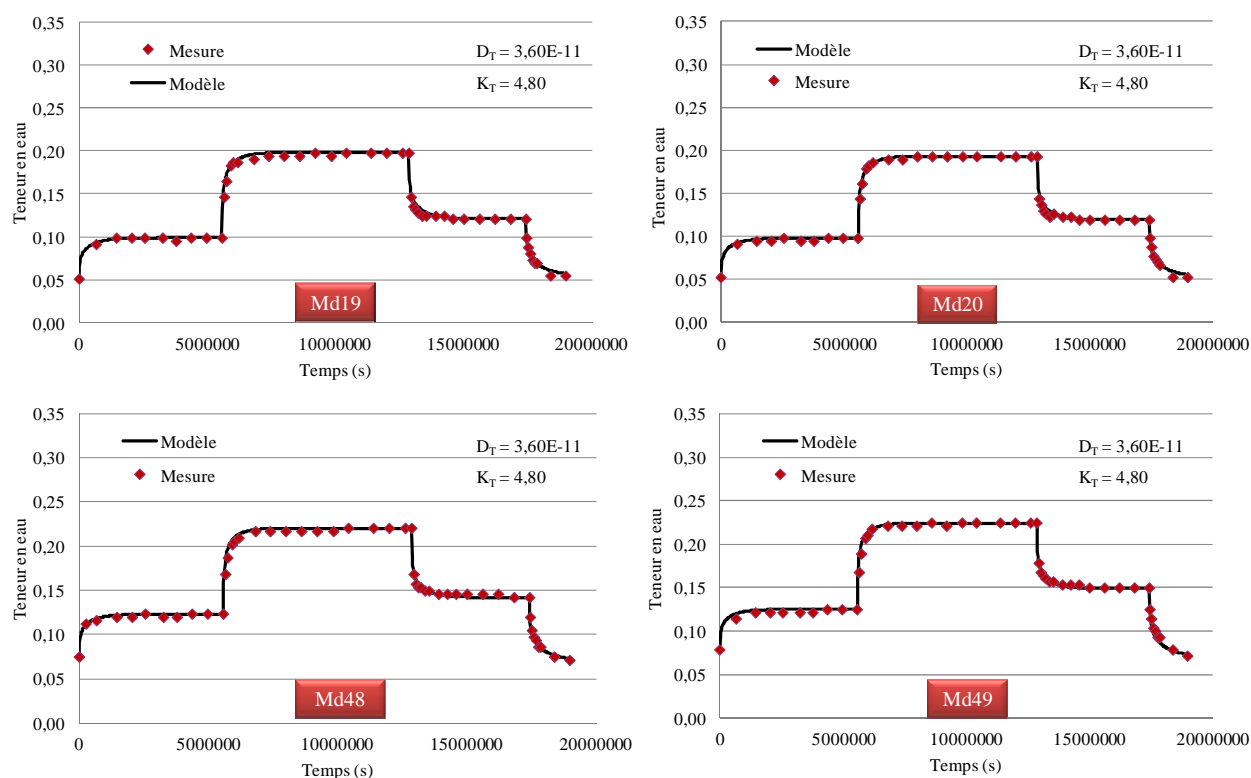


**Figure B.3.34.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Md11 à Md14



**Figure B.3.35.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Md15 à Md18



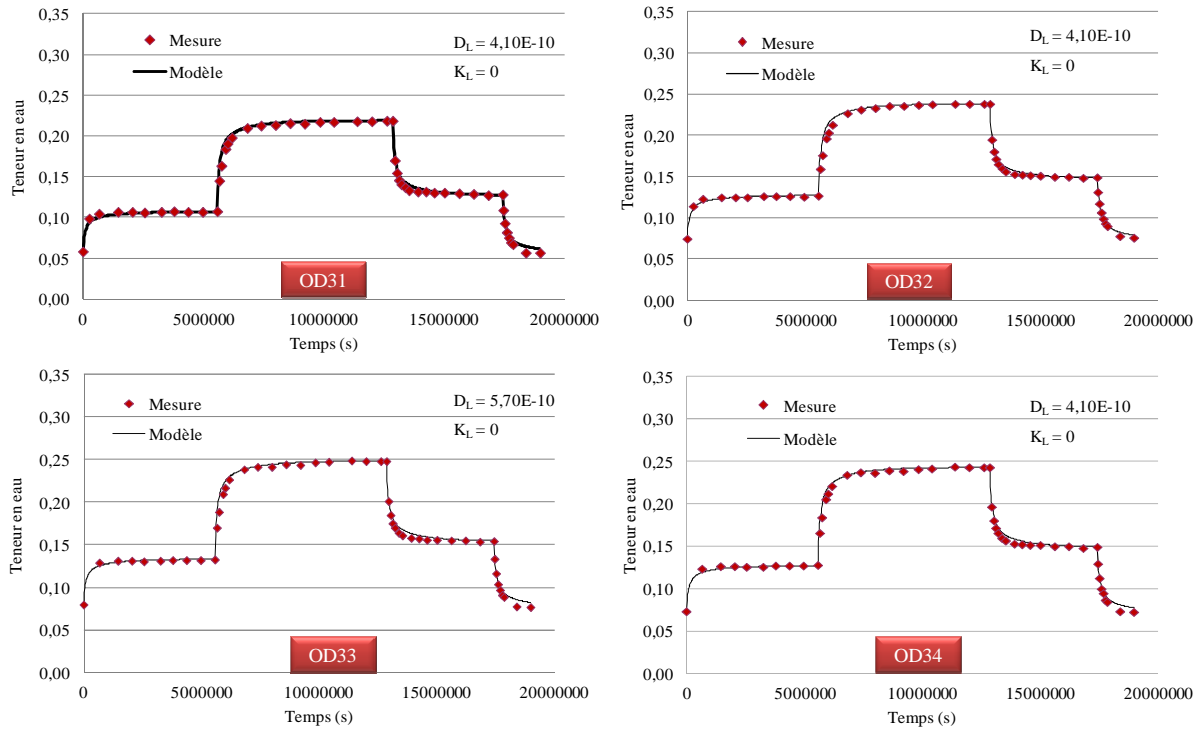


**Figure B.3.36.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Md19, Md20, Md48 et Md49

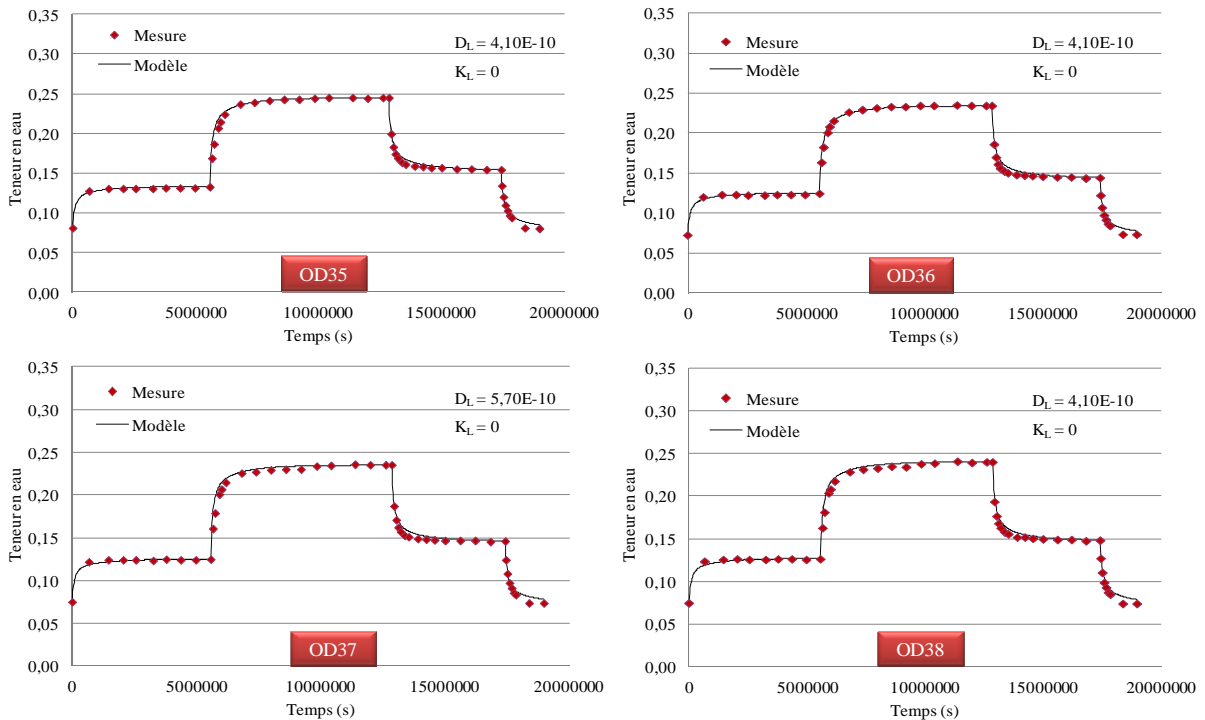
**Tableau B.3.20.** Valeurs des paramètres de diffusion transversale en 15 x 15 x 15 pour le Moabi

Coef.	Md11	Md12	Md13	Md14	Md15	Md16	Md17	Md18	Md19	Md20	Md48	Md49	Moy.	E.T.
$K_T$	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80E+00	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	<b>4,80</b>	<b>0</b>
$D_T$	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	3,60E-11	<b>3,60E-11</b>	<b>0</b>

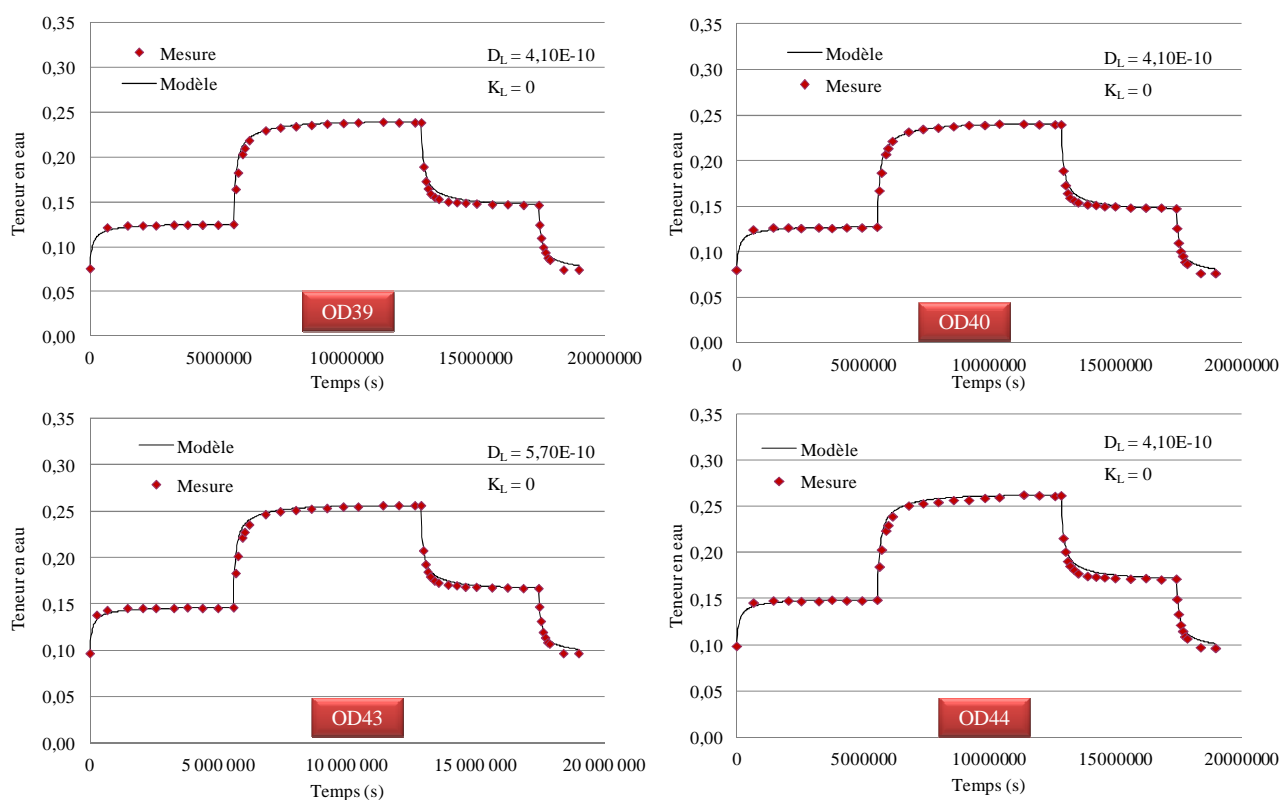
## B.3.2.4 Ozigo

Direction longitudinale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)

**Figure B.3.37.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons OD31 à OD34 (30x30x30)



**Figure B.3.38.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons OD35 à OD38 (30x30x30)

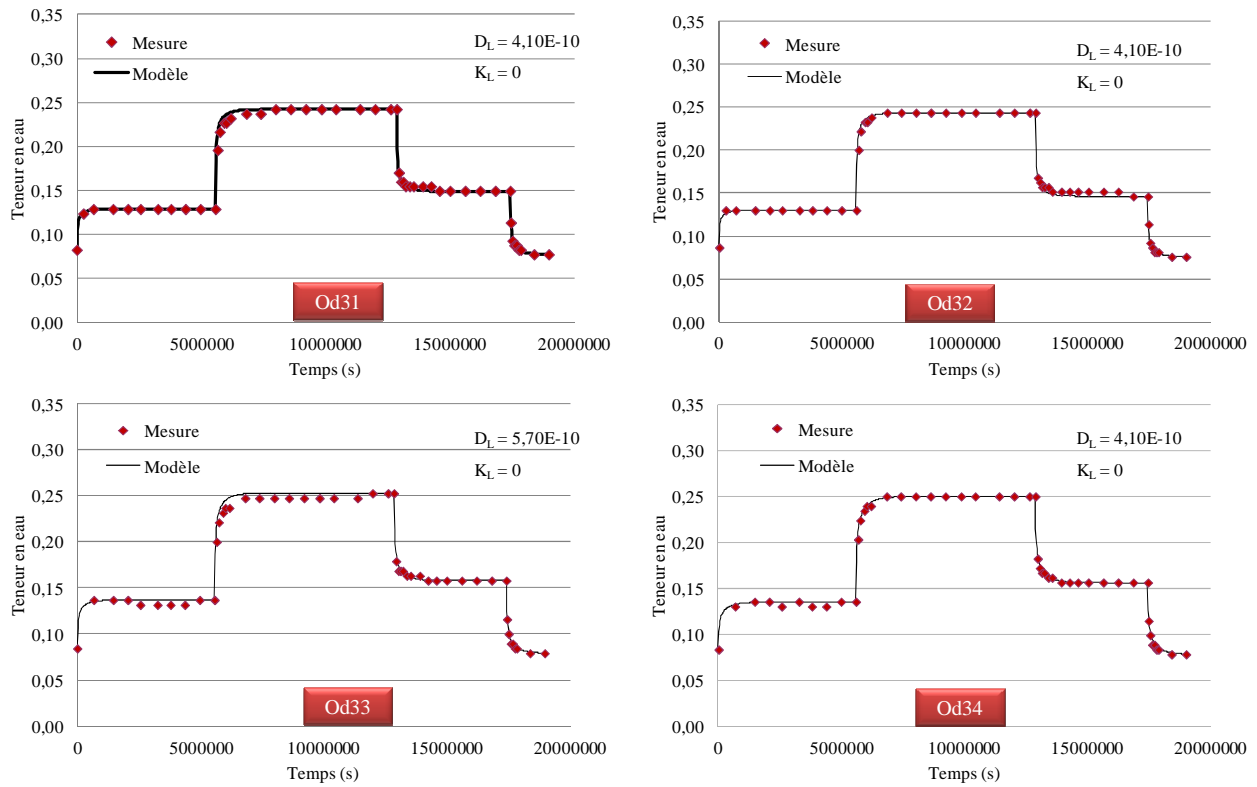


**Figure B.3.39.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons OD39, OD40, OD43 et OD44 (30x30x30)

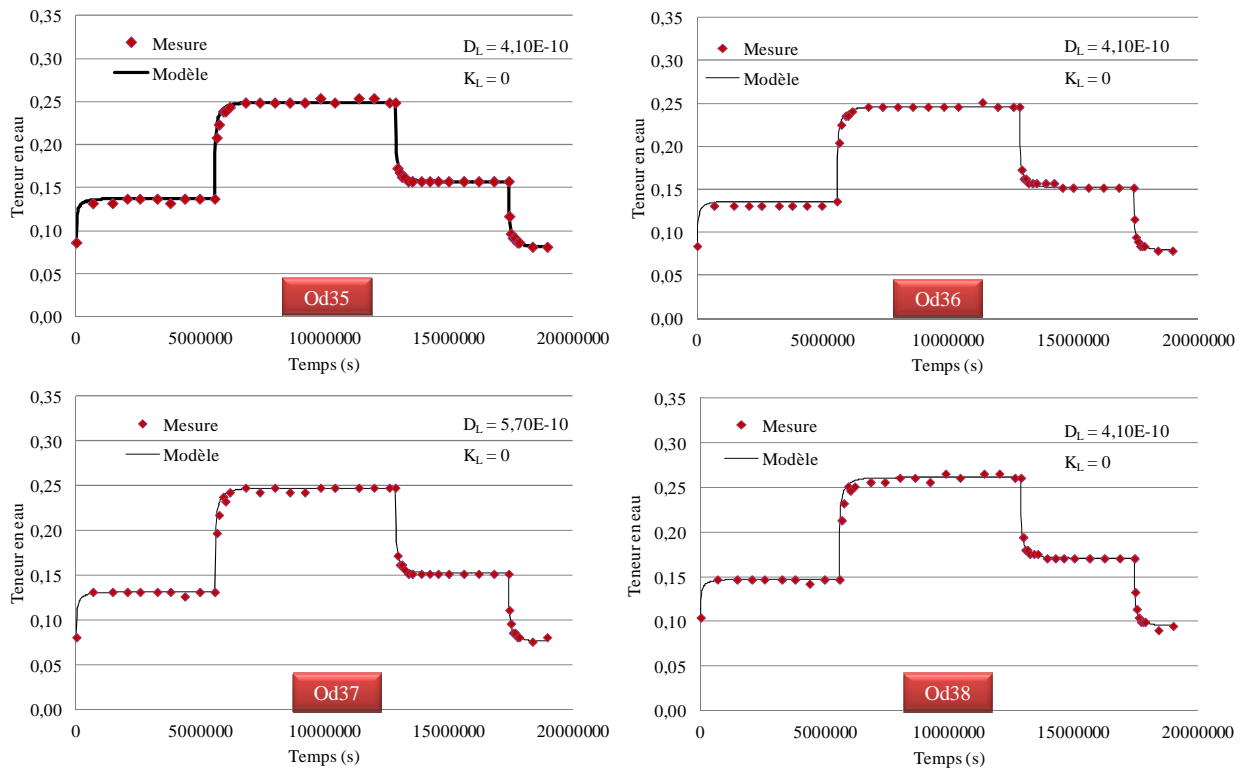
**Tableau B.3.21.** Valeurs des paramètres de diffusion longitudinale en 30 x 30 x 30 pour l'Ozigo

Coef.	OD31	OD32	OD33	OD34	OD35	OD36	OD37	OD38	OD39	OD40	OD43	OD44	Moy.	E.T.
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	5,9E-10	5,6E-10	5,6E-10	5,6E-10	5,6E-10	5,6E-10	6,2E-10	5,6E-10	5,6E-10	5,6E-10	6,2E-10	5,6E-10	5,73E-10	2,38E-11

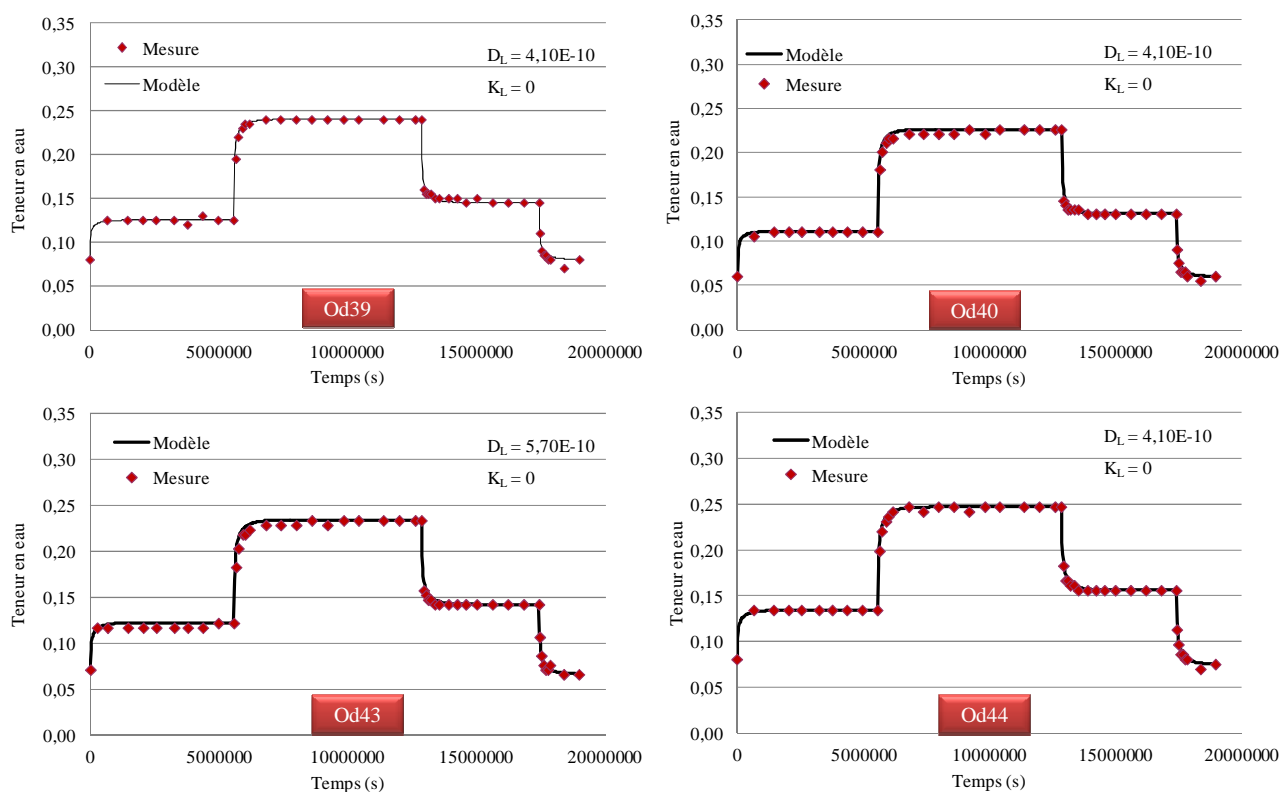
### Direction longitudinale (cube de $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$ )



**Figure B.3.40.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Od31 à Od34



**Figure B.3.41.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Od35 à Od38

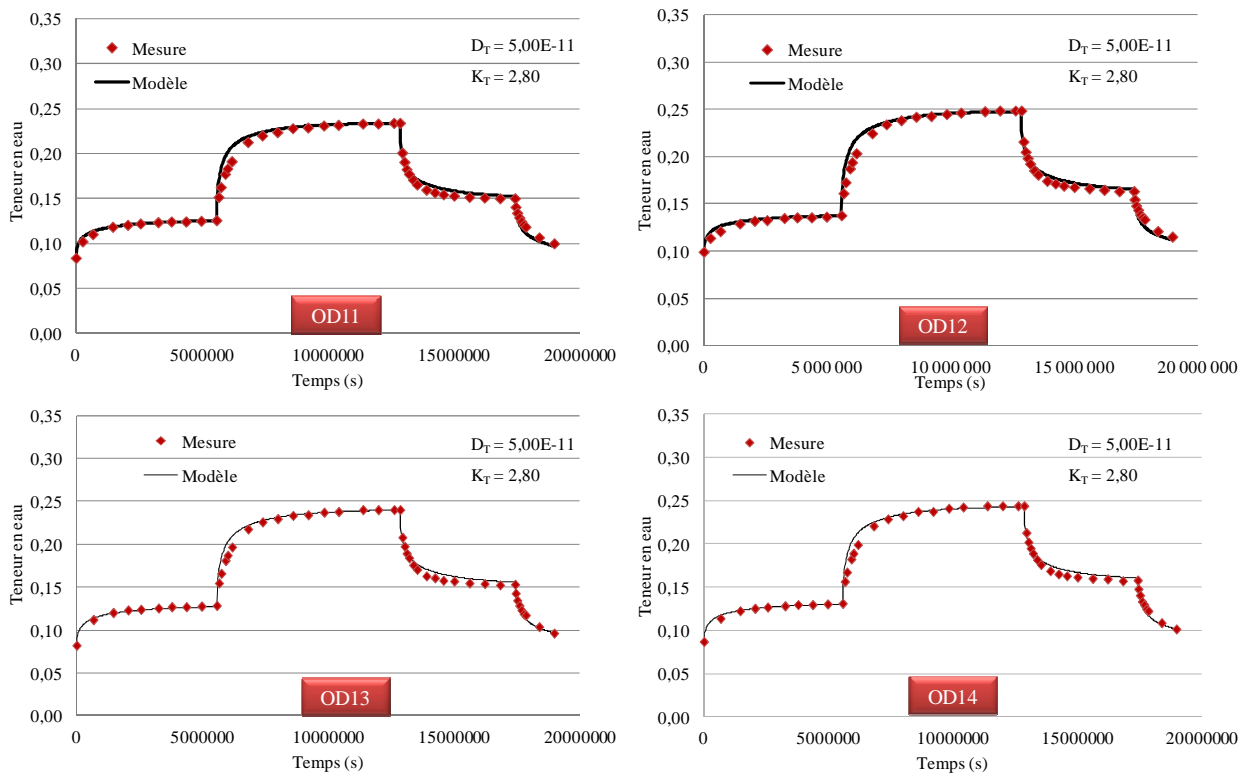


**Figure B.3.42.** Cinétique de diffusion longitudinale pour les échantillons Od39, Od40, Od43 et Od44

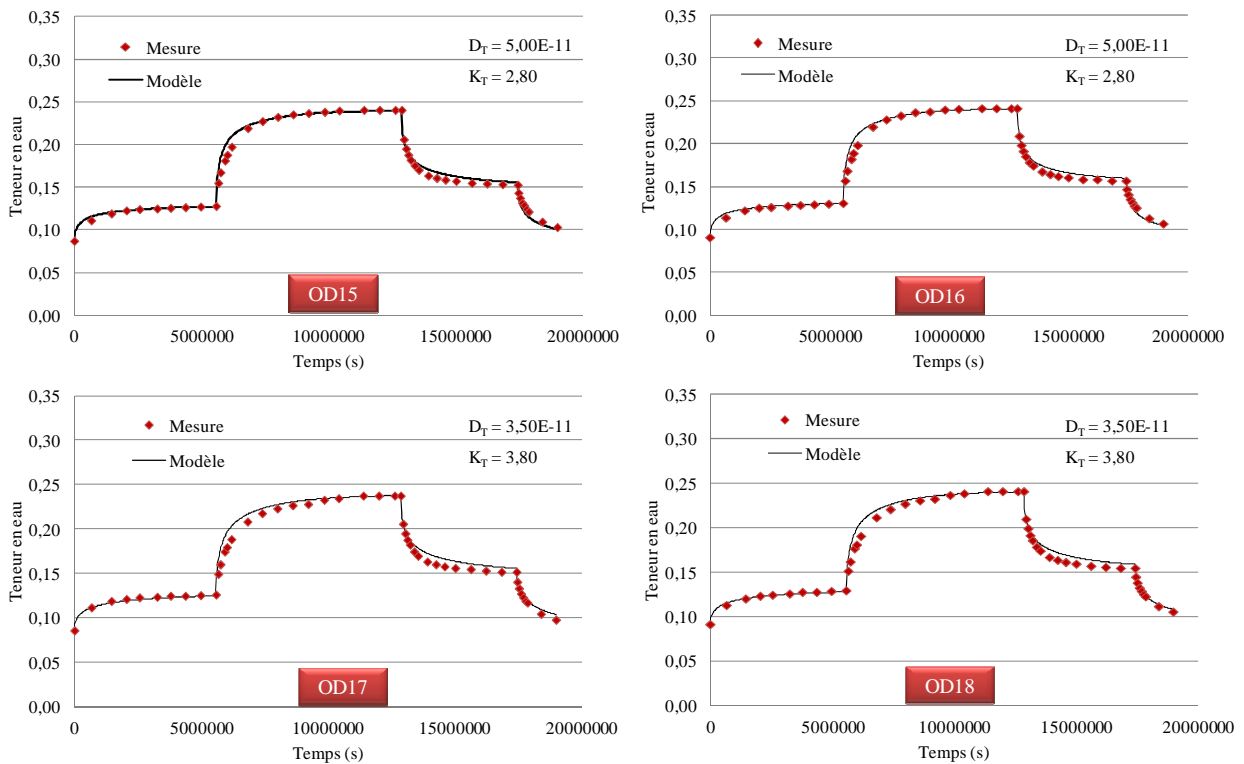
**Tableau B.3.22.** Valeurs des paramètres de diffusion longitudinale en 15 x 15 x 15 pour l'Ozigo

Coef.	Od31	Od32	Od33	Od34	Od35	Od36	Od37	Od38	Od39	Od40	Od43	Od44	Moy.	E.T.
$K_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_L$	5,6E-10	5,6E-10	3,4E-10	3,4E-10	5,6E-10	5,4E-10	5,4E-10	5,4E-10	5,4E-10	5,4E-10	4,4E-10	4,4E-10	4,95E-10	8,36E-11

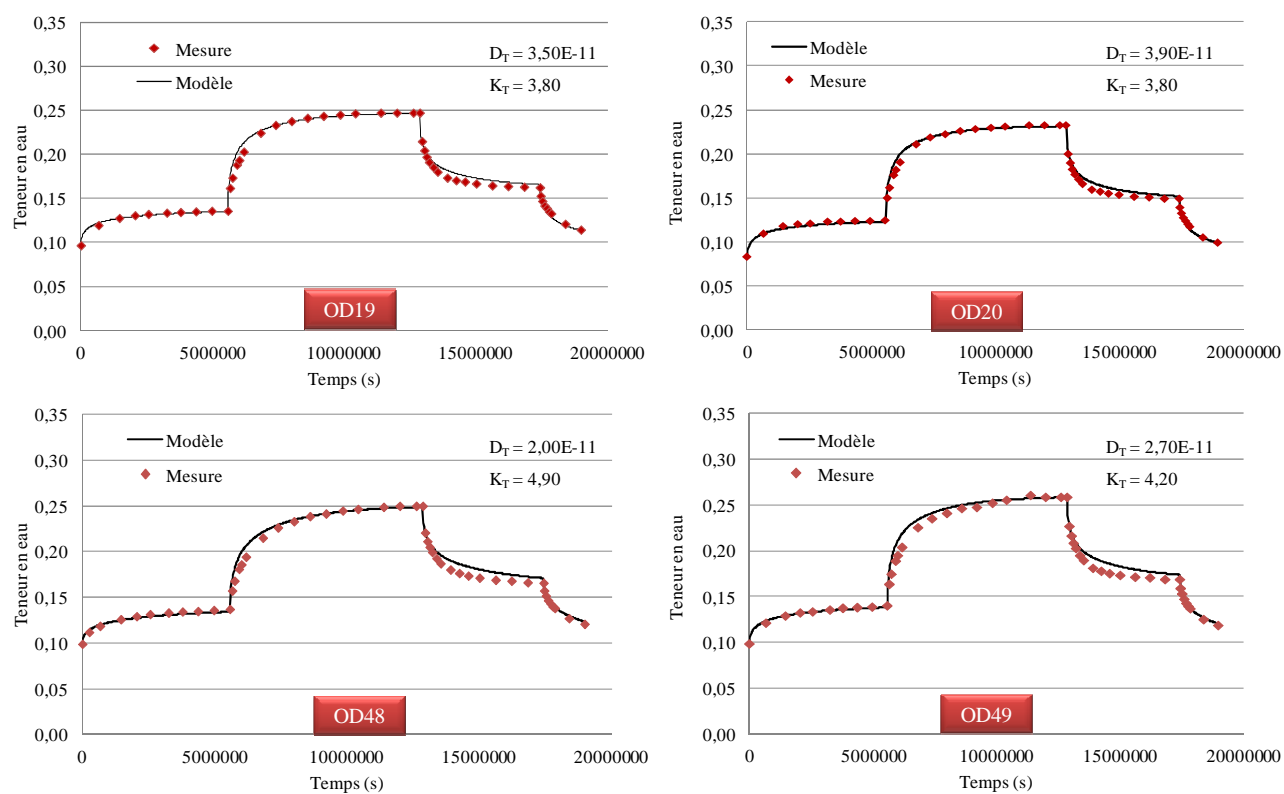
Direction transversale (cube de 30x30x30 mm<sup>3</sup>)



**Figure B.3.43.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons OD11 à OD14



**Figure B.3.44.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons OD15 à OD18

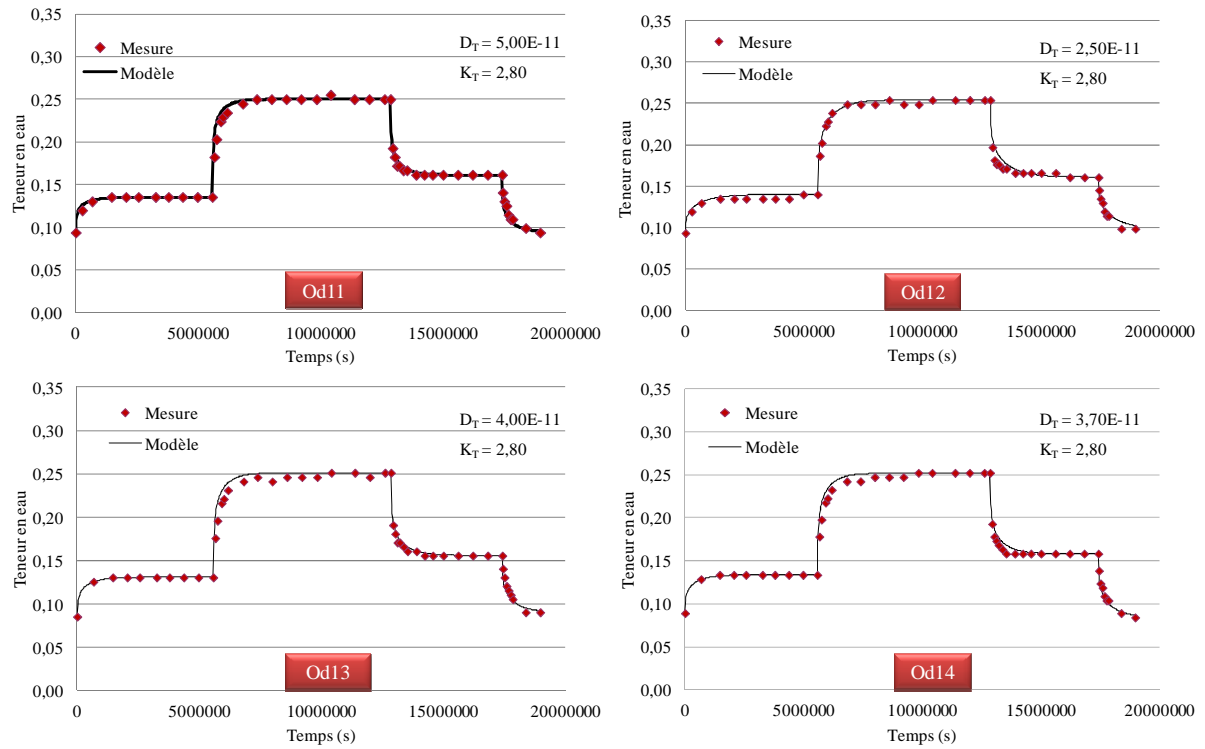


**Figure B.3.45.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons OD19, OD20, OD48 et OD49

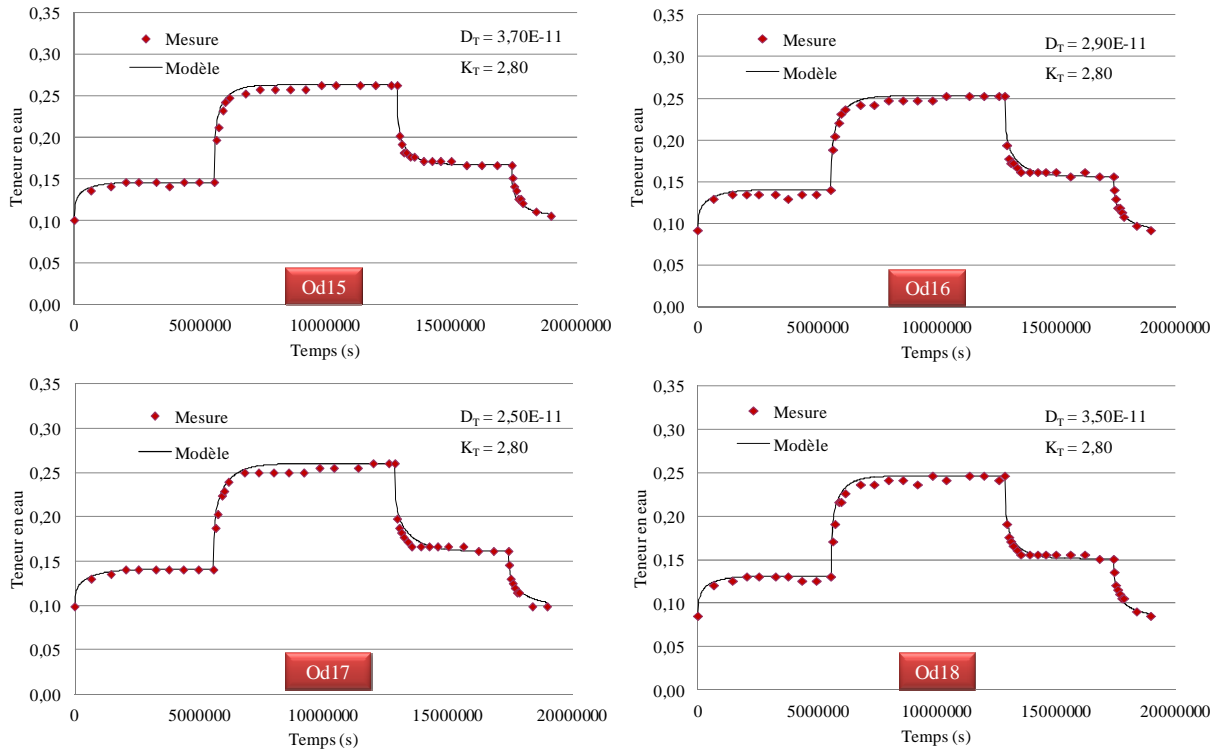
**Tableau B.3.23.** Valeurs des paramètres de diffusion transversale en 30 x 30 x 30 pour l'Ozigo

Coef.	OD11	OD12	OD13	OD14	OD15	OD16	OD17	OD18	OD19	OD20	OD48	OD49	Moy.	E.T.
$K_T$	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	3,80	3,80	3,80	3,80	4,90	4,20	<b>3,43</b>	<b>6,88E-01</b>
$D_T$	5,00E-11	5,00E-11	5,00E-11	5,00E-11	5,00E-11	5,00E-11	3,50E-11	3,50E-11	3,50E-11	3,90E-11	2,00E-11	2,70E-11	<b>4,09E-11</b>	<b>1,01E-11</b>

Direction transversale (cube de 15x15x15 mm<sup>3</sup>)

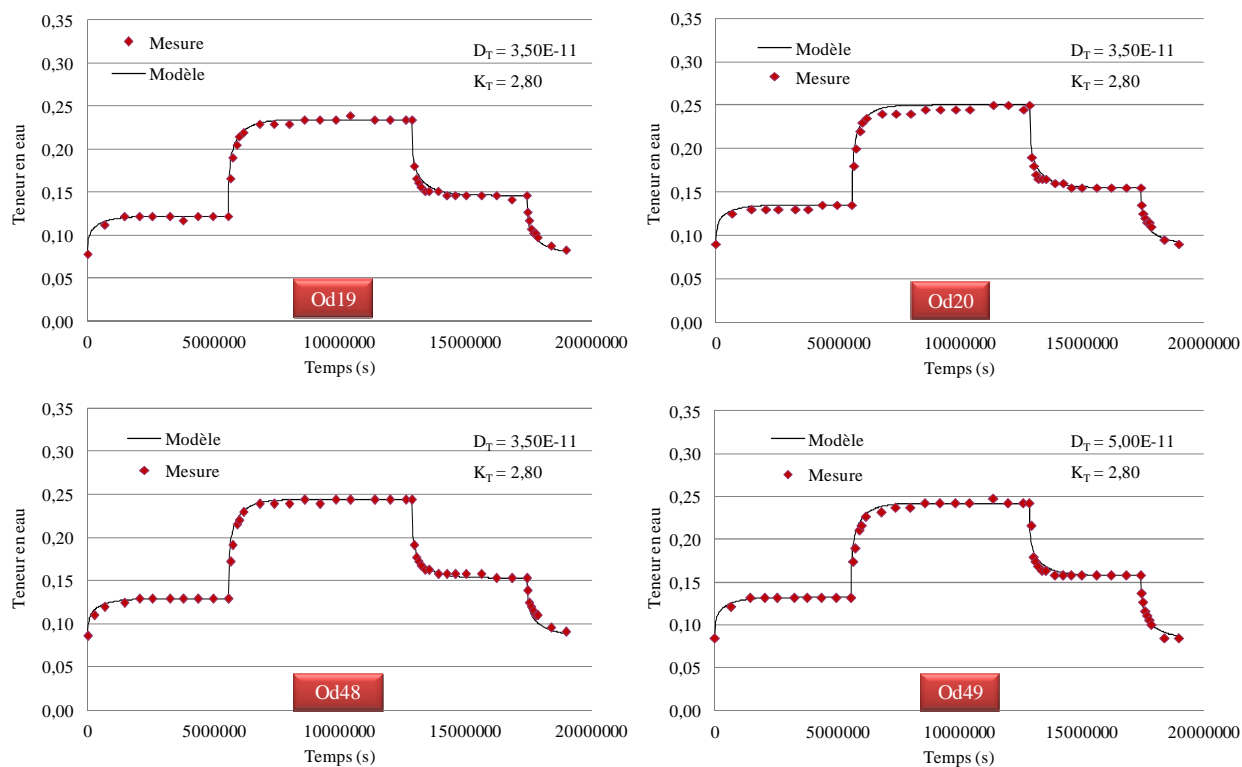


**Figure B.3.46.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Od11 à Od14



**Figure B.3.47.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Od15 à Od18





**Figure B.3.48.** Cinétique de diffusion transversale pour les échantillons Od19, Od20, Od48 et Od49

**Tableau B.3.24.** Valeurs des paramètres de diffusion transversale en 15x15x15 pour l'Ozigo

Coef.	OD11	OD12	OD13	OD14	OD15	OD16	OD17	OD18	OD19	OD20	OD48	OD49	Moy.	E.T.
$K_T$	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	<b>2,80</b>	<b>0</b>
$D_T$	5,00E-11	2,50E-11	4,00E-11	3,70E-11	3,70E-11	2,90E-11	2,50E-11	3,50E-11	3,50E-11	3,50E-11	3,50E-11	5,00E-11	<b>3,61E-11</b>	<b>7,66E-12</b>



## ANNEXES C

*Caractérisation des propriétés viscoélastiques en flexion : Moabi et Ozigo*



## C.1 Evolution générale des flèches

Evolution temporelle des déplacements, en faces supérieure et inférieure de chaque poutre, dès chargement mécanique sous basse humidité relative (40%).

### C.1.1 Moabi

#### Flèches en face supérieure

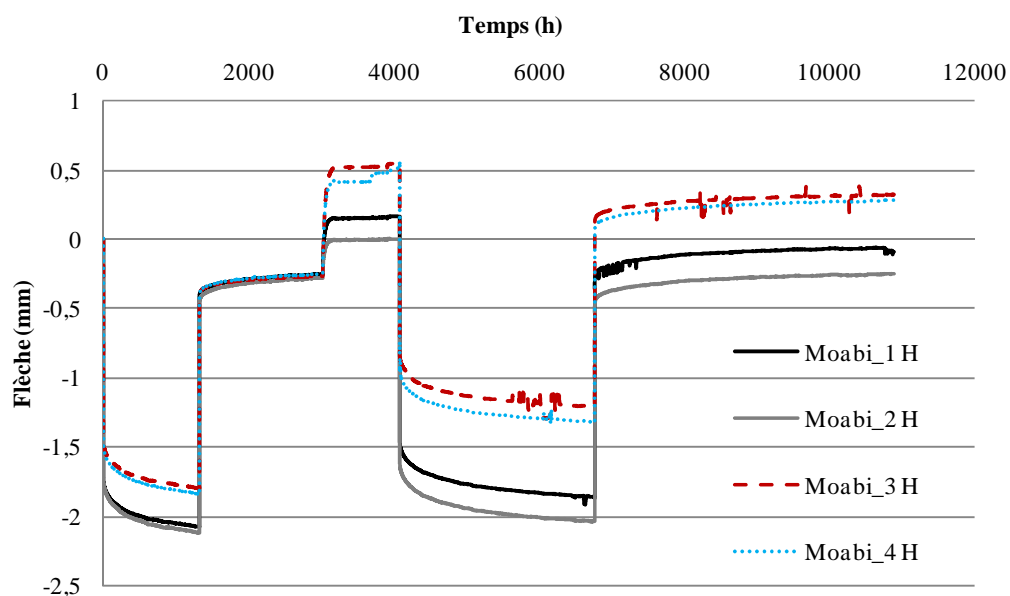


Figure C.1.1. Evolution de la flèche en face supérieure

#### Flèches en face inférieure

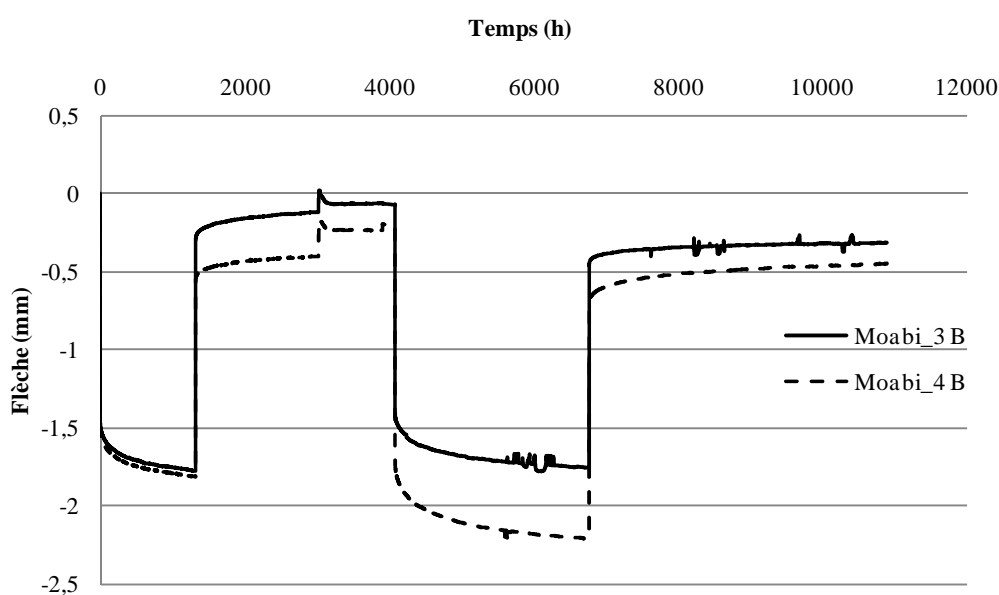
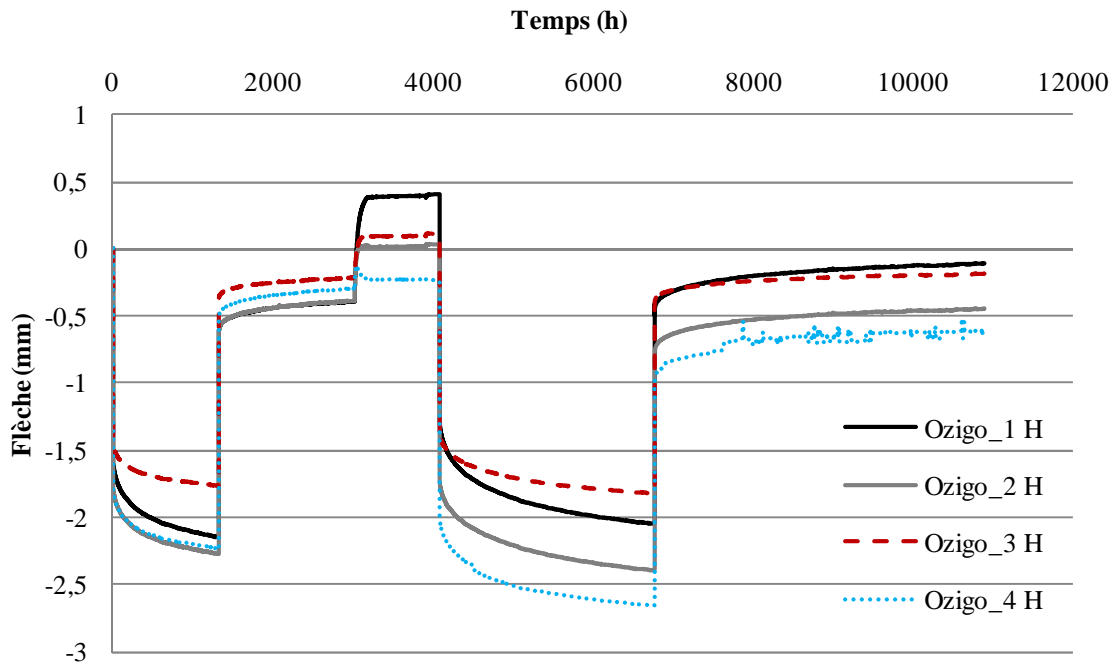


Figure C.1.2. Evolution de la flèche en face inférieure

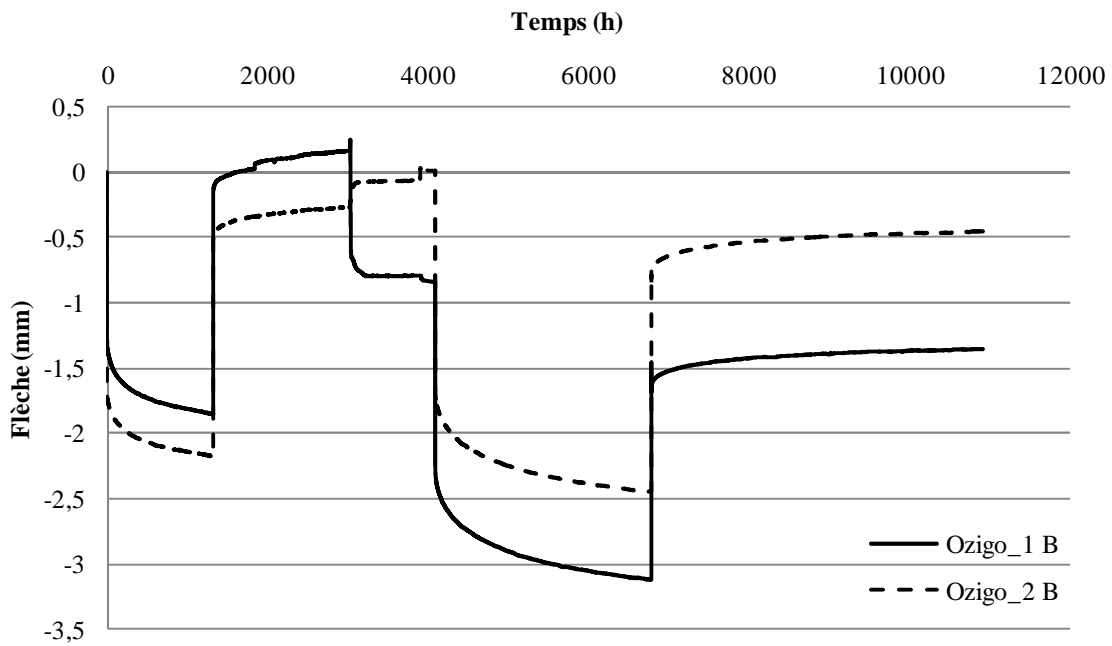
### C.1.2 Ozigo

#### Flèches en face supérieure



**Figure C.1.3.** Evolution de la flèche en face supérieure

#### Flèches en face inférieure



**Figure C.1.4.** Evolution de la flèche en face inférieure

## C.2 Modélisation du fluage-recouvrance sous basse humidité

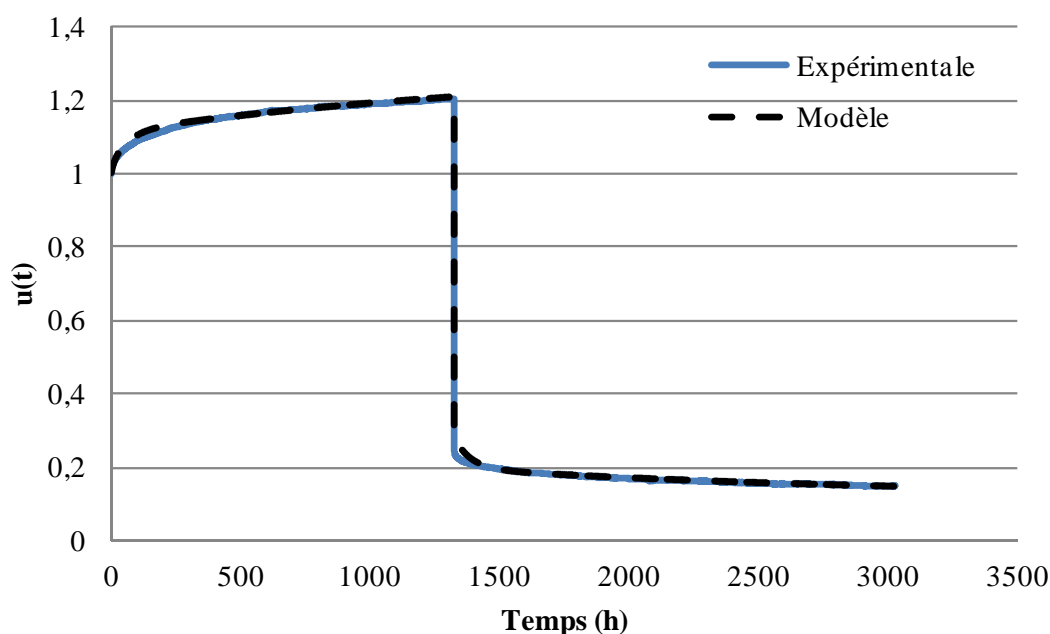
Conformément à la section IV.5.6.3, on modélise l'ensemble des courbes expérimentales de fluage-recouvrance obtenues, sous basse humidité relative (40%).

### C.2.1 Moabi

#### Poutre 1

**Tableau C.2.1.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,10	3,19E-03	1,11E-01	9,12E-01	1,75E-02
168			1,58E-02		8,40E-02
4320			6,16E-04		1,47E-01
87600			3,04E-05		1,45E-01

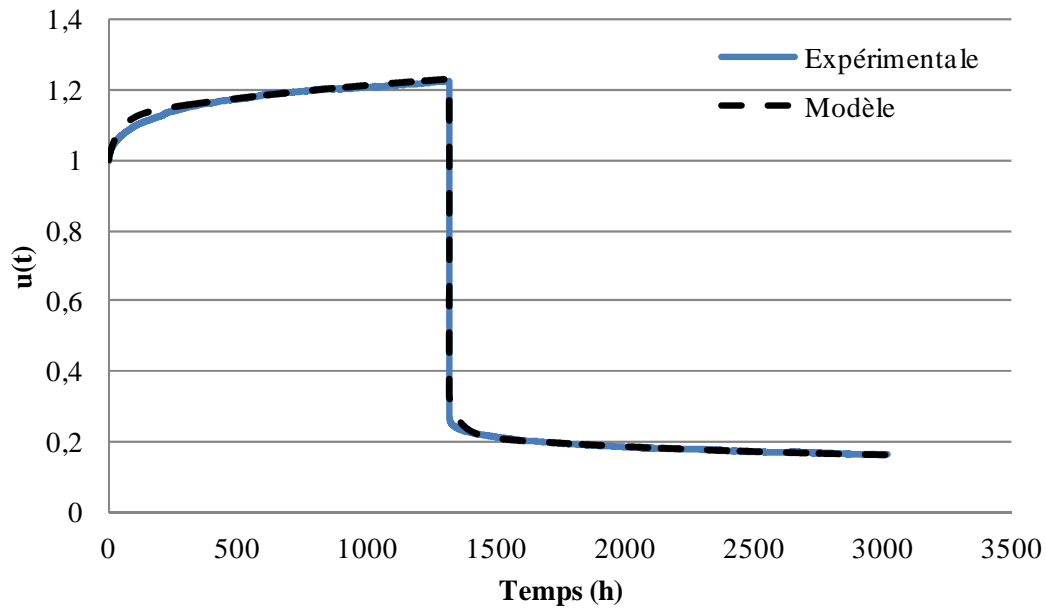


**Figure C.2.1.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_1

#### Poutre 2

**Tableau C.2.2.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,11	3,74E-03	1,46E-01	9,00E-01	1,14E-02
168			2,09E-02		9,76E-02
4320			8,12E-04		1,22E-01
87600			4,00E-05		3,15E-01



**Figure C.2.2.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_2

Poutre 3

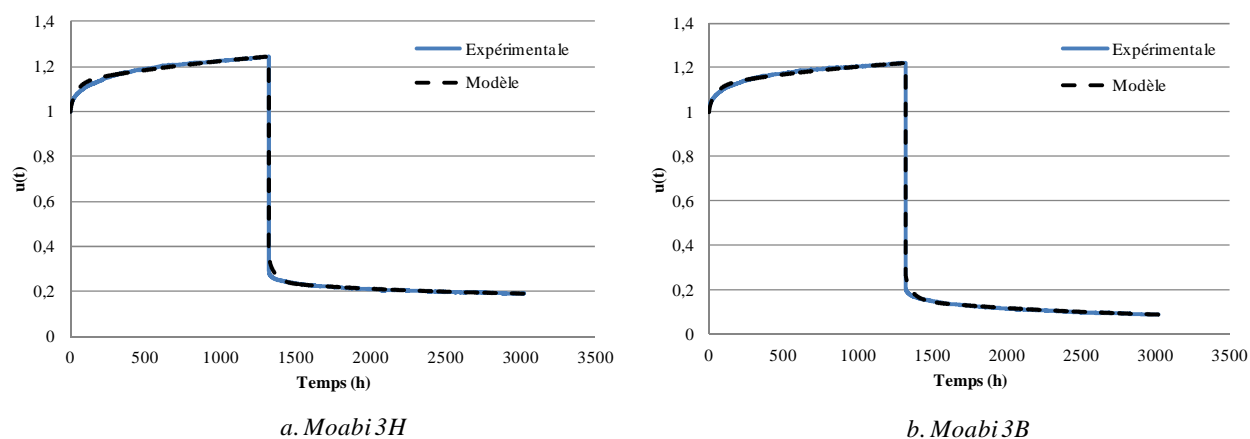
**Tableau C.2.3.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Moabi 3H)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,13	3,78E-03	1,46E-01	8,88E-01	1,95E-02
168			2,09E-02		9,64E-02
4320			8,12E-04		1,15E-01
87600			4,00E-05		5,19E-01

**Tableau C.2.4.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Moabi 3B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,05	3,23E-03	1,25E-01	9,54E-01	2,31E-02
168			1,78E-02		9,20E-02
4320			6,93E-04		1,60E-01
87600			3,42E-05		0





**Figure C.2.3.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_3

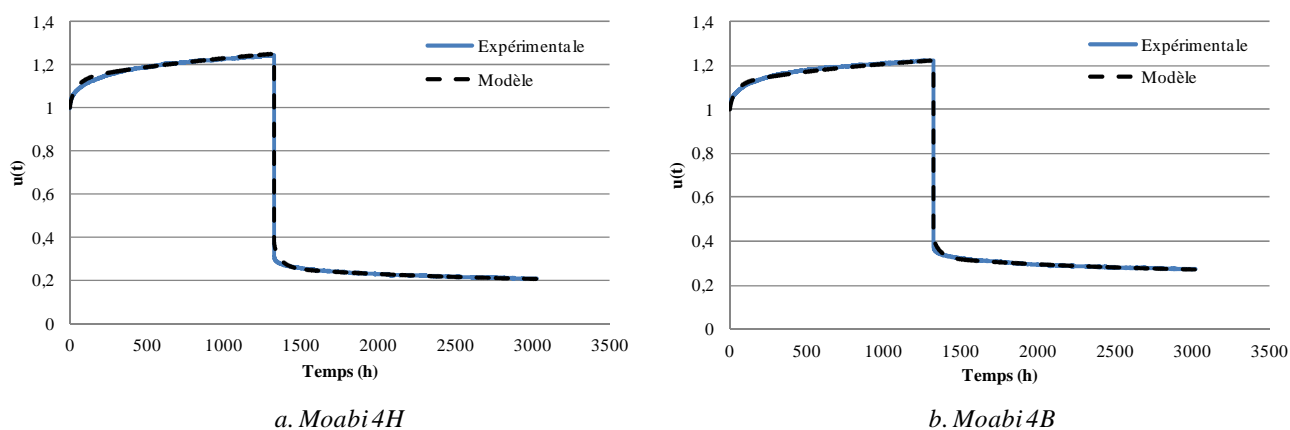
#### Poutre 4

**Tableau C.2.5.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Moabi 4H)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,15	3,48E-03	1,46E-01	8,72E-01	2,13E-02
168			2,09E-02		9,28E-02
4320			8,12E-04		1,21E-01
87600			4,00E-05		4,49E-01

**Tableau C.2.6.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Moabi 4B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,24	3,05E-03	1,46E-01	8,04E-01	1,74E-02
168			2,09E-02		7,89E-02
4320			8,12E-04		1,27E-01
87600			4,00E-05		0



**Figure C.2.4.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_4

## C.2.2 Ozigo

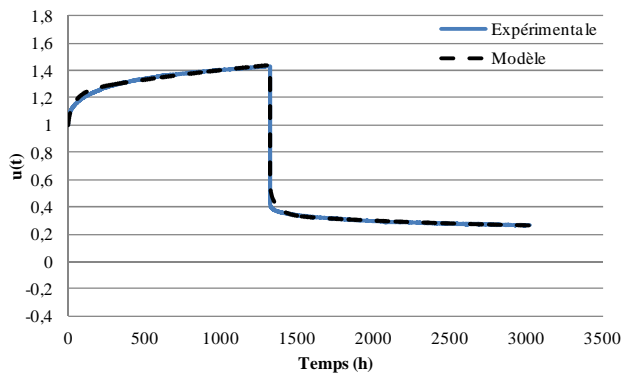
### Poutre 1

**Tableau C.2.7.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Ozigo\_1H)

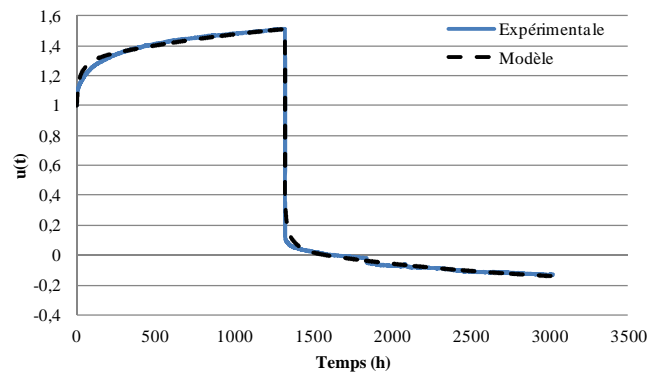
$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,13	6,25E-03	1,25E-01	8,87E-01	5,73E-02
168			1,78E-02		1,56E-01
4320			6,93E-04		2,18E-01
87600			3,42E-05		1,04

**Tableau C.2.8.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Ozigo\_1B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	8,80E-01	1,05E-02	1,25E-01	1,14	1,76E-01
168			1,78E-02		1,63E-01
4320			6,93E-04		4,09E-01
87600			3,42E-05		0



a. Ozigo 1H



b. Ozigo 1B

**Figure C.2.5.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_1

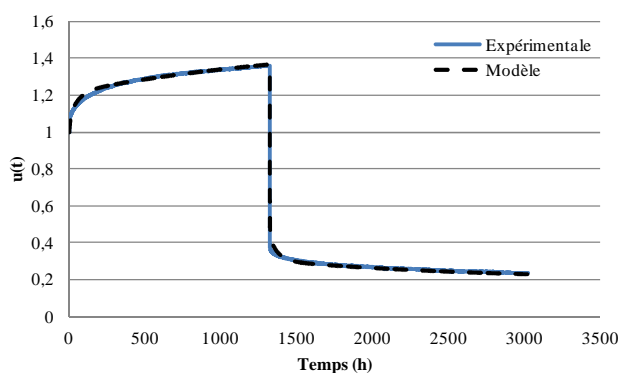
### Poutre 2

**Tableau C.2.9.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Ozigo\_2H)

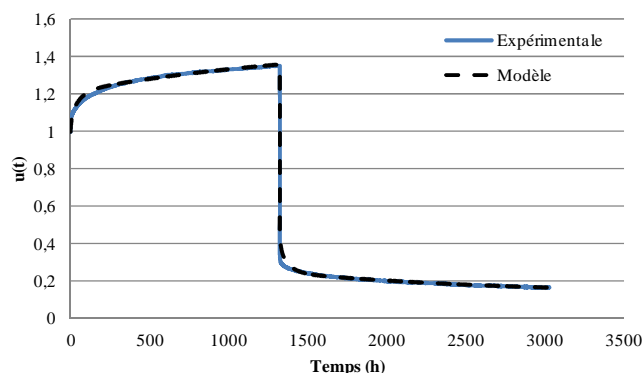
$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,14	4,46E-03	1,25E-01	8,74E-01	6,68E-02
168			1,78E-02		1,19E-01
4320			6,93E-04		2,03E-01
87600			3,42E-05		3,01E-01

**Tableau C.2.10.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Ozigo\_2B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,09	4,53E-03	1,25E-01	9,21E-01	7,01E-02
168			1,78E-02		1,25E-01
4320			6,93E-04		2,12E-01
87600			3,42E-05		2,25E-01



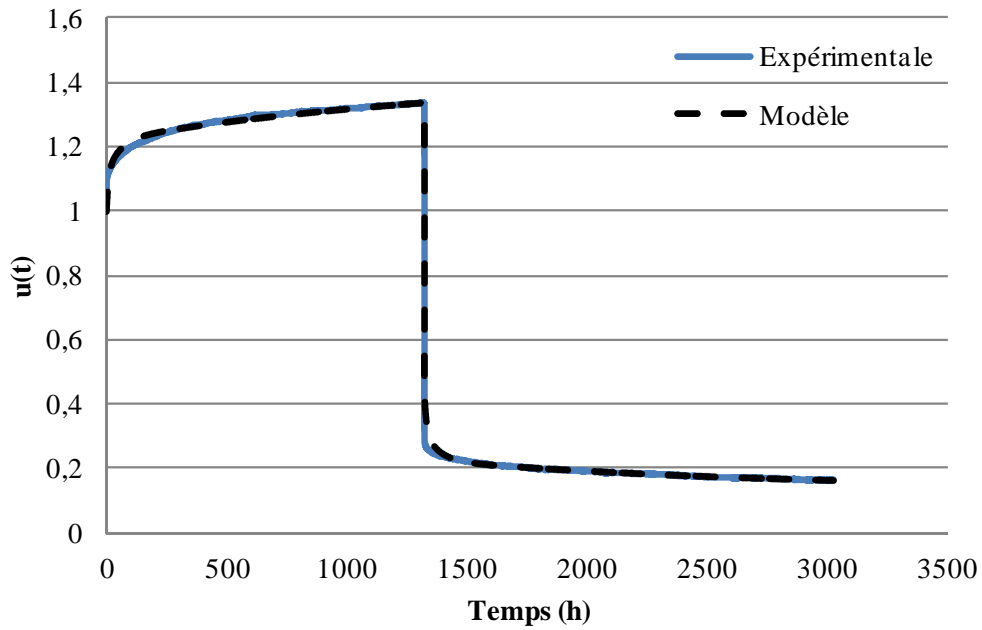
a. Ozigo 2H



b. Ozigo 2B

**Figure C.2.6.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_2Poutre 3**Tableau C.2.11.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Ozigo\_3H)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,10	4,04E-03	1,25E-01	9,09E-01	1,09E-01
168			1,78E-02		9,31E-02
4320			6,93E-04		1,65E-01
87600			3,42E-05		1,52E-01

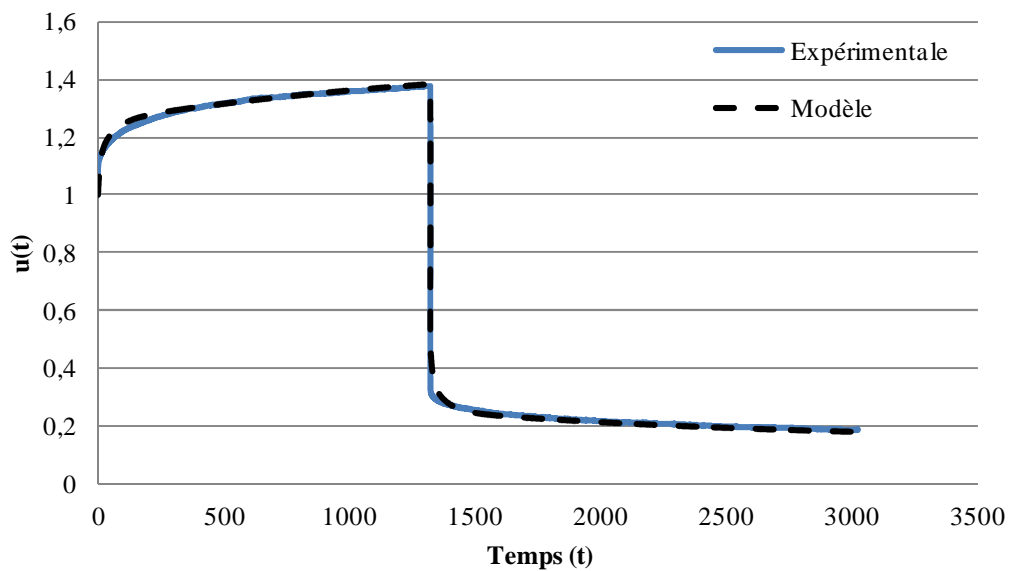


**Figure C.2.7.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_3

Poutre 4

**Tableau C.2.12.** Identification des paramètres viscoélastiques sous basse humidité (Moabi 4B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda_i$	$A_0$	$A_i$
24	1,11	4,54E-03	1,25E-01	8,99E-01	1,14E-01
168			1,78E-02		1,10E-01
4320			6,93E-04		1,91E-01
87600			3,42E-05		7,05E-02



**Figure C.2.8.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_4

### C.3 Modélisation du fluage-recouvrance sous haute humidité

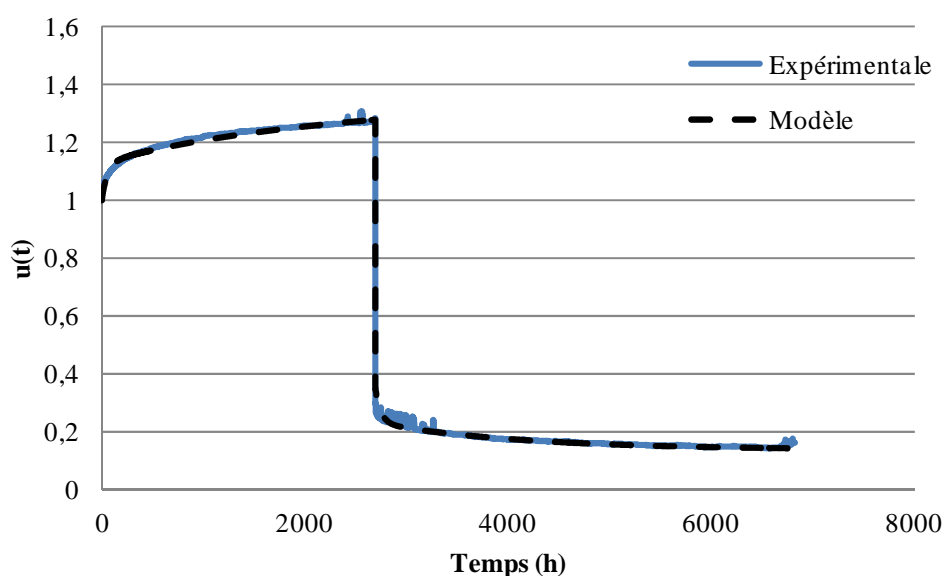
Conformément à la section IV.5.6.3, on modélise l'ensemble des courbes expérimentales de fluage-recouvrance obtenues, sous haute humidité relative (90%).

#### C.3.1 Moabi

##### Poutre 1

**Tableau C.3.1.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,08E+00	5,70E-03	1,25E-01	9,29E-01	5,33E-03
168			1,78E-02		1,15E-01
4320			6,93E-04		1,10E-01
87600			3,42E-05		5,24E-01

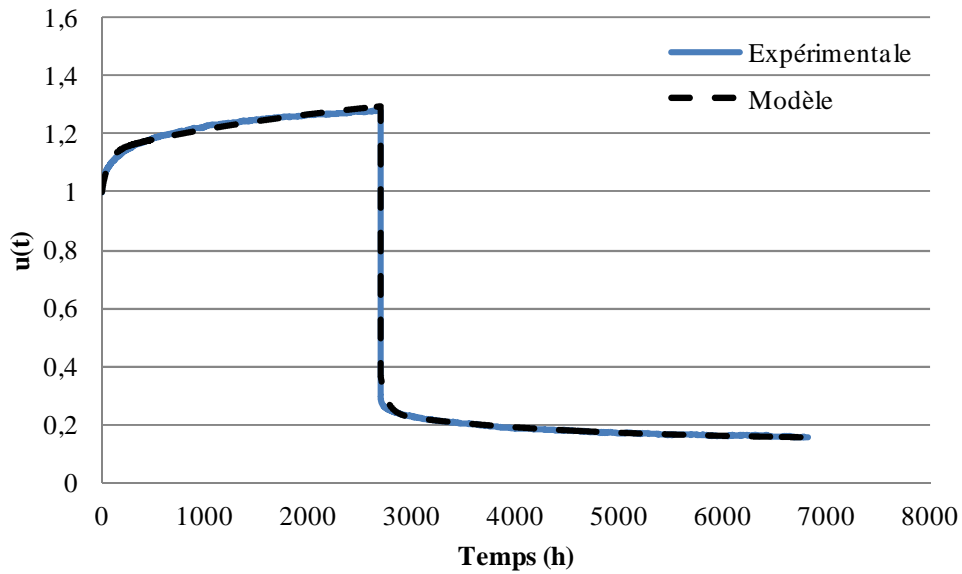


**Figure C.3.1.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_1

##### Poutre 2

**Tableau C.3.2.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,08	5,44E-03	1,00E-01	9,28E-01	8,45E-03
168			1,43E-02		1,21E-01
4320			5,57E-04		1,19E-01
87600			2,75E-05		7,27E-01



**Figure C.3.2.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_2

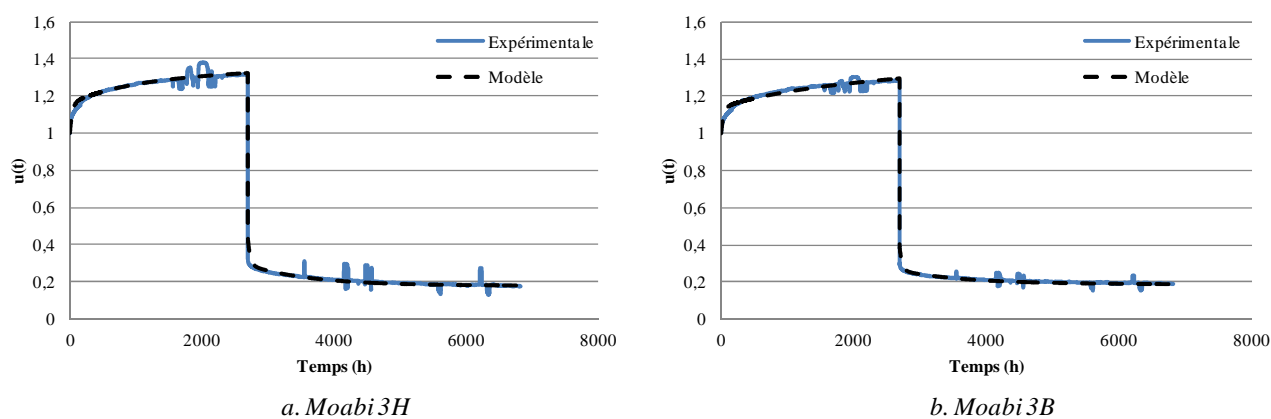
Poutre 3

**Tableau C.3.3.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Moabi 3H)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda_l$	$A_0$	$A_i$
24	1,12	9,81E-03	1,92E-01	8,91E-01	1,21E-03
168			2,74E-02		1,42E-01
4320			1,07E-03		1,18E-01
87600			5,26E-05		2,49E-01

**Tableau C.3.4.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Moabi 3B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda_l$	$A_0$	$A_i$
24	1,10	8,54E-03	1,92E-01	9,07E-01	0
168			2,74E-02		1,25E-01
4320			1,07E-03		7,41E-02
87600			5,26E-05		5,48E-01



**Figure C.3.3.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_3

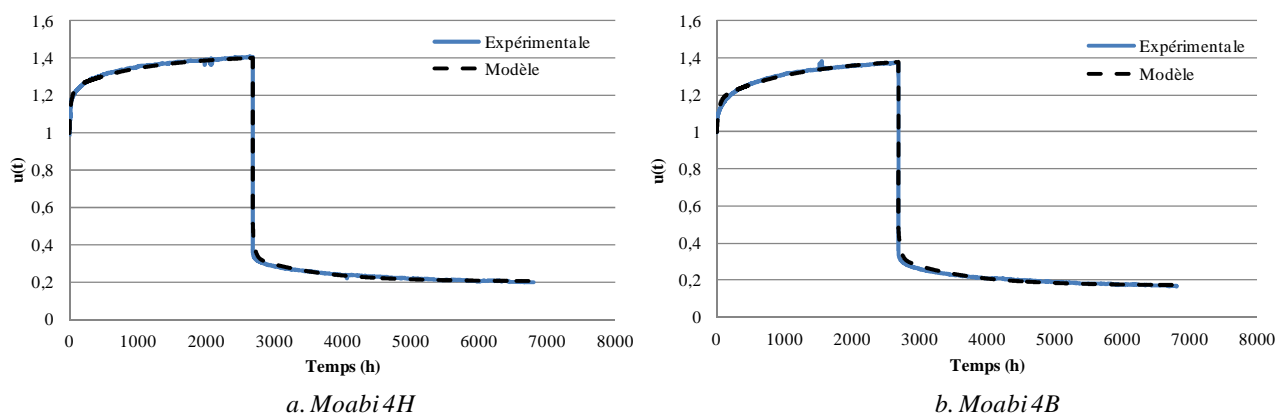
#### Poutre 4

**Tableau C.3.5.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Moabi 4H)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,15	5,88E-03	1,92E-01	8,67E-01	7,75E-02
168			2,74E-02		1,28E-01
4320			1,07E-03		1,37E-01
87600			5,26E-05		1,11E-01

**Tableau C.3.6.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Moabi 4B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,11	7,11E-03	1,92E-01	9,00E-01	1,92E-02
168			2,74E-02		1,41E-01
4320			1,07E-03		1,54E-01
87600			5,26E-05		2,70E-01



**Figure C.3.4.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Moabi\_4

### C.3.2 Ozigo

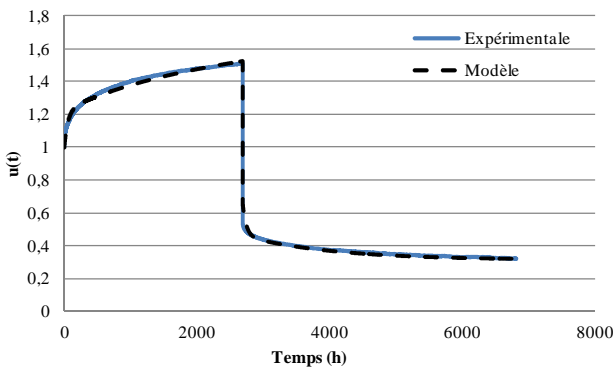
#### Poutre 1

**Tableau C.3.7.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Ozigo\_1H)

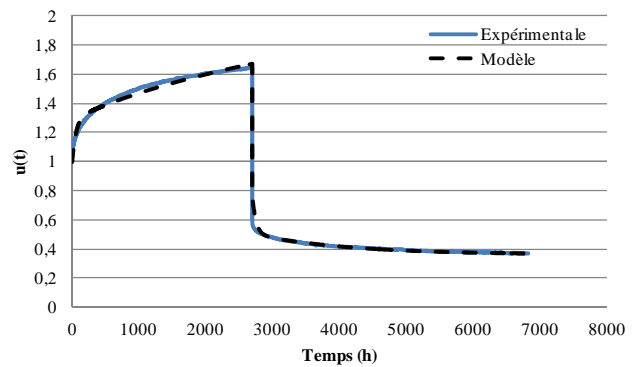
$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,15	9,25E-03	1,25E-01	8,68E-01	1,96E-03
168			1,78E-02		1,94E-01
4320			6,93E-04		1,90E-01
87600			3,42E-05		1,14

**Tableau C.3.8.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Ozigo\_1B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,11	1,37E-02	1,25E-01	9,04E-01	2,85E-04
168			1,78E-02		2,64E-01
4320			6,93E-04		1,75E-01
87600			3,42E-05		2,24



a. Ozigo 1H



b. Ozigo 1B

**Figure C.3.5.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_1

#### Poutre 2

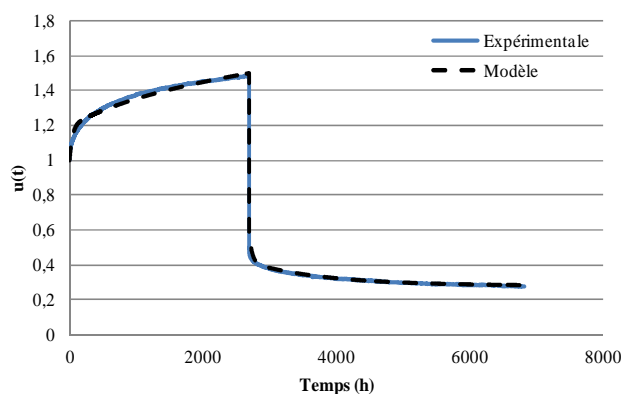
**Tableau C.3.9.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Ozigo\_2H)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,15	7,15E-03	1,63E-01	8,73E-01	0
168			2,33E-02		1,31E-01
4320			9,06E-04		1,53E-01
87600			4,47E-05		8,53E-01

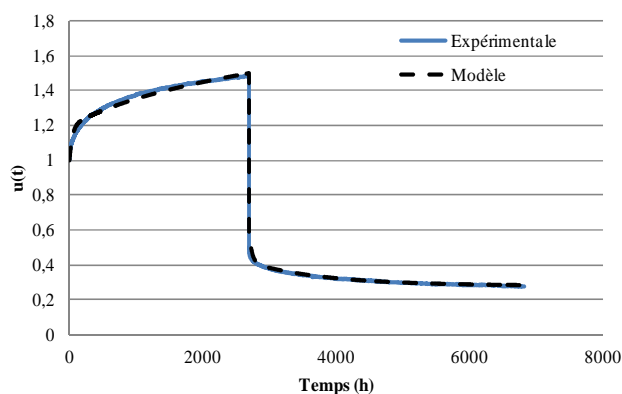


**Tableau C.3.10.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Ozigo\_2B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,10	1,01E-02	1,63E-01	9,06E-01	0
168			2,33E-02		1,79E-01
4320			9,06E-04		1,43E-01
87600			4,47E-05		1,27



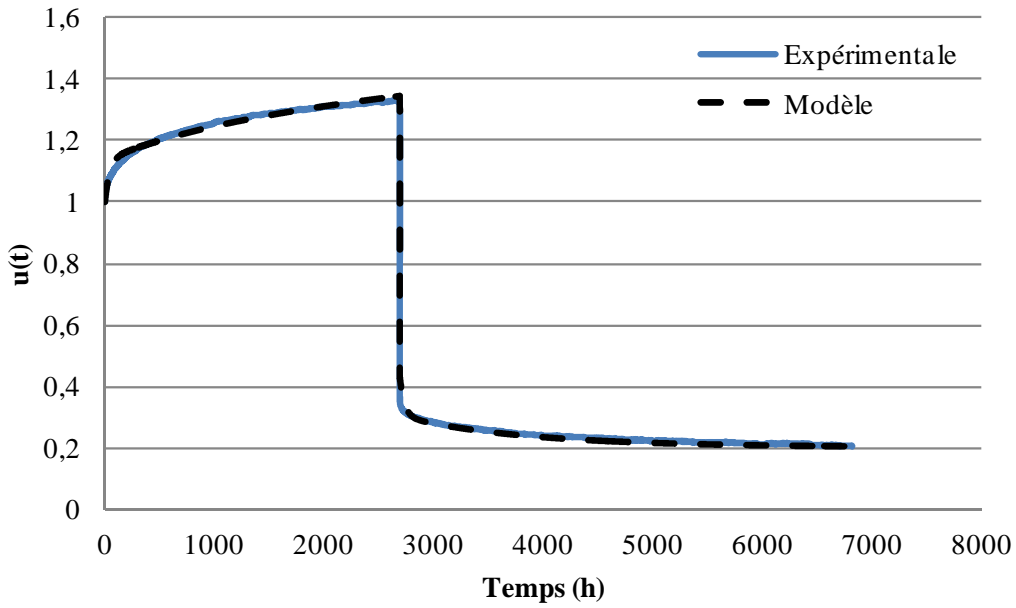
a. Ozigo 1H



b. Ozigo 1B

**Figure C.3.6.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_2Poutre 3**Tableau C.3.11.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Ozigo\_3H)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,10	6,56E-03	1,63E-01	9,12E-01	0
168			2,33E-02		1,25E-01
4320			9,06E-04		1,06E-01
87600			4,47E-05		8,06E-01

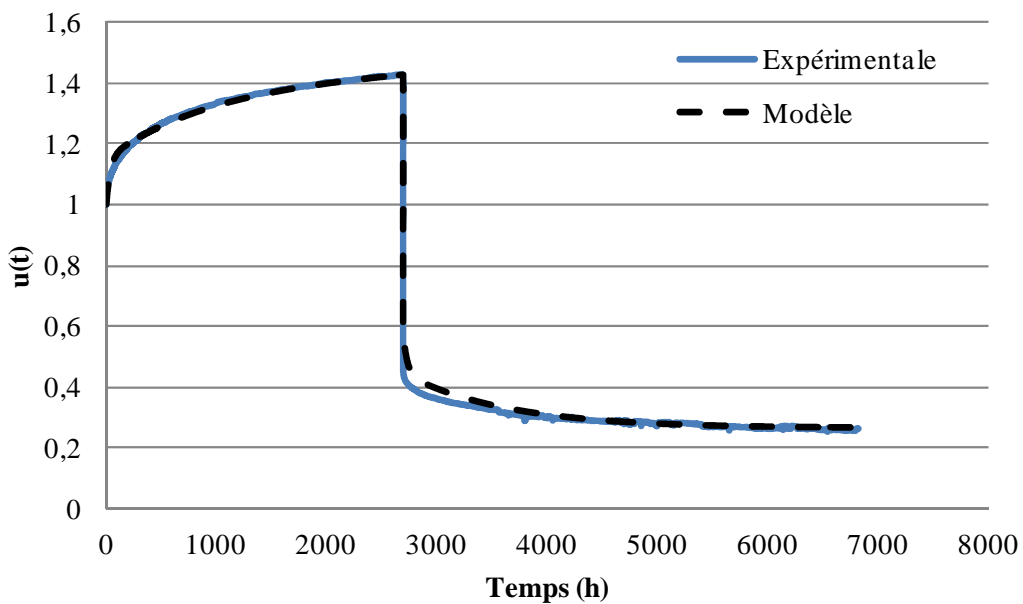


**Figure C.3.7.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_3

Poutre 4

**Tableau C.3.12.** Identification des paramètres viscoélastiques sous haute humidité (Moabi 4B)

$t_j$	$g$	$\xi$	$\lambda t$	$A_0$	$A_i$
24	1,11	7,11E-03	1,92E-01	9,00E-01	1,92E-02
168			2,74E-02		1,41E-01
4320			1,07E-03		1,54E-01
87600			5,26E-05		2,70E-01



**Figure C.3.8.** Modélisation du fluage-recouvrance pour la poutre Ozigo\_4



## RESUME

Le présent mémoire apporte une contribution à l'application de l'Eurocode 5 dans le dimensionnement et la vérification des constructions bois en zone tropicale. Cette approche, première du genre, nécessite la compréhension du comportement mécanique des essences tropicales en environnement variable. Dans une première phase, une étude expérimentale de découplage des phénomènes différés des éléments fléchis, sous climat contrôlé et à l'échelle centimétrique, est présentée. Ce protocole expérimental, premier du genre, a permis non seulement de dissocier les effets de retrait-gonflement transversale des effets de fluage proprement-dit et des effets mécano-sorptifs, mais également de comprendre la nature des effets mesurés selon l'emplacement des capteurs. Les effets liés au retrait-gonflement longitudinale, non négligeable, selon les conditions aux appuis et la taille des échantillons, sont également perceptibles. En deuxième phase, des essais de flexion long-terme, à l'échelle structure, ont été menés, en ambiances tropicales, à Franceville au Gabon, sur deux essences tropicales : le Moabi et l'Ozigo. A l'image de l'Eurocode 5, trois types d'environnement ont été sélectionnés : une ambiance climatisée temporairement, une ambiance extérieure abritée et une ambiance extérieure non-abritées. Les résultats obtenus et en cours d'acquisition montrent que les bois tropicaux ont un comportement différé accentué par la forte variation d'humidité pour des variations de températures peu significatives. Pour comprendre l'influence de l'humidité sur ces essences, une campagne d'essais, pour la caractérisation des isothermes de sorption et cinétiques de diffusion, a été menée, dans une troisième phase. Les paramètres de diffusion longitudinale et transversale dans les deux essences ont été déterminés. En complément, des essais de fluage et relaxation, en flexion long-terme, sous ambiance contrôlée, à l'échelle matériau de ces essences, ont été également conduits, dans une dernière phase. Cette étude, menée en basse et haute humidité, montre que le fluage est plus accentué pour les poutres humides et que la recouvrance est plus importante lorsque les poutres sont sèches. Une modélisation du fluage-recouvrance sous basse et haute humidité permet la détermination des paramètres viscoélastiques des poutres étudiées. Enfin, une étude comparative des coefficients de fluage, obtenus sur les essais en laboratoire et les essais en vrai grandeur, montre que les effets mécano-sorptifs sont prépondérants, en plus des effets du retrait-gonflement longitudinale empêchés non négligeables à l'échelle structure.

**Mots clés :** bois tropicaux, climat tropical, Eurocode 5, comportement long-terme, fluage, retrait-gonflement, viscoélasticité, mécano-sorption, isothermes de sorption, diffusion.

## ABSTRACT

The present report makes a contribution to adapt Eurocode 5 for timber constructions using tropical hardwoods in tropical climate. This approach requests to well know the mechanical behavior in variable environment. In a first time, an experimental study is presented for decoupling postponed phenomena from a longitudinal four-point creep bending, under controlled climate on small samples by measuring upper and lower deflections. The result of this original experimental protocol allows separating and illustrating different phenomena met on creep evolution of timber beams: swelling-shrinkage effects, hygro-lock effect, orthotropic mechano-sorption and viscoelasticity. In second time, longitudinal four-point creep bending tests were realised, in the scale of structure, in tropical atmosphere to Franceville in Gabon, in two tropical hardwoods: Moabi and Ozigo. The experimental device was led on three sites corresponding to three different climatic environments according to specific service classes of Eurocode 5: an atmosphere temporarily air-conditioned, a sheltered outside atmosphere and an outside atmosphere non-sheltered. The obtained results show that tropical wood have a deferred behaviour stressed by the strong variation of humidity for little significant temperature variations. To define new classes of service appropriated for the tropical atmospheres, it is important to characterize the diffusion process. Following this objective, a complete experimental device was led, in the scale of material, in order to determinate the sorption isotherms and diffusion parameters needed to study the mechano-sorptive behavior in real condition. In a last time, others tests of creep and relaxation, in the scale of material, were realized under controlled atmosphere, in the same species. This study, led in low and high relative humidity, shows that the creep is more significant for the wet beams and the recovery is more important when beams are dry. A modeling of the creep-recovery under low and high relative humidity is proposed and allows the determination of the viscoelastic parameters of the studied beams. At the end, a comparative study of creep coefficients, obtained on the laboratory samples and the beams in real environment, shows that the mechanic-sorptive effects are dominating, with an importance of longitudinal swelling-shrinkage effects, not insignificant in the scale of structure.

**Keywords:** tropical hardwood, tropical environment, Eurocode 5, long term behavior, creep, swelling-shrinkage, viscoelasticity, mechano-sorption, isotherms of sorption, diffusion.