



HAL
open science

Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie

Maximin Varnier

► **To cite this version:**

Maximin Varnier. Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie. Génie civil. Université de Limoges, 2019. Français. NNT : 2019LIMO0035 . tel-02303304

HAL Id: tel-02303304

<https://theses.hal.science/tel-02303304>

Submitted on 2 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges
Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique,
Energétique et Aéronautique (ED 609)

Laboratoire Génie Civil, Diagnostic et Durabilité – GC2D

Présentée et soutenue par
Maximin VARNIER

Le 15/03/2019

Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus

Des sciences du bois à l'ingénierie

Thèse dirigée par Frédéric DUBOIS

JURY :

Président du jury

M. [Christine DELISEE Professeure des Universités, I2M, Université de Bordeaux]

Rapporteurs

Mme. Sandrine BARDET Maitre de conférence, HDR, LMGC, Université de
Montpellier

M. Romain REMOND Maitre de conférence, HDR, LERMAB, Université de
Lorraine

Examineurs

Mme. [Christine DELISEE Professeure des Universités, I2M, Université de Bordeaux]

M. [Abdelhamid BOUCHAIR, Professeur des Universités, Institut Pascal, Université
Clermont Auvergne]

M. [Nicolas SAUVAT, Maitre de conférence, GC2D, Université de Limoges]

M. [Cédric MONTERO, Maitre de conférence, LMGC, Université de Montpellier]

M. [Frédéric DUBOIS, Professeur des Universités, GC2D, Université de Limoges]

M. [Joseph GRIL, Directeur de recherche, CNRS]



A mon épouse : Delphine VARNIER
A mes parents : Christine et Christophe VARNIER
A mes frères : Gabriel (Astrid et Louise), Florian et Martin

Remerciements

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le projet EFEUR 5, coordonné par le CRITT bois d'Epinal et financés par l'ANR. Ils m'ont permis d'effectuer des échanges fructueux et constructif auprès des différents partenaires. Je tiens ainsi à remercier, Laurent BLERON, Jean François BOCQUET, Julien RUELLE, Thibault BENISTAND en tant que doctorant au LERMAB sur la tache 2, Damien LATHUILLIERE et Eric MASSON.

Je souhaite remercier mon directeur de thèse, M Frédéric DUBOIS, professeur de l'université de Limoges, pour son aide, et son soutien tous au long de mes travaux. Je le remercie également en tant que Directeur du laboratoire GC2D de m'avoir accueilli ces trois années.

Je tiens également à adresser mes plus sincères remerciements à M. Nicolas SAUVAT, Maitre de conférence, et co-encadrant pour son aide quotidienne, sa disponibilité et son soutien indéfectible jusqu'au bout de ses trois années de doctorat. J'adresse mes remerciements à mes co-encadrants de thèse M. Cédric MONTERO, et M. Joseph GRIL qui malgré la distance ont toujours fait de leur mieux pour répondre à mes questions, et qui m'ont accueilli quelques semaines au sein du laboratoire LMGC de Montpellier.

Mme Sandrine BARDET, maitre de conférence, HDR du laboratoire LMGC de Montpellier et M Romain REMOND, maitre de conférence, HDR du laboratoire LERMAB d'Epinal m'ont fait l'honneur de rapporter cette thèse, qu'ils en soient sincèrement remerciés. Je remercie également Mme Christine DELISEE et M Abdelhamid BOUCHAIR, professeurs des Universités, d'I2M de Bordeaux et de l'institut Pascal de Clermont Ferrand respectivement, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je souhaite adresser ma gratitude à M. Jérôme DOPEUX, et M. Hamidou SEBBAH pour leurs contributions pour la réalisation du protocole expérimental ainsi que pour leurs conseils.

Mes remerciements vont également à tout le personnel du campus universitaire de Génie Civil d'Egletons, pour leur soutien.

Je tiens enfin remercier mes compagnons de galère du laboratoire GC2D, pour leur amitié, leur soutien, et pour les échanges fructueux que nous avons pu avoir tout au long de ces dernières années.

Je ne saurais oublier ma famille. Ils ont dû faire preuve de patience et de compréhension au cours de ces trois années pendant lesquelles je n'ai pas toujours pu leur consacrer le temps nécessaire.

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Table des symboles

A, D, B	: Coefficient de calage de la capacité hydrique ξ_{ad}^b et ξ_{de}^b
A_{ad}	: Paramètre de calcul de ΔH_s en adsorption
A_{de}	: Paramètre de calcul de ΔH_s en désorption
a_w	: Terme d'hygro activation visqueuse
A_w	: Coefficient de calage du terme d'hygro activation visqueuse
C_a	: Capacité calorifique massique de l'air
C_{anh}	: Capacité calorifique anhydre
C_e	: Capacité calorifique de l'eau
C_h	: Capacité calorifique homogénéisée du matériau humide
C_{ijkl}	: Composantes du tenseur de complaisance 3D
$C(t)$: Evolution temporelle de la complaisance
C_{ve}	: Capacité calorifique de la vapeur d'eau
C_w	: Capacité calorifique du matériau humide
d	: Densité
D_T	: Coefficient de diffusion thermique
D_{Tw}	: Couplage thermohydrique
D_w	: Coefficient de diffusion de l'eau liée
D_{wT}	: Couplage hygrothermique (effet Soret)
E_a	: Energie d'activation
E_{ijkl}	: Composantes du tenseur de rigidité élastique 3D
E_s	: Enthalpie de sorption
E_v	: Enthalpie de l'eau vapeur
E_w	: Enthalpie de l'eau libre
$F_{1/2}$: Facteur de forme gris
h_r	: Coefficient d'échanges surfaciques thermique par rayonnement
HR	: Humidité relative

HR_{amb}	: Humidité relative de l'air ambiant
HR_{surf}	: Humidité relative équivalente en surface
H_s	: Chaleur de sorption
h_t	: Coefficient d'échanges surfaciques thermique
h_v	: Coefficient d'échanges surfaciques thermique par convection
h_w	: Coefficient d'échanges surfaciques hydrique par convection
$J(t)$: Fonction de fluage uni axiale
$\underline{\underline{J}}(t)$: Tenseur de fluage d'ordre 4
J_{ijkl}	: Composantes de $\underline{\underline{J}}(t)$
k_{def}	: Coefficient déterminant le comportement différé à 50ans
k_{def}^i	: Evolution de k_{def} en fonction des temps caractéristiques
$k^{(m)}$: Rigidité de la $m^{ième}$ cellule
$k_{min}(T,t)$: Rigidité minimale connue sous charge
$[K_T]$: Matrice tangente
L	: Chaleur latente de vaporisation de l'eau libre
L'	: Chaleur latente de vaporisation de l'eau liée
m_{anh}	: Masse anhydre
m_e	: Masse d'eau dans le matériau
m_h	: Masse humide
\vec{n}	: normal sortante du flux en surface
P_c	: Pesée corrigée de la température
P_m	: Pesée mesurée par la balance
p_s	: Pression de vapeur saturante
p_v	: Pression de vapeur
p_{va}	: Pression de vapeur de l'air ambiant
p_{vsurf}	: Pression de vapeur sur la surface d'échange
Q	: Chargement mécanique

Q_T	: Terme source de thermo couplage
Q_W	: Terme source d'hygro couplage
R	: Constante des gaz parfaits
$R(t)$: Fonction de relaxation uni-axiale
S_{ijkl}	: Composantes du tenseur de la complaisance élastique 3D
t	: Temps
$[T]_\epsilon$: Matrice rotation appliquée aux déformations
$[T]_\sigma$: Matrice rotation appliquée aux contraintes
T	: Température
T_{amb}	: Température de l'air ambiant
T_{moy}	: Température moyenne du corps d'étude
T_{surf}	: Température en surface du milieu
$u(t)$: Evolution de la flèche globale
u_{inst}	: Flèche instantanée
v	: Vitesse du vent
w	: Teneur en eau massique
w_{ad}	: Teneur en eau massique d'adsorption
w_{de}	: Teneur en eau massique de désorption
w_i, w_{i+1}	: Teneur en eau incrémental
w_s	: Teneur en eau de saturation
w_s^0	: Teneur en eau de saturation à 0°C

Table des symboles grecs

$\alpha_a, \alpha_d, \varphi_a$ et φ_d	: Paramètres de calage de l'isotherme d'adsorption et de désorption
$\alpha_L, \alpha_R, \alpha_T, \alpha_{RT}$: Coefficients de retrait gonflement libre selon le plan de référence
α_w	: Activité de l'eau
$\Gamma(t)$: Contrainte mécanosorptive
δ^*	: Perméabilité apparente
δ_0	: Paramètre de calcul homogène à une perméabilité
δ_a	: Perméabilité à la vapeur d'un matériau anhydre
δ_{air}	: Perméabilité à la vapeur de l'air
ΔC_n	: Incrément de complaisance aux points d'intégration pendant Δt_n
ΔG	: Différence d'énergie libre d'un système
ΔH_s	: Différence d'enthalpie de vaporisation de l'eau liée et de l'eau libre
ΔS	: Différence d'entropie d'un système
$\Delta \varepsilon_n$: Incrément de déformation aux points d'intégration pendant Δt_n
$\{\Delta F\}_n$: Incrément de chargement nodal pendant Δt_n
$\Delta \sigma_n$: Incrément de contrainte aux points d'intégration pendant Δt_n
$\{\Delta u\}_n$: Incrément de déplacement nodal pendant Δt_n
$\underline{\underline{\varepsilon}}(t)$: Tenseur de déformation
ε_{ij}	: Composantes du tenseur de déformation
ε_n	: Déformation uni-axiale au temps t_n
$\eta^{(m)}$: Viscosité de la $m^{ième}$ cellule
λ	: Conductivité thermique
κ	: Erreur sur le pourcentage d'ouverture de chaque cellule de Kelvin Voigt
ξ	: Capacité hydrique
ξ_{ad}^b	: Capacité hydrique de l'isotherme enveloppe en phase d'adsorption
ξ_a	: Capacité hydrique de l'isotherme partielle en phase d'adsorption

ξ_{de}^b	: Capacité hydrique de l'isotherme enveloppe en phase de désorption
ξ_d	: Capacité hydrique de l'isotherme partielle en phase de désorption
ρ_a	: Masse volumique de l'air
ρ_{anh}	: Masse volumique anhydre du matériau
ρ_h	: Masse volumique homogénéisée du matériau humide
$\underline{\underline{\sigma}}(t)$: Tenseur de contrainte
σ_{ij}	: Composantes du tenseur de contrainte
σ_n	: Contrainte uni-axiale au temps t_n
σ_{SB}	: Constante de Stefan-Boltzmann
Φ	: Déphasage entre la pesée et la température
φ_a , et φ_d	: Paramètres thermodynamique d'adsorption et de désorption
φ_{lw}	: Flux d'eau liée
φ_{s0}	: Flux surface appliqué sur la surface d'échange
φ_T	: Flux de chaleur
φ_{vw}	: Flux de vapeur
φ_w	: Flux d'humidité
Ψ_{ti}	: Répartition temporelle des taux d'ouvertures du modèle de Kelvin Voigt
$\vec{\nabla}$: Opérateur nabla

Table des matières

<i>Remerciements</i>	3
<i>Droits d’auteurs</i>	4
<i>Table des symboles</i>	5
<i>Table des symboles grecs</i>	8
<i>Table des illustrations</i>	11
<i>Table des tableaux</i>	19
<i>Résumé</i>	21
<i>Abstract</i>	22
<i>Introduction générale</i>	23
<i>Chapitre I. Le matériau bois de la ressource à la construction</i>	26
<i>Chapitre II. Transfert de chaleur et de masse dans le bois en ambiance variable</i>	45
<i>Chapitre III. Comportement mécanique différé du bois</i>	101
<i>Chapitre IV. Synthèse et propositions réglementaires</i>	168
<i>Conclusion générale</i>	207
<i>Références bibliographiques</i>	210
<i>Annexes</i>	218

Table des illustrations

Figure 1 : Répartition surfacique des essences en France (x10 ³ ha) (FCBA, 2018a).....	27
Figure 2 : Répartition de la forêt Française par type d'essence (FCBA, 2018b).....	27
Figure 3 : Représentation des trois structures du bois (Harrington, 2002)	29
Figure 4: Représentation des différentes couches composant le tronc d'arbre	30
Figure 5 : Anisotropie du bois, axes et plans de références (Trouy, 2016)	31
Figure 6: Ponctuations aréolées vues de face sur une coupe radiale (douglas) vue au MEB (Trouy, 2016).....	32
Figure 7 : Coupe transversale de sapin (Trouy, 2016)	33
Figure 8 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les résineux (Trouy, 2016)	33
Figure 9 : Section transversale du douglas selon deux échelles (Trouy, 2016).....	34
Figure 10 : Perforation simple (tel que l'érable, le hêtre et le peuplier) et perforation scalariforme (tel que le bouleau, le hêtre et le chêne) vue au MEB (Trouy, 2016)	34
Figure 11 : Coupe transversale d'orme, avec présence de différentes largeurs de cernes (Trouy, 2016).....	35
Figure 12 : Coupe transversale du hêtre (Trouy, 2016)	35
Figure 13 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les feuillus (Trouy, 2016)	36
Figure 14 : Section transversale du chêne selon deux échelles (Trouy, 2016)	36
Figure 15: Section transversale du hêtre selon deux échelles (Trouy, 2016)	37
Figure 16 : Section transversale du peuplier selon deux échelles (Trouy, 2016).....	37
Figure 17 : Représentation de la décomposition de la paroi cellulaire (Trouy, 2016)	38
Figure 18 : Coupe radial de pin sylvestre avec décrochement de la paroi S3, vue au MEB (Trouy, 2016).....	38
Figure 19 : La couche S2 : représentation de l'AMF	38
Figure 20 : Diagramme de répartition des trois composants principaux du bois dans l'épaisseur de la paroi cellulaire (Panshin and De Zeeuw, 1980)	39
Figure 21 : Influence de la densité sur le module d'Young longitudinal.....	41
Figure 22 : Influence de l'humidité interne sur les composantes élastiques de l'épicéa Sitka (Félix, 1990)	42
Figure 23 : Trois états distincts de l'eau dans le bois et son influence sur ses variations dimensionnelles.....	47
Figure 24 : Régression linéaire de la teneur en eau en fonction de la variation de surface (Burgers, 2016)	48
Figure 25 : Les trois types d'isothermes de sorption selon Skaar	49
Figure 26 : Courbe d'équilibre hygroscopique du bois (AFNOR, 2010).....	50

Figure 27 : Isothermes de sorption pour des essences de bois (vert) et d'autres matériaux (rouge)	51
Figure 28 : Synthèse bibliographique des familles de résineux et de feuillus en désorption et adsorption	51
Figure 29 : Disposition des molécules par couches selon le modèle de Dent	52
Figure 30 : Isotherme enveloppe du douglas : comparaison modèle et expérimental	53
Figure 31 : Droite de Pedersen, au point (α_{w0} ; w_0) et pour coefficient directeur ξ_a	54
Figure 32 : Isothermes partielles : Modèle de Pedersen vs mesures expérimentales (Merakeb, 2006).....	55
Figure 33: Chemins de l'eau au sein des lumens, et au niveau des perforations (Vues au MEB à droite) (Trouy, 2016)	58
Figure 34 : Processus Stop and GO de Kulasinski (2015)	59
Figure 35 : Schématisation des transferts thermo-hydrrique et de leurs interactions	64
Figure 36 : Représentation schématique des échanges superficiels.....	65
Figure 37 : Algorithme de couplage	66
Figure 38: Enthalpie de sorption expérimentale/modèle logarithmique (Rawat, 1996).....	71
Figure 39 : Evolution de l'enthalpie des molécules d'eau dans le bois en fonction de l'état d'équilibre.....	72
Figure 40 : Influence de la température, la teneur en eau et du cycle de sorption sur la perméabilité apparente.....	73
Figure 41 : Influence de la température sur la teneur en eau de saturation	74
Figure 42 : 4 faces étanches pour la diffusion longitudinal et 2 faces étanches pour la diffusion transversale.....	75
Figure 43 : Eprouvette longitudinal de chêne.....	76
Figure 44 : Eprouvettes pour essais de diffusion transversale	76
Figure 45 : Dispositif expérimental.....	77
Figure 46 : Essai de correction de la pesée des balances en fonction de la température	77
Figure 47 : Déphasage entre température environnante et pesée	78
Figure 48 : Coefficient de correction de la pesée en fonction de la température	78
Figure 49: Evolution de la Température et de l'Humidité relative	79
Figure 50 : Correction de la pesée par la température.....	79
Figure 51 : Enceinte climatique de régulation d'humidité initiale	80
Figure 52 : Protocole expérimental avec période, initiale, calage, validation.....	81
Figure 53 : Conditions météorologiques au cours des deux essais de diffusion	83
Figure 54 : Pesée en fonction de la température extérieur	83

Figure 55 : Coefficient de correction et déphasage de la pesée en fonction de la température d'essai.....	84
Figure 56 : Correction des pesées.....	85
Figure 57 : Evolutions expérimentale de la teneur en eau moyenne.....	86
Figure 58 : Isothermes de sorption de plusieurs essences de bois en fonction du ratio de saturation	88
Figure 59 : Identification des hystérésis par familles.....	89
Figure 60 : Algorithme du simplexe (Nguyen, 2014)	91
Figure 61 : Comparaison de la réponse du modèle numérique par rapport à l'évolution de l'humidité moyenne expérimentale	93
Figure 62 : Comparaison du profil expérimental/modèle.....	94
Figure 63 : Perméabilité apparente à 20°C selon le sens de diffusion et le cycle	95
Figure 64 : Perméabilité apparente pondérée de la densité à 20°C.....	96
Figure 65 : Comparaison de la perméabilité apparente pondérée de la densité en fonction du cycle de sorption	97
Figure 66 : Maillage d'une poutre et de sa section en 3D composée de 25 536 éléments de type CUB8.....	98
Figure 67 : Maillage d'une poutre de section 75x150 mm ² (182 éléments de types QUA4) en vue de la modélisation du transfert de masse.....	99
Figure 68 : Maillage intermédiaire pour l'interpolation du champ hydrique 2D vers un champ hydrique 3D.....	99
Figure 69 : Interpolation du champ hydrique 3D sur la poutre.....	100
Figure 70 : Evolution théorique du comportement différé du bois en environnement constant	103
Figure 71 : Essais de fluage/recouvrance du pin en traction pour trois humidités différentes	103
Figure 72 : Evolution du module d'Young selon la teneur en eau w(%) (Nakano, 1999)	104
Figure 73 : Evolution de la complaisance à t = 300min selon la teneur en eau w(%) (Nakano, 1999).....	104
Figure 74 : Evolution de la complaisance relative selon la teneur en eau w(%) (Nakano, 1999).....	104
Figure 75 : Essai de fluage avec variations d'humidité (Pittet, 1996)	105
Figure 76 : Amplification du fluage due à des variations hydriques (Ranta-Maunus, 1975)	106
Figure 77 : Déformations sous chargement mécanique et hydrique combinées et découplage des phénomènes (Randriambololona, 2003)	107
Figure 78 : Influence du taux de charge sur la réponse différée sous environnement constant (93% HR), et variable (Hearmon and Paton, 1964)	108
Figure 79 : Fluage relatif en fonction du logarithme du temps (Hunt, 2001)	109

Figure 80 : Trajectoire mécanosorptive du hêtre en traction (6 MPa).....	109
Figure 81 : Essai de fluage-recouvrance (Navi and Heger, 2005).....	110
Figure 82 : Essai de relaxation-effacement (Navi and Heger, 2005).....	111
Figure 83 : représentation du modèle de Kelvin Voigt généralisé	111
Figure 84 : Représentation du modèle de Maxwell généralisé.....	112
Figure 85 : Modèle de Gril avec effet hygro-verrou.....	114
Figure 86 : Représentation schématique du module d'élasticité minimum	115
Figure 87 : Représentation rhéologique du ressort à effet mémoire selon Husson (2009) ..	116
Figure 88 : Modélisation des cellules viscoélastiques généralisées avec ressorts à effet mémoire	116
Figure 89 : Comparaison du modèle de Husson sur les essais de Randriambololona	117
Figure 90 : Comportement mécanique d'un élément soumis à des variations d'humidité....	118
Figure 91 : Chargement mécanique quelconque	118
Figure 92 : Algorithme implémenté dans le logiciel de calcul aux éléments finis.....	121
Figure 93 : Influence de répartition temporelle des taux d'ouvertures sur le comportement différé pour une valeur de $k_{def} = 0,8$ (Classe de service 2).....	123
Figure 94 : Modélisation rhéologique du comportement instantané et différé	124
Figure 95 : Evolution de la fonction de fluage $J(t)$ pour chaque cellule de Kelvin Voigt.....	124
Figure 96 : Algorithme de détermination de la contrainte et de la déformation au temps \bar{t}	127
Figure 97 : Influence de l'hygro sensibilité élastique sur la flèche	128
Figure 98 : Scénario de chargement thermo-hygro mécanique (Manfoumbi 2012).....	131
Figure 99 : Evolutions moyennes des flèches hautes et basses et de la teneur en eau moyenne des éprouvettes témoins	132
Figure 100 : Comparaison des évolutions de teneur en eau entre le modèle et l'expérimentation	133
Figure 101 : Influence de l'hygro sensibilité élastique sur la flèche au travers de la matrice élastique.....	134
Figure 102 : Réponse du modèle hygro activé viscoélastique et d'hygro sensibilité élastique sur les deux faces	135
Figure 103 : Maillage de la poutrelle (2240 CUB8)	136
Figure 104 : Comparaison modèles hygro sensible et viscoélastique pour une orthotropie radiale	137
Figure 105 : Réponses en flèche basse des modèles mécaniques pour deux pentes de fil différentes.	138
Figure 106 : Impact de la pente de fil sur la flèche.....	138
Figure 107 : Redistribution des transferts hydriques dans une section en fonction de la pente de fil	138

Figure 108 : Influence de la pente de fil sur la diffusion lors d'un essai en laboratoire	139
Figure 109 : Schéma du banc d'essai de flexion quatre points	143
Figure 110 : Zones expérimentales : Intérieur non régulé (à gauche) extérieur (à droite) ...	143
Figure 111 : Appui bloqué (à gauche) et appui libre (à droite)	144
Figure 112 : Disposition des éléments du banc de flexion 4 points	146
Figure 113 : Banc de flexion 4 points en intérieur	146
Figure 114 : Banc de flexion 4 points en extérieur	146
Figure 115 : Chargement d'une poutre au transpalette	147
Figure 116 : Flèches instantanées : classe de service 2	147
Figure 117 : Flèches instantanées : classe de service 3	148
Figure 118 : Mesure du tassement aux appuis du chêne (à gauche) et du douglas (à droite) en CS2	149
Figure 119 : Gauchissement aux appuis des poutres de douglas et de chêne en classe de service 2	149
Figure 120 : Evolution climatique enregistrée en classe de service 2	150
Figure 121 : Evolution climatique enregistrée en classe de service 3	151
Figure 122 : Evolution des variations dimensionnelles du douglas (à gauche) et du peuplier (à droite)	152
Figure 123 : Evolution des variations dimensionnelles du hêtre (à gauche) et du chêne (à droite)	152
Figure 124 : Evolution des variations dimensionnelles du douglas (à gauche) et du chêne (à droite)	152
Figure 125 : Evolution des flèches en classe de service 2	153
Figure 126 : Mise en évidence des fissures non traversantes sur la poutre de chêne C1 (91-1) le jour du chargement, en comparaison à la poutre C2 (94-1)	154
Figure 127 : Evolution des flèches en classe de service 3	154
Figure 128 : Evolution de la teneur en eau moyenne en fonction des quatre essences en CS2	155
Figure 129 : Profils de teneurs en eau extrêmes (à gauche) et variations de teneur en eau annuelle (à droite)	156
Figure 130 : Evolution de la teneur en eau moyenne en fonction des quatre essences en CS3	157
Figure 131 : Profils de teneurs en eau extrêmes (à gauche) et variations de teneur en eau annuelle (à droite)	158
Figure 132 : Réponses différées du modèle d'hygro sensibilité pour les poutres en CS2 ...	159
Figure 133 : Maillage d'une poutre avec affinage en périphérie (4368 CUB8)	160

Figure 134 : Douglas : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite)	161
Figure 135 : Peuplier : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite)	161
Figure 136 : Hêtre : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite) ...	162
Figure 137 : Chêne : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite) .	162
Figure 138 : Ecart relatif entre modèle et expérimentale.....	163
Figure 139 : Identification des périodes de dérive.....	164
Figure 140 : Disposition des points d'enregistrement de la teneur en eau	164
Figure 141 : Evolution du gradient hydrique du peuplier au niveau de sept zones différentes pour un pas de temps d'une heure	165
Figure 142 : Apparition de fissures sur les poutres de douglas (à gauche) et hêtre (à droite)	165
Figure 143 : Comparaison des paramètres identifiées.....	166
Figure 144 Influence de la température sur w_s	170
Figure 145 : Diagramme d'équilibre hygroscopique du douglas selon la phase de sorption	171
Figure 146 : Diagrammes d'équilibres hygroscopique des quelques essences, et variation des valeurs d'humidité pour le couple 20°C / 65% HR.....	174
Figure 147 : Evolutions climatiques des deux environnements : extérieur équivalent CS3 (à gauche) et intérieur équivalent CS1 (à droite)	176
Figure 148 : Evolution de la teneur en eau des quatre essences dans les deux environnements.....	177
Figure 149 : Variations hydrique dans la hauteur au cours de la dernière année en classe de service 1 ; les moyennes des variations hydriques à cœurs et sur la couche de peau est représenté par les ronds.....	178
Figure 150 : Variations hydrique dans la hauteur au cours de la dernière année en classe de service 3 ; les moyennes des variations hydriques à cœurs et sur la couche de peau est représenté par les ronds.....	179
Figure 151 : Influence de la pente de fil sur la réponse hydrique long terme	180
Figure 152 : Comparaison expérimental/modèle du comportement différé pondéré par la flèche instantanée	182
Figure 153 : Comparaison expérimental/modèle du comportement différé	183
Figure 154 : Comparaison expérimental/modèles du comportement différé	184
Figure 155 : Comparaison expérimentation/modélisation du comportement différé pondéré pour le chêne	185
Figure 156: Evolution climatiques selon les 3 classes de service	188
Figure 157 : Maillage de la poutre Géo4 : 100x200 mm ² (266 QUA4)	188

Figure 158 : Evolutions de teneur en eau moyenne des cinq géométries en CS3 et humidité initiale de 24%.....	189
Figure 159 : Amplitudes des variations hydrique entre la 49 ^{ème} et la 50 ^{ème} année.....	190
Figure 160 : Position des points d'enregistrements.....	191
Figure 161 : Extremums et écarts hydriques dans la hauteur des poutres au cours de la dernière année de simulation en classe de service 2 et pour une humidité initiale de 12%	192
Figure 162 : Moyenne sur la dernière année des variations hydriques sur la partie centrale et sur les 20mm de peau pour les 3 environnements et les 5 géométries.....	193
Figure 163 : Maillage (Géo4) et symétries	195
Figure 164 : Optimisation des paramètres du modèle analytique simplifié sur la réponse Castem (Géo1).....	198
Figure 165 : Optimisation des paramètres du modèle analytique simplifié sur la réponse Castem (Géo4).....	199
Figure 166 : Evolution du comportement différé à 50 ans (Géo1)	200
Figure 167 : Evolution du comportement différé à 50 ans (Géo4)	201
Figure 168 : Correction de k_{def} en fonction de la variation d'humidité moyenne par rapport à 12%.....	202
Figure 169 : Valeurs de k_{def} pour $w_{ini} = 12\%$ en fonction de l'environnement et des valeurs EC5	202
Figure 170 : k_{def} en fonction de la section et de l'environnement pour une humidité initiale de 12%.....	203
Figure 171 : Influence de l'humidité initiale sur le coefficient k_{def}	204
Figure 172 : Variations de k_{def} en fonction des Classes de Service et de la section.....	205
Figure 173 : Coefficient de correction et déphasage de l'essai de hêtre par rapport aux autres (Eprouvette L : Balance 924 ; Eprouvette RT : Balance 927)	220
Figure 174 : Influence des paramètres de calage des balances sur l'évolution de la teneur en eau des éprouvettes L (à droite) et RT (à gauche)	220
Figure 175 : Evolution de la complaisance durant une phase de rigidification	223
Figure 176 : Evolution de la complaisance durant une phase d'adoucissement.....	224
Figure 177 : Algorithme de résolution de l'incrément de déformation viscoélastique.....	233
Figure 178 : Evolutions de la teneur en eau pour les 5 géométries, les trois environnements, et les deux humidités initiales	236
Figure 179 : Extremums et écart hydrique dans la hauteur des poutres cours de la dernière année de simulation	238
Figure 180 : Géo4 - CS2 – $w_{ini} = 12\%$: Identification du paramètres d'hygro activation A_w , $k_{def-ref} = 1$	239
Figure 181 : Géo1 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié, avec validation sur 10ans	240
Figure 182 : Géo2 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié	240

Figure 183 : Géo3 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié	241
Figure 184 : Géo4 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié	241
Figure 185 : Géo5 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié, avec validation sur 10 ans	241
Figure 186 : Géo1 : Comportement différé sur 50 années	243
Figure 187 : Géo2 : Comportement différé sur 50 années	243
Figure 188 : Géo3 : Comportement différé sur 50 années	244
Figure 189 : Géo4 : Comportement différé sur 50 années	244
Figure 190 : Géo5 : Comportement différé sur 50 années	244

Table des tableaux

Tableau 1 : Propriétés physiques et mécaniques des trois essences de feuillus et du douglas (résineux de référence) selon le Cirad (Gérard et al., 2011) à 12% d'humidité	40
Tableau 2 : Corrections de la teneur en eau et de la température sur la matrice de complaisance	42
Tableau 3 : Coefficient de retrait gonflement de quelques essences de bois en %/% de variation d'humidité (Preziosa and Guitard, 1986)	42
Tableau 4 : Récapitulatif des valeurs de k_{def} en fonction de trois environnements	43
Tableau 5 : Synthèse bibliographique de valeurs de coefficient de diffusion [$m^2.s^{-1}$]	57
Tableau 6: Equations de diffusion thermo hydrique	62
Tableau 7 : Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique.....	69
Tableau 8 : Paramètres de déphasages et de correction de la température	79
Tableau 9 :Eprouvettes d'essai de diffusion	80
Tableau 10 : Planning des essais de diffusion	82
Tableau 13: Masse sèche des éprouvettes selon la NF EN 12571	85
Tableau 14: Paramètres des isothermes de sorption des feuillus et des résineux	88
Tableau 15 : Récapitulatif des valeurs identifiées par l'algorithme d'optimisation.....	92
Tableau 16 : Evolution du coefficient de détermination sur les périodes de l'essai	93
Tableau 17 : Estimation des temps caractéristiques	122
Tableau 18 Scénarios de Ψ_{ti} en fonction des durées de charge	123
Tableau 19 : comparaison des valeurs types entre le modèle et l'expérimental.....	132
Tableau 20 : Essais intérieurs : géométrie et classes de résistance estimée.....	141
Tableau 21 : Essais extérieurs : géométrie et classes de résistance estimée.....	141
Tableau 22 : Tableau récapitulatif de la teneur en eau initiale des poutres : intérieur	141
Tableau 23 : Tableau récapitulatif de la teneur en eau initiale des poutres : extérieur	141
Tableau 24 : Récapitulatif des défauts macros : poutres en intérieur.....	142
Tableau 25 : Récapitulatif des défauts macros : poutres en extérieur.....	142
Tableau 26 : Détermination du comportement instantané-Comparaison avec le classement visuel : CS2.....	148
Tableau 27 : Détermination du comportement instantané-Comparaison avec le classement visuel : CS3.....	148
Tableau 28 : Tableau synthétique des évolutions climatiques en classe de service 2	150
Tableau 29 : Tableau récapitulatif des évolutions climatiques en classe de service 3.....	151
Tableau 30 :Tableau des ratios d'ouvertures des quatre amortisseurs en fonction des temps caractéristiques d'ouverture sans hygro activation	163

Tableau 31 : Comparaison de la teneur en eau à l'équilibre pour un environnement de HR = 65% et T = 20°C, et l'écart par rapport à la valeur de l'Eurocode 5 (w = 12,5%).....	174
Tableau 32 : Valeurs des paramètres climatiques pour les deux environnements	176
Tableau 33 : Amplitude, moyenne, et valeur finale de teneur en eau au cours de la dernière année	177
Tableau 34 : Moyenne des variations hydriques sur la partie centrale et sur les 20mm de peau	179
Tableau 35 : Paramètres viscoélastique du douglas et du comportement de référence.....	182
Tableau 36 : Paramètres viscoélastiques du modèle de Kelvin Voigt généralisé à 6 cellules	184
Tableau 37 : Cinq géométries d'étude	186
Tableau 38 : Paramètres climatiques pour les trois environnements	187
Tableau 39 : Informations sur le maillage	188
Tableau 40 : Humidité moyenne finale la dernière année de simulation	190
Tableau 41 : Durée d'humidification supérieure à 20% d'humidité (en jours/an) en Classe de Service 2	192
Tableau 42 : Durée d'humidification supérieure à 20% d'humidité (en jours/an) en Classe de Service 3	192
Tableau 43 : Propriétés des 8 cellules de Kelvin Voigt	195
Tableau 44 : Portées modélisées pour les 5 géométries	195
Tableau 45 : Taux d'ouverture des cellules de Kelvin Voigt du modèle viscoélastique hygro activé.....	197
Tableau 46 : Enumération des paramètres des modèles viscoélastiques hygro activés	198
Tableau 47 : Paramètres du modèle analytique (Géo1).....	199
Tableau 48 : Paramètres du modèle analytique (Géo4).....	200
Tableau 49 : Valeurs de k_{def} à 50 ans	201
Tableau 50 : Planning des essais complémentaires sur l'année 2016-2017	219
Tableau 51 : Paramètres viscoélastiques du modèle simplifié pour les 5 géométries	242

Résumé

La conception et la vérification du dimensionnement des structures en bois, pour une utilisation en Génie Civil, est régie par la norme Européenne Eurocode 5. Elle permet de dimensionner tout élément de structure en fonction du chargement qui lui est appliqué et d'hypothèses relatives à son environnement. Coordonnée particulièrement par la filière bois des pays Nordiques, cette norme est basée sur l'emploi exclusif de résineux. Or, la France détient la plus grande forêt de feuillus d'Europe. Ces essences ont leur place dans les structures bois d'aujourd'hui en apportant, par exemple, des propriétés de durabilité naturelle. Malheureusement, ces essences ne sont pas aujourd'hui considérées dans les règles de dimensionnement.

Le projet EFEUR5, financé par l'agence nationale de la recherche, a pour objectif de répondre à cette problématique en effectuant des travaux similaires à ceux déjà réalisés pour les résineux. Ainsi, les travaux présentés ont pour objectifs de comprendre et de modéliser le comportement mécanique différé des essences de feuillus français que sont le chêne, le hêtre et le peuplier. A ces trois essences, est rajouté le douglas comme essence de référence des résineux.

Nous commençons l'étude par l'analyse microscopique de la structure anatomique des essences étudiées. Cette analyse a pour objectif de mettre en avant les différences entre ces quatre essences. Le comportement mécanique différé du bois étant sensible à l'humidité de celui-ci, nous devons dans un premier temps déterminer l'évolution de l'humidité dans la section d'un élément de structure. Pour cela, il est présenté dans le second chapitre un protocole expérimental innovant de détermination des propriétés de diffusion d'une éprouvette située en extérieur. L'identification des propriétés de diffusion effectuée, nous proposons une étude de sensibilité des écarts de comportement hydrique sur un élément de structure.

Le comportement mécanique long terme est ensuite étudié par une approche couplée entre expérimentation et modélisation. Différents comportements mécaniques dépendant du temps et de l'humidité sont pris en compte et hiérarchisés. L'implémentation, dans un logiciel aux éléments finis, de l'évolution du champ hydrique 3D au sein d'un élément de structure, ainsi que des différents phénomènes physiques mis en jeu lors du fluage sont discutés. Par la suite, la conception de deux bancs de flexion quatre points à l'échelle métrique des poutres de feuillus et de douglas est détaillée. Les mesures réalisées sur plus d'une année permettent dans un premier temps d'identifier les principaux comportements. Dans un second temps, ces données permettent de déterminer les propriétés viscoélastiques hygro activées par analyse inverse. Ainsi une comparaison des propriétés viscoélastiques entre ces quatre essences est présentée.

Enfin, dans la dernière partie, les modèles développés et validés sont mis en forme pour une approche technologique. De nouveaux abaques d'équilibre d'humidité interne sont proposés essence par essence. Une méthodologie de détermination du coefficient k_{def} est proposée, et permet, par une relation très simple, d'affiner sa détermination en fonction de l'environnement réel, de la section, et de l'humidité initiale.

Mots clefs : Couplage thermo-hydrique, Comportement différé, Diffusion, Bois, Feuillus, Hygro verrou, Viscoélasticité hygro-activée.

Abstract

The design and verification of timber structures, for use in Civil Engineering, is governed by the European standard Eurocode 5. It allows to size any structure element according to the load applied to it and assumptions about its environment. Essentially coordinated by the Nordic timber industry, this standard is based on the exclusive use of softwoods. However, French country has the largest hardwood forest in Europe. Today, these species have their place in timber structures by considering, for example, natural durability properties. Unfortunately, these species are not today considered in design rules.

The EFEUR5 project, funded by the National Research Agency, aims to respond to this problem by doing work like those already carried out for softwoods. Thus, the work objectives are for understanding and modeling the long-term mechanical behavior of French hardwood species like oak, beech and poplar. In support of these species, Douglas fir is added as the conifer reference.

The study starts with the anatomical structure analysis of the of the species studied. The objective of this analysis is to highlight the differences between these four species. Because the long-term mechanical behavior depends on moisture content, we must first determine the evolution of moisture in the section of a structural element. For this, it is presented in this chapter an innovative experimental protocol for determining the diffusion properties of a test tube located outdoors. The identification of the diffusion properties carried out we propose a study of the sensitivity of the water behavior differences on a structural element.

The implementation of the evolution of moisture within a structure element, regardless of its geometry and environment, we present the different physical phenomena involved when creeping a structural element and their implementation in a code with finite elements. Next, we describe the completion of two four-point bending benches at the metric scale of hardwood and Douglas-fir beams. The instrumentation allows to analyze their deferred behavior according to their environment. In a second step, these numerical data are used to determine the hydro viscoelastic properties enabled, by inverse analysis. Thus, a comparison of the viscoelastic properties between these four species is presented.

We conclude this study with a proposal for a new approach for considering the delayed mechanical behavior of structural elements. The approach consists in the determination of the long-term behavior through a reference behavior. The prediction of long-term deflection is then defined from the average humidity of the study element. This approach makes it possible to report both the geometry of the beam and its initial humidity.

Key words: Thermo-hydric coupling, long term behavior, Heat and mass transfer, French hardwood, Hydro lock effect, Hygro-activated viscoelasticity.

Introduction générale

Nous construisons en bois depuis des millénaires. Le patrimoine ancien témoigne de la fiabilité de ce matériau qui a permis à ces édifices de traverser les époques. En France, nous avons conçu de nombreux ouvrages à base de feuillus. Cependant, les méthodes de construction s'appuyaient sur des règles empiriques qui engendraient la plupart du temps un surdimensionnement par la méconnaissance du comportement mécanique de ce matériau. Plus récemment, plusieurs pays ont développé des méthodes de dimensionnement basées sur des méthodes probabilistes. C'est ainsi que depuis la fin du XXème siècle et dans un souci d'homogénéisation des normes de calculs, les pays européens se sont regroupés pour créer une norme commune de dimensionnement et de vérification des structures en bois appelée Eurocode 5. Associé aux annexes nationales, l'Eurocode 5 propose la vérification aux Etats Limites Ultimes (E.L.U.) et de service (E.L.S.) par une approche semi probabiliste. Or, tous les développements, hypothèses de comportements et valeurs des paramètres sont exclusivement basés sur l'emploi de résineux, en oubliant le potentiel des feuillus.

La ressource forestière française est composée de résineux de qualité, mais également de feuillus, très peu valorisés en bois d'œuvre bien qu'ils représentent les deux tiers de la ressource sur pied. Au-delà de cette quantité potentiellement disponible, les feuillus représentent une diversité de comportement mal exploitée, notamment en ce qui concerne la durabilité naturelle.

Ce travail fait partie du projet ANR EFEUR5 (Comportements structurels des Essences de bois Feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux EURocodes 5). Ce projet collaboratif étudie particulièrement les principaux bois de feuillus de la ressource forestière française, le chêne, le hêtre et le peuplier en vue d'une intégration dans l'Eurocode 5. Le projet vise à caractériser les coefficients de correction à intégrer dans les procédures de vérification du comportement mécanique instantané de ces trois essences et des assemblages de type tige. Une des tâches a également pour objectif d'étudier les relations entre la qualité des grumes et celle des sciages

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéresserons particulièrement au comportement mécanique différé des feuillus, et plus particulièrement des déflexions des pièces fléchies dans le cadre de l'E.L.S. Formulé d'un point de vue strictement réglementaire (au sens de l'Eurocode 5), il convient de confirmer (ou d'infirmer) si les coefficients de déformation k_{def} (proposés pour les résineux) peuvent être appliqués au feuillus. Ce coefficient traduit une amplification forfaitaire de la déformation instantanée afin de traduire le comportement de fluage à long terme en intégrant les conditions d'environnement et la durée d'application des charges. Il englobe les effets de plusieurs phénomènes mécaniques tels que viscoélasticité hygro-activée, déformations hygrothermiques ou encore fissuration.

Cette étude permettra, au-delà d'une réponse purement comparative, de réétudier certaines propositions de l'Eurocode 5 pour déterminer le comportement hydrique et mécanique différé du bois.

A ces trois essences de feuillus est ajoutée l'essence de douglas comme résineux de référence à l'Eurocode 5.

Après une analyse de la ressource forestière française, nous proposons, dans le premier chapitre, une revue bibliographique de la structure anatomique des bois. Cette étude a pour

objectif de mettre en avant les différences de structures anatomiques entre essences qui pourraient expliquer des écarts de comportement hydrique et mécanique.

Comme la plupart de ses propriétés physiques et mécaniques, le comportement différé du bois est sensible à son l'humidité. Il est alors nécessaire de disposer d'un modèle de comportement permettant de prédire l'évolution du champ hydrique tri-dimensionnel au sein d'un élément de structure orthotrope soumis à un environnement climatique variable. Nous effectuons, dans le second chapitre, un état de l'art des différents travaux concernant le transfert d'humidité dans un élément en bois couplé à des variations de température. Après une remise en question de la détermination de l'humidité d'un élément de structure par l'Eurocode 5, nous nous intéressons dans un second temps à l'identification des propriétés de diffusion des quatre essences d'étude. Habituellement déterminées à partir d'essais en ambiance contrôlée, nous proposons un protocole expérimental et numérique permettant de déterminer ces propriétés dans des ambiances variables réelles. Cette approche nécessite la prise en compte des différents couplages entre transfert de chaleur et transfert de masse. Enfin, ce chapitre propose une simplification des champs hydriques tridimensionnels en vue d'une implémentation du couplage hygro-mécanique dans un calcul par éléments finis de la réponse globale d'un élément de structure soumis à un chargement de flexion à long terme.

L'analyse et l'identification du comportement mécanique différé des essences de feuillus fait l'objet du troisième chapitre. Dans un premier temps, nous présentons l'état de l'art sur les différents phénomènes mécaniques mis en jeu lors d'un essai de flexion en ambiance variable. Nous évoquerons le comportement viscoélastique, le couplage entre état mécanique et humidité à travers, d'une part, les effets de retrait-gonflement et, d'autre part, la mécano-sorption. Nous y décrivons également l'implémentation de ces phénomènes dans une approche numérique aux éléments finis. Une validation du modèle, sur la base d'un essai de laboratoire y est présentée. Une étude paramétrique permet de quantifier l'influence de chaque phénomène modélisé, et ce, à l'échelle d'éléments structuraux. Une campagne expérimentale est enfin proposée employant des poutres d'échelle métrique. La conception du dispositif expérimental est présentée ainsi que les résultats de mesure sur deux bancs de flexion quatre points situés en extérieur et en intérieur. La confrontation des résultats expérimentaux avec différents niveaux de modélisation permet de hiérarchiser l'effet des divers phénomènes long terme présents dans la littérature. Ce chapitre se conclue par la détermination des propriétés viscoélastiques hygro activées des poutres.

Le dernier chapitre concerne une mise en forme des travaux en vue d'une intégration technologique de leurs résultats. Ces apports portent aussi bien sur la diffusion de l'eau dans le bois que sur le comportement mécanique différé. En effet, l'étude de l'équilibre hygroscopique se fait actuellement au travers d'un unique abaque proposé par l'Eurocode 5. L'approche thermodynamique présentée dans le chapitre 2 nous permet de proposer de nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique pour chaque essence. Dans un second temps, nous proposons une étude de sensibilité des écarts de comportements hydriques entre les quatre essences étudiées. Nous y montrons ainsi l'influence toute relative de ces différences de comportement sur un élément de structure. La modélisation du comportement différé en flexion ainsi que ces limites étant présentés dans le chapitre 3, nous proposons au sein de ce

dernier chapitre une nouvelle approche de comparaison inter-essence. Nous pouvons ainsi conclure sur les différences de coefficient k_{def} envisageables entre les quatre essences d'études. Enfin, cette réflexion nous permet de proposer une approche plus précise de détermination du comportement différé en fonction de son environnement, de sa section et de son humidité initiale. Cette étude aboutit à une proposition de détermination du k_{def} suffisamment simple pour être intégrée dans une approche Eurocode 5.

Une conclusion générale est proposée ainsi qu'une analyse des perspectives à court et à plus long terme permettant d'enrichir ce travail.

Remerciements : Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR EFEUR5 soutenu par l'Agence Nationale de Recherche ANR-15-CE08-0027-04.

Chapitre I. Le matériau bois de la ressource à la construction

I.1. Contexte d'EFEUR5 : Choix des essences	27
I.1.1. La ressource forestière en France	27
I.1.2. La construction bois.....	27
I.1.3. Domaine d'action du projet EFEUR5	28
I.2. Connaissance du matériau bois	29
I.2.1. Origine et fonctions du bois	29
I.2.2. Anatomie du bois.....	29
I.2.2.1. L'échelle macroscopique.....	30
I.2.2.2. Echelle microscopique	31
I.2.2.3. Ultra structure de la paroi cellulaire	37
I.2.3. Comportement mécanique instantané	39
I.2.3.1. Loi de Hooke généralisée.....	39
I.2.3.2. Données bibliographiques.....	40
I.2.3.3. Influence de la masse volumique	40
I.2.3.4. Influence de la température et de la teneur en eau	41
I.2.3.5. Retrait gonflement.....	42
I.2.4. Comportement mécanique différé du bois selon l'Eurocode 5	43
I.3. Conclusion	44

I.1. Contexte d'EFEUR5 : Choix des essences

I.1.1. La ressource forestière en France

Avec une production annuelle de 88 Mm³(FCBA, 2018a) et une diversité d'essences susceptibles d'être valorisables, la France détient la première forêt de feuillus d'Europe. La répartition de cette ressource forestière s'effectue sur tout le territoire, avec un ratio volumique de 65% de feuillus pour 35% de résineux (FCBA, 2018a). La Figure 1 représente la répartition surfacique des essences majoritaires.

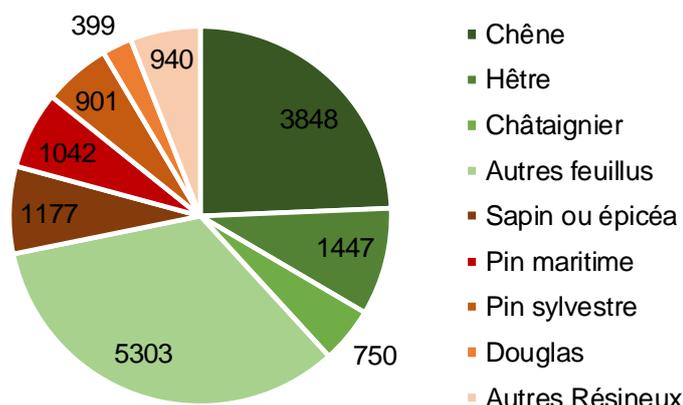


Figure 1 : Répartition surfacique des essences en France (x10³ ha) (FCBA, 2018a)

Cette répartition de feuillus leur permet d'être présents partout sur le territoire français contrairement aux résineux, tel que le représente la Figure 2.

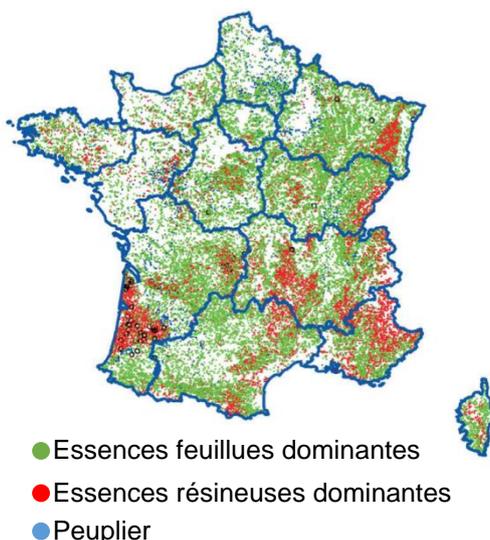


Figure 2 : Répartition de la forêt Française par type d'essence (FCBA, 2018b)

I.1.2. La construction bois

Le marché de la construction est l'acteur majoritaire dans la consommation de cette ressource. Cependant le marché français s'approvisionne essentiellement en bois de résineux. C'est ainsi que dans notre pays, seulement 27% du bois d'œuvre récolté sur grume provient de feuillus (FCBA, 2018b). Au-delà des contraintes économiques, l'utilisation des feuillus souffre des

lacunes importantes concernant l'exploitation, l'évaluation mécanique du bois brut et la fabrication de produits reconstitués à base de feuillus.

Ainsi, selon les chiffres édités par le memento 2018 du FCBA (FCBA, 2018a), la filière bois française consommait en 2016 les deux tiers de l'accroissement naturel de la ressource forestière de résineux, et ce, sans compter les bois d'importation. De ce fait, et par l'augmentation de l'intérêt porté sur l'utilisation de ressources locales, de nombreuses actions sont menées pour proposer des solutions d'approvisionnement et de construction avec cette ressource en feuillus.

I.1.3. Domaine d'action du projet EFEUR5

L'hégémonie de l'utilisation des résineux dans la construction a mené les normes de construction européenne, dont le code de calculs Eurocode 5, à ne considérer que les données bibliographiques du comportement mécanique de ces essences. L'intérêt grandissant pour les essences de feuillus mène logiquement à la réactualisation de ces normes en effectuant des études mécaniques similaires à celles effectuées sur les essences de résineux. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet EFEUR5 (Comportements structurels des Essences de bois Feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux EURocodes 5). Ce programme cible plus particulièrement les essences de chêne, de hêtre et de peuplier, essences majoritaires sur le territoire, et ce, avec un fort potentiel pour la construction.

Ce projet vise à développer des outils et des connaissances nécessaires à la mise sur le marché de produits structurels en feuillus français. L'objectif est de fiabiliser l'utilisation de ces essences pour les structures en bois justifiées selon les règles Eurocode 5 par les validations ou des corrections nécessaires de la norme NF EN 338. Bien que quelques rares études, sur quelques essences feuillues existent ((Bahar et al., 2016; Berthelot et al., 2009; Constant et al., 2003; Hunt, 1984; Rousset, 1999),...), elles doivent être complétées par de nouvelles données scientifiques et expérimentales. Plusieurs incertitudes sont à lever, dont :

- La connaissance du comportement à long terme,
- La connaissance des propriétés mécaniques dites secondaires,
- La définition des modèles de calcul des assemblages,
- L'anticipation des propriétés mécaniques : connaissance de l'impact du développement de l'arbre sur les propriétés du matériau, lien entre anatomie et physique.

Le projet se construit autour des savoir-faire et des compétences scientifiques développées sur le matériau bois et les structures bois par les laboratoires LERMAB (Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le MATériau Bois) d'Epinal, GC2D (Génie Civil, Diagnostic et Durabilité) d'Egletons, LMGC (Laboratoire de Mécanique et Génie Civil) de Montpellier et l'UMR SILVA de Nancy. Le centre de transfert de technologie CRITT Bois d'Epinal coordonne ce projet, prépare le transfert des résultats et oriente les travaux pour des débouchés économiques majeurs pour la filière bois.

Cette thèse s'inscrit dans la tâche 1 de ce projet et vise à renseigner spécifiquement sur les éventuelles différences de comportement différé entre résineux et feuillus dans le cadre d'une vérification réglementaire.

Dans ce premier chapitre, nous effectuons une analyse microscopique des bois, afin de répondre à la problématique posée. Nous étudierons la structure des essences de feuillus ainsi que l'essence de résineux prise comme référence dans cette étude, le douglas.

I.2. Connaissance du matériau bois

I.2.1. Origine et fonctions du bois

Les végétaux ligneux ont la particularité d'être constitués majoritairement de cellulose, d'hémicelluloses, et de lignine. Les variations de ces trois constituants d'une essence à l'autre, en nature comme en quantité, est en partie à l'origine de la variabilité de leurs propriétés physiques. Dans des proportions beaucoup plus faibles, le bois est constitué d'extractibles dont l'influence est primordiale sur la durabilité naturelle, mais également sur le comportement différencié (Brémaud, 2006; Montero, 2010).

La structure du bois fait de celui-ci un matériau poreux, hétérogène, anisotrope, hygroscopique et perméable. (Jodin, 1994)

Ainsi, les cellules du bois jouent trois rôles bien précis dans l'arbre :

- Il est le tissu conducteur de la sève brute ascendante jusqu'à la cime de l'arbre,
- Il est le tissu de soutien et de contrôle de la posture de l'arbre
- Et enfin, il est le tissu de réserve, de restitution, d'élaboration et de transformation chimique et de défense.

I.2.2. Anatomie du bois

La description de l'anatomie du bois peut se faire selon trois échelles différentes : l'échelle macroscopique, microscopique et moléculaire. (Harrington, 2002). Cependant, dans le cadre de ce travail, seules les deux premières échelles seront abordées.

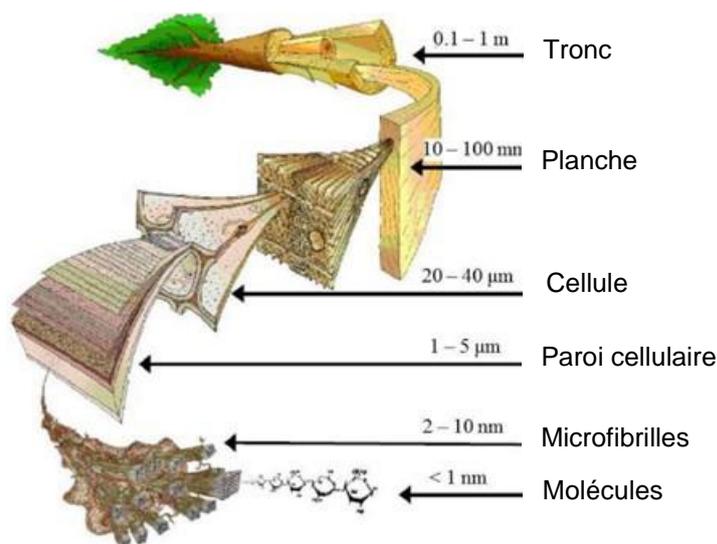


Figure 3 : Représentation des trois structures du bois (Harrington, 2002)

I.2.2.1. L'échelle macroscopique

I.2.2.1.1. La décomposition d'un tronc

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

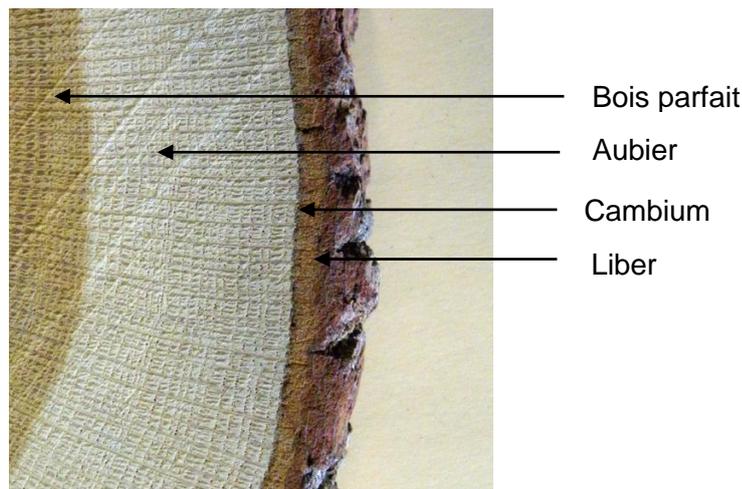


Figure 4: Représentation des différentes couches composant le tronc d'arbre

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

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

Au fur et à mesure que l'arbre grandit en diamètre, de nouvelles cellules d'aubier sont créées, et, dans des quantités à peu près identiques, d'autres meurent pour former le bois de cœur. Cependant, la proportion aubier/bois de cœur peut être assez variable d'une essence à l'autre.

Il est à noter que pour un arbre vivant, sa partie vivante (aubier) est souvent plus résistante aux attaques des insectes et champignons que le bois de cœur, car les cellules de parenchymes le protègent. Cependant, dans le cas du bois mis en œuvre, l'aubier, ne pouvant plus se protéger, ne résistera pas aux attaques. Au contraire, le bois de cœur composé d'aubier différencié résistera aux attaques grâce à son propre système de protection élaboré au moment de la duraminisation (transformation physique des cellules, tanins, ...)

I.2.2.1.2. Plans d'orthotropie et plans ligneux

Le bois est un matériau orthotrope du fait de sa structure cellulaire circulaire qui forme les cernes et de l'orientation de ces fibres. Il possède trois plans de symétries orthogonaux. Il a donc un comportement mécanique, thermique, et hydrique différent selon les trois axes de référence, Figure 5.

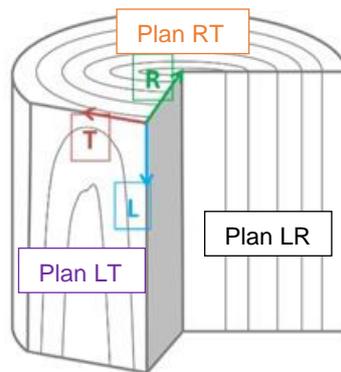


Figure 5 : Anisotropie du bois, axes et plans de références (Trouy, 2016)

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

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

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

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

I.2.2.2. Echelle microscopique

Nous nous intéressons à la composition chimique et microscopique de l'arbre. Nous utiliserons cette étude anatomique pour comprendre les phénomènes de transfert hydrique et de comportement mécanique présentés dans la suite de cette étude.

I.2.2.2.1. Constitution chimique

Le bois est un polymère dont sa matière organique est composée (dans l'ordre décroissant des quantités massiques) de carbone, d'oxygène, d'hydrogène d'azote et d'extractibles. Ce

matériau est lui-même composé par trois polymères, de substances organiques et minérales, dont leurs proportions varient d'une essence à l'autre :

- La cellulose est le principal constituant du bois, avec une proportion allant de 40 à 50%. Il est le principal responsable des propriétés physiques du matériau. De plus, ce polymère a la particularité d'être hydrophile, propriété caractérisée par des liaisons hydrogènes sur lesquelles viendront se greffer des molécules d'eau.
- L'hémicellulose, constituant du bois avec une proportion allant de 20 à 40%, possède une constitution moléculaire proche de la cellulose. Il est également hydrophile.
- La lignine, présent à 20-30%, a le rôle de colle inter fibres. Contrairement aux autres constituants, elle a la particularité d'être hydrophobe. La proportion de ce polymère varie beaucoup entre résineux et feuillus.
- Les substances organiques et minérales, en faible proportion (0 à 10%), sont les extractibles, tels que les tanins, les composantes aromatiques des huiles, les alcools, ou encore les minéraux (calcium, manganèse, potassium et sodium). Ils peuvent influencer le transfert hydrique dans le matériau.

I.2.2.2. Parois cellulaires

I.2.2.2.1. Les résineux

Les résineux, de l'embranchement des *Pinophyta*, sont désignés ainsi en raison de leur forme conique. Leur plan ligneux est simple. Il est formé de trachéides orientées dans le sens longitudinal. Elles sont allongées (1 à 8 mm de long) et de sections transversales polygonales et creuses (0,25 à 0,75 mm de diamètres). Dans le sens radial, au cours d'une saison, la dimension de la trachéide diminue, tandis que la paroi subit une augmentation d'épaisseur (dans le sens du bois initial vers le bois final). Les fluides (sève brute), situés au niveau des lumens, peuvent passer d'une trachéide à l'autre grâce aux ponctuations aréolées en majorité présentes sur les faces radiales des trachéides (Venet, 1986) (Figure 6).

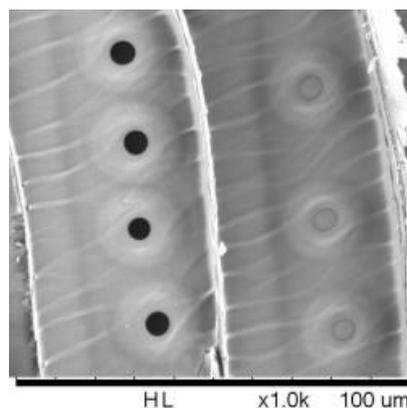


Figure 6: Ponctuations aréolées vues de face sur une coupe radiale (douglas) vue au MEB (Trouy, 2016)

Les essences de douglas, épicéa, sapin, pin, mélèze, etc. font partie de cette famille. La structure microscopique du bois de résineux est présentée en Figure 8. Il est à noter que, pour les résineux des régions tempérées, les trachéides formées au début de la saison de végétation (printemps) ont un rôle de conduction marqué et celles formées à la fin de la saison

de végétation ont un rôle de soutien marqué. Cette caractéristique permet de différencier facilement les cernes du bois, Figure 7.

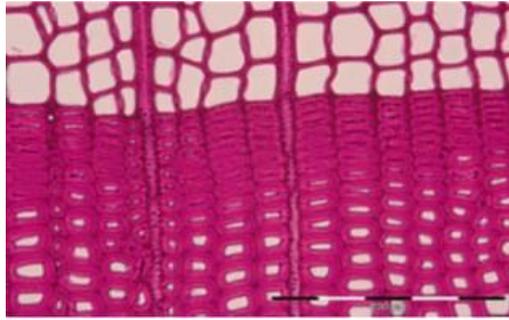
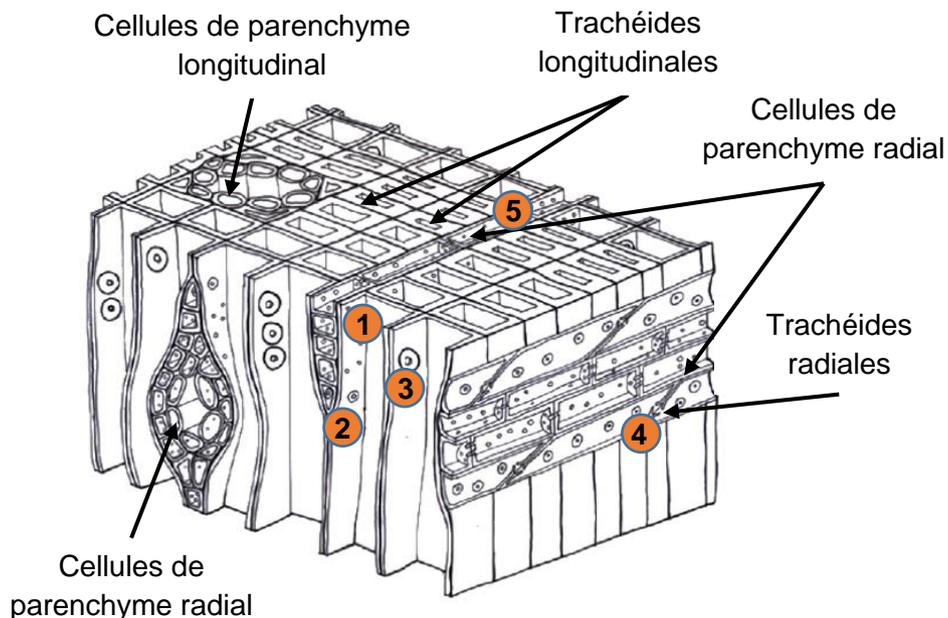


Figure 7 : Coupe transversale de sapin (Trouy, 2016)

Enfin, une croissance rapide induit un accroissement de la largeur de cerne dû à une augmentation de la quantité de bois initial (bois peu dense). Ainsi, pour un arbre ayant une croissance rapide, la texture du bois (rapport entre la largeur du bois final et la largeur du cerne) est faible ainsi que sa densité.



- (1) : Ponctuation entre trachéides longitudinales et cellules de parenchyme radial
- (2) : Ponctuation aréolées entre trachéides longitudinale et trachéides radiale
- (3) : Ponctuation aréolées entre trachéides longitudinales
- (4) : Ponctuations aréolées entre trachéides radiales
- (5) : Ponctuations entre cellules de parenchyme radial

Figure 8 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les résineux (Trouy, 2016)

I.2.2.2.2. Cas particulier du douglas

Le douglas, de nom latin *Pseudotsuga menziesii*, est une essence originaire des Rocheuses d'Amérique du Nord fortement implantée en France depuis quelques décennies. C'est un bois à aubier différencié et à la texture forte qui laisse bien apparaître les zones d'accroissements. La largeur des cernes est très variable suivant le climat et les conditions de croissance. Le douglas est une des rares essences de résineux des zones tempérées qui est utilisable en classe d'emploi 3 selon la norme NF EN 335 (AFNOR, 2013a) avec un classement de

résistances mécaniques allant de C18 à C30 (AFNOR, 2012a) et un module d'Young proche de 17 GPa à une humidité interne de 12%(CIRAD, 2012).

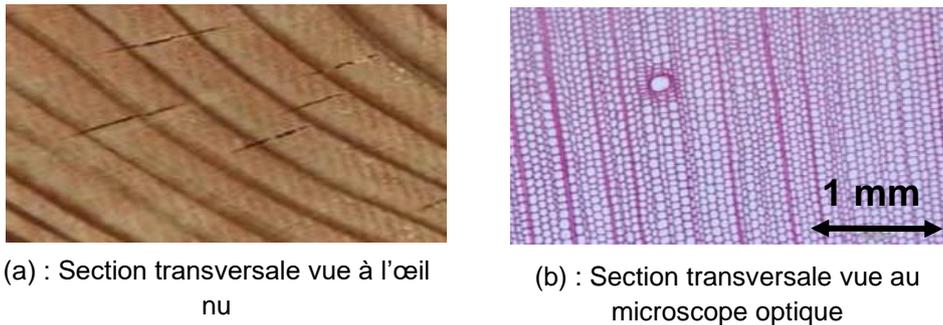


Figure 9 : Section transversale du douglas selon deux échelles (Trouy, 2016)

I.2.2.2.3. Les feuillus tempérés

Ils désignent les arbres appartenant à la classe des dicotylédones en raison de leurs feuilles plates à nervation ramifiée. Ils présentent une structure plus complexe que les bois de résineux. Entre autres, chez les feuillus et les résineux, le rôle de soutien de l'arbre est effectué par les trachéides, alors que pour les résineux, elles assurent également le rôle de conduction de la sève. Ce sont les vaisseaux qui assurent majoritairement cette fonction chez les feuillus. La circulation de la sève brute se fait dans ces éléments construits par superposition, ouverts à leurs extrémités (perforations simples ou scalariformes), Figure 10.



(a) : Perforation simple de l'érable vue au MEB

(b) : Perforation scalariforme du bouleau vue au MEB

Figure 10 : Perforation simple (tel que l'érable, le hêtre et le peuplier) et perforation scalariforme (tel que le bouleau, le hêtre et le chêne) vue au MEB (Trouy, 2016)

Les vaisseaux communiquent avec leurs éléments voisins par leurs ponctuations latérales. La dimension d'un vaisseau varie beaucoup entre essence et selon sa disposition lors des accroissements annuels. On peut retenir, qu'en moyenne, un vaisseau fait 1 mm de long pour un diamètre allant de quelques dizaines à quelques centaines de μm . Ainsi, en fonction de la disposition de ces pores dans les accroissements annuels, on peut classer le bois de feuillus en deux groupes (Jodin, 1994) :

- Le bois à zone initiale poreuse (Ex : Chêne, frêne, ...) : Dans les régions tempérées, les trachéides et vaisseaux formés au début de la saison de végétation (printemps) ont surtout un rôle de conduction de la sève brute. Ceux, formés à la fin de la saison de végétation, ont un rôle de soutien. Ainsi, les vaisseaux du bois initial sont plus grands que ceux du bois final. Lorsque les cernes sont plus larges, c'est le bois final (le plus dense) qui est formé en plus grande quantité. De ce fait, plus la croissance de l'arbre

et rapide, plus la texture est forte (cerne large), et donc plus la densité du bois est importante, Figure 11.

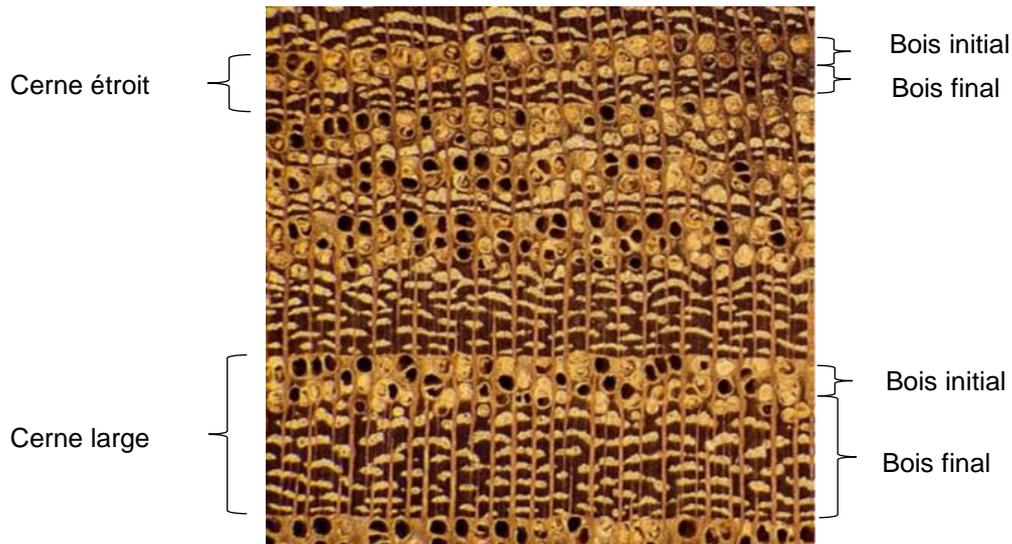


Figure 11 : Coupe transversale d'orme, avec présence de différentes largeurs de cernes (Trouy, 2016)

- Le bois de feuillus à pores diffus ou feuillus homogène (Ex : peuplier, hêtre, bouleau, ...): Le diamètre des vaisseaux est presque identique, quel que soit l'accroissement annuel, Figure 12. Il y a donc peu de différences entre le bois initial et le bois final. Ainsi, la largeur de cerne n'a que très peu d'influence sur la densité de l'arbre.

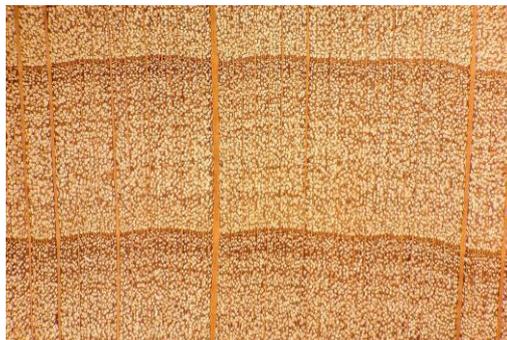
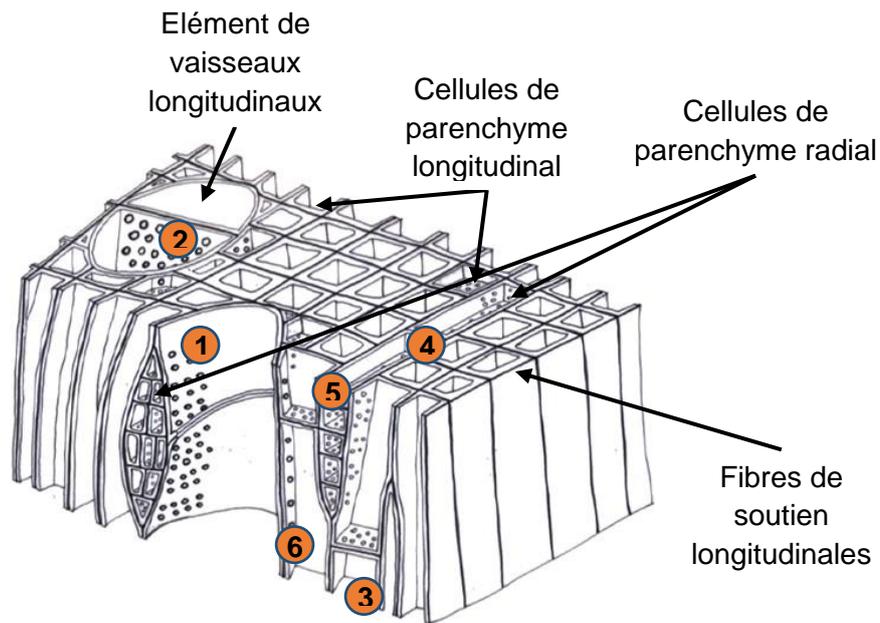


Figure 12 : Coupe transversale du hêtre (Trouy, 2016)

Une représentation schématique du plan ligneux de feuillus est donnée en Figure 13.



- (1) : Ponctuations rayon/vaisseau
- (2) : Ponctuations intervasculaire
- (3) : Ponctuations entre cellules de parenchyme longitudinal
- (4) : Ponctuations entre cellules de parenchyme radial
- (5) : Ponctuations entre parenchyme radial et parenchyme longitudinal
- (6) : Ponctuations entre parenchyme longitudinal et vaisseau

Figure 13 : Les cellules de bois formées par le cambium chez les feuillus (Trouy, 2016)

I.2.2.2.4. Cas particulier du chêne

Dans cette étude, nous nous intéresserons au chêne sessile, de nom latin *Quercus Robur*. C'est un bois à zone initiale poreuse de forte densité (0,55 à 0,85). Le diamètre de ses vaisseaux peut aller de 20 μm dans le bois final jusqu'à 300 à 500 μm pour le bois initial, Figure 14. Cette essence a de nombreux avantages de par sa densité et son anatomie. La distribution usuelle des classes de résistance mécanique, donnée dans la norme NF EN 1912 Juin 2012 (AFNOR, 2012a), sont réparties de D18 à D30. Son module d'Young moyen avoisine les 13 GPa à une humidité interne de 12% (CIRAD, 2012). A la vue de sa densité et du procédé de duraminisation, le duramen de chêne est utilisable en classe d'emploi 3 sans traitement (AFNOR, 2013a).

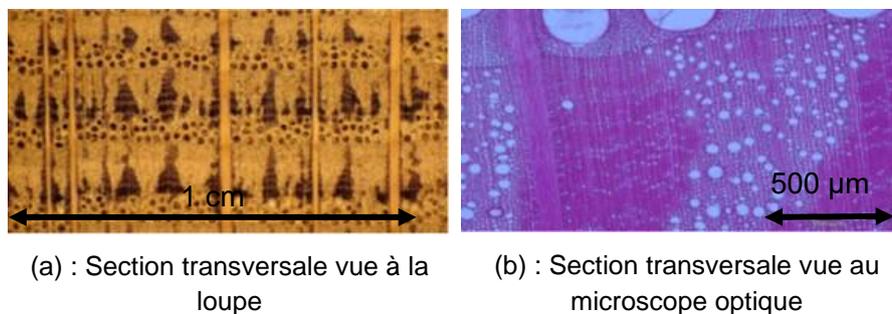


Figure 14 : Section transversale du chêne selon deux échelles (Trouy, 2016)

I.2.2.2.5. Cas particulier du hêtre

De nom latin *Fagus Sylvatica*, le hêtre est un bois homogène à pores diffus et de forte densité (0,6 à 0,7). Ses vaisseaux sont assez fins avec des diamètres allant de 50 à 75 μm , Figure 15. Son grain fin le rend très apprécié en menuiserie. Cependant, il est rarement utilisé dans la construction à cause, principalement, de sa faible résistance aux attaques biologiques de par son aubier non différencié. La norme NF EN 1912 juin 2012 (AFNOR, 2012a), classe le hêtre de D35 à D40 pour un module d'Young moyen voisin de 15GPa pour une humidité interne de 12% (CIRAD, 2012).

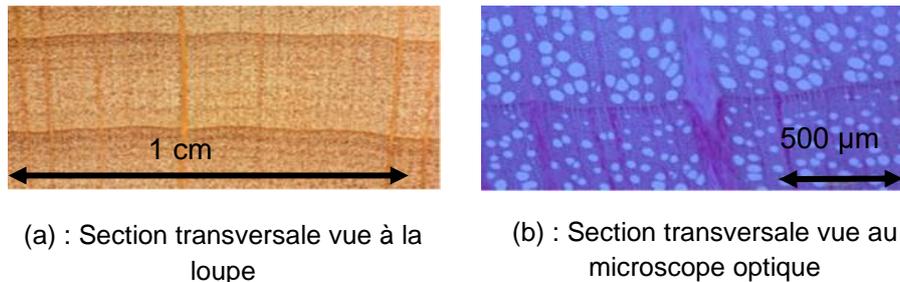


Figure 15: Section transversale du hêtre selon deux échelles (Trouy, 2016)

I.2.2.2.6. Cas particulier du peuplier

Le bois de peuplier, de nom latin *Populus euramericana* 'Robusta', appartient à la famille des Salicacées. C'est un bois à pores diffus (tendance zone semi poreuse) et de faible densité (0,32 à 0,55), Figure 16. Son accroissement, de forme irrégulière, est souvent large avec des cernes de croissance de plus d'un centimètre chez les peupliers de culture (Venet, 1986). Les différents travaux de recherche sur plusieurs peupliers ont été menés pour caractériser son comportement mécanique intrinsèque (Berthelot et al., 2009; Guitard, 1987). En général, pour une humidité interne de 12%, le peuplier a un module d'Young longitudinal moyen de 9GPa. Cependant, la norme NF EN 1912 juin 2012 (AFNOR, 2012a) le classe de C18 à C27. Il est à noter que cette essence est considérée par la norme comme un résineux.

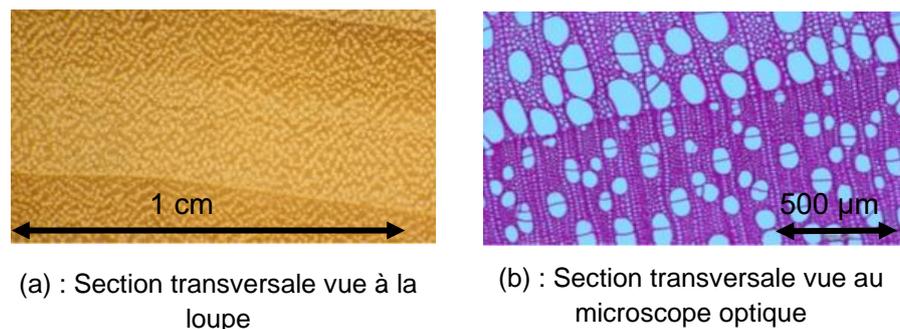


Figure 16 : Section transversale du peuplier selon deux échelles (Trouy, 2016)

I.2.2.3. Ultra structure de la paroi cellulaire

Chaque cellule se décompose en deux parties. Au centre, se situe le lumen qui représente le vide à l'intérieur de la cellule. C'est là où passe la sève brute. Autour de cet espace, se trouve la paroi cellulaire qui est la structure de la cellule. C'est une structure lamellaire complexe qui est comparable à un composite avec une armature et une matrice. Elle peut être également assimilée à un matériau multicouche tel que du contreplaqué car les couches sont à fils croisés (Kollmann and Côté, 1968). Ces dernières sont définies en Figure 17.

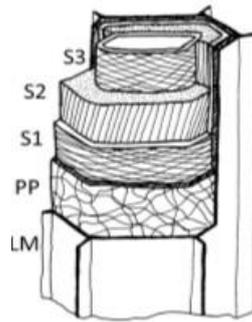


Figure 17 : Représentation de la décomposition de la paroi cellulaire (Trouy, 2016)

- La lamelle moyenne (LM) est la paroi commune aux cellules voisines. Elle est non fibrillaire, c'est à dire qu'elle ne contient pas de cellulose. Elle est fortement constituée de lignine (dans les cellules ligneuses) ou de pectine (dans les cellules non ligneuses). Elle joue le rôle de ciment intercellulaire.
- La paroi primaire (PP) est une paroi très fine et extensible car elle contient un réseau lâche de fibrilles de cellulose.
- La paroi secondaire (S1 et S3) est composée de deux couches très fines S1 et S3 caractérisées par la présence de fibrilles de cellulose presque à l'horizontale, comme le montre la Figure 18. On peut voir quelques lambeaux de la couche S3 qui se décrochent de la paroi cellulaire.

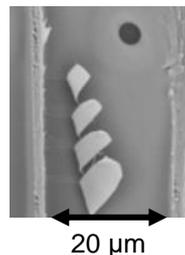


Figure 18 : Coupe radiale de pin sylvestre avec décrochement de la paroi S3, vue au MEB (Trouy, 2016)

- La paroi secondaire (S2) est la plus épaisse. Elle représente 80% de la masse de la trachéide. Elle est composée de fibrilles de cellulose presque verticales et parallèles. Cette couche a une influence primordiale sur les propriétés mécanique et hydrique du matériau. L'angle, formé par les microfibrilles et la verticale, est appelé angle de microfibrille (AMF), Figure 19.

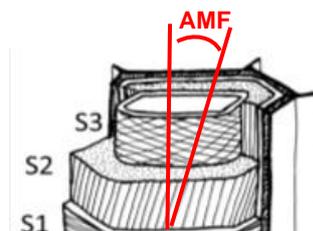


Figure 19 : La couche S2 : représentation de l'AMF

Plus cet angle est grand, plus le bois est souple (bois juvénile). L'angle de microfibrille est également la cause de l'anisotropie des phénomènes de retrait-gonflement (Pittet, 1996). De

plus, l'inclinaison de ces microfibrilles semblent expliquer les propriétés physiques du bois dans le sens longitudinal (Clair, 2001; Gril, 1993; Yamamoto, 1999)

La Figure 20 permet de représenter l'évolution des trois constituants majoritaires de la paroi cellulaire dans son épaisseur. La lignine est un polymère hydrophobe qui permet de rigidifier la paroi face aux efforts subis par l'arbre. Elle permet également de limiter le risque d'implosion de la paroi dû au mécanisme de montée de la sève brute dans l'arbre. Enfin, elle permet l'adhésion des cellules entre elles. L'hémicellulose et la cellulose sont des polysaccharides. Ces polymères, situés surtout en surface, la rendent hydrophile permettant ainsi une bonne adhésion en surface des molécules d'eau.

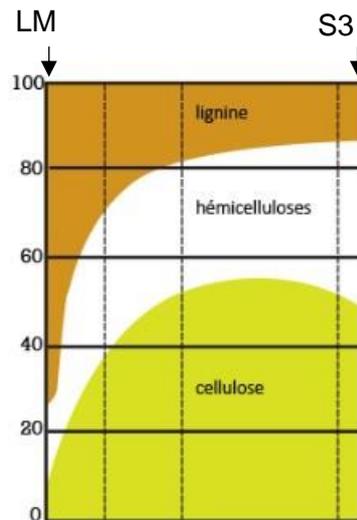


Figure 20 : Diagramme de répartition des trois composants principaux du bois dans l'épaisseur de la paroi cellulaire (Panshin and De Zeeuw, 1980)

I.2.3. Comportement mécanique instantané

Nous venons de voir la structure micro et macroscopique du matériau bois. Nous avons pu mettre en avant son caractère orthotrope. Nous allons maintenant nous intéresser à l'influence de ses caractéristiques, situées à plusieurs échelles, sur le comportement mécanique instantané du bois.

I.2.3.1. Loi de Hooke généralisée

Le matériau bois, soumis à des contraintes ou des déformations, présente un comportement instantané élastique. C'est ainsi qu'en 1663, Robert Hooke énonce une loi linéaire reliant la déformation à la contrainte via le module d'élasticité. De façon plus générale, la loi de Hooke s'écrit, pour toutes symétries matérielles, de la façon suivante :

$$\sigma_{kl} = E_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij} \quad \text{ou} \quad \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (1.1)$$

ε_{ij} représente les composantes du tenseur de déformation, σ_{kl} , les composantes du tenseur de contrainte. Enfin, E_{ijkl} et S_{ijkl} sont les composantes respectives des tenseurs de rigidité et de complaisance élastiques.

Le matériau bois admet une orthotropie selon les directions longitudinale, radiale et transversale. Ainsi, la matrice de complaisance élastique est composée de trois modules de cisaillement et de 6 coefficients de

Poisson dans les différents plans de symétrie. Dans une notation vectorielle, le comportement élastique s'écrit ainsi :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

I.2.3.2. Données bibliographiques

Pour une approche ingénieur, et afin de comparer les propriétés mécaniques entre essence, plusieurs essais de caractérisations ont été réalisés. La littérature propose des fiches de caractérisation de ces essences. Les caractéristiques mécaniques proposées par le Cirad (Gérard et al., 2011) sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés physiques et mécaniques des trois essences de feuillus et du douglas (résineux de référence) selon le Cirad (Gérard et al., 2011) à 12% d'humidité

	Chêne	Hêtre	Peuplier	Douglas
Diamètre (cm)	40 à 80	40 à 90	30 à 60	50 à 80
Densité	0,74	0,71	0,45	0,54
Retrait tangentiel	9,7% ± 0,9	11,6% ± 1,2	8,3%	6,9% ± 1,2
Retrait radial	4,5% ± 0,5	5,7% ± 0,9	4,8%	4,7 ± 0,4
Point de Saturation des Fibres	31%	32%	30%	27%
Contrainte de rupture en compression (MPa)	58 ± 7	57 ± 6	35	50 ± 6
Contrainte de rupture en flexion (MPa)	105 ± 15	111 ± 9	62	91 ± 6
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	13300 ± 1750	15300 ± 1050	9800	16800 ± 1550
Classe d'emploi	Classe 3-4	Classe 2	Classe 1	Classe 2-3

Nous pouvons remarquer que ces propriétés sont très variables d'une essence à une autre. De plus, il existe une variabilité intra spécifique même sur le bois sans défaut. Cette variabilité sera encore accrue lorsqu'on s'intéressera au bois d'œuvre présentant des défauts macroscopiques.

I.2.3.3. Influence de la masse volumique

La densité du bois est souvent considérée comme indicateur de la qualité du matériau, voir un estimateur des propriétés du matériau bois. En effet, la densité représente la proportion de matière ligneuse et de vide (aux extractibles près). Cependant, la densité ne rend pas compte

de la variation d'élasticité de la matière ligneuse en elle-même. De nombreux essais de caractérisation de la matrice de complaisance élastique (pour différentes essences de bois) ont permis de montrer la variabilité de chacune de ses composantes. Entres autres, Guitard et Amri (Guitard and El Amri, 1987), Natterer et Sandoz (Natterer and Sandoz, 1987) et Brémaud (Brémaud, 2006), ont corrélé la masse volumique au module d'élasticité du bois. La Figure 21 représente la relation entre la densité ou masse volumique et le module d'Young longitudinal de plusieurs essences de feuillus et de résineux. Les ajustements de Guitard et Amri, définissant les « bois standards » de feuillus et de résineux, sont également présentés.

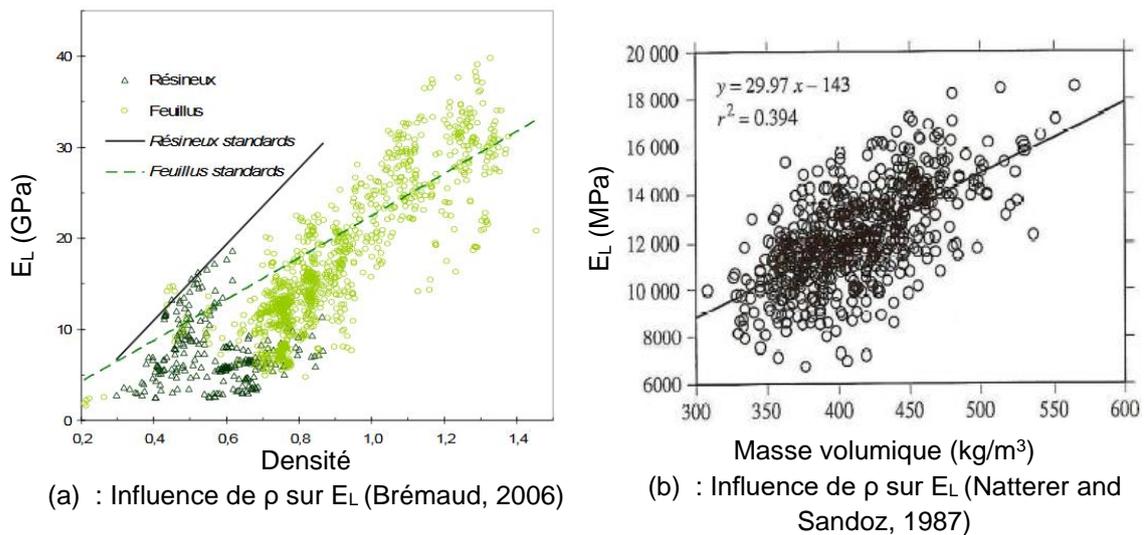


Figure 21 : Influence de la densité sur le module d'Young longitudinal

On peut remarquer une forte dispersion, que ce soit au sein d'une même famille (feuillus/résineux) ou entre les deux familles. Cette dernière remarque coïncide avec les résultats de Guitard représentés à travers les droites de régression de feuillus et résineux « standard ».

I.2.3.4. Influence de la température et de la teneur en eau

Si au sein d'une même essence, les propriétés élastiques du matériau bois peut varier fortement, leur dépendance à la température et à la teneur en eau sont encore plus importantes. En effet, plusieurs auteurs (Félix, 1990; Guitard, 1987; Kollmann and Côté, 1968; Salmen, 1982) ont montré une dépendance linéaire à ces variables d'état, Figure 22.

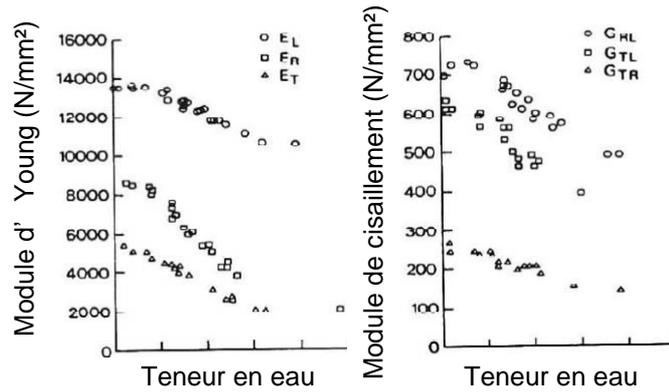


Figure 22 : Influence de l'humidité interne sur les composantes élastiques de l'épicéa Sitka (Félix, 1990)

Ainsi, Guitard (Guitard, 1987) propose d'apporter une correction aux composantes de la matrice de complaisance pour une teneur en eau différente de 12% et une température de 20°C. Cette correction s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{1}{S_{ij}} = \frac{1}{(S_{ij})^0} \cdot [1 - a_{ij} \cdot (w - 12)] \cdot [1 - b_{ij} \cdot w \cdot (T - 12)] \quad (1.3)$$

w est la teneur en eau exprimée en pourcentage et T la température en degré Celsius. Les constantes a_{ij} et b_{ij} sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Corrections de la teneur en eau et de la température sur la matrice de complaisance

Direction	LL	RT				RT+L			
		11	22	33	23	44	55	66	12
a	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
b	$9 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$	$27 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$	$13 \cdot 10^{-5}$	$13 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$

I.2.3.5. Retrait gonflement

En dessous du point de saturation des fibres, les variations d'humidité induisent des effets de retrait gonflement. Ces effets sont proportionnels aux variations d'humidité. De par ses caractéristiques orthotropes, chaque essence de bois présente trois coefficients de retrait gonflement représentant le pourcentage de rétractabilité ou d'expansion du bois pour une variation de 1 % de teneur en eau, Tableau 3.

Tableau 3 : Coefficient de retrait gonflement de quelques essences de bois en %/% de variation d'humidité (Preziosa and Guitard, 1986)

Essence de bois	α_T	α_R	α_L
Douglas	0,33	0,19	0,02
Chêne	0,43	0,18	0,03
Hêtre	0,38	0,22	0,01
Peuplier	0,44	0,14	0,03

Les phénomènes de retrait gonflement ont une grande importance sur la stabilité d'éléments de structure en ambiance variable. En effet, un élément soumis à du séchage peut présenter

de l'endommagement par fissuration. Ce phénomène est d'autant plus important que les coefficients de retrait gonflement du bois sont différents selon l'axe d'orthotropie.

I.2.4. Comportement mécanique différé du bois selon l'Eurocode 5

L'Eurocode 5 est la norme de calcul européenne qui, associée aux annexes nationales, permet de dimensionner les structures en bois. La norme prend en compte différents phénomènes physiques qui peuvent modifier le comportement instantané ou différé au travers de coefficients. Nous présentons ici un aperçu de la prise en compte de l'environnement sur le comportement différé par cette norme.

La déformation long terme est induite par les déformations dues à la viscoélasticité hygro activée et de l'hygro sensibilité de la matrice élastique. D'autres phénomènes, plus difficilement quantifiables, peuvent influencer le comportement différé d'un élément de structure, comme la présence de fissures induisant des sections réduites et représentant un vecteur hydrique.

Etant données la complexité et la diversité de ces phénomènes, il est proposé dans l'Eurocode 5 un simple coefficient de déformation globale appelé k_{def} , Tableau 4. Ce coefficient englobe de manière forfaitaire l'ensemble des phénomènes listés précédemment. Il s'applique comme un coefficient amplificateur de la déformation élastique de chacune des forces, pondéré par le coefficient « quasi permanent » Ψ_2 donné dans l'Eurocode 0 et qui a pour fonction de transformer une charge variable en charge constante équivalente susceptible de générer des déformations long terme. La combinaison d'actions qui permet de calculer la déformation à long terme à l'Etat Limite de Service est la combinaison « quasi-permanente » telle que :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i=1}^n \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1.4)$$

Les charges G ou Q pouvant être de différentes formes (ponctuelles, linéiques, ...), il est usuel de prendre en compte l'effet quasi permanent sur les valeurs de déplacements (linéarité du comportement mécanique), et ce, de la façon suivante :

$$w_{fin} = w_{inst G,i} (1 + k_{def}) + w_{inst Q,1} (1 + \Psi_{2,1} \cdot k_{def}) + \sum (w_{inst Q,i} (\Psi_{0,i} + \Psi_{2,i} \cdot k_{def})) \quad (1.5)$$

Tableau 4 : Récapitulatif des valeurs de k_{def} en fonction de trois environnements

Matériau	k_{def}		
	Classe de service		
	1	2	3
Bois massif, lamellé collé, LVL	0,60	0,80	2,00
Contreplaqué	0,80	1,00	2,50
OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	-

Toujours dans un souci de simplification pour une approche d'ingénierie, les ambiances hygrothermiques sont limitées à 3. L'Annexe Nationale française définit ces 3 classes de service de la manière suivante :

- Classe de service 1 (Structure intérieure en milieu sec) : l'humidité moyenne est stabilisée de 7 à 13% d'humidité.

- Classe de service 2 (Charpente abritée soumise à variations hygrométriques, murs à ossature bois) : l'humidité moyenne est stabilisée de 13 à 20% d'humidité.
- Classe de service 3 : (Eléments exposés aux intempéries) : Conditions climatiques amenant des humidités moyennes supérieures à celles de la classe de service 2.

I.3. Conclusion

La répartition forestière des essences de feuillus (ainsi que leur production biologique annuelle) fait de la France le pays présentant la plus grande ressource de feuillus d'Europe. L'approche d'ingénierie actuelle, à l'échelle européenne, tend à privilégier l'utilisation des résineux pour des raisons pratiques (rectitudes du fut, vitesse de croissance) et économiques (forte influence des pays du Nord de l'Europe sur la construction bois). Les normes de calcul sont adaptées aux résineux, ne facilitant pas le retour des feuillus dans la construction d'aujourd'hui. Plusieurs facteurs font que la ressource forestière française de feuillus retrouve un regain d'intérêt, comme la recherche d'une ressource locale ou d'essences de plus forte durabilité naturelle. Cette valorisation passe par la vérification de l'adéquation du comportement des feuillus par l'approche développée pour les résineux. Le projet EFEUR5 a cet objectif et cette ambition. Nous nous intéressons, plus précisément, au comportement mécanique différé des essences de chêne, hêtre, peuplier, et de douglas comme essence de référence.

Après une étude du matériau bois en générale, nous nous sommes intéressés aux différences micro et macroscopiques de ces quatre essences. Cette analyse a permis de mettre en avant des différences de structure ligneuse entre les feuillus et le résineux de référence. Des différences notables sont également visibles entre les essences de feuillus elles même au travers de la répartition des trachéides et vaisseaux dans le bois initial et final. Ces écarts permettront-ils d'expliquer les éventuelles différences de comportement hydrique et mécanique entre ces essences ? Une étude de la proportion de cellules radiales et des cellules longitudinales permettrait-elle de corréliser cette information anatomique à la diffusion hydrique ?

Enfin d'un point de vue mécanique, nous avons effectué un état de l'art sur les propriétés mécaniques instantanées de ces essences. Nous avons également montré la difficulté pour caractériser le comportement mécanique instantané d'un élément de structure au travers de sa densité. Cette remarque est d'autant plus vraie que le matériau bois est un élément sensible à son milieu. Ainsi, l'environnement influence fortement les propriétés mécaniques du matériau.

Enfin, nous avons effectué un rappel sur la détermination du comportement mécanique différé selon l'Eurocode 5. Cette approche s'effectue par la détermination de l'humidité interne de l'élément de structure en fonction de son environnement. La teneur en eau et ses évolutions (diffusion) jouent un rôle prépondérant dans le comportement en service des structures en bois, et ce, à l'échelle du matériau mais également à l'échelle structurelle.

Chapitre II. Transfert de chaleur et de masse dans le bois en ambiance variable

II.1. Etat de l'art sur la diffusion	47
II.1.1. Comportement thermo hydrique du bois	47
II.1.1.1. L'eau sous différents états	47
II.1.1.2. Synthèse bibliographique des isothermes de sorption.....	49
II.1.2. Modèles des isothermes de sorption	51
II.1.2.1. Modèle de B.E.T et de Dent.	51
II.1.2.2. Modèle thermodynamique de Merakeb	52
II.1.2.3. Modèle d'isothermes partielles de sorption	53
II.1.3. Cinétique du transfert de masse	55
II.1.3.1. Perméabilité et diffusion, notions et définitions	55
II.1.3.2. Paramètres influençant la perméabilité	57
II.1.3.3. Couplage température/humidité	60
II.2. Modélisation du transfert thermo-hydrique couplé en environnement extérieur.....	61
II.2.1. Equations de transferts de masse et de chaleur	61
II.2.1.1. Détermination des gradients moteurs.....	61
II.2.1.2. Transfert de chaleur	63
II.2.1.3. Transfert de masse	63
II.2.1.4. Echanges superficiels	64
II.2.1.5. Traitement numérique du couplage thermo hydrique :	65
II.2.2. Influence d'une ambiance variable sur les propriétés physiques.....	66
II.2.2.1. Propriétés physiques intrinsèques à l'essai	66
II.2.2.2. Propriétés physiques intrinsèques au matériau	68
II.2.2.3. Influence de la température sur les propriétés hygrothermiques du bois	71
II.3. Démarche d'identification expérimentale des paramètres des essences étudiées	74
II.3.1. Matériel et méthodes	75
II.3.1.1. Essences et géométries des échantillons d'étude	75
II.3.1.2. Choix du lieu d'essai	76
II.3.1.3. Choix du matériel utilisé	76
II.3.1.4. Influence de la température sur les balances	77
II.3.1.5. Méthodologie	80
II.3.1.6. Plan d'expérience	81
II.3.2. Résultats expérimentaux	82
II.3.2.1. Evolutions métrologiques	82
II.3.2.2. Corrections métrologiques	83
II.3.2.3. Mesures corrigées.....	84
II.3.2.4. Evolution de teneur en eau	85
II.4. Analyses	86
II.4.1. Limites de l'analyse inverse.....	86
II.4.1.1. Proposition de simplification des isothermes par famille.....	87
II.4.1.2. Méthode du Simplexe	89
II.4.2. Résultat numérique	92
II.4.2.1. Réponse de l'algorithme d'optimisation	92
II.4.2.2. Evolution de la teneur en eau moyenne	92
II.4.3. Comparaison inter essence	94
II.5. Présentation des champs hydriques	97

II.5.1. Optimisation du maillage	98
II.5.2. De la modélisation 2D vers la modélisation 3D.....	99
II.6. Conclusion sur l'identification des propriétés de diffusion inter essences	100

II.1. Etat de l'art sur la diffusion

II.1.1. Comportement thermo hydrique du bois

Il a été vu dans le chapitre 1 que deux des constituants principaux du bois sont hydrophiles (hémicellulose et cellulose). Cela confère au matériau bois une caractéristique particulière, c'est un matériau hygroscopique. Ainsi, il a la capacité d'adsorber (gain) ou de désorber (perte) de l'eau en fonction de l'humidité relative, de la température de l'air et des propriétés intrinsèques du matériau. Les molécules d'eau ainsi adsorbées entrent dans les constituants du matériau et se comportent alors comme un constituant à part entière. L'eau dans le matériau a ainsi une forte influence sur les propriétés physiques et mécaniques du bois.

II.1.1.1. L'eau sous différents états

Après la découpe en billon des grumes, l'eau va être présente sous trois états différents. Tout d'abord, il y a l'eau libre ou également appelé l'eau capillaire, située dans les porosités anatomiques du bois et les lumens. Lorsqu'un élément de bois vert sèche, cette eau partira en premier. Une fois l'eau libre éliminée, le domaine hygroscopique débute avec le départ de l'eau liée et de l'eau vapeur.

II.1.1.1.1. Limites du domaine hygroscopique

La détermination du Point de Saturation des Fibres (PSF) est très importante. En effet, pour des variations d'humidité interne allant du PSF à l'état anhydre, l'eau peut être présente sous deux états, l'eau liée (c'est à dire l'eau adsorbée) et l'eau sous phase vapeur au niveau des porosités du bois. Dans cette phase, les variations d'humidité interne font varier les propriétés physiques et induisent des variations géométriques du matériau, tout en gardant son caractère orthotrope (Navi and Heger, 2005). Ces trois états sont représentés en Figure 23.

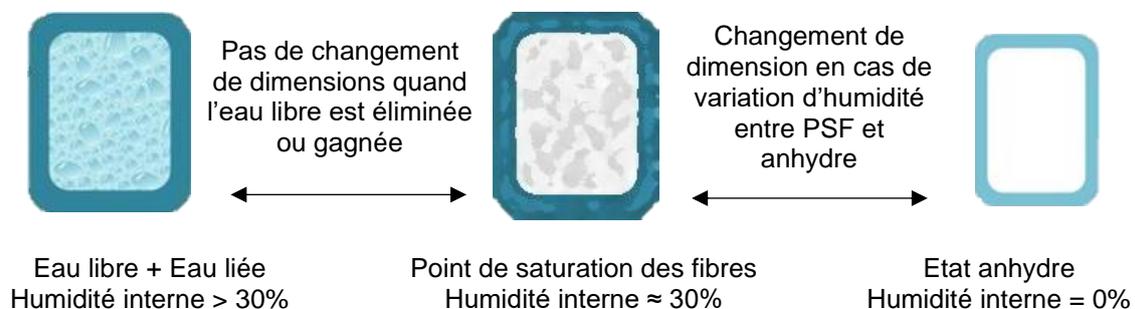


Figure 23 : Trois états distincts de l'eau dans le bois et son influence sur ses variations dimensionnelles

Ce point est historiquement décrit comme la disparition de l'eau libre dans les lumens. Cet état n'étant pas systématiquement atteint de manière uniforme dans un volume donné, sa détermination précise dépend des méthodes expérimentales d'identification décrites ci-après :

- Par mesure gravimétrique, on détermine la quantité d'eau, située dans les fibres du matériau, lorsque celui-ci est en équilibre dans un air humide saturé (HR = 100%). On définit ainsi la teneur en eau de saturation des fibres. (Choong, 1965; Jamaaoui, 2017; Siau and Babiak, 1982). La difficulté expérimentale réside ici dans l'atteinte de ce point d'équilibre extrême, sachant que les phénomènes de sorption asymptotiques sont très sensibles au voisinage de la saturation.

- A partir du comportement mécanique du bois, Choong (1989) détermine la limite haute du domaine hygroscopique en fonction du processus de retrait/gonflement qui est proportionnel à la teneur en eau, le PSF est alors déterminé en interpolant une fonction linéaire reliant les variations de déformations libres entre l'état saturé et d'autres états intermédiaires ($0% < HR < 100%$). Ainsi le point de saturation des fibres correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite de tendance (Burgers, 2016; Choong, 1989), Figure 24.

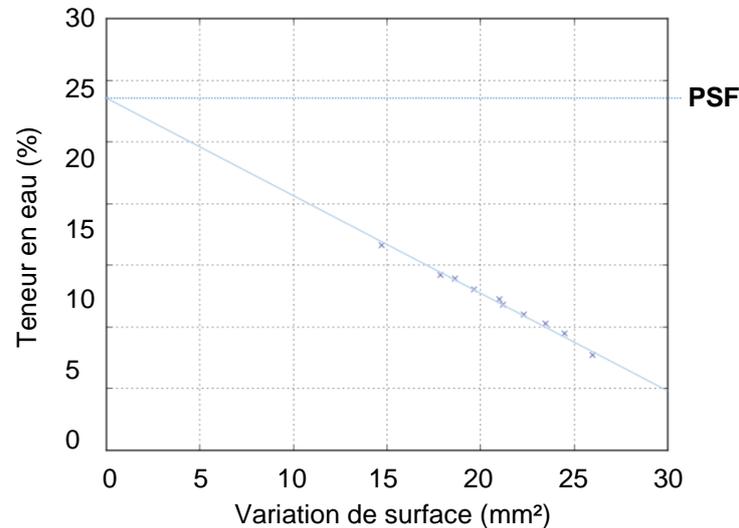


Figure 24 : Régression linéaire de la teneur en eau en fonction de la variation de surface (Burgers, 2016)

Dans le cadre de ce travail, il ne sera pas abordé une quatrième forme de l'eau qui est l'eau de constitution. Cette eau contribue à l'élaboration des molécules de la structure du bois. Elle ne part qu'à de hautes températures (plusieurs centaines de degrés (Chaouch, 2011)) et, en son absence, la structure n'est plus physiquement stable (détérioration du matériau). Nous supposons cependant que sa présence n'impacte en rien les propriétés mécaniques.

II.1.1.1.2. Etat d'équilibre hydrique

L'état d'équilibre hygroscopique est défini en fonction des conditions ambiantes par une courbe appelée « isotherme de sorption ». Elle permet de relier la teneur en eau d'équilibre du matériau à l'humidité relative de l'air, et ce, pour une température donnée. La teneur en eau représente la masse d'eau par rapport à la masse anhydre du matériau :

$$w = \frac{m_h - m_{anh}}{m_{anh}} \quad (2.1)$$

La forme d'une isotherme de sorption varie fortement en fonction du matériau hygroscopique. Skaar (Skaar, 1988) en présente trois formes, Figure 25.

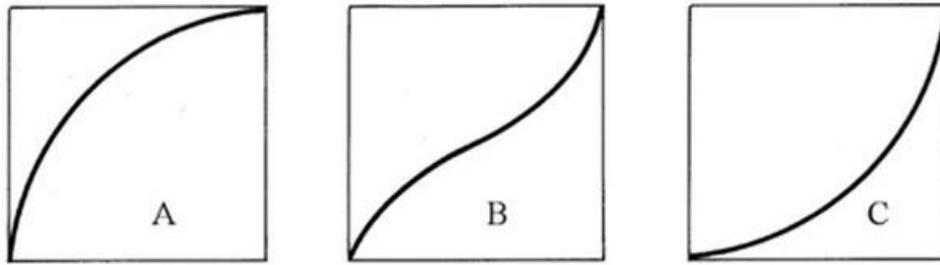


Figure 25 : Les trois types d'isothermes de sorption selon Skaar

- Le type A représente un modèle d'isotherme de sorption prenant en compte uniquement une seule couche moléculaire adsorbée sur les sites de sorptions. Les liaisons, qui lient les molécules d'eau aux groupes hydroxyles -OH des polymères hydrophiles, sont des liaisons hydrogènes qualifiées de fortes.
- Le type B représente un modèle d'isotherme de sorption où les molécules d'eau, après avoir remplie une première couche, en remplissent d'autres par-dessus. D'une couche à l'autre, les liaisons formées entre les molécules d'eau proviennent des forces de Van der Waals.
- Le type C représente uniquement les couches superposées à la première qui font appelent aux forces de Van der Waals.

Les isothermes de sorption du bois sont de type B.

Lors d'essais de diffusion, le cycle d'humidité (allant de 0 à 100% de HR) définit l'isotherme enveloppe d'adsorption et, pour un cycle inverse, l'isotherme enveloppe de désorption. Ces courbes, pour une température donnée, sont distinctes et forment ainsi une hystérésis. De plus, l'isotherme d'adsorption est toujours en deçà de l'isotherme de désorption. Plusieurs explications ont été apportées à ce phénomène. Hartley (1993) explique l'hystérésis par une réhydratation non complète des sites de sorption lors du phénomène d'adsorption. Cela peut être également dû au phénomène de retrait gonflement. En effet, lorsque l'eau liée est retirée du bois pendant la phase de désorption, les constituants des parois cellulaires peuvent se rapprocher suffisamment pour créer de nouvelles liaisons entre les sites de sorption. Au cours du processus inverse d'adsorption, certaines de ces liaisons (nouvellement formées) ne peuvent être rompues avant que la saturation complète ne soit obtenue. Il en résulte une réduction des sites de sorption disponibles. Ainsi, l'équilibre hygroscopique en adsorption est plus faible qu'en désorption (Olek, 2012). Enfin, Merakeb (2006), Rawat (1996), Siau (1971) et Stamm (1964) expliquent ce phénomène par la différence d'énergie nécessaire pour adsorber ou désorber une molécule d'eau. Ces énergies pourraient être différentes d'une essence à l'autre de par la nature des extractibles.

II.1.1.2. Synthèse bibliographique des isothermes de sorption

II.1.1.2.1. Approche normative

Pour des raisons pratiques de simplifications, un abaque unique est utilisé dans l'Eurocode 5. Le diagramme, présenté en Figure 26, représente l'évolution de la teneur en eau du bois en fonction de l'humidité relative ambiante et de la température en supposant un équilibre atteint et en négligeant l'histoire hydrique (cycles partiels par exemples). Cependant, ces courbes, basées sur les travaux de Keylwerth (1964), ont été construites à partir d'essais de séchage

de quelques essences de résineux. Cette approche ne permet pas de prendre en compte l'influence de la variabilité entre famille ou essence, ni la distribution spatiale et temporelle de l'humidité.

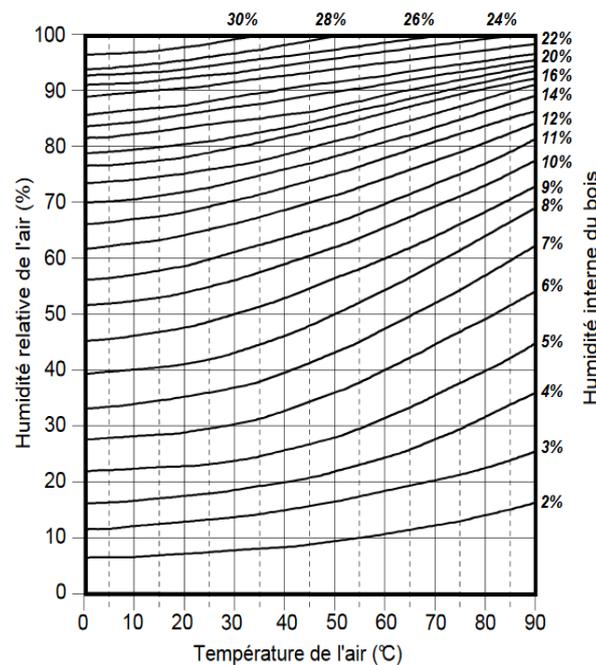


Figure 26 : Courbe d'équilibre hygroscopique du bois (AFNOR, 2010)

II.1.1.2.2. Données bibliographiques

Nous avons donc réalisé une synthèse bibliographique sur une trentaine d'essence de bois à majorité européenne. D'autres matériaux hygroscopiques ligneux ou non sont comparés aux bois en Figure 27. Les isothermes d'adsorption sont définies par le terme « Ad » et les isothermes de désorption par le terme « De ».

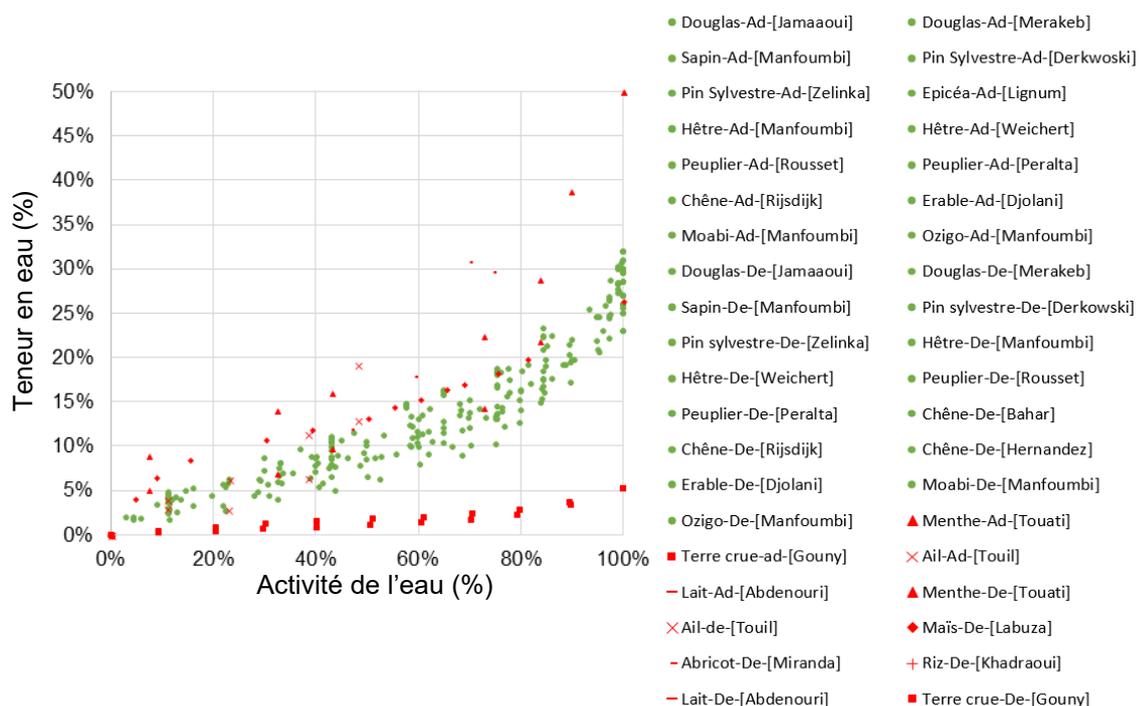


Figure 27 : Isothermes de sorption pour des essences de bois (vert) et d'autres matériaux (rouge)

Ce comportement étant principalement piloté par la teneur en cellulose et hémicelluloses, les différentes essences de bois ont un comportement relativement homogène par rapport aux autres matériaux présentés. Cependant, une comparaison plus fine entre essences de bois en distinguant les sens de sorption semble dessiner des tendances générales, Figure 28.

Ces différences proviennent alors de la forme de l'hystérésis ou encore de la teneur en eau de saturation. Cette dernière est une donnée très présente dans la littérature. Nous nous appuyons ici sur le travail du CIRAD qui référence dans le site Tropix plus de 250 essences (Gérard et al., 2011) définissant, entre autres, le point de saturation des fibres à partir de la méthode surfacique.

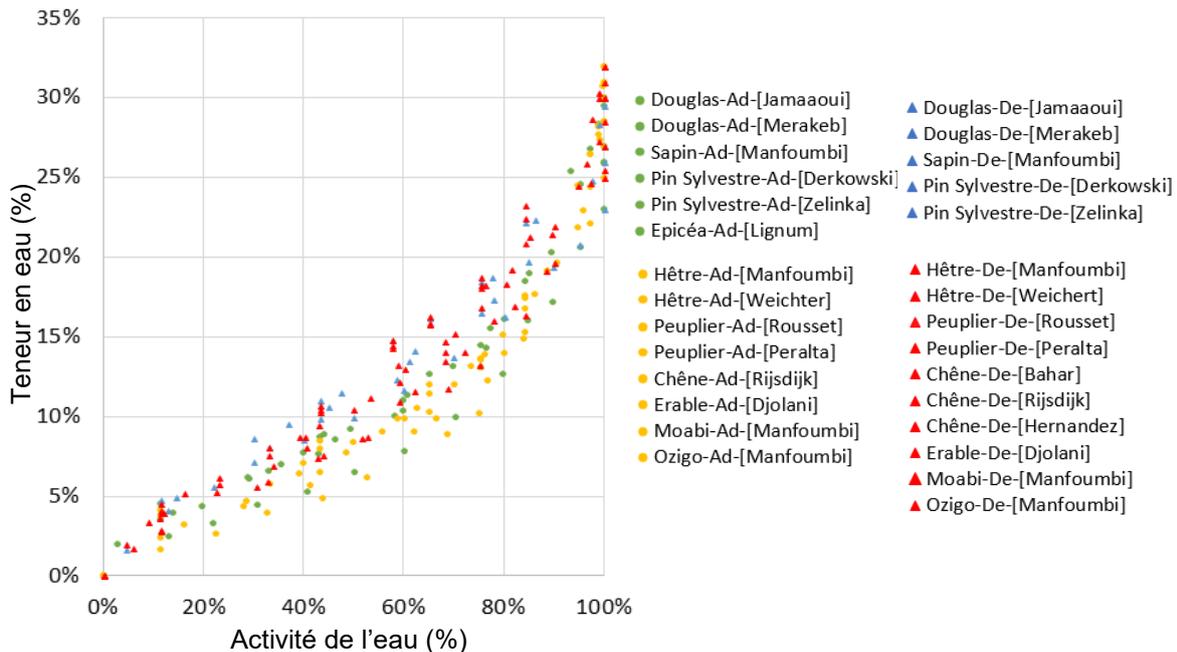


Figure 28 : Synthèse bibliographique des familles de résineux et de feuillus en désorption et adsorption

II.1.2. Modèles des isothermes de sorption

Depuis le début du XX^{ème} siècle, des modèles empiriques (ou semi empiriques) ont été créés et améliorés pour déterminer l'équilibre hygroscopique en fonction de l'activité de l'eau. Cette dernière définit l'humidité relative dans les cavités du matériau supposé en équilibre instantané avec l'humidité interne du matériau. On peut citer le modèle de Brunauer, Emmett, Teller (couramment nommé B.E.T.) (Brunauer et al., 1938) le modèle de Dent (Dent, 1980), le modèle d'Hailwood & Horrobin (Hailwood and Horrobin, 1946), ou encore le modèle de Merakeb (Merakeb, 2006),... Tous ces modèles permettent de représenter les phénomènes d'équilibre hygroscopique dans un matériau.

II.1.2.1. Modèle de B.E.T et de Dent.

Le modèle de B.E.T. a été créé par Brunauer-Emmett-Teller en 1938 (Brunauer et al., 1938). Il permet de représenter les isothermes de sorption en fonction de l'humidité relative de l'environnement. Ce modèle est basé sur l'adsorption de surface. Il représente le phénomène généralisé de sorption monocouche de Langmuir (Langmuir, 1918) dans lequel les molécules d'eau sont adsorbées sur une première couche S₀ avec une forte énergie de liaison. Pour les

couches suivantes, les molécules d'eau sont considérées sous forme liquide. Cela implique que l'énergie apportée ou libérée lors du phénomène de sorption est égale à l'énergie de vaporisation de l'eau ; c'est-à-dire à la chaleur latente de vaporisation. Si n représente le nombre de couches adsorbées et w_0 la teneur en eau correspondant à la première couche, le modèle de B.E.T écrit l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative HR de la façon suivante :

$$w = \frac{w_0 \cdot b \cdot HR}{1 - b} - \frac{1 - (n + 1) \cdot b^n + n \cdot HR^{n+1}}{1 + (b - 1) \cdot HR + b \cdot HR^{n+1}} \quad (2.2)$$

La constante b est reliée à l'énergie de liaison des molécules d'eau avec le matériau. Ce modèle est en accord avec des résultats expérimentaux pour des variations d'humidité relative allant de 0% à 50%.

Le modèle de Dent (Dent, 1980) modifie le modèle B.E.T. en donnant, aux molécules adsorbées des couches secondaires, des propriétés thermodynamiques différentes des molécules d'eau liquide. Le modèle se traduit par :

$$w = \frac{w_0 \cdot b_1 \cdot HR}{[(1 - b_2 \cdot HR)(1 + b_1 \cdot HR - b_2 \cdot HR)]} \quad (2.3)$$

b_1 et b_2 désignent deux constantes d'équilibre liées à l'énergie de liaison des couches primaires et secondaires. Ainsi, ce modèle stipule que l'énergie de liaison des molécules secondaires est plus faible que l'énergie de liaison des molécules primaires. Enfin, le modèle de Dent considère que, sur la totalité de la surface S des sites de sorption, seulement une portion S_0 est libre, une portion S_1 est occupée par une seule couche moléculaire, une portion S_2 est quant à elle occupée par deux couches, et ainsi de suite.

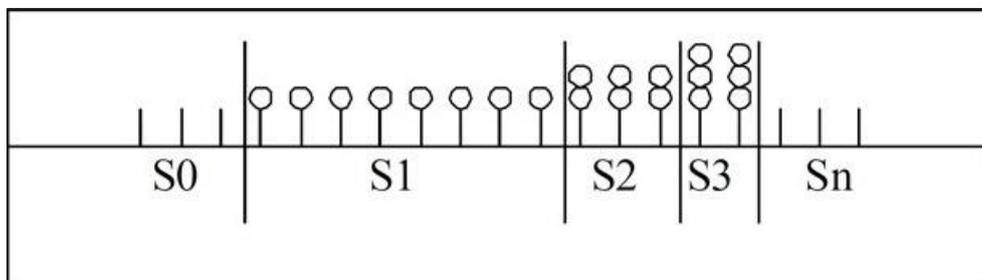


Figure 29 : Disposition des molécules par couches selon le modèle de Dent

Toutefois, on peut citer trois restrictions majeures à l'utilisation de ce modèle :

- L'état hydrique initial du matériau n'est pas pris en compte,
- Le sens de variation hydrique (ad-désorption) n'est pas pris en compte,
- Il ne s'applique qu'en conditions isothermes.

II.1.2.2. Modèle thermodynamique de Merakeb

Le modèle retenu ici (pour représenter les isothermes enveloppe et utilisé tout au long de cette thèse) est celui proposé par Merakeb (2006). Ce modèle semi empirique est basé sur une approche thermodynamique de l'équilibre des phases de l'eau. Dans sa démarche, l'auteur assimile la pression de vapeur saturante à un potentiel chimique d'une espèce en équilibre dont l'expression dépend d'une fonction d'état qui est la pression de vapeur. Ainsi, à partir

d'une adaptation de l'équation de Clapeyron, Merakeb propose une relation logarithmique reliant la teneur en eau w et l'humidité relative HR sous la forme suivante :

$$\ln\left(\frac{w}{w_s}\right) = \varphi \cdot \ln(HR) \cdot e^{\alpha \cdot HR} \quad (2.4)$$

φ représente un paramètre thermodynamique et α une constante de calage dont les valeurs sont différenciées selon le cycle de sorption, comme l'indique la Figure 30. w_s est la teneur en eau de saturation à 100% d'humidité relative.

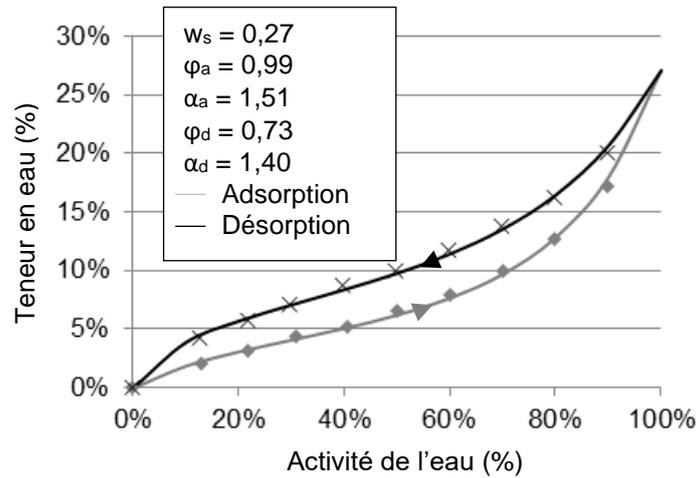


Figure 30 : Isotherme enveloppe du douglas : comparaison modèle et expérimental

Ce modèle apporte plusieurs avantages. Tout d'abord, il permet de différencier les cycles de sorption, en faisant ainsi apparaître le phénomène d'hystérésis à partir des paramètres φ et α . Ce modèle présente enfin l'avantage d'avoir peu de paramètres à caractériser.

II.1.2.3. Modèle d'isothermes partielles de sorption

Supposer un état initial situé sur les courbes enveloppe de sorption ne peut être qu'une hypothèse de laboratoire et ne traduit pas les oscillations d'humidité subies par les structures bois en service. Ainsi, pour des cycles partiels d'humidité relative, l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau se situe entre les deux courbes enveloppes. Les modèles numériques, permettant de représenter ces isothermes partielles, sont beaucoup moins nombreux dans la littérature (Carsten-Rode-Pedersen, 1990; Kulasinski, 2015). De nombreux modèles ne prennent pas en compte l'hystérésis par simplification ou ne s'intéressent qu'aux cinétiques de séchage. Dans le cadre de ce travail, nous faisons référence au modèle de Pedersen, adapté à un calcul incrémental, se définissant de la façon suivante :

$$\xi_{sd} = \left(\frac{(w_0 - w_{ad})^B \cdot \xi_{de}^b + D \cdot (w_{de} - w_0)^B \cdot \xi_{ad}^b}{(w_{de} - w_{ad})^B} \right) : \text{désorption} \quad (2.5)$$

$$\xi_{sa} = \left(\frac{A \cdot (w_0 - w_{ad})^B \cdot \xi_{de}^b + (w_{de} - w_0)^B \cdot \xi_{ad}^b}{(w_{de} - w_{ad})^B} \right) : \text{adsorption} \quad (2.6)$$

- w_0 : Teneur en eau initiale pour une activité de l'eau α_{w0}
- w_{ad} : Teneur en eau de l'isotherme complète d'adsorption pour une activité de l'eau α_{w0}
- w_{de} : Teneur en eau de l'isotherme complète de désorption pour une activité de l'eau α_{w0}

- ξ_{ad}^b : Nombre dérivé de l'isotherme complète d'adsorption pour une activité de l'eau α_{w0}
- ξ_{de}^b : Nombre dérivé de l'isotherme complète de désorption pour une activité de l'eau α_{w0}
- A, D, B trois coefficients de calage.

$w_0 - w_{\text{ad}}$ représente la distance entre l'isotherme enveloppe d'adsorption et la teneur en eau au temps précédent. De même, $w_0 - w_{\text{de}}$ est la distance entre l'isotherme enveloppe de désorption et la teneur en eau au temps précédent. De plus, ξ_{ad} et ξ_{de} sont les tangentes aux isothermes enveloppes d'adsorption et de désorption respectivement. Ainsi, Pedersen propose un coefficient qui n'est autre qu'un barycentre pondéré par trois constantes A, D et B.

Pour déterminer au temps t la teneur en eau w_t en fonction de l'activité de l'eau $\alpha_{w t}$, sachant que la teneur en eau au temps t-1 est w_{t-1} pour une activité de l'eau $\alpha_{w t-1}$ on a alors :

$$w_t = \xi \cdot (\alpha_{w t} - \alpha_{w t-1}) + w_{t-1} \quad (2.7)$$

Le modèle est basé sur la détermination de la pente ξ à l'origine de l'isotherme partielle. Ensuite, par incrément de l'activité de l'eau est reconstruit l'isotherme partielle en fonction de l'activité de l'eau et du cycle de sorption. Le coefficient ξ représente donc la capacité hydrique, c'est-à-dire la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité. Enfin, il est différent selon le cycle de sorption (2.5) et (2.6).

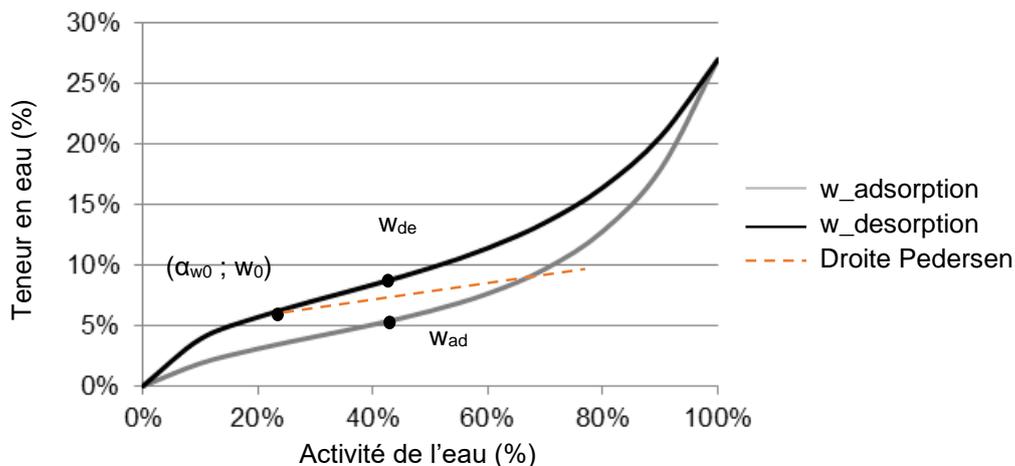


Figure 31 : Droite de Pedersen, au point $(\alpha_{w0} ; w_0)$ et pour coefficient directeur ξ_a

Merakeb (2006) a réalisé des essais de diffusion pour des cycles d'humidité partielle (20%-80%-30%), Figure 32. Ici les trois coefficients de calage A, D, B ont pris les valeurs 0,40 ; 0,06 et 1,50 respectivement.

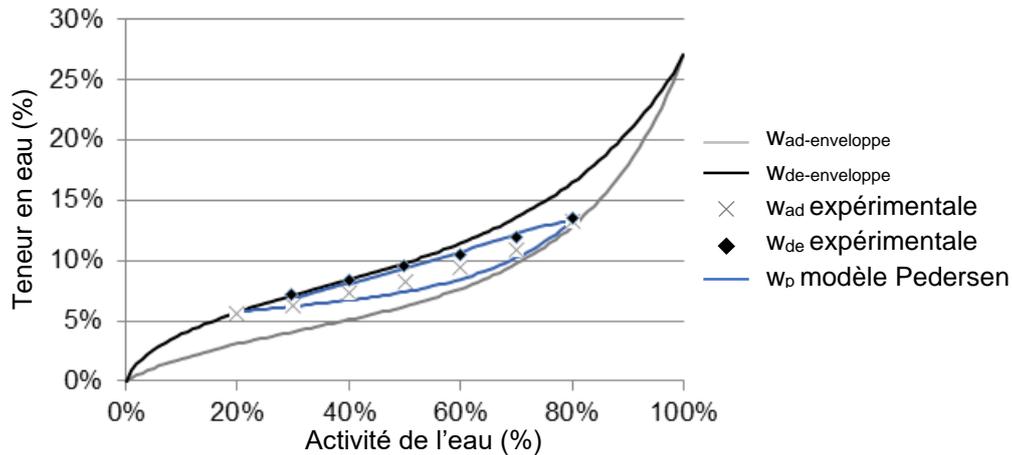


Figure 32 : Isothermes partielles : Modèle de Pedersen vs mesures expérimentales (Merakeb, 2006)

Le modèle de Pedersen a été testé pour plusieurs autres cycles de sorption donnant, à chaque fois, satisfaction. Ainsi, de façon simple, ce modèle permet, à l'aide de trois paramètres de calage, de déterminer l'évolution de la teneur en eau pour un cycle de sorption partielle.

II.1.3. Cinétique du transfert de masse

II.1.3.1. Perméabilité et diffusion, notions et définitions

II.1.3.1.1. La perméabilité apparente

Une analogie peut être faite entre les phénomènes de transfert de masse et de chaleur. Ainsi, un élément soumis à un gradient de température et d'humidité va tendre vers un équilibre thermo hydrique avec son environnement. On a alors un phénomène de transport d'eau et de température dans le matériau. En transfert thermique, le paramètre physique, qui permet de quantifier ce phénomène de conduction, est la conductivité thermique noté λ en $W.m^{-1}.K^{-1}$. En transfert de masse, ce paramètre physique est la perméabilité à la vapeur d'eau noté δ en $kg.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-1}$. Le transfert de masse peut être également décrit par le coefficient de diffusion D en $m^2.s^{-1}$, dans les expressions faisant intervenir des flux d'humidité. Nous avons vu précédemment que l'eau diffuse selon deux modes différents.

- L'eau, sous phase vapeur, va se déplacer au niveau des lumens, trachéides, ponctuations et autres porosités. Ce mode de transfert est similaire au transfert par convection thermique. Il existe donc un coefficient de perméabilité de l'eau sous phase vapeur. Des méthodes empiriques ou semi empirique permettent de quantifier ce mode de transfert. La plupart sont basés sur la loi de Darcy (1856), (Resch and Ecklund, 1964; Sucoff and Chen, 1965), en la modifiant pour prendre en compte la dégradation de l'énergie cinétique due à la rectitude des zones d'écoulements de l'eau vapeur (Erickson and Schmidt, 1969; Kuroda and Siau, 2007; Siau and Petty, 1979).
- L'eau, sous phase d'eau liée, va se déplacer au sein de la paroi cellulaire. Ce mode de transfert peut être assimilé à celui de la conduction thermique. La sorption est due à la présence de molécules d'eau au niveau des sites de sorption qui sont adsorbés ou désorbés. Ce phénomène est décrit par la perméabilité apparente impactée par les molécules d'eau présentes dans la paroi cellulaire.

II.1.3.1.2. La diffusion de l'eau dans le bois

Lorsque le bois sèche ou s'humidifie, il existe différents potentiels à l'origine du transport de l'eau et qui peuvent agir en même temps (Stamm, 1964).

- Une différence de pression de vapeur p_v induit un déplacement de la vapeur d'eau dans la porosité à travers les ponctuations des zones les plus humides vers les plus sèches. Ce phénomène de transfert de masse est régi par la loi de Fick (1855). Soit φ_{vw} , le flux de vapeur traversant une tranche infinitésimale ∂x de matériau hygroscopique. Dans un cas unidirectionnel, il s'exprime par :

$$\varphi_{vw} = -\delta_a \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.8)$$

δ_a représente le coefficient de perméabilité en phase vapeur, également appelé perméabilité anhydre. La loi de Fick, détermine le flux de diffusion hydrique sous un gradient de concentration de molécules d'eau. Deux forces motrices sont alors possibles, soit la concentration d'eau liée, soit la pression de vapeur d'eau. En reprenant l'équation (2.8), on peut écrire :

$$\varphi_{vw} = -\delta_a \cdot p_s \cdot \frac{\partial \alpha_w}{\partial x} - \delta_a \cdot \alpha_w \cdot \frac{\partial p_s}{\partial x} \quad (2.9)$$

p_s désigne la pression de vapeur saturante, α_w , l'activité de l'eau qui est le rapport entre la pression de vapeur instantanée et la pression de vapeur saturante.

- Une différence de teneur en eau (phase adsorbée) induit des mouvements d'eau liée des régions humides vers les plus sèches, en passant de site de sorption en site de sorption dans les parois cellulaires. Ce phénomène est également régi par une loi de Fick. Soit φ_{lw} , le flux d'eau liée traversant une couche infinitésimale ∂x de matériau hygroscopique. Dans une description unidirectionnelle, il s'écrit :

$$\varphi_{lw} = -\rho_{anh} D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.10)$$

ρ_{anh} représente la masse volumique anhydre du matériau et D_w le coefficient de diffusion de l'eau adsorbée. Comme précédemment, on peut écrire le flux d'eau adsorbée en fonction de l'activité de l'eau α_w de la façon suivante :

$$\varphi_{lw} = -\rho_{anh} D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial \alpha_w} \cdot \frac{\partial \alpha_w}{\partial x} \quad (2.11)$$

De cette façon, nous faisons apparaître la capacité hydrique $\frac{\partial w}{\partial \alpha_w}$. Ainsi, on écrit la loi de Fick, en utilisant la pression de vapeur comme force motrice dans des conditions isothermes.

- Enfin, dans le cas d'un système non isotherme, Siau considère qu'un gradient de température induit une migration de l'eau liée, c'est l'effet Soret (Li et al., 2006; Siau, 1971; Siau and Jin, 1985a).

II.1.3.2. Paramètres influençant la perméabilité

Le transport de l'eau dans le bois se faisant sous deux états (gazeux et chimiquement lié à la paroi cellulaire), les paramètres de sorption sont dépendants de plusieurs phénomènes physiques.

II.1.3.2.1. Influence de la structure du bois

II.1.3.2.1.1. Influence de l'anatomie de l'élément d'étude

L'influence de l'anatomie du bois a été très peu étudiée de par sa complexité. Cependant, de nombreuses valeurs de coefficient de diffusion ont été données, Tableau 5.

Tableau 5 : Synthèse bibliographique de valeurs de coefficient de diffusion [$m^2.s^{-1}$]

Essence	Longitudinal	Tangentiel	Radial
Epicéa	3.10^{-11} 12.10^{-11} (Krabbenhoft, 2004)		
Hêtre	$1,54.10^{-9}$ (Agoua, 2001) $2,2.10^{-5}$ (Mouchot, 2002) $5,24.10^{-10}$ (Nguyen, 2014)	$0,53.10^{-10}$ (Kouchade, 2004) $9,90.10^{-11}$ (Agoua, 2001) $5,2.10^{-8}$ (Mouchot, 2002) $8,96.10^{-11}$ (Nguyen, 2014)	$1,33.10^{-10}$ (Kouchade, 2004) $1,92.10^{-10}$ (Agoua, 2001) $8,5.10^{-8}$ (Mouchot, 2002) $1,79.10^{-11}$ (Nguyen, 2014)
Châtaignier (Kouchade, 2004)		$0,95.10^{-10}$	$1,05.10^{-10}$
Pin sylvestre (Agoua, 2001)	$1,80.10^{-9}$	$4,29.10^{-11}$	$2,87.10^{-10}$
Sapin (Nguyen, 2014)	$1,04.10^{-9}$	$2,47.10^{-11}$	$1,24.10^{-11}$
Douglas (Jamaaoui, 2017)	$1,92.10^{-10}$	$4,36.10^{-11}$	$9,29.10^{-11}$

Plusieurs auteurs ont montré que la perméabilité du bois était sensible à son anatomie et à sa provenance dans l'arbre. De manière générale, Stamm and Nelson (1961) et Choong (1965) ont montré, en s'intéressant au chemin pris par l'eau dans le bois, Figure 33, que plus le bois était dense, plus sa perméabilité était faible. En effet, l'augmentation de la densité provient majoritairement de l'accroissement de la matière ligneuse induisant une diminution de la porosité du bois. Elle induit alors une diminution de la diffusion de la vapeur d'eau quel que soit le sens de diffusion. (Perré and May, 2001).

- Le chemin n°1 représente le passage de l'eau liée dans la paroi cellulaire au niveau de la couche S2. Cette diffusion est d'autant plus importante que le matériau est humide.
- Le chemin n°2 représente le transport de l'eau (sous phase vapeur et sous phase d'eau liée) au niveau d'une paroi cellulaire
- Le chemin n°3 représente le transport de l'eau vapeur et liée au travers d'une ponctuation

- Le chemin n°4 représente le transport de l'eau sous phase vapeur au niveau des cavités. Ce transport est majoritairement présent lors de la diffusion dans le sens longitudinal.

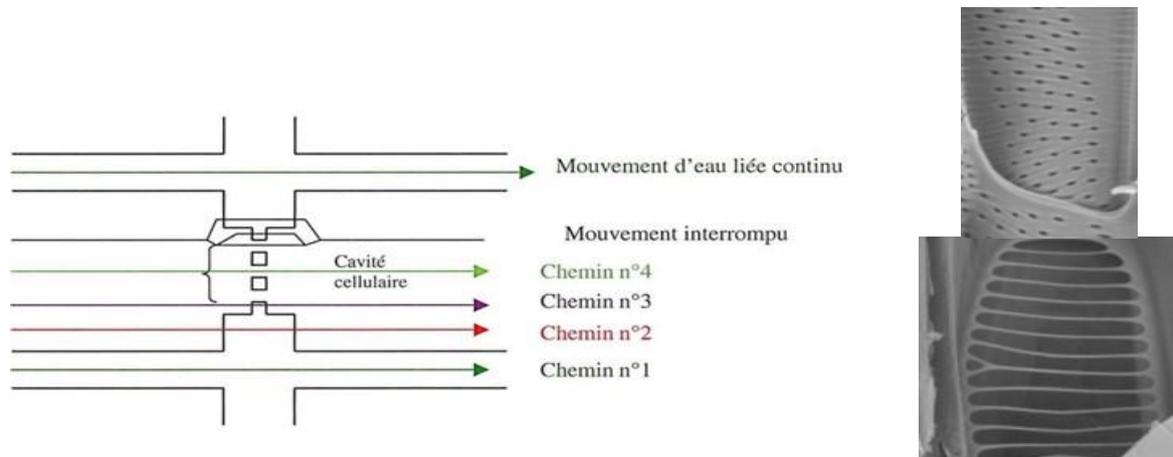


Figure 33: Chemins de l'eau au sein des lumens, et au niveau des perforations (Vues au MEB à droite) (Trouy, 2016)

Bramhall (1971) et Chen (1991) ont remarqué que l'aubier est plus perméable que le duramen, conformément aux fonctions physiologiques. De plus, Cheng montre que la rapidité de croissance a une influence sur la perméabilité longitudinale de l'aubier pour le peuplier, mais pas pour le chêne et le noyer, conformément à l'anatomie de ces feuillus. Milota (1995) a remarqué que, pour le pin loblolly (*Pinus taeda linnaeus*), le bois juvénile présente une perméabilité plus faible que celle du bois adulte.

II.1.3.2.1.2. Influence de l'anisotropie du bois

Le bois est un matériau orthotrope du fait de sa structure microscopique. Stamm et Nelson ont montré que l'eau diffuse suivant trois chemins différents. Ainsi, au niveau de la perméabilité du bois, la structure anatomique du bois induit un transfert d'eau dans la direction longitudinale plus important que dans les deux autres sens. Siau, en se basant sur le modèle de Comstock (1967, 1968) montre que pour les feuillus, la perméabilité dans le sens longitudinal est de 10 000 à 40 000 fois plus importante que dans les deux autres sens. Cependant Comstock part sur l'hypothèse que l'eau diffuse uniquement sous phase vapeur. De ce fait, la perméabilité vapeur du matériau dépend fortement de la proportion des ponctuations et du nombre de ponctuations ouvertes. Il détermine ainsi l'influence de ces ouvertures dans le sens radial et longitudinal. Cependant, ce rapport serait moins élevé pour les résineux. Cela s'explique par la forte présence de ponctuations aréolées chez les résineux permettant ainsi une plus grande migration de l'eau dans le plan transversal. De plus, la diffusivité dans le sens radial est plus importante que dans le sens tangentiel. Un rapport d'environ deux a souvent été observé entre ces deux directions (Jamaoui, 2017; Kouchade, 2004; Mouchot, 2002). De par la physiologie du matériau, il existe en effet différentes structures de transferts radiaux dans le bois (rayons ligneux, parenchymes), ce qui n'est pas le cas du sens tangentiel. La diffusion tangentielle est donc principalement pilotée par des mouvements continus d'eau liée, correspondant au chemin n°1.

II.1.3.2.2. Influence de l'environnement

II.1.3.2.2.1. Influence de l'humidité

L'impact de l'humidité interne du bois sur sa perméabilité est très controversé. La méthode la plus utilisée pour déterminer la perméabilité du bois est l'essai de cinétique de diffusion par palier d'humidité. Ainsi, au cours de l'essai, l'évolution temporelle de la masse de l'éprouvette est enregistrée. A partir d'un modèle de diffusion, la perméabilité du matériau, pour chaque palier, en est déduite (Laou, 2017). Cet essai permet de mettre en évidence l'influence de l'humidité interne sur la perméabilité. Stamm (1959, 1964) a observé que la perméabilité augmente de façon exponentielle avec la teneur en eau. Ce principe sera repris par Skaar (1988) et Simpson and Liu (1991) pour la perméabilité dans le sens radial mais pas dans le sens tangentiel. Rosen (1976) propose une loi de forme exponentielle permettant de représenter l'influence de la teneur en eau sur le coefficient de diffusion. Elle s'écrit comme suit :

$$D_w = D_0 \cdot e^{(\beta \cdot x)} \quad (2.12)$$

x désigne la teneur en eau du bois et β un facteur (positif dans le sens radial et tangentiel, et négatif dans le sens longitudinal). Cependant, Choong (1963) propose une relation linéaire croissante entre le coefficient de diffusion et l'humidité dans le sens radial du sapin. Aujourd'hui, aucune explication physique n'a été encore validée pour comprendre l'origine de ce phénomène. Cependant, au moins deux théories sont proposées. Choong, pense que l'augmentation du coefficient de diffusion est due aux variations dimensionnelles causées par le phénomène de retrait -gonflement. Cela induirait alors un accroissement des espaces libres par lesquels l'eau sous phase vapeur peut diffuser. Cependant, Stamm et Kulasinski (2015) proposent une tout autre explication. Dans le domaine hygroscopique, plus il y a de molécules d'eau dans les parois cellulaires, plus celles-ci s'excitent par leur mouvement brownien. Cette mise en mouvement augmente la probabilité que les molécules d'eau viennent se greffer sur les sites de sorption. Kulasinski (2015) propose un modèle dans lequel les molécules d'eau sont toujours en mouvement. Elles se font attirer par les sites de sorption mais leur énergie cinétique rompt la liaison. La molécule reprend alors son chemin, processus qu'il nomme « Stop and Go » et illustré en Figure 34. Ce processus permet de comprendre l'évolution des molécules d'eau adsorbées, et leurs influences mutuelles sur la perméabilité apparente du matériau.

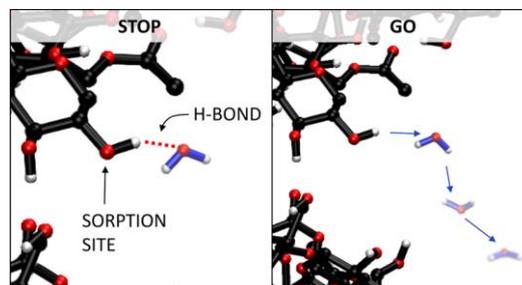


Figure 34 : Processus Stop and GO de Kulasinski (2015)

C'est sur ce principe que nous nous baserons dans le cadre de cette thèse pour prendre en compte l'influence de la teneur en eau sur la perméabilité apparente. On parle alors de la perméabilité apparente car ce n'est plus une propriété intrinsèque au matériau.

II.1.3.2.2. Influence de la température

Les essais de diffusion couplés à des variations de température ne sont pas très nombreux (Siau and Babiak, 1982). Et dans bien des cas, il s'agit de travaux concernant le séchage des aliments (Touil et al., 2015). Cependant, il a été remarqué que le coefficient de diffusion augmente en fonction de la température selon la loi d'Arrhenius (Navi and Heger, 2005; Nelson, 1986). Elle permet ainsi de décrire la variation de vitesse d'une réaction chimique en fonction de la température avoisinante. Elle s'écrit sous la forme :

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (2.13)$$

k représente le coefficient de vitesse de la réaction, k_0 le facteur pré-exponentiel ou coefficient de calage, E_a l'énergie d'activation du phénomène thermodynamique, R la constante des gaz parfaits et T la température exprimée en Kelvin.

II.1.3.3. Couplage température/humidité

II.1.3.3.1. L'enthalpie de vaporisation ou chaleur latente de vaporisation de l'eau

La chaleur latente de vaporisation traduit l'énergie nécessaire qu'il faut pour faire évaporer/condenser un kilogramme d'eau. Prigogine et Kondepudi (1999) expliquent qu'en thermodynamique, l'équilibre de l'eau et de la pression de vapeur saturante est similaire à l'équilibre des potentiels chimiques des deux phases (vapeur/liquide). Un potentiel thermodynamique est une force qui intervient sur les échanges de matière entre deux espèces. Ainsi, lorsque les potentiels s'égalisent, leurs échanges de matière s'estompent également jusqu'à atteindre l'équilibre. Ces phénomènes sont donc réversibles et les échanges se font à la même vitesse. En d'autres termes, la vitesse de condensation de la vapeur d'eau est égale à la vitesse d'évaporation. Enfin, la chaleur latente diminue avec la température du fait de l'augmentation de l'agitation des molécules due à l'augmentation de température. Ainsi, la formule de Regnault (Bruhat et al., 1962) permet de représenter cette dépendance :

$$L = L_0 - b \cdot T \quad (2.14)$$

L_0 et b sont deux constantes déterminés expérimentalement. Ainsi, l'équation (1.14) est prête à l'emploi avec la forme suivante :

$$L = 2501 - 2,4456 \cdot T \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (2.15)$$

II.1.3.3.2. Chaleur de sorption, approche thermodynamique

Lors de l'étude du comportement thermodynamique de l'eau libre, la formule de Clausius Clapeyron permet de déterminer l'évolution de la pression de vapeur saturante en fonction de la température d'équilibre au cours d'un changement d'état. Ainsi, lors du phénomène d'évaporation ou de condensation, des essais expérimentaux ont permis de déterminer la chaleur latente de vaporisation notée L. L'équation de Clapeyron s'écrit de la façon suivante :

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{L}{T \cdot V_{\text{gaz}}} \quad (2.16)$$

p_s est la pression de changement d'état à la température T (K), L (kJ/kg) la chaleur latente de vaporisation et V_{gaz} le volume molaire du corps à la température T. A partir de l'équation des gaz parfait, on peut écrire :

$$\frac{dp_s}{p_s} = \frac{L}{R} \cdot \frac{dT}{T^2} \quad (2.17)$$

ou encore :

$$L = RT^2 \cdot \frac{d \ln(p_s)}{dT} \quad (2.18)$$

Merakeb (2006) propose une analogie entre l'équilibre hygroscopique et l'équilibre de l'eau libre avec sa pression saturante. Alors que les principes de la thermodynamique sont faits pour des corps purs soumis à des transformations de phase ou d'équilibre entre ses phases (solide, liquide gazeuse), une analogie est faite pour l'eau adsorbée. Ainsi, par analogie à l'équation de Clapeyron (2.18), l'équation, reliant la pression de vapeur d'équilibre dans l'élément d'étude en fonction de sa température d'équilibre, s'écrit :

$$L' = RT^2 \frac{d \ln(p_v)}{dT} \quad (2.19)$$

L' désigne la chaleur de vaporisation de l'eau liée et P_v la pression de vapeur sèche à la température T. Cette approche permet de mettre en avant la détermination de l'enthalpie de sorption (également appelée enthalpie molaire de sorption) notée ΔH_s. Cette propriété thermodynamique n'est autre que la différence entre l'enthalpie de vaporisation de l'eau liée et de l'eau libre. Elle se déduit par :

$$\Delta H_s = L' - L = RT^2 \cdot \frac{d \ln(p_v)}{dT} - RT^2 \cdot \frac{d \ln(p_s)}{dT} = RT^2 \cdot \frac{d \ln(\alpha_w)}{dT} \quad (2.20)$$

$\alpha_w = \frac{P_v}{P_s}$ est l'activité de l'eau.

Ainsi la chaleur de sorption H_s se calcul de la façon suivante

$$H_s = L + \Delta H_s \quad (2.21)$$

II.1.3.3.3. Effet Soret

En 1879, Charles Soret, reprenant les travaux de Carl Ludwick, décrit le phénomène de thermophorèse. Ce phénomène induit la migration de molécules de la zone chaude vers la zone froide. Ainsi, dans le domaine du transfert de masse en condition non isotherme, l'effet Soret est un phénomène qui se caractérise par l'apparition d'un gradient d'humidité dans un système (Artola, 2009). Ce terme d'hygro couplage sera présenté plus tard avec la présentation des équations de bilan thermo-hydrique.

II.2. Modélisation du transfert thermo-hydrique couplé en environnement extérieur

II.2.1. Equations de transferts de masse et de chaleur

Les équations de transferts traduisent le fait que le flux est proportionnel au gradient moteur. Dans notre cas, elles sont régies par deux lois ; la loi de Fourier pour le transfert thermique et la loi de Fick pour le transfert de masse. Le choix du potentiel moteur permet de représenter plus ou moins bien les phénomènes à modéliser.

II.2.1.1. Détermination des gradients moteurs

Dans le cas du transfert thermique, il n'y a pas d'ambiguïté, le potentiel moteur est le gradient de température. Cependant, dans le cas du transfert hydrique, le potentiel moteur peut être un gradient de teneur en eau w ou un gradient de pression de vapeur p_v. Le premier cas, le plus

utilisé aujourd'hui, est le modèle de transfert couplé de A.V. Luikov (1966, 1965), utilisant un gradient de teneur en eau w . Il permet d'écrire les équations de transfert en mettant en jeu quatre propriétés de transferts. Les deux premiers représentent les propriétés de diffusion thermique et hydrique, respectivement, D_{TT} , D_{WW} . D_{TT} représente la conductivité thermique du matériau. Quant à D_{WW} , il représente le coefficient de diffusion. Ces deux paramètres sont disponibles dans la littérature. Le couplage des phénomènes de transfert de masse et de chaleur est représenté par les paramètres D_{TW} et D_{WT} . Cependant, ces deux paramètres sont très difficiles à déterminer car les plans d'expériences nécessitent des conditions de transfert sous gradient. Ils sont donc très peu présents dans la littérature, voire négligés par défaut. Au vu du nombre d'inconnues qu'impose cette approche, notre choix s'est porté sur l'utilisation de l'autre potentiel de diffusion, à savoir, la pression de vapeur (Holm and Künzel, 2000; Künzel, 1995). Une hypothèse forte consiste à supposer, qu'en tout lieu de la matière, l'équilibre hygroscopique est atteint. C'est-à-dire que la teneur en eau du matériau correspond à l'activité de l'eau dans les porosités, conformément aux isothermes de sorption. Cette hypothèse devient fautive à partir du moment où on étudie un matériau à forte porosité ouverte. En effet, dans ce cas, la vapeur pourrait migrer rapidement dans les vides donnant lieu à des variations rapides de l'activité de l'eau ne permettant pas au matériau de s'équilibrer avec celle-ci (inertie apportée par des effets convectifs locaux). L'observation de ces phénomènes dans le matériau bois nous montre un comportement très lent, ce qui conforte cette hypothèse.

Il est intéressant de comparer les similitudes d'écriture entre le transfert thermique et le transfert hydrique comme le récapitule le Tableau 6. Ces similitudes serviront grandement au choix des algorithmes de calcul par Eléments Finis.

Tableau 6: Equations de diffusion thermo hydrique

Diffusion thermique	Diffusion hydrique
Densité surfacique de flux (Fourier) : $\varphi_t = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \text{ [W.m}^{-2}\text{]}$ Avec : λ en [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] T en [K]	Densité surfacique de flux (Fick) : En phase liquide : $\varphi_{lw} = -\rho_{anh} \cdot D_w \frac{\partial w}{\partial x} = -\rho_{anh} \cdot D_w \frac{\partial w}{\partial \alpha_w} \cdot \frac{\partial \alpha_w}{\partial x}$ En phase vapeur : $\varphi_{vw} = -\delta_a \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} = -\delta_a \cdot \frac{\partial (\alpha_w \cdot p_s)}{\partial x}$ Au total (liquide + vapeur) : $\varphi_w = -\rho_{anh} \cdot D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial \alpha_w} \cdot \frac{\partial \alpha_w}{\partial x} - \delta_a \cdot \frac{\partial (\alpha_w \cdot p_s)}{\partial x}$ Avec : φ_w en [kg.m ⁻² .s ⁻¹] $\frac{\partial w}{\partial \alpha_w}$ la capacité hydrique D_w : le coefficient de diffusion en phase liquide en [m ² .s ⁻¹] δ_a : La perméabilité à la vapeur en [kg.s ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻¹]
Echange superficiel :	Echange superficiel :

$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h_t \cdot (T_a - T_{\text{surf}})$ <p>Avec T_a = La température ambiante en °C ou K h_t : Le coefficient d'échange surfacique thermique en [W.m⁻².K⁻¹]</p>	$-\delta_a \cdot \frac{\partial p_s}{\partial x} = h_w \cdot (P_{va} - P_{\text{vsurf}})$ <p>Avec P_{va} = La pression de l'air ambiante en Pa h_w : Le coefficient d'échange surfacique hydrique en [s.m⁻¹]</p>
---	---

II.2.1.2. Transfert de chaleur

A partir du Tableau 6, dans le cas unidimensionnel d'un matériau d'épaisseur infinitésimale dx à un intervalle de temps infinitésimale dt, l'équation de conservation d'énergie s'écrit de la façon suivante :

$$(\rho_h \cdot C_h) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H_s \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_a \cdot \frac{\partial (\alpha_w \cdot p_{vs})}{\partial x} \right) \quad (2.22)$$

Soit, dans le cas tridimensionnel :

$$(\rho_h \cdot C_h) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) + Q_T \quad (2.23)$$

Q_T désigne un terme source qui sera traité comme une source volumique de chaleur. Il représente donc l'influence de l'hydrique sur la thermique au travers de la chaleur de sorption H_s telle que :

$$Q_T = H_s \cdot \vec{\nabla} (\delta_a \cdot \vec{\nabla} (\alpha_w \cdot p_{vs})) \quad (2.24)$$

II.2.1.3. Transfert de masse

De la même façon, l'équation de diffusion hydrique s'écrit sous la forme unidimensionnelle :

$$\rho_{\text{anh}} \cdot \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_{\text{anh}} \cdot D_w \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_a \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) \quad (2.25)$$

En considérant l'activité de l'eau α_w , l'équation devient :

$$\rho_{\text{anh}} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_w} \cdot \frac{\partial \alpha_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_{\text{anh}} \cdot D_w \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_w} \cdot \frac{\partial \alpha_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_a \cdot \frac{\partial (\alpha_w \cdot p_s)}{\partial x} \right) \quad (2.26)$$

La forme tridimensionnelle s'écrit :

$$\rho_{\text{anh}} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_w} \cdot \frac{\partial \alpha_w}{\partial t} = \vec{\nabla} (\delta^* \cdot p_s \cdot \vec{\nabla} \alpha_w) + \vec{\nabla} (\delta_a \cdot \alpha_w \cdot \vec{\nabla} p_s) = \vec{\nabla} (\delta^* \cdot p_s \cdot \vec{\nabla} \alpha_w) + Q_w \quad (2.27)$$

Avec

$$\delta^* = \delta_a + \frac{\rho_{\text{anh}} \cdot D_w}{p_s} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_w} \quad (2.28)$$

Le paramètre δ^* représente la perméabilité apparente, c'est à dire la perméabilité vapeur corrigée de la teneur en eau. Enfin, Q_w désigne un terme source. Il représente l'influence de

la variation d'humidité sur l'équilibre thermique au travers le gradient de pression de vapeur saturante p_s (effet Soret) tel que :

$$Q_w = \vec{\nabla} (\delta_a \cdot \alpha_w \cdot \vec{\nabla} p_s) \quad (2.29)$$

Ces deux modes de transferts ainsi que leurs interactions sont schématisés sur la Figure 35.

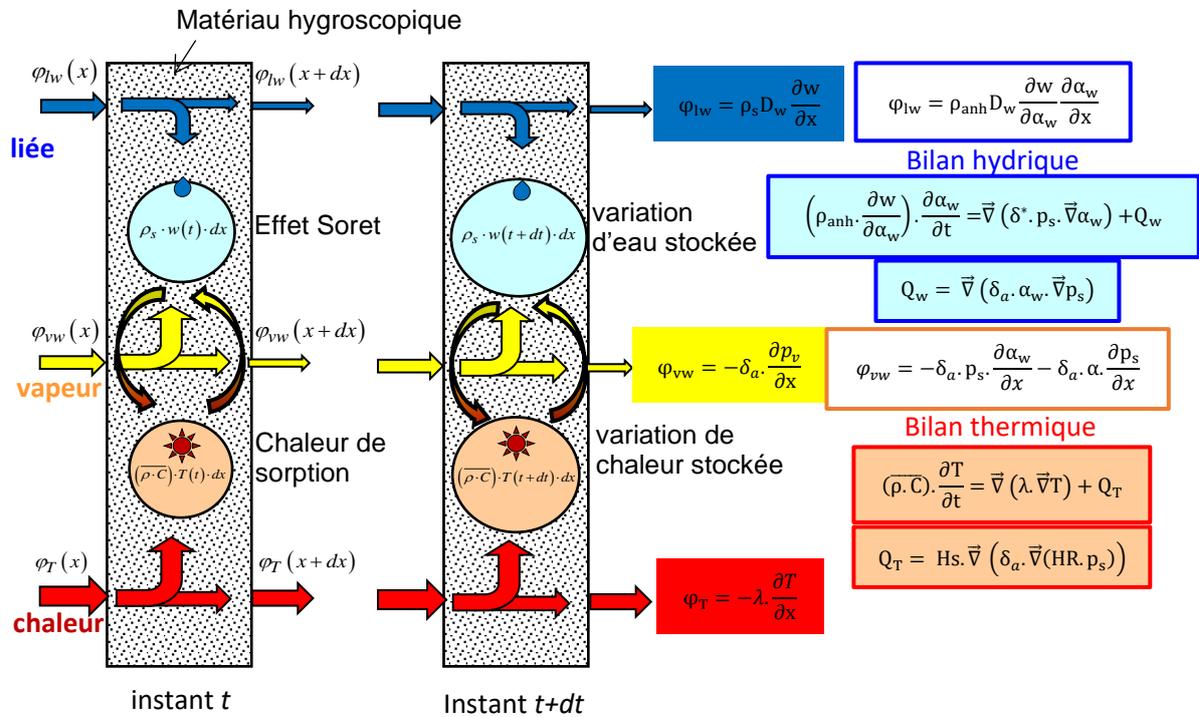


Figure 35 : Schématisation des transferts thermo-hydrrique et de leurs interactions

II.2.1.4. Echanges superficiels

Il est communément admis que la résistance superficielle d'un échange convectif est due à la présence d'une couche d'air en écoulement laminaire le long de la paroi. La trajectoire des molécules étant parallèle à la paroi dans cette couche, la chaleur et l'humidité peuvent donc se transmettre que par conduction dans l'air, avec un coefficient de conductivité thermique/hydrrique correspondant au cas de l'air immobile : $\lambda_{air} = 0,025 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, Figure 36.

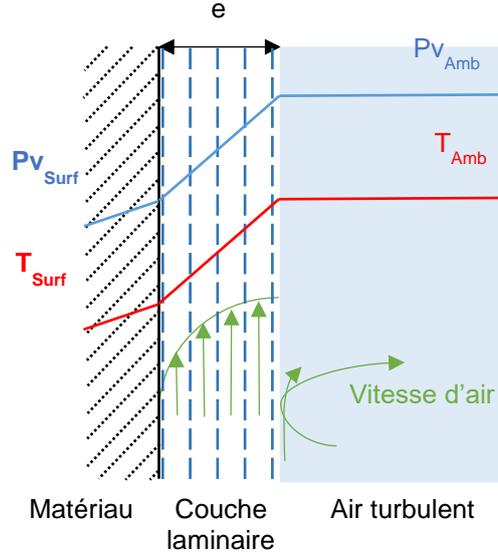


Figure 36 : Représentation schématique des échanges superficiels

L'équation représentant l'échange superficiel est :

$$\begin{aligned}
 \delta_a \bar{\nabla} (HR \cdot p_s)_0 \vec{n} &= (\delta_a p_s \bar{\nabla} HR)_0 \vec{n} + (\delta_a \cdot HR \cdot \bar{\nabla} p_s)_0 \vec{n} \\
 &= h_w (p_{v0} - p_{va}) = h_w (p_{s0} \cdot HR_0 - p_{sa} \cdot HR_a) \\
 &= h_w \cdot p_{s0} \left(HR_0 - \frac{p_{sa}}{p_{s0}} \cdot HR_a \right)
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

\vec{n} désigne la normale sortante, l'indice 0 représentant les grandeurs relatives à la surface du matériau, l'indice a représentant celles relatives à l'ambiance. L'équation peut alors s'écrire :

$$(\delta_a p_s \bar{\nabla} HR)_0 \vec{n} = h_{eq} (HR_0 - HR_{eq}) + \Phi_{s0} \tag{2.31}$$

Avec les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 HR_{eq} &= \frac{p_{sa}}{p_{s0}} HR_a \\
 h_{eq} &= h_w \cdot p_{s0}
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Enfin, le terme Φ_{s0} peut être assimilé à une densité surfacique de flux appliquée sur la surface du matériau, tel que :

$$\Phi_{s0} = -\delta_a \cdot HR \cdot \bar{\nabla} p_s \vec{n} \tag{2.33}$$

II.2.1.5. Traitement numérique du couplage thermo hydrique :

Le processus de résolution hybride consiste à résoudre successivement l'équation thermique puis l'équation hydrique via l'algorithme Theta-méthode classiquement utilisée dans Castem, et ce, pour la résolution de problèmes de thermique transitoire. Ce processus est répété itérativement avec une mise à jour, après chaque résolution, des propriétés physiques d'une part (conductivité thermique et perméabilité, capacités thermique et hydrique, etc...) mais aussi de la pression de vapeur saturante et des termes source (Q_T et Q_w). Le processus itératif

est ainsi répété jusqu'à convergence du résultat. Cette dernière sera atteinte lorsque la variation de chaque inconnue (température et humidité) entre deux itérations sera inférieure à une valeur maximale donnée notée t_{max} . Cette valeur est choisie à 0,1% de HR et 0,01°C. Ces valeurs correspondent à une précision dix fois supérieure à celle du capteur hygrothermique que nous avons utilisé pour la campagne expérimentale. Les systèmes à résoudre s'écrivent de la façon matricielle suivante :

$$\text{Résolution thermique : } [A_t] \cdot \{T\} = \{f_t\}$$

$$\text{Résolution hydrique : } [A_w] \cdot \{HR\} = \{f_w\}$$

La Figure 37 représente l'organigramme du traitement du couplage :

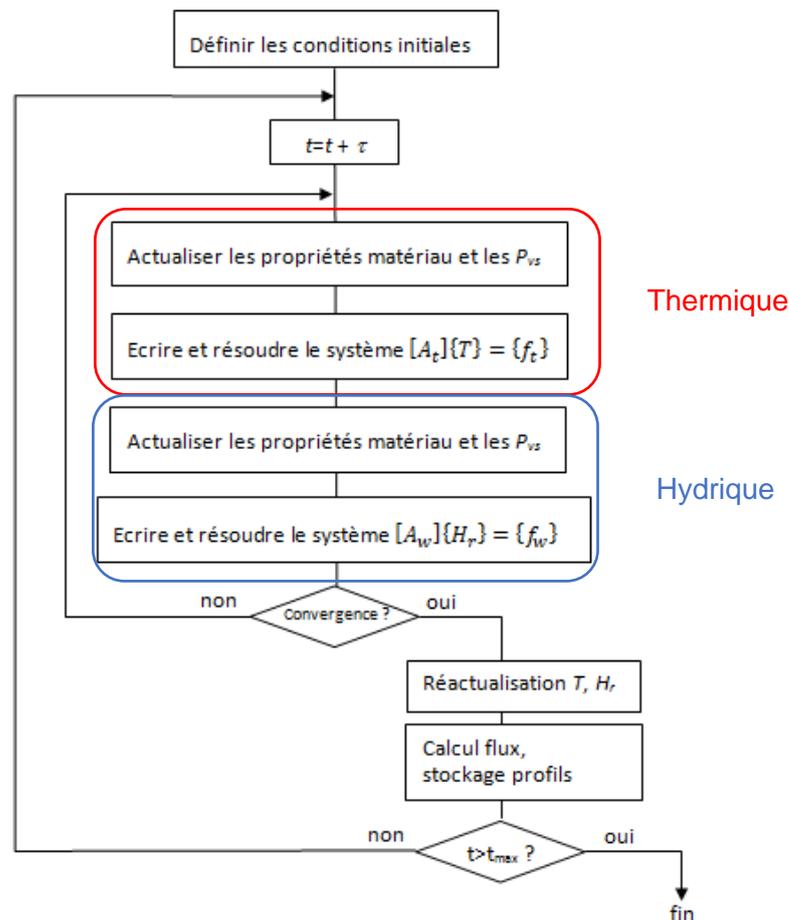


Figure 37 : Algorithme de couplage

II.2.2. Influence d'une ambiance variable sur les propriétés physiques

II.2.2.1. Propriétés physiques intrinsèques à l'essai

Nous avons vu précédemment que les échanges surfaciques provenaient d'un échange convectif dû à la présence d'une couche d'air en écoulement laminaire le long des parois d'échanges, Figure 36. Les coefficients d'échanges surfaciques thermique et hydrique dépendent alors des conditions de cette couche laminaire.

II.2.2.1.1. Coefficient d'échanges surfaciques thermique

Le coefficient d'échanges surfaciques thermique est la somme du coefficient d'échanges surfaciques par convection et par rayonnement. Recknagel (1995) propose une méthode pour calculer les deux coefficients d'échanges. Le coefficient d'échanges surfacique thermique par convection se détermine par la relation suivante :

$$h_v = 4 + 4.v \quad (2.34)$$

v est la vitesse du vent avoisinant l'élément d'étude.

Nous nous appuyerons ici sur les approximations utilisées pour le calcul des échanges surfaciques pour les bâtiments. Dans ce cas, la vitesse du vent a été choisie constante et égale à $0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Ainsi, le coefficient d'échanges surfaciques thermiques convectif est égale à $h_v = 4,4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Quant au coefficient d'échanges surfaciques par rayonnement, il admet la forme suivante :

$$h_r = 4.\sigma_{\text{SB}}.F_{1/2}.\varepsilon.T_{\text{moy}}^3 \quad (2.35)$$

σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma_{\text{SB}} = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$), T_{moy} la température moyenne entre l'élément d'étude et son environnement et $F_{1/2}$, le facteur de forme qui, au vu de l'importante différence de superficie entre les parois entourant l'élément d'étude et sa surface, est égal à l'émissivité de l'élément d'étude : $\varepsilon_{\text{bois}} = 0,9$.

A 20°C , le coefficient surfacique thermique par rayonnement, dans les conditions expérimentales des essais réalisés dans le cadre de ce travail, est égal à $h_r = 5,1 \text{ m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Ainsi, pour une vitesse de vent constante, et pour des températures allant de 0°C à 30°C , le coefficient d'échange surfacique thermique varie entre :

$$8,5 \leq h_t \leq 10,1 \text{ m}^{-2}.\text{K}^{-1} \quad (2.36)$$

Dans le domaine du génie civil, et au vu de l'influence de la température sur le coefficient d'échanges surfaciques thermique, nous avons considéré ce coefficient comme une constante valant : $h_t = 9,3 \text{ m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

II.2.2.1.2. Coefficient d'échanges surfaciques hydrique

Dans la littérature, il existe peu de données sur le coefficient d'échanges surfaciques hydrique h_w (Tremblay et al., 2000). Deux méthodes similaires permettent de déterminer ce coefficient. La première est celle proposée par Defraeye (2012). Elle consiste à écrire le coefficient d'échanges surfaciques hydrique en fonction du coefficient d'échanges surfaciques thermique par convection et la température, selon les lois de la mécanique des fluides :

$$h_w = \left(\frac{\delta_{\text{air}}}{\lambda_a} \right)^{2/3} \cdot \frac{h_v}{(\rho_a.C_a.R.T)^{1/3}} \quad (2.37)$$

Avec

- ✓ δ_{air} la perméabilité vapeur de l'air $\delta_{\text{air}} = 1,875.10^{-10} \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$
- ✓ λ_a : la conductivité thermique de l'air, $\lambda_a = 0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- ✓ ρ_a : La densité de l'air, $\rho_a = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}$ pour une altitude de 0m et une pression d'une atmosphère.

- ✓ C_a : la capacité thermique massique de l'air : $C_a = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- ✓ R la constante des gaz parfaits

Ainsi, à 20°C, le coefficient d'échanges surfaciques hydrique est $h_w = 3,2.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$ L'influence de la température sur ce paramètre est très faible (+0,1% pour une diminution de la température de 10°C). Ce coefficient est donc surtout dépendant du coefficient d'échanges surfaciques thermique par convection qui, dans notre cas, est considéré comme constant.

Une deuxième approche est basée sur le même principe utilisé pour le coefficient h_t . Le mécanisme de diffusion de la vapeur d'eau, dans la couche laminaire d'épaisseur e entourant l'élément d'étude, est identique au cas de l'air immobile. On peut donc déterminer le coefficient d'échanges hydrique superficiel de la façon suivante :

$$h_w = \frac{\delta_{\text{air}}}{e} = h_v \cdot \frac{\delta_{\text{air}}}{\lambda_a} \quad (2.38)$$

Le coefficient d'échanges surfaciques hydrique est dans ce cas égal à $h_w = 3,3.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$. Ainsi, les deux méthodes convergent vers un résultat similaire.

II.2.2.2. Propriétés physiques intrinsèques au matériau

II.2.2.2.1. Capacité thermique massique

Cette grandeur dépend aussi bien de la teneur en eau w que de la température T . C'est pourquoi il est difficile de trouver dans la littérature des essais expérimentaux montrant l'influence de la température et de l'humidité sur chaque essence de bois. C'est ainsi que la norme NF EN 12524 (AFNOR, 2000) donne une fourchette de valeur allant de 1500 à 1700 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. D'autre part, d'autres références présentent des variations de capacité thermique massique allant de 1300 à 2400 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. (Deglise and Donnot, 2004; Duplex et al., 2013; Kanter, 1957; Radmanović et al., 2014; TenWolde et al., 1988; Volbehr, 1896).

L'influence des conditions climatiques sur la capacité thermique pour le matériau bois a été effectué dans différents travaux. Cependant, les résultats ne semblent pas toujours concorder, même si les tendances sont similaires.

- Radmanovic, citant Volbehr, propose une relation décrivant l'influence de la teneur en eau et de la température sur la capacité thermique :

$$C_h = 1,08 + 4,08.10^{-3}.w + 2,53.10^{-3}.T + 6,28.10^{-5}.w.T \quad (2.39)$$

T est la température en °C, w la teneur en eau.

- TenWolde puis Deglise reprenant les travaux de Dunlap (1912), donnent une relation linéaire permettant de corriger la capacité thermique massique anhydre avec la température.

$$C_{\text{anh}} = 0,003867.T + 0,1031 \quad (2.40)$$

Ensuite, ils corrigent, comme de nombreux autres auteurs (Künzel, 1995; Laou, 2017; Medjelekh, 2015), la capacité thermique massique de la teneur en eau à partir de la loi des mélanges :

$$C_h = \frac{C_{anh} + (w.C_e)}{(1 + w)} \quad (2.41)$$

Avec :

- C_e , la capacité thermique massique de l'eau égale à $4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- C_{anh} , la capacité thermique massique du matériau anhydre. Ce paramètre physique est propre à chaque essence. Il est fonction de la température. Il peut être déterminé de façon expérimentale à partir d'un essai calorimétrique (Medjelekh, 2015), ou de façon moins précise à partir d'une mesure par Hot Disk (Dupleix et al., 2013).

II.2.2.2.2. Masse volumique du matériau

Cette grandeur se définit comme le rapport entre la masse de l'élément d'étude sur son volume. Cette propriété physique est donc fortement liée à la teneur en eau. Dans le cas d'un matériau hygroscopique, sa définition peut être complexe. Nous négligerons, dans les variations de masse volumique, la part due aux variations de volume. Suivant la disponibilité des données, l'état de référence pourra être choisi, par exemple, comme l'état anhydre ρ_{anh} . Ainsi, la masse volumique s'écrit :

$$\rho_h = \rho_{anh} \cdot (1 + w) \quad (2.42)$$

II.2.2.2.3. Conductivité thermique

Compte tenu de la structure du bois, la conductivité thermique de celui-ci dépend de sa densité, de la direction considérée (L ou RT), et bien sûr de l'humidité interne. Il a été remarqué que la conductivité thermique du bois était proportionnelle à sa densité. C'est ainsi que (Trouy-Triboulot et Triboulot, 2012) proposent la relation suivante pour le sens transversale :

$$\lambda_{12\%} = 0,62.d - 0,15 \quad (2.43)$$

d représente la densité du bois à 12% d'humidité interne. Les auteurs proposent également une relation entre l'humidité du bois et la conductivité thermique pour les essences de chêne et d'épicéa et selon les deux directions (L et RT). Cette approche sera retenue par la suite, Tableau 7.

Tableau 7 : Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique

Essence	Sens	Conductivité thermique λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Chêne ($d = 0,65$)	L	$\lambda = 0,17.w + 0,28$
	RT	$\lambda = -0,17.w + 0,22$
Epicéa ($d = 0,45$)	L	$\lambda = 0,22.w + 0,17$
	RT	$\lambda = -0,04.w + 0,14$

II.2.2.2.4. Chaleur de sorption

L'équation (2.20) représente l'influence de l'activité de l'eau sur l'enthalpie de sorption. L'activité de l'eau est assimilable à un potentiel chimique d'un élément en équilibre qui dépend d'une fonction d'état qui est la pression de vapeur. Alors que l'état d'énergie le plus bas correspond aux molécules d'eau liées, le plus haut est associé aux molécules d'eau libre. Cet

état d'énergie est atteint uniquement lorsque toutes les fibres sont saturées. Ainsi, il est pris comme hypothèse que l'enthalpie de sorption est nulle pour une teneur en eau égale à la teneur en eau de saturation. Plusieurs essais (Merakeb et al., 2009; Navi and Heger, 2005; Skaar, 1988) ont été réalisés et ont permis de montrer que l'enthalpie de sorption décroît de façon exponentielle avec l'augmentation de la teneur en eau. C'est ainsi qu'on trouve dans la littérature des modèles de type logarithmique ou exponentiel inversée reliant l'enthalpie de sorption à la teneur en eau.

$$\Delta H_s = A_{ad/de} \cdot \ln \frac{W}{W_s} \quad (2.44)$$

w_s est la teneur en eau de saturation, $A_{ad/de}$ un coefficient de calage qui dépend du sens de diffusion. La forme semi empirique de cette équation permet de se rapprocher des phénomènes physiques. En effet, à la teneur en eau de saturation, les molécules d'eau adsorbées sont proches du niveau énergétique des molécules d'eau libre. C'est pourquoi, l'enthalpie de sorption au point de saturation des fibres doit s'annuler. De plus, à l'état sec, l'énergie nécessaire pour arracher les dernières molécules d'eau est très importantes. Proche de l'état anhydre, il subsiste une quantité d'eau liée appelée teneur en eau irréductible. Il est quasi impossible d'extraire cette eau sans détruire la structure cellulosique du bois. Ainsi, on peut estimer qu'il faut une énergie infinie pour extraire les dernières molécules d'eau présentes dans le matériau. Si ce point mériterait d'être exploré pour les problématiques de combustion, il est toutefois en dehors de la plage d'étude dans la construction bois.

Rawat, a repris les essais de diffusion de K.E. Kelsey(1957) sur l'*Araucaria hunsteinii*, également appelé Klinki pine. Cet arbre de Nouvelle Guinée a une teneur en eau de saturation avoisinant celle du douglas, à savoir, $w_s = 25\%$. A partir des essais pour quatre températures différentes, Rawat a déterminé l'évolution expérimentale des trois énergies mises en jeu dans le phénomène de sorption :

$$\Delta G = \Delta H_s - T \cdot \Delta S \quad (2.45)$$

L'expression fait intervenir la différence d'énergie libre, ΔG , correspondant à la différence entre l'énergie libre de l'eau libre et l'énergie libre de l'eau adsorbée, ΔH_s , la différence d'enthalpie entre l'eau libre et l'eau liée et ΔS la différence d'entropie entre l'eau libre et l'eau liée. L'énergie libre est fonction de l'activité de l'eau dans le matériau et de la température. Elle s'écrit de la façon suivante :

$$\Delta G = \pm R \cdot T \cdot \ln(\alpha_w) \quad (2.46)$$

R est la constante des gaz parfaits, T la température en K, et α_w l'activité de l'eau dans le matériau. L'énergie libre est une variable d'état induite qui permet de définir le travail utile susceptible d'être fourni à un système. Ainsi, ΔG est positif dans le cas d'une désorption et négatif dans le cas d'une adsorption.

En combinant les équations (2.45) et (2.46), on peut écrire l'activité de l'eau en fonction de la différence d'enthalpie et de l'entropie :

$$\ln(\alpha_w) = \pm \left(\frac{\Delta H_s}{R \cdot T} - \frac{\Delta S}{R} \right) \quad (2.47)$$

La fonction $\ln(\alpha_w) = f(1/T)$ peut être interpolée par une droite pour chaque valeur de teneur en eau et sur la plage de température qui nous intéresse (entre -10°C et $+40^\circ\text{C}$). L'équation (2.47) s'écrit alors :

$$\ln(\alpha_w) = \pm \left(\frac{\Delta H_s}{R} \cdot \frac{1}{T} - \frac{\Delta S}{R} \right) \quad (2.48)$$

Les droites ainsi créées sont appelées isostères de sorption. Elles ont donc, pour coefficient directeur, l'enthalpie de sorption (à l'inverse de R près) et pour ordonnée à l'origine l'entropie (à l'inverse de R près). D'après l'équation (2.48), nous prendrons pour hypothèse que l'enthalpie de sorption est indépendante de la température, hypothèse qui a été validée expérimentalement à plusieurs reprises (Rawat, 1996; Touati et al., 2007; Touil et al., 2015).

En déterminant la pente des isostères de sorption pour différentes teneurs en eau, on peut alors représenter l'évolution de la chaleur de sorption pour différentes teneurs en eau. C'est ainsi que Rawat propose une évolution de la chaleur de sorption en fonction de la teneur en eau et du cycle de diffusion de l'*Araucaria* en utilisant l'expression (2.44), Figure 38.

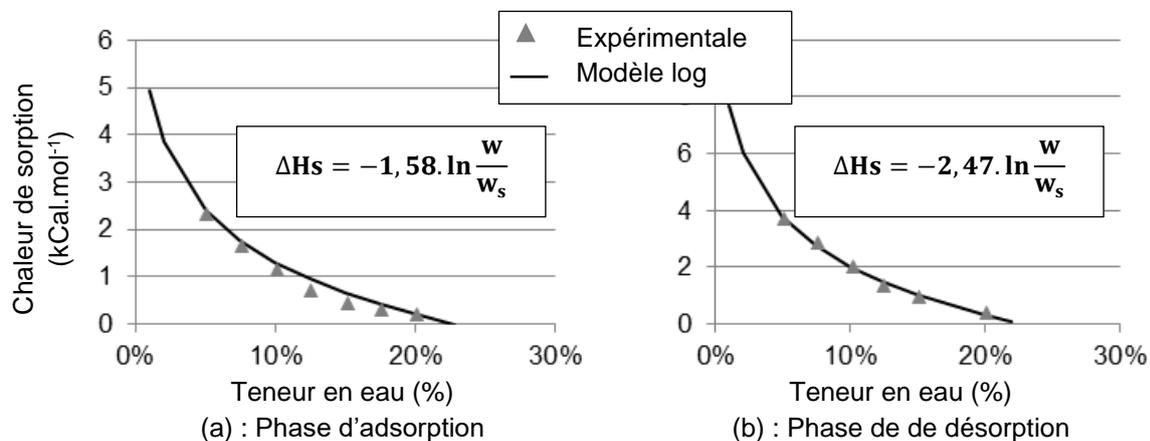


Figure 38: Enthalpie de sorption expérimentale/modèle logarithmique (Rawat, 1996)

On remarquera que la chaleur de désorption est supérieure à celle d'adsorption, ce qui est également en accord avec les phénomènes physiques présents. Cette différence d'énergie confirme donc le phénomène d'hystérésis. D'autres essais ont été réalisés et montrent que le coefficient A est différent d'une essence à l'autre (Bahar, 2015; Bahar et al., 2016).

II.2.2.3. Influence de la température sur les propriétés hygrothermiques du bois

Les interprétations et modélisations de la diffusion s'appuyant souvent sur des résultats expérimentaux obtenus en ambiance contrôlée et température constante, l'influence de la température est souvent écartée. Dans un objectif final de suivi des structures bois en service, c'est au contraire une étape importante de la démarche présentée ici.

II.2.2.3.1. Perméabilité apparente

II.2.2.3.1.1. Loi d'Arrhenius

Il a été vu dans la partie II.1.3.2.2 que la loi d'Arrhenius permet de décrire la dépendance du facteur de vitesse d'une réaction à la température selon la loi (2.13). Cette équation a été reprise par la suite pour les phénomènes de diffusion de l'eau dans le bois, que ce soit au

niveau de la perméabilité apparente ou du coefficient de diffusion (Choong, 1965; Stamm, 1959) :

$$\delta^* = \delta_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (2.49)$$

II.2.2.3.1.2. Energie d'activation

L'énergie d'activation représente l'enthalpie nécessaire à un système pour passer d'un état à un autre en fonction de l'état initial et final de celui-ci. L'évolution de l'enthalpie d'une molécule d'eau dans le bois suit le diagramme de la Figure 39 en fonction des trois états d'équilibre (eau vapeur, eau libre et eau liée).

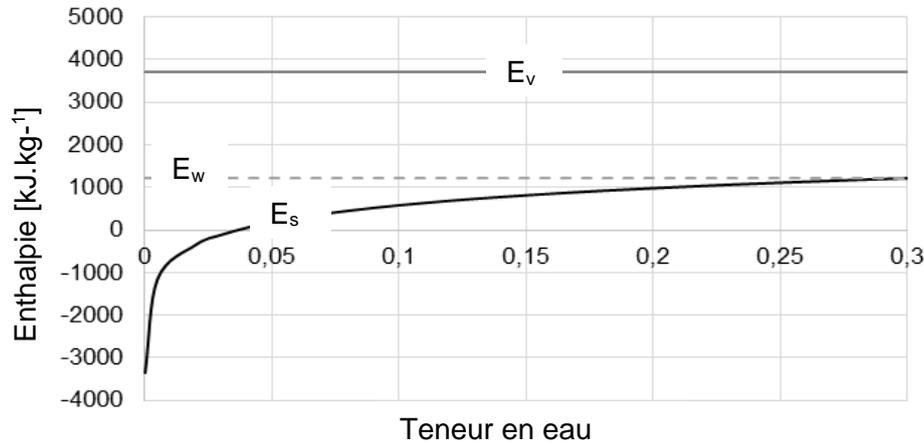


Figure 39 : Evolution de l'enthalpie des molécules d'eau dans le bois en fonction de l'état d'équilibre

L'enthalpie de l'eau libre est définie par la variable E_w selon l'équation :

$$E_w = C_e \cdot T \quad (2.50)$$

C_e représente la capacité calorifique thermique de l'eau liquide en $\text{kJ.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, et T la température en K. Le niveau d'énergie E_v désigne l'enthalpie des molécules de vapeur d'eau :

$$E_v = L + C_e \cdot T \quad (2.51)$$

E_s représente l'enthalpie de sorption telle que :

$$E_s = \Delta H_s + C_e \cdot T \quad (2.52)$$

En reprenant les travaux de (Nelson, 1986, 1991; Siau and Jin, 1985b; Skaar, 1988), l'énergie d'activation E_a représente l'écart d'enthalpie entre l'enthalpie de l'eau vapeur, et l'enthalpie de sorption auquel est soustrait l'enthalpie de la vapeur d'eau. Elle prend la forme suivante :

$$E_a = (E_v + E_s) - (C_{ve} \cdot T) = H_s - (C_{ve} \cdot T) \quad (2.53)$$

Avec C_{ve} la capacité thermique massique de la vapeur d'eau

II.2.2.3.1.3. Dépendance de perméabilité apparente à la température et à la teneur en eau

En considérant l'expression (2.53), la perméabilité apparente δ^* , dont la forme générale est rappelée dans l'équation (2.49), devient :

$$\delta^* = \delta_o \cdot \exp\left(-\frac{H_s - (C_{ve} \cdot T)}{R \cdot T}\right) \quad (2.54)$$

La Figure 40 présente la dépendance de la perméabilité apparente à la température et à la teneur en eau pour les deux cycles de sorption.

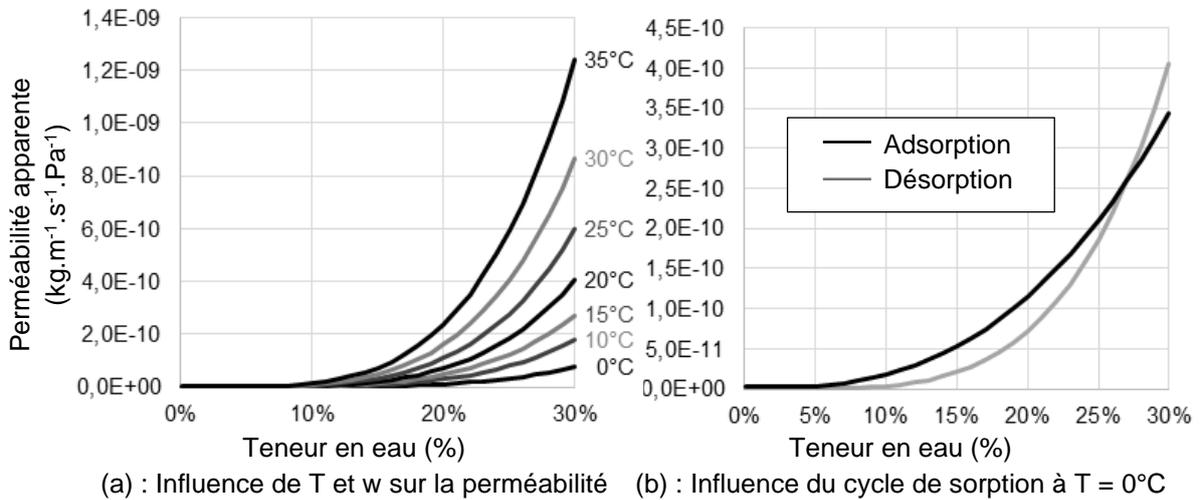


Figure 40 : Influence de la température, la teneur en eau et du cycle de sorption sur la perméabilité apparente

La loi d'Arrhenius induit une dépendance de la perméabilité apparente plus forte à la température qu'à la teneur en eau. Ainsi, par une approche thermodynamique, nous proposons une loi prenant en compte aussi bien l'influence de l'humidité interne sur la perméabilité que celle de la température. De plus, au travers la dépendance de la chaleur de sorption à l'humidité, la loi d'Arrhenius permet de quantifier la perméabilité apparente selon le cycle de sorption.

II.2.2.3.2. Isotherme de sorption

Une grande part des travaux concernant les isothermes de sorption est présentée, dans la littérature, sous conditions isothermes. Or, il est admis aujourd'hui que l'équilibre hydrique est conditionné par la température du milieu. Perré. (2001) et Merakeb. (2009) ont proposé une première correction touchant particulièrement l'humidité d'équilibre w_s à 100% d'humidité relative. D'une approche phénoménologique, elle prend la forme d'une dépendance linéaire à la température telle que :

$$w_s = 0,598 - 10^{-3} \cdot T, \quad T \text{ exprimé en K} \quad (2.55)$$

II.2.2.3.2.1. Principe de Le Chatelier

En accord avec les travaux de (Frandsen, 2007) nous abordons cette question sous l'angle des échanges thermodynamiques dont la température représente un catalyseur selon le principe de Le Chatelier. Considérons une augmentation de température ΔT . La variation de chaleur induite est définie par :

$$dE = m_h \cdot C_h \cdot dT \quad (2.56)$$

C_h représente la capacité thermique massique du matériau 'homogénéisé' de masse m_h déduit de la masse anhydre m_{anh} et de la masse d'eau liée m_e telle que :

$$m_h = m_{anh} + m_e \quad (2.57)$$

Cette variation de chaleur s'équilibre avec le processus de sorption. Les expressions (2.21), (2.44), (2.56) et (2.57) permettent alors d'écrire à l'humidité de saturation ($w = w_s$) comme suit:

$$(m_{anh} \cdot C_{anh} + m_e \cdot C_e) \cdot dT = -L \cdot dm_e \quad (2.58)$$

C_{anh} et C_e représentent, respectivement, les capacités thermiques massiques du matériau anhydre et de l'eau. En considérant l'expression (2.1), l'équation (2.58) s'écrit sous la forme d'une équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dw_s}{dT} + \frac{C_e}{L} \cdot w_s = -\frac{C_{anh}}{L} \quad (2.59)$$

Ainsi, la résolution de l'équation (2.59) permet de donner une forme analytique de l'humidité de saturation en fonction de la température :

$$w_s(T) = \left(w_s^0 + \frac{C_{anh}}{C_e} \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_e}{L} \cdot T\right) - \frac{C_{anh}}{C_e} \quad (2.60)$$

Expression dans laquelle la température T est exprimée en °C. w_s^0 désigne la teneur en humidité de saturation à 0°C.

II.2.2.3.2.2. Hypothèses d'études

Le modèle analytique proposé est comparé aux données déduites de l'abaque d'équilibre hygrosopique de l'Eurocode 5 (AFNOR, 2010) et à la fonction linéarisée proposée par Perré. Notre modèle présente une très bonne corrélation, et ce, avec les paramètres thermodynamiques suivants, Figure 41 :

$$L = 2501 - 2,4464 \cdot T \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}, C_{anh} = 1600 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]} \text{ et } C_e = 4180 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$$

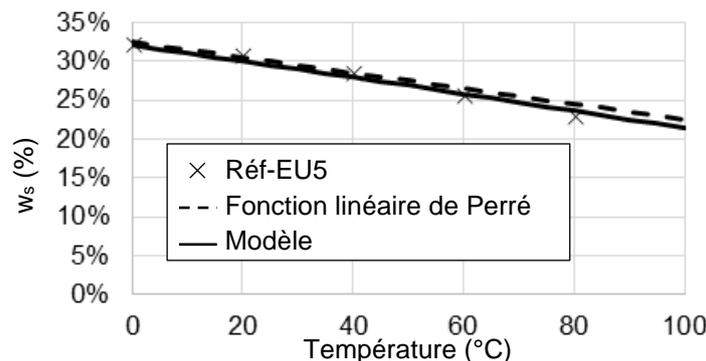


Figure 41 : Influence de la température sur la teneur en eau de saturation

II.3. Démarche d'identification expérimentale des paramètres des essences étudiées

Le nombre important de paramètres dépendants de la température et de la teneur en eau conduit souvent à simplifier ces dépendances. C'est pourquoi, les différentes méthodes citées précédemment permettent de caractériser les propriétés de diffusion de l'eau dans le bois à

l'aide d'essais expérimentaux en environnement contrôlé. Pour cela, ces méthodes nécessitent l'utilisation de chambres climatiques, moyens expérimentaux précis et onéreux. Les protocoles d'identification des paramètres de diffusion par stabilisation par paliers nécessitent des mois voire des années de mesure.

Dans un objectif de diagnostic in situ des structures, la diffusion de l'eau liée dans le bois doit prendre en compte l'influence de la température. L'identification expérimentale des paramètres de diffusion pour différentes températures pour les trois essences d'études prendrait un temps considérable et non raisonnable en utilisant des enceintes climatiques.

Nous proposons donc un nouveau protocole de détermination des paramètres de transfert de l'eau dans le bois en ambiance variable, rapide et peu onéreux.

II.3.1. Matériel et méthodes

II.3.1.1. Essences et géométries des échantillons d'étude

Le chêne (*Quercus Petraea*), le hêtre (*Fagus Sylvatica*) et le peuplier (*Populus euramericana 'Robusta'*) sont les trois essences de feuillus tempérées étudiées auxquelles a été ajouté le douglas (*Pseudotsuga menziesii*) comme référence.

Dans un souci de simplification vis-à-vis des pièces de structures, l'orthotropie du matériau pour l'identification des paramètres de diffusion est limitée à deux sens : le sens longitudinal et le sens transversal (isotropie transverse). Ainsi, deux éprouvettes par essence sont utilisées pour caractériser ses propriétés de diffusion, l'une pour le sens longitudinal et l'autre pour la section transversale. Les surfaces non diffusantes sont imperméabilisées à l'aide d'un mastic silicone recouvert d'une feuille d'aluminium, Figure 42.

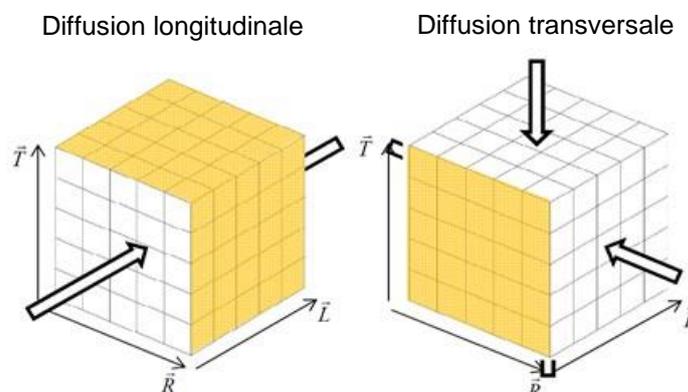


Figure 42 : 4 faces étanches pour la diffusion longitudinale et 2 faces étanches pour la diffusion transversale

L'étude du champ hydrique dans l'espace et le temps peut se faire de deux façons. Tout d'abord, par le suivi de la masse de l'éprouvette, on peut déterminer l'évolution de la quantité d'eau moyenne au sein de l'éprouvette à l'instant de la mesure. On peut également s'intéresser au profil d'humidité le long de l'éprouvette, permettant alors de présenter l'évolution du front hydrique au moment de la mesure. Afin de coupler ces deux informations, il a été choisi de travailler sur deux géométries différentes.

Les éprouvettes L ont une géométrie de type parallélépipède rectangle de 200mm de longueur pour une section transversale carrée de 50mm de côté, Figure 43. Cette géométrie est le résultat d'un compromis ; elle permet à la fois d'avoir une éprouvette de petite taille, permettant

à une balance de précision de mesurer l'évolution de masse, tout en ayant des surfaces d'échange avec l'environnement assez grandes pour permettre des échanges hydriques quantifiables. Enfin, la forme allongée de l'éprouvette permet de la découper à la fin de l'essai afin d'en déduire le profil hydrique.

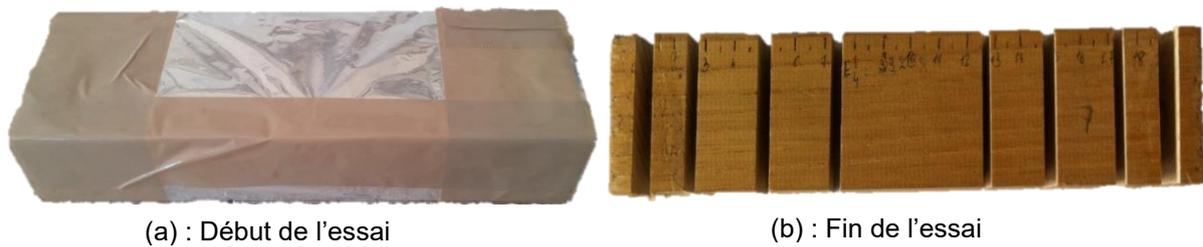


Figure 43 : Echantillon longitudinal de chêne

Les éprouvettes RT ont une géométrie répondant à un compromis entre la disponibilité des sections d'avivés, toutes essences confondues, et le ratio surface d'échange sur volume, (Manfoumbi, 2012) (Figure 44).



Figure 44 : Échantillons pour essais de diffusion transversale

II.3.1.2. Choix du lieu d'essai

Ce protocole expérimental est basé sur la richesse des variations thermo-hydriques que peuvent apporter des conditions extérieures. Cependant, le dispositif est protégé des intempéries et de l'ensoleillement direct. Ces conditions correspondent à une classe de service 2 définie dans l'Eurocode 5 pour un climat de moyenne montagne. Le dispositif étant placé sous un appentis fermé sur trois côtés, la vitesse de l'air, non mesurée, est faible et constante.

II.3.1.3. Choix du matériel utilisé

Pour une raison de robustesse du protocole expérimental, le dispositif expérimental se veut simple. Les mesures de masse des éprouvettes sont effectuées à l'aide de balances (balance Precisa Série 321LS avec une capacité de 620g connectées à un ordinateur pour un enregistrement toutes les dix minutes. Un capteur numérique (Ahlborn FHAD46-2) de type capacitif, branché à une centrale d'acquisition, permet de mesurer l'humidité de l'air, la température et la pression atmosphérique. L'ensemble expérimental est résumé en Figure 45.

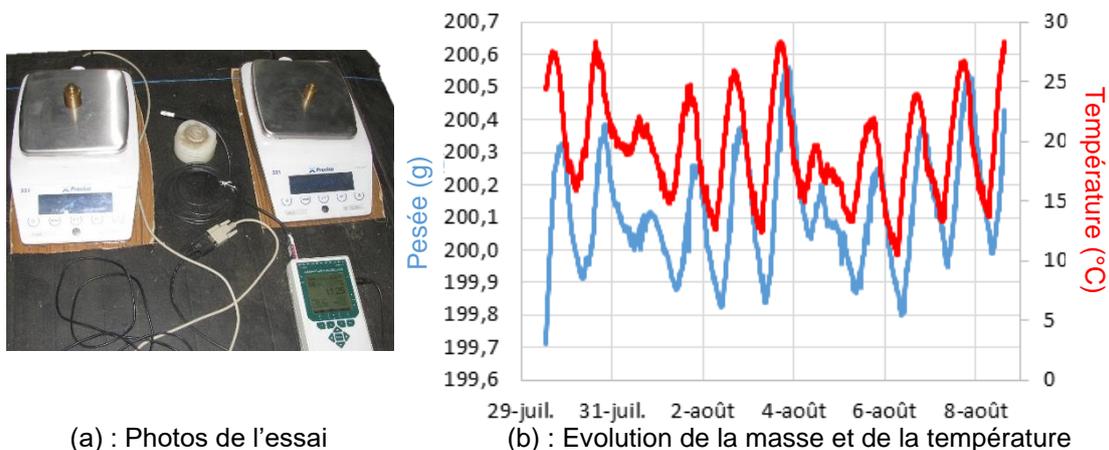


Figure 45 : Dispositif expérimental

La difficulté métrologique principale réside dans la sensibilité des balances aux variations de température. Des mesures préliminaires ont permis de corriger les mesures de pesées en fonction de la température.

II.3.1.4. Influence de la température sur les balances

Les balances utilisées ne corrigent pas la pesée de l'influence de la température. En effet, ces balances sont constituées d'un corps d'épreuve associé à un pont de jauge de déformation complet. Aucune auto-calibration étant effectuée, les pesées successives des balances sont donc sensibles à la température. Une calibration a été réalisée en mesurant, dans le temps, la dérive de la mesure d'une masse étalon, et ce, pendant une semaine afin d'avoir une amplitude suffisante de la température. Les masses étalon sont choisies de façon à se rapprocher de la masse initiale de l'éprouvette en bois, Figure 46.a. Il est alors possible de comparer les variations de températures et de masse, Figure 46.b.



(a) : Photos de l'essai
(b) : Evolution de la masse et de la température
Figure 46 : Essai de correction de la pesée des balances en fonction de la température

L'évolution de la pesée est déphasée par rapport à la température extérieure. En effet, la sensibilité à la température intègre un processus de transfert de chaleur dans les différents éléments de la balance, Figure 47, se traduisant par une boucle d'hystérésis, Figure 47.

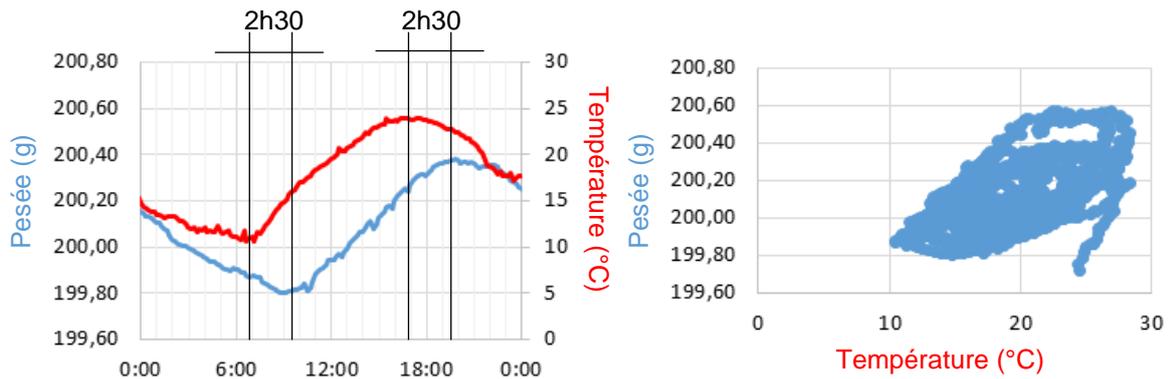


Figure 47 : Déphasage entre température environnante et pesée

En corrigeant l'évolution de la pesée du déphasage de 2h30, nous pouvons déterminer une régression linéaire entre l'évolution de la température environnante et la pesée, Figure 48.

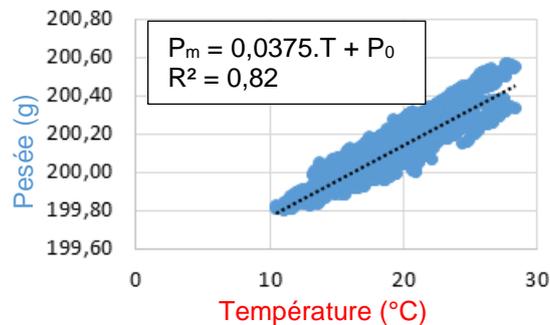


Figure 48 : Coefficient de correction de la pesée en fonction de la température

En introduisant un déphasage de 2h30min, la pesée corrigée s'écrit comme suit :

$$P_c(t) = P_m(t) + \text{Coef.} \cdot (T_{\text{ini}} - T(t)) \quad (2.61)$$

Avec :

- P_m : pesée mesurée au temps t
- Coef : coefficient de correction linéaire
- T_{ini} : température au début de l'essai
- T : température au temps t

L'essai de calibration a été réalisé entre le 29 juillet et le 8 août, et ce, avec une masse étalon de 200g. Les conditions environnantes sont présentées en Figure 49.

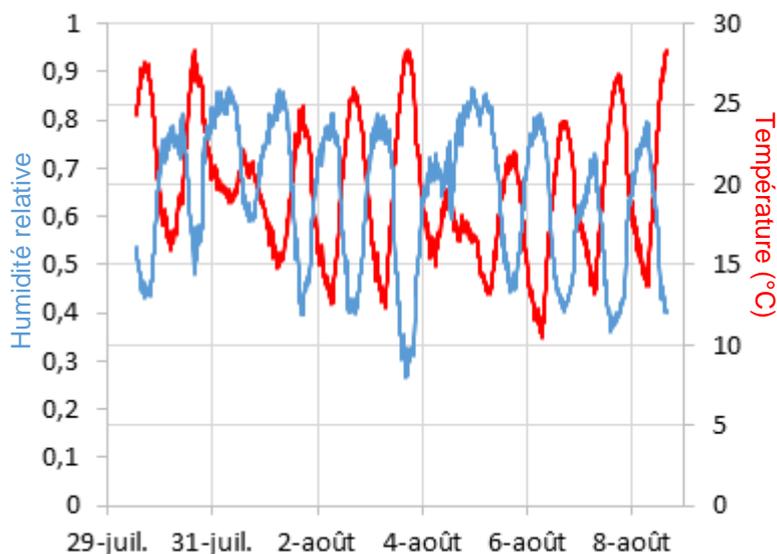


Figure 49: Evolution de la Température et de l'Humidité relative

A partir de cet essai, la méthode de correction a été effectuée. Ainsi, les paramètres de correction de la pesée ont été déterminés, Tableau 8.

Tableau 8 : Paramètres de déphasages et de correction de la température

Paramètres de déphasage	$\Phi = 2h30$
Coefficient de correction linéaire	Coef = $3,75 \cdot 10^{-2}$

L'évolution de la pesée corrigées de la température est présentée en Figure 50 :

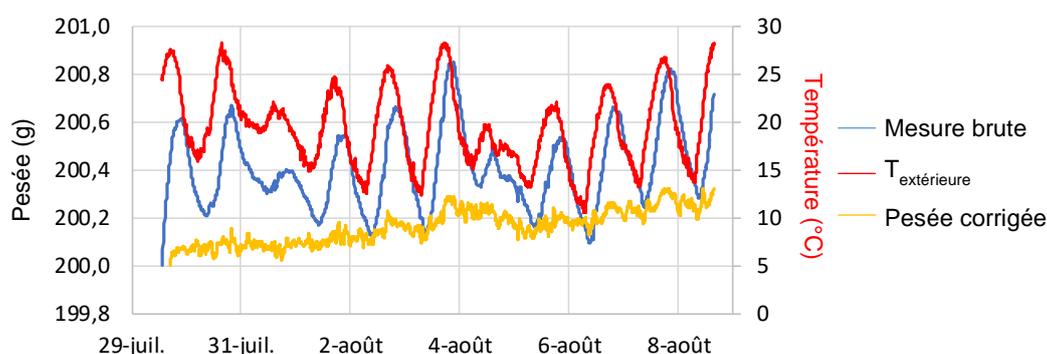


Figure 50 : Correction de la pesée par la température

Cette méthode permet de corriger la pesée de l'influence de la température sur le système de mesure. L'erreur moyenne relative de cette méthode est de 0,08%, pour un écart type moyen de 11%. Pourtant, cette méthode présente une tendance à l'augmentation de la valeur de la pesée. Cela provient sûrement d'une dérive de la balance dans le temps. Cependant, l'erreur induite est de l'ordre de grandeur de la précision de la balance (0,1g). Elle a donc été négligée.

II.3.1.5. Méthodologie

II.3.1.5.1. Eprouvettes

Les éprouvettes ont été usinées dans les mêmes pièces que les poutres métriques, voir Tableau 9.

Tableau 9 :Eprouvettes d'essai de diffusion

Direction de diffusion	Douglas (Référence)	Chêne	Hêtre	Peuplier
Longitudinale (200x50x50 mm ³)				
Transversale (50x50x50 mm ³)				

La connaissance de l'état hydrique initial est une donnée primordiale pour la justesse du calage. Or, si la teneur en eau moyenne peut être corrigée à posteriori par analyse inverse, l'hétérogénéité de la distribution spatiale de l'humidité est inconnue.

Des simulations numériques préliminaires ont été réalisées sur Castem avec des profils d'humidité interne initiaux homogènes, secs à cœurs et humide à cœur, pour une même humidité moyenne. Avec les données de cette étude, la simulation numérique montre que l'incertitude sur l'état initial n'a plus de conséquences au-delà d'une semaine.

Afin de garantir une similitude de comportement, les éprouvettes ont été entreposées dans une enceinte climatique non régulée en température, Figure 51. Des sels de chlorure de sodium ont été placés dans l'enceinte afin d'obtenir un environnement de conditionnement constant à 22°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) et à HR $\approx 71\%$ ($\pm 3\%$).



Figure 51 : Enceinte climatique de régulation d'humidité initiale

II.3.1.5.2. Déroulement de l'essai

Pour chaque couple d'éprouvettes, les essais se déroulent sur 5 semaines. Outre la semaine nécessaire à effacer les conditions initiales, l'ensemble de la mesure est découpé en trois périodes comme indiquées en Figure 52.

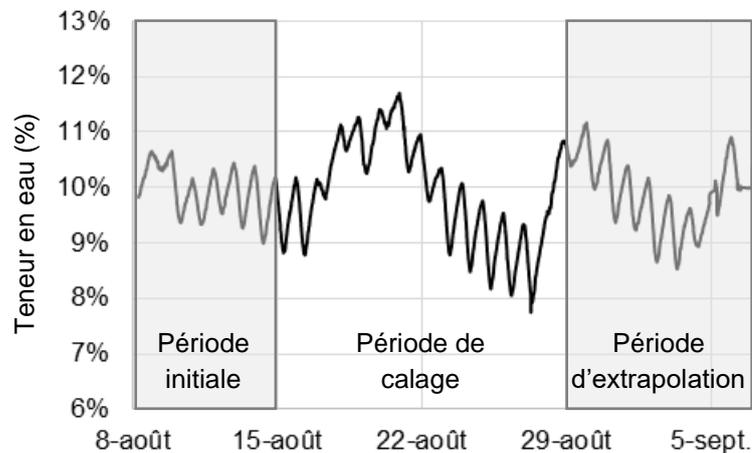


Figure 52 : Protocole expérimental avec période, initiale, calage, validation

Les paramètres du modèle numérique sont identifiés sur deux semaines consécutives tandis qu'une dernière semaine est utilisée en extrapolation pour valider la cohérence des paramètres.

II.3.1.6. Plan d'expérience

Cette campagne expérimentale a été conduite entre novembre 2017 et octobre 2018. En fonction des contraintes de temps et de matériel, le nombre de répétition des mesures a été limité à deux. Ces essais ont été organisés de façon à réaliser un essai durant l'été et un autre durant une saison intermédiaire. La période hivernale n'a pas été exploitée pour ne pas détériorer le matériel de mesure. De plus, le développement du modèle de diffusion n'est pas capable de fonctionner pour des valeurs de température négatives. L'étude de la diffusion dans ces conditions de températures est une perspective à part entière pour une application au génie civil bois. Le plan d'expérience est résumé dans le Tableau 10.

Avant de réaliser ce programme expérimental nous avons effectué plusieurs essais de faisabilités courant 2016-2017. Les résultats obtenus seront exploités lors du bilan des résultats d'identification des propriétés de diffusion afin d'augmenter la répétabilité de l'essai. En Annexe 1 est donné le planning de ces essais.

Tableau 10 : Planning des essais de diffusion

		Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aoû.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
T_{moy}	°C	3,5				8,1	13,5	18	21,2		20,7	16,3			
T_{min}		-6,5				0,7	3,1	10,3	15,6		10,5	7,3			
T_{max}		12,6				18,8	23,6	25,2	28,3		32,2	25,6			
HR_{moy}	%	83,7				71,5	68,4	73,6	58,1		61,7	64,2			
HR_{min}		45,6				33	32	41,1	31,6		30,1	36			
HR_{max}		100				93,7	88,4	88,2	86,8		87	84,6			
Essence	Direction														
Hêtre	L														
Hêtre	RT														
Chêne	L														
Chêne	RT														
Peuplier	L														
Peuplier	RT														
Douglas	L														
Douglas	RT														

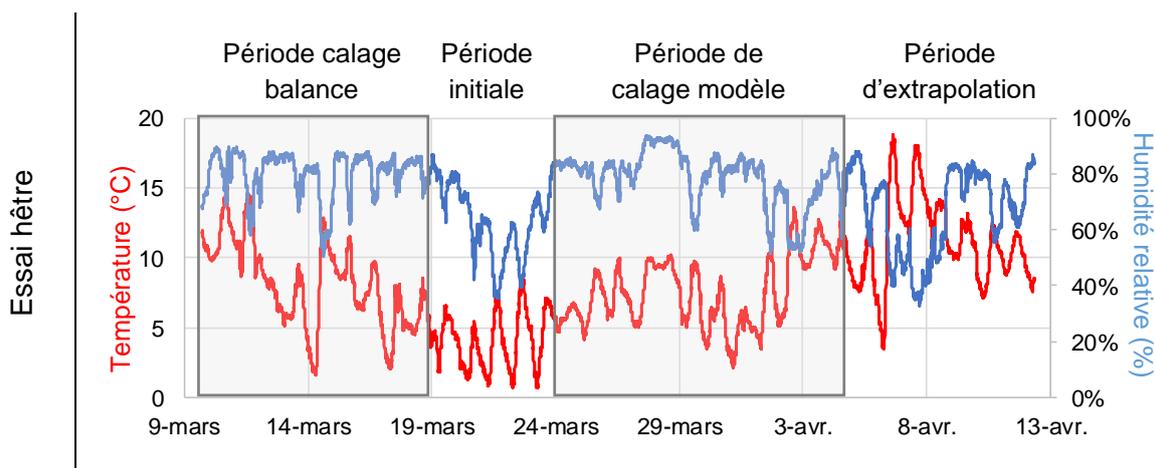
II.3.2. Résultats expérimentaux

Sur l'ensemble des essais de caractérisation effectués, nous ne présenterons ici que deux essais.

- L'essai sur l'essence de hêtre au cours des mois de mars-avril
- L'essai sur l'essence de douglas au cours des mois de septembre et octobre

II.3.2.1. Evolutions météorologiques

Les deux essais présentés ont été effectués sur les périodes de mi-saisons : printemps et automne.



Essai Douglas

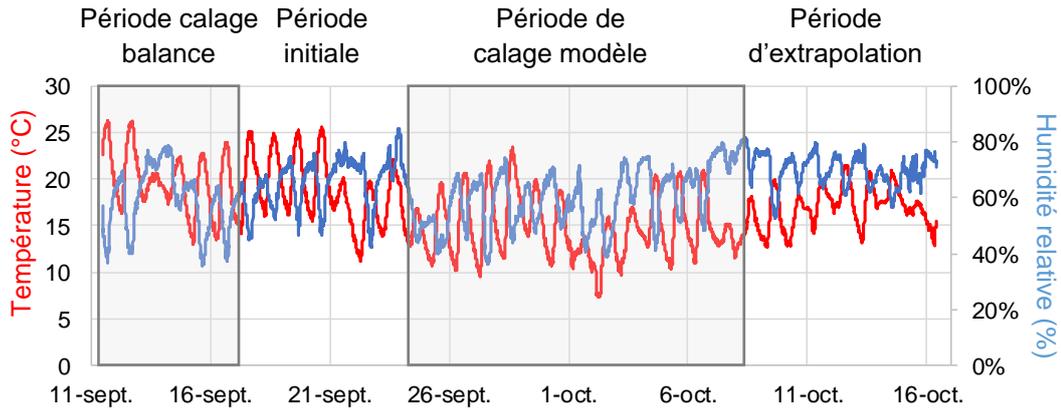


Figure 53 : Conditions météorologiques au cours des deux essais de diffusion

II.3.2.2. Corrections métrologiques

Ces deux essais ont donc commencé de la même façon, par la calibration des deux balances en fonction de l'évolution de la température extérieure. La Figure 54 récapitule le protocole de calibration des balances par la température extérieure.

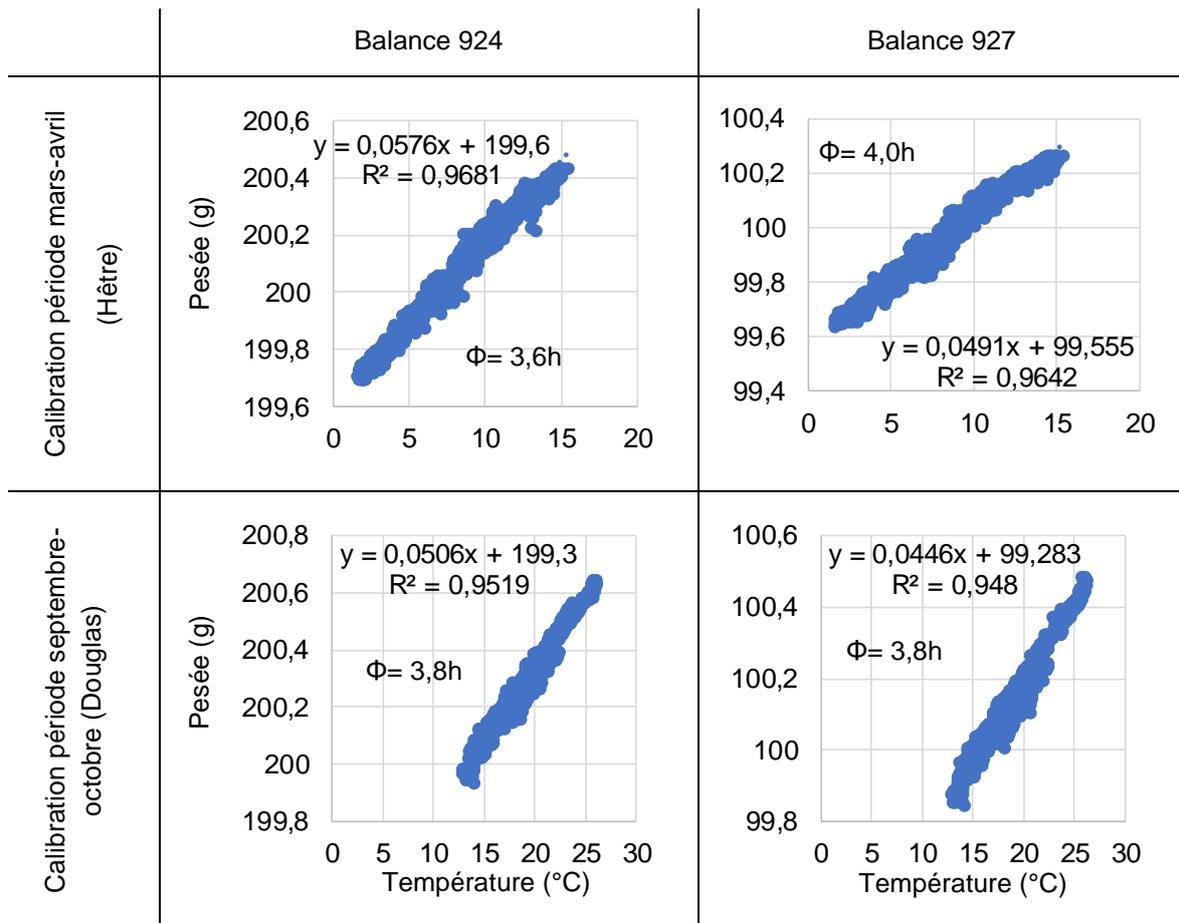


Figure 54 : Pesée en fonction de la température extérieure

Les paramètres de calage des balances étant sensibles à l'environnement extérieur, ce protocole a été effectué avant chaque essais de diffusion. La Figure 55 représente les 25 résultats de la détermination des deux paramètres en fonction de la température moyenne

extérieure au cours de la période de calage des balances. Ce récapitulatif a pour objectif de contrôler et valider ce protocole d'identification à la fin de la campagne d'essai.

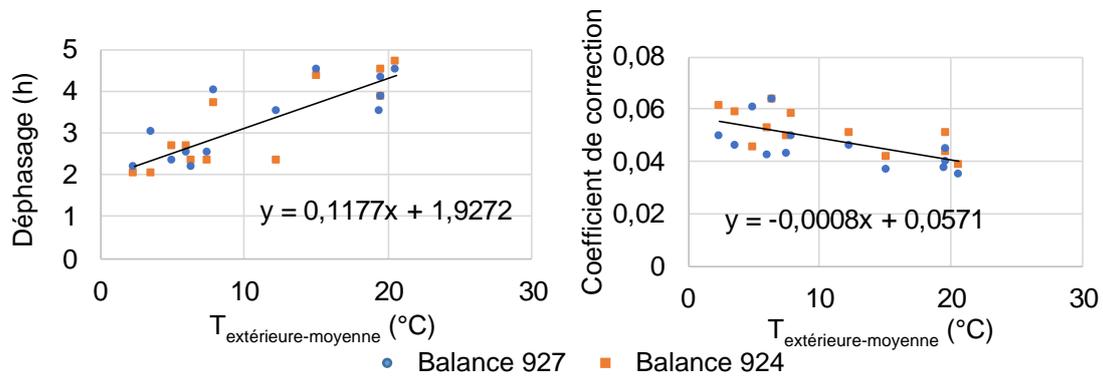
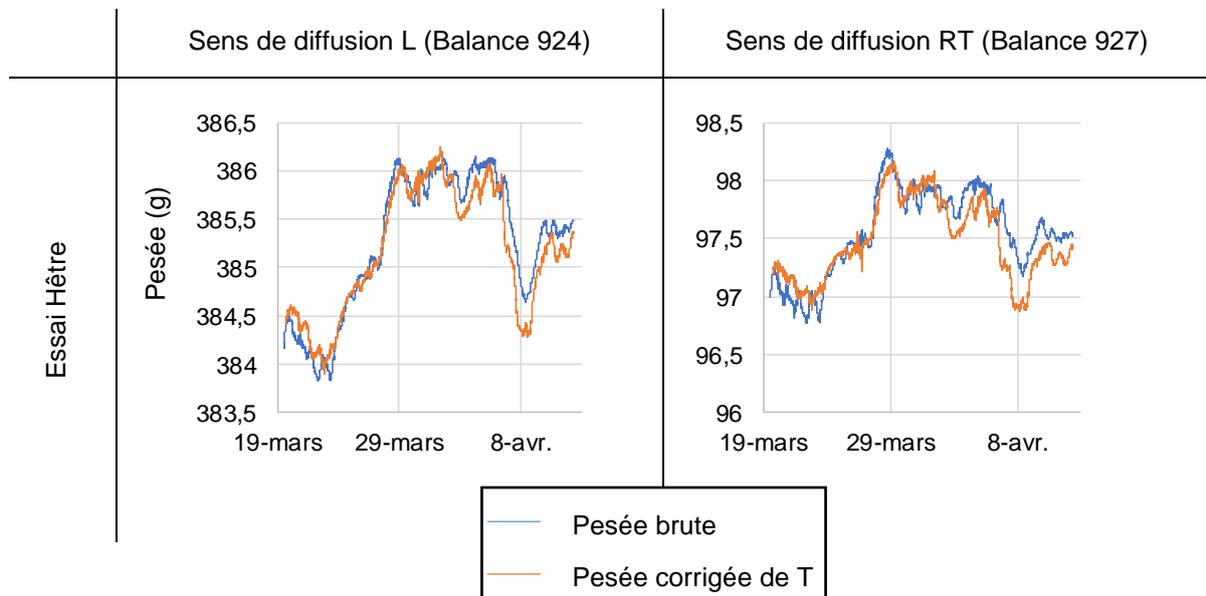


Figure 55 : Coefficient de correction et déphasage de la pesée en fonction de la température d'essai

Nous prenons comme hypothèses que les dérives des deux balances sont identiques. Ainsi cette représentation met en avant la corrélation entre ces deux paramètres et la température moyenne au cours de l'essai. Cependant, l'Annexe 2 permet de répondre à la question de l'impact de cette méthode de correction sur l'identification des propriétés hydrique du matériau.

II.3.2.3. Mesures corrigées

Sur une période d'un mois, nous avons effectué le suivi de la masse des éprouvettes d'études. L'éprouvette de diffusion permettant de caractériser les propriétés du matériau dans le sens longitudinal a été placée sur la balance 924. L'autre éprouvette étant placée sur la balance 927. Les données de pesées corrigées sont présentées en Figure 56.



Essai Douglas

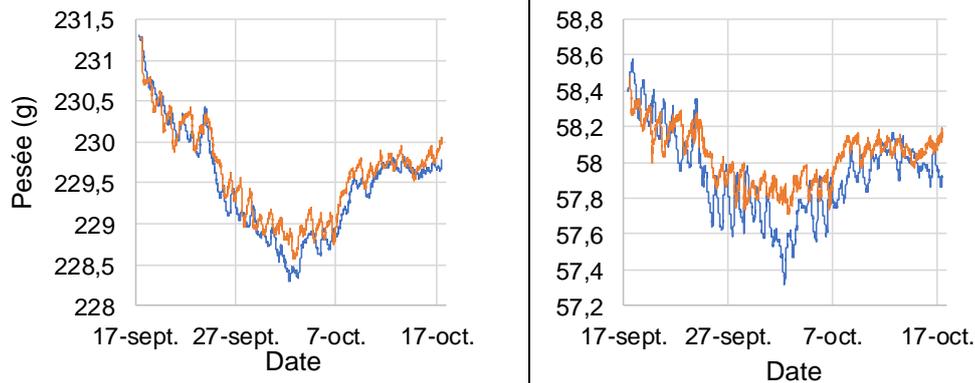


Figure 56 : Correction des pesées

II.3.2.4. Evolution de teneur en eau

Une fois l'essai terminé, nous plaçons les éprouvettes à une température de 103°C jusqu'à stabilisation de la masse sèche.

Tableau 11: Masse sèche des éprouvettes selon la NF EN 12571

	Sens de diffusion L (Balance 924)	Sens de diffusion RT (Balance 927)
Essai Hêtre	342,60 g	85,80 g
Essai Douglas	200,33 g	51,33 g

A partir de ces masses sèches, et de l'évolution des pesées, nous pouvons déterminer l'évolution de la teneur en eau moyenne des éprouvettes, Figure 57.

On remarquera que ces deux campagnes expérimentales sont très riches en variations d'humidité au cours de la période d'un mois. Cela provient du fait que les éprouvettes sont initialement stabilisées à une humidité proche de celle de l'environnement extérieur (HR ≈ 70%).

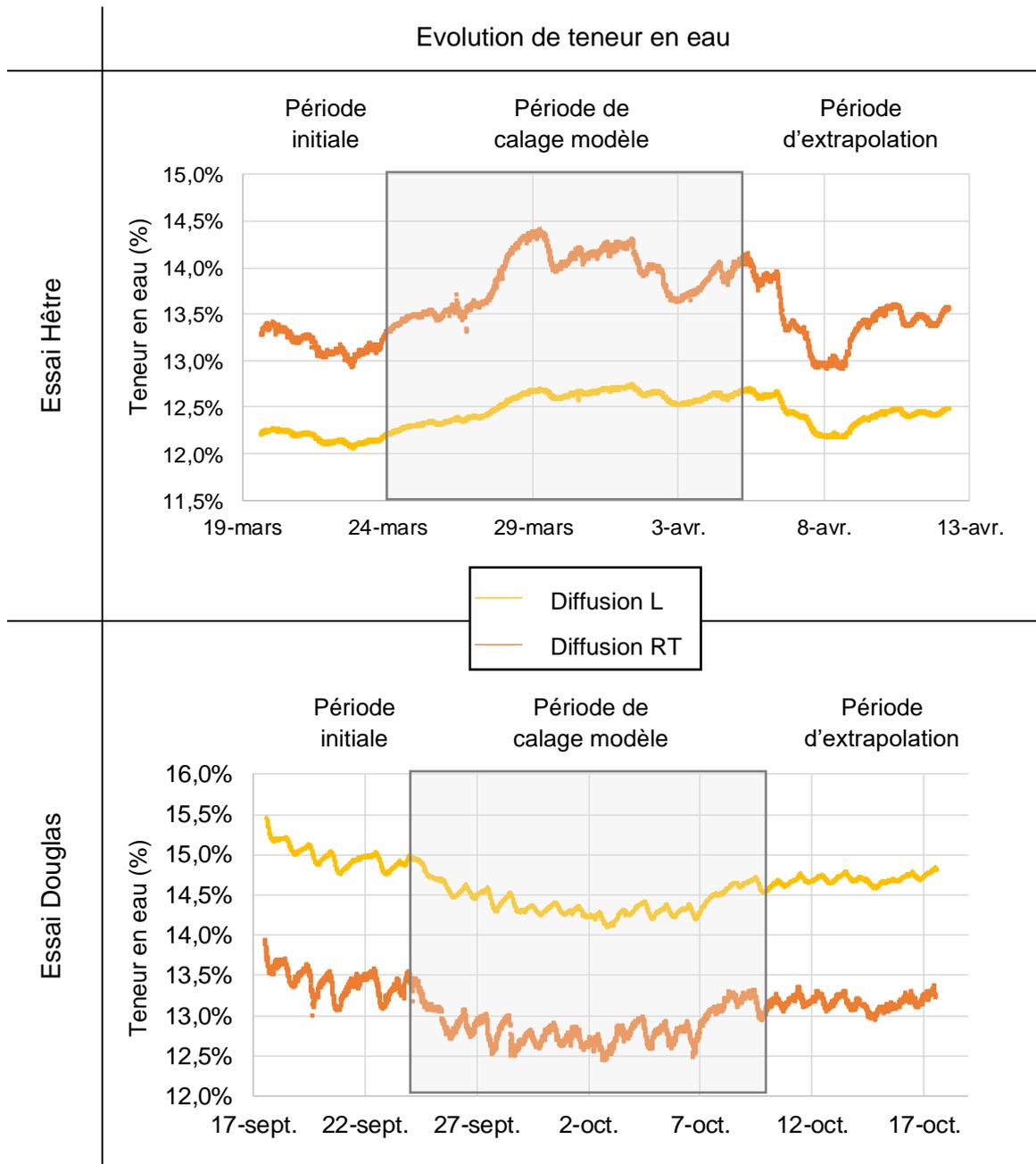


Figure 57 : Evolutions expérimentale de la teneur en eau moyenne

II.4. Analyses

II.4.1. Limites de l'analyse inverse

Les différents paramètres de calage, qui permettent de quantifier le transfert de chaleur et de masse, ont été présentés précédemment. Nous pouvons alors les classer dans trois catégories :

- Equilibre hygroscopique :
 - ✓ Isotherme enveloppe : w_s , φ_a , α_a , φ_d et α_d (II.1.2.2)
 - ✓ Isotherme partielle : A, D, B (II.1.2.3)

- Coefficients d'échanges surfaciques : h_t et h_w (II.2.1.4)
- Transfert de chaleur et de masse : λ , δ_0 , A_{ad} et A_{de} (II.2.2.3.1.3)

Ainsi, 14 paramètres physiques ou de calage permettent d'identifier le transfert de masse et de chaleur dans un environnement variable. Afin de simplifier l'identification par méthode inverse, certains paramètres ont été déterminés au préalable (A , D , B , h_t et h_w , λ). Ainsi, il ne reste plus que huit paramètres à identifier pour déterminer le transfert d'humidité et de température dans un élément de structure. Les résultats expérimentaux sont riches en variations ce qui permettra à l'algorithme d'optimisation de déterminer plus justement ces propriétés.

Cependant, plusieurs d'entre eux ont une influence identique ou opposée sur la réponse du modèle (Jamaaoui, 2017). La méthode inverse propose une approche d'identification des paramètres de façon purement mathématique. Il n'est alors pas possible de différencier les propriétés présentant le même comportement car une infinité de solutions existe (Nguyen, 2014). Nous avons alors décidé de simplifier le modèle.

II.4.1.1. Proposition de simplification des isothermes par famille

La littérature propose de nombreuses isothermes de sorption que ce soit pour des essences de bois, ou d'autres matériaux hygroscopiques. Plusieurs phénomènes physiques vont différencier ces isothermes, le premier étant la teneur en eau de saturation w_s , l'aire d'hystérésis et la forme de l'isotherme.

Aujourd'hui, seul des modèles empiriques ou semi empiriques permettent de modéliser et de déterminer ces isothermes. Le modèle que nous utilisons est le modèle de Merakeb. Il permet de déterminer les paramètres, à savoir :

- La teneur en eau de saturation des fibres w_s
- 4 paramètres de calage : φ_a et α_a pour l'isotherme d'adsorption et φ_d , et α_d pour l'isotherme de désorption.

Ces 4 derniers paramètres sont à l'origine de l'hystérésis de sorption. Ainsi, pour comparer la forme des hystérésis de sorption entre essence, il faut comparer les isothermes de sorption en fonction du ratio de saturation ; c'est-à-dire le ratio w/w_s , Figure 58.

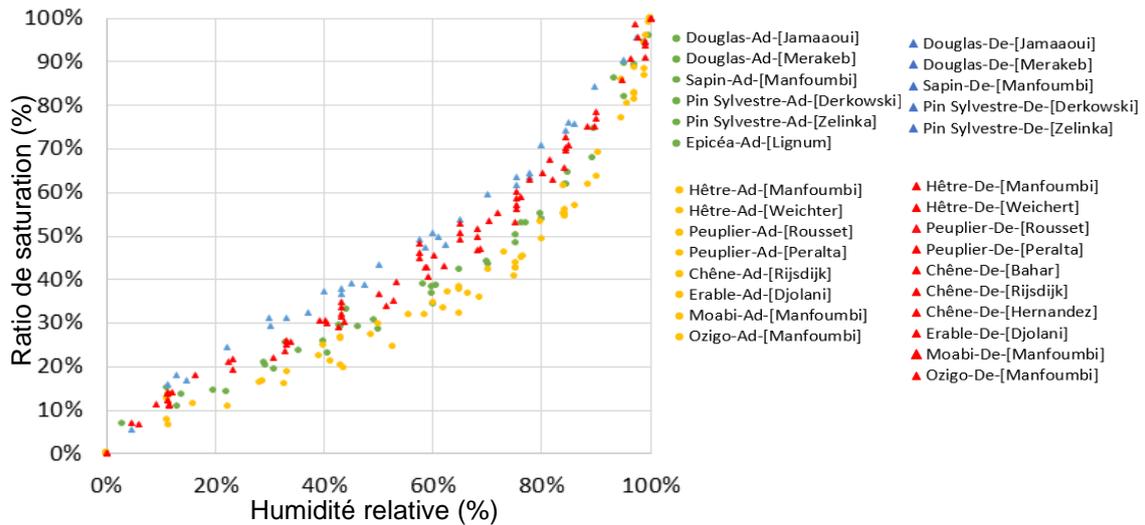


Figure 58 : Isothermes de sorption de plusieurs essences de bois en fonction du ratio de saturation

Cette représentation normée par w_s permet de limiter la dispersion apparente des données bibliographiques. Séparées par familles résineux ou feuillus, et distinguant les phases d'adsorption et de désorption, cette représentation permet de proposer des formes d'hystérésis globales par famille, Figure 59. Les paramètres utilisés sont résumés dans le Tableau 12.

Tableau 12: Paramètres des isothermes de sorption des feuillus et des résineux

	Feuillus	Résineux
φ_a	0,849	0,820
φ_d	1,647	1,435
α_a	0,852	0,761
α_d	1,088	0,988

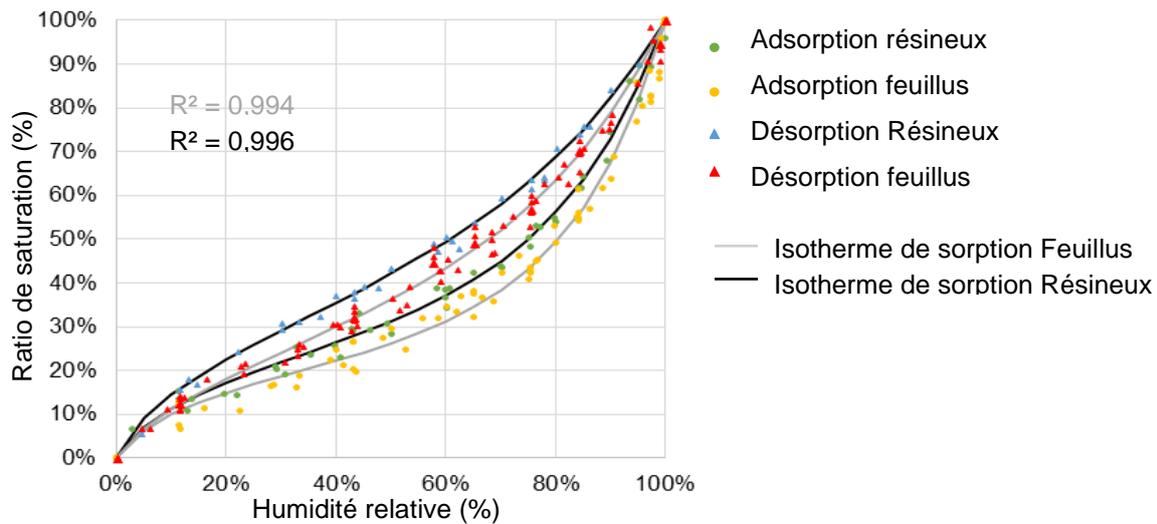


Figure 59 : Identification des hystérésis par familles

Une comparaison globale avec l'isotherme complète est présentée en Figure 59. Elle permet de bien distinguer les familles des résineux et des feuillus. Il est à remarquer que l'isotherme des feuillus est en dessous de l'isotherme des résineux. Une étude de la composition chimique (polymères hydrophiles/hydrophobes) des résineux par rapport à celle des feuillus permettrait peut-être d'expliquer cette remarque.

Cette approche permet de simplifier le nombre de paramètres de calage à identifier par méthode inverse. Ainsi, parmi les 14 paramètres de départ, il n'en reste plus que trois, à savoir:

- δ_0 : Paramètre de calage de l'équation de la perméabilité apparente (2.54)
- A_{ad} et A_{de} : paramètres de calage de l'équation de la chaleur de sorption (2.44)

II.4.1.2. Méthode du Simplexe

La méthode de minimisation du Simplexe a été introduite par Nelder et Mead en 1965 et permet de déterminer le minimum d'une fonction sans calculer sa dérivée (Nelder and Mead, 1965). Elle résout directement le problème en utilisant la valeur de la fonction objective. Dans le cas où il y a peu de variables, elle est appréciée pour sa robustesse, sa simplicité de programmation et son faible temps de calcul.

L'algorithme du Simplexe se base sur l'évaluation de la fonction objective qui peut être calculée par la méthode des moindres carrés. Son principe est la conception d'une figure géométrique à n dimensions ($n \neq 0$) qui est le volume d'une enveloppe convexe de $n + 1$ sommets. Chaque sommet correspond à une valeur de fonction objective. Les sommets de ce polygone subiront des transformations géométriques vers un minimum global, comme présenté dans l'organigramme de la Figure 60. Les itérations de l'algorithme du Simplexe correspondent à de simples opérations algébriques de transformations géométriques élémentaires sur les sommets du polygone (réflexion, expansion, rétrécissement et contraction) jusqu'à une réduction optimale (Lagarias et al., 1998).

Chaque opération est associée à une variable. Les coefficients associés aux opérations de réflexion, dilatation, contraction sont respectivement notés α , β , et γ . Ils doivent satisfaire les

conditions suivantes : $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $0 < \gamma < 1$, et $0 < \sigma < 1$. Les paramètres standards de l'algorithme du Simplexe sont : $\alpha = 1$, $\beta = 2$, $\gamma = \frac{1}{2}$, et $\sigma = \frac{1}{2}$.

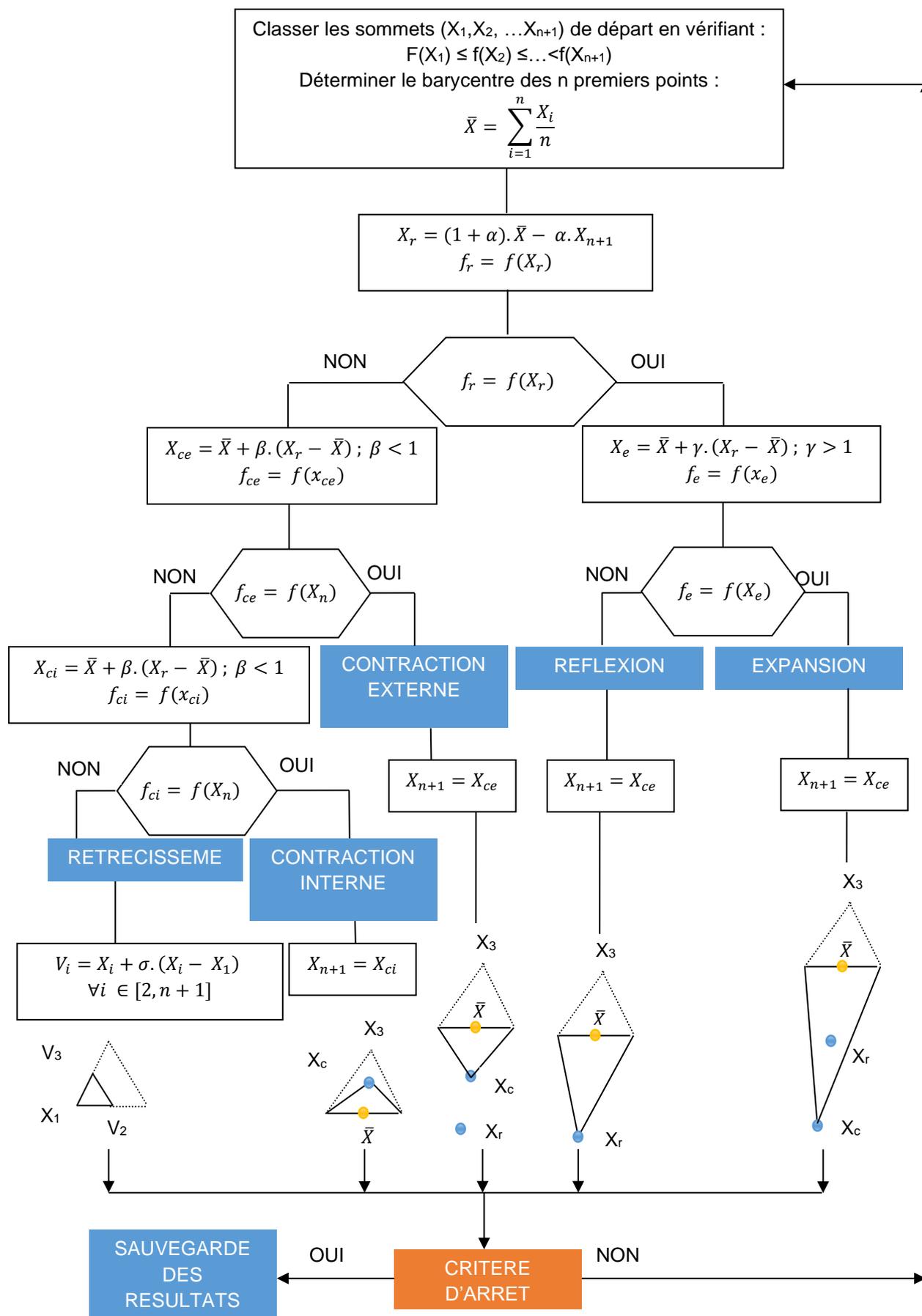


Figure 60 : Algorithme du simplexe (Nguyen, 2014)

II.4.2. Résultat numérique

En entrée du modèle numérique sont saisies les propriétés d'équilibre hygroscopique présentes dans le Tableau 12. Les conditions d'échanges convectifs sont également ajoutées au modèle. L'algorithme d'optimisation détermine les trois paramètres de diffusion δ_0 , A_{ad} et A_{de} .

II.4.2.1. Réponse de l'algorithme d'optimisation

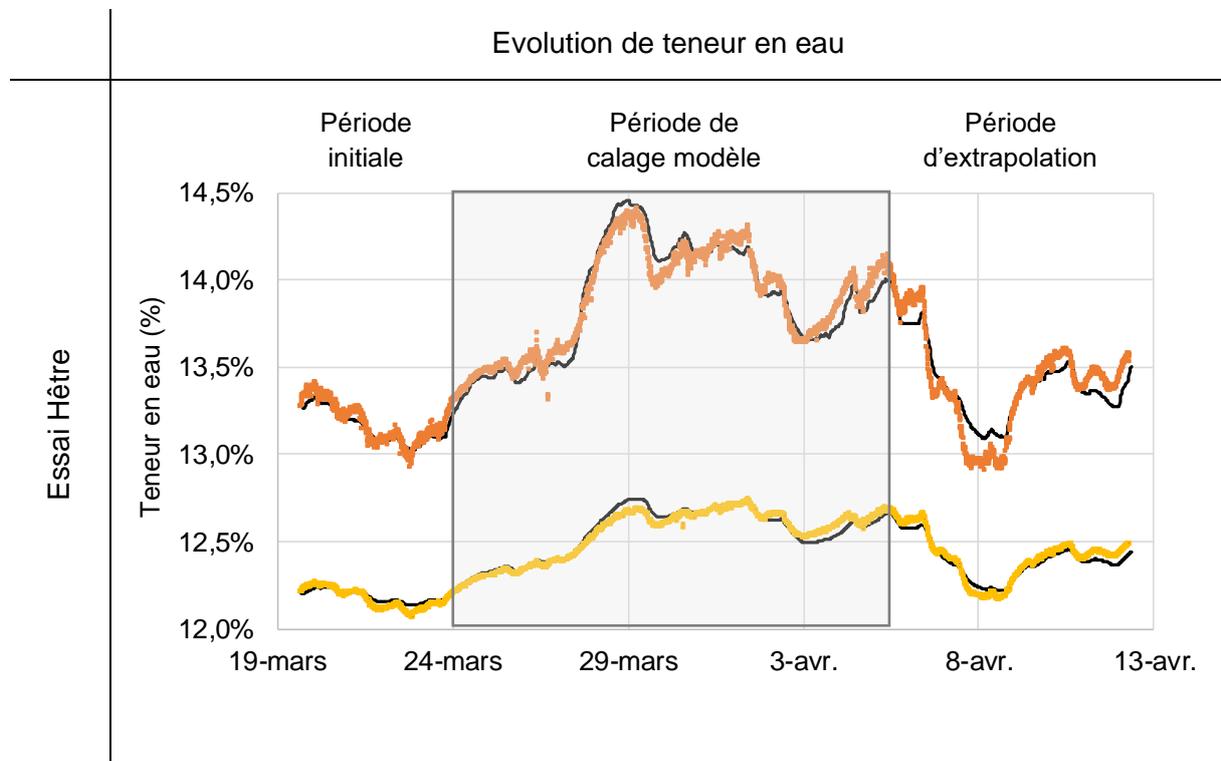
A la fin de la procédure de détermination des paramètres, l'algorithme renvoie la valeur moyenne des trois coefficients. Le Tableau 13 résume l'identification des propriétés de diffusion pour les deux essais, et les deux sens.

Tableau 13 : Récapitulatif des valeurs identifiées par l'algorithme d'optimisation

Essence	Sens	$\delta_{0L}(\times 10^{-4})$ $\delta_{0RT}(\times 10^{-5})$	A_{ad}	A_{de}
Hêtre	L	35,28	1,70	1,89
	RT	31,64	2,17	2,43
Douglas	L	35,21	1,77	2,38
	RT	14,73	1,60	2,50

II.4.2.2. Evolution de la teneur en eau moyenne

Une fois l'identification numérique effectuée, le modèle aux éléments finis retourne l'évolution de la teneur en eau moyenne des éprouvettes, voir Figure 61.



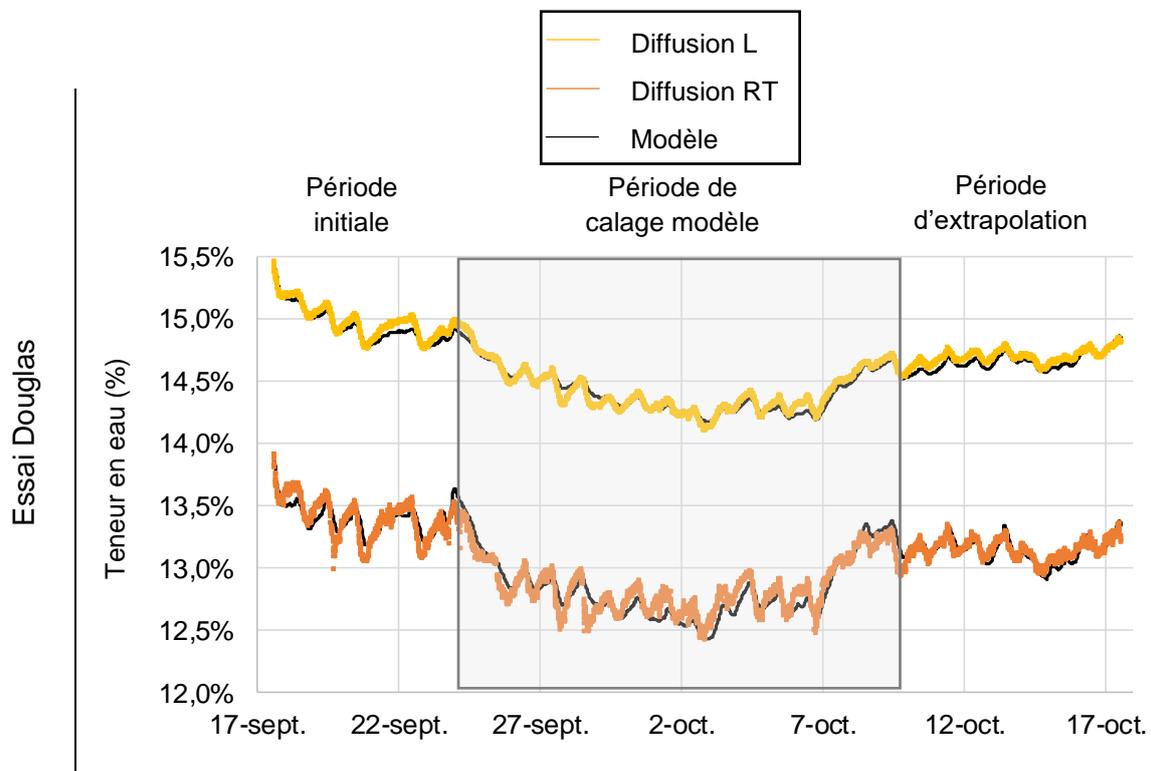


Figure 61 : Comparaison de la réponse du modèle numérique par rapport à l'évolution de l'humidité moyenne expérimentale

Pour ces quatre essais, nous pouvons remarquer que le modèle renvoie bien des évolutions hydriques similaires aux évolutions expérimentales, et ce, même pour la période d'extrapolation. Afin de quantifier la validation de la réponse du modèle sur les différentes périodes de l'essai, nous avons déterminé le coefficient de détermination sur ces trois périodes, Tableau 14.

Tableau 14 : Evolution du coefficient de détermination sur les périodes de l'essai

		Période initiale	Période de calage	Période d'extrapolation
Essai hêtre	Eprouvette L	$R^2 = 0,73$	$R^2 = 0,92$	$R^2 = 0,90$
	Eprouvette RT	$R^2 = 0,93$	$R^2 = 0,94$	$R^2 = 0,90$
Essai douglas	Eprouvette L	$R^2 = 0,90$	$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,98$
	Eprouvette RT	$R^2 = 0,42$	$R^2 = 0,98$	$R^2 = 0,95$

Les valeurs de coefficient de détermination montrent une très bonne corrélation entre le modèle et l'expérimentale. Aux vues de la richesse des variations hydriques, et des valeurs de R^2 , nous supposons, par la suite, que les paramètres déterminés représentent bien les propriétés de diffusions des échantillons testés. Pour renforcer nos conclusions, l'éprouvette parallélépipédique de diffusion L a permis de tracer le profil hydrique en fin d'essai, Figure 62.

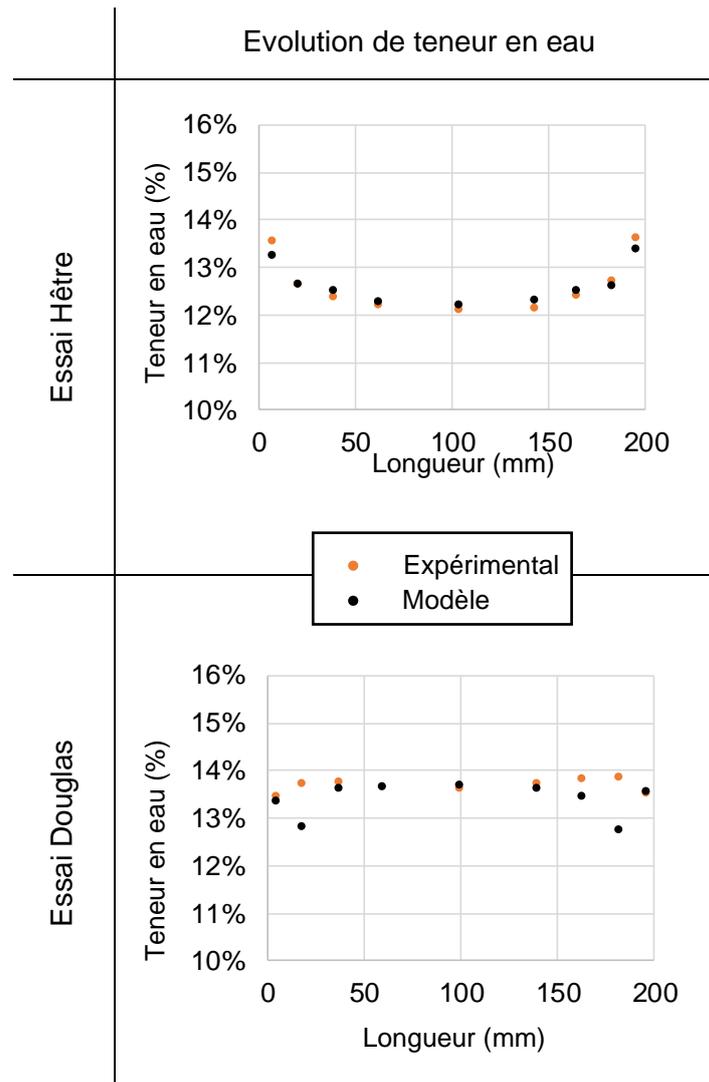


Figure 62 : Comparaison du profil expérimental/modèle

Nous remarquons pour l'éprouvette de hêtre que le profil d'humidité à la fin de l'essai proposé par le modèle est également proche de celui mesuré. Cette remarque permet de confirmer une fois de plus la fiabilité acceptable de l'identification des propriétés de diffusion par le Simplexe. Cependant concernant le douglas, le modèle présente un front de séchage à 20 mm du bord, ce qui n'est pas observé sur le profil expérimental. Cet écart peut provenir de la méthode de mesure du profil hydrique à la fin de l'essai qui serait 'trop intrusif'.

En effet, cette approche de comparaison du profil d'humidité à la fin de l'essai présente un défaut expérimental. Lors de la découpe de l'éprouvette L, la découpe vient chauffer le morceau de bois. Ainsi la teneur en eau des tranches aux extrémités de l'éprouvettes est certainement perturbée par cette découpe.

II.4.3. Comparaison inter essence

Nous avons effectué ce protocole expérimental sur les seize éprouvettes du plan expérimental. A ces seize identifications, nous avons ajouté les essais complémentaires que nous avons effectués au début de ce travail (Annexe 1). Ainsi, nous présentons une meilleure répétabilité de ce protocole expérimental avec 27 résultats. Afin de comparer les propriétés de diffusion

de chaque essence, nous représentons l'évolution de la perméabilité apparente en fonction de la teneur en eau pour une température de 20°C.

La Figure 63 récapitule les résultats obtenus pour les quatre essences, selon les deux sens de diffusion et pour les cycles d'adsorption et de désorption. La répétabilité de ce protocole expérimental apparaît au travers des barres d'erreurs. Ces dernières représentent \pm le coefficient de variation pour six valeurs de teneur en eau différentes.

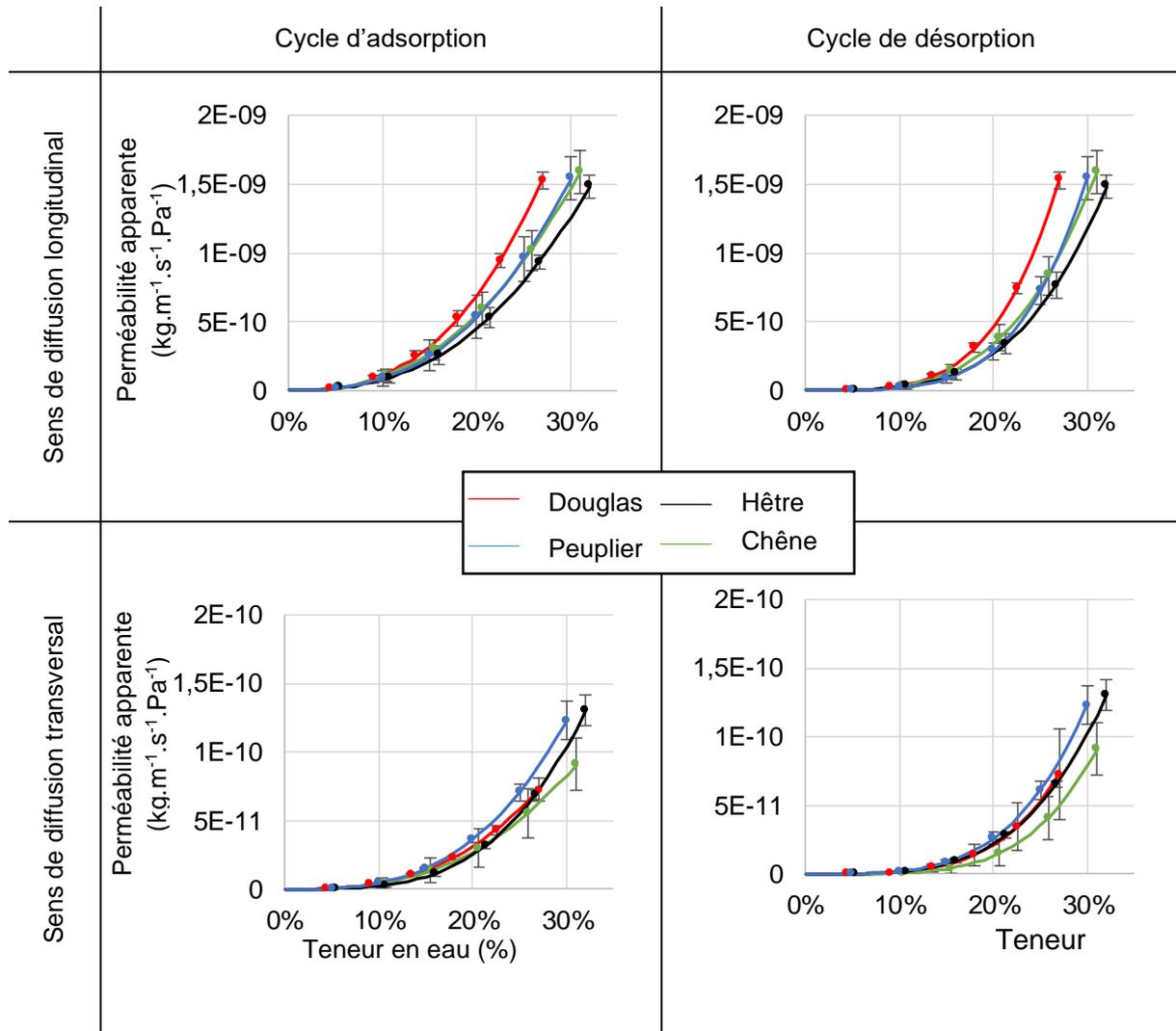


Figure 63 : Perméabilité apparente à 20°C selon le sens de diffusion et le cycle

On remarque que ce protocole expérimental présente une bonne répétabilité. De plus, cette représentation permet de retrouver l'influence du sens de diffusion sur la perméabilité apparente. En effet, on peut remarquer que la perméabilité apparente dans le sens longitudinal est environ dix fois plus grande que dans le sens transversal. Enfin, dans le sens longitudinal, nous pouvons conclure que le douglas présente des propriétés de diffusion plus grandes que les feuillus.

De même les résultats obtenus dans le sens transversal présentent une homogénéité des comportements de transferts hydriques pour les quatre essences d'études. Dans le sens transversal l'eau diffuse majoritairement dans les parois cellulaires. Ces résultats mèneraient à penser que les variations de compositions de parois cellulaires ne viendraient pas influencer de façon significative les propriétés de diffusion du matériau.

Cependant, une dernière propriété du matériau vient influencer le transfert de masse, c'est la masse volumique. En effet, l'équation de Fick présente deux propriétés du matériau, la perméabilité apparente, et la masse volumique. En effet au sein d'un même matériau, plus celui-ci présente une faible densité, plus il diffuse vite. Nous proposons de représenter les évolutions de perméabilité apparente pondérées de la densité d des quatre essences comme proposé en Figure 64.

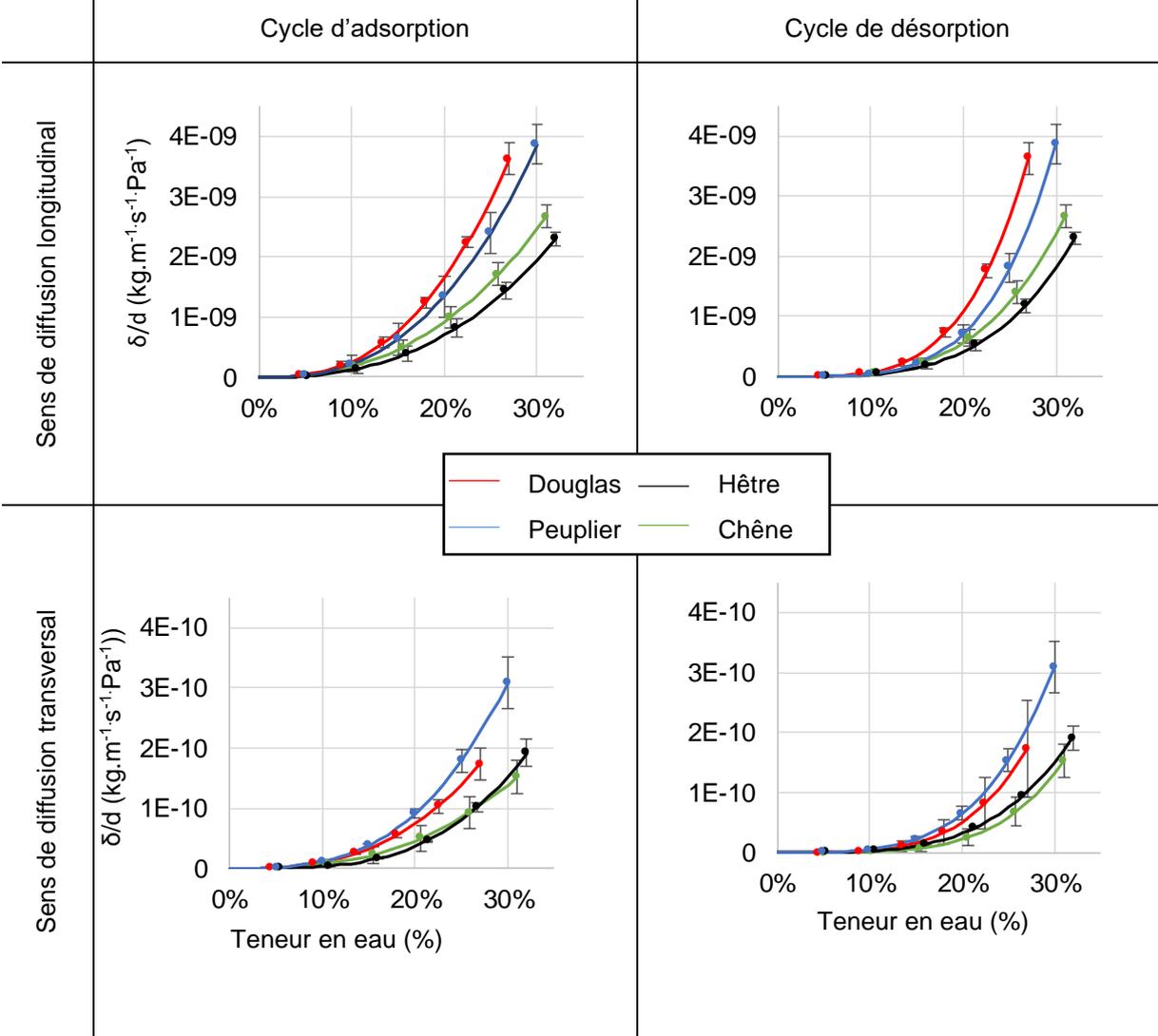


Figure 64 : Perméabilité apparente pondérée de la densité à 20°C

Cette représentation met en avant l'influence de la densité du matériau sur ses capacités à diffuser. Nous pouvons ainsi différencier les essences en deux groupes, à savoir le couple peuplier-douglas et le couple chêne-hêtre.

Enfin, afin de comparer les variations d'énergies absorbées ou restituées lors des cycles complets de sorption, nous proposons une dernière représentation des évolutions de perméabilité apparente en fonction de la teneur en eau, Figure 65.

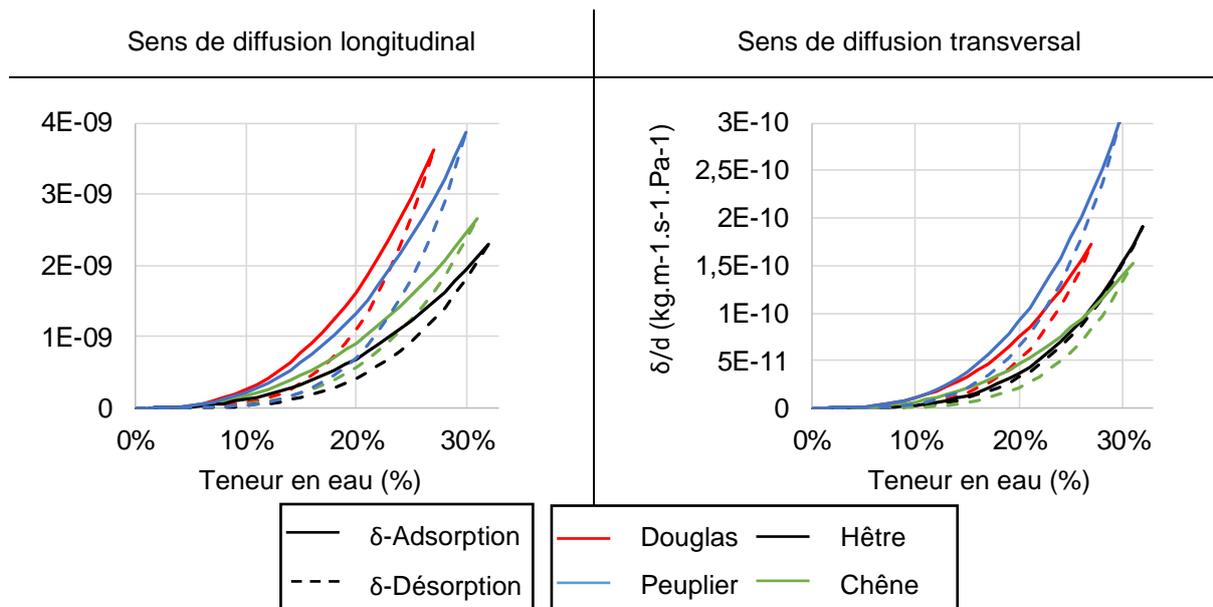


Figure 65 : Comparaison de la perméabilité apparente pondérée de la densité en fonction du cycle de sorption

La perméabilité apparente de désorption est inférieure à la perméabilité apparente en adsorption. Ainsi, pour un élément de structure, il se stabilisera plus vite en humidité lors d'une phase d'humidification qu'en phase de séchage. Cette remarque est vérifiée lors d'essai de cinétique de sorption en enceinte climatique.

Cependant, qu'en est-il des énergies de sorption mises en jeu ? Nous avons vu dans le paragraphe II.1.1.1.2 que l'existence de l'hystérésis de sorption était induite par un écart d'énergie entre la phase d'adsorption et la phase de désorption. En d'autres termes cela veut dire que l'énergie emmagasinée lors de la phase d'adsorption n'est pas égale à l'énergie restituée en phase de désorption.

Les résultats obtenus en Figure 65 montrent que l'énergie de désorption est supérieure à l'énergie d'adsorption. Cela signifie qu'un système aura besoin de plus d'énergie pour désorber une molécule d'eau qu'il en dégagera lors de l'adsorption. Un tel constat mène à conclure que le niveau d'équilibre d'un système en phase de désorption est supérieur à celui d'un système en phase d'adsorption. Nous retrouvons alors le phénomène d'hystérésis des isothermes de sorption.

II.5. Présentation des champs hydriques

La modélisation du transfert de masse et de chaleur a été utilisée dans les paragraphes précédents dans le but d'identifier les paramètres de diffusion d'une éprouvette de type centimétrique. Nous présentons plus particulièrement l'évolution d'humidité au sein d'un élément de structure de type poutre, et ce, sur des temps beaucoup plus longs.

La modélisation des isothermes de sorption partielle par la méthode de Pedersen limite le pas de temps pour éviter des variations d'humidité relative trop importantes. Ainsi, une étude de convergence du champ hydrique en fonction du pas de temps nous a mené à une discrétisation temporelle allant de ½ heure à 2 heures en fonction des variations climatiques modélisées. Ce découpage temporel doit cependant être en phase avec la discrétisation spatiale passant par une optimisation géométrique du maillage aux éléments finis.

II.5.1. Optimisation du maillage

Nous savons que les variations d'humidités apparaissent surtout en peau (plus forts gradients et plus fortes variations temporelles). Cela demande un raffinement du maillage sur la périphérie de l'élément. De même, nous savons que la diffusion dans le sens longitudinal est plus importante que dans le sens transversal. Ainsi, un raffinement du maillage aux abouts est effectué, comme le montre la Figure 66.

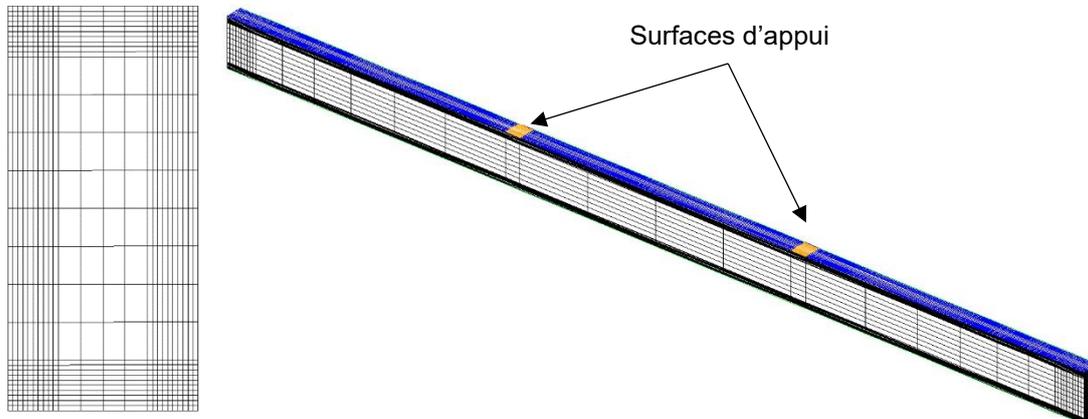


Figure 66 : Maillage d'une poutre et de sa section en 3D composée de 25 536 éléments de type CUB8

Cependant, un tel maillage sur une poutre à l'échelle structurale devient très lourd. La gestion mémoire ainsi que la discrétisation temporelle génèrent des coûts de calcul trop longs sur station de calcul, même avec une parallélisation des opérations.

Une poutre étant un élément très élancé, l'influence de l'humidification des abouts n'a qu'un faible impact sur la partie centrale, partie où le moment fléchissant est le plus important. L'humidification des abouts va toutefois influencer les effets de cisaillement à l'appui et de variations dimensionnelles. Nous intéressés à la déformée globale de flexion, nous avons négligés les effets de diffusion aux appuis sur l'étude du comportement différé en flexion. Nous allégerons ainsi les temps de calcul.

On suppose alors que seule l'évolution du front d'humidité dans la section au travers d'une diffusion dans le sens transversal viendra influencer le comportement mécanique différé d'un élément de structure.

Une première simplification consiste donc à effectuer toutes les simulations de transfert sur une section transversale transformant ainsi un problème tridimensionnel en un problème bidimensionnel en jouant sur les symétries du problème en supposant un comportement diffusif isotrope. Ainsi, le maillage utilisé a la forme présentée en Figure 67.

Ce maillage permet ainsi de modéliser des phénomènes de transferts de masse et de chaleur au sein d'une poutre quel que soit son environnement grâce à la densification des éléments en périphérie. Ainsi cette optimisation permet de modéliser un essai de diffusion dans une poutre massive avec un rendement de 1h de calcul pour 2 années de simulation.

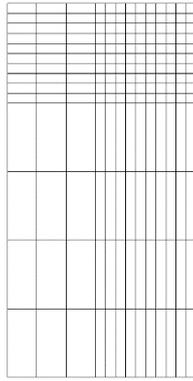


Figure 67 : Maillage d'une poutre de section 75x150 mm² (182 éléments de types QUA4) en vue de la modélisation du transfert de masse

II.5.2. De la modélisation 2D vers la modélisation 3D

Cette optimisation de maillage en 2D apporte un très grand gain de temps. Cependant, pour modéliser le comportement mécanique 3D d'une poutre, nous devons modéliser un champ hydrique 3D. De plus, si nous souhaitons modéliser l'influence de la position de la moelle sur le comportement mécanique, nous ne pouvons pas simplifier le maillage par des symétries matérielles. Nous proposons donc d'étudier le comportement différencié tridimensionnel en reportant, dans la direction longitudinale, le champ hydrique 2D supposé homogène dans cette direction, demandant une opération de transfert de d'interpolation géométrique. Pour cela, nous proposons de créer une poutre fictive avec une section présentant le même maillage 2D (sans les symétries), et un seul élément dans le sens longitudinal, Figure 68.

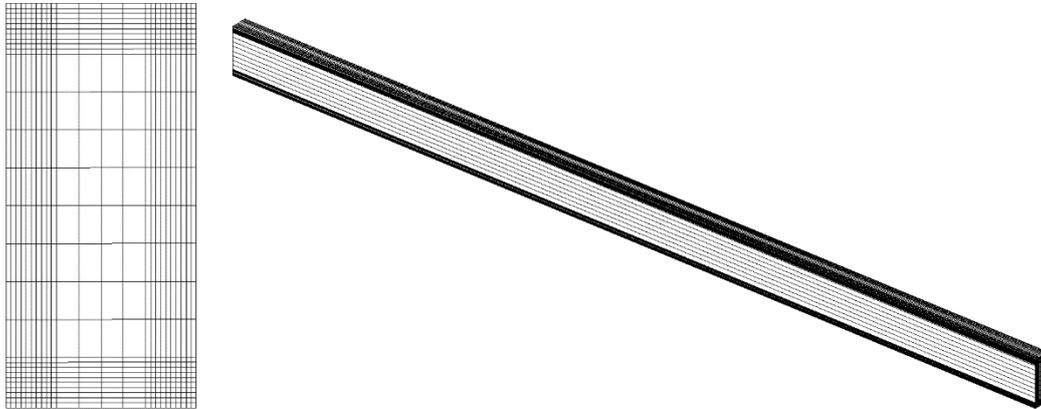


Figure 68 : Maillage intermédiaire pour l'interpolation du champ hydrique 2D vers un champ hydrique 3D

Ainsi à cette poutre 3D nous lui associons nœuds par nœuds les valeurs du champ hydrique 2D. Enfin, pour pouvoir utiliser un maillage 3D adapté aux calculs mécaniques, nous procédons à une nouvelle interpolation linéaire du champ hydrique 3D sur le maillage définitif visualisé en Figure 69.

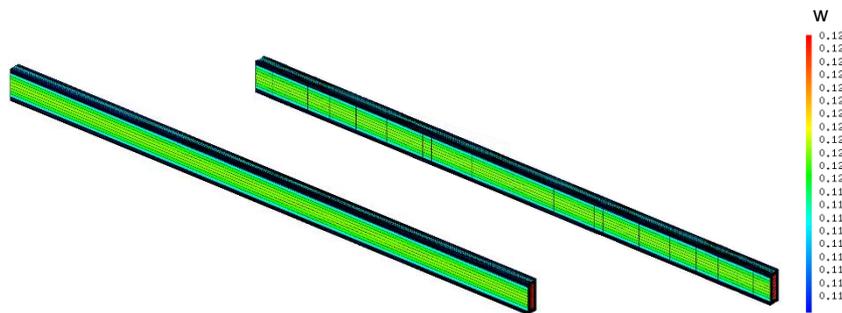


Figure 69 : Interpolation du champ hydrique 3D sur la poutre

A présent, le modèle est prêt à intégrer l'algorithme prenant en charge l'étude du comportement mécanique différé à long terme.

II.6. Conclusion sur l'identification des propriétés de diffusion inter essences

Le protocole expérimental en environnement extérieur permet de suivre les variations d'humidité en ambiance non isotherme. Cette approche demande de déterminer le couplage entre ces deux fonctions d'états, température et humidité. La modélisation des phénomènes de transfert de masse et de chaleur fait appel à plusieurs propriétés physiques et de calage. La dépendance de ces paramètres à la température a été montrée et intégrée au modèle. Puis, nous avons proposé une première simplification des propriétés d'équilibre hygroscopique au travers des familles résineux/feuillus sur la base de données bibliographiques. Ainsi, à partir des variations d'humidité moyenne, l'algorithme d'optimisation a identifié les propriétés de diffusion en ambiance variable.

La comparaison des paramètres identifiés nous mène à conclure que les essences de feuillus de hêtre et de chêne diffusent moins vite que les essences de peuplier et de douglas. Nous avons également pu mettre en avant l'influence de la densité sur les propriétés de diffusion. De façon générale, les variations de densité entre les essences influencent plus les transferts de masse que les écarts entre essences.

Les résultats obtenus nous permettent ainsi de prédire l'évolution de l'humidité d'une pièce en bois dans son environnement.

Reste à présent à faire le lien entre le comportement diffusif du matériau bois avec son comportement mécanique, et ce, via les poutres testées ultérieurement en flexion quatre points.

Chapitre III. Comportement mécanique différé du bois

III.1. Etat de l'art.....	103
III.1.1. Mis en évidence des phénomènes différés du bois au travers d'essais expérimentaux.....	103
III.1.1.1. Comportement viscoélastique	103
III.1.1.2. Mise en évidence de l'influence de l'humidité sur la viscoélasticité	103
III.1.1.3. Effet mécanosorptif	104
III.1.1.4. Mise en évidence de l'effet verrou/ effet mémoire	106
III.1.1.5. Influence du taux de charge	107
III.1.1.6. Comportement limite	108
III.1.2. Modélisation du comportement différé du matériau bois.....	109
III.1.2.1. Comportement viscoélastique linéaire.....	109
III.1.2.2. Modélisation rhéologique du comportement viscoélastique linéaire	111
III.1.2.3. Modélisation de la mécano-sorption.....	113
III.1.2.4. Modèle de Jean Marie Husson.....	113
III.2. Développements supplémentaires	122
III.2.1. Proposition d'approche viscoélastique.....	122
III.2.1.1. Détermination des temps caractéristiques.....	122
III.2.1.2. Approche rhéologique	123
III.2.1.3. Identification des paramètres de viscoélasticité.....	125
III.2.2. Modélisation 3D du comportement mécanique différé	126
III.2.2.1. Modélisation 3D de l'hygro sensibilité de la matrice élastique	126
III.2.2.2. Influence de l'hygro sensibilité élastique sur la déformation long terme.....	127
III.2.2.3. Modélisation 3D du comportement viscoélastique.....	128
III.2.3. Optimisation du modèle géométrique	131
III.3. Validation et calage des paramètres du modèle.....	131
III.3.1. Présentation de l'essai	131
III.3.2. Modélisation du comportement hydrique	132
III.3.3. Réponse instantanée du modèle d'hygro sensibilité élastique	133
III.3.4. Réponse différée du modèle viscoélastique hygro activé.....	134
III.3.5. Influence du modèle géométrique.....	135
III.3.5.1. Présentation du maillage.....	135
III.3.5.2. Modèle orthotrope, isotrope transverse L & RT	136
III.3.5.3. Modèle orthotrope radial L & R & T	136
III.3.5.4. Modèle orthotrope radial avec position moelle	137
III.3.5.5. Conclusion et discussion.....	139
III.4. Expérimentation et analyse sur éléments de structure	140
III.4.1. Poutres.....	140
III.4.1.1. Classement visuel	141
III.4.1.2. Teneur en eau initiale.....	141
III.4.1.3. Défauts macroscopiques.....	142
III.4.2. Dispositif expérimental de fluage	142
III.4.2.1. Zones expérimentales	143
III.4.2.2. Montage du banc d'essai	143
III.4.3. Résultats expérimentaux	147

III.4.3.1. Comportement mécanique instantané.....	147
III.4.3.2. Comportement mécanique long terme	149
III.4.4. Modélisation des essais de fluage	155
III.4.4.1. Modélisation du champ thermo-hydrique.....	155
III.4.4.2. Modélisation du comportement différé.....	159
III.5. Synthèse et discussion	166

Les travaux de Nakano (1999) sur le frêne de Mandchourie (*Fraxinus mandshurica*) complètent ceux de Pittet. Ils mettent en exergue l'influence de la teneur en eau initiale d'un élément de dimension 90(L)x8(R)x2(T)mm³ soumis à des cinétiques de fluage. Ses résultats montrent que la complaisance relative au module d'élasticité est sept fois plus élevée au bout de 300 minutes pour un fluage d'une éprouvette initialement humide ($w = 22\%$) que pour un fluage d'une éprouvette initialement sèche ($w = 0,5\%$) (Figure 72, Figure 73 et Figure 74).

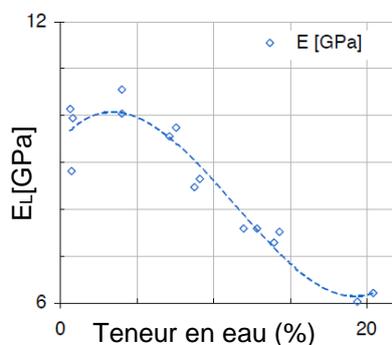


Figure 72 : Evolution du module d'Young selon la teneur en eau $w(\%)$ (Nakano, 1999)

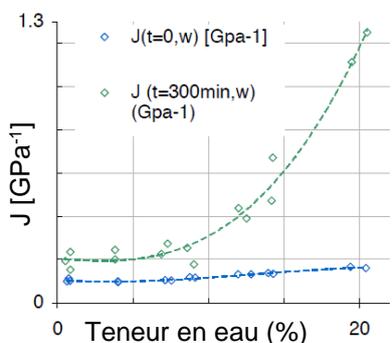


Figure 73 : Evolution de la complaisance à $t = 300\text{min}$ selon la teneur en eau $w(\%)$ (Nakano, 1999)

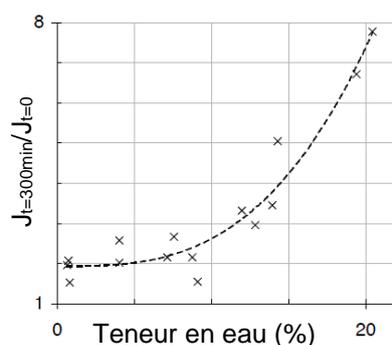


Figure 74 : Evolution de la complaisance relative selon la teneur en eau $w(\%)$ (Nakano, 1999)

Cependant, ces comportements mécaniques, observés en environnement constant, sont probablement différents de ceux d'éléments de structures en service. En effet, ces derniers sont soumis constamment à des variations de température et d'humidité mettant alors en jeu d'autres phénomènes.

III.1.1.3. Effet mécanosorptif

L'effet mécanosorptif concerne le couplage entre l'état mécanique et les variations d'humidité. Plusieurs auteurs (Armstrong, 1960; Gril, 1988; Grossman, 1976; Husson, 2009; Montero,

2010; Ranta-Maunus, 1975) ont montré que le comportement différé du bois présente des effets non linéaires dus au couplage environnemental. En effet, il a été observé qu'un élément en bois soumis à un chargement mécanique constant, et subissant des variations d'humidité, présente une accélération et une accumulation de la déformation. Ce phénomène est appelé mécanosorption. Cependant, ce phénomène est encore aujourd'hui peu maîtrisé. Plusieurs interprétations phénoménologiques lui ont été attribuées (Pittet, 1996) :

- Processus dû à la rupture ou la déformation des liaisons hydrogènes des chaînes de cellulose
- Phénomène lié à la configuration et à l'orientation des microfibrilles de la couche S2 de la paroi cellulaire.
- Phénomène induit par une délamination à l'interface S2/S1 des trachéides chez les résineux sous l'action de tensions longitudinales en humidité variables (Mukudai and Yata, 1986).

On peut également expliquer ce phénomène au travers du principe du Stop and Go. En effet, lorsque les molécules se déplacent de site de sorption en site de sorption, elles vont temporairement libérer des liaisons entre les différents polymères (cellulose, hémicellulose, ...). Cela induit un assouplissement de la structure polymérique. Cet assouplissement peut être à l'origine d'une augmentation de la déformation. Ainsi, plus il y a de variations d'humidité, plus les molécules d'eau sont en mouvement, et plus cet effet prend de l'importance se traduisant par une augmentation de la déformation.

Pittet (1996) met en évidence le phénomène mécanosorptif par une accélération du fluage lors d'une première humidification après chargement et l'accélération de la recouvrance lors de la première humidification après déchargement, Figure 75.

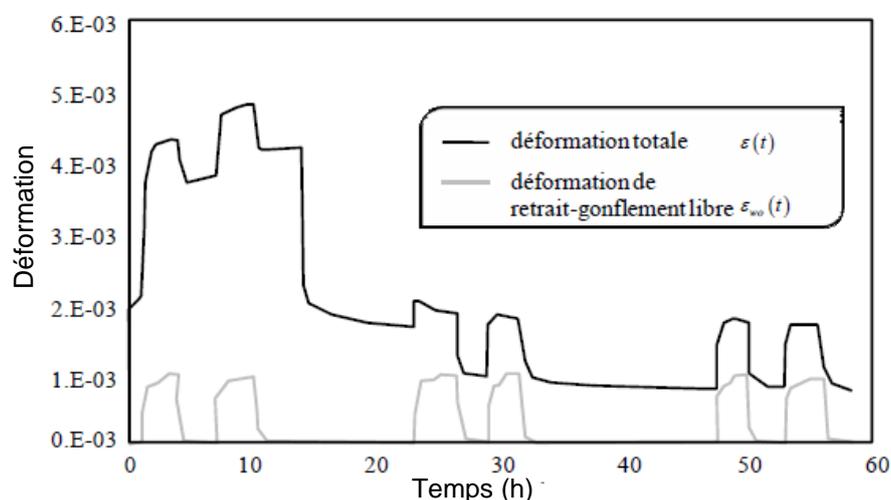


Figure 75 : Essai de fluage avec variations d'humidité (Pittet, 1996)

Ranta-Maunus (1975) montre également l'influence des variations hydriques sur le comportement différé du panneau de contreplaqué de bouleau, Figure 76.

Cette amplification du fluage apparaît donc aussi bien pour un séchage que pour une humidification.

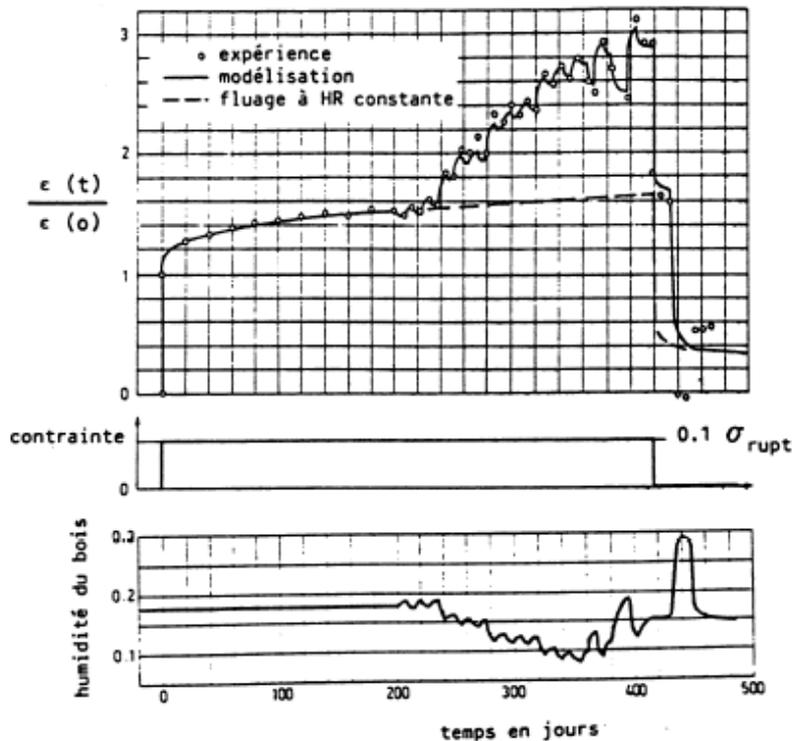


Figure 76 : Amplification du fluage due à des variations hydriques (Ranta-Maunus, 1975)

Cependant, cette approche ne permet pas de conclure réellement sur l'importance de l'effet mécanosorptif. La réponse à la première humidification après le chargement et après le déchargement est également due au comportement viscoélastique hydro activé par les hautes humidités.

III.1.1.4. Mise en évidence de l'effet verrou/ effet mémoire

Cependant, une partie des phénomènes de mécanosorption se traduit par un blocage des déformations durant des phases de séchage et une mémoire hydrique rappelée lors des phases de recouvrement. Gril (1988) identifie ces phénomènes sous le nom d'hygro-verrou. C'est ainsi que Randriambololona (2003) a effectué des essais de traction sur des éprouvettes de pin maritime ($30 \times 2,8 \times 0,6 \text{ mm}^3$) mettant en avant les phénomènes d'hygro verrou et d'effet mémoire, Figure 77.

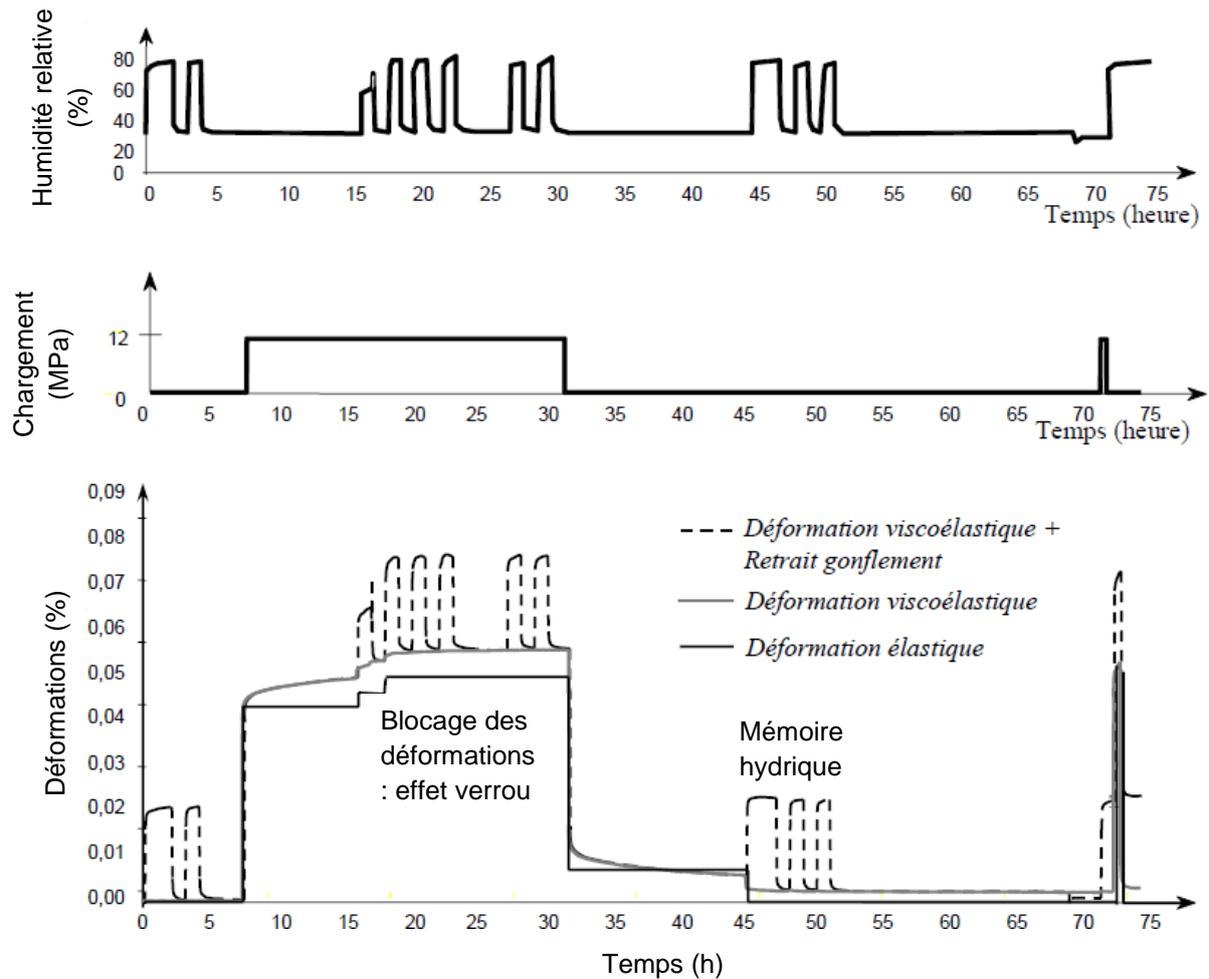


Figure 77 : Déformations sous chargement mécanique et hydrique combinées et découplage des phénomènes (Randriambololona, 2003)

Cette représentation met en évidence l'effet verrou qui se caractérise par une augmentation de la déformation lors des premières phases d'humidification due à un adoucissement de la matrice d'élasticité et un blocage de la déformation lors des phases de séchage lors de la rigidification du module d'élasticité. Cet effet verrou est ensuite libéré lorsque le matériau est à nouveau porté à l'humidité atteinte auparavant ; c'est la part nommée « mémoire hydrique ».

III.1.1.5. Influence du taux de charge

Hearmon and Paton (1964) ont montré l'influence du taux de charge sur le comportement différé du bois. Pour cela ils ont travaillé sur des échantillons de hêtre de faible épaisseur (2mm) sollicités en flexion trois points.

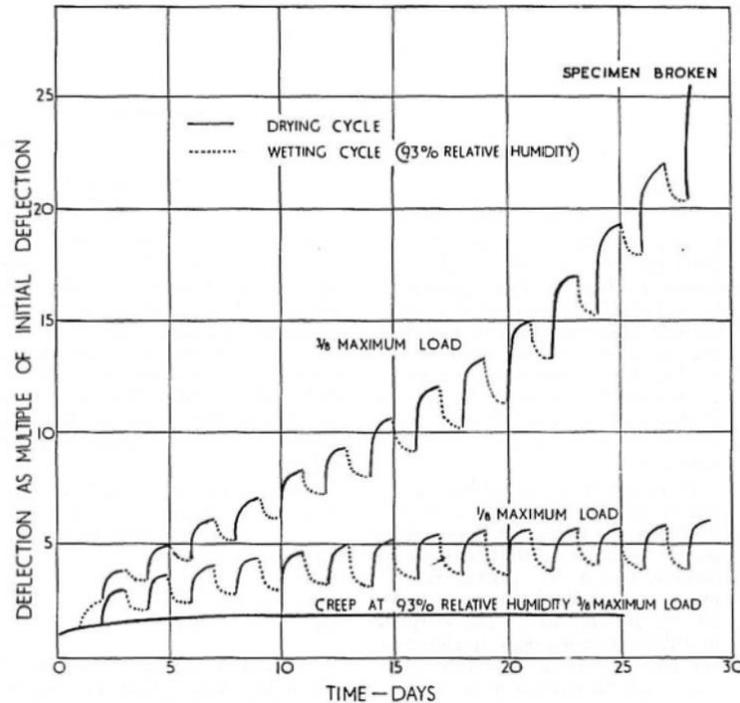


Figure 78 : Influence du taux de charge sur la réponse différée sous environnement constant (93% HR), et variable (Hearmon and Paton, 1964)

Les résultats de la Figure 78 montrent que la mécanosorption peut entraîner une rupture de l'éprouvette si celle-ci est soumise à un taux de contrainte trop élevé (37% de la contrainte à la rupture). Alors que pour un taux de charge plus faible, la réponse différée tend à se stabiliser.

III.1.1.6. Comportement limite

Dans le domaine linéaire, l'existence d'un état limite de déformation est encore non défini. Hunt (2001, 2004) propose une méthode de détermination du fluage limite à partir d'une représentation logarithmique. Il a réalisé des essais de fluage en flexion d'une durée de 13 semaines sur du hêtre et de l'épicéa. Les éprouvettes de section $8 \times 3,2 \text{ mm}^2$ ont été conditionnées à une humidité de 65%. Les résultats, représentés en fluage relatif en fonction du logarithme du temps, permettent de présenter deux phases approximativement linéaires, Figure 79.

L'auteur en conclut que rien ne laisse présager la présence d'une limite de fluage à long terme en environnement constant (Hunt, 2004). De plus, les travaux de Toratti, (1992a), sur des éprouvettes de section $10 \times 10 \text{ mm}^2$ soumises à un état de fluage en traction de 6MPa sur une durée de quatre ans, semblent ne pas montrer un fluage limite, bien que le niveau de contrainte soit dans le domaine linéaire. Cependant, les variations de chargement hydrique tendent à stabiliser la réponse différée.

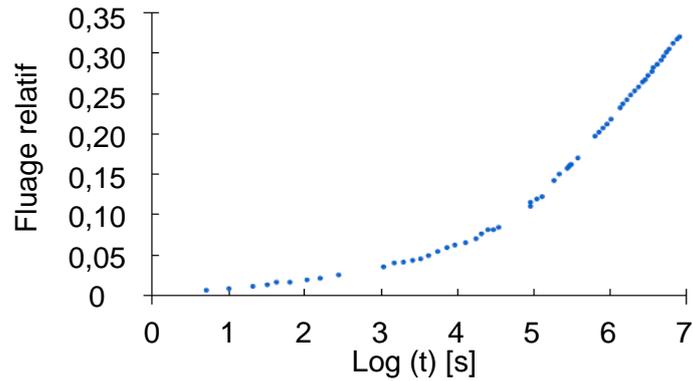


Figure 79 : Fluage relatif en fonction du logarithme du temps (Hunt, 2001)

Ainsi en postulant sur le fait que les phénomènes mécanosorptifs sont liés aux variations hydriques, Hunt (1984) propose le concept de pseudo fluage. Il représente la déformation en fonction de la teneur en eau (dite trajectoire mécanosorptive) en soustrayant les effets de retrait/gonflement hydriques.

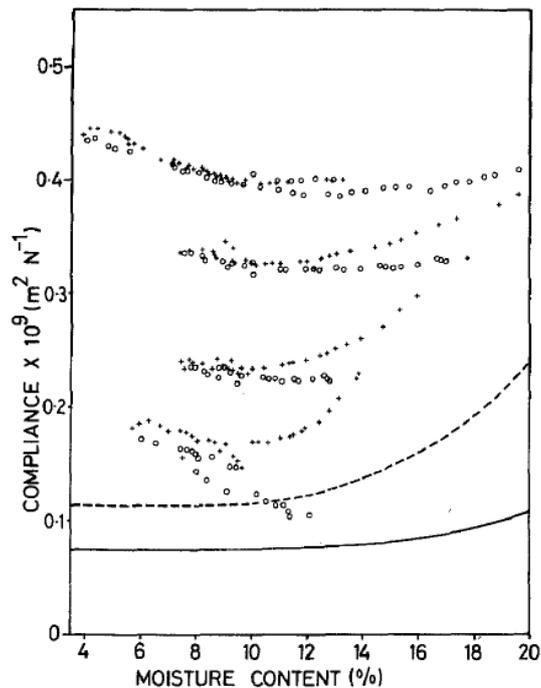


Figure 80 : Trajectoire mécanosorptive du hêtre en traction (6 MPa)

III.1.2. Modélisation du comportement différé du matériau bois

III.1.2.1. Comportement viscoélastique linéaire

La modélisation du comportement viscoélastique linéaire présuppose qu'il existe une correspondance fonctionnelle linéaire entre l'histoire des contraintes $\sigma(t)$ et l'histoire des déformations $\epsilon(t)$ tant pour la réponse instantanée que différée. De plus, si les caractéristiques mécaniques n'évoluent pas dans le temps, on parle alors d'un comportement viscoélastique linéaire non vieillissant. Cela signifie que le recouvrement des déformations ou l'effacement des contraintes sera totale lors d'un essai de fluage/recouvrance ou de relaxation/effacement

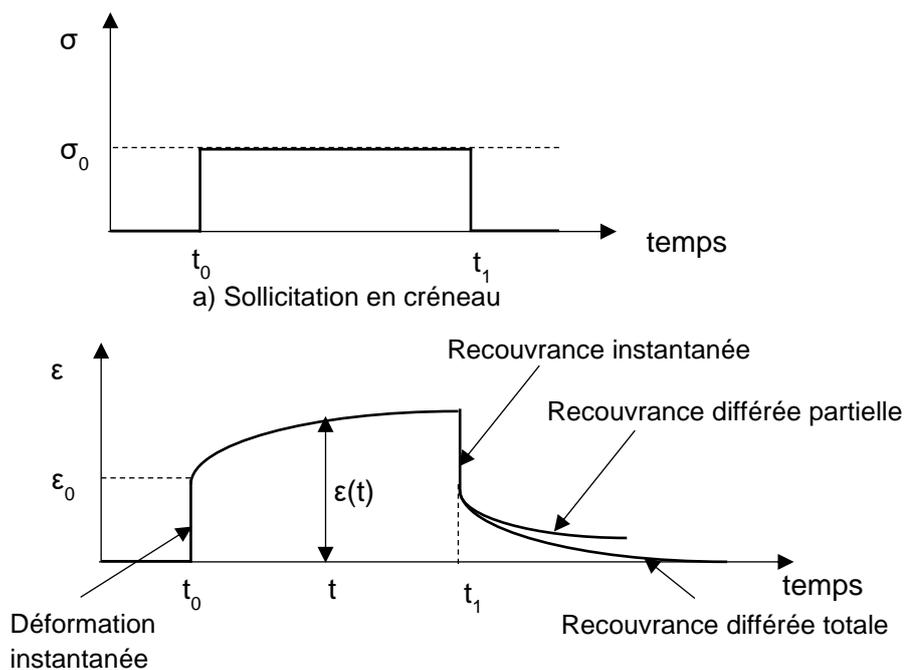
respectivement. Dans ces conditions, s'applique alors le principe de superposition (également appelé principe de Boltzmann). Ainsi, la superposition des sollicitations implique une superposition homologe des réponses.

III.1.2.1.1. Essais de fluage-recouvrance

Le fluage se définit comme étant l'augmentation de la déformation dans le temps d'un élément soumis à un créneau de charge constant et pour un environnement stabilisé. La recouvrance définit la diminution de l'amplitude de la déformation dans le temps après effacement de la contrainte, et ce, toujours sous les mêmes conditions climatiques stabilisées. Ainsi, dans le cas d'un matériau viscoélastique linéaire non vieillissant, la recouvrance a tendance à voir la déformation s'annuler à long terme, Figure 81. La présence d'une déformation résiduelle est alors signe d'un comportement viscoélastique non linéaire ou de l'existence d'un processus non réversible pouvant être causé par un environnement climatique non stabilisé.

Le comportement viscoélastique linéaire non vieillissant se caractérise par une intégrale de Boltzmann dans laquelle intervient la fonction de fluage J. Pour un comportement uni-axial, ce comportement s'exprime par :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (3.1)$$



b) Réponse du matériau viscoélastique à la sollicitation en créneau

Figure 81 : Essai de fluage-recouvrance (Navi and Heger, 2005)

III.1.2.1.2. Essais de relaxation-effacement

L'essai de relaxation consiste à suivre l'évolution de la contrainte d'un élément soumis à un échelon de déformation constant. La contrainte mesurée décroît au fur et à mesure de l'essai. C'est le phénomène de relaxation des contraintes. La phase d'effacement consiste à observer un effacement partiel ou total de la contrainte une fois la diminution ou la suppression de la déformation, Figure 82.

Au cours de cet essai, le comportement viscoélastique linéaire se caractérise par la fonction de relaxation R. Pour un comportement uni-axial cette fonction s'écrit :

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (3.2)$$

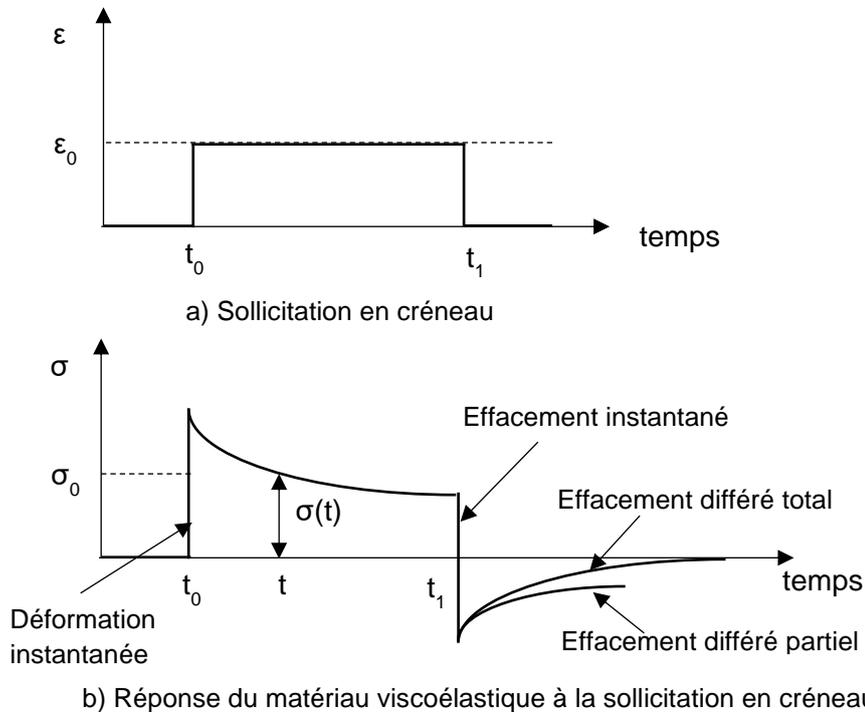


Figure 82 : Essai de relaxation-effacement (Navi and Heger, 2005)

III.1.2.2. Modélisation rhéologique du comportement viscoélastique linéaire

Des modèles rhéologiques permettent de modéliser le comportement viscoélastique d'un matériau à partir de deux éléments, le ressort élastique (solide élastique) et l'amortisseur visqueux (fluide visqueux). Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé et le modèle de Maxwell généralisé sont les deux modèles les plus couramment utilisés.

III.1.2.2.1. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

Plus particulièrement utilisé pour les essais de fluage-recouvrance, le modèle de Kelvin Voigt généralisé se compose de plusieurs cellules de Kelvin Voigt et d'un ressort en série. Le ressort k_0 représente le comportement élastique instantané du système. Quant aux N cellules mises en série, elles s'activent selon une période temporelle caractéristique.

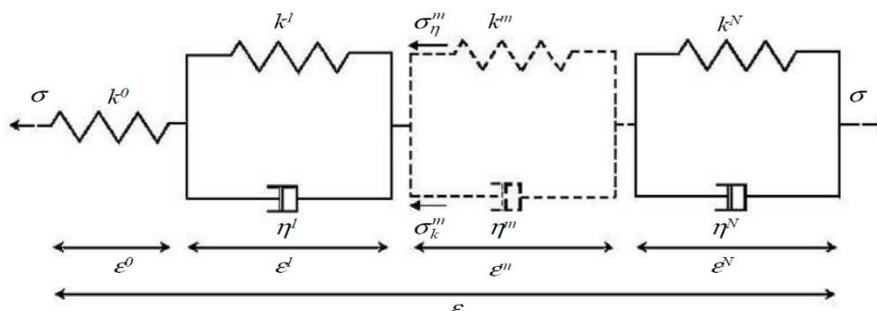


Figure 83 : représentation du modèle de Kelvin Voigt généralisé

Le comportement global du modèle de Kelvin Voigt généralisé s'écrit ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \varepsilon^{(0)} + \sum_{m=1}^N \varepsilon^{(m)} \\ \varepsilon^{(0)} = \frac{\sigma}{k^{(0)}} \\ \sigma = k^{(m)} \cdot \varepsilon^{(m)} + \eta^{(m)} \cdot \dot{\varepsilon}^{(m)} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

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

A partir des relations (3.3), la loi de comportement en fluage s'écrit :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{k^{(0)}} + \sum_{m=1}^N \frac{1}{k^{(m)}} \cdot (1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot t}) \right] \quad \text{Avec } \lambda^{(m)} = \frac{k^{(m)}}{\eta^{(m)}} \quad (3.4)$$

Ainsi, la fonction de fluage uni-axiale $J(t)$ d'un matériau non vieillissant s'écrit sous la forme :

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{k^{(0)}} + \sum_{m=1}^N \frac{1}{k^{(m)}} \cdot (1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot t}) \quad (3.5)$$

III.1.2.2.2. Modèle de Maxwell généralisé

Ce modèle est utilisé pour représenter les essais de relaxation-effacement. Il est constitué de plusieurs cellules de Maxwell et d'un ressort en parallèle. Il est présenté sur la Figure 84 :

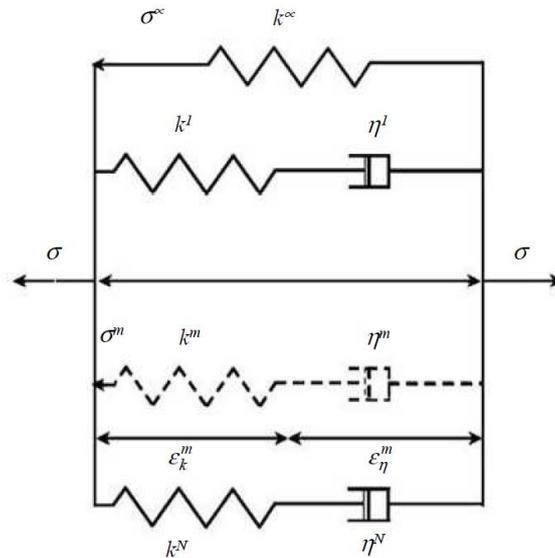


Figure 84 : Représentation du modèle de Maxwell généralisé

Son comportement s'écrit de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sigma^{(\infty)} + \sum_{m=1}^N \sigma^{(m)} \\ \varepsilon^{(0)} = \frac{\sigma^{(0)}}{k^{(0)}} \\ \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}^{(m)}}{k^{(m)}} + \frac{\sigma^{(m)}}{\eta^{(m)}} \end{array} \right. \quad (3.6)$$

$\sigma^{(\infty)}$ représente la contrainte dans le ressort $k^{(\infty)}$, $\sigma^{(m)}$, la contrainte dans la $m^{\text{ième}}$ cellule de Maxwell, caractérisée par sa raideur $k^{(m)}$ et sa viscosité $\eta^{(m)}$. A partir des relations (3.6), la loi de comportement en relaxation s'écrit :

$$\sigma(t) = \varepsilon^{(0)} \left[k^{(\infty)} + \sum_{m=1}^N k^{(m)} \cdot e^{-\lambda^{(m)} \cdot t} \right] \text{ Avec } \lambda^{(m)} = \frac{k^{(m)}}{\eta^{(m)}} \quad (3.7)$$

Ainsi, la fonction de relaxation uni-axiale $R(t)$ d'un matériau non vieillissant s'écrit sous la forme :

$$R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon^{(0)}} = k^{(\infty)} + \sum_{m=1}^N k^{(m)} \cdot e^{-\lambda^{(m)} \cdot t} \quad (3.8)$$

III.1.2.3. Modélisation de la mécano-sorption

Lorsqu'on s'intéresse au comportement mécanique d'éléments de structure soumis à un environnement extérieur, l'influence des cycles d'humidité sur le comportement mécanique différé doit être pris en compte. La modélisation de ces phénomènes est basée sur la discrétisation de la déformation finale en une somme de déformations élémentaires. La littérature propose plusieurs modèles qui peuvent alors se regrouper en deux familles.

- Les modèles à activation indépendante (Hunt, 1989; Leicester, 1971; Ranta-Maunus, 1975; Toratti, 1992b), ils sont basés sur un découplage des phénomènes physiques. Ainsi lors d'un essai de fluage, les déformations d'origines viscoélastique et mécanosorptive sont vues comme faiblement couplées.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{ve}(t) + \varepsilon_{ms}(t) + \varepsilon_{wo}(t) + \varepsilon_{wo\sigma}(t) \quad (3.9)$$

- Les modèles à activation combinée (Bažant, 1985; Hunt, 1999; Husson, 2009) considèrent une forte interaction entre les déformations mécanosorptive et viscoélastique.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{ve+ms}(t) + \varepsilon_{wo+w\sigma}(t) \quad (3.10)$$

$\varepsilon_e(t)$ désigne la déformation instantanée élastique, $\varepsilon_{ve}(t)$ et $\varepsilon_{ms}(t)$ les déformations viscoélastiques et mécanosorptives découplées l'une de l'autre, la forme couplée étant représentée par $\varepsilon_{ve+ms}(t)$. Enfin, les phénomènes de retrait gonflement sont partagés en terme de retrait gonflement libre $\varepsilon_{wo}(t)$ et de retrait gonflement sous charge $\varepsilon_{wo\sigma}(t)$, ou alors couplé $\varepsilon_{wo+w\sigma}(t)$. Enfin, malgré la différence entre ces deux types de modèles, les essais expérimentaux ne permettent pas aujourd'hui d'établir un consensus sur ces deux approches.

III.1.2.4. Modèle de Jean Marie Husson

III.1.2.4.1. Origine du modèle

En 1988 Gril (1988) propose un modèle permettant de déterminer le comportement mécanosorptif du bois en se basant sur la mobilité moléculaire. Son modèle se base sur les travaux de Mukudai et Yata (Mukudai and Yata, 1986). Cependant, contrairement à ce dernier, Grill veut pallier le manque de reproduction des effets de blocage des déformations durant la phase de déchargement pour de faibles teneurs en eau. Ainsi, il propose un modèle à activation combinée auquel il associe le concept d'hygro-verrou. Son modèle est constitué de

n cellules de Maxwell, chacune étant mise en parallèle avec un amortisseur. Ces derniers permettent de modéliser les effets de blocage des déformations.

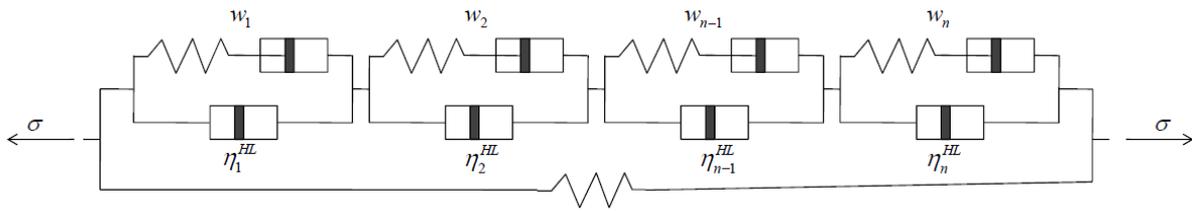


Figure 85 : Modèle de Gril avec effet hygro-verrou

Afin de compléter le modèle de Gril, Dubois (2005) propose de modéliser l'effet hygro verrou en considérant deux comportements élastiques spécifiques. Le premier étant pour la phase d'humidification, basé sur la loi de Hooke. Pour la phase de séchage, le modèle est basé sur la loi de Bazant nécessaire pour prendre en compte, d'une part, une rigidification et d'autre part, un effet verrou en l'absence de variations de contraintes :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{k(w(t))} \text{ pour } \dot{w}(t) \geq 0 \text{ et } \dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{k(w(t))} \text{ pour } \dot{w}(t) \leq 0 \quad (3.11)$$

Ainsi, un modèle de Kelvin Voigt généralisé permet de représenter le comportement viscoélastique tout en prenant en compte les effets de variations d'humidités. Cependant, l'existence de deux lois de comportement différentes, Hooke et Bazant, présente une difficulté de synchronisation lors du développement analytique ou de la modélisation aux éléments finis de ces phénomènes.

III.1.2.4.2. Modèle thermodynamique d'hygro verrou par Husson

C'est ainsi qu'Husson (2009) propose une nouvelle approche thermodynamique de l'effet verrou. Son apport permet de prendre en compte l'influence de l'humidité sur le comportement élastique du matériau. Son approche débute par la forme dérivée de la loi de Hooke, qui s'écrit :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}(t)}{k(t)} - \frac{\dot{k}(t)}{k^2(t)} \cdot \sigma(t) \quad (3.12)$$

En l'absence de chargement mécanique ($t < t_1$), les variations d'humidité n'ont aucun impact sur la déformation. Une fois le chargement mécanique appliqué, l'auteur détermine l'effet hygro verrou par un blocage des déformations au moment du séchage. Ainsi l'équation (3.12) s'écrit :

$$\dot{\varepsilon} = 0 \text{ ou encore } \frac{\dot{\sigma}(t)}{\sigma(t)} = \frac{\dot{k}(t)}{k(t)} \quad (3.13)$$

La résolution de l'équation (3.13) s'écrit alors :

$$\sigma(t) = A \cdot k(t), \text{ avec } A \text{ une constante} \quad (3.14)$$

Afin d'introduire la notion de contrainte mécanosorptive, notons la contrainte mécanique induite par le chargement mécanique comme suit :

$$\Phi(t) = \Phi_1 \cdot H(t - t_1) \quad (3.15)$$

H représente ici la fonction Heaviside.

Ainsi, en supposant que le blocage des déformations en phase de séchage est dû à l'existence d'une contrainte mécanosorptive $\Gamma(t)$, la contrainte totale $\sigma(t)$ peut alors s'écrire :

$$\sigma(t) = \Phi(t) + \Gamma(t) \quad (3.16)$$

A partir des équations (3.14) et (3.16), Husson propose une écriture de la contrainte mécanosorptive.

$$\Gamma(t) = A.k(t) - \Phi(t) \quad (3.17)$$

Or, au temps $t < t_1$, les variations hydriques n'induisent pas de blocage des déformations. On peut alors déterminer la valeur de A à partir de l'équation (3.17) :

$$\Gamma(t_1) = 0 \text{ et donc } A = \frac{\Phi_1}{k(t_1)} \quad (3.18)$$

Ainsi, lors d'une phase de séchage à partir de l'instant t_1 , la contrainte mécanosorptive est définie selon les équations (3.17) et (3.18), telle que :

$$\Gamma(t) = \Phi_1.H(t - t_1). \frac{(k(t) - k(t_1))}{k(t_1)} \quad (3.19)$$

Dans un cas plus général, lors de variations d'humidité, la contrainte mécanosorptive s'écrit :

$$\Gamma(t) = \Phi_1.H(t - t_1). \frac{(k(t) - k_{\min}(t_1, t))}{k_{\min}(t_1, t)} \quad (3.20)$$

$k_{\min}(t_1, t)$ représente le minimum de la raideur depuis le moment du chargement au temps t_1 tel qu'il est représenté en Figure 86. Cette rigidité minimale est définie par :

$$k_{\min}(t_1, t) = \min k(t') \text{ avec } t' \in [t_1, t] \quad (3.21)$$

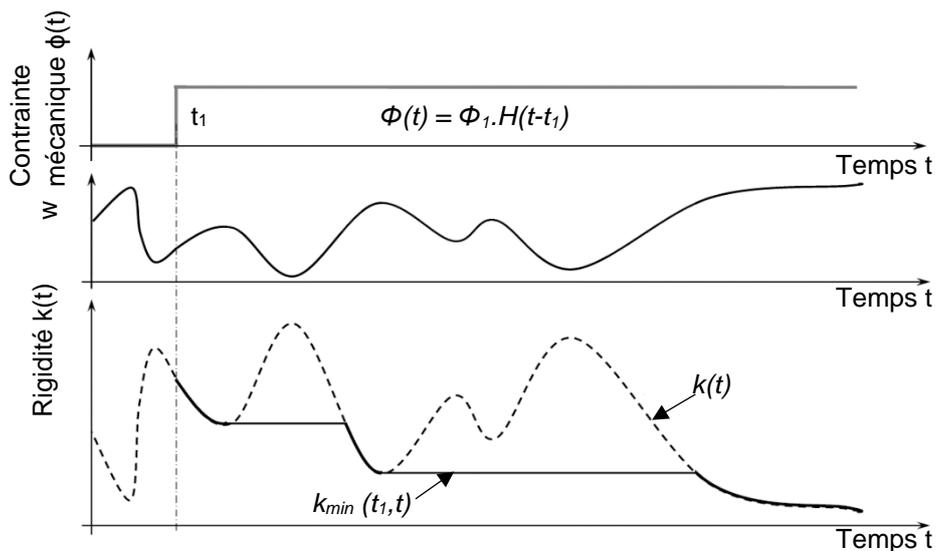


Figure 86 : Représentation schématique du module d'élasticité minimum

L'auteur propose alors un nouveau modèle rhéologique, Figure 87, celui d'un ressort à effet mémoire.

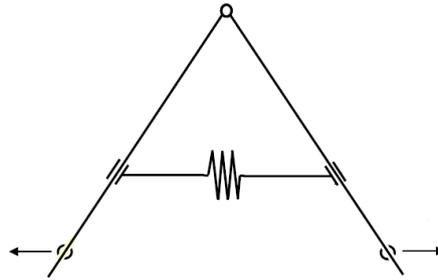


Figure 87 : Représentation rhéologique du ressort à effet mémoire selon Husson (2009)

Enfin, Husson étend l'approche faite dans le domaine élastique linéaire à la modélisation du comportement viscoélastique linéaire. Dans le cas uniaxial, cela se traduit par l'implantation du ressort à effet mémoire en lieu et place des ressorts standards d'un modèle de Kelvin Voigt généralisée, Figure 88.

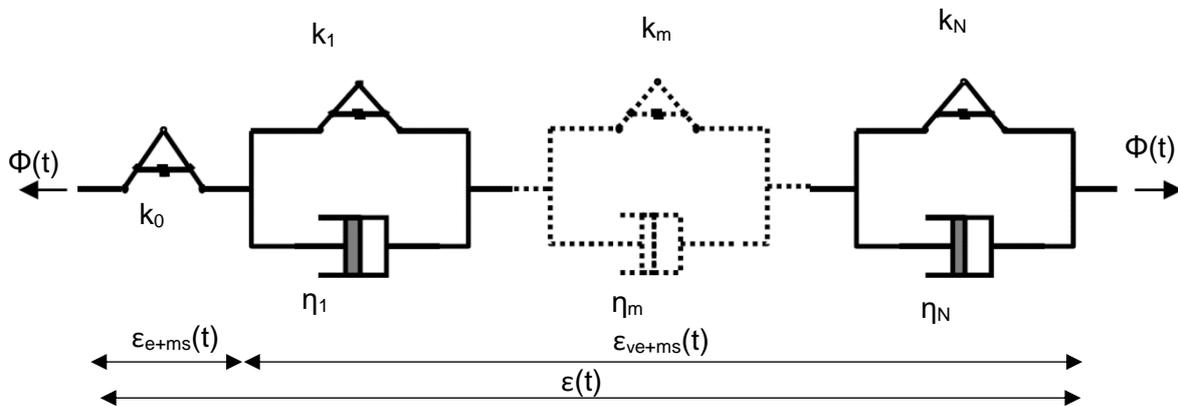


Figure 88 : Modélisation des cellules viscoélastiques généralisées avec ressorts à effet mémoire

L'indice m représente le numéro de la cellule et l'indice N le nombre de cellules mises en série.

Cependant, cette approche présente une instabilité numérique au premier pas de temps de calcul. En effet, si au premier pas de temps la charge supportée par le ressort à effet mémoire de la cellule viscoélastique est supérieure à celle supportée par l'amortisseur, un phénomène de résonance apparaît et crée une divergence. Afin de limiter ce phénomène de résonance, la procédure nécessite une détermination d'un pas de temps de calcul maximum à ne pas dépasser (Husson, 2009).

Husson a testé son modèle dans plusieurs conditions de chargements hydromécanique avec un modèle qui représente bien les résultats expérimentaux. Est présenté sur la Figure 89 un essai de Randriambololona (Randriambololona, 2003) réalisé sur des éprouvettes de très faibles épaisseurs ($30 \times 2,8 \times 0,7 \text{ mm}^3$) et qui permettent de supposer une variation d'humidité homogène instantanée dans le matériau. Husson y présente la réponse de son modèle.

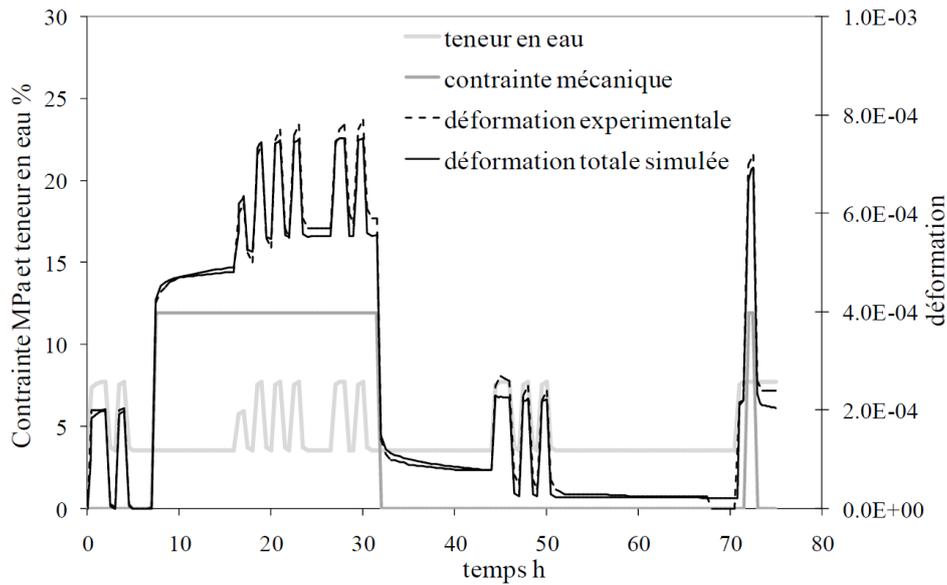


Figure 89 : Comparaison du modèle de Husson sur les essais de Randriambololona

Ce modèle n'a été écrit que pour des essais 1D. Il nous reste l'implémentation dans le code aux éléments finis Cast3M en 3D afin de l'utiliser pour nos essais mécaniques en conditions d'environnement extérieur et en y introduisant l'orthotropie caractérisant le matériau bois.

III.1.2.4.3. Influence de l'hygro verrou sur la déformation

A humidité constante, la loi de Hooke permet de décrire la contrainte en fonction de la déformation :

$$\sigma = k_0 \cdot \varepsilon_0 \quad (3.22)$$

Cependant, dans le cas d'un matériau soumis à une sollicitation hydrique cette loi n'est pas toujours thermodynamiquement admissible (2nd principe).

- Cas d'une humidification

Dans le cas d'humidification, la matrice élastique s'assouplit. L'élément soumis à une contrainte mécanique va voir sa déformation augmenter. Ainsi, pour un élément passant d'une humidité w_0 à w_1 , la loi de Hooke permet d'écrire :

$$\sigma(w_1) = k_0(w_1) \cdot \varepsilon_0(w_1) \quad (3.23)$$

- Cas d'un séchage

Dans le cas d'un séchage, nous avons vu que la déformation était bloquée par l'effet d'hygro verrou. Ainsi, la loi de Hooke ne permet pas de décrire le comportement mécanique d'un échantillon soumis à une rigidification. Dans le cas de la solidification des métaux en fusion, Bazant (Bažant, 1985) a proposé une adaptation de la loi de Hooke en exprimant une proportionnalité entre le taux de contrainte et de déformation telle que :

$$\dot{\sigma}(w) = k_0(w) \cdot \dot{\varepsilon}_0(w) \quad (3.24)$$

Ainsi, pour un matériau soumis à des variations d'humidité et selon le principe thermodynamique décrit dans le paragraphe III.1.2.4.2, on peut définir l'évolution de la déformation selon l'équation :

$$\varepsilon_0(t) = \frac{\sigma_0(t)}{k_{\min}(t_0, t)} \quad (3.25)$$

σ_0 désigne la contrainte mécanique, $k_{\min}(t_0, t)$ représente la raideur minimale selon l'équation (3.21) entre les temps t_0 et t . Le moteur de l'hygro verrou n'est pas directement les variations d'humidités mais les variations de raideurs associées. Les détails du formalisme analytique est repris en Annexe 3. La Figure 90 représente un exemple d'un élément soumis à un chargement mécanique constant et à des variations hydriques.

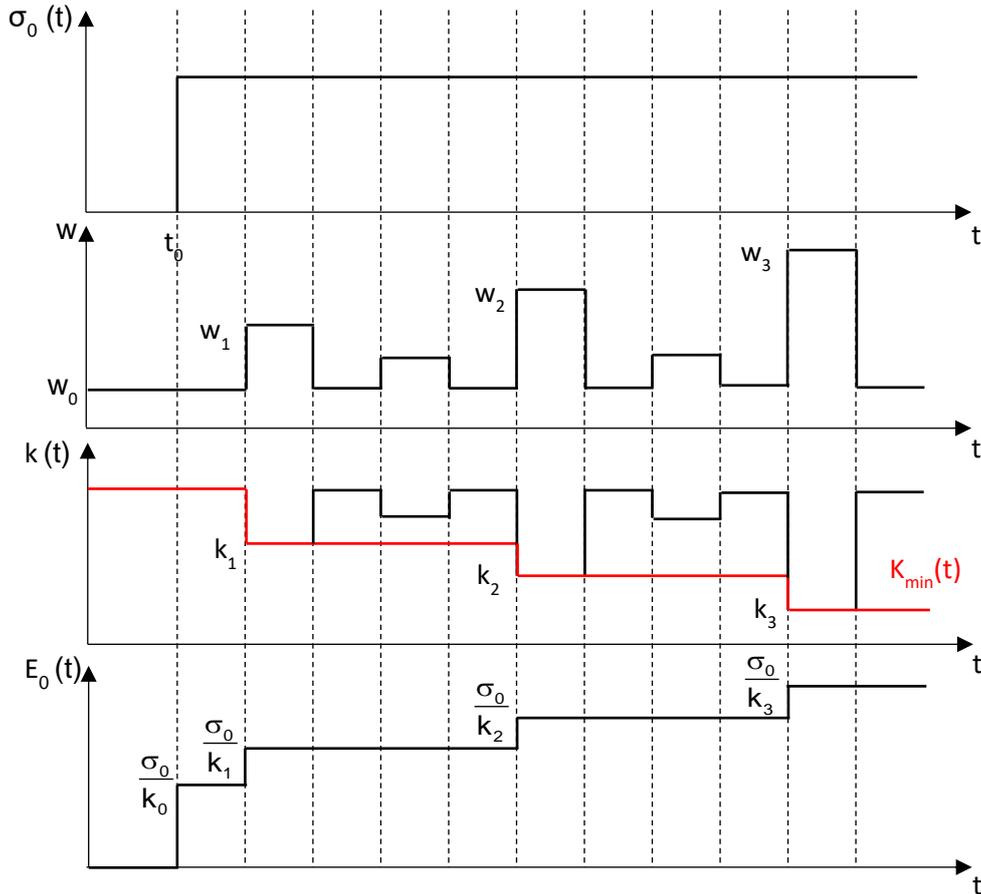


Figure 90 : Comportement mécanique d'un élément soumis à des variations d'humidité

Dans le cas d'un élément soumis à un chargement mécanique variable, il faut alors appliquer le principe de superposition des gradients de contraintes en discrétisant son histoire, comme proposé en Figure 91.

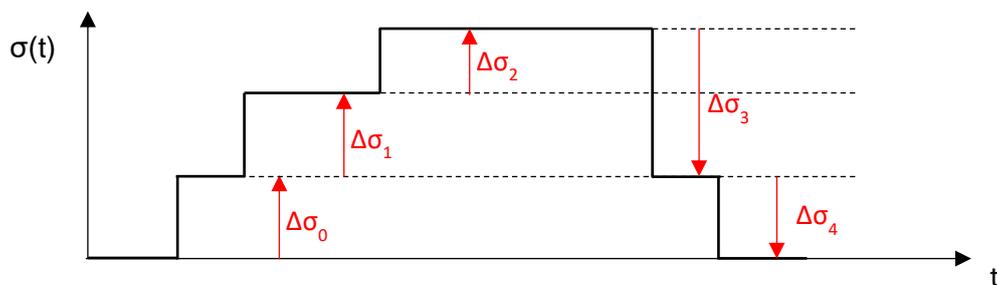


Figure 91 : Chargement mécanique quelconque

Ainsi les incréments de déformations au temps t_0 , t_1 et t_2 valent :

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_0(t) &= \frac{\Delta\sigma_0}{k_{\min}(t_0, t)} \\ \Delta\varepsilon_1(t) &= \frac{\Delta\sigma_1}{k_{\min}(t_1, t)} \\ \Delta\varepsilon_2(t) &= \frac{\Delta\sigma_2}{k_{\min}(t_2, t)}\end{aligned}\quad (3.26)$$

D'après le principe de superposition de Boltzmann, au temps $t \in [t_2, t_3]$ la contrainte σ et la déformation ε valent :

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 \\ \varepsilon(t) &= \frac{\Delta\sigma_0}{k_{\min}(t_0, t)} + \frac{\Delta\sigma_1}{k_{\min}(t_1, t)} + \frac{\Delta\sigma_2}{k_{\min}(t_2, t)}\end{aligned}\quad (3.27)$$

Enfin dans le cas d'une sollicitation mécanique quelconque d'un élément soumis à un chargement hydrique quelconque, l'équation de la déformation s'écrit sous la forme intégrale suivante:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{d\sigma}{k_{\min}(\tau, t)} = \int_0^t \frac{1}{k_{\min}(\tau, t)} \cdot \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} \cdot d\tau \quad (3.28)$$

L'équation (3.28) montre que pour un ressort, le processus hygro-verrou se traduit par un comportement analogue à une intégrale de Boltzmann, comme le comportement viscoélastique usuel.

III.1.2.4.3.1. Formulation incrémentale

Afin de déterminer l'incrément de déformation d'un système soumis au séchage ou à une humidification, Husson propose les deux équations analytiques suivantes:

- Cas de la rigidification de la matrice élastique :

$$\varepsilon(t) = \int_0^{t_{n-1}} C_{\max}(\tau, t_{n-1}) \cdot \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^t C(\tau) \cdot \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} \cdot d\tau = \varepsilon(t_{n-1}) + \Delta\varepsilon_n \quad (3.29)$$

$$\text{Avec } \Delta\varepsilon_n = \int_{t_{n-1}}^t C(\tau) \cdot \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} \cdot d\tau$$

- Cas de l'assouplissement de la matrice élastique

$$\begin{aligned}\varepsilon(t_n) &= \int_0^{\bar{t}} C_{\max}(\tau, \bar{t}) \cdot \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} \cdot d\tau + \int_{\bar{t}}^{t_n} C_{\max}(t_n) \cdot \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} \cdot d\tau \\ &= \varepsilon(\bar{t}) + C(t_n) \cdot (\sigma(t_n) - \sigma(\bar{t})) \\ \Delta\varepsilon_n &= \varepsilon(\bar{t}) - \varepsilon(t_{n-1}) + C(t_n) \cdot (\sigma(t_n) - \sigma(\bar{t}))\end{aligned}\quad (3.30)$$

Où \bar{t} représente le temps tel que pour $\tau < t_n$, $C(\tau) = C(t_n)$.

III.1.2.4.3.2. Implémentation aux éléments finis

Le comportement mécanique que nous modélisons ici est celui d'un matériau élastique soumis à des variations d'humidité. Nous sommes alors en présence d'un comportement hygro élastique. Ainsi, pour déterminer l'évolution de la déformation, on peut différencier les deux types de comportement de la façon suivante :

$$\varepsilon = \mathbf{C} \cdot \sigma + \alpha \cdot \Delta W \quad (3.31)$$

Le premier terme représente la déformation proportionnelle à la contrainte au travers de la complaisance, et le second terme définit la déformation libre.

Dans une loi incrémentale, l'équation (3.31) s'écrit :

$$\varepsilon = \mathbf{C} \cdot \sigma + \mathbf{B} \quad \text{avec } \mathbf{B} \text{ le terme de déformation libre} \quad (3.32)$$

Ou encore pour définir l'incrément de déformation sur l'incrément de temps Δt_n :

$$\Delta \varepsilon_n = \mathbf{A} \cdot \Delta \sigma_n + \mathbf{B} \quad \text{avec } \mathbf{A}, \text{ une matrice de complaisance équivalente} \quad (3.33)$$

\mathbf{A} représente une pseudo complaisance qui permet de traduire la réponse d'une déformation instantanée induit par un incrément de contrainte mécanique. \mathbf{B} représente l'histoire complète de l'effet de la température, de l'humidité et du chargement sur la déformation. Ainsi, pour les cas rigidifiant et assouplissant, nous devons identifier les paramètres \mathbf{A} et \mathbf{B} . L'Annexe 3, reprend le développement des formulations incrémentales à implémenter dans le code aux éléments finis.

Nous rappelons ici les deux termes \mathbf{A} et \mathbf{B} de l'équation (3.33) décrit en Annexe pour les deux cas, à savoir :

- Cas rigidifiant :
$$\mathbf{A} = \mathbf{C}(t_{n-1}) + \frac{\Delta \mathbf{C}_n}{2} \quad (3.34)$$

$$\mathbf{B} = 0$$

- Cas assouplissant :
$$\mathbf{A} = \mathbf{C}(t_n)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{C}(t_n) \cdot (\sigma(t_{n-1}) - \sigma(\bar{t})) + \varepsilon(\bar{t}) - \varepsilon(t_{n-1}) \quad (3.35)$$

Enfin, comme c'est un matériau soumis à des déformations libres dû au retrait gonflement, au terme \mathbf{B} , doit être ajouté l'incrément de déformation libre décrit en Annexe 3.2.1.

Nous présentons ici une généralisation à un comportement et une sollicitation tridimensionnelle.

La modélisation des essais mécanique se faisant en 3D, la formulation incrémentale doit alors être définie dans cet espace. Par principe de superposition, le comportement incrémental (3.33) se généralise par l'expression suivante :

$$\Delta \varepsilon_{ij}^n = A_{ijkl}^n \cdot \Delta \sigma_{kl}^n + B_{ij}^n \quad (3.36)$$

A_{ijkl}^n représente un tenseur de complaisance d'ordre quatre. B_{ij}^n est la composante du tenseur de pseudo déformation. Ces deux tenseurs n'ont plus qu'à être mis à jours à partir des équation (3.34) et (3.35) auxquels ont ajoute le terme de déformation libre.

Afin de calculer l'incrément de déformation (3.36) à partir de la méthode aux éléments finis, nous avons utilisé la méthode proposée par Ghazlan et al. (1995). Elle est basée sur le principe des travaux virtuel. Ainsi, dans le domaine discrétisé V, l'équation s'écrit de la façon suivante :

$$\mathbf{K}_T \cdot \{\Delta \mathbf{U}(t_n)\} = \{\Delta \mathbf{F}(t_n)\} + \{\Delta \mathbf{F}(t_{n-1})\} \quad (3.37)$$

Où $\{\Delta \mathbf{U}(t_n)\}$ représente l'incrément de vecteur de déplacement nodal, et \mathbf{K}_T est une matrice équivalente assemblée à partir du tenseur A_n , défini à partir des composantes A_{ijkl}^n , et de la matrice de déformation B, tel que :

$$\mathbf{K}_T = \int_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{B} dV \quad (3.38)$$

$\{\Delta \mathbf{F}(t_n)\}$ représente l'incrément de vecteur de force nodal des efforts mécaniques extérieurs durant l'incrément de temps Δt_n . $\{\Delta \mathbf{F}(t_{n-1})\}$ représente le vecteur de pseudo chargement. Ce terme permet de prendre en compte l'histoire du chargement mécanique et des variations de température et d'humidité. Il se détermine à partir de la relation suivante :

$$\{\Delta \mathbf{F}(t_{n-1})\} = \int_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot \{\varepsilon(t_{n-1})\} dV \quad (3.39)$$

Avec $\{\varepsilon(t_{n-1})\}$ le vecteur obtenu à partir du tenseur défini par les composantes B_{ij}^n .

La résolution de la formulation incrémentale implémentée dans le logiciel Cast3M (CEA, 2015).est présenté sous la forme de l'algorithme de la Figure 92.

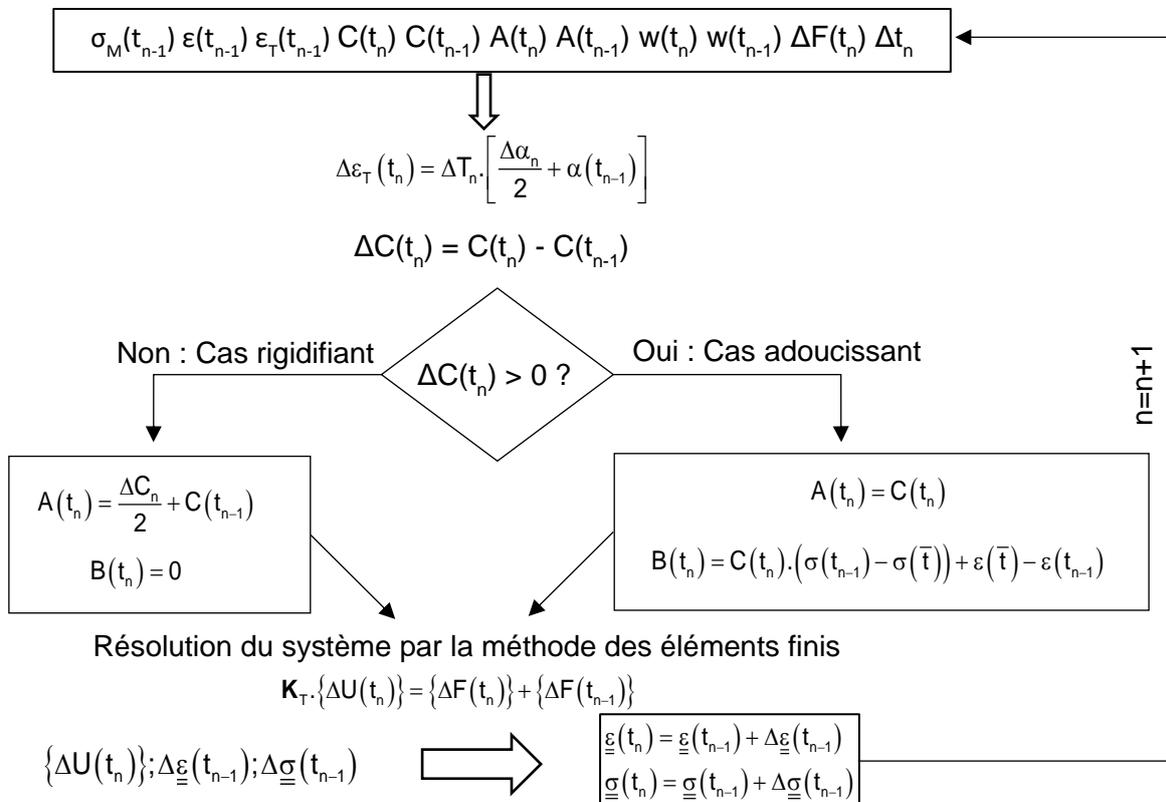


Figure 92 : Algorithme implémenté dans le logiciel de calcul aux éléments finis

Cet algorithme permet de déterminer le comportement mécanique au temps t_n à partir de l'histoire mécanique connue au temps t_{n-1} , tout en prenant en compte l'influence de la température et de l'humidité sur la matrice de rigidité élastique ainsi que l'évolution du chargement mécanique au cours du pas de temps Δt_n .

III.2. Développements supplémentaires

L'état de l'art a permis de mettre en avant les différents phénomènes mis en jeu lors d'un essai mécanique long terme. Nous avons également pu voir les différentes approches de modélisations de ces phénomènes. Cependant, ces modèles ont souvent été créés dans un objectif de détermination du comportement mécanique différé d'éléments en bois de petites dimensions, sollicités dans des ambiances contrôlées et ne présentant aucun défaut macroscopique (nœuds, défaut d'alignement de fil, etc.). Nous souhaitons déterminer le comportement long terme d'éléments de structures. Ces éléments présentent bien souvent de multiples défauts, et sont situés dans des environnements très variables.

Afin de prendre en compte ces différents points, nous présentons ici le développement de l'implémentation en 3D des modèles présentés dans le paragraphe précédent. Ainsi, nous présenterons les différents apports que nous proposons au sein des modèles mécaniques permettant de modéliser le comportement d'hygro sensibilité de la matrice élastique, et du comportement viscoélastique hygro activé. Dans un premier temps, la démarche de construction du modèle viscoélastique est présentée. Dans un second temps, les simulations 3D permettront d'identifier l'impact des modifications élastiques et viscoélastiques, sur le comportement long terme.

III.2.1. Proposition d'approche viscoélastique

Actuellement, l'Eurocode 5 quantifie le comportement long terme au travers d'un unique coefficient qui varie en fonction de trois environnements types. Pour des éléments fléchis, ce coefficient représente l'amplification de déformation à 50 ans par rapport à la flèche instantanée. Dans un objectif de modélisation du comportement différé au travers un modèle de Kelvin Voigt généralisé, nous devons adapter cette démarche d'Eurocode. Nous proposons ainsi de modéliser le comportement long terme au travers d'une redistribution du coefficient k_{def} au cours du temps.

III.2.1.1. Détermination des temps caractéristiques

Au travers de ce coefficient, l'Eurocode 5 définit la déformation limite prévue à long terme d'un élément de structure soumis à un chargement permanent. Cependant, le règlement ne permet pas de déterminer la déformation limite pour un temps caractéristique plus court ou plus long. Afin de se baser sur l'approche Eurocode 5, nous proposons une interprétation de la répartition temporelle de ce coefficient au travers des temps de durée de chargement (AFNOR, 2010). Le Tableau 15 récapitule les durées de chargement et l'interprétation des valeurs de temps caractéristiques retenues pour la suite de ces travaux :

Tableau 15 : Estimation des temps caractéristiques

Classe de durée de charge équivalente	t	Temps caractéristiques estimés (heures)
Instantané	t_0	0
Court terme	t_1	168 (1 semaine)
Moyen terme	t_2	4320 (6 mois)

Long terme	t_3	87600 (10 ans)
Permanent	t_4	438000 (50ans)

Comment déterminer la part du coefficient k_{def} pour un temps différent du permanent c'est-à-dire 50 ans pour les constructions standards ? Nous proposons alors de décrire l'évolution de k_{def} au cours du temps au travers du facteur de fluage pour chaque temps caractéristique.

$$k_{def}^i = k_{def} \cdot \Psi_{t_i} \text{ avec } i \text{ le temps caractéristique } (i \in [1,4]) \quad (3.40)$$

Les quatre valeurs du facteur Ψ_{t_i} seront identifiées à partir des résultats expérimentaux. Le choix de l'histoire de ces temps d'ouverture est à adapter en fonction de la durée des données à caler. Afin de mettre en évidence l'influence de ces paramètres sur le comportement différé, sont représentés dans le Tableau 16 deux scénarios de Ψ_{t_i} par classe de durée de charge.

Tableau 16 Scénarios de Ψ_{t_i} en fonction des durées de charge

Classe de durée de charge	Scénario 1	Scénario 2
Instantanée	0	0
Court terme	0,05	0,025
Moyen terme	0,5	0,3
Long terme	0,8	0,7
Permanent	1,0	1,0

Ainsi est représenté en Figure 93 l'évolution de la flèche différée relative selon les deux scénarios. Ils présentent deux types de matériaux ayant la même déformation long terme. Cependant le scénario1 sera plus réactif que le scénario 2.

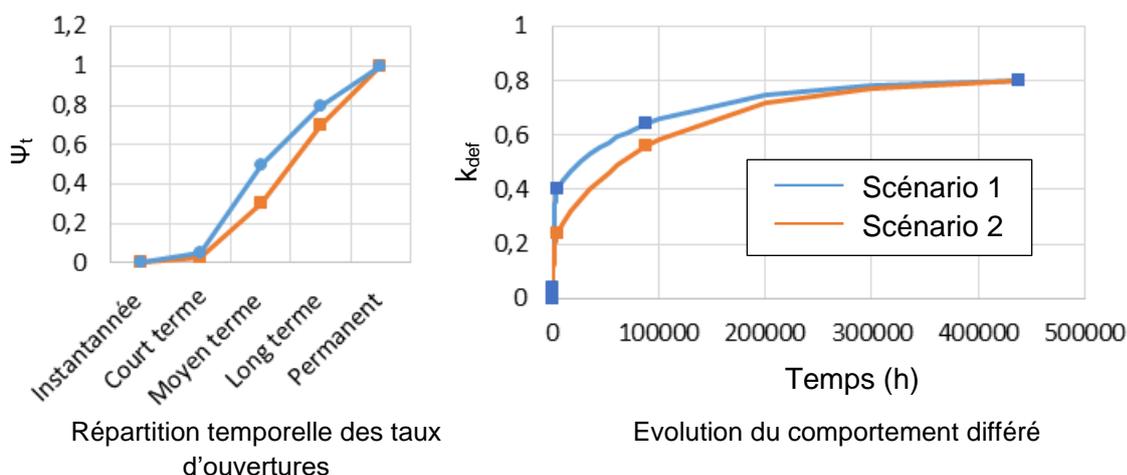


Figure 93 : Influence de répartition temporelle des taux d'ouvertures sur le comportement différé pour une valeur de $k_{def} = 0,8$ (Classe de service 2)

Ainsi, la répartition temporelle du coefficient k_{def} permet de rendre compte des différences de comportement différé « entre matériaux ».

III.2.1.2. Approche rhéologique

Afin de déterminer le coefficient k_{def} des essences de feuillus à partir des modèles numériques, nous devons traduire ce coefficient via une approche rhéologique. Le comportement

instantané est modélisé au travers du ressort à effet mémoire présenté au paragraphe III.1.2.4 et le comportement différé à partir de plusieurs cellules de Kelvin Voigt généralisées mises en série (Figure 94).

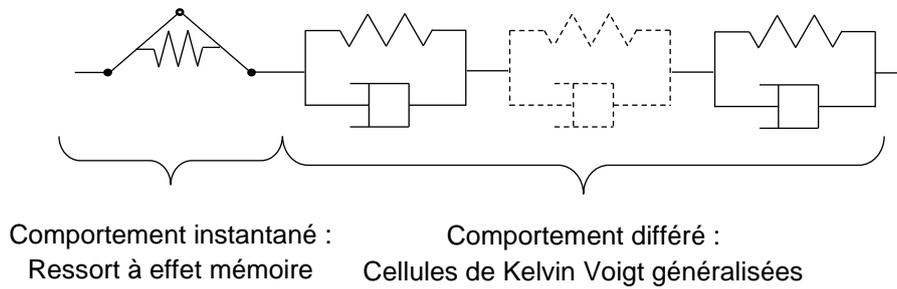


Figure 94 : Modélisation rhéologique du comportement instantané et différé

Pour modéliser le comportement différé du matériau, à chaque cellule de Kelvin Voigt est associée une durée de charge tel qu'elles sont décrites dans le Tableau 15. Les temps caractéristiques représentent alors le temps d'ouverture de l'amortisseur de chaque cellule, Figure 95.

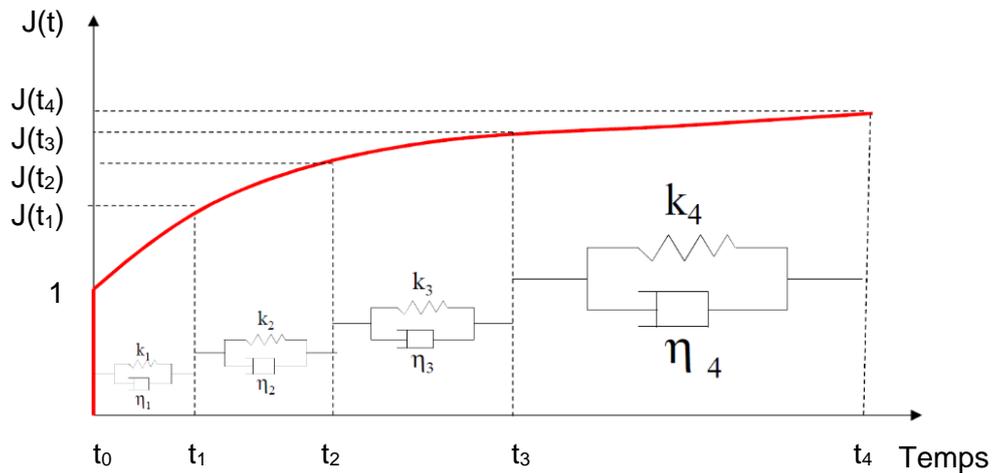


Figure 95 : Evolution de la fonction de fluage $J(t)$ pour chaque cellule de Kelvin Voigt

La flèche $u(t)$ au temps t_i s'écrit de la façon suivante :

$$u(t_i) = u(t_0) \cdot (1 + k_{\text{def}}^i) \quad \text{avec } i \geq 1 \quad (3.41)$$

La valeur du coefficient k_{def} au temps caractéristique t_i se déduit de la façon suivante :

$$k_{\text{def}}^i = \frac{u(t_i)}{u_{\text{inst}}} - 1 \quad \text{avec } i \geq 1 \quad (3.42)$$

Ainsi on définit la fonction de fluage $J(t)$ tel que

$$u(t) = u_{\text{inst}} \cdot J(t) \quad (3.43)$$

Cette dernière est défini selon la forme du modèle de Kelvin Voigt pour chaque intervalle de temps. Elle s'écrit alors :

$$J(t) = 1 + \sum_{i=1}^n X_i \cdot (1 - e^{(-\lambda_i \cdot t)}) \text{ avec } \lambda_i = \frac{k_i}{\eta_i} \text{ et } X_i = \frac{1}{k_i} \quad (3.44)$$

n est le nombre d'intervalles correspondant au temps de durée de charge. k_i et η_i sont, respectivement, la raideur et l'amortissement du $i^{\text{ème}}$ élément de Kelvin Voigt.

En déterminant la valeur de λ_i au temps t_i , la valeur de k_{def}^i sera déterminée pour chaque temps caractéristique. Nous devons donc résoudre l'équation :

$$1 - e^{(-\lambda_i \cdot t_i)} = 1 \quad (3.45)$$

Cependant, cette équation n'a pas de solution ($e^{(-\lambda_i \cdot t_i)} = 0$). Nous introduisons alors le terme κ représentant le pourcentage d'ouverture de la cellule de Kelvin Voigt, tel que :

$$1 - e^{(-\lambda_i \cdot t_i)} = 1 - \kappa \text{ avec } \kappa \ll 1 \quad (3.46)$$

Soit pour le premier intervalle :

$$e^{(-\lambda_1 \cdot t_1)} = \kappa$$

Ou encore $\lambda_1 = -\frac{1}{t_1 \cdot \ln \kappa}$ (3.47)

Bien que le taux d'ouverture pourrait être différent pour chaque cellule de Kelvin Voigt nous choisissons de garder une valeur commune pour les quatre. Ainsi les λ_i des trois autres intervalles peuvent être déterminés à partir du premier via les expressions suivantes :

$$\lambda_2 = -\frac{1}{t_2 \cdot \ln \kappa} \rightarrow \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{t_1}{t_2}$$

$$\lambda_3 = -\frac{1}{t_3 \cdot \ln \kappa} \rightarrow \frac{\lambda_3}{\lambda_1} = \frac{t_1}{t_3} \quad (3.48)$$

$$\lambda_4 = -\frac{1}{t_4 \cdot \ln \kappa} \rightarrow \frac{\lambda_4}{\lambda_1} = \frac{t_1}{t_4}$$

III.2.1.3. Identification des paramètres de viscoélasticité

Les simplifications, présentées précédemment, permettent une identification simple des propriétés de viscoélasticité. Les temps d'ouvertures des amortisseurs de chaque cellule sont déterminés à partir de l'histoire d'ouverture proposée. A partir des relations (3.47) et (3.48) sont déterminées les valeurs de λ_i . Il ne reste plus qu'à déterminer les raideurs des quatre ressorts. Pour les quatre cellules de Kelvin Voigt mise en série, l'équation (3.44) peut s'écrire sous la forme :

$$k_{\text{def}}^i = \sum_{i=1}^4 X_i \cdot (1 - e^{(-\lambda_i \cdot t)}) \quad (3.49)$$

Ou encore sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} k_{\text{def}}^1 \\ k_{\text{def}}^2 \\ k_{\text{def}}^3 \\ k_{\text{def}}^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - e^{(-\lambda_1 \cdot t_1)} & 1 - e^{(-\lambda_2 \cdot t_1)} & 1 - e^{(-\lambda_3 \cdot t_1)} & 1 - e^{(-\lambda_4 \cdot t_1)} \\ 1 - e^{(-\lambda_1 \cdot t_2)} & 1 - e^{(-\lambda_2 \cdot t_2)} & 1 - e^{(-\lambda_3 \cdot t_2)} & 1 - e^{(-\lambda_4 \cdot t_2)} \\ 1 - e^{(-\lambda_1 \cdot t_3)} & 1 - e^{(-\lambda_2 \cdot t_3)} & 1 - e^{(-\lambda_3 \cdot t_3)} & 1 - e^{(-\lambda_4 \cdot t_3)} \\ 1 - e^{(-\lambda_1 \cdot t_4)} & 1 - e^{(-\lambda_2 \cdot t_4)} & 1 - e^{(-\lambda_3 \cdot t_4)} & 1 - e^{(-\lambda_4 \cdot t_4)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

L'équation (3.50) sous la forme matricielle suivante :

$$[k_{\text{def}}] = [F] \times [X] \quad (3.51)$$

Il ne reste plus qu'à déterminer la matrice X_i en résolvant l'équation :

$$[X] = [F]^{-1} \times [k_{\text{def}}] \quad (3.52)$$

III.2.2. Modélisation 3D du comportement mécanique différé

Lors d'un essai en environnement hydrique variable, l'humidité va intervenir instantanément de deux façons différentes. La première va impacter la matrice de rigidité élastique. La seconde se traduit par le phénomène de retrait gonflement induisant, d'une part, des variations de section et, d'autre part, des contraintes internes. Dans ce travail, nous nous intéresserons dans un premier temps à modéliser l'hygro sensibilité de la matrice de rigidité couplée au phénomène de retrait gonflement. Dans un second temps, nous étudierons l'impact de ces phénomènes sur le comportement différé.

III.2.2.1. Modélisation 3D de l'hygro sensibilité de la matrice élastique

L'hygro sensibilité de la matrice d'élasticité fait apparaître deux phénomènes. Le premier bien connu et de nombreuses fois présenté par des résultats expérimentaux est l'adoucissement de la matrice de rigidité lors de l'augmentation de la teneur en eau du matériau. Le second effet est représenté, d'une part, par un blocage des déformations lors du séchage sous contrainte et, d'autre part, par un relâchement total ou partiel des contraintes internes lors d'une réhumidification. Cet effet est nommé effet hygro verrou (§ III.1.1.4). La programmation de ce phénomène dans le logiciel Cast3M a été écrite par Husson (§ III.1.2.4.2).

La difficulté rencontrée a été de modéliser ce phénomène en 3D dans le code Cast3M. La résolution des équations (3.34) et (3.35) dans un modèle 3D, soumis à des variations d'humidité, devient plus complexe car les différents effets sont répartis de façon hétérogène dans le volume (gradients et déphasages hydriques dus à l'inertie amenée par le processus de diffusion). En effet, cette approche fonctionne bien sur un point de Gauss et pour une histoire de chargement idéalisée par paliers stabilisés. Elle est cependant très gourmande en mémoire pour garder les histoires de contrainte, de déformation et de complaisance. Pour un temps donné, il est nécessaire de définir les zones d'adsorption et de désorption, et ce, pour retrouver le temps équivalent au couple complaisance/contrainte au temps n en chaque point d'intégration. Cette opération est rendue possible en masquant les zones d'adsorption. Cette procédure est effectuée jusqu'à ce que pour tous points en phase d'adoucissement, l'algorithme ait retrouvé la condition $C(\tau) = C(t_n)$.

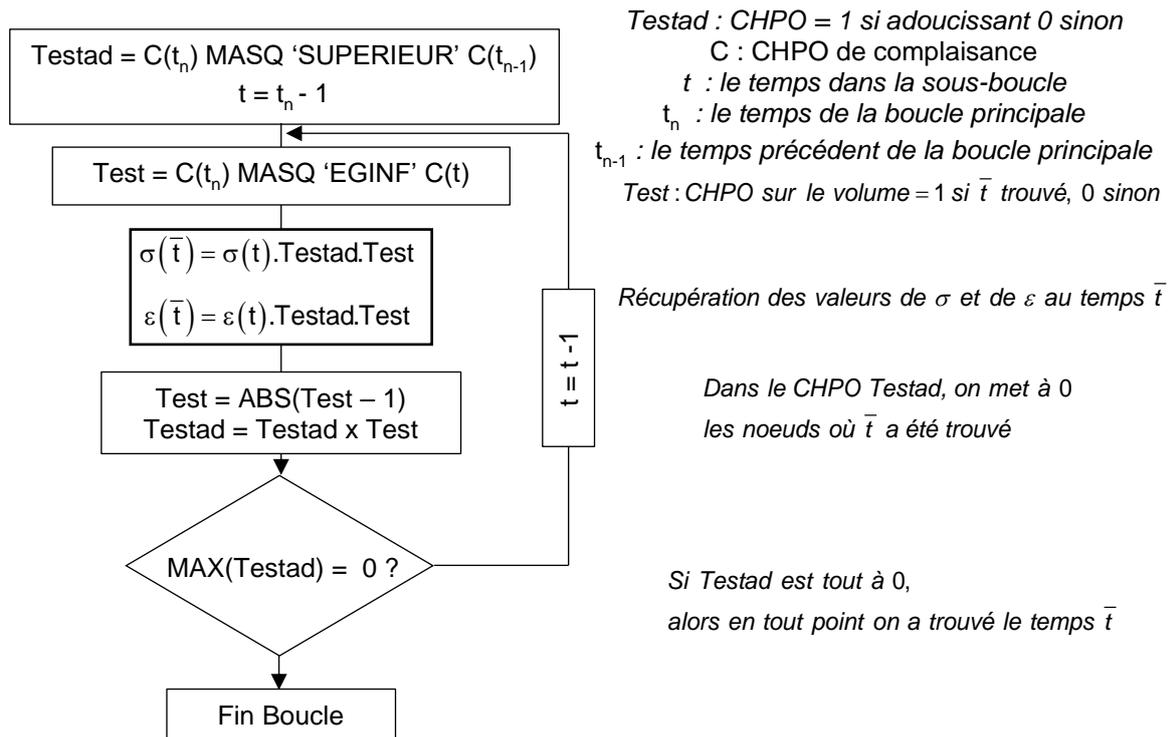


Figure 96 : Algorithme de détermination de la contrainte et de la déformation au temps \bar{t}

III.2.2.2. Influence de l'hygro sensibilité élastique sur la déformation long terme

L'influence de l'hygro sensibilité élastique sur la déformation long terme est d'autant plus importante que la section de l'élément a une humidité homogène, comme on peut le trouver lors d'un essai de laboratoire sur petits échantillons en condition hydrique stabilisée.

A partir de simulations numériques, nous avons remarqué que la redistribution des contraintes due aux variations de module d'Young influençait peu son comportement différé global. Ainsi, en prenant comme hypothèse que la redistribution des contraintes due aux variations de module d'Young n'influe pas ou peu sur la flèche, on peut alors déterminer l'influence de l'hygro sensibilité sur celle-ci. Ainsi, si on s'intéresse à un cas simple d'une poutre en flexion 4 points en phase d'humidification, nous pouvons utiliser la correction que propose Guitard (Guitard, 1987) sur le module d'Young longitudinal :

$$E_{LL}^w = E_{LL}^{(12\%)} \cdot [1 - 0,015 \cdot (w - 12)] \cdot [1 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot w \cdot (T - 20)] \quad (3.53)$$

T et w représentent, respectivement, la température en °C et w la teneur en eau en %.

Soit une poutre, de longueur L, et de section $b_0 \times h_0$ sollicitée en flexion 4 points, avec un chargement situé à un tiers de chaque extrémité de la poutre, et à une humidité de référence ($w=12\%$). La flèche instantanée est déterminée selon l'équation donnée par :

$$U_{inst}^w = \frac{23 \cdot F \cdot L^3}{1296 \cdot E_{LL}^w \cdot I} \quad (3.54)$$

Ainsi, la variation de flèche relative, induite par une variation homogène d'humidité, s'écrit :

$$\Delta U(w) = \frac{\frac{-23.F.L^3}{1296 * E_{LL}^w . I} - \frac{-23.F.L^3}{1296 * E_{LL}^{12\%} . I}}{\frac{-23.F.L^3}{1296 * E_{LL}^{12\%} . I}} \quad (3.55)$$

$$= \frac{E_{LL}^{12\%}}{E_{LL}^w} - 1$$

Enfin, à partir de l'équation (3.53) on peut écrire :

$$\Delta U(w) = \frac{1}{\left[1 - 0,015 \cdot (w - 12)\right] \cdot \left[1 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot w \cdot (T - 20)\right]} - 1 \quad (3.56)$$

Ainsi, la perturbation (due à l'humidité sur la matrice élastique) va influencer la déformation de quelques pourcents comme le montre la Figure 97.

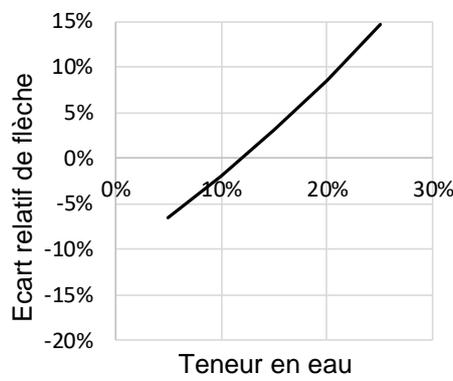


Figure 97 : Influence de l'hygro sensibilité élastique sur la flèche

Cette approche met en avant la faible influence du phénomène d'hygro sensibilité élastique sur le comportement long terme d'un élément de structure dans le cas d'un profil d'humidité homogène. En effet, en comparaison à un k_{def} de 2,0, l'influence de l'humidité sur la matrice élastique va influencer la flèche long terme de 10 à 15% par rapport à la flèche instantanée. L'effet sera beaucoup plus faible sur des profils d'humidité plus réalistes, comme il sera montré plus tard, ce qui confortera cette hypothèse.

III.2.2.3. Modélisation 3D du comportement viscoélastique

Pour un ratio de contrainte assez faible, inférieur à 20% de la résistance à rupture, il n'est pas noté dans la littérature d'effet non linéaire ; on peut dire que le matériau bois se comporte tel un matériau viscoélastique. Cependant les propriétés de ce matériau viscoélastique présentent une forte dépendance à l'humidité. Dans le cas d'un élément de structure soumis à une humidification, ce dernier va présenter un comportement moins visqueux. Il en résultera alors une accélération de la déformation. On parle alors d'« hygro-activation » du comportement viscoélastique.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à présenter le comportement viscoélastique du matériau en uni axial. Cette approche a été décrite par Dubois (Dubois, 1997). Pour une utilisation à l'échelle d'éléments structuraux, nous verrons comment l'implémenter dans un code aux éléments finis pour un modèle orthotrope 3D. Enfin, nous modéliserons l'hygro activation du comportement viscoélastique.

Pour décrire le comportement mécanique d'un élément de structure soumis à des variations d'humidité dans sa section, nous devons déterminer l'incrément de déformation tridimensionnel. Pour cela, Dubois propose d'écrire l'incrément de contrainte et de déformation au cours du pas de temps Δt_n sous forme indicielle tel qu'il est décrit en Annexe 4.

Pour un matériau orthotrope, l'accroissement de contrainte et de déformation peuvent s'écrire sous forme matricielle. Soit, dans le repère principal d'orthotropie :

$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_{11} \\ \Delta \varepsilon_{22} \\ \Delta \varepsilon_{33} \\ \Delta \gamma_{23} \\ \Delta \gamma_{31} \\ \Delta \gamma_{12} \end{pmatrix}_n = \begin{bmatrix} M_{1111} & M_{1122} & M_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ M_{2211} & M_{2222} & M_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ M_{3311} & M_{3322} & M_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{3131} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{1212} \end{bmatrix}_n \cdot \begin{pmatrix} \Delta \sigma_{11} \\ \Delta \sigma_{22} \\ \Delta \sigma_{33} \\ \Delta \sigma_{23} \\ \Delta \sigma_{31} \\ \Delta \sigma_{12} \end{pmatrix}_n + \begin{pmatrix} \tilde{\varepsilon}_{11} \\ \tilde{\varepsilon}_{22} \\ \tilde{\varepsilon}_{33} \\ \tilde{\gamma}_{23} \\ \tilde{\gamma}_{31} \\ \tilde{\gamma}_{12} \end{pmatrix}_{n-1} \quad (3.57)$$

Et :

$$\begin{pmatrix} \Delta \sigma_{11} \\ \Delta \sigma_{22} \\ \Delta \sigma_{33} \\ \Delta \sigma_{23} \\ \Delta \sigma_{31} \\ \Delta \sigma_{12} \end{pmatrix}_n = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ D_{2211} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ D_{3311} & D_{3322} & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{3131} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1212} \end{bmatrix}_n \cdot \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_{11} \\ \Delta \varepsilon_{22} \\ \Delta \varepsilon_{33} \\ \Delta \gamma_{23} \\ \Delta \gamma_{31} \\ \Delta \gamma_{12} \end{pmatrix}_n - \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{n-1} \quad (3.58)$$

III.2.2.3.1.1. Modélisation de la pente de fil

Un élément de structure présente fréquemment une pente de fil plus ou moins importante, dans la limite donné par le classement visuel (AFNOR, 2016a). Les propriétés hydriques et mécaniques étant différentes dans le sens longitudinal et transversal, nous pouvons nous demander quelle est l'influence de cette pente de fil sur le comportement différé. Cette étude demande donc de modéliser la pente de fil. Dans cette configuration, si l'on souhaite modéliser ce phénomène, il suffit d'effectuer un changement de repère. Les deux matrices de rotation en contrainte et déformation $[T_\sigma]$ et $[T_\varepsilon]$ s'écrivent de la façon suivante :

$$[T]_\varepsilon = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & \sin\theta.\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & -\sin\theta.\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -2\sin\theta.\cos\theta & 2\sin\theta.\cos\theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$[T]_\varepsilon^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & -\sin\theta.\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & \sin\theta.\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 2.\sin\theta.\cos\theta & -2.\sin\theta.\cos\theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
[T]_{\sigma} &= \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & 2.\sin\theta.\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & -2.\sin\theta.\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\sin\theta.\cos\theta & \sin\theta.\cos\theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \\
[T]_{\sigma}^{-1} &= \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & -2.\sin\theta.\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & 2.\sin\theta.\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \sin\theta.\cos\theta & -\sin\theta.\cos\theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.60}$$

En généralisant les équations (3.57) et (3.58) dans un repère quelconque, nous pouvons écrire :

$$\underline{\underline{\Delta\varepsilon}}_n = [T]_{J_{\varepsilon}}^{-1} \cdot \left(\underline{\underline{M}}_n \cdot [T]_{\sigma}^{-1} \cdot \underline{\underline{\Delta\sigma}}_n + \tilde{\varepsilon}_{n-1} \right) \tag{3.61}$$

et

$$\underline{\underline{\Delta\sigma}}_n = [T]_{J_{\sigma}}^{-1} \cdot \left(\underline{\underline{D}}_n \cdot [T]_{J_{\varepsilon}}^{-1} \cdot \underline{\underline{\Delta\varepsilon}}_n - \underline{\underline{\sigma}}_{n-1} \right) \tag{3.62}$$

III.2.2.3.1.2. Implémentation dans Cast3M

De la même façon que pour l'implémentation de l'hygro sensibilité sur la matrice élastique, nous avons utilisé la méthode proposée par Ghazlan et al. (1995) basée sur le principe des travaux virtuels. Nous avons implémenté ce problème dans le code Castem. L'algorithme doit résoudre l'équation, et ce, de façon incrémentale :

$$\mathbf{K}_T \cdot \{\Delta U(t_n)\} = \{\Delta F(t_n)\} + \{\Delta F_{visco}(t_{n-1})\} \tag{3.63}$$

L'algorithme de résolution incrémentale de la déformation viscoélastique est en Annexe 4.4

III.2.2.3.1.3. Modélisation de l'hygro activation

L'influence de l'humidité sur le comportement viscoélastique du matériau bois a été montrée au paragraphe III.1.1.2. L'augmentation de l'humidité génère un comportement élastique assouplissant. Par contre, nous n'avons pas de données expérimentales permettant d'approcher la perturbation des coefficients de viscosité lors des variations d'humidité. Pour contourner ce manque, il est proposé une modification équivalente du temps d'ouverture des amortisseurs, capable de recréer une diminution de viscosité en cas d'humidification. Afin de quantifier ce phénomène, nous avons utilisé une forme exponentielle de type Arrhenius. Ainsi, le temps caractéristique d'ouverture τ des amortisseurs se détermine de la façon suivante :

$$\tau = \frac{\Delta t_n}{a_w} = \frac{\Delta t_n}{e^{A_w \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{ref}} \right)}} \text{ avec } a_w = e^{A_w \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{ref}} \right)}, \text{ le terme d'hygro activation visqueuse} \tag{3.64}$$

A_w représente un coefficient de calage, w , la teneur en eau au temps t_n , et w_{ref} , la teneur en eau de référence, prise égale à 12%.

III.2.3. Optimisation du modèle géométrique

La modélisation du comportement mécanique instantané et long terme peut se faire au travers de différents modèles plus ou moins complexes prenant en compte les caractéristiques spécifiques du matériau. Quel est donc l'influence de ces caractéristiques sur le comportement différé du bois ?

Le bois est un matériau orthotrope. Ses propriétés d'orthotropie peuvent être déterminées par des essais de caractérisation en laboratoire. Dans le cadre de la construction bois, différencier le sens radial du sens transversal d'une poutre est utopique. On peut alors parler d'un matériau orthotrope isotrope transverse. Cependant, nous savons que le bois est un matériau orthotrope radial, c'est-à-dire que ses composantes transversales vont dépendre de la courbure des cernes et de la pente de fil.

Nous pouvons alors nous demander quelle est la différence de comportement entre un modèle isotrope transversale et un modèle orthotrope radial. Dans un second temps, nous nous intéresserons à l'influence de la pente de fil et, de façon plus générale, de la position de la moelle sur le comportement mécanique à long terme.

Le modèle que nous avons implémenté dans Castem permet de répondre à toutes ces questions. Une comparaison des réponses mécaniques est présentée au paragraphe III.3.5.

III.3. Validation et calage des paramètres du modèle

Nous avons vu comment modéliser le comportement mécanique différé pour des éléments de structures dans leur environnement. Cette approche doit alors s'effectuer au travers d'une analyse 3D afin de prendre en compte le champ thermo hydrique hétérogène dans la section.

Afin de valider les modèles numériques et de montrer l'influence de chaque phénomène mécanique sur le comportement mécanique différé, nous exploitons les travaux expérimentaux de Manfoumbi (2012).

III.3.1. Présentation de l'essai

Nous considérons un essai de flexion 4 points d'éléments décimétriques ($b = 10$ mm, $h = 30$ mm, portée = 600 mm) de douglas. La Figure 98 représente le scénario de chargement mécanique et climatique.

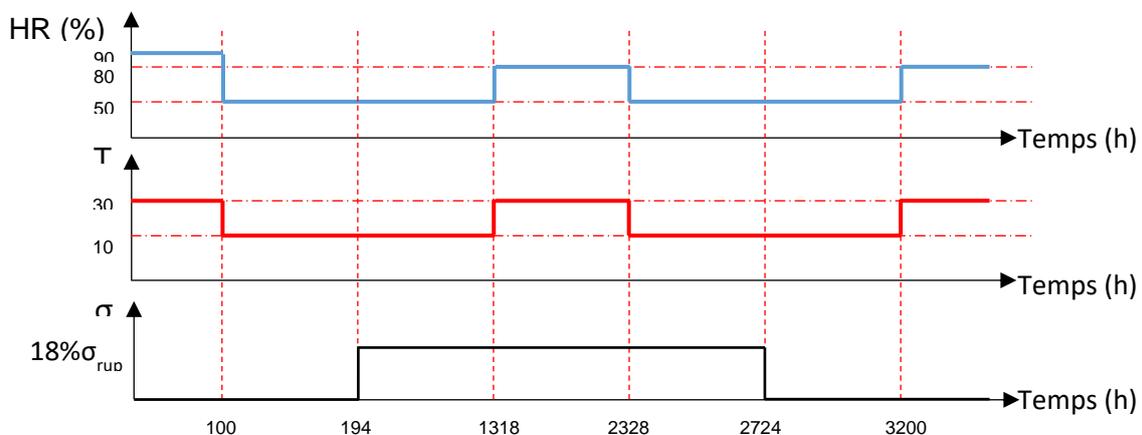


Figure 98 : Scénario de chargement thermo-hygro mécanique (Manfoumbi 2012).

Ces essais de flexion ont été effectués sur 8 éprouvettes en enceinte climatique. Elles ont été instrumentées afin de mesurer l'évolution de la flèche en face supérieure et inférieure des éléments. Les éprouvettes ont été chargées à un taux de contrainte de l'ordre de 18% de la charge à la rupture.

Deux éprouvettes témoins non chargées ont été placées dans l'enceinte afin de mesurer leur évolution hydrique au cours de l'essai.

La Figure 99 représente l'évolution de la moyenne des flèches hautes et basses des éprouvettes. Y est ajoutée la moyenne des évolutions de teneur en eau des deux éprouvettes témoins.

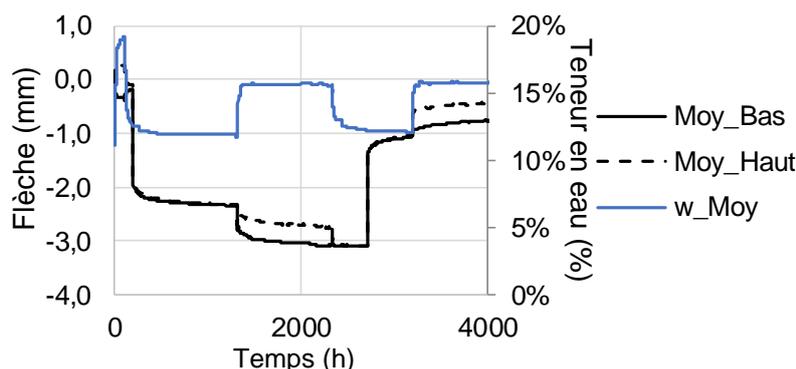


Figure 99 : Evolutions moyennes des flèches hautes et basses et de la teneur en eau moyenne des éprouvettes témoins

L'essai met en avant les effets de retrait gonflement en phase d'humidification. Il montre également l'influence de la viscoélasticité et de l'humidité sur la flèche. Entre autres, nous sommes en présence d'un essai de fluage-recouvrance.

III.3.2. Modélisation du comportement hydrique

Nous avons simulé le transfert de masse et de chaleur des éprouvettes d'études afin de corréler les propriétés de diffusion et d'équilibre hygroscopique identifiées précédemment. Nous prenons ainsi les propriétés d'équilibre hydrique et de cinétique du douglas.

Le but de cette modélisation est de retrouver l'évolution de l'humidité dans la section afin de l'imposer dans les modèles mécaniques. Afin que le champ hydrique moyen soit identique à celui de l'essai, il a fallu modifier légèrement les consignes de chargement hydrique, Tableau 17. Ces écarts sont cependant suffisamment faibles pour qu'ils rentrent dans les incertitudes de stabilisation hydrique de l'enceinte climatique ($\pm 3\%HR$)

Tableau 17 : comparaison des valeurs types entre le modèle et l'expérimental

Temps	HR_exp	w_Moy	HR_Modèle	w_Modèle
T1	50%	11,0%	50%	11,0%
T2	90%	19,2%	90%	18,86%
T3	50%	11,80%	50%	11,76%
T4	80%	15,70%	82%	15,73%
T5	50%	12,20%	54%	12,13%
T6	80%	15,80%	80%	15,49%

La Figure 100 représente les évolutions de teneur en eau renvoyées par le modèle et les mesures expérimentales. Ainsi, le modèle thermo-hydrigue permet de retrouver le comportement hydrique des éprouvettes de douglas situées dans l'enceinte climatique. Cette remarque permet de confirmer une fois de plus la justesse de l'identification des propriétés de diffusions en ambiance variable.

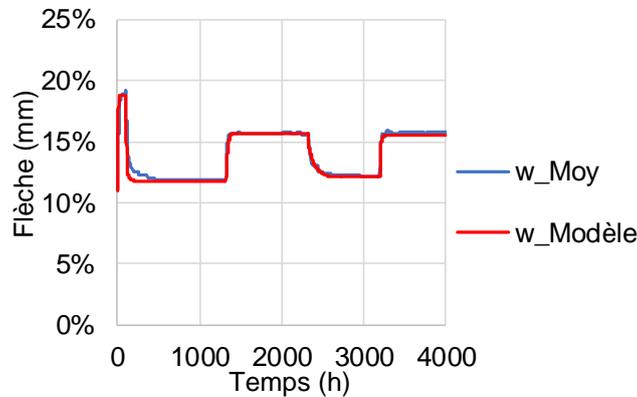


Figure 100 : Comparaison des évolutions de teneur en eau entre le modèle et l'expérimentation

III.3.3. Réponse instantanée du modèle d'hygro sensibilité élastique

A partir de la flèche instantanée, le module d'Young longitudinal a été déterminé selon l'équation (3.54). A partir d'une valeur de 9600MPa, les propriétés mécaniques élastiques ont été attribuées aux éprouvettes selon la norme NF EN 338 (AFNOR, 2016b). Nous obtenons :

- $E_{LL} = 9600\text{MPa}$
- $E_{RT} = E_{LL}/15$ NF EN 384 (AFNOR, 2016c)
- $G = E_{LL}/16$ NF EN 384 (AFNOR, 2016c)

Le coefficient de retrait gonflement a été déterminé à partir du gonflement hydrique apparaissant dans l'intervalle temporel $1400 < t < 2300\text{h}$ (stabilisation hydrique dans la section) entre la flèche moyenne haute et basse :

$$\alpha_{RT} = \frac{(U_{\text{Haut}} - U_{\text{Bas}})}{h * \Delta w} = \frac{0,00034}{0,3 * 0,04} = 0,28 \text{ \%/\%} \quad (3.65)$$

A partir du modèle thermodynamique de Husson et du champ hydrique calculé dans la section transversale, l'essai a été modélisé pour identifier l'influence de l'hygro sensibilité élastique couplée à l'hygro verrou sur le comportement instantané.

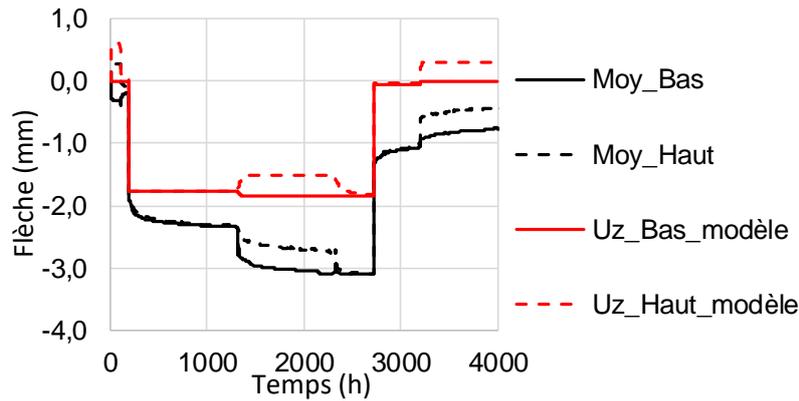


Figure 101 : Influence de l'hygro sensibilité élastique sur la flèche au travers de la matrice élastique

Le modèle d'hygro sensibilité élastique permet de modéliser l'effet du retrait gonflement, ce qui est effectué en comparant la flèche haute et basse renvoyée par le modèle. L'assouplissement de la matrice élastique influence le comportement différé de 3,88% par rapport à la flèche instantanée lors de l'humidification ($t = 1318h$). L'effet verrou est également présent en phase de séchage après déchargement ($t = 3200h$).

Nous pouvons conclure que, lors d'un essai de laboratoire, la prise en compte de l'hygro sensibilité élastique dans l'analyse de la flèche est négligeable. En effet, la prise en compte de ce phénomène n'augmente la flèche que de quelques pourcents. Cette valeur est à comparer à la flèche différée à 2724h, qui représente 75% de la flèche instantanée.

III.3.4. Réponse différée du modèle viscoélastique hygro activé

Le comportement viscoélastique hygro activé a été modélisé à partir du modèle décrit au paragraphe III.1.2.2. Le modèle comporte six inconnues :

- Le comportement différé long terme : k_{def}
- L'hygro activation sur la viscosité : Coefficient de calage A_w
- Les temps d'ouverture des cellules en fonction des durées de charge : 4 coefficients $\Psi_i(t)$

Ces paramètres ont été identifiés séparément par une analyse des résultats expérimentaux et par comparaison de la réponse du modèle et de l'évolution expérimentale.

Tout d'abord, le coefficient k_{def} est déterminé à partir de la flèche basse à 2724h, tel que :

$$k_{def} = \frac{U(t = 2724h) - U_{inst}}{U_{inst}} = \frac{3,096 - 1,768}{1,768} = 0,75 \quad (3.66)$$

Le coefficient d'hygro activation a été déterminé de façon à avoir une réponse du modèle équivalente à l'augmentation de la flèche à $t=1318h$. Ainsi, le coefficient de calage du terme d'hygro activation visqueux a été identifié à une valeur de $A_w = 190$ (§ III.2.2.3.1.3)

Enfin, les 4 coefficients d'ouverture sont identifiés afin que la réponse modèle interpole au mieux à la flèche expérimentale. Ainsi, ces coefficients ont pour valeurs :

- $\Psi_{t1}(t=168h) = 0,2$
- $\Psi_{t2}(t=4368h) = 0,35$

- $\Psi_{t3}(t=87600h) = 0,7$
- $\Psi_{t4}(t=438000h) = 1,0$

Afin de modéliser la flèche en face inférieure et supérieure, a été associée à la réponse viscoélastique la réponse du modèle d'hygro sensibilité élastique. Ainsi, la réponse des deux modèles associés est représenté en Figure 102.

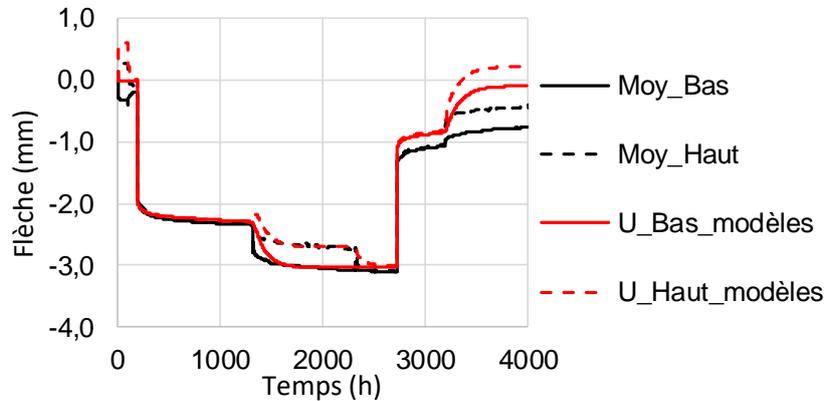


Figure 102 : Réponse du modèle hygro activé viscoélastique et d'hygro sensibilité élastique sur les deux faces

Le modèle donne des résultats proches de l'expérimental que ce soit en face inférieure ou supérieure. La réponse du modèle propose une recouvrance totale, ce qui n'est pas observé expérimentalement. Il est possible que cela provienne d'un déchargement empêché aux appuis dû à des frottements ou encore à une réponse viscoélastique non linéaire dû à un taux de chargement trop important. Ces hypothèses permettraient également d'expliquer l'écart de flèche instantanée lors du déchargement entre le modèle et l'expérimentation.

III.3.5. Influence du modèle géométrique

Nous avons vu les variantes de modèles possibles dans le paragraphe III.2.3. Nous allons nous appuyer sur les essais de Manfoumbi pour quantifier l'influence du modèle sur le comportement différé.

Dans cette partie, l'hygro sensibilité élastique et l'hygro activation viscoélastique sont prises en compte. Cependant, pour ce dernier, les propriétés viscoélastiques sont choisies identiques dans le sens longitudinal et transversal, et ce, par méconnaissance de l'orthotropie sur les propriétés visqueuses.

III.3.5.1. Présentation du maillage

Le maillage de la poutre a été optimisé dans le but de minimiser les temps de calcul. Afin de modéliser des phénomènes de pente de fil, la poutrelle ne présente aucune symétrie. Le maillage en périphérie est plus dense pour garder la richesse d'information sur l'évolution du front d'humidité au cours de l'essai pilotée par les échanges convectifs en surface. La Figure 103 représente le maillage qui a été effectué pour la modélisation de cet essai.

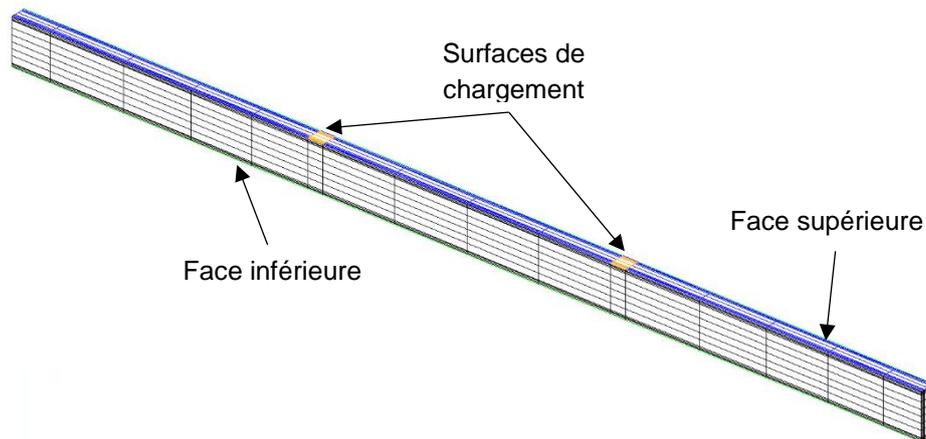


Figure 103 : Maillage de la poutrelle (2240 CUB8)

III.3.5.2. Modèle orthotrope, isotrope transverse L & RT

Ce modèle est celui que nous avons utilisé dans le paragraphe III.3.3. Dans le langage Cast3M, le matériau se définit de la façon suivante :

Mate = MATE Mode 'DIRECTION' Vecte1 Vecte2 'PARALLELE' Composantes.

Où Mode représente le type du modèle (« Orthotrope »), Vecte1 et Vecte2 désignent les vecteurs d'orthotropie. Avec Vecte1 = (1 0 0) et Vecte2 = (0 1 0). Et enfin les valeurs des neuf composantes du tenseur élastique, sont définies telles que :

- $E_{LL} = 9600\text{MPa}$
- $E_{RT} = E_{LL}/15$ NF EN 384 (AFNOR, 2016c)
- $G = E_{LL}/16$ NF EN 384 (AFNOR, 2016c)

III.3.5.3. Modèle orthotrope radial L & R & T

Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons à comparer la réponse d'un modèle orthotrope radial et celle d'un modèle orthotrope isotrope transverse (§ III.3.5.2).

Le bois est un matériau orthotrope radial, par son accroissement en circonférence. Dans le code Cast3M, les caractéristiques de ce type de matériau s'écrivent :

Mate = MATE Mode 'RADIAL' Vecte1 Vecte2 'PARALLELE' Composantes.

Où Mode représente le type du modèle (« Orthotrope »), Vecte1 et Vecte2 désignent les deux points qui définissent le premier vecteur d'orthotropie. Ainsi Vecte1 = (0 a b) et Vecte2 = (1 a b). avec a et b deux variables qui représentent les coordonnées de la moelle de l'arbre d'un côté et de l'autre de l'élément d'étude. Dans un premier temps, nous ne modéliserons pas la pente de fil. Ainsi, les coordonnées de la moelle prennent les valeurs suivantes :

- $a=l/2$, avec l la largeur de la poutre
- $b=H/2$, H la hauteur de la poutre

Les neuf composantes du tenseur de rigidité élastique sont les suivantes :

- $E_{LL} = 9600\text{MPa}$
- $E_{RR} = E_{LL}/15$ NF EN 384 (AFNOR, 2016c)

- $E_{TT} = E_{RR}/2$ (Jodin, 1994)
- $G = E_{LL}/16$ NF EN 384 (AFNOR, 2016c)

La Figure 104 représente l'influence de la modélisation de l'orthotropie radiale sur la réponse du modèle d'hygro sensibilité élastique et du modèle viscoélastique par rapport à un modèle orthotrope, isotrope transverse.

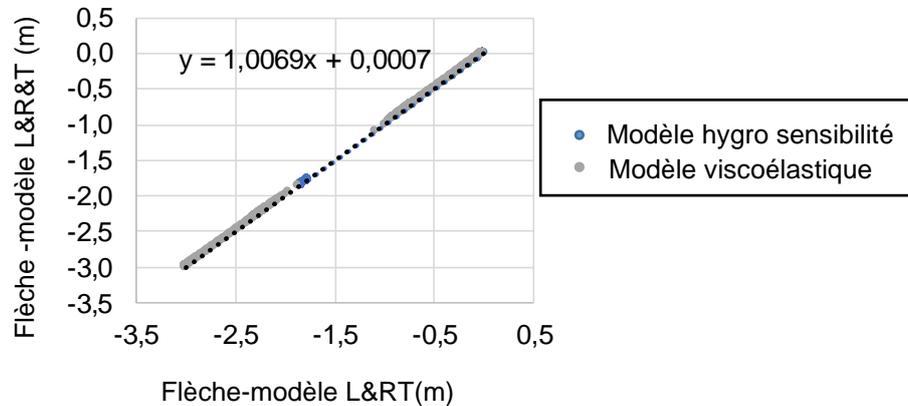


Figure 104 : Comparaison modèles hygro sensible et viscoélastique pour une orthotropie radiale

Cette représentation met en avant le faible impact de cette variante de modélisation sur la flèche. En effet, la prise en compte de l'orthotropie du matériau n'influe sur le comportement long terme que de 0,7%.

III.3.5.4. Modèle orthotrope radial avec position moelle

La pente de fil est un défaut macroscopique de sciage connu pour avoir une forte influence sur le comportement et le classement mécanique. Il n'y a pas d'informations disponibles sur l'influence de la pente de fil sur les effets différés. Nous avons modélisé une pente de fil de 1 : 14, pente de fil maximale acceptée par le classement visuel pour une poutre de douglas de type ST I (AFNOR, 2016a). Ainsi, les propriétés d'orthotropie s'implémentent de la façon suivante :

- Vecte1 = (0 l/2 H/2) avec l la largeur de la poutre et H la hauteur
- Vecte2 = (L l/2 H/2+L.1/14) avec L la longueur de la poutre.

Cette pente de fil va influencer le comportement long terme par assouplissement mécanique de la poutre mais également par modification du sens privilégié de diffusion.

III.3.5.4.1. Influence sur le comportement mécanique

Les réponses instantanée et différée des modèles mécaniques pour les deux poutrelles sont présentées en Figure 105. Elles intègrent l'hygro sensibilité élastique et l'hygro activation visqueuse.

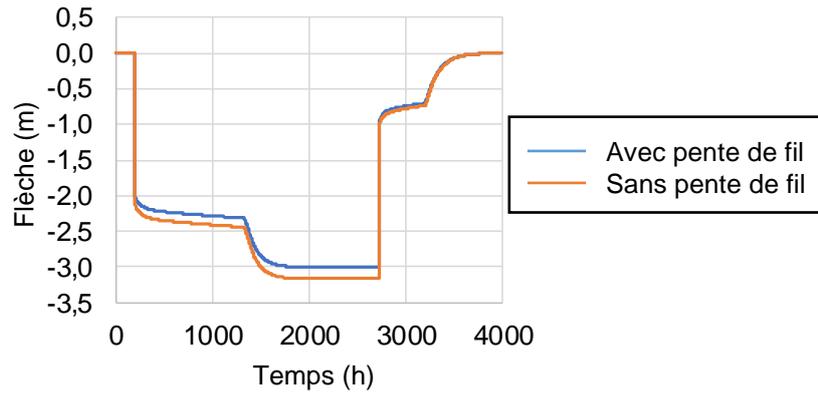


Figure 105 : Réponses en flèche basse des modèles mécaniques pour deux pentes de fil différentes.

En comparant ces deux résultats, on peut en déduire que la pente de fil va influencer la flèche globale de 6% tel que le montre la Figure 106 :

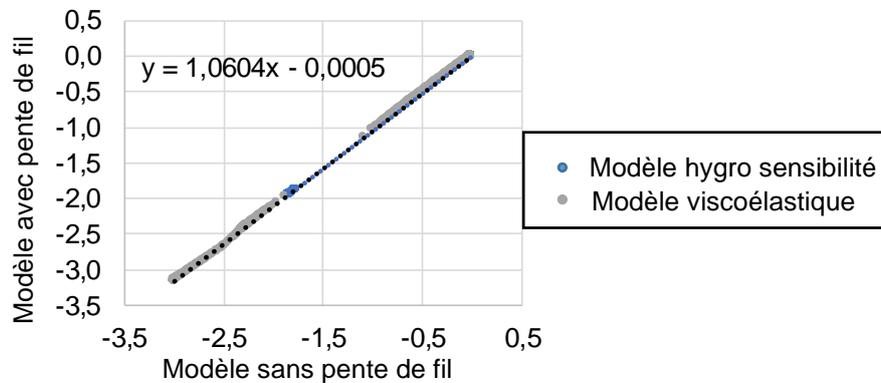


Figure 106 : Impact de la pente de fil sur la flèche

III.3.5.4.2. Influence sur le comportement hydrique

La pente de fil va également induire une augmentation de la diffusion de l'eau dans la section de l'élément. En effet, loin des extrémités, la diffusion de l'humidité se fera dans le sens transversal et longitudinal tel qu'il est représenté en Figure 107. La perméabilité dans le sens longitudinal étant beaucoup plus grande que dans le sens transversal, la prise en compte de la pente de fil dans le calcul de transfert thermo-hydrique va accélérer les transferts.

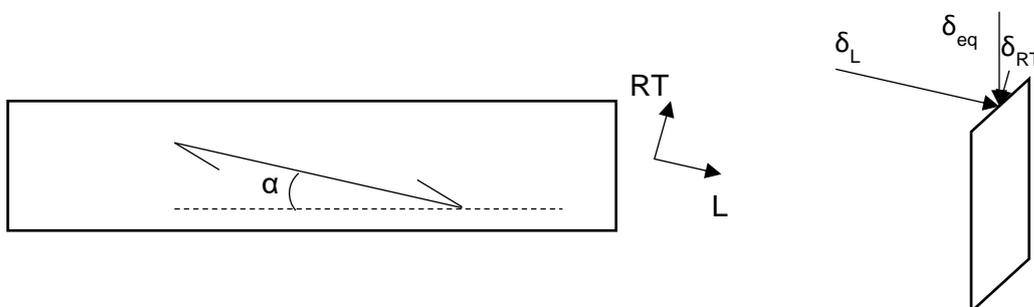


Figure 107 : Redistribution des transferts hydriques dans une section en fonction de la pente de fil

Une étude rigoureuse demanderait d'écrire l'équation de Fick en 3D, sur un modèle orthotrope prenant en compte la pente de fil souhaitée. Cependant, nous avons vu précédemment que la modélisation des phénomènes de transferts en 3D est chronophage. Nous proposons donc

de simplifier cette approche en déterminant une perméabilité apparente équivalente selon une loi des mélanges tel que :

$$\delta_{eq}^* = \delta_{RT}^* \cdot (1 - \alpha) + \delta_L^* \cdot \alpha \quad (3.67)$$

Cette simplification nous permet alors d'implémenter le transfert de masse dans une poutre présentant une pente de fil dans une configuration bidimensionnelle.

A partir de l'essai de Manfoumbi, nous avons modélisé l'essai avec une poutre de douglas présentant une pente de fil de 1 :14, Figure 108.

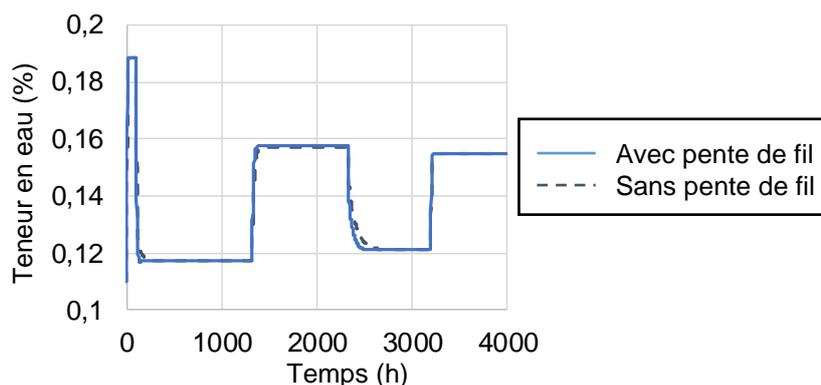


Figure 108 : Influence de la pente de fil sur la diffusion lors d'un essai en laboratoire

La prise en compte de la pente de fil accélère les phénomènes de transferts lors d'un essai de laboratoire. L'effet est toutefois d'autant plus vite atténué que la section est faible et que le temps de stabilisation est long.

Dans un cas concret d'une poutre dans un environnement variable, la prise en compte de la pente de fil dans la modélisation des transferts induira une augmentation des amplitudes de variations d'humidité. Une étude complémentaire devra être effectuée pour mettre en avant l'impact de la pente de fil sur la diffusion hydrique d'un élément de structure en ambiance extérieure. Cependant, dans le cas de cet essai de laboratoire, cela ne va pas venir amplifier la réponse en flèche globale.

Nous pouvons donc conclure que les différentes variantes géométriques de modèle présentées ne sont pas utiles à la détermination de la déformée d'un élément de structure en flexion.

III.3.5.5. Conclusion et discussion

Nous proposons deux modèles qui permettent de simuler le comportement mécanique instantané et différé d'un élément en laboratoire. La modélisation de l'hygro sensibilité élastique demande un temps considérable de calcul pour une influence sur la déformation long terme qui demeure finalement très faible. Pour une étude de déformations à long terme, et au regard de l'importance de la réponse viscoélastique hygro activée, l'hygro sensibilité élastique peut être négligé. Nous avons également mis en avant la faible influence de la finesse du modèle géométrique sur la réponse différée. Ainsi, la méconnaissance de l'orthotropie transversale du bois n'a que peu d'influence sur la détermination du comportement différé de celui-ci.

Ces différentes variantes ont permis d'identifier l'importance des différents phénomènes modélisés. Le modèle utilisé par la suite est donc un compromis entre l'exhaustivité de la prise en compte des phénomènes, leur influence et l'allègement en temps de calcul attendu.

III.4. Expérimentation et analyse sur éléments de structure

Actuellement, aucune norme est proposée pour déterminer le comportement long terme d'un élément de structure en bois de feuillus. Pour la filière bois de feuillus français et Européen en général, cela présente un manque majeur. C'est pourquoi nous avons conçus deux bancs de fluage en flexion quatre points afin d'observer le comportement à long terme de poutres de feuillus soumises à deux environnements différents, correspondant à un intérieur non chauffé et un extérieur exposé aux intempéries. Enfin, pour vérifier les résultats obtenus selon le protocole expérimental utilisé, nous avons ajouté, comme référence, une essence de résineux, le douglas.

III.4.1. Poutres

Les poutres de feuillus ont été obtenues dans le cadre de la tâche 0 du projet EFEUR5 garantissant une traçabilité de la parcelle à la poutre. Les billons de hêtre et de chêne utilisés ont été classés C ou D et une classe de qualité A pour les billons de peuplier.

Enfin, les poutres de douglas ont été choisies dans une scierie locale, avec des billes en provenance du Massif Central et sélectionnée visuellement pour correspondre à la classe de résistance C24.

Il avait été demandé à la partie approvisionnement de nous fournir des poutres de section légèrement plus grande que celle souhaitées (soit 100 x 200 mm²) permettant ainsi un passage à la raboteuse dégauchisseuse avant montage sur banc. Enfin, la longueur des poutres livrées était de 4m pour pouvoir prélever des échantillons sur le supplément de longueur. Ces échantillons ont permis de réaliser les essais de diffusion ainsi que la détermination de l'humidité interne de la poutre au moment du chargement.

Les dimensions des poutres ont été choisies de la façon suivante :

- Les essais de caractérisation du comportement mécanique de poutre en flexion est régit selon la norme NF EN 408 (AFNOR, 2012b). La hauteur des poutres est définie selon la norme NF EN 384 (AFNOR, 2016c) et a été prise égale à 150mm.
- La largeur des poutres a été déterminée en fonction des sections brutes. En effet, plusieurs d'entre elles présentaient des défauts de type flaches ou gauchissement survenus lors du séchage, ce qui a demandé une reprise en menuiserie.
- Enfin, la longueur des poutres a été déterminée à parti des normes NF EN 408 (AFNOR, 2012b) et NF EN 384 (AFNOR, 2016c). Selon ces normes, la portée de la poutre ne doit pas dépasser : $18.h \pm 3.h$, h représentant la hauteur de la poutre. Ainsi, les poutres ont été usinées à 3,05m, pour une portée de 3m et 5cm d'appui centrés sur les axes.

Enfin, pour des raisons de durabilité, les essences de hêtre et de peuplier n'ont pas été retenues pour les essais en extérieur. En effet, ces deux espèces présentent une classe d'emploi 1-2.

III.4.1.1. Classement visuel

Depuis quelques années, la norme NF B52-001-1 (A3-juin 2016) (AFNOR, 2016a) permet d'effectuer un classement visuel de quelques essences de feuillus. Afin de connaître les propriétés mécaniques instantanées des poutres de feuillus et celle de douglas, elles ont été soumises au classement visuel selon cette norme. Les Tableau 18 et le Tableau 19 récapitulent les propriétés de classement des poutres qui ont été retenues.

Tableau 18 : Essais intérieurs : géométrie et classes de résistance estimée

Essence	Douglas		Chêne		Hêtre		Peuplier	
	D1	D2	C1	C2	H1	H2	P1	P2
N° poutre	66	66	76	77	58	59	66	66
Largeur (mm)	150	150	152	152	150	150	150	150
Hauteur (mm)	STI	STI	Classe 3	Classe 2	H1	H1	STII	STII
Classe de résistance estimée	C30	C30	D18	D24	D40	D40	C24	C24
Estimation de $E_{0,m}$ (MPa)	12000	12000	9500	10000	13000	13000	11000	11000

Tableau 19 : Essais extérieurs : géométrie et classes de résistance estimée

Essence	Douglas				Chêne			
	D3	D4	D5	D6	C3	C4	C5	C6
N° poutre	66	66	66	66	77	77	77	76
Largeur (mm)	150	150	150	150	152	152	151	152
Hauteur (mm)	STIII	STIII	STI	STI	Classe 3	Classe 3	Classe 2	Classe 3
Classe de résistance estimée	C18	C18	C30	C30	D18	D18	D24	D18
Estimation de $E_{0,m}$ (Mpa)	9000	9000	12000	12000	9500	9500	10000	9500

III.4.1.2. Teneur en eau initiale

Les poutres livrées ont suivi une période de séchage artificiel (tâche réalisée par l'UMR Silva). Juste avant le chargement, nous avons effectué une dernière reprise des géométries en menuiserie. Sur chacune d'entre elles, nous avons prélevé un échantillon de section de la poutre brute et de longueur 10cm. Ces éprouvettes ont été pesées puis mises au four à 103°C afin de mesurer la teneur en eau moyenne initiale des poutres avant chargement (AFNOR, 2013b).

Tableau 20 : Tableau récapitulatif de la teneur en eau initiale des poutres : intérieur

Essence	Douglas		Chêne		Hêtre		Peuplier	
	D1	D2	C1	C2	H1	H2	P1	P2
Teneur en eau (%)	16	17	27	30	12	12	12	12

Tableau 21 : Tableau récapitulatif de la teneur en eau initiale des poutres : extérieur

Essence	Douglas				Chêne			
	D3	D4	D5	D6	C3	C4	C5	C6
Teneur en eau (%)	13	14	14	14	14	20	22	21

Dans la norme, les propriétés mécaniques sont données pour une humidité interne de 12%. Charger une poutre à une humidité plus forte induirait des flèches instantanées est différées plus importantes. Cependant, n'ayant pas eu plus de temps de prolonger le séchage des poutres trop humides, nous les avons donc chargées dans l'état.

III.4.1.3. Défauts macroscopiques

Malgré le choix notre échantillonnage, plusieurs poutres présentent des défauts macroscopiques. Ils ont été recensés avant chargement afin d'observer leurs évolutions, et peut être, permettre une meilleure compréhension des évolutions de déplacement que nous avons mesuré durant la période d'essai. Les Tableau 22 et Tableau 23 récapitulent les défauts recensés.

Tableau 22 : Récapitulatif des défauts macros : poutres en intérieur

Essence	Douglas		Chêne		Hêtre		Peuplier	
N° poutre	D1	D2	C1	C2	H1	H2	P1	P2
Défauts macro	RAS	Aubier sur face	Nœuds sur face + fentes	Nœuds sur face	RAS	bois juvénile	RAS	Nœuds sur face

Tableau 23 : Récapitulatif des défauts macros : poutres en extérieur

Essence	Douglas				Chêne			
N° poutre	D3	D4	D5	D6	C3	C4	C5	C6
Défauts macro	Nœuds sur face + bois juvénile	Nœuds sur face	Nœuds sur face	RAS	Bois juvénile + nœuds sur rives/face + fentes	Bois juvénile + fentes + nœuds sur face	Bois juvénile + fentes + nœuds sur face	Bois juvénile + fentes

III.4.2. Dispositif expérimental de fluage

Deux bancs de flexion quatre points identiques ont été développés. La Figure 109 représente une vue 3D du dispositif. Ils sont localisés dans les deux environnements rediscutés par la suite.

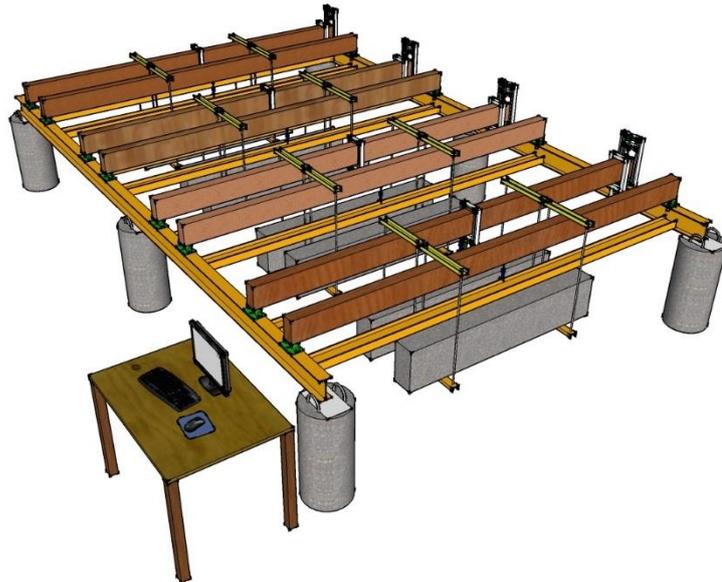


Figure 109 : Schéma du banc d'essai de flexion quatre points

III.4.2.1. Zones expérimentales

Afin de mettre en avant les variations d'humidité sur le comportement différé, les deux bancs d'essai sont fixés dans deux environnements différents définis en Figure 110 :

- La première zone expérimentale est un intérieur non régulé en température, ce qui, dans un premier abord, pourrait se rapprocher de la classe de service 2. Une étude de l'humidité moyenne des poutres au cours de l'essai permettra de confirmer la classe de service.
- La seconde zone expérimentale est située en extérieur. Cette zone n'est pas protégée de la pluie ou du soleil. Seulement quelques masques solaires sont présents le matin. Ce banc est donc dans un environnement qui correspond à la classe de service 3.



Figure 110 : Zones expérimentales : Intérieur non régulé (à gauche) extérieur (à droite)

III.4.2.2. Montage du banc d'essai

Pour la réalisation des bancs, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Manfoumbi (Manfoumbi B., 2012).

III.4.2.2.1. Appuis

Afin de déterminer de façon simplifiée le comportement mécanique instantané et différé des poutres, le schéma mécanique doit être isostatique. Aux niveaux des appuis, deux difficultés se sont présentées. Tout d'abord, ils doivent être de type rotule pour permettre la rotation de la poutre. De plus, ils ne doivent pas freiner ou bloquer les déplacements axiaux dus, par exemple, au retrait-gonflement longitudinal. Nous avons alors choisi des systèmes de roulement à billes sur lesquels sont posées les poutres, Figure 111. D'un côté, celui-ci est bloqué en déplacement (appui bloqué). De l'autre, il permet une translation dans l'axe de la poutre (appui libre).



Figure 111 : Appui bloqué (à gauche) et appui libre (à droite)

III.4.2.2.2. Chargement

Les poutres isostatiques sont majoritairement dimensionnées à l'ELS. Cet état limite vise à limiter la déformation long terme des poutres. Nous avons alors décidé de déterminer le chargement selon un ratio de déformation. Pour les structures de type planchers, l'Eurocode 5 propose une valeur de déformation maximale long terme à ne pas dépasser telle que :

$$u_{\text{net,fin}} < L / 250 \text{ soit pour } L = 3\text{m}, u_{\text{net,fin}} < 12\text{mm} \quad (3.68)$$

Nous prenons comme hypothèse les mêmes valeurs de k_{def} pour les feuillus que pour les résineux. Ainsi, pour les deux environnements, nous déterminons la flèche instantanée induisant, à long terme, une valeur dépendant de la classe de service, soit :

- Environnement intérieur : classe de service 2 : $k_{\text{def}} = 0,8$ $U_{\text{inst}} = 7\text{mm}$ (3.69)

- Environnement extérieur : classe de service 3 : $k_{\text{def}} = 2,0$ $U_{\text{inst}} = 4\text{mm}$ (3.70)

Le chargement s'est effectué à partir de lests en béton suspendu à des tiges filetées. Selon les lois de la RDM, dans le cas d'une flexion 4 points, on détermine le chargement en fonction de la flèche initiale de la façon suivante :

$$Q = \frac{1296.E_{0,m}.I.U_{\text{inst}}}{23.L^3}, I \text{ étant le moment quadratique} \quad (3.71)$$

Aux vues des faibles variations de masse de l'ensemble des poutres, nous proposons de mettre un chargement identique pour chaque poutre d'un même environnement, c'est à dire :

- Environnement intérieur : classe de service 2 : $Q \approx 3 \text{ kN}$ (3.72)

- Environnement extérieur : classe de service 3 : $Q \approx 1,5 \text{ kN}$ (3.73)

Cette simplification aura pour impact une flèche instantanée plus ou moins importante en fonction de la qualité de chacune. Ainsi, à partir du classement visuel (Tableau 18 et Tableau 19), nous avons vérifié le ratio de contrainte que ce chargement induisait. Celui-ci est de l'ordre de $15\% \pm 5\%$ (selon les caractéristiques mécaniques de chaque poutre). Le ratio de contrainte

étant inférieur à 20%, les données bibliographiques permettent de croire à un comportement viscoélastique linéaire.

III.4.2.2.3. Instrumentation

Nous avons utilisé quatre types de capteurs différents pour instrumenter nos bancs de mesure.

- Un capteur hygrothermique (FHAD462 : précision T : $\pm 0,2K$ & HR : $\pm 2\%HR$) pour chaque site permettant de mesurer l'évolution climatique dans l'environnement. Il est à noter que pour son bon fonctionnement, ce capteur est protégé des intempéries et des rayonnements solaires.
- En environnement intérieur, deux jauges de déformations ont été posées sur les IPE160 et deux autres sur les supports de capteurs en aluminium afin de mesurer les phénomènes de dilatation thermique du banc de fluage. Aucune jauge ne sera mise en extérieur car elles sont très sensibles aux rayonnements solaires et aux dégradations du temps (gel, humidité...)
- A chaque poutre a été associé un capteur de déplacement de type potentiométrique de 50mm de course (SLS130-50-L-50-01-N : précision $\pm 0,15\%PE$) afin de mesurer la flèche globale à mi travée en face inférieur. Ce capteur sera nommé «En°F»
- A une poutre par essence et par environnement ont été attribué 3 capteurs de déplacement de type potentiométrique de 25 mm de course (SLS130-25-L-50-01-N : précision $\pm 0,15\%PE$) afin de mesurer les phénomènes de retrait gonflement à trois abscisses différentes :
 - Capteur «En°b» : Au nu de l'appuis : 25 mm de l'about
 - Capteur «En°i » : Quelques centimètres plus loin : 75 mm de l'about
 - Capteur « En°m » : A mi travée

La lettre « E » désigne l'essence (Première lettre), et «n°» le numéro de la poutre. Par exemple, le capteur C4m désigne le capteur de 25mm de course de la poutre de chêne C4 situé à mi travée.

Pour rappel, la diffusion dans le sens longitudinal est prépondérante par rapport à la section transverse. Ce phénomène va impacter les variations de sections et le comportement mécanique aux appuis. Ainsi, les deux premiers capteurs vont permettre de mesurer l'influence de la diffusion longitudinale sur le champ hydrique. Enfin, le capteur à mi travée, se situant loin des abouts, mesurera l'influence du transfert de masse dans le sens transverse uniquement.

Enfin, une centrale d'acquisition des données est associée à chaque banc. Elles enregistrent les données à différentes fréquences. Durant toute la journée de chargement des poutres, la fréquence d'acquisition est de 1s. Puis elle passe à 15 minutes pendant la première semaine. Enfin, elle est d'une heure en environnement intérieur et d'une demi-heure en extérieur, et ce, jusqu'à la fin de l'essai.

La Figure 112 représente la disposition des différents éléments constituant le banc d'essai.

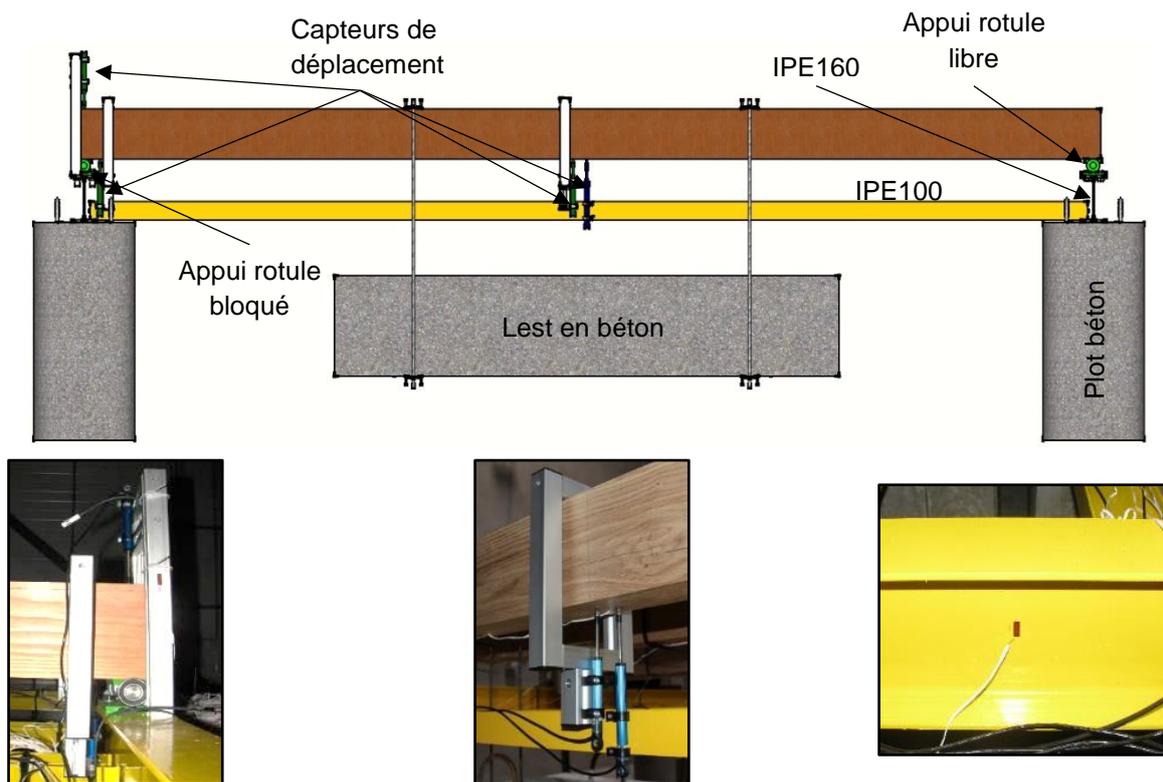


Figure 112 : Disposition des éléments du banc de flexion 4 points

Les Figure 113 et Figure 114 représentent les bancs de flexion montés dans leur environnement :



Figure 113 : Banc de flexion 4 points en intérieur



Figure 114 : Banc de flexion 4 points en extérieur

III.4.3. Résultats expérimentaux

Les essais ayant débutés en août-septembre 2017, nous avons aujourd'hui un recul d'un an sur les essais de flexions dans les deux environnements.

III.4.3.1. Comportement mécanique instantané

Le chargement des poutres a été réalisé en respectant au mieux une vitesse de chargement constante. Pour des raisons pratiques, les lests ont été déposés sur les appuis à l'aide d'un transpalette manuel, Figure 115.

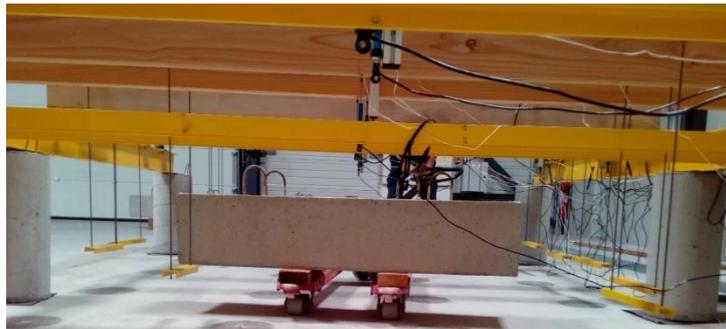


Figure 115 : Chargement d'une poutre au transpalette

III.4.3.1.1. Module d'Young

A partir de la flèche instantanée (Figure 116 et Figure 117) nous avons pu en déduire le module d'Young pour chaque poutre. Cependant, certaines d'entre elles ont été chargées pour des humidités supérieures à 12%. Afin de les corriger de cet assouplissement, nous utilisons les équations de correction proposées par Guitard (Guitard, 1987). Nous déterminons ainsi la valeur de ce module pour une humidité de référence ($w=12\%$) (Tableau 24 et Tableau 25).

Enfin, nous comparons les modules d'Young estimés par le classement visuel et ceux déduits des flèches instantanées.

- Classe de service 2

Est représenté sur la Figure 116 l'évolution des flèches globales des poutres en environnement intérieur.

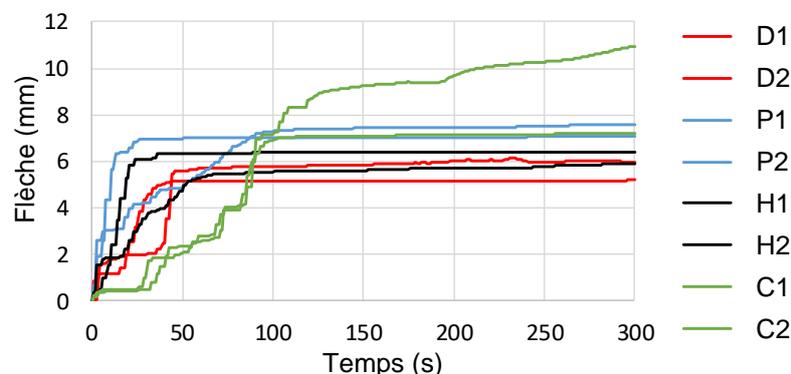


Figure 116 : Flèches instantanées : classe de service 2

A l'exception d'une poutre de chêne (C1) les autres poutres présentent un comportement mécanique instantané proche de celui prévu ou même meilleur (Tableau 24). Cela signifie que

le comportement élastique estimé par le classement visuel semble être adapté pour la classe de service 2.

Tableau 24 : Détermination du comportement instantané-Comparaison avec le classement visuel : CS2

Essence	Douglas		Chêne		Hêtre		Peuplier	
N° poutre	D1	D2	C1	C2	H1	H2	P1	P2
Classe de résistance estimée	C30	C30	D18	D24	D40	D40	C24	C24
Estimation de $E_{0,m}$ (MPa)	12000	12000	9500	10000	13000	13000	11000	11000
Détermination de $E_{0,k}$ (MPa)	8000	8000	6333	6666	8666	8666	7333	7333
Teneur en eau	16%	17%	27%	30%	12%	12%	12%	12%
Flèche instantanée (mm)	5,13	5,58	8,69	6,90	5,33	6,34	6,96	7,21
E_0 expérimental (GPa)	14,9	13,7	7,4	9,3	15,5	12,8	10,7	10,4
E_0 (w=12%) expérimental (GPa)	15,5	14,3	8,8	11,2	15,5	12,8	10,7	10,4
Erreur sur les modules	29%	19%	-8%	12%	19%	-2%	-3%	-6%

- Classe de service 3

La Figure 117 représente l'évolution de la flèche sur les 300 premières secondes après chargement.

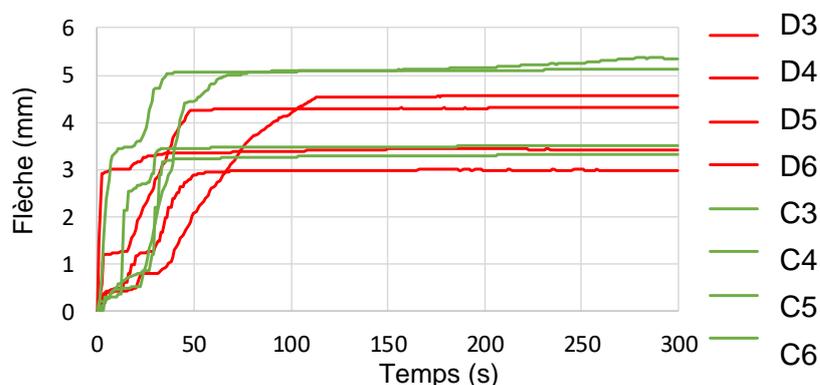


Figure 117 : Flèches instantanées : classe de service 3

Les poutres de douglas et deux poutres de chênes présentent un comportement tel qu'il était attendu. Cependant, la flèche instantanée de deux autres poutres de chênes (C3 et C4) sont très supérieures à celles attendues (Tableau 25). La poutre C3 présente des défauts macro qui peuvent peut-être expliquer ce comportement instantané non attendu. En effet, un nœud sur rive se situe en face inférieure et à mi travée de la poutre. Ce nœud est peut-être la cause de ce comportement.

Tableau 25 : Détermination du comportement instantané-Comparaison avec le classement visuel : CS3

Essence	Douglas				Chêne			
N° poutre	D3	D4	D5	D6	C3	C4	C5	C6
Classe de résistance estimée	C18	C18	C30	C30	D18	D18	D24	D18
Estimation de $E_{0,m}$ (MPa)	9000	9000	12000	12000	9500	9500	10000	9500
Détermination de $E_{0,k}$ (MPa)	6000	6000	8000	8000	6333	6333	6666	6333
Teneur en eau	13%	14%	14%	14%	14%	20%	22%	21%
Flèche instantanée (mm)	4,25	4,53	3,35	2,95	4,97	5,03	3,41	3,21
E_0 expérimental (GPa)	9,5	8,9	12,0	13,7	6,7	6,6	9,9	10,5
E_0 (w = 12%) expérimental (GPa)	9,6	9,0	12,3	14,0	6,8	7,2	11,0	11,5
Erreur sur les modules	6%	1%	2%	16%	-28%	-25%	10%	21%

III.4.3.1.2. Module transversal

La mesure du tassement aux appuis a été réalisée à partir des capteurs de déplacement de 25mm de course, situés au droit de l'appui.

Est représenté sur la Figure 118 l'enregistrement des trois capteurs de déplacement de 25mm de course pour une poutre de chêne et de douglas en classe de service 2. Le capteur de bord permet bien de mesurer ce phénomène de tassement.

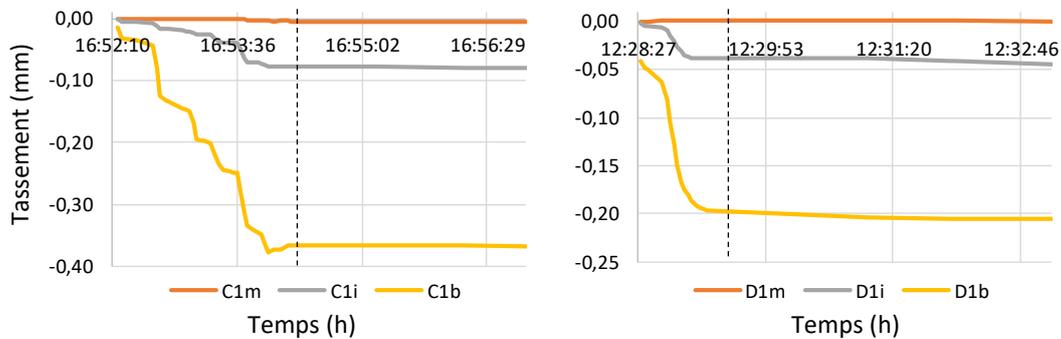


Figure 118 : Mesure du tassement aux appuis du chêne (à gauche) et du douglas (à droite) en CS2

Cependant plusieurs paramètres sont venus perturber la mesure. Tout d'abord, les poutres de chêne présentaient des fissures avant chargement. Celle-ci se sont refermées sous la charge. De plus, juste après l'usinage des poutres, plusieurs d'entre elles ont présenté un gauchissement. Cet effet de torsion a fait que nous ignorons la surface de contact de la poutre sur l'appui. Nous avons tout de même effectué le chargement dans cet état (Figure 119).



Figure 119 : Gauchissement aux appuis des poutres de douglas et de chêne en classe de service 2

Malheureusement ces deux défauts combinés nous ont mené à la perte de cette information. Nous n'avons donc pas pu déterminer le module transversal.

III.4.3.2. Comportement mécanique long terme

Aujourd'hui, les poutres sont chargées depuis plus d'un an, et les capteurs enregistrent les effets différés. Nous avons subi quelques coupures au début de l'essai (courant octobre). De plus quelques capteurs de déplacement en extérieur n'ont pas accepté les conditions climatiques et ont présenté des dysfonctionnements.

III.4.3.2.1. Conditions climatiques

Les évolutions climatiques ont été mesurées à partir des capteurs thermo hydrique. Nous rappelons que les capteurs sont protégés de l'ensoleillement.

III.4.3.2.1.1. Classe de service 2

Les essais ont débuté le 28 août 2017. La Figure 120 représente l'évolution de l'environnement en classe de service 2.

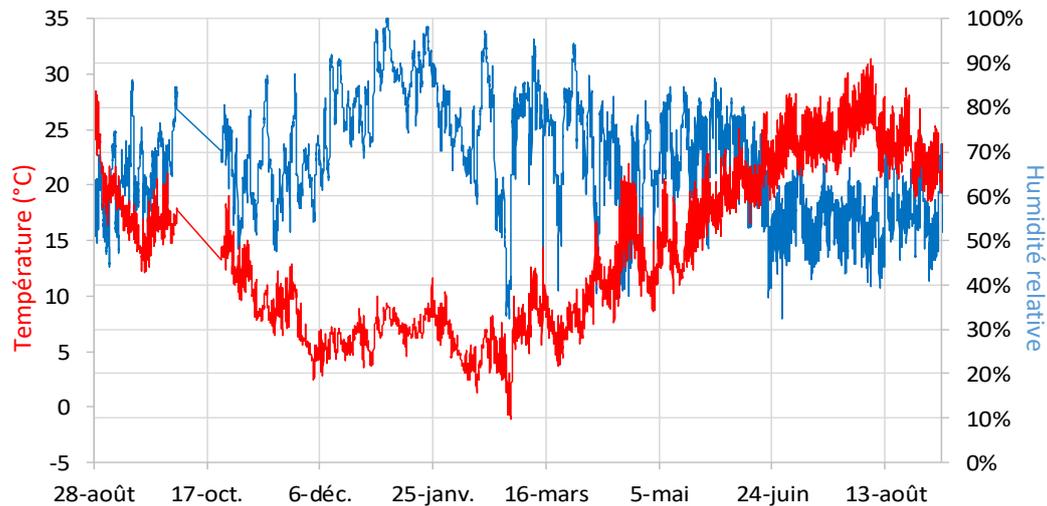


Figure 120 : Evolution climatique enregistrée en classe de service 2

Les évolutions climatiques obtenues présentent plusieurs périodes intéressantes pour la modélisation des phénomènes. Par exemple en janvier, une période à forte humidité a été relevée. Cette tendance aura un impact notable sur le comportement mécanique différé.

Enfin le Tableau 26 récapitule les caractéristiques statistiques des évolutions climatiques sur la période.

Tableau 26 : Tableau synthétique des évolutions climatiques en classe de service 2

	HR(%)	T(°C)
Minimum	32,4	-1,13
Maximum	100,0	31,41
Moyenne	66,4	15,51

III.4.3.2.1.2. Classe de service 3

Les essais ont débuté le 15 septembre 2017. La Figure 121 représente l'évolution de l'environnement en classe de service 3

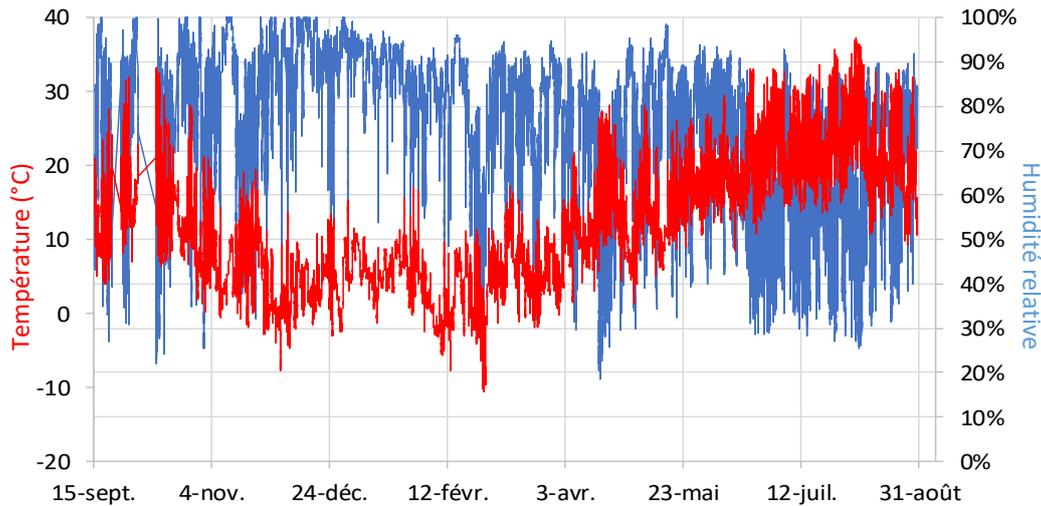


Figure 121 : Evolution climatique enregistrée en classe de service 3

Les variations climatiques sont beaucoup plus importantes qu'en intérieur. Entre autres, au cours de plusieurs périodes l'humidité relative a atteint le seuil des 100%. Cependant nous ne disposons d'aucun capteur pour mesurer la pluviométrie ou encore l'ensoleillement direct des poutres. Ces phénomènes bien qu'importants ne sont pas pris en compte dans les modèles de transfert de masse et de chaleur.

Enfin le Tableau 27 récapitule les caractéristiques statistiques des évolutions climatiques.

Tableau 27 : Tableau récapitulatif des évolutions climatiques en classe de service 3

	HR(%)	T(°C)
Minimum	18,6	-10,62
Maximum	100,0	37,27
Moyenne	68,3	14,14

III.4.3.2.2. Analyse des phénomènes de retrait gonflement

Les capteurs transversaux ont permis de mesurer les variations dimensionnelles induites par le phénomène de retrait gonflement. Cependant, comme il a été vu dans le paragraphe III.4.3.1.2 l'apparition et l'évolution des fissures n'ont pas permis l'exploitation de ces résultats en vue de leurs corrélations à la modélisation du transfert de masse.

- Classe de service 2

Les Figure 122 et Figure 123 représentent les évolutions de variation de hauteurs des poutres D1, P1, H1 et C1 situées en classe de service 2.

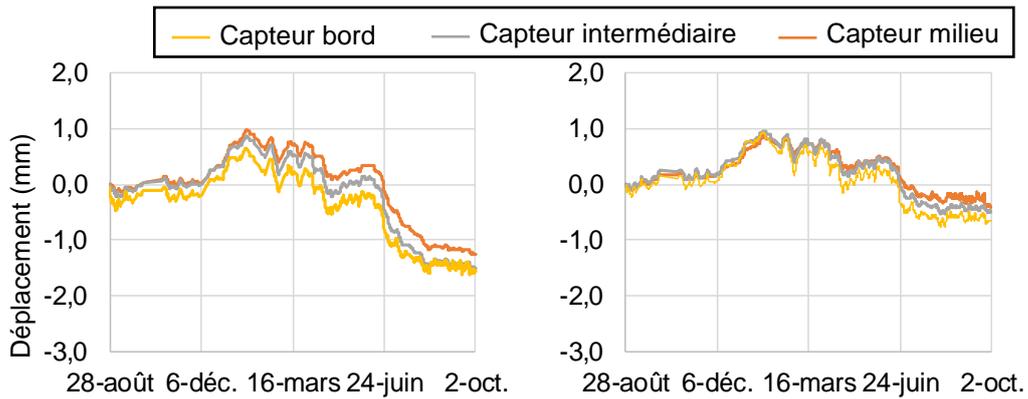


Figure 122 : Evolution des variations dimensionnelles du douglas (à gauche) et du peuplier (à droite)

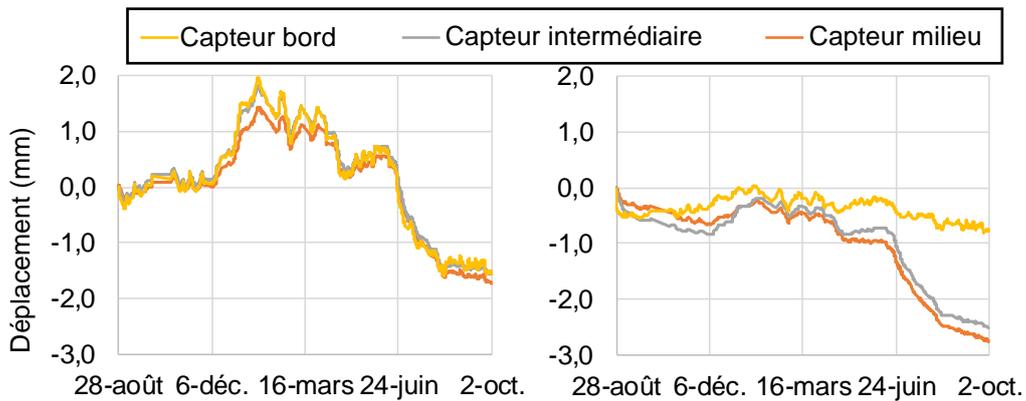


Figure 123 : Evolution des variations dimensionnelles du hêtre (à gauche) et du chêne (à droite)

Comme attendu, les variations de hauteur sont globalement d'autant plus forte que l'on se situe proche de l'about. On remarquera que la poutre de hêtre est celle qui présente le plus de variations de hauteur sur la période d'essai ($\pm 2\%$). L'évolution de variations de hauteur de la poutre de chêne confirme que celle-ci a été chargée humide. En effet le capteur de bord présentant moins de variations que les deux autres, cela signifie que la poutre a perdu beaucoup d'eau à mi-travée et moins en about.

- Classe de service 3

La Figure 124 représente les évolutions de variation de hauteurs des poutres D3, et C3 situées en classe de service 3.

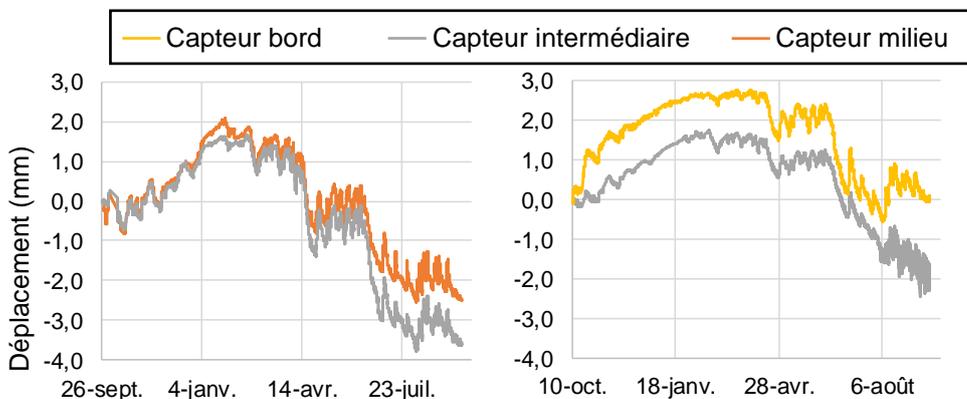


Figure 124 : Evolution des variations dimensionnelles du douglas (à gauche) et du chêne (à droite)

Deux capteurs ont posé problèmes au cours de cet essai en extérieur. Le capteur d'about de la poutre D3 de douglas a présenté un dysfonctionnement dès le début des essais. Enfin, le 29 juin 2018, nous nous sommes aperçu que le cadre du capteur du milieu de la poutre de chêne C3 était en contact avec l'IPE100. En plus de modifier la déformation de la poutre, cette erreur est venue modifier également l'évolution des variations à mi-travée de la poutre de chêne.

Cependant les variations dimensionnelles de la poutre de douglas mettent en avant un séchage plus rapide à l'about qu'à mi-travée aux vues de l'écart qui se crée entre les deux évolutions à partir de mi-juin. Enfin aux vues des variations en début d'essai du capteur de bord de la poutre de chêne, on remarque bien les effets de gonflement et d'augmentation de fissures en about.

III.4.3.2.3. Analyse des flèches

- Classe de service 2

La Figure 125 représente les évolutions de flèches globales des huit poutres situées en intérieur.

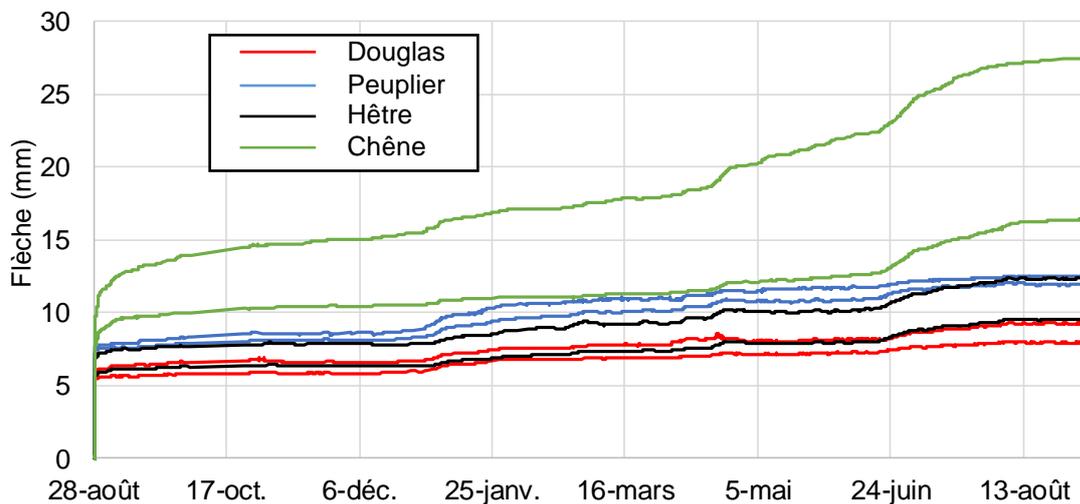


Figure 125 : Evolution des flèches en classe de service 2

Au bout d'un an de mesure de la flèche globale des poutres en intérieur, les évolutions de flèches semblent peu bruitées par des effets parasites

Nous pouvons noter que des périodes de fortes augmentations des flèches sont observables. Entre autres, courant janvier, il y a eu de fortes précipitations entraînant une forte humidité mais en intérieur, de l'ordre de 90% sur un mois. Cela a induit un assouplissement des poutres. Deux autres périodes sont visibles, la fin du mois d'avril et à la fin du mois de juin. Ces deux périodes correspondent à des périodes de beau temps avec des températures élevées, qui ont induits des séchages importants et peut être des fissurations.

Enfin, il est à remarquer que seules les deux poutres de chênes ne présentent pas une répétabilité entres-elles. L'une se déforme beaucoup plus que l'autre. En effet, cette poutre présente des fissures dès les premiers jours de l'essai. Il a été remarqué qu'elle c'est très fortement endommagée tout au long de l'essai, et c'est pour certainement pour cette raison qu'elle présente un comportement difféé beaucoup plus défavorable.



Figure 126 : Mise en évidence des fissures non traversantes sur la poutre de chêne C1 (91-1) le jour du chargement, en comparaison à la poutre C2 (94-1)

- Classe de service 3

La Figure 127 représente les évolutions de flèches globales des poutres en extérieur.

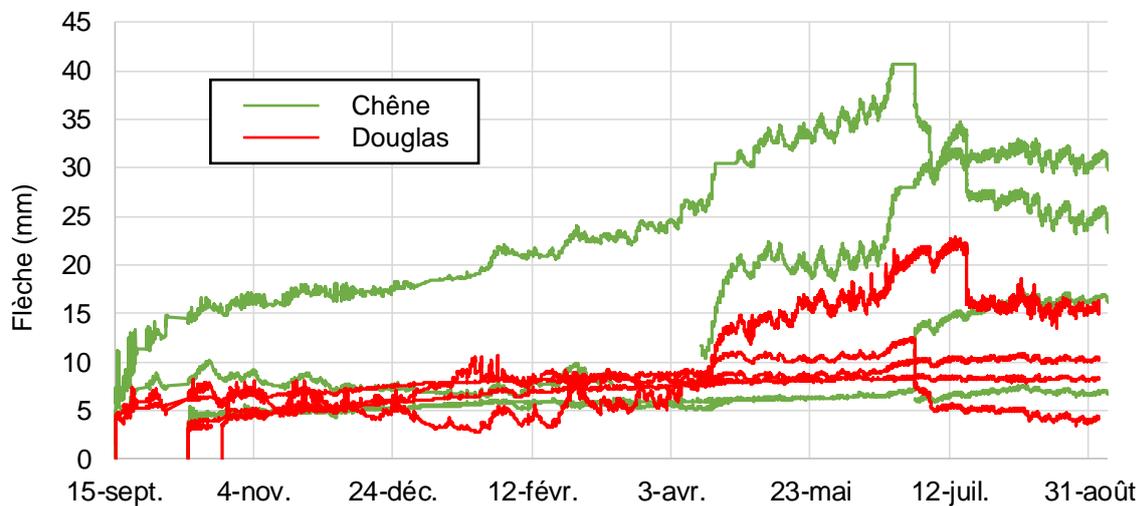


Figure 127 : Evolution des flèches en classe de service 3

Ces résultats présentent beaucoup plus de bruitage. Ensoleillement et pluviométrie directs sont deux facteurs d'influence très fort pour la métrologie extérieure. Nous pouvons entre autres remarquer que des flèches se sont mises à diminuer après le chargement. Ces phénomènes sont certainement dus à un gonflement de la fibre supérieure à cause d'une forte humidification de la surface supérieure par de l'eau liquide (rosée du matin et pluie) induisant alors du transfert d'eau sous phase liquide. Ces perturbations hydriques n'étant pas symétriques entre la faces inférieures et supérieures, elles ont induit des effets non attendus.

De plus plusieurs de ces poutres présentent des déplacements long terme non attendus. C'est pourquoi nous avons pris la décision de décharger quatre d'entre elles (le 30 juin et le 18 juillet 2018).

Enfin quelques capteurs de déplacement ont présenté des défaillances dues à l'environnement trop humide. C'est ainsi que nous avons perdu deux périodes d'enregistrement de poutres de chênes.

On rappelle qu'une des poutres de chêne a subi un blocage dans son fluage à cause d'un support de capteur mi-travée. Nous nous en sommes rendu compte le 30 juin 2018. Cela explique la subite augmentation de flèche mesurée sur cette poutre.

III.4.4. Modélisation des essais de fluage

A partir des différents modèles que nous avons présentés dans les parties précédentes, nous avons pu modéliser les phénomènes de transferts thermo-hydrrique et de comportement mécanique différé des différentes poutres. Le comportement différé étant sensible aux variations d'humidité dans la section, nous commencerons l'analyse par la modélisation de l'évolution de l'humidité dans les différentes poutres et pour les deux environnements.

III.4.4.1. Modélisation du champ thermo-hydrrique

L'analyse de l'évolution de l'humidité dans les éléments d'études s'est effectuée grâce au modèle présenté dans le Chapitre III. Les paramètres de diffusion utilisés sont ceux déterminés par le protocole expérimental de diffusion (II.4.3).

Cependant nous ne prendrons pas en compte les phénomènes de transferts d'eau liquide, ni de séchage par ensoleillement direct des poutres. En effet les poutres situées en extérieur n'ont pas été protégées de ces deux sollicitations.

Enfin, nous avons vu dans le paragraphe II.5.2 que la modélisation de transfert hydrrique au sein d'une poutre peut se simplifier par la modélisation du transfert dans la section transversale, en négligeant alors le transfert longitudinal aux abouts.

III.4.4.1.1. Classe de service 2

A partir des sollicitations thermo-hydrrique présentées sur la Figure 120, et des conditions d'humidité initiale Tableau 24 considérées comme homogène au début de l'essai, nous avons modélisé l'évolution d'humidité des huit poutres en classe de service 2 sur la période d'un an (Figure 128).

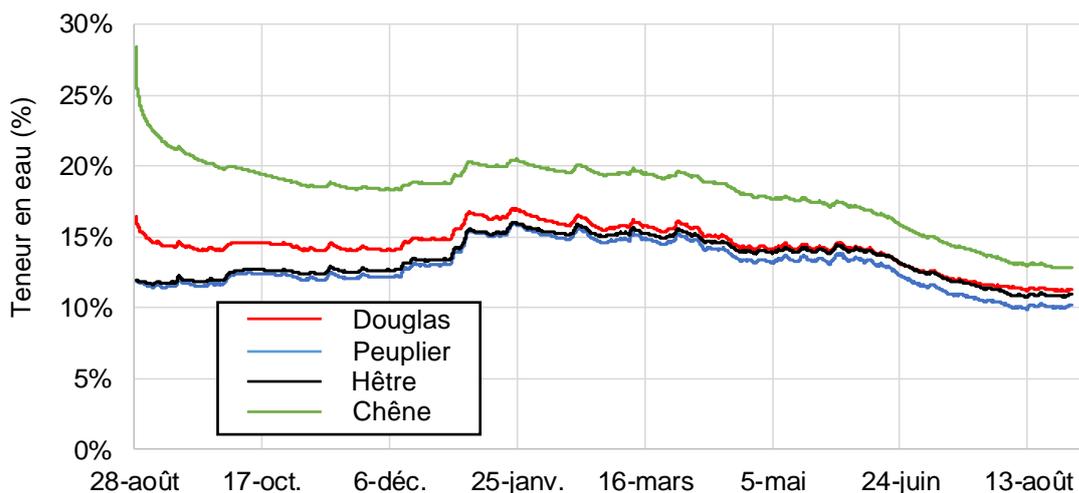


Figure 128 : Evolution de la teneur en eau moyenne en fonction des quatre essences en CS2

Nous pouvons remarquer l'influence de l'humidité initiale sur l'évolution de la teneur en eau moyenne au sein des poutres. Ces résultats montrent également les différences de comportements hydrrique entre les essences. Cependant, malgré les différences de propriétés

de diffusion entre ces essences, les évolutions d'humidité moyenne sont peu impactées. Enfin, au vu des variations hydriques des quatre essences nous pouvons conclure sur le type d'environnement de l'essai. En effet, cet environnement décrit bien une classe de service 2 puisque la teneur en eau moyenne des poutres varie entre 12 et 20% au cours de l'année.

Une analyse de la teneur en eau moyenne ne suffit pas à différencier le comportement hydrique d'une essence. Nous devons également nous intéresser au profil hydrique. Au niveau de la symétrie verticale des poutres, nous pouvons comparer les évolutions de profil d'humidité entre les essences. Ainsi la Figure 129 représente en tout point de la hauteur de la poutre, la valeur minimale et maximale de teneur en eau pour les quatre essences. Est calculé ainsi l'écart entre la valeur de teneur en eau minimale et la teneur en eau maximale (Figure 129). Cette représentation met en avant la profondeur d'humidification ou de séchage de la poutre. Ainsi on peut comparer les profils d'humidifications.

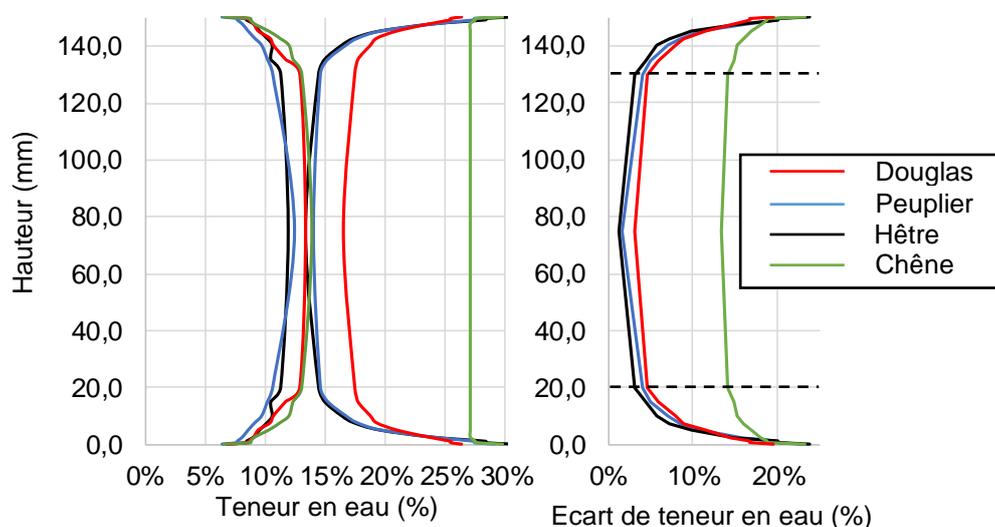


Figure 129 : Profils de teneurs en eau extrêmes (à gauche) et variations de teneur en eau annuelle (à droite)

Tout d'abord on peut conclure que toutes les poutres ont leur humidité fortement variée sur les vingt premiers millimètres en dessous de la surface de contact avec l'extérieur. De façon plus précise si l'on s'intéresse aux variations d'humidités à 20 mm de profondeur, nous pouvons comparer les écarts de variations hydriques entre essences :

- Les poutres de chêne de par leur humidité initiale importante vont voir leur humidité varier de plus de 14,1% à 20 mm de profondeur.
- Les trois autres essences présentent des variations d'humidification à 20 mm de profondeur de :
 - Douglas : $\Delta W_{20mm} = 4,5\%$
 - Peuplier : $\Delta W_{20mm} = 4,0\%$
 - Hêtre : $\Delta W_{20mm} = 3,1\%$

L'essence de douglas présente une valeur légèrement plus importante que les deux autres à cause de son humidité initiale légèrement plus grande. Cependant, les propriétés de diffusion du hêtre étant plus faible que celle du peuplier, nous remarquons que cela va induire une différence de pénétration de l'humidité de quelques pourcents. Cet écart présentera-t-il une différence de comportement différé sur cette période ?

Nous pouvons également remarquer que les poutres de chêne vont avoir leur humidité à cœur baisser ($\Delta W_{\text{cœur}} = -13\%$) alors que les poutres de douglas, de hêtre et de peuplier auront des variations hydriques à cœur de moins de 3%.

De façon général, on ne remarque pas de grande différence de comportement hydrique des poutres au vu des variations de propriétés de diffusion. Cette remarque vient du fait que nous nous intéressons à un élément massif de structure, auquel seulement quelques centimètres de hauteur vont être modifiées par l'environnement.

III.4.4.1.2. Classe de service 3

De la même façon, à partir des sollicitations thermo-hydrigue présentées sur la Figure 121, et des conditions d'humidité initiale (Tableau 25), considérée comme homogène au début de l'essai, nous avons modélisé l'évolution d'humidité des huit poutres en classe de service 3 sur la durée d'un an.

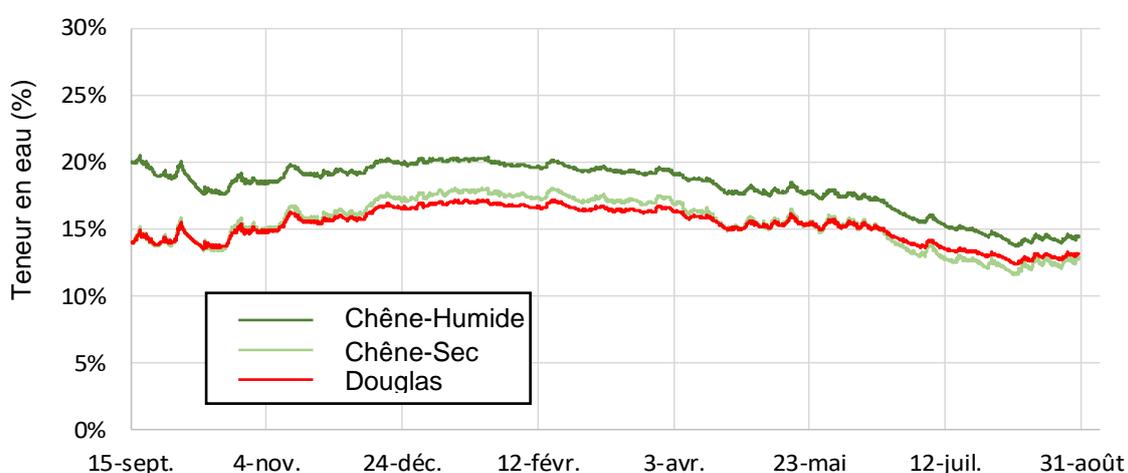


Figure 130 : Evolution de la teneur en eau moyenne en fonction des quatre essences en CS3

Comme pour l'environnement précédent, ces résultats montrent de faibles différences de comportements hydriques entre ces deux essences. Nous pouvons également remarquer l'influence de l'humidité initiale sur l'évolution de la teneur en eau moyenne au sein des poutres de chêne.

De la même façon, au niveau de la symétrie verticale des poutres, nous pouvons comparer les évolutions de profil d'humidité entre les deux essences. Ainsi la Figure 131 représente en tout point de la hauteur de la poutre, la valeur minimale et maximale de teneur en eau pour les deux essences. Nous calculons ainsi l'écart entre la valeur de teneur en eau minimale et la teneur en eau maximale (Figure 131). Cette représentation met en avant la profondeur d'humidification ou de séchage de la poutre. On peut comparer les profils d'humidifications ainsi que les variations hydriques dans la hauteur des poutres.

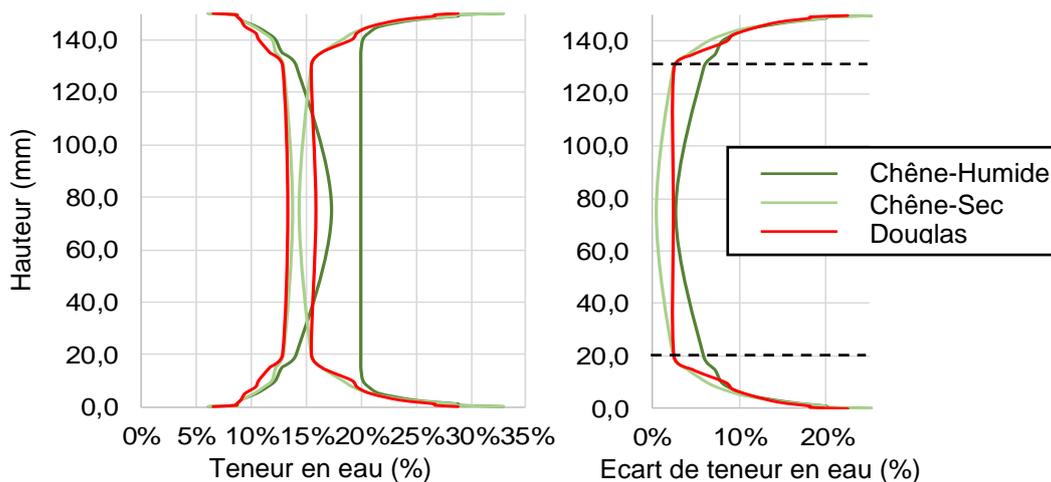


Figure 131 : Profils de teneurs en eau extrêmes (à gauche) et variations de teneur en eau annuelle (à droite)

Comme pour les poutres en classe de service 2, on peut conclure que les poutres ont vues leur humidité fortement varier sur les vingt premiers millimètres en dessous de la surface d'échanges avec l'extérieur malgré les différences d'environnement. Cependant, on peut remarquer une différence de comportement hydrique entre les poutres de douglas et celle de chêne à humidité initiale identique. Celle de douglas va voir son cœur légèrement humidifié en période hivernale (+2,5% de teneur en eau) ce qui n'est pas le cas pour la poutre de chêne.

De façon plus précise si l'on analyse les variations de teneur en eau à 20 mm du bord des poutres, les deux essences présentent des variations d'humidification de :

- Douglas : $\Delta w_{20\text{mm}} = 2,6\%$
- Chêne-sec : $\Delta w_{20\text{mm}} = 2,5\%$
- Chêne-humide : $\Delta w_{20\text{mm}} = 5,9\%$

On peut remarquer que le douglas présentera des variations d'humidités légèrement supérieure au chêne pour une même humidité initiale. Cependant, comme analysé précédemment, on ne remarque pas de grande différence de comportement hydrique des poutres au vu des variations de propriétés de diffusion entre le chêne et le douglas.

III.4.4.1.3. Discussion et conclusion

A partir du modèle de transfert de masse couplé aux variations de chaleur, nous avons pu modéliser l'évolution de l'humidité des seize poutres dans les deux environnements. Cette approche a permis de mettre en avant l'évolution hydrique de poutres très humides mises dans les environnements d'essai. Le modèle montre, qu'après 1 année, cette condition initiale n'a pratiquement pas d'impact sur l'humidité interne moyenne.

Nous avons également analysé les variations de teneur en eau en fonction des quatre essences d'études. Que ce soit d'un point de vu de la teneur en eau moyenne ou du profil d'humidification de la poutre, nous n'avons pas pu mettre en avant de variations de comportement sensibles entre chacune de ces essences. Cette remarque vient du fait que nous nous intéressons à un élément massif de structure, auquel seulement quelques centimètres de matière périphérique vont être impactés par l'environnement.

En effet, nous avons également pu mettre en avant l'influence de l'environnement sur la section des poutres. Dans ces conditions d'essai, les poutres avec une humidité initiale proche de la stabilisation dans leur environnement, présentent des variations hydriques majoritairement sur les 15 à 20 premiers millimètres périphériques.

Les résultats des essais mécaniques en extérieur étant trop parasités (dissymétries hydriques, gauchissement des sections, fissures, etc.), nous nous sommes concentrés sur la modélisation et l'étude du comportement mécanique des poutres en classe de service 2. Cependant, nous apporterons quelques éléments de réponse aux problématiques expérimentales que nous avons pu observer et mesurer.

III.4.4.2. Modélisation du comportement différé

Lors d'une étude du comportement mécanique d'un élément de structure, nous avons pu montrer que les essences étudiées ne présentent pas assez d'écart hydrique pour conclure sur une différence de comportement. La modélisation du comportement différé, sensible à l'humidité interne des poutres, permettra de définir si les essences de feuillus présentent des propriétés viscoélastiques différentes des résineux.

III.4.4.2.1. Réponse du modèle d'hygro sensibilité élastique

Nous avons vu l'influence de l'hygro sensibilité de la matrice élastique sur le comportement différé d'un essai de laboratoire. Au cours de cette analyse, nous avons montré que l'hygro sensibilité n'influence que faiblement le comportement différé. Afin de confirmer cette analyse, nous proposons de déterminer la réponse du modèle d'hygro sensibilité sur les essais mécaniques en classe de service 2.

Aujourd'hui, pour déterminer l'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques nous faisons appel aux lois de Guitard (Guitard, 1987). Nous avons ainsi modélisé le comportement d'hygro sensibilité élastique couplé au phénomène d'hygro verrou. Nous représentons, pour chaque essence, la réponse du modèle en évolution de la réponse différée pondérée de la flèche instantanée, Figure 132.

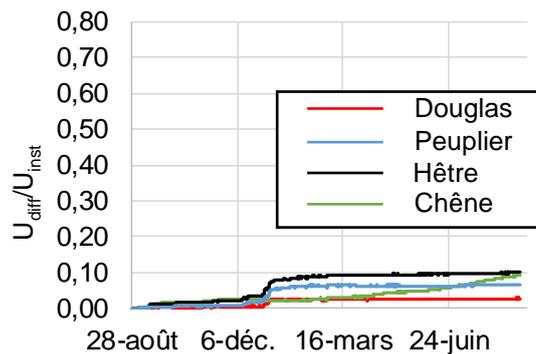


Figure 132 : Réponses différées du modèle d'hygro sensibilité pour les poutres en CS2

La modélisation de l'hygro sensibilité élastique rend bien compte de l'augmentation de déformation lors de la période humide (janvier) due à l'assouplissement de la matrice élastique. L'effet verrou est également visible en période estivale. En effet, lors de cette période les déformations ont été bloquées, induisant alors une contrainte thermodynamique interne. Dans le cas des poutres de chêne, celles-ci présentent une légère augmentation de la flèche due à l'hygro sensibilité de la matrice élastique même en période estivale. Ce

phénomène est certainement dû à une redistribution des contraintes due aux variations de module d'Young. En effet, en période estivale, les poutres de chênes vont sécher à cœur, tout en s'humidifiant périodiquement en surface. Ces variations hydriques et donc mécanique, dans toute la hauteur de la poutre, induisent cette augmentation de déformation au cours de cette période. Cependant, il est à noter que l'hygro sensibilité de la matrice élastique ne participe au comportement différé que de l'ordre de 10%. Elle va entre-autre augmenter la flèche en période humide.

III.4.4.2.2. Modélisation et identification des propriétés viscoélastiques des feuillus

III.4.4.2.2.1. Présentation du maillage

Nous avons vu dans le paragraphe III.3.5 que la réponse viscoélastique du modèle est très peu sensible au type de modèle géométrique. Nous avons utilisé le modèle viscoélastique hygro activé le plus simple : modèle orthotrope isotrope transverse, sans retrait gonflement ni pente de fil. Ainsi, nous pouvons modéliser le comportement différé des poutres à partir d'un maillage présentant deux symétries, l'une dans la longueur, et l'autre dans la hauteur.

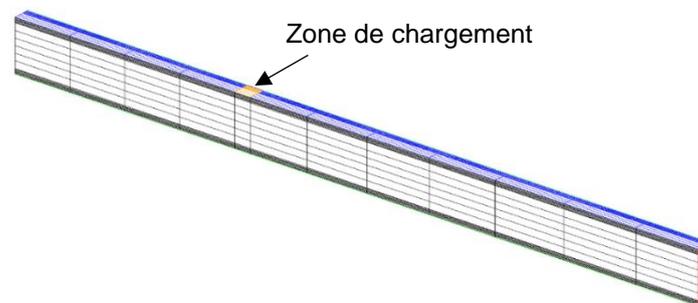


Figure 133 : Maillage d'une poutre avec affinage en périphérie (4368 CUB8)

III.4.4.2.2.2. Présentation du protocole de détermination des propriétés viscoélastiques

Nous rappelons que l'orthotropie n'est pas prise en compte dans la modélisation viscoélastique proposée. En s'appuyant sur la démarche présentée au paragraphe III.3.4, les propriétés viscoélastiques vont être identifiées en fixant les paramètres suivants :

- La valeur « cible » du comportement différé à 50 ans : le coefficient k_{def}
- Les proportions d'ouverture des quatre amortisseurs du modèle rhéologique Ψ_{ti}
- Le coefficient d'hygro activation viscoélastique A_w

Ce dernier terme pourra être identifié notamment à partir de la période de janvier 2018 qui présente une forte humidification, induisant une forte augmentation de la déformée. Quant à k_{def} et Ψ_{ti} , ils seront optimisés manuellement pour des raisons de rapidité. En effet, le temps de calcul de la simulation du fluage d'une poutre sur un an est de l'ordre d'une dizaine d'heures. Identifier ces cinq paramètres à partir d'un algorithme d'optimisation de type simplexe prendrait un temps considérable. Sans chercher à optimiser les valeurs, les tendances de calage ainsi obtenues sont suffisantes pour les développements présentés.

III.4.4.2.2.3. Identification des propriétés viscoélastiques hydro activée

Nous avons identifié les six paramètres du modèle viscoélastique hydro activé. Les , Figure 136 et Figure 137 récapitulent les valeurs identifiées. Y est également présenté les évolutions de flèches différées expérimentales et les réponses des modèles mécaniques.

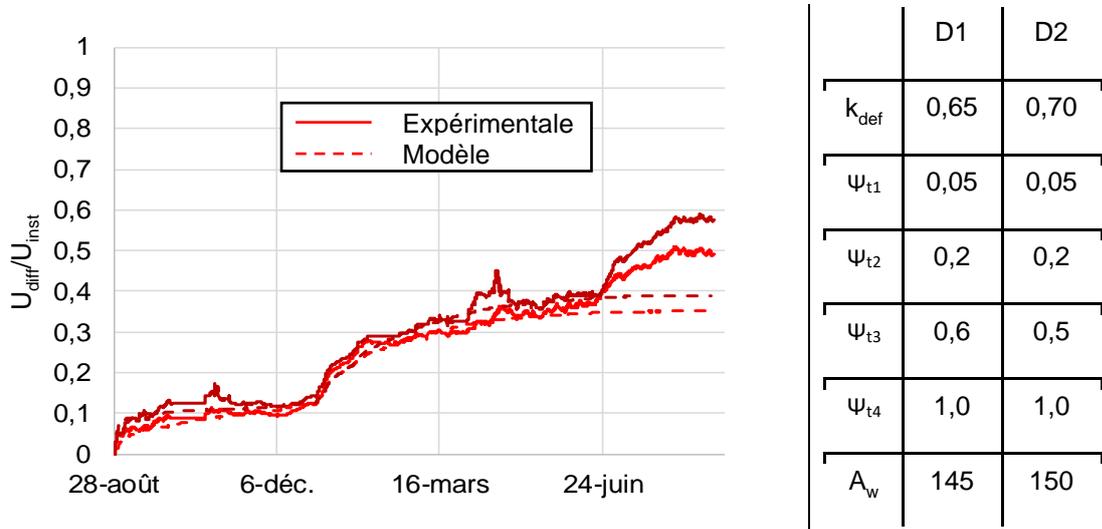


Figure 134 : Douglas : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite)

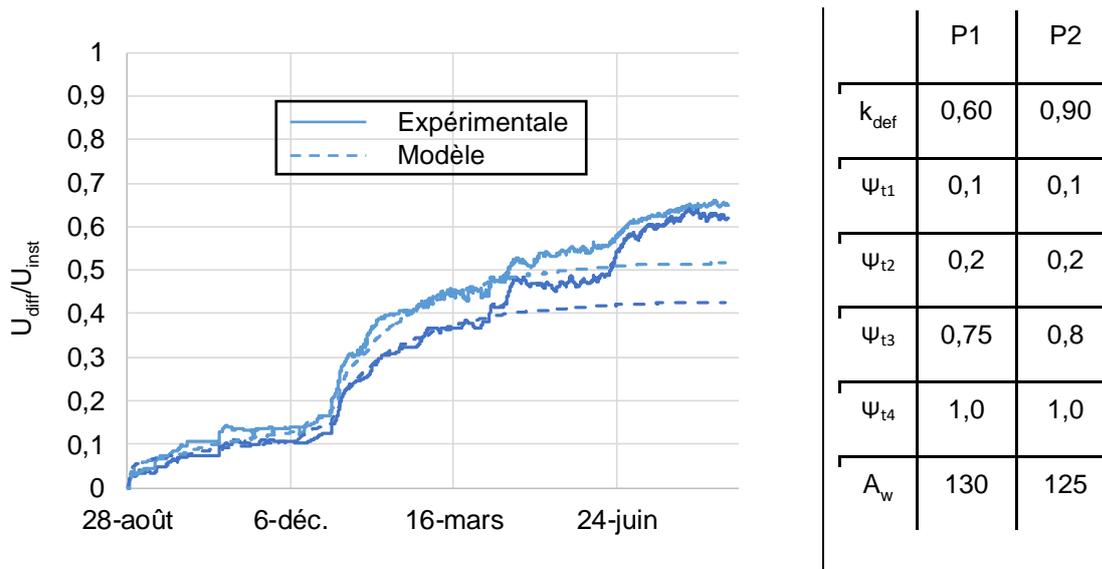
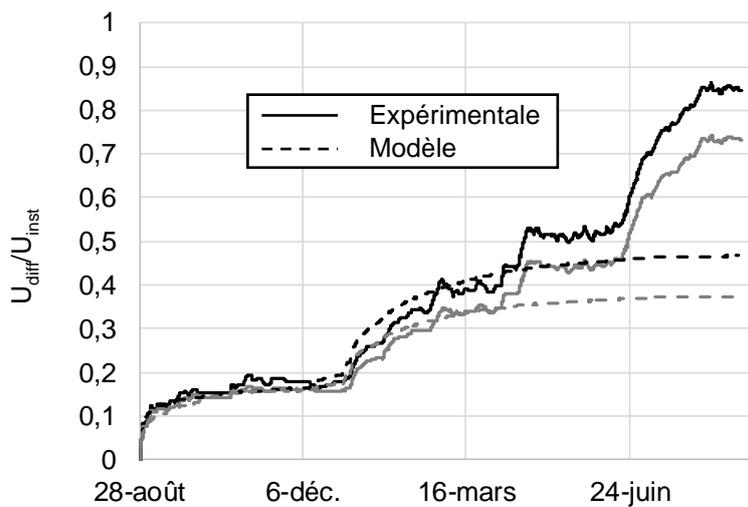
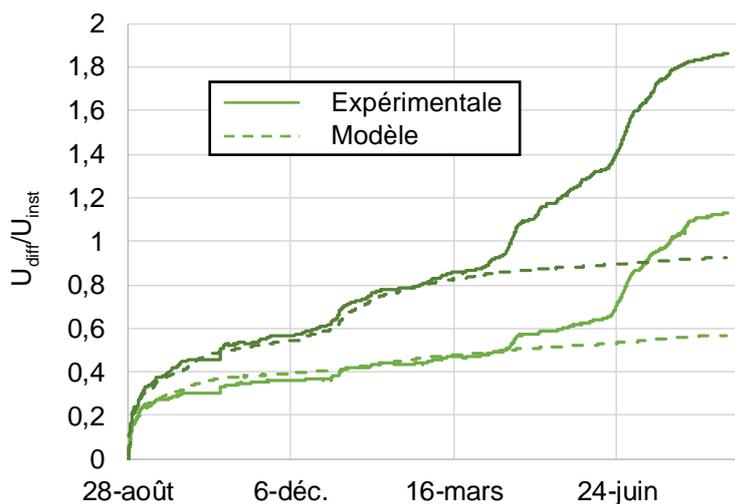


Figure 135 : Peuplier : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite)



	D1	D2
k_{def}	0,65	0,70
ψ_{t1}	0,05	0,05
ψ_{t2}	0,2	0,2
ψ_{t3}	0,6	0,5
ψ_{t4}	1,0	1,0
A_w	145	150

Figure 136 : Hêtre : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite)



	C1	C2
k_{def}	1,9	1,40
ψ_{t1}	0,2	0,25
ψ_{t2}	0,45	0,5
ψ_{t3}	0,8	0,75
ψ_{t4}	1,0	1,0
A_w	130	100

Figure 137 : Chêne : Evolution de U_{diff}/U_{inst} (à gauche) et les valeurs identifiées (à droite)

Pour rappel, la valeur de k_{def} retenue par l'Eurocode 5 vaut 0,8. Les poutres de chêne et de hêtre présentent des flèches à 1 an qui sont déjà supérieures à celle prévue pour 50ans.

Du point de vue des résultats du modèle, ce dernier semble bien représenter le comportement différé des poutres en classe de service 2 jusqu'à la fin du mois de mars. Il permet de modéliser l'augmentation de déformation en période humide (courant janvier). En effet, au cours de cette période, l'augmentation de l'humidité des poutres induit un assouplissement des propriétés viscoélastiques du matériau. Le modèle prend ce phénomène en compte au travers du paramètre d'hygro activation viscoélastique A_w .

L'identification des valeurs de Ψ_{ti} a été possible malgré une seule année de simulation. Dès le début de l'essai, tous les amortisseurs commencent à s'ouvrir. Ainsi, au bout d'un an de simulation, le dernier amortisseur est déjà ouvert à 7,5% sans la prise en compte de l'hygro activation. Effectivement, nous pouvons déterminer les proportions d'ouvertures de chaque

amortisseur au cours du temps. Ainsi, le Tableau 28 récapitule les ratios d'ouvertures des quatre amortisseurs en fonction des temps caractéristiques de ces derniers, et ce, sans hygro activation.

Tableau 28 :Tableau des ratios d'ouvertures des quatre amortisseurs en fonction des temps caractéristiques d'ouverture sans hygro activation

Temps d'ouverture	1 ^{er} amortisseur	2 nd amortisseur	3 ^{ème} amortisseur	4 ^{ème} amortisseur
1 semaine	98%	14,1%	0,7%	0,1%
6 mois	100%	98%	17,5%	3,8%
10 ans	100%	100%	98%	54%
50 ans	100%	100%	100%	98%

En prenant en compte le terme d'hygro activation ($A_w = 150$), le ratio d'ouverture des quatre amortisseurs est de : $\psi_{11} = 100\%$; $\psi_{12} = 100\%$; $\psi_{13} = 80\%$; $\psi_{14} = 27\%$ à la fin d'essai.

Si la réponse du modèle est très satisfaisante sur les premiers mois, elle présente une brusque divergence avec les mesures à partir du mois d'avril. Toutes les poutres, toutes essences confondues, présentent cette même divergence. Cette différence est visible sur la Figure 138 qui représente l'écart relatif entre le modèle et la mesure.

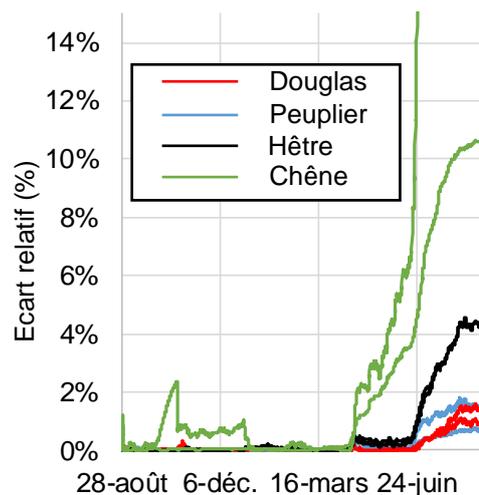


Figure 138 : Ecart relatif entre modèle et expérimentale

Cette représentation met en avant la dérive du modèle à partir de mi-avril pour les poutres de chênes, mais surtout à partir du 24 juin pour l'ensemble des autres poutres. Mais quel phénomène physique est intervenu au cours de ces deux périodes et qui expliquerait cette dérive ?

III.4.4.2.2.4. Discussion sur l'évolution des défauts macroscopiques

Dans ce paragraphe, nous discuterons de l'origine de cette dérive aux périodes du 20 avril et du 24 juin.

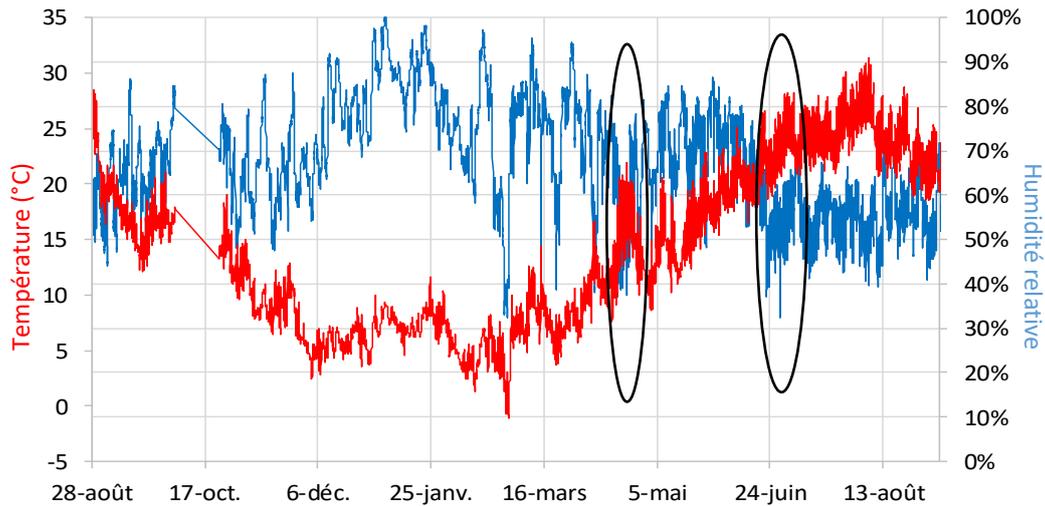


Figure 139 : Identification des périodes de dérive

Nous pouvons remarquer que ces deux périodes sont caractérisées par une forte diminution d'humidité relative et une augmentation de la température de l'air, Figure 139.

Pour évaluer le risque d'endommagement par fissuration de la poutre lors d'un séchage trop brusque, nous proposons une analyse de l'évolution de l'humidité dans la largeur de la poutre à mi-hauteur, Figure 140.

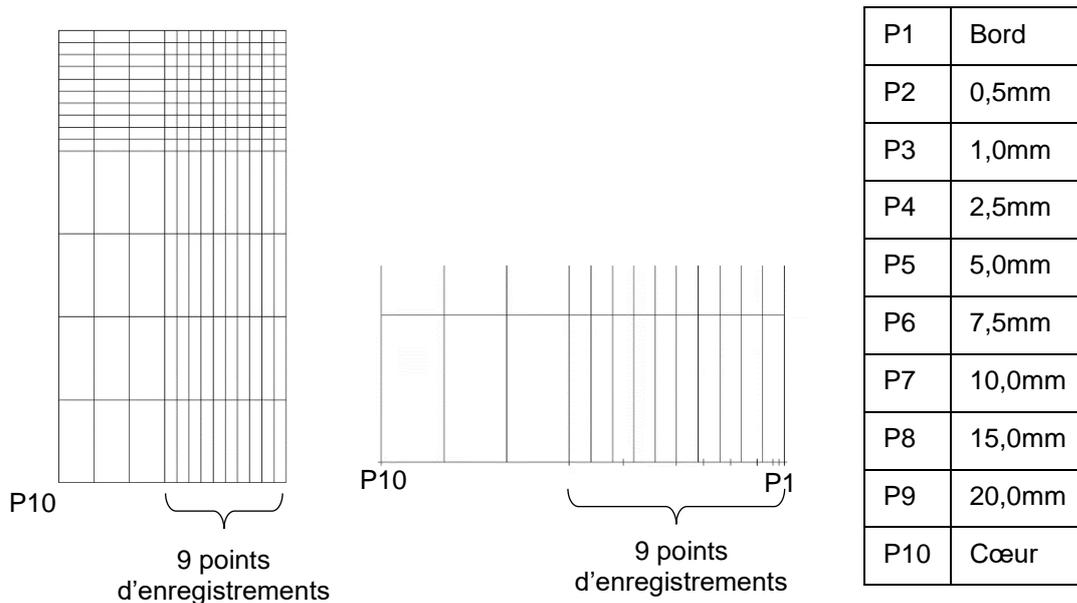


Figure 140 : Disposition des points d'enregistrement de la teneur en eau

Ainsi, en effectuant la différence de teneur en eau entre une abscisse et une autre sur un delta de temps donné, nous pouvons quantifier l'importance du séchage à différentes abscisses de la poutre, Figure 141. Si le gradient hydrique est trop important (lors d'une phase de séchage) nous pouvons alors supposer qu'il y a un risque d'endommagement par fissuration. Sur la Figure 141 est représenté sept gradients hydriques à partir du bord extérieur de la poutre :

- $w(2,5\text{mm}) - w(1,0\text{mm})$
- $w(5,0\text{mm}) - w(2,5\text{mm})$
- $w(7,5\text{mm}) - w(5,0\text{mm})$
- $w(10,0\text{mm}) - w(7,5\text{mm})$

- $w(15,0\text{mm}) - w(10,0\text{mm})$
- $w(20,0\text{mm}) - w(15,0\text{mm})$
- $w(\text{cœur}) - w(20,0\text{mm})$

Les gradients hydriques, plus proches du bord, ne sont pas représentés par souci de lisibilité.

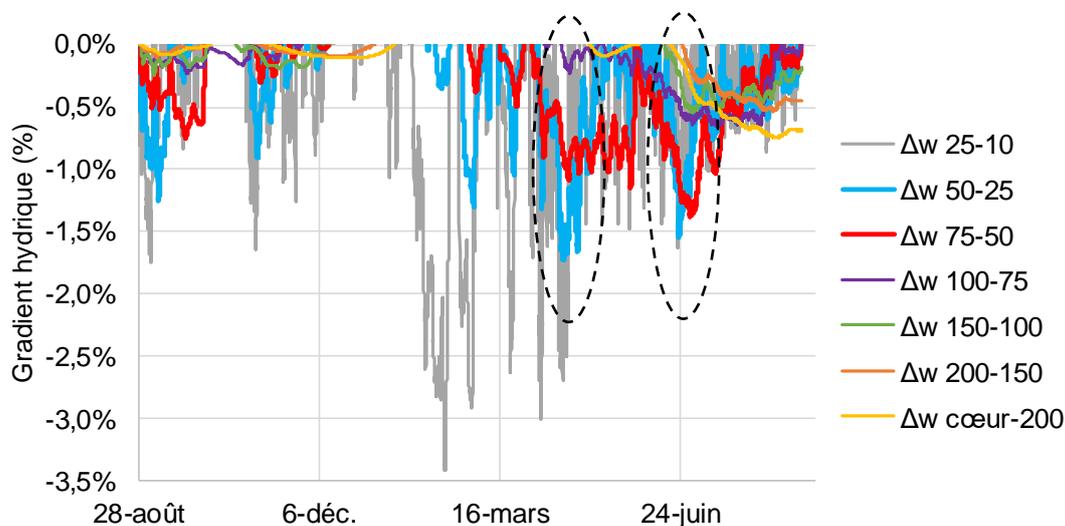


Figure 141 : Evolution du gradient hydrique du peuplier au niveau de sept zones différentes pour un pas de temps d'une heure

Nous pouvons remarquer que, sur les deux périodes (20 avril et 24 juin), nous mesurons des gradients d'humidité de plus de 1% en une heure à des profondeurs allant de 5 à 7,5mm, et ce, sur une période de plusieurs jours. Nous supposons que ces gradients de séchage induisent de l'endommagement par fissuration. Des apparitions de fissures sur les faces des poutres ont effectivement été constatées au cours de l'année. La Figure 142 montre deux exemples de fissures sur deux essences différentes.



Figure 142 : Apparition de fissures sur les poutres de douglas (à gauche) et hêtre (à droite)

Ces constatations n'ont pas été analysées jusqu'ici, mais des variations d'humidité et donc des gradients de cette importance, en surface ou à faible profondeur, peuvent tout à fait générer des amorces de fissure par retrait en traction perpendiculaire. En l'état, il est donc probable que le décrochage brutal observé soit imputable à un phénomène d'endommagement de la poutre. Cet endommagement pourrait être appliqué au comportement matériau, à l'inertie, voire à la raideur globale EI.

III.4.4.2.2.5. Comparaison des propriétés viscoélastiques des différentes essences

Nous avons pu identifier les six paramètres du modèle viscoélastique pour les huit poutres en classe de service 2. Cependant, les feuillus présentent-ils un comportement long terme différent du douglas ? Une comparaison des paramètres est présentée en Figure 143.

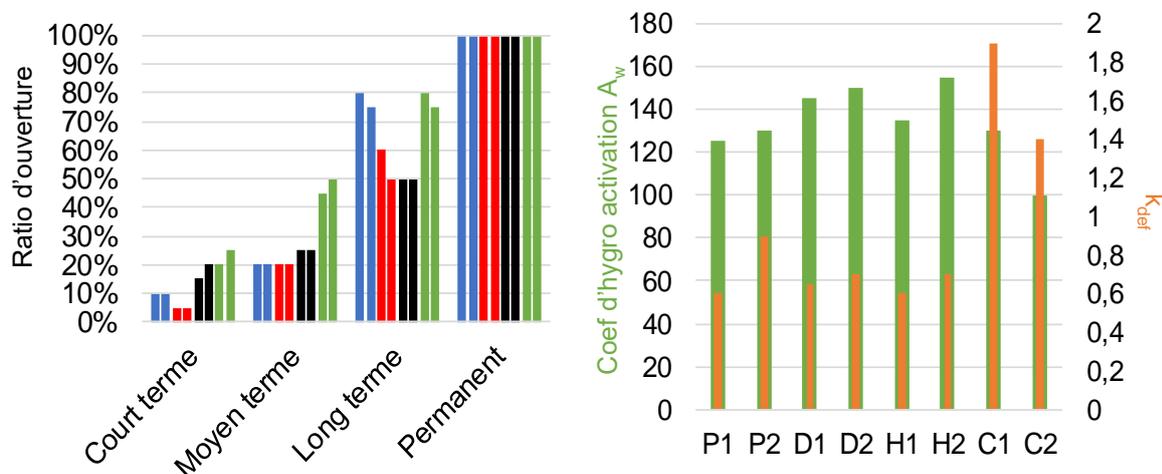


Figure 143 : Comparaison des paramètres identifiées

Que ce soit l'analyse des ratios d'ouverture des amortisseurs, des k_{def} et des termes d'hygro activation, nous ne pouvons pas conclure sur un comportement mécanique différé des feuillus différent de celui du douglas. Seulement, les deux poutres de chêne présentent des ratios d'ouvertures et des k_{def} supérieurs à ceux des autres essences. Cependant ces poutres ont été chargées humides et présentent des défauts macroscopiques tels que les fissures.

Cette approche d'identification des propriétés de chacune des essences ne permet donc pas de conclure sur une différence de comportement entre les feuillus et le douglas. Nous proposerons une autre analyse dans le chapitre suivant.

III.5. Synthèse et discussion

Le modèle de transfert de masse et de chaleur a permis d'identifier l'évolution du champ hydrique au cours des essais en fonction des propriétés de diffusions des essences et de leur environnement. A partir du champ hydrique 2D dans la section des poutres, nous avons pu identifier les différences de profil hydrique dans la hauteur de la poutre. Cette approche a permis de mettre en avant le faible impact des variations des propriétés de diffusion par essence sur le profil d'humidité. L'analyse de la teneur en eau moyenne des poutres montre l'influence du champ hydrique initial sur l'essai d'un an. En effet, nous avons montré qu'une forte humidité au moment du chargement disparaît en quasi-totalité au bout d'un an d'essai quel que soit les deux environnements modélisés.

A partir du champ hydrique 2D, nous avons simulé le comportement mécanique différé des différentes essences de feuillus et de douglas ainsi que l'influence de l'humidité sur celui-ci. Pour cela, nous avons modélisé aussi bien le comportement d'hygro sensibilité de la matrice élastique et le comportement viscoélastique hygro activé. L'ensemble des deux modèles permet de prédire le comportement différé des poutres en classe de service 2 tant que celles-ci ne présentent pas de risque d'endommagement par fissuration. Effectivement, en période estivale, les poutres ont été soumises à des gradients de séchage importants sur deux

périodes de quelques semaines. Ce séchage est venu modifier le champ hydrique sur plusieurs millimètres de profondeur induisant probablement un risque de fissuration. Une fissure va dégrader le comportement différé des poutres au travers deux phénomènes. Premièrement, elle va diminuer l'inertie de la poutre induisant alors une augmentation de la flèche. Egalement, au cours du temps, elle va accélérer les échanges hydriques et réactiver le processus de diffusion. Une approche par la mécanique de la rupture permettrait de quantifier l'apparition et l'influence d'une fissure sur le comportement différé, mais cela sort du contexte de la thèse.

Nous avons vu, sur un essai réel, que la prise en compte de l'influence de l'humidité sur la matrice élastique peut être négligée lors de l'étude du comportement différé d'un élément de structure. En effet, elle ne contribue au comportement différé que pour 10% de la flèche instantanée. Pour un environnement de type classe de service 2, l'Eurocode 5 définit le comportement différé tel qu'il représente 80% de la flèche instantanée. Une légère augmentation du coefficient d'hygro activation A_w permettrait de compenser cette simplification.

Ainsi, la modélisation du comportement différé des poutres de classe de service 2 est possible à partir du modèle viscoélastique hygro activé. Cette hygro activation permet aussi bien de rendre compte de l'accélération de la déformation en phase d'humidification que le ralentissement de la déformation en période sèche.

Cependant, cette approche n'a pas permis de montrer une différence de comportement différé entre les différentes essences de feuillus par rapport au douglas. Dans le chapitre à venir, nous proposerons une nouvelle approche de comparaison qui permettra de répondre à la problématique posée.

Chapitre IV. Synthèse et propositions réglementaires

IV.1. Introduction des sciences du bois à l'ingénierie	169
IV.2. Apports du modèle de diffusion	169
IV.2.1. Equilibre hygroscopique	169
IV.2.1.1. Rappel du contexte réglementaire	170
IV.2.1.2. Proposition de nouveaux abaques d'équilibres hygroscopiques	170
IV.2.1.3. Simplification des abaques d'équilibres	171
IV.2.2. Identification des champs hydriques 3D à long terme et par essence	175
IV.2.2.1. Protocole numérique.....	175
IV.2.2.2. Environnements climatiques	175
IV.2.2.3. Résultats de simulation.....	177
IV.2.2.4. Influence de la pente de fil	180
IV.2.3. Conclusion	180
IV.3. Extrapolation aux feuillus du comportement différé réglementaire du douglas	181
IV.3.1. Propriétés viscoélastiques hygro activée du douglas	182
IV.3.2. Cas du hêtre et du peuplier	183
IV.3.3. Cas particulier du chêne.....	183
IV.3.4. Conclusions	185
IV.4. Adaptation du modèle mécanique pour le dimensionnement ELS	185
IV.4.1. Etude paramétrique.....	186
IV.4.1.1. Paramètres	186
IV.4.1.2. Maillages	188
IV.4.1.3. Résultats	189
IV.4.1.4. Conclusion.....	193
IV.4.2. Calcul simplifié de la réponse mécanique différée.....	194
IV.4.2.1. Réponse différée à 5 ans par éléments finis	194
IV.4.2.2. Extrapolation du comportement viscoélastique à 50 ans.....	196
IV.4.3. Conclusion	205
IV.5. Conclusion.....	206

IV.1. Introduction des sciences du bois à l'ingénierie

L'objectif de ce chapitre est de proposer des applications à visée technologique des outils présentés dans les chapitres précédents. Le compromis entre la complexité de l'approche scientifique et la facilité d'usage technologique des résultats dépend beaucoup du champ d'application.

Dans un premier temps, nous présentons une approche plus fine de prédiction de l'état hydrique dans le volume, adaptée à une approche ingénieur. Ensuite, dans un objectif final d'affiner la prédiction du coefficient d'amplification des déformées finales k_{def} , nous présentons une utilisation pratique du modèle mécanique avec la prise en compte ou non de certains défauts macroscopiques des pièces de structure pour aboutir à une proposition simple et réaliste de ce coefficient dans l'Eurocode 5.

Aujourd'hui, l'équilibre hydrique est estimé de manière réglementaire à partir d'un unique abaque. Cette approche est trop simplifiée pour déterminer l'équilibre hygroscopique de toutes les essences. En effet, elle ne rend pas compte des différences de comportement hydrique entre essences pourtant visibles dès qu'on étudie la teneur en eau de saturation. A partir de l'approche thermodynamique présentée au chapitre 2, nous proposons donc un jeu d'abaques par essence.

Dans une approche du comportement différé d'un élément de structure, une analyse par humidité homogène dans la section est également trop simplifiée. Nous proposons alors un modèle de transfert de masse dans la section transverse d'un élément de structure. Cette approche permet de calculer l'évolution du front hydrique. Nous pouvons ainsi répondre à plusieurs questions :

- Quelles sont les différences de comportement hydrique des essences étudiées ?
- Quelle est l'impact d'un défaut macroscopique sur le profil d'humidité ?
- Quelle est l'influence de la section sur l'évolution hydrique ?
- L'approche de l'évolution d'humidité d'un élément de structure au travers de l'humidité moyenne permet-elle de rendre compte de l'évolution du profil d'humidité ?

Enfin, l'Eurocode 5 détermine le comportement différé d'un élément de structure via un coefficient k_{def} . Cette approche simplifiée ne permet pas de différencier le comportement mécanique différé entre essence. Elle ne permet pas, non plus, de rendre compte de l'influence de la section sur la réponse différée. De plus, la norme pénalise le chargement d'un élément à forte humidité à partir d'une majoration de +1 du coefficient k_{def} . Nous proposons alors une analyse de sensibilité de l'influence d'un chargement à haute humidité sur le comportement long terme.

IV.2. Apports du modèle de diffusion

IV.2.1. Equilibre hygroscopique

La modélisation des phénomènes de transfert en ambiance variable nous a permis de mieux comprendre les phénomènes de couplages thermo-hydriques. Pour une approche ingénieur, nous proposons d'améliorer la détermination de l'équilibre hydrique d'un élément de structure situé dans un environnement stabilisé. Pour cela, nous proposons de nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique.

Le modèle de diffusion permet de déterminer l'évolution hydrique au sein d'un élément de structure quel que soit son environnement. Nous étudierons ainsi l'influence des écarts des propriétés de diffusion entre essence déterminés dans le Chapitre II sur l'évolution hydrique d'un élément de structure.

IV.2.1.1. Rappel du contexte réglementaire

Aujourd'hui, l'Eurocode 5 ne propose qu'un seul abaque d'équilibre hygroscopique. Cependant, nous avons vu que ce diagramme avait été conçu pour répondre à une problématique de séchage du bois (phase de désorption) et pour différentes essences de résineux (Keylwerth 1964). A la vue des variations de teneur en eau de saturation entre chaque essence, nous pensons que cet unique abaque ne peut pas suffire à la détermination de l'humidité d'équilibre quelle que soit l'essence et l'histoire hydrique.

IV.2.1.2. Proposition de nouveaux abaques d'équilibres hygroscopiques

Précédemment (Chapitre II), nous avons démontré la dépendance de la température sur la teneur en eau de saturation au travers de l'approche thermodynamique proposée par Frandsen :

$$w_s(T) = \left(w_s^0 + \frac{C_{anh}}{C_e} \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_e}{L} \cdot T \right) - \frac{C_{anh}}{C_e} \quad (4.1)$$

Cette approche permet de rendre compte de la dépendance de la teneur en eau de saturation vis-à-vis de la température au travers d'une teneur en eau de référence w_s^0 . A partir de la base de donnée Tropix du Cirad (Gérard et al., 2011), nous pouvons déterminer la relation $w_s(T)$ pour chacune des essences souhaitées, Figure 144.

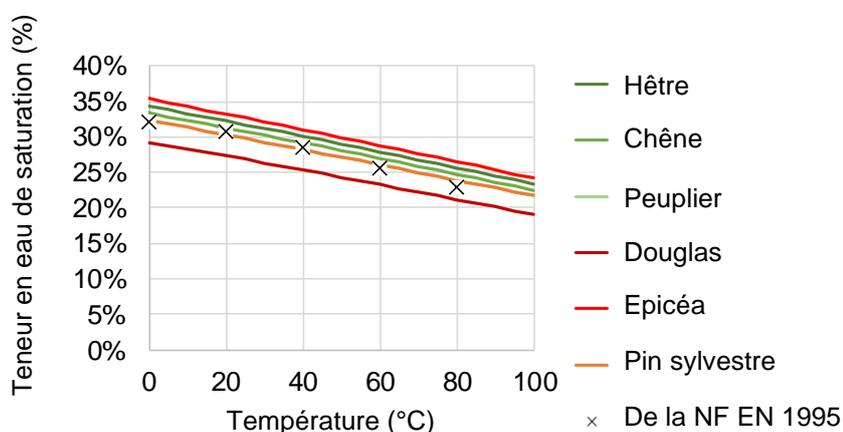


Figure 144 Influence de la température sur w_s

Nous en déduisons que la température a une influence sur l'équilibre hygroscopique au travers de la teneur en eau de saturation. Ainsi, cette correction permet de déterminer les isothermes de sorption de chaque essence et pour chaque température. De plus, nous avons montré que les isothermes de sorption pouvaient se classer suivant deux familles, à savoir, la famille des feuillus et la famille des résineux. Ainsi, en regroupant, d'une part, l'influence de la température sur la teneur en eau de saturation et, d'autre part, les deux familles d'isotherme de sorption, nous pouvons créer des abaques d'équilibres pour chaque essence aussi bien en adsorption qu'en désorption. La Figure 145 représente un exemple d'abaque pour le douglas.

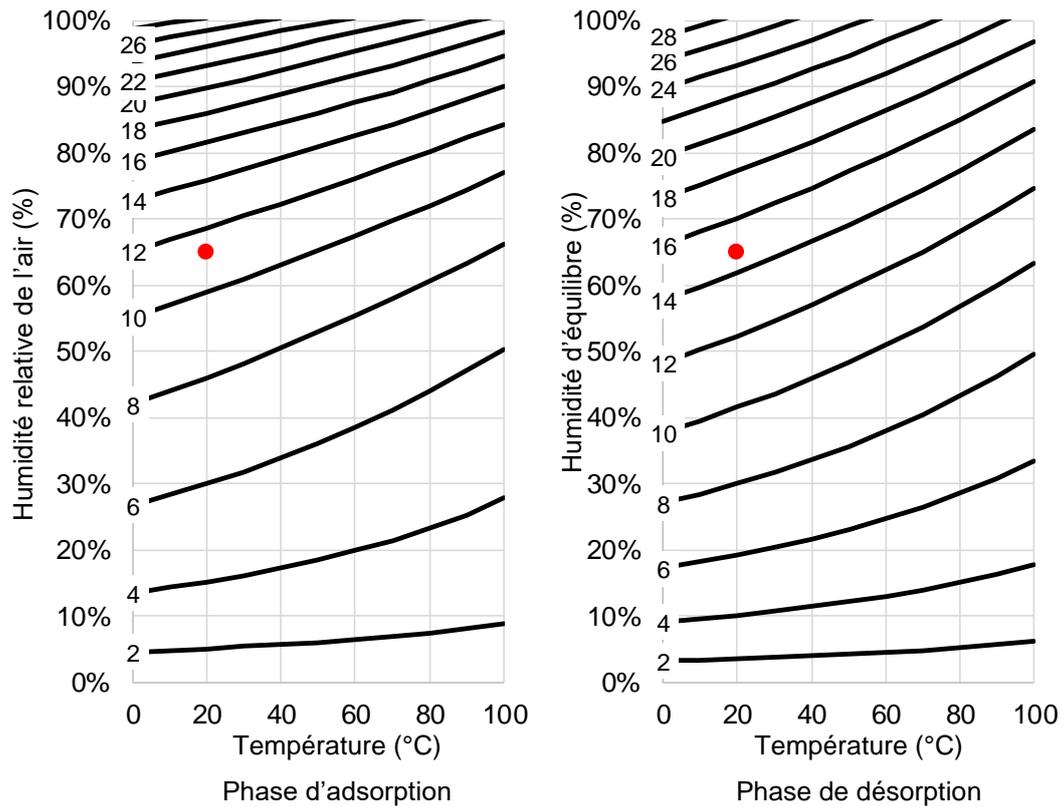


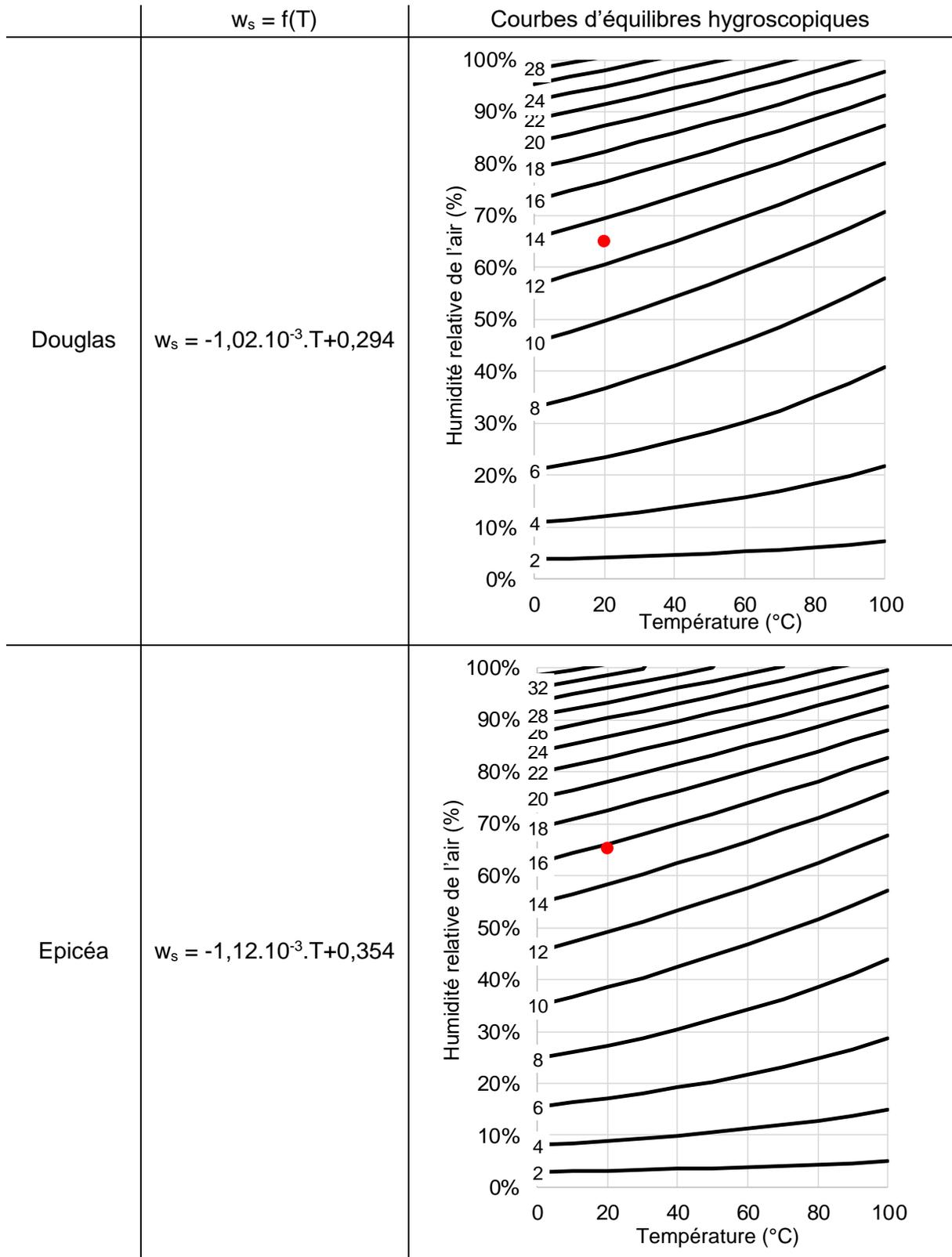
Figure 145 : Diagramme d'équilibre hygrosopique du douglas selon la phase de sorption

Ainsi, nous pouvons retracer les abaques d'équilibre hygrosopique pour chaque essence. Pour cela il faut déterminer sa famille : feuillus/résineux et connaître une valeur de teneur en eau de saturation pour une température donnée.

Pour un environnement caractérisé par une humidité relative de 65% et une température de 20°C, l'Eurocode 5 donne une valeur d'humidité d'équilibre à 12,5%. Au regard des nouveaux abaques proposés, et pour un Douglas, la simple prise en compte du chemin de sorption et la correction de l'influence de la température font varier l'humidité d'équilibre entre de 11,2% à 14,5%. Cette approche demeure plus précise tout en gardant une certaine conformité avec l'abaque proposé actuellement dans l'Eurocode 5.

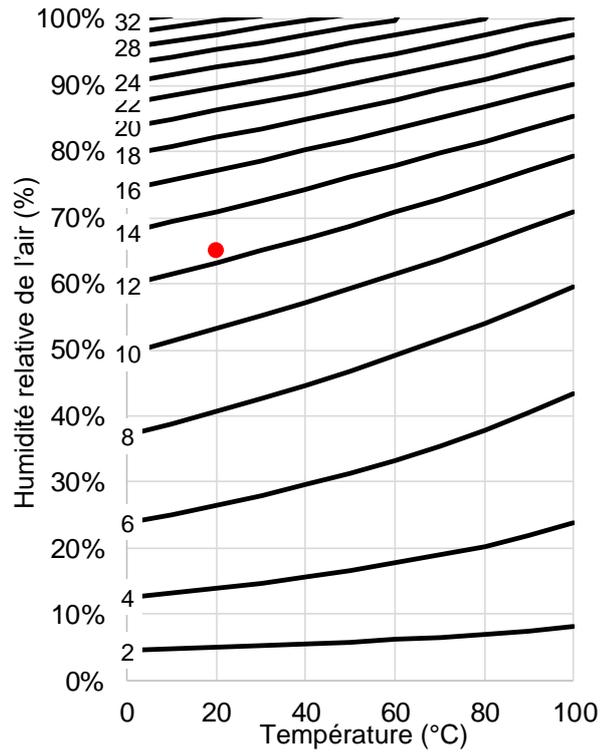
IV.2.1.3. Simplification des abaques d'équilibres

L'histoire hydrique des pièces de bois d'œuvre étant rarement connue avec précision, il n'est pas concevable de proposer, pour chaque essence, un diagramme hygrosopique pour la phase d'adsorption et pour la phase de désorption. De plus, les éléments structuraux n'étant jamais en équilibre dans un environnement variable, la teneur en eau se place toujours entre l'isotherme d'adsorption et de désorption. Ainsi, nous pouvons simplifier cette représentation en un seul diagramme d'équilibre hygrosopique médian entre adsorption et désorption, Figure 146.



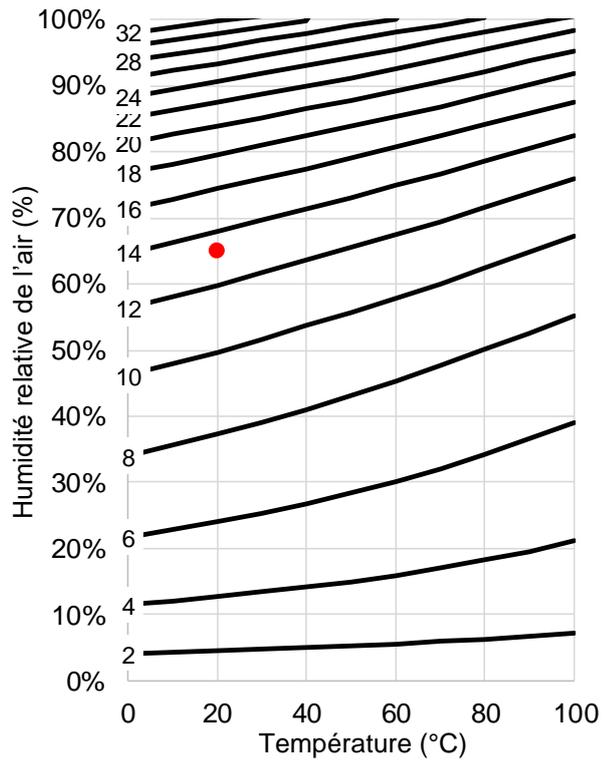
Peuplier

$$w_s = -1,07 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,324$$



Hêtre

$$w_s = -1,10 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,344$$



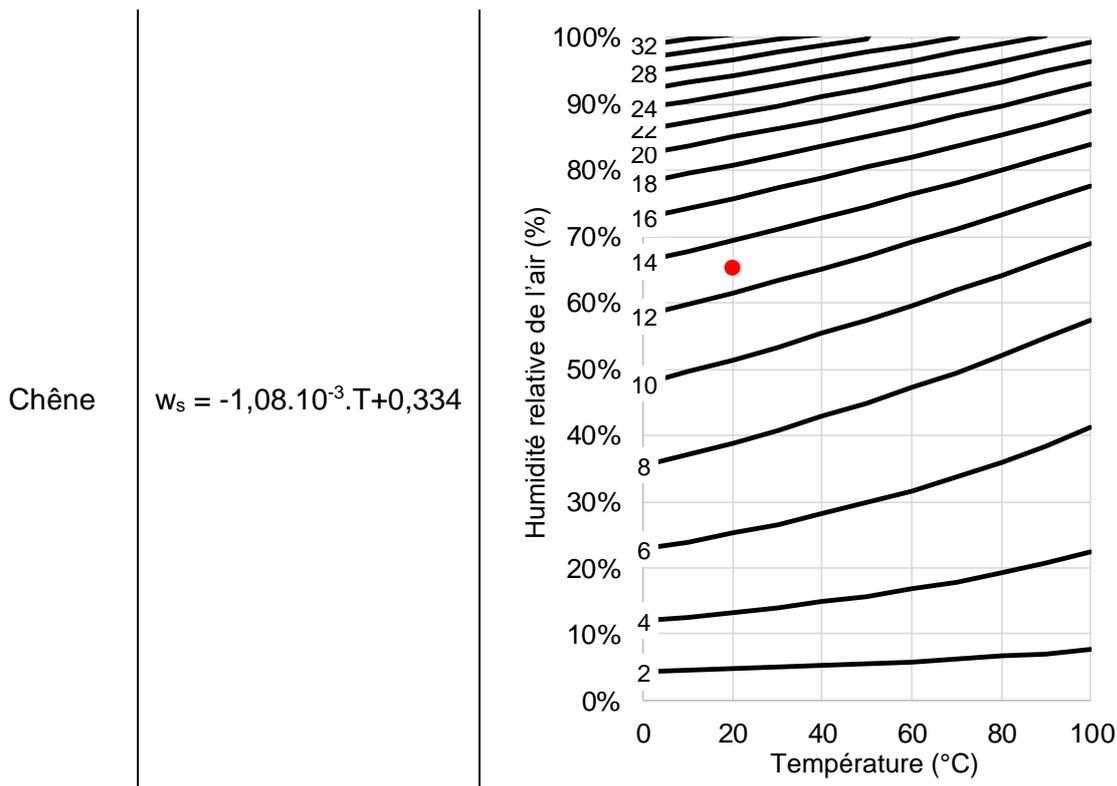


Figure 146 : Diagrammes d'équilibres hygroscopique des quelques essences, et variation des valeurs d'humidité pour le couple 20°C / 65% HR

Bien connaître l'équilibre hydrique peut être important pour des problématiques de séchage, de collage (CLT, lamellé collé) ou encore de comportement mécanique. Par exemple, la norme EN 384 (AFNOR, 2016c) propose une correction de la résistance en compression des résineux en fonction de leur humidité. Elle diminue de 3% par % de teneur en eau. De plus, les travaux, de la tâche 3 du projet EFEUR5 sur le comportement mécanique instantané, annoncent une influence de l'humidité sur la résistance en compression des feuillus de 7% par % de teneur en eau. Il est donc important de bien connaître l'état d'équilibre hydrique de l'élément d'étude.

Pour conclure sur l'impact de ces nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique, le Tableau 29 donne l'humidité moyenne à 20°C et 65%HR pour différentes essences de résineux et de feuillus. Enfin, il indique l'écart de teneur en eau par rapport à la valeur donnée par l'Eurocode 5, à savoir, $w = 12,5\%$. Pour cet équilibre thermo-hydrique, nous constatons une différence d'équilibre d'humidité interne dépassant 2% pour plusieurs essences.

Tableau 29 : Comparaison de la teneur en eau à l'équilibre pour un environnement de HR = 65% et T = 20°C, et l'écart par rapport à la valeur de l'Eurocode 5 ($w = 12,5\%$)

Essence	$w(\text{HR} = 65\%/T+20^\circ\text{C})$	Δw
Douglas	12,9%	+0,4% ± 1,8%
Pin sylvestre	14,3%	+1,8% ± 2,0%
Sapin	13,4%	+0,9% ± 1,8%
Mélèze	12,5%	0,0% ± 1,7%
Epicéa	15,7%	+3,2% ± 2,1%
Peuplier	12,4%	-0,1% ± 2,0%
Hêtre	13,2%	+0,7% ± 2,1%

Chêne	12,8%	+0,3% ± 2,0%
Châtaignier	12,4%	-0,1% ± 2,1%
Merisier	10,4%	-1,9% ± 1,7%
Robinier	12,4%	-0,1% ± 2,1%

La valeur d'entrée de la teneur en eau de saturation est donc la principale donnée. Pour estimer l'impact de l'incertitude sur cette valeur, une variation de $\pm 1\%$ de teneur en eau de saturation va induire une variation de teneur en eau d'équilibre de $\pm 0,46\%$ pour les résineux et de $\pm 0,40\%$ pour les feuillus pour un environnement de 65% et 20°C.

IV.2.2. Identification des champs hydriques 3D à long terme et par essence

Pour une approche structure, la prise en compte de l'humidité sur le comportement mécanique au travers d'une humidité moyenne est-elle suffisante ? Un élément en flexion aura ses fibres extrêmes, les plus sollicitées mécaniquement, soumises à plus de variations hydriques que celles à cœur. Ainsi, une approche mécanique différée, au travers d'une humidité homogène dans la section, ne permet peut-être pas de prédire le comportement différé avec justesse. Une étude plus précise à partir d'un champ d'humidité hétérogène doit être effectuée.

Cependant, nous avons remarqué que les propriétés de diffusion présentaient peu de variations inter essence dans le sens transversal. Nous pouvons alors nous demander quelle sera l'influence de ces variations de propriétés de diffusion sur des éléments de structures ?

IV.2.2.1. Protocole numérique

Nous proposons de comparer le comportement thermo hydrique des trois essences de feuillus et du douglas au travers un protocole numérique. Pour une durée de 5 ans, le modèle numérique est employé pour étudier le transfert de masse et de chaleur au sein d'une section de poutre de 75x150 mm². Afin de comparer la réponse hydrique de ces quatre essences, les calculs sont réalisés dans deux environnements différents. Toutefois, la distribution du champ hydrique initial étant rarement connue, nous écartons son influence en considérant une humidité initiale homogène de 12% pour une température de 20°C.

IV.2.2.2. Environnements climatiques

Plutôt que d'utiliser des enregistrements d'ambiance, nous avons préféré recréer des climats annuels type qui ont l'avantage de montrer une périodicité facilitant l'interprétation. Nous avons ainsi défini un environnement correspondant à une classe de service 1, et l'autre à une classe de service 3. Nous avons créé ces environnements à partir d'une association de trois sinusoïdes. Afin de reproduire un climat océanique Européen, les fonctions de température et d'humidité relative représentent respectivement les évolutions saisonnières ($P_1 = 360$ jours), les effets anticycloniques ($P_2 = 15$ jours) et les variations quotidiennes ($P_3 = 1$ jour). Elles sont définies de la façon suivante :

$$HR(t) = \text{MIN} \left(1 ; \overline{HR} + \sum_{i=1}^3 HR_i \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{P_i} \cdot t - \varphi_i^{HR} \right) \right) \quad (4.2)$$

$$T(t) = \text{MAX} \left(T_{\min} ; \bar{T} + \sum_{i=1}^3 T_i \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{P_i} \cdot t - \varphi_i^T \right) \right) \quad (4.3)$$

Les amplitudes climatiques sont précisées dans le Tableau 30. L'évolution temporelle de l'humidité relative est en opposition de phase avec la température pour la classe de service 3, et ce, pour les périodes annuelle, séquentielle et quotidienne ($\varphi_i^{\text{HR}} = \varphi_i^T + \pi$). Cependant, pour la classe de service 1, nous souhaitons retrouver les conditions d'un habitat intérieur avec saison de chauffe. Ainsi, le cycle annuel d'humidité et de température sont en phase pour retrouver une période hivernale sous consigne de chauffage stable avec une humidité ambiante plus faible. Enfin, l'évolution de l'humidité relative est bornée entre 0% et 100%. Quant à celle de la température, elle est bornée à $T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ dans l'environnement de type CS3 pour des problématiques de modélisation de transfert de masse en dessous de 0°C .

Tableau 30 : Valeurs des paramètres climatiques pour les deux environnements

	CS1			CS3		
	Annuel	Séquentiel	Journalier	Annuel	Séquentiel	Journalier
<i>HR</i>	<i>HR</i> ₁ 10%	<i>HR</i> ₂ 7,5%	<i>HR</i> ₃ 5%	<i>HR</i> ₁ 15%	<i>HR</i> ₂ 10%	<i>HR</i> ₃ 5%
<i>T</i>	<i>T</i> ₁ 2,5°C	<i>T</i> ₂ 1,25°C	<i>T</i> ₃ 1,25°C	<i>T</i> ₁ 12,5°C	<i>T</i> ₂ 5°C	<i>T</i> ₃ 5°C

Enfin les valeurs moyennes des cycles sont telles que :

$$\begin{aligned} \text{CS1 : } \overline{\text{HR}} &= 47,5\% \\ \bar{T} &= 20,5^\circ\text{C} \\ \text{CS3 : } \overline{\text{HR}} &= 83,0\% \\ \bar{T} &= 13,0^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Sont représenté en

Figure 147 les évolutions annuelles de température et d'humidité relative pour les deux environnements. Afin d'éviter les chocs thermo-hydriques, les évolutions débutent sur une période de température et d'humidité moyenne correspondant à un début de printemps, limitant ainsi l'influence des conditions initiales.

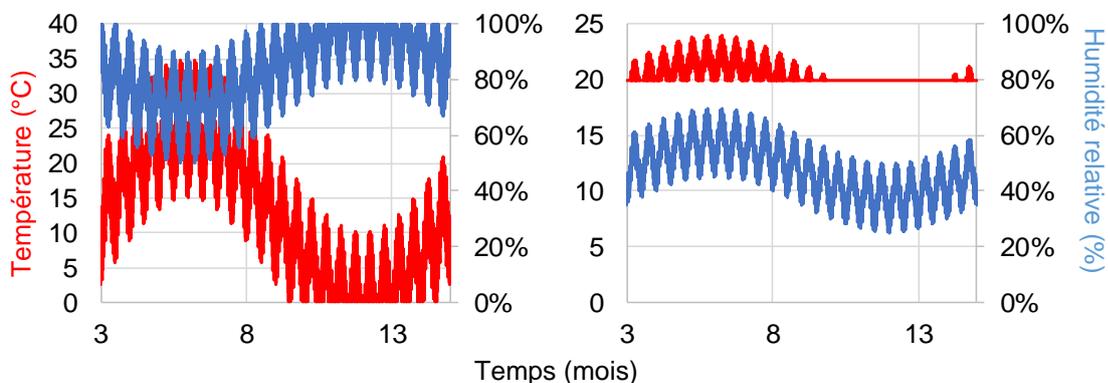


Figure 147 : Evolutions climatiques des deux environnements : extérieur équivalent CS3 (à gauche) et intérieur équivalent CS1 (à droite)

Les cycles sont répétés 5 fois afin de constituer le chargement thermo-hydrigue d'une simulation sur 5 ans.

IV.2.2.3. Résultats de simulation

IV.2.2.3.1. Humidité moyenne

La Figure 148 représente les évolutions de la teneur en eau moyenne des poutres situées dans les deux environnements.

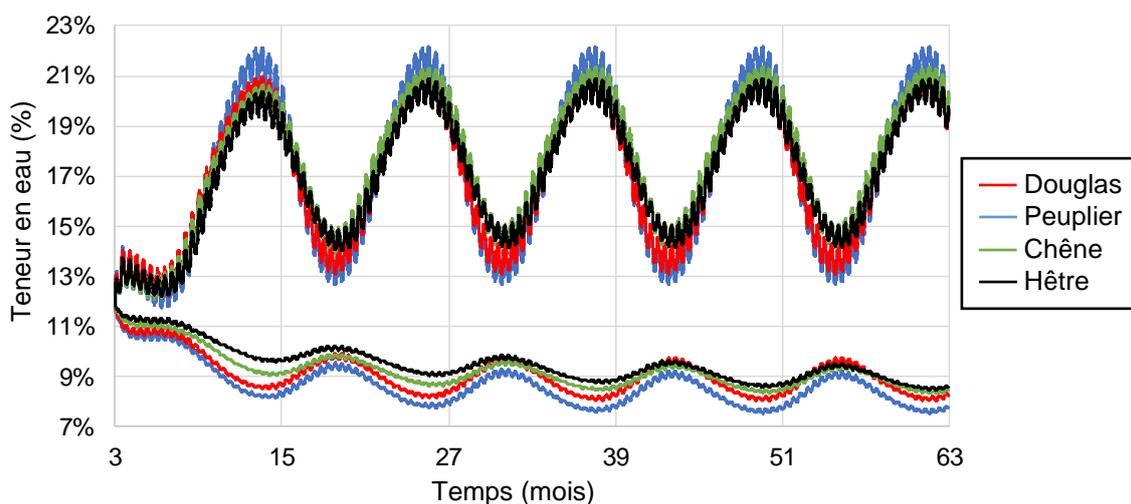


Figure 148 : Evolution de la teneur en eau des quatre essences dans les deux environnements

Ces résultats mettent en évidence la différence de comportement entre les deux environnements quelle que soit l'essence. Cette représentation met également en avant l'influence des écarts de propriétés de diffusion entre les essences. On remarquera que les essences de douglas et de peuplier présentent des amplitudes de variations hydriques annuelles plus importantes que les deux autres essences de feuillus. Ces deux essences ayant des coefficients de diffusion plus forts, elles sont donc plus réactives. Ainsi, nous pouvons analyser les amplitudes d'humidification entre les essences au cours de cette dernière année, Tableau 31.

Tableau 31 : Amplitude, moyenne, et valeur finale de teneur en eau au cours de la dernière année

Essence	Classe de service 1			Classe de service 3		
	Amplitude	Moyenne	Finale	Amplitude	Moyenne	Finale
Douglas	1,7%	8,8%	8,2%	7,9%	17,2%	19,6%
Peuplier	1,7%	8,3%	7,7%	9,5%	17,4%	20,2%
Chêne	1,1%	8,8%	8,4%	7,2%	17,9%	20,2%
Hêtre	1,0%	8,9%	8,6%	6,8%	17,5%	19,6%

En classe de service 1, les essences de peuplier et de douglas présentent des teneurs en eau moyennes sur la dernière année, et des teneurs en eau à la fin de la période d'essai, plus faibles. De plus, ce sont les deux essences qui présentent les plus fortes amplitudes de variations hydriques. En classe de service 3, elles présentent également les plus fortes amplitudes annuelles ; le peuplier présentant une réactivité réellement plus élevée que les autres. Ainsi, conformément aux propriétés de diffusion déterminées précédemment le douglas et le peuplier présentent les cinétiques hydriques les plus importantes. A forte

humidité, l'essence de peuplier est également plus réactive, comme le montre sa sensibilité à l'humidité (Figure 64). Cependant, leurs isothermes étant différentes, nous pouvons nous questionner sur l'importance de la modélisation de l'hystérésis lors de l'étude d'un élément de structure. Les deux autres essences de feuillus présentent des amplitudes plus faibles et des teneurs en eau d'équilibre à 5 ans légèrement plus élevées. Cependant, nous sommes en droit de se questionner de la façon suivante :

- Les écarts de comportement hydrique, entre les différentes essences, sont-ils si importants ?
- Quelle est l'influence de ces propriétés de diffusion sur le profil d'humidité ?

IV.2.2.3.2. Profil d'humidité

Pour un élément de structure en flexion, ce sont les fibres supérieures et inférieures qui vont être les plus sollicitées. Les variations hydriques sont plus importantes en périphérie et entraînent des variations de propriétés élastiques. Nous souhaitons quantifier l'impact de la différence de comportement hydrique entre ces essences en étudiant des profils d'humidité sur la hauteur des poutres.

L'analyse proposée est limitée à la dernière année de simulation pour se rapprocher d'un état stabilisé. Les Figure 149 et Figure 150 représentent les extrema en tous points répartis sur la hauteur des poutres ainsi que l'écart entre ces extremums en fonction de la hauteur des poutres. Ces représentations permettent ainsi de visualiser les variations du front hydrique en fonction des essences et de l'environnement.

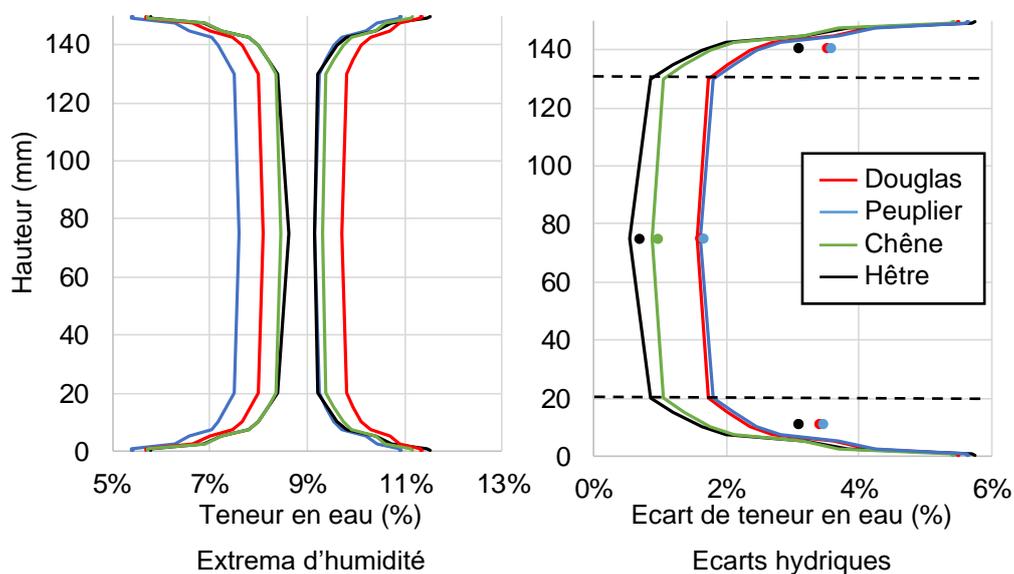


Figure 149 : Variations hydrique dans la hauteur au cours de la dernière année en classe de service 1 ; les moyennes des variations hydriques à cœurs et sur la couche de peau est représenté par les ronds

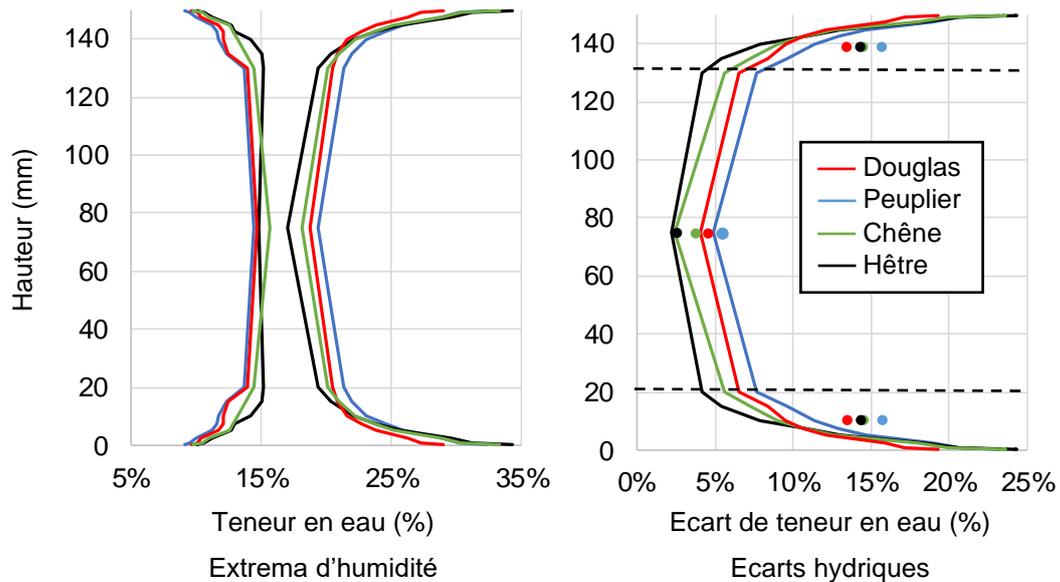


Figure 150 : Variations hydrique dans la hauteur au cours de la dernière année en classe de service 3 ; les moyennes des variations hydriques à cœurs et sur la couche de peau est représenté par les ronds

La comparaison entre les Figure 149 et Figure 150 montre l'influence de l'environnement, tant en termes d'humidité d'équilibre globale que de variations le long de la hauteur de la poutre. Globalement, les comportements observés sont identiques avec un effet d'amplification en environnement humide. Ainsi, la représentation des extremums en classe de service 1 montre que l'élément de structure aura une humidité toujours inférieure à 20%. En classe de service 3, une bande périphérique, d'une largeur supérieure à 10mm présentera une humidité supérieure à 20%, et ce, quelle que soit l'essence considérée. Cette forte teneur en eau amène un risque d'attaque fongique. La comparaison inter essence confirme l'ordre de réactivité de diffusion qui a pu être mis en avant dans le paragraphe précédent.

Enfin, quel que soit l'environnement et l'essence, nous pouvons remarquer que les échanges hydriques se font majoritairement sur les vingt premiers millimètres de hauteur de la poutre (Figure 149, Figure 150 et Tableau 32).

Tableau 32 : Moyenne des variations hydriques sur la partie centrale et sur les 20mm de peau

Essences	CS1		CS3	
	$\Delta W_{\text{moy cœur}}$	$\Delta W_{\text{moy peau}}$	$\Delta W_{\text{moy cœur}}$	$\Delta W_{\text{moy peau}}$
Douglas	1,7%	3,8%	5,7%	13,7%
Peuplier	1,7%	3,7%	6,8%	15,8%
Chêne	1,0%	3,3%	4,5%	14,5%
Hêtre	0,7%	3,3%	4,0 %	14,3%

Ces résultats mettent en avant les différences de comportement entre essences. Alors que toutes les essences présentent les mêmes variations hydriques sur la couche externe, c'est au niveau de l'humidification à cœur que se fait la différence. Ainsi, le modèle permet de déterminer de façon précise le profil de variations d'humidité. Pour une approche ingénieur, nous proposons une différenciation spatiale de la section d'un élément de structure. Tout d'abord, une partie en périphérie de la poutre présente de fortes variations d'humidité au cours

de l'année. En classe de service 3, cette épaisseur en peau sera alors sensible aussi bien aux attaques fongiques qu'aux risques de fissuration par retrait avec des variations annuelles hydriques supérieure à 10%, et ce, sur une bande périphérique de 20mm de largeur.

Une seconde partie, est différenciable elle est le centre de la poutre. Dans le cas d'élément massif, elle représente la partie qui intervient majoritairement dans l'étude mécanique.

Cependant, ces écarts restent faibles. Sur la base des mesures présentées au Chapitre II, il persiste des variations des propriétés de diffusion sur des éprouvettes sans défaut. A l'échelle d'un élément de structure, des défauts anatomiques peuvent perturber le comportement hydrique comme, par exemple, la présence de nœuds et des déviations de fil. Afin de relativiser les écarts de comportement hydrique inter essences, l'impact d'une variation de pente de fil est étudié.

IV.2.2.4. Influence de la pente de fil

L'influence d'une pente de fil sur la diffusion hydrique est reprise selon l'approche simplifiée présentée précédemment. La Figure 151 représente la réponse du modèle de transfert de masse pour une poutre de douglas avec une pente de fil globale de 1:14 (7%), valeur maximale admise pour les résineux dans la NF EN 52-001 pour la classe ST I. pour les feuillus, les valeurs proposées dans cette norme sont bien supérieures. Pour un douglas, l'évolution de teneur en eau, en prenant en compte une pente de fil, est superposée aux réponses des différentes essences présentées en Figure 148.

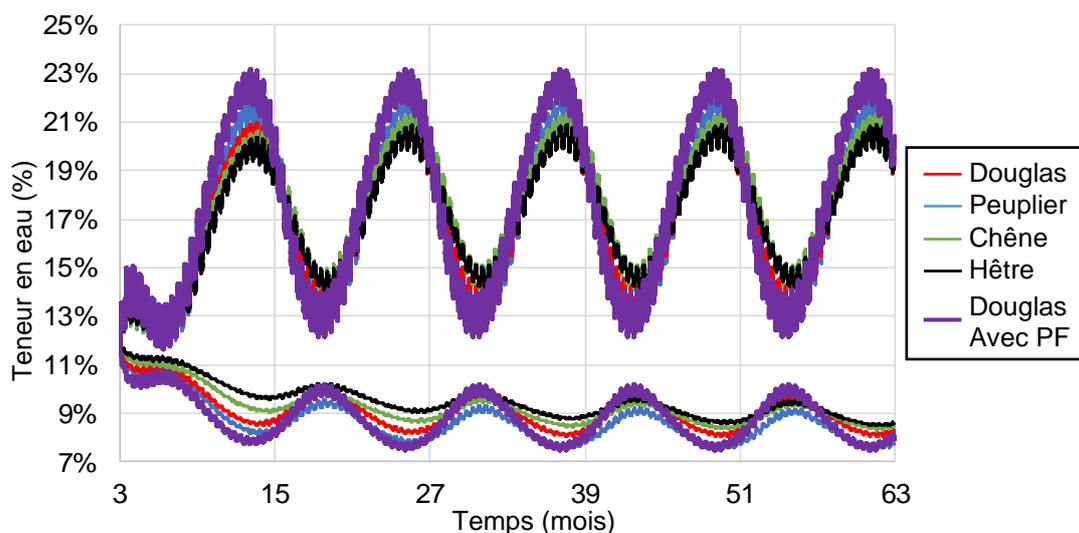


Figure 151 : Influence de la pente de fil sur la réponse hydrique long terme

Quel que soit l'environnement, la prise en compte de la pente de fil vient augmenter le transfert de masse de façon considérable, et ce, avec une amplitude annuelle de 2,7% et 11,1% en classe de service 1 et 3, respectivement. La prise en compte d'une pente de fil de 7% vient influencer la teneur en eau moyenne de façon bien plus considérable que les écarts entre essences. La pente de fil a donc un impact sur le profil hydrique qui semble écraser les différences de comportement inter essences.

IV.2.3. Conclusion

Dans un premier temps nous avons proposé une nouvelle approche plus précise de détermination de l'équilibre hydrique. En connaissant l'essence de la pièce de bois, ainsi que

sa teneur en eau de saturation à une température donnée, l'approche permet de tracer le diagramme d'équilibre hygrosopique de cette essence spécifique. Au vu des variations des propriétés d'équilibres hygrosopiques au sein d'une même essence, et pour une utilisation simplifiée, nous proposons un diagramme d'équilibre moyen pour chaque essence.

En comparant les valeurs d'équilibres dans un environnement à 20°C, 65% HR, on a montré que cette approche permet une meilleure connaissance de l'équilibre hydrique d'élément en bois.

L'outil est donc applicable pour toute utilisation spécifique où l'humidité du bois doit être connue avec précision : stabilisation, collage, usinage, finition, et évidemment structure.

Pour l'étude d'un élément de structure, le gradient spatial d'humidité peut être important. Ainsi, dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux différences hydriques dans la section pour différentes essences de bois. Nous avons appliqué les modèles de diffusion hydrique à des pièces d'échelle structurale, dans des environnements thermo hydriques simplifiés mais toutefois cohérents avec une classe de service 1 et 3.

Les résultats, présentés sur une période de 5 années, permettent de montrer les différentes réponses modélisées en fonction des essences, tant en valeur d'équilibre qu'en profil.

Nous avons ainsi pu montrer l'impact de l'environnement sur la section d'une poutre. Dans ce cas, nous avons montré que le front d'humidification était présent jusqu'à 20mm d'épaisseur. Au-delà, l'humidification de l'élément ne se fait que de quelques pourcents. Nous proposons ainsi une différenciation du comportement d'une poutre en deux régions, à savoir, une première partie en périphérie qui est sensible à l'humidité (dans laquelle nous pouvons étudier les risques de fissurations ou d'attaques fongiques) et une autre partie centrale, qui aura un couplage thermo-hydrique moins marqué.

Enfin, à l'échelle d'un élément de structure présentant potentiellement des défauts anatomiques, la perturbation des échanges hydriques par la forte orthotropie des coefficients de diffusion vient en grande partie écraser les variations inter essences observées sur des échantillons sans défaut.

IV.3. Extrapolation aux feuillus du comportement différé réglementaire du douglas

Dans le Chapitre III, nous avons déterminé les propriétés viscoélastiques hygro activées sur les huit poutres en classe de service 2. Tous les paramètres ont été laissés libres et seul l'adéquation finale entre résultats expérimentaux et modèle a permis de déterminer le meilleur jeu de paramètres. Cependant, cette approche d'identification de l'ensemble des paramètres viscoélastiques hygro activés n'a pas permis de différencier le comportement différé des feuillus par rapport au douglas ; les différents paramètres ayant parfois des effets compensatoires. Nous proposons donc une démarche alternative de calage. Les paramètres du modèle mécanique sont optimisés pour répondre au comportement du douglas en imposant la seule valeur réglementaire désignée par k_{def} . Le résultat ainsi obtenu est considéré comme le comportement viscoélastique de référence des résineux. Les données expérimentales (obtenues sur les feuillus) permettront, par la suite, de déterminer la valeur de k_{def} associée pour ces trois essences.

IV.3.1. Propriétés viscoélastiques hygro activée du douglas

La valeur de k_{def} , donnée dans l'Eurocode 5 pour les poutres de douglas étant de 0,8 en classe de service 2, il ne reste plus qu'à identifier la répartition temporelle de k_{def} et le coefficient d'hygro activation visqueux A_w . Le Tableau 33 récapitule les paramètres viscoélastiques (identifiés sur les deux poutres D1 et D2) ainsi que les paramètres correspondant au comportement de référence égale à la moyenne des paramètres.

Tableau 33 : Paramètres viscoélastique du douglas et du comportement de référence

		D1	D2	Comportement de référence
k_{def} fixé	Temps caractéristiques	0,8	0,8	0,8
A		130	150	140
Ψ_{t1}	1 semaine	0,05	0,05	0,05
Ψ_{t2}	6 mois	0,15	0,20	0,17
Ψ_{t3}	10 ans	0,50	0,50	0,50
Ψ_{t4}	50 ans	1,0	1,0	1,00

Il est encore supposé ici que l'ouverture des amortisseurs est complète, à la valeur κ près, pour une durée de projet de 50 ans. La Figure 152 présente l'évolution de la flèche différée pondérée par la flèche instantanée expérimentale ainsi que la réponse du modèle avec le comportement de référence.

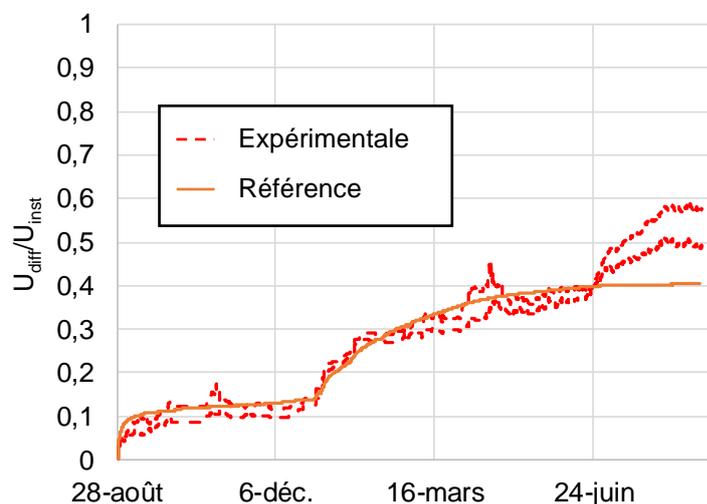
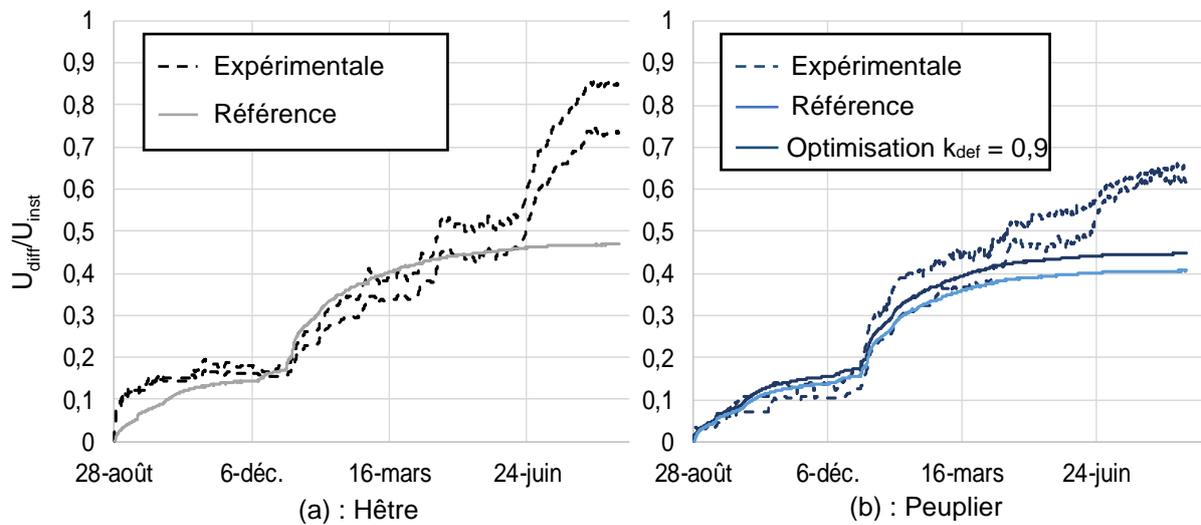


Figure 152 : Comparaison expérimental/modèle du comportement différé pondéré par la flèche instantanée

Il faut rappeler ici que les dégradations de fissuration observées en avril et en juin ne sont pas prises en compte dans le modèle. Au-delà du 24 juin, l'endommagement des poutres perturbe, de façon non négligeable, le comportement long terme pour proposer un calage satisfaisant.

IV.3.2. Cas du hêtre et du peuplier

La réponse différée des essences de hêtre et de peuplier est donnée en Figure 153. Nous rappelons que l'humidité initiale de ces éléments a été fixée à 12%.



Le comportement de référence permet d'approcher de manière satisfaisante les mesures sur ces deux essences. Du début de l'essai jusqu'à la période de choc thermo hydrique du 20 avril, le comportement de référence permet de rendre compte de l'évolution expérimentale du hêtre. Toutefois, on remarquera qu'une des poutres de peuplier présente une déformation long terme légèrement supérieure à l'autre. Elle présente donc des propriétés viscoélastiques hygro activées légèrement plus importantes que celles du comportement de référence. Le paramètre d'hygro-activation A_w étant fixé pour le comportement de référence, une légère augmentation de k_{def} permettrait d'améliorer le calage du peuplier. Le comportement optimisé, présenté en Figure 153-b, est basé sur une valeur de k_{def} égale à 0,9.

IV.3.3. Cas particulier du chêne

La Figure 154 représente la comparaison entre la modélisation du comportement de référence et les évolutions expérimentales de flèche différée.

Dans un premier temps, nous remarquons, à la vue des résultats, que, pour ces deux poutres, les propriétés viscoélastiques du comportement de référence ne correspondent pas au chêne. De plus, nous notons la différence de comportement entre les deux poutres. Le comportement « optimisé » proposé est calculé à partir d'une valeur k_{def} de 1,3.

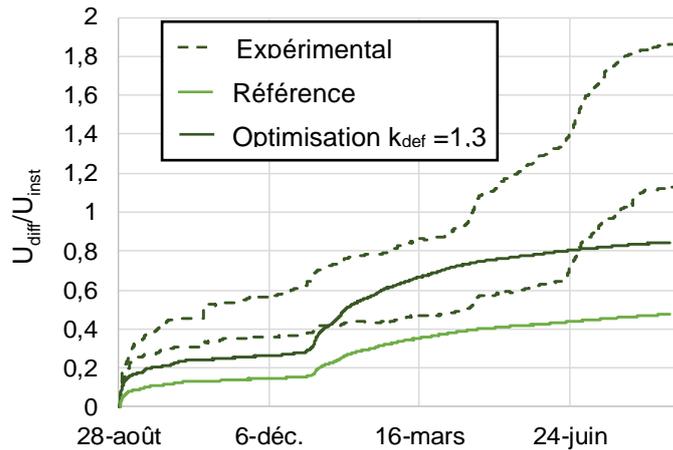


Figure 154 : Comparaison expérimental/modèles du comportement différé

Comme cela a été présenté précédemment, les poutres de chêne présentent une particularité expérimentale. En effet, lors de la mise en charge, leur humidité initiale était de 26%. L'hygro activation du comportement viscoélastique, via a_w , vient modifier la valeur des temps d'ouvertures des amortisseurs des quatre cellules de Kelvin Voigt. Sa forme exponentielle la rend très sensible à des humidités supérieures à la teneur en eau de référence ($w_{ref} = 12\%$). Par exemple, pour une teneur en eau de 26% et pour un coefficient d'hygro activation A_w de 140, l'accélération du fluage est multipliée par 563, comme le prouve l'expression suivante :

$$a_w = e^{A_w \cdot \left(\frac{1}{w_{ref}} - \frac{1}{w} \right)} = e^{140 \cdot \left(\frac{1}{12} - \frac{1}{26} \right)} = 0,00178 \text{ et donc } t(w) = \frac{\tau}{a_w} = 563 \cdot \tau \quad (4.5)$$

Ainsi, au bout d'un an d'essai, le temps d'ouverture moyen du système est de 41 années (pour une humidité de référence de 12%).

Cette analyse met en défaut le modèle. Les paramètres modèles, choisis pour le comportement de référence à 12%, ne permettent pas de modéliser correctement de forts adoucissements induits par de hautes humidités. Cette « accélération » du temps par humidification induit une remise en question du nombre de cellule de Kelvin Voigt à associer au modèle. Ainsi, afin de prendre en compte des teneurs en eau élevées, nous devons ajouter des cellules avec des temps caractéristiques à 12% dépassant 50 ans.

A partir d'une étude de sensibilité, deux cellules de Kelvin Voigt ont été ajoutées en accord avec les propriétés données dans le Tableau 34. Les valeurs de répartition temporelle de ψ_{ti} sur ces deux dernières cellules sont définies de façon à proposer une évolution logarithmique du ratio d'ouverture du système en fonction du temps.

Tableau 34 : Paramètres viscoélastiques du modèle de Kelvin Voigt généralisé à 6 cellules

Temps	Temps caractéristique	ψ_{ti}
Court terme	1 semaine	0,05
Moyen terme	6 mois	0,175
Long terme	10 ans	0,5
Permanent	50 ans	1,0
Très permanent	500 ans	1,5
Infini	5 000 ans	2,0

La Figure 155 représente la réponse du modèle correspondant. L'introduction des cellules supplémentaires permet d'avoir une ouverture plus progressive de l'ensemble du modèle. Une valeur de k_{def} de 0,8 est toutefois trop faible pour s'approcher des résultats expérimentaux. La réponse mécanique différée est finalement optimisée avec une valeur k_{def} de 1,0.

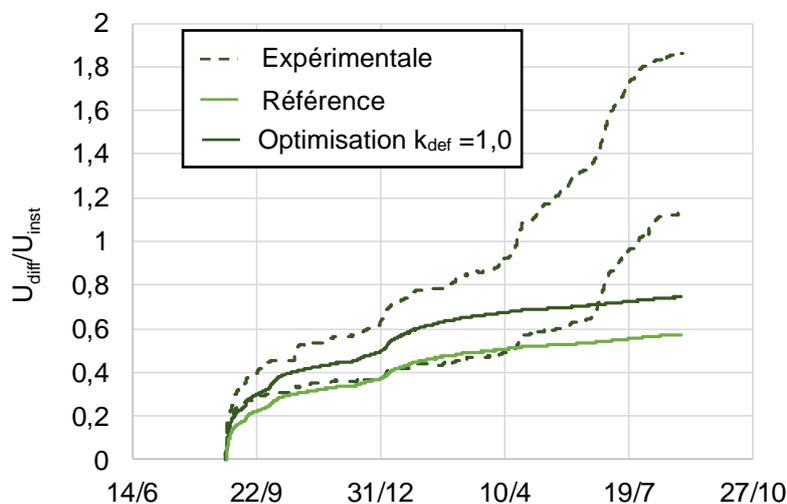


Figure 155 : Comparaison expérimentation/modélisation du comportement différé pondéré pour le chêne

Le modèle à 6 cellules de Kelvin Voigt a été testé sur les six autres poutres. Avec leur taux d'humidité initial beaucoup plus faible, les deux cellules complémentaires se sont trop peu ouvertes pour influencer la réponse différée. Ainsi, les analyses précédentes ne sont pas erronées par manque de capacité d'ouverture du modèle de Kelvin Voigt généralisé.

IV.3.4. Conclusions

En se basant sur le comportement du douglas en classe 2, un modèle de référence de type résineux a été proposé en s'appuyant sur la valeur réglementaire de k_{def} de 0,8. Il apparaît que les résultats obtenus sur le hêtre et le peuplier s'accordent relativement bien à cette approche, avec toutefois une possibilité d'augmentation légère du k_{def} pour le peuplier.

Cependant, la modélisation du comportement différé des poutres de chêne a montré une limite du modèle. L'hygro activation revenant à augmenter un temps fictif viscoélastique, il est nécessaire d'optimiser le nombre de cellules de Kelvin Voigt afin de s'assurer que celles qui ont un temps caractéristique important ne soient pas totalement ouvertes au temps de calcul réel. Cette adaptation du modèle à 6 cellules (avec des temps caractéristiques allant jusqu'à 5000 ans) semble être une solution robuste pour modéliser le comportement long terme pour des temps de projet de 50 ans.

Le modèle présenté étant basé sur des comportements viscoélastiques homogènes en absence de singularités, il ne peut pas intégrer leurs effets. De même, l'endommagement de fissuration par retrait n'est pas intégré dans le modèle, ce qui présente une des perspectives de ce travail de modélisation.

IV.4. Adaptation du modèle mécanique pour le dimensionnement ELS

La vérification réglementaire du comportement mécanique des structures résulte toujours d'un compromis entre la précision du calcul et la simplicité de la méthode. L'évaluation de la flèche

différée aux Etats Limites de Service (par l'intermédiaire d'un seul et unique coefficient k_{def} , dépendant de 3 classes de service arbitraires) a un avantage indéniable de simplicité mais néglige beaucoup de paramètres qui pourraient être pris en compte, sans pour autant alourdir les calculs en bureau d'études.

Les différences de propriétés de diffusion hydrique en fonction des essences, même si elles sont différentes à l'échelle matériau, n'impliquent pas d'écarts notables à l'échelle de l'élément de structure. Toutefois, une connaissance plus fine des profils d'humidité permettrait une meilleure expertise du comportement à long terme associée aux réflexions récurrentes sur le rôle de l'eau sur les pathologies des structures en bois (attaques fongiques, fissures de retrait, déformations différées accélérées, etc.). Les gradients d'humidité et ses variations temporelles sont aujourd'hui des questions auxquelles ce modèle peut apporter des réponses. Également, la démystification des classes de service peut être opérée en apportant de réelles sollicitations thermo hydriques en intégrant les effets d'inertie induits par la taille des sections transversales (effet d'échelle). Enfin, le modèle permet de lever le doute sur les conditions hydriques initiales à prendre en compte pour des bois séchés ou non.

Nous proposons donc un jeu de coefficient k_{def} dépendant de ces paramètres afin de conserver cette simplicité de calculs caractérisant l'Eurocode 5. L'ingénieur pourra toujours un dimensionnement simple en apportant une optimisation mécanique et économique de ces futures réalisations. Les challenges apportés par les projets de bâtiments de grande hauteur ou les ouvrages d'art sont des exemples concrets. Cela demande néanmoins une étude paramétrique pour laquelle nous retiendrons plus spécifiquement les écarts relatifs induits par ces différents paramètres plutôt que les valeurs elles-mêmes.

IV.4.1. Etude paramétrique

Les niveaux des paramètres étudiés sont développés par la suite ainsi que la méthodologie de résolution numérique.

IV.4.1.1. Paramètres

IV.4.1.1.1. Sections

La cinétique de diffusion, pourtant très lente, n'est pas prise en compte dans l'Eurocode 5. De plus, l'état d'équilibre est supposé être atteint quelle que soit la section. Il est pourtant évident que l'état d'équilibre en ambiance variable va fortement dépendre de la section. Nous proposons d'étudier les cinq géométries référencées dans le Tableau 35.

Tableau 35 : Cinq géométries d'étude

Géométrie	Section	Commentaire
Géo 1	30x60 mm ²	Type tasseau
Géo 2	45x90 mm ²	Type montant d'ossature
Géo 3	75x150 mm ²	Géométrie référence poutre selon la NF 338
Géo 4	100x200 mm ²	Bois massif de charpente traditionnelle (section seuil NF B 52-001)
Géo 5	300x600 mm ²	Type élément massif reconstitué (pont, ...)

IV.4.1.1.2. Teneur en eau initiale

Actuellement, l'Eurocode 5 impose une majoration du k_{def} de 1 quelque soient l'environnement et la section de la poutre lorsque les éléments en bois sont chargés humide. Nous proposons

d'analyser le comportement différé pour les cinq géométries et pour deux conditions hydriques initiales :

- Humidité homogène à $w_{ini} = 12\%$
- Humidité homogène à $w_{ini} = 24\%$

IV.4.1.1.3. Environnements climatiques fictifs

La prise en compte d'ambiance réaliste, voire enregistrée in situ, est aujourd'hui envisageable pour un coût de calcul compatible avec une conception d'ouvrage. Nous proposons 3 environnements fictifs correspondant aux classes de service définies dans l'Eurocode 5. Pour faciliter l'interprétation de ces calculs, des fonctions sinusoïdales sont utilisées pour composer ces ambiances. Nous avons déjà remarqué que les variations d'humidité journalières n'influencent pas le comportement différé du bois. Ainsi, ces variations sont négligées dans cette étude numérique. Afin de reproduire un climat océanique Européen, les fonctions temporelles de température et d'humidité relative, représentant les évolutions saisonnières ($P_1 = 360$ jours), et les effets anticycloniques ($P_1 = 15$ jours), sont choisies de la façon suivante :

$$HR(t) = \text{MIN} \left(1 ; \overline{HR} + \sum_{i=1}^2 HR_i \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{P_1} \cdot t - \varphi_i^{HR} \right) \right) \quad (4.6)$$

$$T(t) = \text{MAX} \left(T_{\min} ; \bar{T} + \sum_{i=1}^2 T_i \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{P_1} \cdot t - \varphi_i^T \right) \right) \quad (4.7)$$

Les amplitudes climatiques pour les trois environnements sont précisées dans le Tableau 36. Pour les classes de services 2 et 3, l'évolution temporelle de l'humidité relative est en opposition de phase avec la température, et ce, pour les périodes annuelle et séquentielle ($\varphi_i^{HR} = \varphi_i^T + \pi$). Pour la classe de service 1, nous considérons un intérieur chauffé lors de la période hivernale. Ainsi, le cycle annuel d'humidité et de température sont en phase. La température intérieure est donc calée sur une consigne de chauffage à 20°C lors de la saison de chauffe. Pour des problématiques de modélisation de transfert de masse en dessous de 0°C, la température minimale est pour l'instant fixée à 0°C.

Tableau 36 : Paramètres climatiques pour les trois environnements

	CS1			CS2			CS3		
	Annuel	Séquentiel	Moyenne	Annuel	Séquentiel	Moyenne	Annuel	Séquentiel	Moyenne
HR	10%	7,5%	52,5%	15%	20%	79,4%	15%	20%	88,7%
T	2,5°C	1,25°C	21,0°C	12,5°C	5°C	17,5°C	12,5°C	5°C	17,5°C

Les évolutions annuelles de température et d'humidité relative dans les trois environnements sur une année sont représentés sur la Figure 156. La simulation débute à l'équivalence de l'intersaison, ici le 1^{er} mars. Ces chargements thermo hydriques peuvent être répétés autant que nécessaire afin d'étudier le comportement à long terme sur plusieurs années.

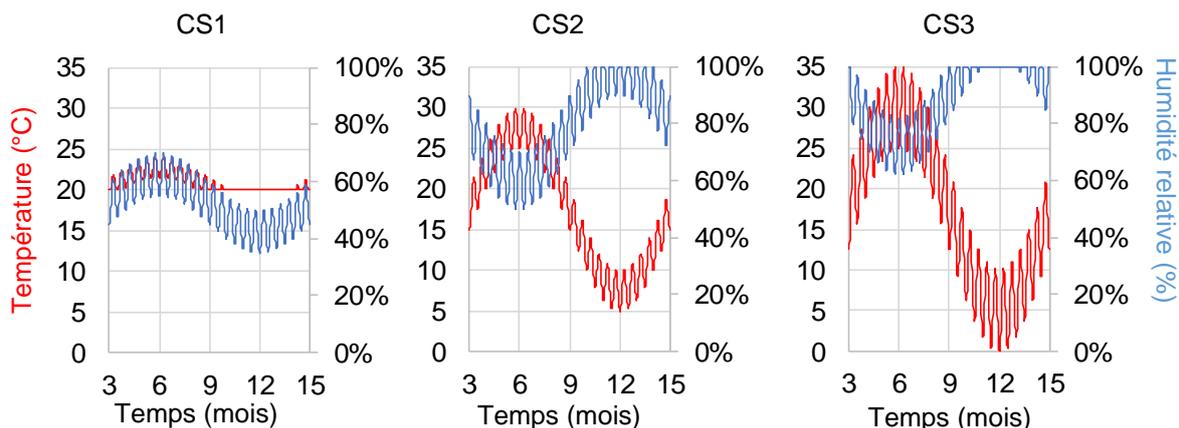


Figure 156: Evolution climatiques selon les 3 classes de service

IV.4.1.2. Maillages

Nous avons modélisé la section transverse de poutre de la même façon que précédemment. Un maillage périphérique est affiné afin de contrôler la précision de calcul au niveau des échanges superficiels. Les éléments ont une ‘épaisseur caractéristique’ de 2mm sur un périmètre de 2cm. Le reste de la section est composée d’éléments carrés de 2cm de côté pour les trois plus grandes géométries et de 1cm de côté pour les deux plus petites, Figure 157. Les éléments employés sont des quadrangles intégrant des fonctions d’interpolation linéaires. Le Tableau 37 récapitule le nombre d’éléments pour chaque géométrie.

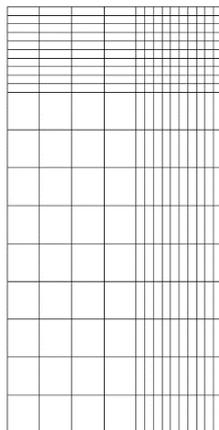


Figure 157 : Maillage de la poutre Géo4 : 100x200 mm² (266 QUA4)

Tableau 37 : Informations sur le maillage

Géométrie	Surface (mm ²)	Nombre d’éléments QUA4
Géo1 (30x60)	1 800	176
Géo2 (45x90)	4 050	192
Géo3 (75x150)	11 250	216
Géo4 (100x200)	20 000	266
Géo5 (300x600)	180 000	408

La poutre Géo5, de section 300x600, représente une poutre de lamellé collé. Nous négligeons ici l’impact éventuel des plans de colle sur le transfert de masse. Une humidité initiale de 24% n’a pas de sens technologique pour du lamellé-collé en sachant que son humidité, lors du

process de collage, doit être de l'ordre de 11 à 12%. Les calculs ont cependant été menés sur l'ensemble des configurations à des fins de comparaison. Enfin, un pas de temps de 10h a été choisi de façon à ne pas avoir de variation d'humidité trop importante entre deux pas de calcul garantissant ainsi la convergence du calcul, et ce, au regard de la discrétisation spatiale. Une valeur aussi grande est possible car nous ne nous intéressons pas aux variations hydriques journalières.

IV.4.1.3. Résultats

Le modèle thermo-hydrigue permet de modéliser l'évolution d'humidité au sein des différentes sections, et ce, pour différentes humidités initiales et dans les trois environnements. Nous avons vu précédemment que les propriétés de diffusion n'influençaient que faiblement le comportement hydrique d'un élément de structure. Ainsi, les propriétés de diffusion utilisées lors de cette campagne numérique sont celles du douglas. Le calcul est répété sur une période de 50 ans, avec les paramètres suivants : 3 classes de services, deux conditions hydriques initiales et 5 géométries. Cela représente 30 configurations de calcul.

IV.4.1.3.1. Teneur en eau moyenne sur 50 ans

Dans cette partie, nous comparons l'évolution d'humidité au sein des cinq sections différentes pour 50 années de simulation. Nous étudions plus précisément les humidités moyennes ainsi que leurs profils. Les évolutions de la teneur en eau moyenne sur 5 ans et sur 50 ans sont représentées en Figure 158 pour l'environnement de type classe de service 3 et une humidité initiale de 24%. L'ensemble des 30 évolutions de teneur en eau moyenne sont accessibles en Annexe 5.

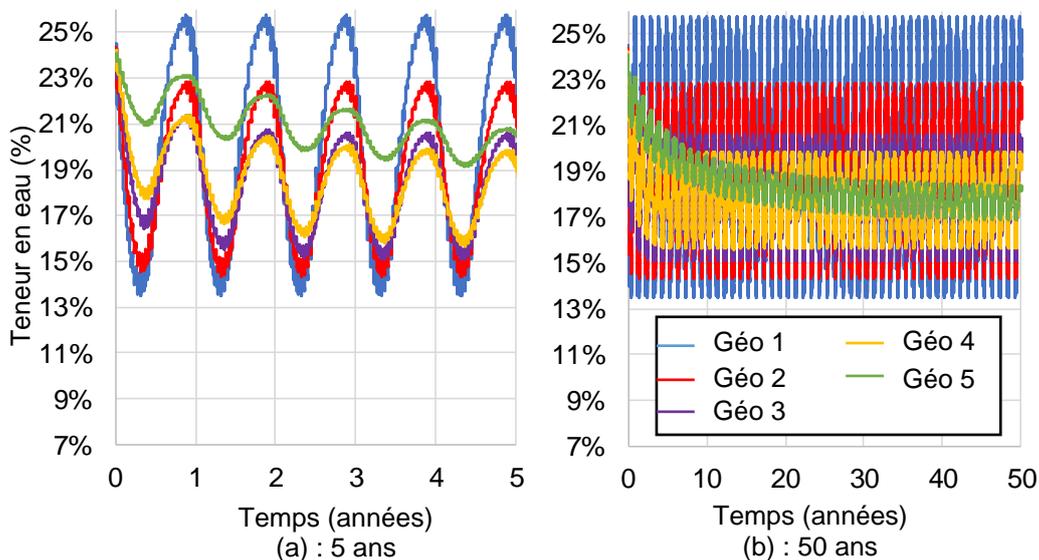


Figure 158 : Evolutions de teneur en eau moyenne des cinq géométries en CS3 et humidité initiale de 24%

Ces représentations mettent en avant l'influence de la géométrie sur le comportement hydrique long terme en fonction de l'environnement et des conditions d'humidités initiales.

- Influence de la section en fonction de l'environnement : L'environnement influence l'amplitude de variation de l'humidité moyenne. Plus la section est importante, plus les amplitudes sont faibles. Il s'agit d'un effet d'amortissement induit par l'inertie hydrique.

- Influence de la section en fonction de l'humidité initiale : La teneur en eau initiale va influencer plus ou moins longtemps le champ hydrique en fonction de la section et de l'environnement. Ainsi, pour les plus petites sections l'humidité initiale n'influence plus le comportement hydrique dès 5 ans d'existence. Pour les plus grandes sections, il faut attendre plusieurs dizaines d'années. La poutre de section 300x600 ne sera pas encore stabilisée après 50ans dans certains environnements.

La Figure 159 propose une synthèse des 30 simulations. L'amplitude annuelle de variation d'humidité (au cours de la dernière année) met en évidence l'influence de la géométrie, de l'environnement et de l'humidité initiale à long terme.

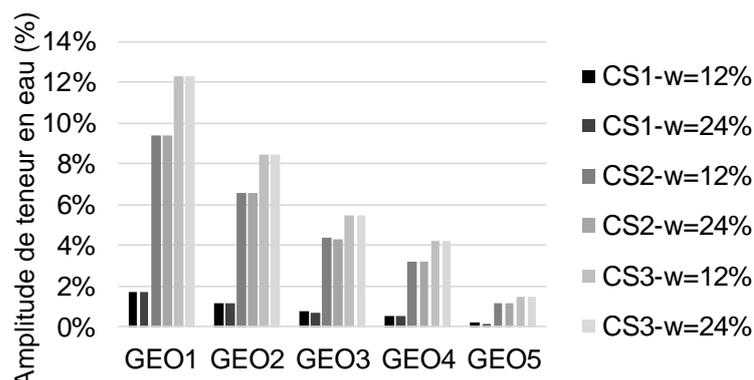


Figure 159 : Amplitudes des variations hydrique entre la 49^{ème} et la 50^{ème} année

Cette représentation montre qu'au bout de 50 ans, les cinq géométries sont stabilisées en variations hydriques quelle que soit l'humidité initiale. Elle montre également l'influence de l'environnement et de la géométrie sur les évolutions hydriques annuelles. Ainsi, nous pouvons imaginer qu'une poutre de petite section (avec des variations hydriques d'une dizaine de pourcents de teneur en eau par an) n'aura pas le même comportement différé qu'une poutre de grosse section qui verra son humidité varier que de quelques pourcents d'humidité. Les valeurs d'humidité moyenne finales sont résumées dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Humidité moyenne finale la dernière année de simulation

$w_i = 12\%$	CS1	CS2	CS3	$w_i = 24\%$	CS1	CS2	CS3
Géo1	9,65%	16,38%	19,97%	Géo1	9,77%	16,41%	19,99%
Géo2	9,82%	15,50%	18,92%	Géo2	9,99%	15,55%	18,97%
Géo3	10,17%	14,84%	17,97%	Géo3	10,40%	15,17%	18,08%
Géo4	10,29%	14,82%	17,77%	Géo4	11,01%	15,18%	17,95%
Géo5	10,91%	13,94%	16,78%	Géo5	14,50%	16,89%	18,46%

Ces premiers résultats nous montrent par ailleurs que les conditions choisies pour la classe de service 2 ne sont pas tout à fait intermédiaires et sont plus proches de la Classe 3.

IV.4.1.3.2. Analyse des profils hydriques en régime établi

Pour aller au-delà de l'humidité moyenne sur toute la section, nous allons maintenant analyser l'influence de ces différents paramètres sur le profil hydrique le long de la hauteur des poutres. Comme présenté au paragraphe IV.2.2.3.2, nous comparons deux zones, Figure 160 :

- Une première zone qui présentera de fortes variations d'humidité au cours de l'année proche de la périphérie avec 9 points de calcul (P0 à P8),
- Une seconde zone qui sera moins sensible à ces variations annuelles représentée par un point de calcul à cœur (P9).

Précédemment, nous avons identifié cette limite d'influence annuelle autour de 20mm pour une poutre de 150 mm de hauteur.

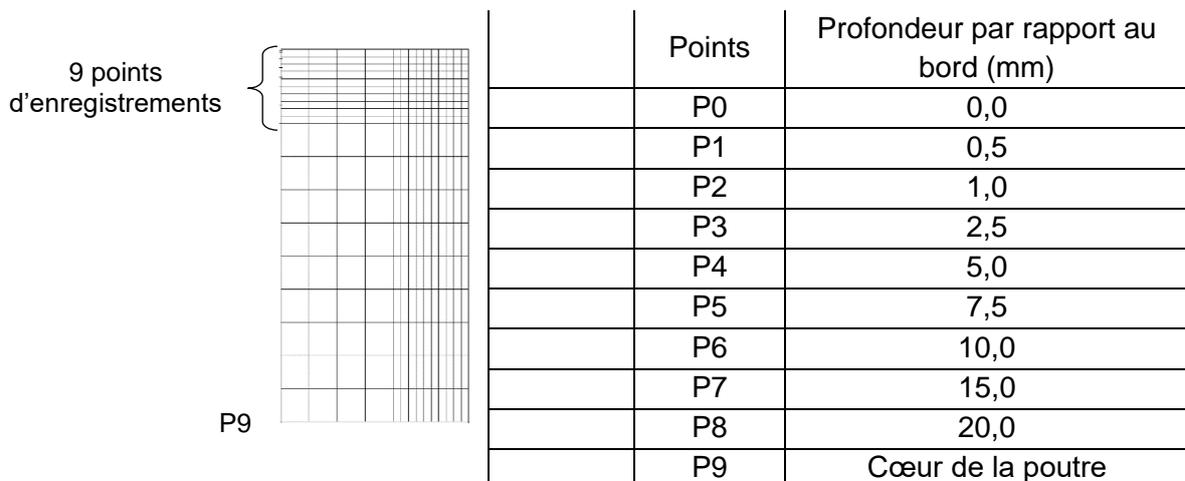


Figure 160 : Position des points d'enregistrements

Nous analysons les profils d'humidité entre la 49^{ème} et la 50^{ème} année de modélisation afin de voir l'influence de la section sur la profondeur d'humidification en régime hydrique établi (sauf la Géo5 qui n'a pas tout à fait atteint ce régime après 50 années). Nous procédons à deux comparaisons.

En régime hydrique établi, les extremums hydriques sont comparés en fonction de la hauteur relative des poutres, Figure 161-a. Cette représentation met en avant les valeurs minimales et maximales d'humidité dans la section.

La seconde analyse consiste à observer l'écart des variations hydriques au cours de cette même période, Figure 161-b. Elle met en avant la profondeur de pénétration du front hydrique dans les poutres et permet ainsi de différencier les deux zones spatiales.

Si les résultats sont limités à la classe de service 2 et pour une humidité initiale de 12%, les autres cas sont présentés en Annexe 6.

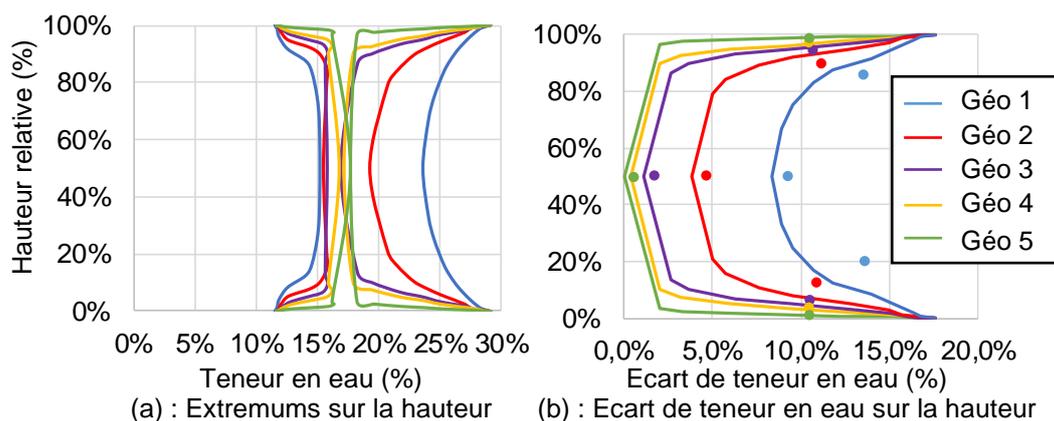


Figure 161 : Extremums et écarts hydriques dans la hauteur des poutres au cours de la dernière année de simulation en classe de service 2 et pour une humidité initiale de 12%

Pour toutes les géométries, nous remarquons qu'elles présentent une humidification en peau allant jusqu'à 28% d'humidité. Des valeurs supérieures à 20% correspondent à la plage de risque d'attaques fongiques. Pour la classe de service 1, l'humidité ne dépasse jamais les 20% quelle que soit la section. Cependant, dans les deux autres environnements, l'humidité va atteindre à plusieurs reprises ce seuil, Tableau 39 et Tableau 40. Les résultats présentent la durée d'humidification (au cours de la dernière année) pour laquelle l'humidité est supérieure à 20% en continu au niveau des différentes profondeurs pour les classes de service 2 et 3 et pour une humidité initiale de 12%.

Tableau 39 : Durée d'humidification supérieure à 20% d'humidité (en jours/an) en Classe de Service 2

	2 mm	5 mm	10 mm	20 mm	Cœur
Géo1	125	93	23	0	0
Géo2	114	69	0	0	0
Géo3	114	68	0	0	0
Géo4	114	68	0	0	0
Géo5	114	68	0	0	0

Tableau 40 : Durée d'humidification supérieure à 20% d'humidité (en jours/an) en Classe de Service 3

	2 mm	5 mm	10 mm	20 mm	Cœur
Géo1	187	179	174	133	122
Géo2	177	175	146	42	0
Géo3	177	174	134	0	0
Géo4	177	174	130	0	0
Géo5	177	174	130	0	0

Jusqu'à 5 mm de profondeur, les cinq géométries présentent une période de forte humidification qui peut induire une attaque fongique quel que soit l'environnement. En classe de service 3, la section Géo1 présentera un risque d'attaque fongique jusqu'à même le cœur, la largeur de section étant inférieure à 40mm.

Les valeurs d'écart de teneur en eau (au cours de la dernière année au niveau des deux zones, peau et cœur) sont synthétisées en Figure 162. Comme nous l'avons remarqué en Annexe 5, au bout de 50 ans, l'humidité initiale ne vient plus influencer le profil hydrique. Ainsi, dans un

souci de simplification, il ne sera présenté ici que les valeurs pour une humidité initiale de 12%, en fonction des trois environnements et des cinq géométries.

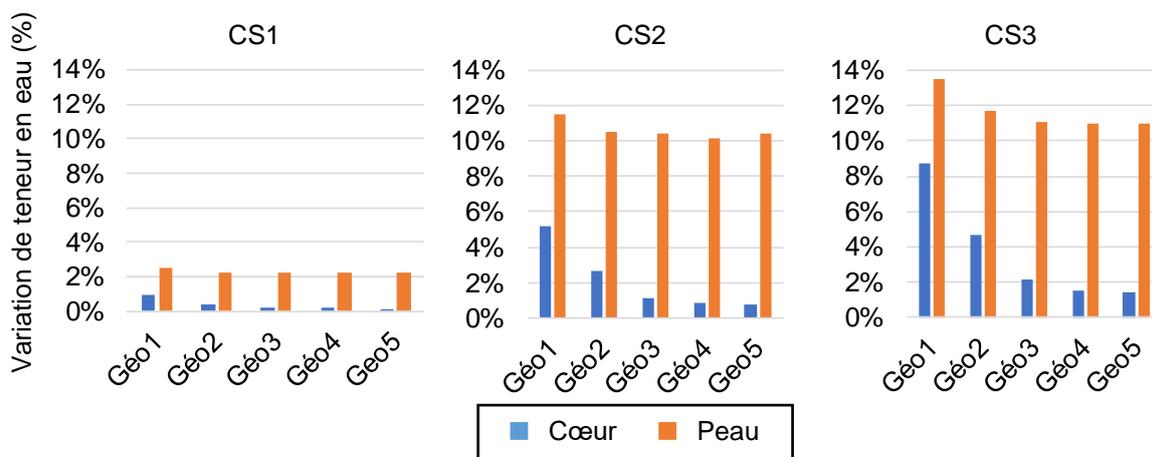


Figure 162 : Moyenne sur la dernière année des variations hydriques sur la partie centrale et sur les 20mm de peau pour les 3 environnements et les 5 géométries

Cette représentation met en évidence la différence de comportement des deux zones. D'un côté, quel que soit l'environnement, les variations hydriques en peau sont similaires d'une section à une autre. Alors qu'en partie centrale, la section va influencer les variations hydriques annuelles.

Pour la Classe de Service 1, les variations sont faibles en peau comme à cœur. Cependant pour les classes de service 2 et 3, les variations d'humidité en peau peuvent dépasser 12% voire 14%, ce qui pourrait expliquer des fissures de séchage en périphérie. De plus, pour les petites sections (Géo1 et Géo2), les variations d'humidité en partie centrale peuvent déclencher des effets hygro activés voir hygro-verrous.

IV.4.1.4. Conclusion

Le modèle de transfert de masse et de chaleur a permis de modéliser l'évolution de la teneur en eau moyenne et du profil hydrique au cours des 50 années, et ce, pour les trois environnements et les deux conditions d'humidités initiales.

Une première approche en teneur en eau moyenne a permis de rendre compte de l'influence de l'humidité initiale sur l'évolution d'humidité. Alors que certaines sections n'accusent aucune influence du champ hydrique initiale au bout de quelques années, certaines devront attendre plusieurs décennies avant de voir effacer l'influence du champ hydrique initiale. Cette observation est d'autant plus marquée que les poutres sont dans un environnement avec de faibles variations thermo hydriques comme la classe de service 1.

L'analyse du profil hydrique des différentes géométries en conditions stabilisées a permis de mettre en évidence l'influence de la section sur la profondeur de pénétration du front hydrique. Quelles que soient les géométries, les variations hydriques sont très importantes sur les 20 premiers millimètres. Nous avons pu constater que, pour la classe de service 1, quel que soit la section, il n'y aura aucun risque d'attaque fongique. A contrario, pour les deux autres environnements, la zone de peau sera soumise à des risques d'attaques forts. Enfin, les variations hydriques annuelles en peau sont si importantes, qu'il est possible que des fissures s'amorcent en surface par séchage, et ce, quel que soit la géométrie considérée.

Enfin, nous avons constaté que les variations hydriques dans la zone de peau, pour un environnement donné, sont très peu différentes d'une section à l'autre.

IV.4.2. Calcul simplifié de la réponse mécanique différée

Les évolutions spatiales d'humidité étant à présent calculées pour toutes les configurations présentées précédemment, le comportement mécanique différé peut être étudié. Ces calculs par éléments finis étant très gourmands en temps, des hypothèses simplificatrices ont dû être prises afin d'alléger ces calculs :

- Le chapitre 3 a mis en évidence le faible impact des effets hygro-verrou et de retrait-gonflement sur le comportement mécanique à long terme. Nous restreignons donc nos investigations à une modélisation viscoélastique hygro activée.
- Nous proposons une résolution en deux temps. Premièrement, le comportement différé est modélisé avec précision durant les 5 premières années. Le calcul repose sur l'utilisation du modèle implémenté dans le code aux éléments finis Castem. Pour les 45 années suivantes, un calcul simplifié d'extrapolation est effectué de façon analytique en ne prenant en compte que l'évolution de l'humidité moyenne.

Nous proposons une démarche de détermination du comportement long terme différente de celle proposée par l'Eurocode 5, et ce, pour deux raisons :

- Les valeurs de k_{def} réglementaires (choisies en fonction des classes de service) sont des valeurs enveloppes qui correspondent probablement à peu de projets réels.
- Quelques soient les essences, le comportement viscoélastique suit les mêmes lois physiques. De plus, la variabilité inter essence étant négligeable à l'échelle du code de calcul, un comportement différé de référence $k_{def-ref}$ (insensible à l'humidité) peut être proposé. A partir de cette référence, nous nous attachons à quantifier l'écart engendré par les différents paramètres d'environnement et de projet.

IV.4.2.1. Réponse différée à 5 ans par éléments finis

Pour s'adapter à toutes les accélérations de temps (engendrées par les différents environnements et les profils de teneur en eau dans les différentes géométries), la calibration du modèle repose sur huit cellules de kelvin Voigt. Leurs caractéristiques sont données dans le Tableau 41

Nous remarquerons notre liberté pour nommer les temps longs au-delà de 50ans car ils représentent, des durées de chargement fictives pour une humidité constante de 12%.

Le temps d'ouverture des dernières cellules sont très grands et permettent ainsi de rendre compte de l'influence de l'humidité à long terme au travers de l'hygro activation. Les propriétés du matériau utilisé sont celles du comportement de référence présenté au paragraphe IV.3.1.

Tableau 41 : Propriétés des 8 cellules de Kelvin Voigt

Temps	Valeur de temps caractéristique	ψ_{ti}	Répartition temporelle de ψ_{ti}
Court terme	1 semaine	0,05	
Moyen terme	6 mois	0,5	
Long terme	10 ans	0,8	
Permanent	50 ans	1,0	
Très permanent	500 ans	1,5	
Semi-infini	5 000 ans	2,0	
Infini	50 000 ans	2,5	
Très infini	500 000 ans	3,0	

Enfin, la particularité de cette proposition consiste à définir le comportement différé comme une valeur intrinsèque au matériau, et ce, à partir d'une valeur de référence $k_{\text{def-ref}}$. Cette valeur est supposée définir le comportement à 50 ans d'un élément ayant une humidité constante et égale à 12%. Ainsi, un élément dans son environnement présentera un comportement différé inférieur à $k_{\text{def-ref}}$ si son humidité moyenne est inférieure à 12% ou un comportement différé supérieure à $k_{\text{def-ref}}$ si son humidité moyenne est supérieure à 12%. Afin de conserver le même niveau de chargement selon les géométries, des poutres de longueur variable sont modélisées en flexion 4 points. Le ratio hauteur/portée est constant. L'amplitude du chargement est calculée pour atteindre un ratio de flèche équivalent à $1/250^{\text{ème}}$ de la portée. Les différentes portées, en relation avec les 5 sections précédentes, sont définies dans le Tableau 42

Tableau 42 : Portées modélisées pour les 5 géométries

Section	Géo1	Géo2	Géo3	Géo4	Géo5
Portée	1,2m	1,8m	3,0m	4,0m	12,0m

La Figure 163 représente le maillage de la poutre de section Géo4 avec ses deux conditions de symétries (longitudinale et verticale).

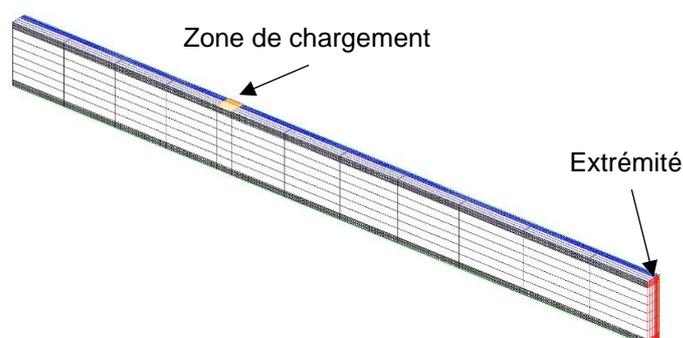


Figure 163 : Maillage (Géo4) et symétries

La convergence numérique de la réponse mécanique nécessite un pas minimal de calcul de 20h. Pour rappel, la simulation du transfert thermo-hydrigue demandait un pas de 10h.

IV.4.2.2. Extrapolation du comportement viscoélastique à 50 ans

Par mesure de simplification du calcul et en respect de la puissance des stations de calcul utilisées, nous proposons une extrapolation analytique à 50 ans unidimensionnel sur la base des 5 premières années modélisées par éléments finis. Cette simplification est légitime car il a été montré précédemment que l'évolution de la teneur en eau moyenne est corrélée aux variations du profil d'humidité dans la section. Les influences des variations spatiales d'humidité et de l'état mécanique seront prises en compte dans le modèle 1D en opérant un recalage des propriétés matériaux équivalentes. Ainsi, à partir de la réponse du modèle Cast3M sur les 5 premières années, nous adaptons le modèle viscoélastique hygro activé simplifié. Cette simplification demande donc une modification de l'implémentation de la fonction de fluage.

IV.4.2.2.1. Modèle viscoélastique hygro activé simplifié équivalent

Une simplification de l'étude passe par la modélisation uni-dimensionnelle du comportement différé de l'élément. Soit l'évolution de la flèche en fonction de la fonction de fluage :

$$u(t) = u_{inst} \cdot J(t) \quad (4.8)$$

Selon la forme du modèle de Kelvin Voigt, la fonction de fluage s'écrit :

$$J(t) = 1 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot (1 - e^{(-\lambda_i \cdot t)}) \text{ avec } \lambda_i = \frac{k_i}{\eta_i} \text{ et } A_i = \frac{1}{k_i} \quad (4.9)$$

Le terme de complaisance est ensuite corrigé par l'humidité afin de prendre en compte l'influence de l'environnement.

IV.4.2.2.1.1. Hygro activation de la fonction de fluage

La prise en compte de l'humidité dans la fonction de fluage se fait grâce à la notion de temps réduit ξ_{n+1} et ξ_n , traduisant ainsi une accélération ou un ralentissement du processus de fluage en fonction de la teneur en eau. Cela se traduit par une réécriture de la fonction de fluage suivante :

$$J(\xi_{n+1} - \xi_n) = 1 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot (1 - e^{(-\lambda_i \cdot (\xi_{n+1} - \xi_n))}) \quad (4.10)$$

Le temps réduit ($\xi_{n+1} - \xi_n$) se détermine selon l'équation ci-dessous :

$$\xi_{n+1} - \xi_n = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{1}{a_w(t)} dt \quad (4.11)$$

Pour rappel, a_w représente le terme d'hygro activation visqueuse et s'écrit :

$$a_w(t) = e^{A_w \left(\frac{1}{w(t_{n+1})} - \frac{1}{w_{ref}} \right)} \text{ avec } A_w \text{ le coefficient de calage} \quad (4.12)$$

On prend comme hypothèse que $a_w(t)$ est linéaire entre t_n et t_{n+1} . L'expression (4.11) peut se réécrire comme suit :

$$\xi_{n+1} - \xi_n = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{1}{c \cdot \tau + d} \cdot d\tau \text{ avec } c = \frac{a_w(t_{n+1}) - a_w(t_n)}{(t_{n+1} - t_n)} = \frac{\Delta a_w}{\Delta t_n} \text{ et } d, \text{ une constante (4.13)}$$

Ainsi, en associant (4.13) à (4.11), le temps réduit s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \xi_{n+1} - \xi_n &= \left[\frac{1}{c} \cdot \ln(c \cdot t + d) \right]_{t_n}^{t_{n+1}} = \frac{\Delta a_w}{\Delta t_n} \cdot \left[\ln(a_w(t_{n+1})) - \ln(a_w(t_n)) \right] \\ &= \frac{\Delta a_w}{\Delta t_n} \cdot A_w \cdot \left[\frac{1}{w(t_{n+1})} - \frac{1}{w(t_n)} \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Cette simplification permet de modéliser le comportement différé à partir de l'évolution de la teneur en eau moyenne renvoyée par le modèle de transfert de masse dans la section transversale.

IV.4.2.2.1.2. Calage du modèle analytique simplifié

A partir de l'approche des temps réduits, nous pouvons modéliser le comportement différé de façon beaucoup plus rapide. Cependant, l'approche demande de définir le nombre de cellules de Kelvin Voigt qui le compose. En effet, l'hygro activation du modèle peut induire des temps d'ouverture bien supérieurs au temps réel. Pour cela, il a été choisi de modéliser le comportement différé à partir de 7 cellules de Kelvin Voigt, tel que la 8^{ème} cellule s'ouvrirait de moins de 10% au bout de 50 ans de simulation. L'apport de cette cellule supplémentaire serait alors négligeable. Enfin, afin d'avoir une uniformisation des modèles entre chaque géométrie et environnement, nous avons effectué cette étude sur le cas le plus défavorable, à savoir, la section Géo1 en classe de service 3 avec une teneur en eau initiale de 24%, et pour un coefficient de calage du terme d'hygro activation A_w valant 140 (§ IV.3.1). Ainsi, à partir de l'évolution de teneur en eau moyenne (Annexe 5) et selon l'équation (4.14), le temps maximum d'ouverture du modèle de Kelvin Voigt généralisé est de 9345 années fictives pour 50 années réelles de simulation. Les taux d'ouverture des huit cellules de Kelvin Voigt sont donnés dans le Tableau 43.

Tableau 43 : Taux d'ouverture des cellules de Kelvin Voigt du modèle viscoélastique hygro activé

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4	Cellule 5	Cellule 6	Cellule 7	Cellule 8
Taux d'ouverture	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	99,9%	51,9%	7,1%

IV.4.2.2.1.3. Identification des propriétés viscoélastiques

Sur la base d'une équivalence de comportement à 5 ans calculé en 3D par éléments finis, le modèle simplifié en 1D est extrapolé, moyennant un calage numérique des propriétés matériau. La même famille de paramètres est utilisée, Tableau 44. La simplification du comportement va induire un calage différent des propriétés viscoélastiques.

Tableau 44 : Enumération des paramètres des modèles viscoélastiques hygro activés

	Modèle Castem	Modèle 1D
Proportion d'ouverture du modèle	ψ_{t_i}	ψ_{t_i}
Comportement à 50 ans pour $w = 12\%$	$k_{\text{def-ref}} = 1$	$k_{\text{def-ref}}$: à identifier
Coefficient de calage du terme d'hygro activation	$A_w = 140$	A_w : à identifier

Il est rappelé que le terme $k_{\text{def-ref}}$ correspond à la valeur de la flèche différée d'un élément à une humidité constante et égale à 12%. Pour le modèle Cast3M, cette valeur est choisie égale à 1, valeur unitaire qui représente le point de référence. Dans le cadre de cette étude, nous cherchons à mieux cerner l'influence des conditions de projet pour l'estimation du comportement différé par un coefficient global k_{def} . Les valeurs numériques sont à considérer a priori comme des valeurs arbitraires. L'identification des propriétés du modèle analytique 1D est optimisée afin de minimiser ses écarts avec la réponse du modèle éléments finis, et ce, pour la 4^{ème} et la 5^{ème} année (Annexe 7). Enfin, un écart de comportement sur les premières années ne sera pas considéré comme problématique au vu d'une analyse long terme, l'accent étant principalement porté sur la minimisation de l'erreur à long terme.

Les Figure 164 et Figure 165 représentent la comparaison des réponses du modèle Castem et du modèle analytique, respectivement pour la géométrie Géo1 et Géo4, et ce, pour la 5^{ème} année. La comparaison des deux modèles pour les quatre autres géométries sont proposées en Annexe 8.

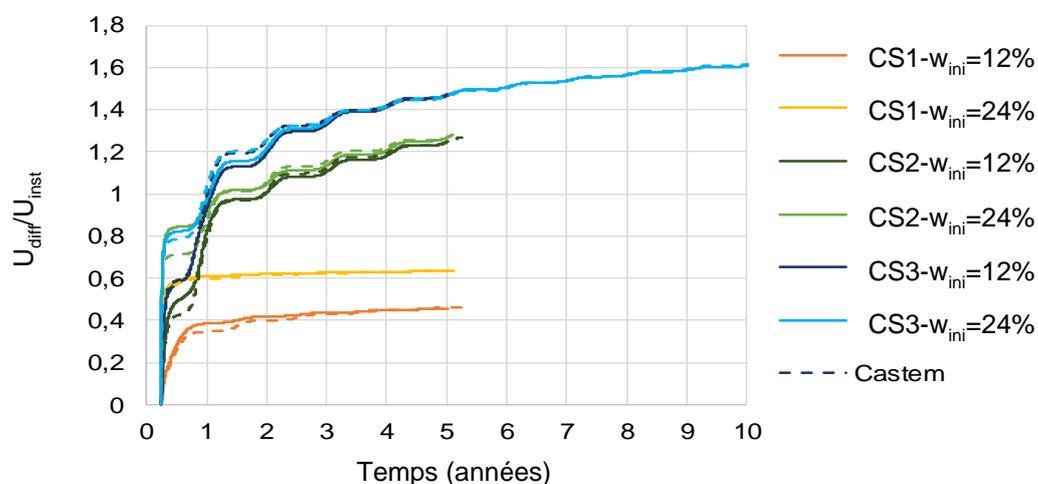


Figure 164 : Optimisation des paramètres du modèle analytique simplifié sur la réponse Castem (Géo1)

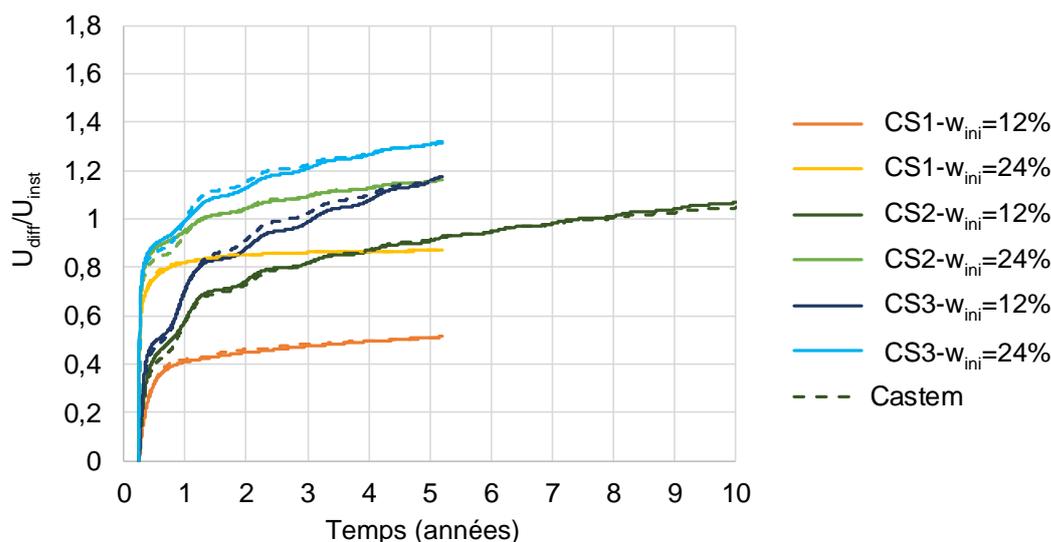


Figure 165 : Optimisation des paramètres du modèle analytique simplifié sur la réponse Castem (Géo4)

De manière générale, le modèle simplifié permet de retrouver un comportement équivalent à 5 ans. Pour assurer du potentiel d'extrapolation du modèle analytique, la comparaison a été poussée jusqu'à 10 ans pour deux configurations géométrique et hydrique (optimisation sur les 5 premières années et extrapolation pour les 5 suivantes).

On remarquera que les deux premières années sont les périodes où les deux modèles présentent le plus d'écart. Cette remarque montre l'impact du champ hydrique hétérogène dans la section qui, lors des deux premières années, varie fortement à cause de l'hypothèse d'humidité initiale homogène. Le processus d'optimisation permet cependant d'effacer cet impact.

Les paramètres viscoélastiques hygro activés du modèle analytique sont reportés, pour les géométries respectives Géo1 et Géo4, dans les Tableau 45 et Tableau 46. En Annexe 8, la totalité des valeurs identifiées pour les cinq géométries est donnée.

Tableau 45 : Paramètres du modèle analytique (Géo1)

Classe de service	w_{ini}	$k_{def-ref}$	A_w
CS1	12%	0,9	140
	24%	0,9	99
CS2	12%	1,0	133
	24%	1,0	134
CS3	12%	1,0	125
	24%	1,0	123

Tableau 46 : Paramètres du modèle analytique (Géo4)

Classe de service	w_{ini}	$k_{def-ref}$	A_w
CS1	12%	0,9	167
	24%	0,9	114
CS2	$w_{ini} = 12\%$	1,0	133
	$w_{ini} = 24\%$	1,0	121
CS3	$w_{ini} = 12\%$	1,0	126
	$w_{ini} = 24\%$	1,0	124

Après une première analyse des résultats et suivant le protocole d'identification des paramètres $k_{def-ref}$ et A_w du modèle analytique simplifié, nous fixons $k_{def-ref} = 0,9$ pour l'environnement de type classe de service 1 et $k_{def-ref} = 1,0$ pour les deux autres environnements. Une fois ce paramètre fixé, le coefficient de calage A_w est identifié.

IV.4.2.2. Prédiction du comportement à 50ans

Les comportements modélisés, via l'approche analytique simplifiée, sont présentés dans cette partie.

IV.4.2.2.1. Evolutions temporelles

Les évolutions de comportement différé pour les géométries Géo1 et Géo4 sont présentées, respectivement en Figure 166

Figure 166 et Figure 167. Les évolutions des cinq géométries sont présentées en Annexe 9.

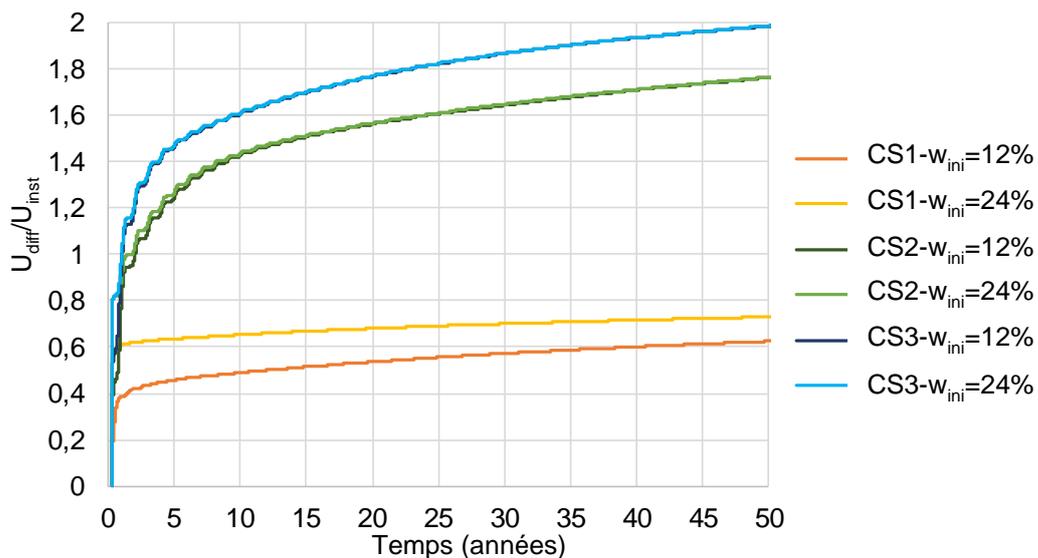


Figure 166 : Evolution du comportement différé à 50 ans (Géo1)

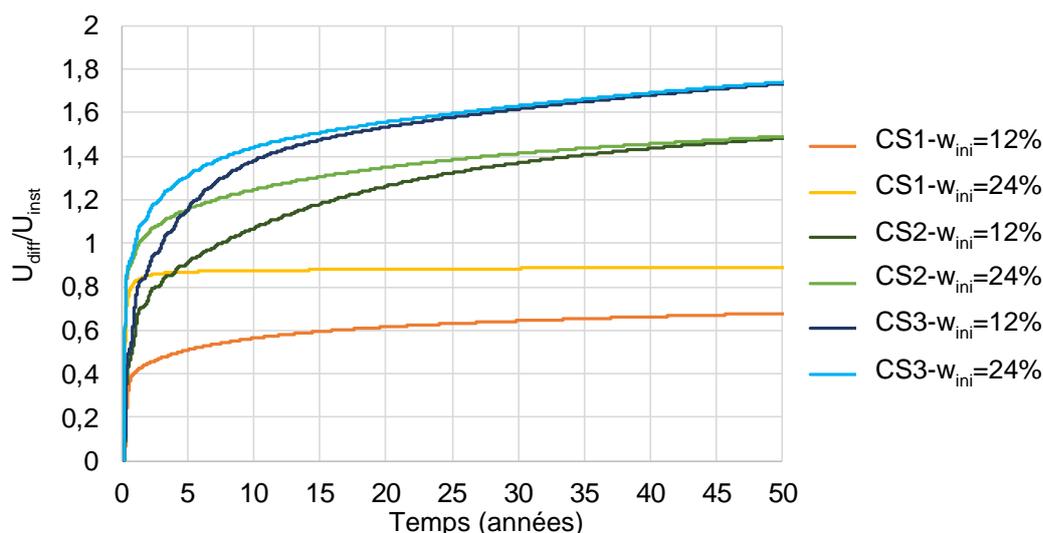


Figure 167 : Evolution du comportement différé à 50 ans (Géo4)

Une première interprétation globale nous montre qu'il existe un faible écart de comportement entre les classes de service 2 et 3 choisies. La classe 2 présente bien néanmoins un comportement intermédiaire entre l'environnement sec et l'humide.

L'humidité initiale agit bien comme un accélérateur. En effet, le terme d'hygro activation va anticiper l'ouverture des cellules viscoélastiques. Pour la Géo4, en Classe de Service 3, il faut une quinzaine d'années pour rattraper cette accélération mais environ 40 ans en classe de service 2. Les valeurs finales de k_{def} sont récapitulées dans le Tableau 47

Tableau 47 : Valeurs de k_{def} à 50 ans

$W_i = 12\%$	CS1	CS2	CS3	$W_i = 24\%$	CS1	CS2	CS3
Géo1	0,62	1,76	2,00	Géo1	0,73	1,77	1,98
Géo2	0,63	1,64	1,91	Géo2	0,76	1,64	1,92
Géo3	0,66	1,54	1,80	Géo3	0,83	1,54	1,80
Géo4	0,66	1,44	1,74	Géo4	0,91	1,49	1,74
Géo5	0,70	1,13	1,61	Géo5	1,29	1,55	1,67

Le choix d'un $k_{def-ref}$ définit pour une valeur de 12% a pour conséquence de bien séparer l'influence des environnements. Les environnements humides (CS2 et CS3) génèrent des valeurs de k_{def} bien supérieures à 1. A l'inverse, l'environnement sec fait apparaître une stabilisation à des valeurs de k_{def} inférieures à 1. Le cas particulier de la section Géo5, mise en charge à une humidité initiale de 24%, montre un comportement différé beaucoup plus marqué car le cœur reste humide très longtemps. Il faut toutefois rappeler que cette hypothèse technologique est peu vraisemblable pour un produit reconstitué par collage.

Les variations de k_{def} à 50 ans (par rapport au comportement de référence) sont représentées Figure 168 en fonction de l'écart entre 12% et l'humidité moyenne au cours de la dernière année.

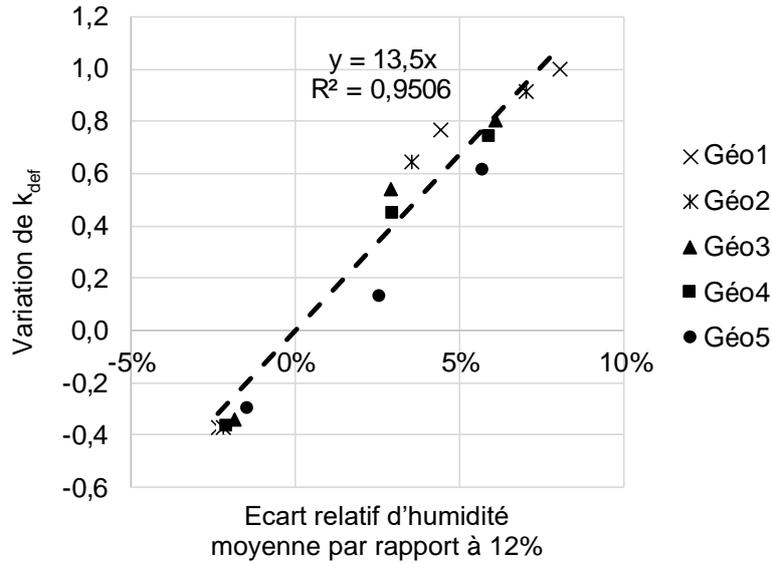


Figure 168 : Correction de k_{def} en fonction de la variation d'humidité moyenne par rapport à 12%

Cette figure peut être utilisée comme un outil de correction simple de la valeur de k_{def} , à condition de connaître la variation moyenne d'humidité de la section. Cette correction est indépendante de la section dans cette représentation. Ainsi, pour une variation de 8% de teneur en eau moyenne dans la section (20% dans ce cas précis) par rapport à 12%, le k_{def} doit être augmenté de +1 par rapport au comportement de référence. La régression linéaire passe par 0, proposant ainsi une correction simple du k_{def} par rapport au k_{def} de référence.

Nous pouvons alors corrélérer le comportement long terme à la section de l'élément d'étude permettant ainsi une approche plus précise dans la détermination du comportement différé d'un élément de structure en fonction de sa géométrie.

IV.4.2.2.2. Influence de l'environnement

Les valeurs de k_{def} , proposées dans l'Eurocode 5, sont reportées en Figure 169

Figure 169. Le graphique est complété par les valeurs de k_{def} des cinq géométries en fonction des classes de service, et ce, pour une teneur en eau initiale de 12%.

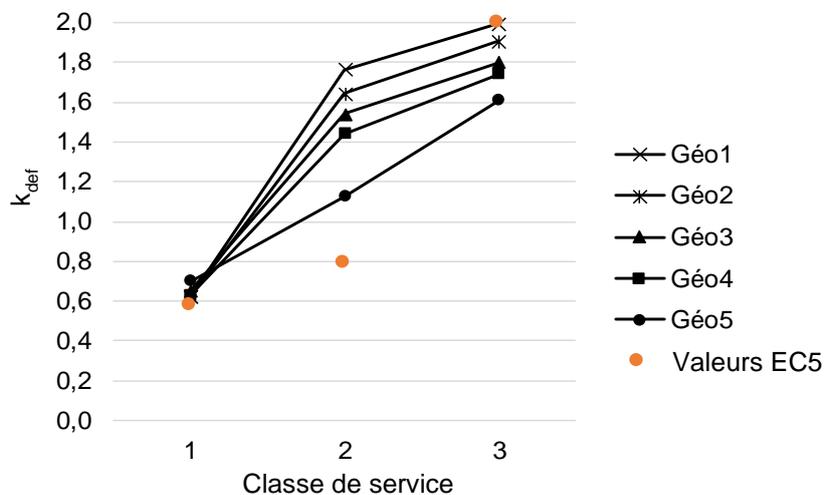


Figure 169 : Valeurs de k_{def} pour $w_{ini} = 12\%$ en fonction de l'environnement et des valeurs EC5

La section n'a quasiment pas d'importance en Classe de Service 1. Elle est cependant notable pour les classes plus humides.

Raisonnons à présent sur les valeurs obtenues. Nos hypothèses de calage permettent d'atteindre un k_{def} voisin de 0,6 pour la Classe de Service 1. Nous n'analyserons pas ici les résultats pour la Classe de Service 2, celle-ci étant choisie visiblement trop humide par rapport au choix initial de l'Eurocode. L'intérêt majeur de l'approche apparaît pour la Classe de Service 3, car l'impact de la section est clairement visible. Le k_{def} proposée actuellement par l'Eurocode 5 ($k_{def} = 2$) correspond à la valeur obtenue pour des faibles sections. Cependant, pour des sections plus fortes, le k_{def} obtenu baisse à 1,6, ce qui pénalise le dimensionnement à l'état limite de service pour des éléments fléchis de forte section placés en environnement extérieur (cas des ouvrages d'art par exemple).

IV.4.2.2.3. Influence de la section

Une autre représentation, en fonction de la section, est proposée Figure 170. Comme attendu, la section vient influencer le comportement différé de manière notable. La perturbation du comportement différé est d'autant plus forte que la section est faible.

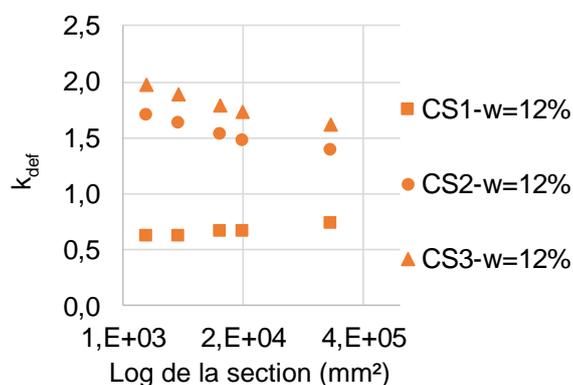


Figure 170 : k_{def} en fonction de la section et de l'environnement pour une humidité initiale de 12%

Les sections massives ont un effet « tampon » sur le comportement différé. Il faudra toutefois réserver cette conclusion dans le cas où la section reste intègre. Dans le cas où il y a présence de fissures, nous savons qu'elles vont perturber la cinétique de fissuration en augmentant l'avancée du front hydrique. Cependant, à l'heure actuelle, nous ne connaissons que trop mal les cinétiques de propagation de fissure. Sur des sections courantes en lamellé-collé, des premiers retours d'expérience laisseraient penser que les fronts de fissures ne progresseraient pas à plus de 2 cm, dans des sections massives telles que du lamellé-collé. Mais aujourd'hui, cette question reste ouverte !

IV.4.2.2.4. Influence de l'humidité initiale

Nous analysons à présent l'influence d'un chargement humide sur le coefficient k_{def} . Aujourd'hui, l'Eurocode5 impose une majoration de 1 point sur k_{def} pour un élément de structure chargé à l'état humide, et ce, quel que soit la classe de service. Lors d'un essai de fluage de quelques mois ou années, le chargement humide présente un cas très défavorable, tel qu'on a pu l'observer sur les évolutions de comportement différé sur 5 ans (Annexe 8). Cet impact négatif sur les premières années est largement étayé par la campagne expérimentale présentée au Chapitre III. Cependant, ces conclusions doivent être nuancées pour un calcul à

très long terme (50 ans). La Figure 171 représente l'évolution de k_{def} en fonction de la section pour des humidités initiales moyennes de 12 et de 24%.

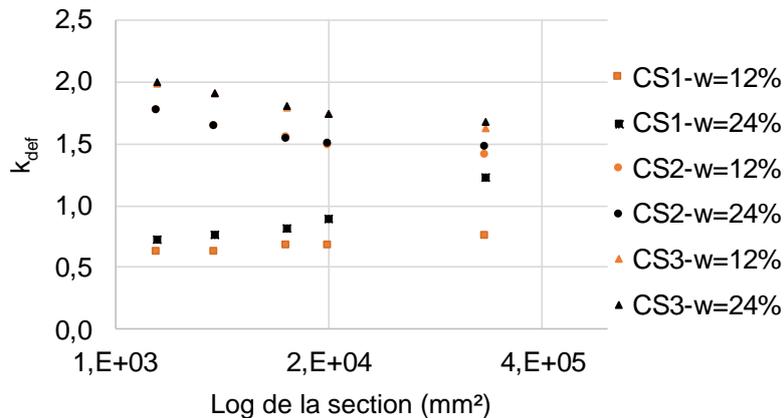


Figure 171 : Influence de l'humidité initiale sur le coefficient k_{def}

Nous constatons une absence de l'influence de l'humidité initiale à 50 ans, et ce, pour les Classes de Service 2 et 3. Par contre, pour une classe de service 1 (pour laquelle les transferts se font plus lentement), l'influence d'un chargement dans un état plus humide a une influence plus marquée. Elle ira croissante avec la taille de la section, le cœur mettant beaucoup plus de temps à sécher.

IV.4.2.2.3. Expression paramétrique de k_{def}

A partir des différentes évolutions et tendances que nous avons pu citer précédemment, nous proposons une nouvelle expression paramétrique du coefficient k_{def} :

$$k_{def} = (HR_{env} - HR_{ref}) \cdot (P \cdot \ln(S) + Q) + k_{def-ref} \quad (4.15)$$

Avec :

- HR_{env} : Humidité relative moyenne de l'environnement
- HR_{ref} : Humidité relative de référence prise à 65%
- $k_{def-ref}$: Valeur de k_{def} pour $HR_{env} = HR_{ref}$
- S : Section en m^2
- P et Q : deux coefficients de calage

Les paramètres de calage ont été identifiés par minimisation de l'erreur. L'humidité relative de référence est de 65%. Elle correspond à une humidité interne du matériau de référence de 12% pour lequel la valeur de k_{def} sera la valeur de référence $k_{def-ref}$ de 1. Ainsi, nous proposons la forme suivante :

$$k_{def}(HR_{env}) = (HR_{env} - 65\%) \cdot (-0,4 \cdot \ln(S) + 1,3) + 1 \quad (4.16)$$

HR_{env} est déterminé à partir de l'humidité relative annuelle moyenne au cours de la dernière année telle que :

- $HR_{env}(CS1) = 52\%$
- $HR_{env}(CS2) = 79\%$
- $HR_{env}(CS3) = 89\%$

La Figure 172 complète la Figure 170 avec les réponses de l'équation simplifiée (4.16) comparée aux valeurs de k_{def} déterminées précédemment en fonction des trois Classes de Service et des cinq sections, et ce, pour une teneur en eau initiale de 12%.

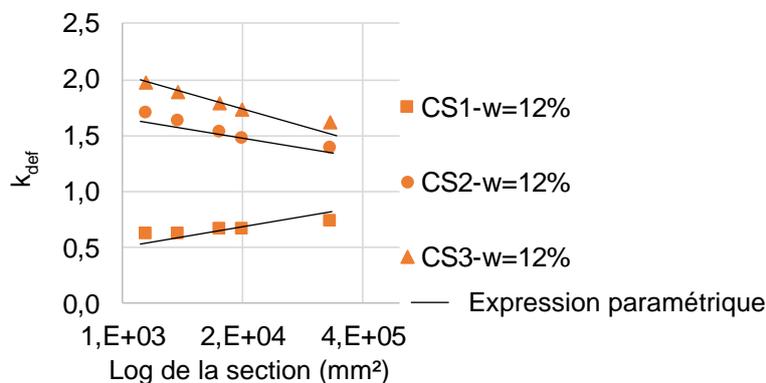


Figure 172 : Variations de k_{def} en fonction des Classes de Service et de la section

Nous pouvons donc approcher le comportement long terme au travers d'une équation simple permettant de rendre compte de la section et de l'environnement. Ces résultats sont bâtis sur les résultats des configurations pour un élancement de 2. Cette étude de l'élancement n'est pas proposée ici, mais la démarche pourrait parfaitement l'intégrer par la suite.

Cette approche permet ainsi à l'ingénieur une détermination du comportement long terme plus précise. La prise en compte de l'humidité, à l'origine du chargement, peut être effectuée en identifiant de nouveaux couples de paramètres ou en pondérant soit le coefficient $k_{def-ref}$ soit HR_{ref} .

IV.4.3. Conclusion

Notre analyse nous a mené à repenser l'approche Eurocode 5 afin de mieux appréhender l'influence d'un chargement humide ou de la section sur le comportement différé. Afin de rendre compte du comportement différé à haute humidité, nous avons dû ajouter des cellules de Kelvin Voigt avec des temps d'ouvertures allant jusqu'à 500 000 ans pour une humidité de référence de 12%. L'analyse est basée sur la proposition d'un comportement différé de référence, noté $k_{def-ref}$, d'un élément à une humidité constante et égale à 12%. Le comportement différé d'un élément sensible à l'humidité sera alors défini à partir de cette référence à laquelle s'ajoute une hygro activation permettant de prendre en compte des évolutions d'humidités interne.

La modélisation du comportement différé sur 50 ans, à partir du modèle aux éléments finis, est chronophage. Nous avons alors proposé une simplification de celui-ci par une approche analytique 1D. Ainsi, l'hygro activation visqueuse a été implémentée dans le calcul de la fonction de fluage au travers des temps réduits. Cette approche simplifiée a permis d'extrapoler le comportement différé à 50 ans en interpolant le modèle analytique sur la réponse éléments finis sur les 5 premières années.

Cette approche a permis de simuler le comportement différé à 50 ans. Nous avons alors proposé une campagne numérique permettant de coupler l'influence de la géométrie, de l'humidité initiale et de l'environnement sur le comportement long terme. Ainsi, nous avons montré que le coefficient k_{def} est linéairement dépendant du logarithme de la section. En effet, plus la section sera grande plus les variations hydriques seront faibles et donc n'auront

d'influences sur le comportement long terme. Enfin, nous avons mis en exergue l'impact d'un chargement humide sur le comportement différé. Alors que celui-ci va influencer fortement la flèche au bout de quelques mois ou années, cette humidité initiale n'aura presque plus d'impact à 50 ans pour un environnement humide. Cependant, dans un environnement plus sec, le coefficient k_{def} est impacté par l'humidité initiale, d'autant plus si la section est massive.

Enfin, un paramétrage simple de la valeur de k_{def} permettra à l'ingénieur de mieux dimensionner les éléments de structures en fonction de leur section et de leur taux d'humidité.

IV.5. Conclusion

Ce chapitre IV a vocation à traduire les résultats scientifiques développés auparavant en une approche simplifiée pour un usage technologique.

Dans une approche d'ingénierie, une connaissance plus fine de l'état hydrique est nécessaire pour l'élaboration des produits (usinage, collage, ...) comme pour la prédiction des variations dimensionnelles. L'outil développé met à disposition de l'ingénieur des diagrammes d'équilibre hygrosopique distincts pour chaque essence.

Pour l'étude d'un élément de structure soumis à un environnement variable, nous proposons un modèle numérique qui permet de déterminer l'évolution du front d'humidification dans la section d'une poutre quel que soit son environnement. Cette étude peut être simplifiée par une discrétisation géométrique en deux parties. L'une, située en périphérie de la poutre sera très sensible aux variations d'humidité. Elle présentera alors les risques d'endommagement par fissuration ou par attaques fongiques. Une seconde partie, représentée par le 'cœur' de la poutre, représente alors la partie intervenant dans l'étude du comportement mécanique.

Enfin, nous nous sommes intéressés à une amélioration de la détermination du comportement long terme au travers du coefficient k_{def} . Au cours de cette étude, nous avons mis en avant l'influence de la section, de l'humidité initiale et de l'environnement sur le comportement différé. A partir d'un modèle analytique simplifié associé aux résultats du modèle 3D, nous avons déterminé une nouvelle loi permettant de prédire le comportement différé en fonction de la section et de l'humidité initiale. Cet apport à la réglementation est très simple et permettrait un gain sur le dimensionnement plus juste des flèches long terme en flexion. Il pourrait également redonner de la valeur à la construction en bois vert, en proposant un cadre réglementaire.

Conclusion générale

Ce travail avait comme objectif de comparer le comportement mécanique différé des feuillus à celui des résineux en vue de leur meilleure intégration à l'Eurocode 5. Afin de répondre à cette problématique, nous avons travaillé sur deux domaines différents mais corrélés : la diffusion hydrique en ambiance extérieure et le comportement mécanique différé d'un élément de structure.

Nous avons commencé par **l'étude du transfert d'humidité et de chaleur** des essences de feuillus et du douglas en environnement extérieur. La méthodologie mise en œuvre consiste en la mesure de l'évolution de masse des éléments mis dans un environnement extérieur protégés des intempéries. Grâce à la richesse des variations climatiques, un protocole a été développé sur une durée de cinq semaines par éprouvette. Cette procédure rapide et simple, associée à la modélisation par éléments finis, permet d'identifier les propriétés hydriques de chaque essence, et ce, par analyse inverse. L'implémentation aux éléments finis des transferts mis en jeu, associée au couplage thermo-hydrique, a demandé une recherche bibliographique des phénomènes thermodynamiques reliant équilibre et cinétique hydriques à la température. Un état de l'art a permis de mettre en évidence une classification par famille résineux et feuillus, selon la forme des hystérésis de sorption. Enfin, la prise en compte de la dépendance de la température sur la teneur en eau de saturation, à travers le principe de Le Chatelier, nous a permis de proposer de nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique pour chaque essence. Cette proposition vient améliorer la détermination de l'équilibre hydrique de chaque essence par rapport à l'unique abaque proposé aujourd'hui par l'Eurocode 5. Une meilleure connaissance de l'état hydrique d'un élément structurel placé en extérieur et la prise en compte de l'influence de la température sur la cinétique de diffusion nous a permis de modéliser les essais de diffusion réalisés sous un climat réel. Nous avons ainsi pu identifier les propriétés de diffusion dans le sens longitudinal et transversal des quatre essences d'étude. Dans le sens longitudinal, les propriétés de diffusion sont différentes entre chaque essence. Cependant, les différences sont beaucoup plus faibles dans le sens transversal. Une pondération de la perméabilité par la densité a permis de différencier les propriétés de diffusion entre essence. Cette analyse permet ainsi de caractériser le comportement hydrique d'une essence par les deux paramètres matériau de la loi de Fick, à savoir, perméabilité et masse volumique. Ces différences de comportement entre essence ont été prises en compte dans la simulation de diffusion dans des pièces à l'échelle métrique, et ce, dans deux environnements distincts. Enfin, bien que nous ayons présenté quelques caractéristiques microscopique et macroscopique du bois, les essais de diffusion ne nous ont pas permis de relier les différences anatomiques au comportement hydrique. Cependant, nous avons pu mettre en évidence que les défauts macroscopiques (pente de fil) avaient une influence bien plus importante que les variations inter essence. Ainsi, l'implémentation aux éléments finis a montré ces différentes capacités au travers de la modélisation d'essais sur plusieurs périodes de l'année. Nous pouvons déterminer précisément le champ hydrique hétérogène au sein d'un élément de structure quel que soit son environnement climatique et sa géométrie. Cependant, pour une étude du comportement mécanique différé d'une poutre en flexion, et dans un objectif de simplification, nous n'avons pas pris en compte l'influence du transfert longitudinal aux abouts sur le comportement différé. Ainsi, à partir de cette approche simplifiée, nous pouvons prédire

l'évolution de l'humidité dans une section transversale d'une poutre sur une période correspondant à un calcul de structure, soit 50 ans minimum, afin de l'implémenter dans les modèles de comportement mécanique.

La seconde partie de nos travaux a pour objet **l'étude du comportement mécanique différé d'un élément de structure bois**. L'approche initiale consistait à déterminer le comportement différé des feuillus par rapport aux résineux. Pour cela, nous avons conçu deux bancs d'essai dans deux environnements différents correspondant à des classes de service 2 et 3. La conception du banc et la disposition des capteurs nous ont permis de mesurer différents phénomènes mis en jeu au cours de cette période d'une année. En classe de service 3, le comportement différé des poutres a été fortement perturbé par des phénomènes de fissuration, ce qui nous a contraint à limiter notre réflexion sur les essais en classe de service 2. Nous avons modélisé deux phénomènes mécaniques connus dans la littérature, à savoir, l'hygro sensibilité de la matrice élastique et le comportement viscoélastique hygro activé. Le champ hydrique étant hétérogène dans la section, la modélisation de ces phénomènes a été effectuée en 3D dans Castem. Au cours de plusieurs analyses, nous avons pu montrer l'influence de chacun de ces deux comportements sur la réponse à long terme d'un élément de structure. Ainsi, en l'absence de fissuration, nous avons conclu que l'hygro sensibilité n'a qu'un faible impact sur le comportement différé par rapport à la réponse viscoélastique hygro activée. Nous avons donc modélisé le comportement viscoélastique hygro activé des poutres situées en classe de service 2. Le cas des poutres de chêne, qui ont été chargées à haute humidité, a permis de bien cerner les effets d'hygro-activation sur le comportement viscoélastique et la nécessaire adéquation du nombre de cellules de Kelvin Voigt associées ainsi que de leur temps caractéristique dans une approche rhéologique. Après adaptation du modèle, nous avons montré que les quatre essences d'étude, en classe de service 2, ne présentent pas de différences de comportement viscoélastique hygro activé. Cette étude nous a également permis d'aller beaucoup plus loin dans la compréhension du comportement long terme d'un élément de structure. En conservant l'idée d'un coefficient simple (k_{def} , utilisé pour la vérification des structures aux états limites de service), les outils développés en permettent une détermination plus fine. En prenant comme référence un comportement long terme $k_{def-ref}$, représentant le comportement d'un élément en flexion qui restera à humidité constante et égale à 12% tout au long de la période, des corrections sont proposées afin de s'adapter à l'environnement climatique, la géométrie ou encore l'humidité initiale. A partir d'une étude sur des poutres de différentes géométries et localisées dans différents environnements, nous avons pu montrer une corrélation entre la section de la poutre et son comportement long terme. Nous avons également mis en avant l'impact d'un chargement (sous conditions d'humidité haute) sur le comportement long terme. Nous avons ainsi pu montrer qu'une poutre chargée humide sera d'autant plus influencée par cette humidité initiale que sa section transversale sera forte, et ce, même si, en service, elle se situera dans un environnement sec.

Ce travail, orienté à l'origine vers une problématique très ingénieur, a permis de développer un modèle thermo-hygro-mécanique réaliste. Pourtant, il ouvre à beaucoup de perspectives dont les plus importantes, à notre sens, sont proposées.

Tout au long de notre étude, nous n'avons pas pris en compte l'influence de la fissuration sur le comportement à long terme. Cette étude permettrait, dans un premier temps, une meilleure compréhension des évolutions des flèches mesurées sur les deux bancs expérimentaux. Elle permettrait également d'améliorer notre approche de détermination du comportement long

terme en fonction de la section et de l'humidité initiale. En effet, nous pouvons estimer que l'influence d'un chargement humide induira l'apparition de fissures qui amplifieront le comportement différé, et ce, lors des phases de séchage en surface. La modélisation des variations d'humidité en peau fait apparaître des gradients locaux difficilement compatibles avec le comportement fragile de traction perpendiculaire. Enfin, la prise en compte de la fissuration permettra, à la vue de nos observations, de présenter des différences de comportement long terme entre les feuillus et les résineux.

En seconde perspective, nous proposons de continuer à identifier les propriétés de diffusion suivant le protocole expérimental et numérique que nous avons élaboré au cours de ces travaux. Ce protocole étant simple et rapide, il permettrait de compléter une base de données de perméabilité de différentes essences de bois. Pour une étude structure, cette base de données permettrait de conclure sur l'influence des écarts des propriétés de diffusion entre les essences utilisées dans la construction sur le comportement mécanique différé. De la même façon, il nous semble intéressant de confirmer la différence d'équilibre et d'hystérésis hydrique entre les feuillus et les résineux. Pour cela, une étude bibliographique approfondie doit être effectuée pour apporter un maximum de références bibliographiques.

Enfin, concernant le modèle de diffusion, deux améliorations doivent être apportées afin de prédire l'évolution hydrique de tout type d'élément de structure. Tout d'abord, une étude du transfert hydrique sous températures négatives permettrait de déterminer le comportement d'un élément soumis à un environnement extérieur tel qu'on peut le connaître en France lors de la période hivernale. Le modèle actuel n'arrive pas à reproduire l'accélération du séchage à température négative. D'un autre côté, la prise en compte de la diffusion de l'eau liquide tel que le décrit Laou (2017) permettrait de rendre compte de la diffusion de l'eau en face supérieure des poutres situées en classe de service 3 et exposées à la pluie. Un modèle de type Darcy pourrait prendre le relais au-delà du point de saturation des fibres.

Références bibliographiques

AFNOR (2000). NF EN 12524.

AFNOR (2010). NF EN 1995-1-1/NA.

AFNOR (2012a). NF EN 1912 - Bois de structure - Classes de résistance - Affectation des classes visuelles et des essences.

AFNOR (2012b). NF EN 408 Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

AFNOR (2013a). NF EN 335 - Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois.

AFNOR (2013b). NF EN 2571 (Octobre 2013).

AFNOR (2016a). NF B52-001-1 (A3-Juin 2016) : Classement visuel pour l'emploi en structure des bois sciés français résineux et feuillus - Partie 1 : Bois massif.

AFNOR (2016b). NF EN 338 - Bois de structure - Classes de résistance.

AFNOR (2016c). NF EN 384 Bois de structure — Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique.

AFNOR FD P 21-502_Structures en bois - Utilisation des bois massifs feuillus en structure - Propositions de compléments à l'Eurocode 5.

Agoua, E. (2001). Diffusivité et perméabilité du bois : validation de méthodologies expérimentales et prise en compte de paramètres morphologiques simples pour la modélisation physique.

Armstrong, L.D. (1960). Effet of moisture changes n creep in wood. *Nature*, 862–863.

Artola, P.A. (2009). Etude théorique et numérique de l'effet Soret.

Bahar, R. (2015). Isotherme de désorption et propriétés thermodynamiques du bois de pin d'Alep, de pin Pignon et de pin Brutia- BAHAR 2015.pdf. 5ème Sémin. Maghréb. Sur Sci. Technol. Séchage.

Bahar, R., Azzouz, S., Remond, R., Ouertani, S., Elaieb, M.T., and El Cafci, M.A. (2016). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of Oak wood (*Quercus robur* and *Quercus canariensis*): optimization of the processing parameters. *Heat Mass Transf.*

Bažant, Z.P. (1985). Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature. *Wood Sci. Technol.* 19, 159–177.

Berthelot, A., Reuling, D., Aleon, D., EL Haouzali, H., Marshal, R., and Paillassa, E. (2009). Référentiel qualités du bois des cultivars de peuplier. 36.

Bramhall, G. (1971). The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood. *Wood Sci. Technol.* 5, 121–134.

Brémaud, I. (2006). Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique. Etude expérimentale des propriétés vibratoires en direction axiale de types de bois

contrastés en majorité tropicaux. Relations à des déterminants de microstructure et de composition chimique secondaire. PhD Thesis. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.

Bruhat, G., Kastler, A., and Vichnievsky, R. (1962). Cours de physique générale : Thermodynamique. (Masson et Cie Poitiers, Sté française d'Impr. et M. Texier réunies).

Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *J Am Chem Soc* 60, 309–319.

Burgers, A. (2016). Caractérisations physico-mécaniques de bois " sans défauts " pour la conception mécanique: application aux pins de la région méditerranéenne française. PhD Thesis. Université Montpellier.

Carsten-Rode-Pedersen (1990). Combined heat and moisture transfer in building constructions. CEA (2015). Cast3M.

Chaouch, M. (2011). Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement: développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes. PhD Thesis. Nancy 1.

Chen, P.Y.S. (1991). Variation in longitudinal permeability of three U.S. hardwoods. *For. Prod. J.* 41, 79–83.

Choong, E.T. (1963). Movement of moisture through a softwood in the hygroscopic range.

Choong, E.T. (1965). Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods. *For. Prod. J.* 15(1), 21–27.

Choong, E.T. (1989). Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. 185–196.

CIRAD (2012). Fiche de l'essence CHÊNE.

Clair, B. (2001). Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire : Essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à coche gélétineuse.

Comstock, G.L. (1967). Longitudinal permeability of wood to gases and non-swelling liquids.

Comstock, G.L. (1968). Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous Sapwood. *Wood Sci. Technol.* 2, 279–291.

Constant, T., Badia, M.A., and Mothe, F. (2003). Dimensional stability of Douglas fir and mixed beech?poplar plywood: experimental measurements and simulations. *Wood Sci. Technol.* 37, 11–28.

Defraeye, T., Houvenaghel, G., Carmeliet, J., and Derome, D. (2012). Numerical analysis of convective drying of gypsum boards. *Int. J. Heat Mass Transf.* 55, 2590–2600.

Deglise, X., and Donnot, A. (2004). Bois énergie. *Tech. Ing. BE8535*, 1–26.

Dent, R.W. (1980). A sorption theory for gas mixtures. *Polym. Eng. Sci.* 20, 286–289.

- Dubois, F. (1997). *Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissurés : application au matériau bois*. Limoges.
- Dubois, F., Randriambololona, H., and Petit, C. (2005). Creep in wood under variable climate conditions: numerical modeling and experimental validation. *Mech. Time-Depend. Mater.* 9, 173–202.
- Dunlap, F. (1912). *The Specific Heat Of Wood*.
- Dupleix, A., Kusiak, A., Hughes, M., and Rossi, F. (2013). Measuring the thermal properties of green wood by the transient plane source (TPS) technique. *Holzforschung* 67, 437–445.
- Erickson, H.D., and Schmidt, R.N. (1969). Rupture of pit membranes during embedding procedures. *Wood Sci. Technol.* 3, 194–202.
- FCBA (2018a). *Memento 2018*.
- FCBA (2018b). *Le programme feuillus de FCBA et EU HARDWOODS*. *For. Entrep.* 27–34.
- Félix, B. (1990). *Éléments de rhéologie du bois*.
- Frandsen, H.L. (2007). Selected constitutive models for simulating the hygromechanical response of wood Frandsen.
- Gérard, J., Guibal, D., Paradis, S., Vernay, M., Beauchêne, J., Brancheriau, L., Châlon, I., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D., et al. (2011). *Tropix*.
- Ghazlan, G., Caperaa, S., and Petit, C. (1995). An incremental formulation for the linear analysis of thin viscoelastic structures using generalized variables. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 38, 3315–3333.
- Gril, J. (1988). Une modélisation du comportement hygro-rheologique du bois à partir de sa microstructure.
- Gril, J. (1993). Recouvrance hygrothermique du bois vert. I. Influence de la température. Cas du jujubier.
- Grossman, P.U.A. (1976). Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour. *Wood Sci. Technol.* 10, 163–168.
- Guitard, D. (1987). *Mécanique du matériau bois & composites (Cépaduès)*.
- Guitard, D., and El Amri, F. (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. In *Annales Des Sciences Forestières, (EDP Sciences)*, pp. 335–358.
- Hailwood, A.J., and Horrobin, S. (1946). Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. *Trans. Faraday Soc.* 42, B084–B092.
- Harrington, J.J. (2002). Hierarchical modelling of softwood hygro-elastic properties.
- Hearmon, R., and Paton, J. (1964). Moisture content changes and creep of wood. *For. Prod. J.* 357–359.

- Holm, A., and Künzel, H.. (2000). Non-Isothermal Moisture Transfer in Porous Building Materials.
- Hunt, D.G. (1984). Creep trajectories for beech during moisture changes under load. *J. Mater. Sci.* 19, 1456–1467.
- Hunt, D.G. (1989). Linearity and non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood in compression and bending. *Wood Sci. Technol.* 23, 323–333.
- Hunt, D.G. (1999). A unified approach to creep of wood. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, (The Royal Society), pp. 4077–4095.
- Hunt, D.G. (2001). Strain rate versus strain plots and creep-limit studies. *Proc. First Int. Conf. Eur. Soc. Wood Mech.*
- Hunt, D.G. (2004). The prediction of long-time viscoelastic creep from short-time data. *Wood Sci. Technol.* 38, 479–492.
- Husson, J.-M. (2009). Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire.
- Jamaoui, A. (2017). Durabilité et comportement hygroscopique du Douglas en relation avec son patrimoine génétique.
- Jodin, F. (1994). *Le bois : Matériau d'ingénierie.*
- Kanter, K.R. (1957). The thermal properties of wood. *Nauka Tekhnika* 6.
- Keylwerth, R. (1964). Bundesforschungsanstalt für Forst und Hozwirtschaft, Reinbek Institut für Holzphysik und mechanische Holztechnologie.
- Kollmann, F.F.P., and Côté, W.A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).
- Kouchade, A.C. (2004). Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire.
- Krabbenhoft, K., and Damkilde, L. (2004). A model for non-Fickian moisture transfer in wood. *Mater. Struct.* 37, 615–622.
- Kulasinski, K. (2015). Physical and mechanical aspects of moisture adsorption in wood biopolymers investigated with atomistic simulations. ETH Zurich.
- Kulasinski, K., Guyer, R., Derome, D., and Carmeliet, J. (2015). Water Diffusion in Amorphous Hydrophilic Systems: A Stop and Go Process. *Langmuir* 31, 10843–10849.
- Künzel, H.. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components : One- and two dimensional calculation using simple parameters.
- Kuroda, N., and Siau, J.F. (2007). Evidence of nonlinear flow in softwoods from wood permeability measurements. *Wood Fiber Sci.* 20, 162–169.
- Lagarias, J.C., Reeds, J.A., Wright, M.H., and Wright, P.E. (1998). Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions. *SIAM J. Optim.* 9, 112–147.

- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *J. Am. Chem. Soc.* *40*, 1361–1403.
- Laou, L. (2017). Evaluation du comportement mécanique sous sollicitations thermohydriques d'un mur multimatériaux (bois, terre crue, liants minéraux) lors de sa construction et de son utilisation.
- Leicester, R.H. (1971). A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams. *Wood Sci. Technol.* *5*, 211–220.
- Li, X., Zhang, B., Li, W., and Li, Y. (2006). Nonisothermal moisture movement in wood. *Front. For. China* *1*, 348–352.
- Luikov, A.V. (1966). *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies* (Oxford).
- Luikov, A.V. and M., Y.A. (1965). *Theory of Energy and Mass Transfer* (Pergamon Press).
- Mandel, J. (1966). *Cours de Mécanique des milieux continus*.
- Manfoumbi B., N., Dubois, F., Sauvat, N., and Gril, J. (2012). Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement.
- Medjelekh, D. (2015). Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscopiques. Université de Limoges.
- Merakeb, S. (2006). Couplage hygromécanique dans le processus de diffusion dans le bois.
- Merakeb, S., Dubois, F., and Petit, C. (2009). Modeling of the sorption hysteresis for wood. *Wood Sci. Technol.* *43*, 575–589.
- Milota, M.R. (1995). Gas permeability of plantation loblolly pine. *AGRIS*.
- Montero, C. (2010). Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois. PhD Thesis. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Mouchot, N. (2002). Etude expérimentale et modélisation des transports diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique des bois de hêtre et d'épicéa.pdf.
- Mukudai, J., and Yata, S. (1986). Modeling and simulation of viscoelastic behavior (tensile strain) of wood under moisture change. *Wood Sci. Technol.* *20*, 335–348.
- Nakano, T. (1999). Analysis of creep of wood during water adsorption based on the excitation response theory. *J. Wood Sci.* *45*, 19.
- Natterer, J., and Sandoz, J.-L. (1987). *Construction en Bois : Matériaux, technologie et dimensionnement* (Presses Polytechniques et Universitaires Romandes).
- Navi, P., and Heger, F. (2005). *Comportement thermo-hydromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures* (PPUR presses polytechniques).
- Nelder, J.A., and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Comput. J.* *7*, 308–313.
- Nelson, R.M. (1986). Diffusion of bound water in wood-part 3-A model for nonisothermal diffusion. *Wood Sci. Technol.* *20*, 309–328.

- Nelson, R.M. (1991). Heats of transfer and activation energy for bound water diffusion in wood. *Wood Sci. Technol.* 25, 193–202.
- Nguyen, T.A. (2014). Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois. Université de Limoges.
- Olek, W. (2012). Influence of cyclic sorption on wood ultrastructure. *BioRessources* 7, 1729–1739.
- Panshin, A.J., and De Zeeuw, C. (1980). *Textbook of Wood Technology Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Wood of the United States and Canada*, third ed.
- Perré, P., and May, B.K. (2001). A Numerical Drying Model That Accounts for the Coupling Between Transfers and Solid Mechanics. Case of Highly Deformable Products. *Dry. Technol.* 19, 1629–1643.
- Pittet, V. (1996). Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée.
- Preziosa, C., and Guitard, D. (1986). Contraintes internes de séchages dans le matériau bois.pdf. *Bois For. Trop. Cahier Scientifique*, 93–109.
- Prigogine, I., and Kondepudi, D. (1999). *THERMODYNAMIQUE. Des moteurs thermiques aux structures dissipatives* (Paris: Editions Odile Jacob).
- Radmanović, K., Đukić, I., and Pervan, S. (2014). Specific Heat Capacity of Wood. *Drv. Ind.* 65, 151–157.
- Randriambololona, H. (2003). Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable.
- Ranta-Maunus (1975). The viscoelasticity of wood at varying moisture content.
- Rawat, S.P.S. (1996). Enthalpy-entropy compensation during sorption of water in wood. *J. Appl. Polym. Sci.* 60, 787–790.
- Recknagel (1995). *Manuel pratique de génie climatique - Tome 1*.
- Resch, H., and Ecklund, B.A. (1964). Permeability of wood exemplified by studies on redwood. *For. Prod. J.* 199–206.
- Rijsdijk, J.F. (1994). *Physical and Related Properties of 145 Timbers* (Dordrecht: Springer Netherlands).
- Rosen, H.N. (1976). Exponential dependency of moisture diffusion coefficient. *Wood Sci.* 8, 174–179.
- Rousset, P. (1999). Détermination des propriétés de diffusion, de sorption et de perméation du bois de peuplier traité à haute température en vue d'une utilisation comme emballage alimentaire.

- Salmen, L. (1982). Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based materials. PhD Thesis. Department of Paper Technology, Royal Institute of Technology Stockholm.
- Siau, J.F. (1971). Flow in wood (Syracuse University Press).
- Siau, J.F., and Babiak, M. (1982). Experiments on nonisothermal moisture movement in wood. *Wood Fiber Sci.* 15, 40–46.
- Siau, J.F., and Jin, Z. (1985a). Nonisothermal moisture diffusion experiments analyzed by four alternative equations. *Wood Sci. Technol.* 19, 151–157.
- Siau, J.F., and Jin, Z. (1985b). Nonisothermal moisture diffusion experiments analyzed by four alternative equations. *Wood Sci. Technol.* 19, 151–157.
- Siau, J.F., and Petty, J.A. (1979). Corrections for capillaries used in permeability measurements of wood. *Wood Sci. Technol.* 13, 179–185.
- Simpson, W.T., and Liu, J.Y. (1991). Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (*Populus spec.*) on moisture content. *Wood Sci. Technol.* 26, 9–21.
- Skaar, C. (1988). Wood water relations.
- Stamm, A.J. (1959). Bound water diffusion into wood in the fiber direction. *For. Prod. J.* 9(1), 27–32.
- Stamm, A.J. (1964). Wood and cellulose science (Ronald Press Co.).
- Stamm, A.J., and Nelson, R.M. (1961). Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine. *For. Prod. J.*
- Sucoff, E.I., and Chen, P.Y.S. (1965). Permeability of unseasoned xylem of northern white cedar. *For. Prod. J.* 15(8), 321–324.
- TenWolde, A., McNatt, J.D., and Krahn, L. (1988). Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings.
- Toratti, T. (1992a). Creep of wood in varying environment humidité Part I Simulation of creep.
- Toratti, T. (1992b). Modelling the creep of timber beams. *Raken. Mek.* 25, 12–35.
- Touati, B., Lips, B., Benyoucef, B., Virgone, J., Jamali, A., and Kouhila, M. (2007). Effet de la température sur les isothermes et la chaleur isostérique de sorption des feuilles de menthe (*mentha viridis*). In *Congres Annuel de La Société Française de La Thermique (SFT'07)*, p.
- Touil, A., Litaïem, J., and Zagrouba, F. (2015). Isothermes de sorption et propriétés thermodynamique de l'*Allium sativum*. *J. Tunis. Chem. Soc.* 17, 105–114.
- Tremblay, C., Cloutier, A., and Fortin, Y. (2000). Experimental determination of the convective heat and mass transfert coefficients for wood drying. *Wood Sci. Technol.* 34, 253–276.
- Trouy, M.-C. (2016). Fun Mooc : Anatomie du bois.
- Trouy-Triboulot, M.-C., and Triboulot, P. (2012). Matériau bois - Structure et caractéristiques Techniques de l'ingénieur. *Tech. Ing.* 38.

Venet, J. (1986). Identification et classement des bois français (Nancy [France]: Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF)).

Volbehr, B. (1896). Swelling of wood fiber.

Yamamoto, H. (1999). A model of the anisotropic swelling and shrinking process of wood. Part 1. Generalization of Barber's wood fiber model. *Wood Sci. Technol.* 33, 311–325.

Annexes

Annexe 1. Essais complémentaires de diffusion	219
Annexe 2. Influence de la correction de pesée des balances sur les mesures	220
Annexe 3. Développement du modèle d'hygro sensibilité de Husson	222
Annexe 3.1. Formulation incrémentale	222
Annexe 3.1.1. Cas de rigidification du matériau	223
Annexe 3.1.2. Cas d'adoucissement du matériau	223
Annexe 3.2. Principe de l'implémentation aux éléments finis.....	224
Annexe 3.2.1. Détermination de l'expansion thermo-hydrique	225
Annexe 3.2.2. Cas rigidifiant	225
Annexe 3.2.3. Cas assouplissant	226
Annexe 4. Développement du modèle viscoélastique de Dubois	227
Annexe 4.1. Approche analytique pour une cellule de Kelvin Voigt	227
Annexe 4.2. Approche analytique pour un modèle de Kelvin Voigt généralisé.....	229
Annexe 4.3. Implémentation du modèle viscoélastique 3D orthotrope.....	230
Annexe 4.4. Algorithme de résolution du comportement viscoélastique 3D.....	232
Annexe 5. Influence de la géométrie sur le comportement hydrique long terme : Evolution de la teneur en eau moyenne	234
Annexe 6. Influence de la géométrie sur le comportement hydrique long terme : Profil d'humidification	237
Annexe 7. Identification des paramètres du modèle simplifié	239
Annexe 8. Comportement long terme : Comparaison des deux modèles	240
Annexe 9. Comportement long terme : Evolution sur 50 ans.....	243

Annexe 1. Essais complémentaires de diffusion

Afin de déterminer le protocole expérimental de diffusion, nous avons réalisé plusieurs essais de diffusion avec plusieurs formes d'éprouvettes. Nous avons également essayé de vérifier la répétabilité de l'essai, ou encore l'influence de la période d'essai sur les paramètres d'identification. Ces essais, complémentaires au plan d'expériences, ont été réalisés en 2016-2017. Le Tableau 48 récapitule le planning de ces essais.

Tableau 48 : Planning des essais complémentaires sur l'année 2016-2017

		Aoû.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.
T _{moy}	°C	17,2		7,6		2,4		8,2	11,4		19,2	
T _{min}		3,2		-0,4		-4,3		-1,2	0,8		6,0	
T _{max}		36,6		18,3		11,7		18,9	22,6		30,7	
HR _{moy}	%	62,2		82,8		78,2		76,4	58,2		65,3	
HR _{min}		18,7		40,4		31,3		26,3	12,4		31,8	
HR _{max}		92,3		95,7		99,6		98,2	96,0		92,9	
Essences	Direction											
Hêtre	L											
Hêtre	RT											
Peuplier	L											
Peuplier	RT											
Douglas	L											
Douglas	RT											

Annexe 2. Influence de la correction de pesée des balances sur les mesures

La correction des pesées en fonction de la température au cours de l'essai du hêtre en mars-avril est l'un des essais qui présente l'une des moins bonnes corrélations coefficient de correction-déphasage et température moyenne (Figure 173).

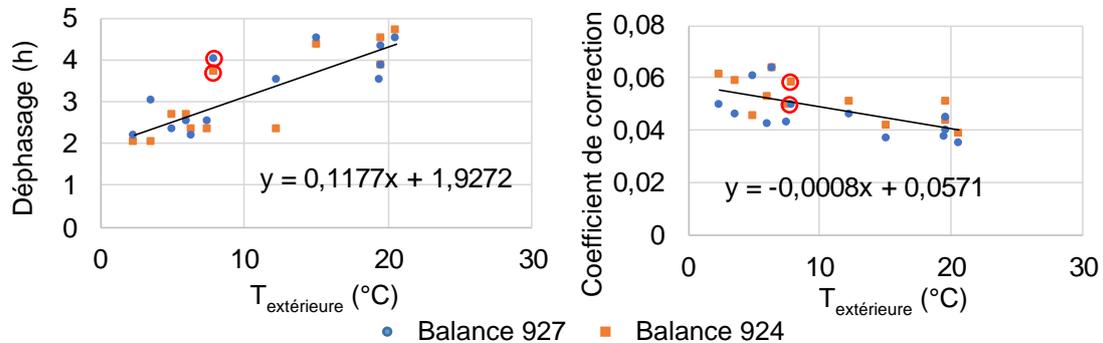


Figure 173 : Coefficient de correction et déphasage de l'essai de hêtre par rapport aux autres (Eprouvette L : Balance 924 ; Eprouvette RT : Balance 927)

Quel est l'influence de cette correction sur l'évolution de l'humidité ? Une erreur de détermination de ces coefficients viendrait-il modifier l'identification des propriétés de diffusion des éprouvettes d'études ?

Nous proposons de montrer l'influence de ces deux corrections sur l'évolution de la teneur en eau des éprouvettes L et RT de hêtre. Une première correction est effectuée à partir des paramètres identifiés (Figure 54), et une seconde à partir de la loi linéaire reliant le coefficient de correction et le déphasage à la température (Figure 173).

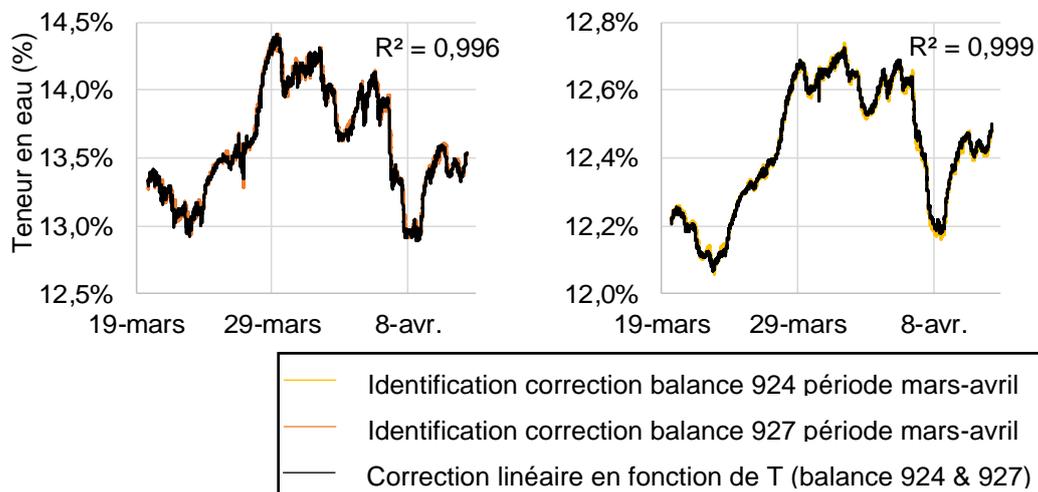


Figure 174 : Influence des paramètres de calage des balances sur l'évolution de la teneur en eau des éprouvettes L (à droite) et RT (à gauche)

Les évolutions de teneur en eau des éprouvettes ne sont pas sensibles aux variations de correction des pesées par la température. Ainsi une erreur effectuée sur l'identification des paramètres de correction par la température n'induirait pas une erreur sur l'évolution de la pesée, et donc sur l'identification des propriétés de diffusion. Enfin, ce résultat montre

également la robustesse de notre protocole expérimental effectué dans un milieu non contrôlé en température malgré un matériel simple.

Annexe 3. Développement du modèle d'hygro sensibilité de Husson

Cette annexe, a pour objectif de rappeler les équations de détermination du comportement mécanique. Nous présentons le modèle d'hygro sensibilité couplé au phénomène d'hygro verrou, développé par Husson au cours de sa thèse (Husson, 2009).

Annexe 3.1. Formulation incrémentale

Dans le domaine viscoélastique standard, l'intégrale de Boltzmann permet de décrire l'évolution de la déformation d'un élément soumis à une variation mécanique et thermo-hydrrique selon l'équation :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t C_{\max}(t-\tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau + \int_0^t \alpha(\tau) \cdot \frac{\partial w}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad \text{Avec } C = \frac{1}{E} = \frac{1}{k} \quad \text{la complaisance} \quad (5.1)$$

Afin de simplifier la formulation incrémentale, on ne s'intéressera dans un premier temps qu'à l'influence de l'incrément de contrainte. Ainsi, on peut écrire l'équation (5.1) la forme incrémentale tel que :

$$\varepsilon(t) = \sum_i C(t-t_i) \cdot \Delta\sigma(t_i) \quad (5.2)$$

Cependant cette approche incrémentale n'est pas très optimisée pour une implémentation dans un code aux éléments finis. En effet elle demande de sommer toute l'histoire de l'incrément de contrainte $\Delta\sigma(t_i)$. Par principe une telle méthode viendrait saturer la mémoire de la station de calcul.

Afin de simplifier l'implémentation, nous proposons de réécrire l'intégrale de Boltzmann sous une forme incrémentale. Ainsi dans un algorithme numérique, la mise à jour du champ de contrainte et de déformation se fait au travers d'un incrément de temps, tel que :

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1} \quad (5.3)$$

Ainsi la déformation et la contrainte mécanique peut être définie à partir de l'état mécanique au temps t_{n-1} tel que :

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_n) &= \varepsilon(t_{n-1}) + \Delta\varepsilon_n \\ \sigma_M(t_n) &= \sigma_M(t_{n-1}) + \Delta\sigma_M^n \end{aligned} \quad (5.4)$$

Avec $\Delta\varepsilon_n$ et $\Delta\sigma_M^n$ l'incrément de déformation et de contrainte durant le pas de temps Δt_n respectivement.

A partir de ce principe de discrétisation temporelle, on peut réécrire l'équation (3.28) tel que :

$$\varepsilon(t) = \int_0^{t_n} C_{\max}(\tau, t_n) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau = \int_0^{t_{n-1}} C_{\max}(\tau, t_n) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} C_{\max}(\tau, t_n) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (5.5)$$

Avec $C_{\max}(\tau, t_n)$ la complaisance maximale entre le temps τ et t_n .

La difficulté numérique est alors de déterminer l'évolution de C_{\max} durant le pas de temps Δt_n . Ainsi cette approche demande de différencier le cas d'adoucissement et de rigidification du matériau.

Annexe 3.1.1. Cas de rigidification du matériau

La rigidification du matériau intervient lors du séchage. Ainsi, durant l'incrément de temps Δt_n , l'incrément de complaisance vaut :

$$\Delta C_n = C(t_n) - C(t_{n-1}) < 0 \quad (5.6)$$

La Figure 175 présente un exemple d'évolution de la complaisance lors d'une phase de rigidification.

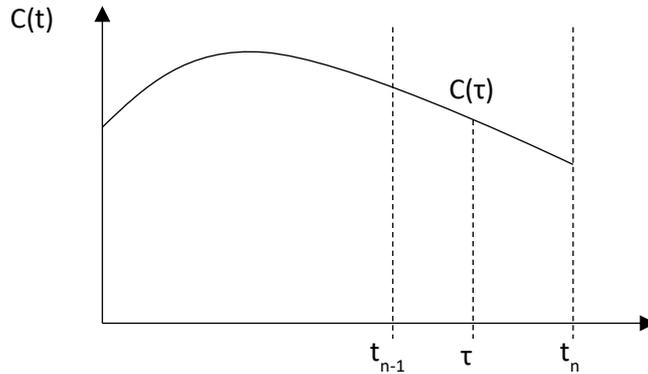


Figure 175 : Evolution de la complaisance durant une phase de rigidification

A partir de cette représentation, il est aisé de déterminer la complaisance maximale selon deux périodes différentes :

$$\begin{aligned} C_{\max}(\tau, t_n) &= C_{\max}(\tau, t_{n-1}) \text{ pour } \tau \in [0, t_{n-1}] \\ C_{\max}(\tau, t_n) &= C(\tau) \text{ pour } \tau \in [t_{n-1}, t_n] \end{aligned} \quad (5.7)$$

Ainsi en combinant les équations (5.5) et (5.7) on peut déterminer l'évolution de la déformation de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \int_0^{t_{n-1}} C_{\max}(\tau, t_{n-1}) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} C(\tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau = \varepsilon(t_{n-1}) + \Delta \varepsilon_n \\ \text{Avec } \Delta \varepsilon_n &= \int_{t_{n-1}}^{t_n} C(\tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau \end{aligned} \quad (5.8)$$

Annexe 3.1.2. Cas d'adoucissement du matériau

L'adoucissement du matériau intervient lors de l'humidification. Ainsi, durant l'incrément de temps Δt_n , l'incrément de complaisance vaut :

$$\Delta C_n = C(t_n) - C(t_{n-1}) > 0 \quad (5.9)$$

En phase d'humidification la raideur prend la valeur minimale de raideur depuis le début du chargement (3.21). Du point de vue de la complaisance cela revient à déterminer la valeur maximale depuis le chargement. Pour déterminer cette valeur nous introduisons un temps \bar{t} , tel que pour $\tau < t_n$, $C(\tau) = C(t_n)$. La Figure 176 présente un exemple d'évolution de la complaisance lors d'une phase d'adoucissement.

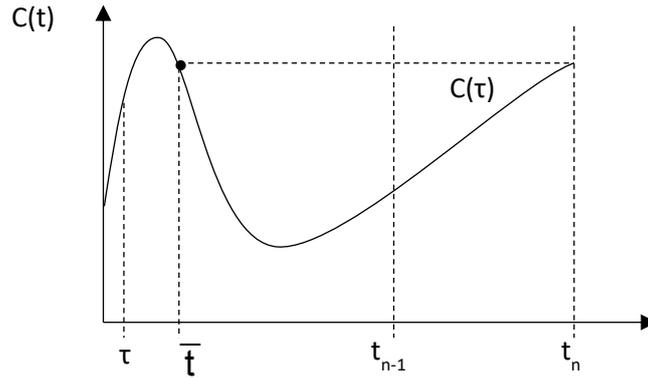


Figure 176 : Evolution de la complaisance durant une phase d'adoucissement

Ainsi la complaisance maximale est déterminée à partir de deux périodes :

$$\begin{aligned} C_{\max}(\tau, t_n) &= C(\tau, \bar{t}) \text{ pour } \tau \in [0, \bar{t}] \\ C_{\max}(\tau, t_n) &= C(t_n) \text{ pour } \tau \in [\bar{t}, t_n] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Entre l'instant $[\bar{t}, t_n]$ la complaisance étant inférieure à la valeur à t_n , $C(t_n)$, le niveau de contrainte reste bloqué à la valeur $\sigma(\bar{t})$.

Enfin à partir de la simplification (5.10), nous pouvons réécrire l'équation de la déformation (5.5) tel que :

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_n) &= \int_0^{\bar{t}} C_{\max}(\tau, \bar{t}) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau + \int_{\bar{t}}^{t_n} C_{\max}(t_n) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \cdot d\tau \\ &= \varepsilon(\bar{t}) + C(t_n) \cdot (\sigma(t_n) - \sigma(\bar{t})) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Ainsi à partir des équations (5.4) et (5.11) l'incrément de déformation s'écrit :

$$\Delta \varepsilon_n = \varepsilon(\bar{t}) - \varepsilon(t_{n-1}) + C(t_n) \cdot (\sigma(t_n) - \sigma(\bar{t})) \quad (5.12)$$

Annexe 3.2. Principe de l'implémentation aux éléments finis

Le comportement mécanique que nous modélisons ici est celui d'un matériau élastique soumis à des variations d'humidité. Nous sommes alors en présence d'un comportement hygro élastique. Ainsi pour déterminer l'évolution de la déformation on peut différencier ces deux types de comportement de la façon suivante :

$$\varepsilon = C \cdot \sigma + \alpha \cdot \Delta w \quad (5.13)$$

Le premier terme représente la déformation proportionnelle à la contrainte au travers de la complaisance, et le second terme définit la déformation libre.

Dans une loi incrémentale, l'équation (5.13) s'écrit :

$$\varepsilon = C \cdot \sigma + B \quad (5.14)$$

Ou encore pour définir l'incrément de déformation sur l'incrément de temps Δt_n :

$$\Delta \varepsilon_n = A \cdot \Delta \sigma_n + B \quad (5.15)$$

A représente une pseudo complaisance qui permet de traduire la réponse d'une déformation instantanée induit par un incrément de contrainte mécanique. B représente l'histoire complète de l'effet de la température, de l'humidité et du chargement sur la déformation.

Ainsi pour les deux cas rigidifiant et assouplissant, nous devons identifier les paramètres A et B. Est présenté ci-dessous la démarche d'identification des deux paramètres sans la prise en compte des effets de retrait gonflement. Ainsi l'incrément de déformation thermo-hydrrique sera à ajouter au terme B.

Annexe 3.2.1. Détermination de l'expansion thermo-hydrrique

S'écrivant sous la même forme que la déformation mécanique, la déformation due aux variations d'humidité ou de température s'écrit :

$$\varepsilon_w(t_n) = \int_0^{t_n} \alpha(\tau) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot d\tau = \int_0^{t_{n-1}} \alpha(\tau) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} \alpha(\tau) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (5.16)$$

De la même façon, l'incrément de déformation s'écrit:

$$\Delta\varepsilon_w(t_n) = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \alpha(\tau) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (5.17)$$

En considérant la linéarité de l'incrément d'humidité (ou de température) $w(\tau)$ et du coefficient de variation $\alpha(\tau)$ pendant l'incrément de temps Δt_n , on peut alors écrire :

$$\alpha(\tau) = \frac{\Delta\alpha_n}{\Delta t_n} \cdot (\tau - t_{n-1}) + \alpha(t_{n-1}) \text{ et } w(\tau) = \frac{\Delta w_n}{\Delta t_n} \cdot (\tau - t_{n-1}) + w(t_{n-1}) \quad (5.18)$$

Ainsi, l'incrément de déformation hydrrique/thermique s'écrit :

$$\Delta\varepsilon_w(t_n) = \Delta w_n \cdot \left[\frac{\Delta\alpha_n}{2} + \alpha(t_{n-1}) \right] \quad (5.19)$$

Annexe 3.2.2. Cas rigidifiant

Dans le cas où la matrice élastique se rigidifie, la déformation et l'incrément de déformation s'écrivent selon les équations (5.4) et (5.8). Nous prenons comme hypothèse que sur l'incrément Δt_n la contrainte est linéaire, ainsi :

$$\sigma(\tau) = \sigma(t_{n-1}) + \Delta\sigma_n \cdot \frac{(\tau - t_{n-1})}{\Delta t_n}, \text{ avec } \Delta t_n = t_n - t_{n-1} \quad (5.20)$$

De la même façon, la complaisance s'écrit :

$$C(\tau) = C(t_{n-1}) + \Delta C_n \cdot \frac{(\tau - t_{n-1})}{\Delta t_n} \quad (5.21)$$

Ainsi l'incrément de déformation donné dans l'équation (5.8) peut se réécrire ce la façon suivante :

$$\begin{aligned}
\Delta \varepsilon_n &= \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left(C(t_{n-1}) + \frac{\Delta C_n}{\Delta t_n} \cdot (\tau - t_{n-1}) \right) \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta t_n} \cdot d\tau \\
&= C(t_{n-1}) \cdot \frac{\Delta \sigma_n}{\Delta t_n} \int_{t_{n-1}}^{t_n} d\tau + \frac{\Delta C_n \cdot \Delta \sigma_n}{\Delta t_n^2} \cdot \int_{t_{n-1}}^{t_n} (\tau - t_{n-1}) \cdot d\tau \\
&= C(t_{n-1}) \cdot \Delta \sigma_n + \frac{\Delta C_n \cdot \Delta \sigma_n}{\Delta t_n^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\tau - t_{n-1})^2 \right]_{t_{n-1}}^{t_n} \\
&= C(t_{n-1}) \cdot \Delta \sigma_n + \frac{\Delta C_n \cdot \Delta \sigma_n}{2 \cdot \Delta t_n^2} \cdot \Delta t_n^2 \\
&= C(t_{n-1}) \cdot \Delta \sigma_n + \frac{\Delta C_n \cdot \Delta \sigma_n}{2}
\end{aligned} \tag{5.22}$$

Ainsi en reprenant la mise en forme incrémentale proposée en (5.15), on peut identifier les paramètres A et B :

$$\begin{aligned}
A &= C(t_{n-1}) + \frac{\Delta C_n}{2} \\
B &= 0
\end{aligned} \tag{5.23}$$

Annexe 3.2.3. Cas assouplissant

Nous procédons de la même façon pour le cas d'assouplissement de la matrice rigidité. Ainsi à partir de l'équation (5.12) et selon la mise en forme de la loi incrémentale (5.4) l'incrément de déformation s'écrit :

$$\begin{aligned}
\Delta \varepsilon_n &= \varepsilon(\bar{t}) - \varepsilon(t_{n-1}) + C(t_n) \cdot (\sigma(t_{n-1}) + \Delta \sigma_n - \sigma(\bar{t})) \\
&= C(t_n) \cdot \Delta \sigma_n + C(t_n) \cdot (\sigma(t_{n-1}) - \sigma(\bar{t})) + \varepsilon(\bar{t}) - \varepsilon(t_{n-1})
\end{aligned} \tag{5.24}$$

Ainsi par identification les deux paramètres A et B valent :

$$\begin{aligned}
A &= C(t_n) \\
B &= C(t_n) \cdot (\sigma(t_{n-1}) - \sigma(\bar{t})) + \varepsilon(\bar{t}) - \varepsilon(t_{n-1})
\end{aligned} \tag{5.25}$$

Annexe 4. Développement du modèle viscoélastique de Dubois

Cette approche est décrite par Dubois, (1997), cependant nous la retranscrivons afin de garder le fil de l'implémentation.

Soit un élément soumis à une sollicitation représentée par une fonction étagée définie par :

$$\sigma(t) = \sum_{j=1}^n \Delta\sigma_j H(t - t_j) \quad (5.26)$$

Par le principe de superposition de Boltzmann, on peut écrire la réponse de l'équation (5.26) en déformation :

$$\varepsilon(t) = \sum_{j=1}^n J(t - t_j) \Delta\sigma_j \quad (5.27)$$

Où $\Delta\sigma_j$ représente la discontinuité en contrainte à l'instant j , et J la complaisance. Ainsi l'écriture peut se généraliser à une sollicitation continue ou discontinue par morceau en prenant une infinité d'échelons. La déformation s'écrit alors sous la forme d'une intégrale de Riemann à laquelle on ajoute les discontinuités éventuelles. Cette relation est connue sous le nom d'intégrale de Boltzmann :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t - \tau) \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} d\tau + \sum_{j=1}^n J(t - t_j) \Delta\sigma_j \quad (5.28)$$

Annexe 4.1. Approche analytique pour une cellule de Kelvin Voigt

Si l'on s'intéresse au comportement d'une cellule de Kelvin Voigt, de raideur k et de viscoélasticité η , l'évolution de la complaisance se détermine selon l'équation :

$$J(t) = \frac{1}{k} \left(1 - e^{-\lambda(t)}\right) \quad (5.29)$$

Dans le cas d'un élément soumis à une seule sollicitation, et en ajoutant l'équation (5.29) dans l'équation (5.28) l'évolution de la déformation s'écrit :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{1}{k} \left(1 - e^{-\lambda(t-\tau)}\right) \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} d\tau \quad (5.30)$$

En vue d'une implémentation du comportement viscoélastique du matériau dans un code aux éléments finis, nous proposons une approche par différence finie. Cela implique une discrétisation temporelle du système selon l'incrément de temps :

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1} \quad (5.31)$$

Ainsi la déformation au temps t_n s'écrit :

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_n) &= \int_0^{t_n} \frac{1}{k} \left(1 - e^{-\lambda(t_n-\tau)}\right) \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} d\tau \\ &= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \left(1 - e^{-\lambda(t_n-\tau)}\right) \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{1}{k} \left(1 - e^{-\lambda(t_n-\tau)}\right) \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} d\tau \end{aligned} \quad (5.32)$$

Et la déformation au temps t_{n-1} s'écrit :

$$\begin{aligned}
\varepsilon(t_{n-1}) &= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot (t_{n-1} - \tau)}) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \\
&= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau - \int_0^{t_{n-1}} \left(\frac{1}{k} \cdot e^{-\lambda \cdot (t_{n-1} - \tau)} \right) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau
\end{aligned} \tag{5.33}$$

Afin de simplifier la résolution de ce système, nous séparons les deux intégrales.

- Résolution de la première partie : A

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot (t_n - \tau)}) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \\
&= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau - \int_0^{t_{n-1}} \left(\frac{1}{k} \cdot e^{-\lambda \cdot (t_n - \tau)} \right) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau
\end{aligned} \tag{5.34}$$

Or d'après l'équation (5.31), on peut réécrire l'équation (5.34) tel que :

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau - \int_0^{t_{n-1}} \left(\frac{1}{k} \cdot e^{-\lambda \cdot (t_{n-1} + \Delta t_n - \tau)} \right) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \\
&= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau - e^{-\lambda \cdot \Delta t_n} \cdot \int_0^{t_{n-1}} \left(\frac{1}{k} \cdot e^{-\lambda \cdot (t_{n-1} - \tau)} \right) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau
\end{aligned} \tag{5.35}$$

Ainsi en associant l'équation (5.33) et (5.35) :

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau + e^{-\lambda \cdot \Delta t_n} \cdot \left[\varepsilon(t_{n-1}) - \int_0^{t_{n-1}} \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \right] \\
&= \frac{1}{k} \cdot \sigma(t_{n-1}) + e^{-\lambda \cdot \Delta t_n} \cdot \left[\varepsilon(t_{n-1}) - \frac{1}{k} \cdot \sigma(t_{n-1}) \right]
\end{aligned} \tag{5.36}$$

- Résolution de la seconde partie : B

$$B = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{1}{k} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot (t_n - \tau)}) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \tag{5.37}$$

On suppose que sur l'incrément de temps Δt_n , la contrainte est linéaire, ainsi :

$$\begin{aligned}
B &= \frac{\Delta \sigma_n}{k \cdot \Delta t_n} \cdot \int_{t_{n-1}}^{t_n} 1 - e^{-\lambda \cdot (t_n - \tau)} \cdot d\tau \\
&= \frac{\Delta \sigma_n}{k \cdot \Delta t_n} \cdot \left[\tau - \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot (t_n - \tau)} \right]_{t_{n-1}}^{t_n} \\
&= \frac{\Delta \sigma_n}{k \cdot \Delta t_n} \cdot \left[t_n - \frac{1}{\lambda} - t_{n-1} + \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot (t_n - t_{n-1})} \right] \\
&= \frac{\Delta \sigma_n}{k \cdot \Delta t_n} \cdot \left[\Delta t_n - \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t_n} \right] \\
&= \frac{\Delta \sigma_n}{k} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda \cdot \Delta t_n} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot \Delta t_n}) \right]
\end{aligned} \tag{5.38}$$

A partir des équations (5.36) et (5.38), la déformation au temps t_n s'écrit :

$$\varepsilon(t_n) = \frac{1}{k} \cdot \sigma(t_{n-1}) + e^{-\lambda \cdot \Delta t_n} \cdot \left[\varepsilon(t_{n-1}) - \frac{1}{k} \cdot \sigma(t_{n-1}) \right] + \frac{\Delta \sigma_n}{k} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda \cdot \Delta t_n} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot \Delta t_n}) \right] \quad (5.39)$$

Sur l'incrément de temps Δt_n , l'incrément de déformation est déterminé de la façon suivante :

$$\Delta \varepsilon_n = \varepsilon(t_n) - \varepsilon(t_{n-1}) \quad (5.40)$$

Ainsi l'incrément de déformation de la $m^{\text{ième}}$ cellule de Kelvin Voigt d'un système s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_n^{(m)} &= \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) + e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot \left[\varepsilon(t_{n-1}) - \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) \right] \\ &+ \frac{\Delta \sigma_n}{k^{(m)}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot (1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n}) \right] - \varepsilon(t_{n-1}) \\ &= \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) \left[1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \right] + \varepsilon(t_{n-1}) \cdot \left[e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} - 1 \right] \\ &+ \frac{\Delta \sigma_n}{k^{(m)}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot (1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n}) \right] \end{aligned} \quad (5.41)$$

Annexe 4.2. Approche analytique pour un modèle de Kelvin Voigt généralisé

La réponse en déformation d'un modèle de Kelvin Voigt généralisé est décrit selon l'équation (3.3). En dérivant cette équation, on a :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{k^{(0)}} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \sum_{m=1}^M \varepsilon^{(m)} \quad (5.42)$$

Ainsi en intégrant cette équation entre le temps t_{n-1} et t_n , nous obtenons :

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{1}{k^{(0)}} \cdot \Delta \sigma_n + \sum_{m=1}^M \Delta \varepsilon_n^{(m)} \quad (5.43)$$

Enfin en regroupant l'équation (5.41) et (5.43) l'incrément de déformation d'un système de Kelvin Voigt généralisé s'écrit :

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{1}{k^{(0)}} \cdot \Delta \sigma_n + \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) \left[1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \right] + \varepsilon(t_{n-1}) \cdot \left[e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} - 1 \right] + \frac{\Delta \sigma_n}{k^{(m)}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot (1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n}) \right] \right] \quad (5.44)$$

Ou sous une forme simplifiée:

$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \sigma_n \cdot M_n + \tilde{\varepsilon}(t_{n-1}) \quad (5.45)$$

Où M_n représente la souplesse viscoélastique. Elle induit la variation de déformation engendrée par l'évolution immédiate des contraintes. Elle s'écrit :

$$M_n = \frac{1}{k^{(0)}} + \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sum_{m=1}^M \left[1 - \frac{1}{\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot (1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n}) \right] \quad (5.46)$$

Et $\tilde{\varepsilon}(t_{n-1})$ représente la déformation équivalente, fonction de l'histoire mécanique présent au temps précédent. Elle s'écrit :

$$\tilde{\varepsilon}(t_{n-1}) = \frac{\sigma(t_{n-1})}{k^{(m)}} \cdot \sum_{m=1}^M (1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n}) + \sum_{m=1}^M (e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} - 1) \cdot \varepsilon(t_{n-1}) \quad (5.47)$$

Ainsi cette approche permet de déterminer l'évolution de la déformation à partir de l'histoire mécanique. Cette modélisation adaptée à la modélisation aux éléments finis peut être généralisée à un matériau anisotrope à partir du principe de superposition de Boltzmann.

Annexe 4.3. Implémentation du modèle viscoélastique 3D orthotrope

Le paragraphe précédent a permis de modéliser l'évolution de la déformation à partir d'une modélisation incrémentale par décomposition spectrale de la fonction de fluage. Cependant dans notre problématique de modélisation d'essais de flexion 4 points de poutres en ambiance variable nous devons modéliser les lois de comportement viscoélastique en 3D.

Nous devons donc généraliser la loi de comportement décrite par l'équation (5.45) à une loi tridimensionnelle au travers de la notation indicielle.

Par le principe de superposition, la loi de comportement viscoélastique linéaire décrite dans l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** s'écrit :

$$\varepsilon_{ij}(t) = \int_0^t J_{ijkl}(t-\tau) \cdot \frac{\partial \sigma_{kl}}{\partial \tau} d\tau + \sum_{j=1}^n J_{ijkl}(t-t_j) \cdot \Delta \sigma_{kl} \quad (5.48)$$

En employant le produit de convolution, on peut réécrire cette équation sous la forme :

$$\varepsilon_{ij}(t) = \sum_{k,l} J_{ijkl} \otimes \frac{D\sigma_{kl}}{D\tau} \quad (5.49)$$

ε_{ij} et σ_{kl} représente les composantes des tenseurs de déformation et de contrainte respectivement. Les composantes du tenseur de fluage sont représentées par le tenseur d'ordre quatre J_{ijkl} . Ce tenseur se détermine à partir de la généralisation de l'équation (3.5) :

$$J_{ijkl}(t) = \frac{1}{k_{ijkl}^{(0)}} + \sum_{m=1}^M \frac{1}{k_{ijkl}^{(m)}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{ijkl}^{(m)} \cdot t}) \quad (5.50)$$

Afin de conserver la formulation présentée dans le paragraphe précédent, nous devons introduire un tenseur d'ordre quatre, dont ses composantes sont décrites par le terme Π_{ijkl} . Ce tenseur est homogène à une déformation, représentant alors l'effet de la composantes σ_{kl} sur la composante ε_{ij} .

$$\Pi_{ijkl}(t) = J_{ijkl}(t) \otimes \frac{D\sigma_{kl}}{D\tau} \quad (5.51)$$

Ainsi nous réécrivons l'équation (5.44) selon la formulation précédente, tel que :

$$\Delta \Pi_{ijkl}(t_n) = M_{ijkl}(t_n) \cdot \Delta \sigma_{kl}(t_n) + \Pi_{ijkl}(t_{n-1}) \quad \text{Sans sommation sur } k, l \quad (5.52)$$

$M_{ijkl}(t_n)$, tenseur d'ordre quatre, représente la composante de souplesse viscoélastique. Il se détermine selon l'équation (5.46), tel que :

$$M_{ijkl}(t_n) = \frac{1}{k_{ijkl}^{(0)}} + \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{k_{ijkl}^{(m)}} - \frac{\eta_{ijkl}^{(m)}}{\Delta t_n} \cdot (1 - e^{-\lambda_{ijkl}^{(m)} \cdot \Delta t_n}) \right] \quad (5.53)$$

Et $\Pi_{ijkl}(t_{n-1})$, tenseur d'ordre quatre, représente l'histoire de la composante de déformation ε_{ij} , induit par la composante de contrainte σ_{kl} . Il se définit selon l'équation (5.47), tel que :

$$\Pi(t_{n-1}) = \sum_{m=1}^M \frac{1}{k_{ijkl}^{(m)}} \left(1 - e^{-\lambda_{ijkl}^{(m)} \cdot \Delta t_n}\right) \cdot \sigma_{kl}(t_{n-1}) + \sum_{m=1}^M \left(e^{-\lambda_{ijkl}^{(m)} \cdot \Delta t_n} - 1\right) \cdot \Pi_{ijkl}^{(m)}(t_{n-1}) \quad (5.54)$$

Ainsi le tenseur homogène à un incrément de déformation sur le pas de temps Δt_n est défini par rapport à l'équation (5.44), tel que :

$$\begin{aligned} \Delta \Pi_{ijkl}(t_n) &= \left(e^{-\lambda_{ijkl}^{(m)} \cdot \Delta t_n} - 1\right) \cdot \Pi_{ijkl}^{(m)}(t_{n-1}) + \left(\frac{1}{k_{ijkl}^{(m)}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{ijkl}^{(m)} \cdot \Delta t_n}\right)\right) \cdot \sigma_{kl}(t_{n-1}) \\ &+ \frac{1}{k_{ijkl}^{(m)}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\eta_{ijkl}^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{ijkl}^{(m)} \cdot \Delta t_n}\right)\right) \cdot \Delta \sigma_{kl}(t_n) \end{aligned} \quad (5.55)$$

A partir de l'équation (5.52), par sommation sur kl , et par le principe de superposition, l'accroissement de déformation s'écrit :

$$\Delta \varepsilon_{ij}(t_n) = \sum_{k,l} M_{ijkl}(t_n) \cdot \Delta \sigma_{kl}(t_n) + \sum_{k,l} \Pi_{ijkl}(t_{n-1}) \quad (5.56)$$

Ainsi l'équation duale de l'équation (5.56) s'écrit :

$$\Delta \sigma_{kl}(t_n) = D_{klij}(t_n) \cdot \Delta \varepsilon_{ij}(t_n) + \sigma_{kl}(t_{n-1}) \text{ Avec } \sigma_{kl}(t_{n-1}) = D_{klij}(t_n) \cdot \tilde{\varepsilon}_{ij}(t_n) \quad (5.57)$$

Où D_{klij} représente un tenseur d'ordre quatre tel que $D_{klij} \cdot M_{ijkl} = Id$ où Id représente le tenseur unité d'ordre quatre. Enfin, $\sigma_{kl}(t_{n-1})$ est le champ de contrainte mémorisant l'histoire complète des contraintes jusqu'au temps t_{n-1} .

A l'instar de l'approche incrémentale proposée pour le modèle d'hygro sensibilité élastique, le but de cette approche est de déterminer l'incrément de déformation et de contrainte au cours de l'incrément de temps Δt_n .

Ainsi, Dubois propose une formulation analytique de l'incrément de déformation d'une seule cellule de Kelvin Voigt (5.41) :

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_n^{(m)} &= \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) + e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot \left[\varepsilon(t_{n-1}) - \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) \right] \\ &+ \frac{\Delta \sigma_n}{k^{(m)}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot \left(1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n}\right) \right] - \varepsilon(t_{n-1}) \\ &= \frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) \left[1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \right] + \varepsilon(t_{n-1}) \cdot \left[e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} - 1 \right] \\ &+ \frac{\Delta \sigma_n}{k^{(m)}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot \left(1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n}\right) \right] \end{aligned} \quad (5.58)$$

En généralisant cette approche pour l'ensemble des cellules de Kelvin Voigt, Dubois donne l'équation suivante (5.44) :

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{1}{k^{(0)}} \cdot \Delta \sigma_n + \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{k^{(m)}} \cdot \sigma(t_{n-1}) \left[1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \right] + \varepsilon(t_{n-1}) \cdot \left[e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} - 1 \right] \right] + \frac{\Delta \sigma_n}{k^{(m)}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \cdot \left(1 - e^{-\lambda^{(m)} \cdot \Delta t_n} \right) \right] \quad (5.59)$$

Ou en écriture simplifiée :

$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \sigma_n \cdot M_n + \tilde{\varepsilon}(t_{n-1}) \quad (5.60)$$

Cette écriture met en avant deux termes :

- $\tilde{\varepsilon}(t_{n-1})$, la déformation équivalente, qui est fonction de l'histoire mécanique inscrit au temps précédent,
- M_n , la souplesse viscoélastique, qui induit la variation de déformation engendrée par l'évolution immédiate des contraintes.

Annexe 4.4. Algorithme de résolution du comportement viscoélastique 3D

Est présenté sur la Figure 177 l'algorithme de résolution du comportement viscoélastique hydro activé en 3D. Cet algorithme est implémenté dans le code aux éléments finis de Cast3M.

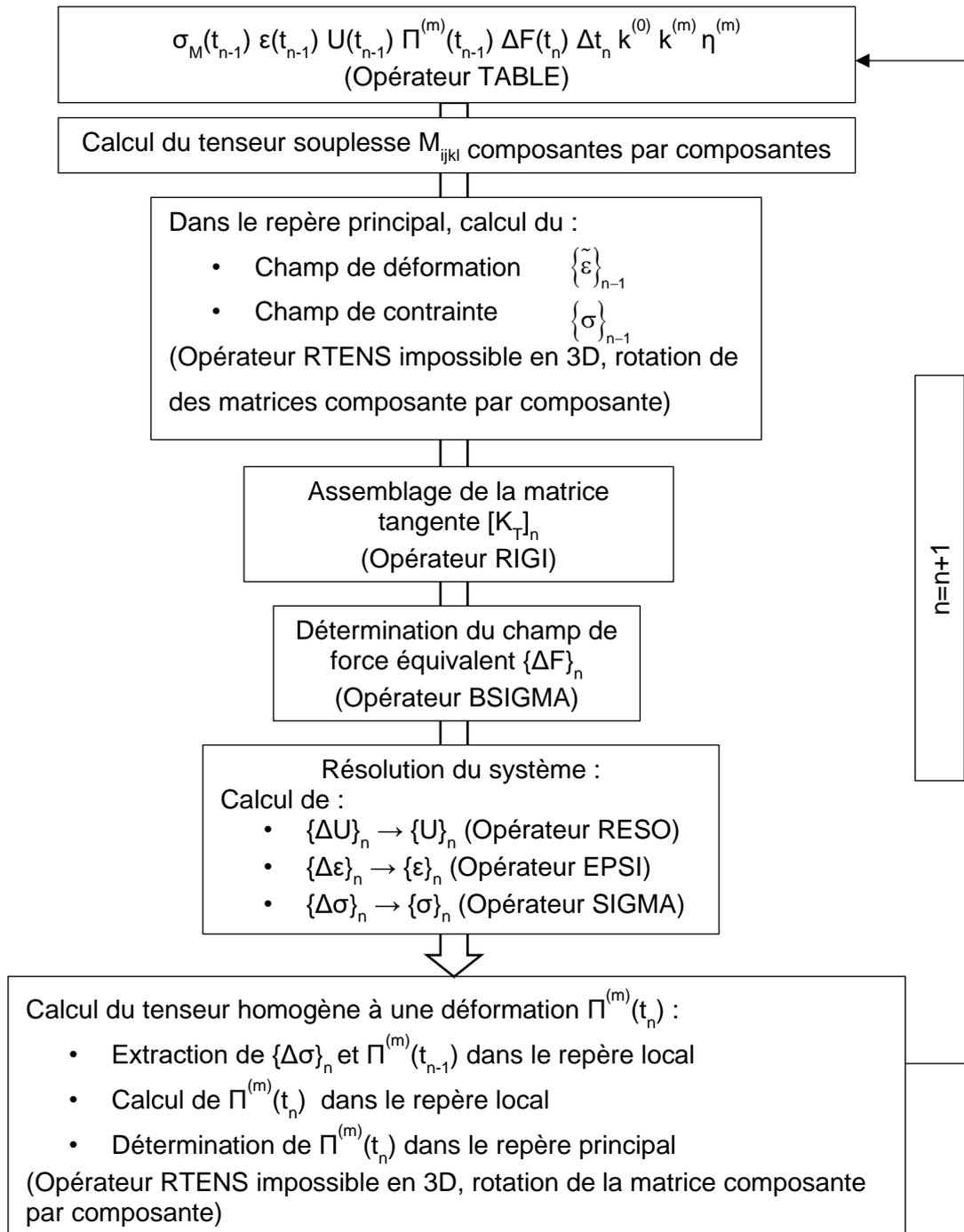
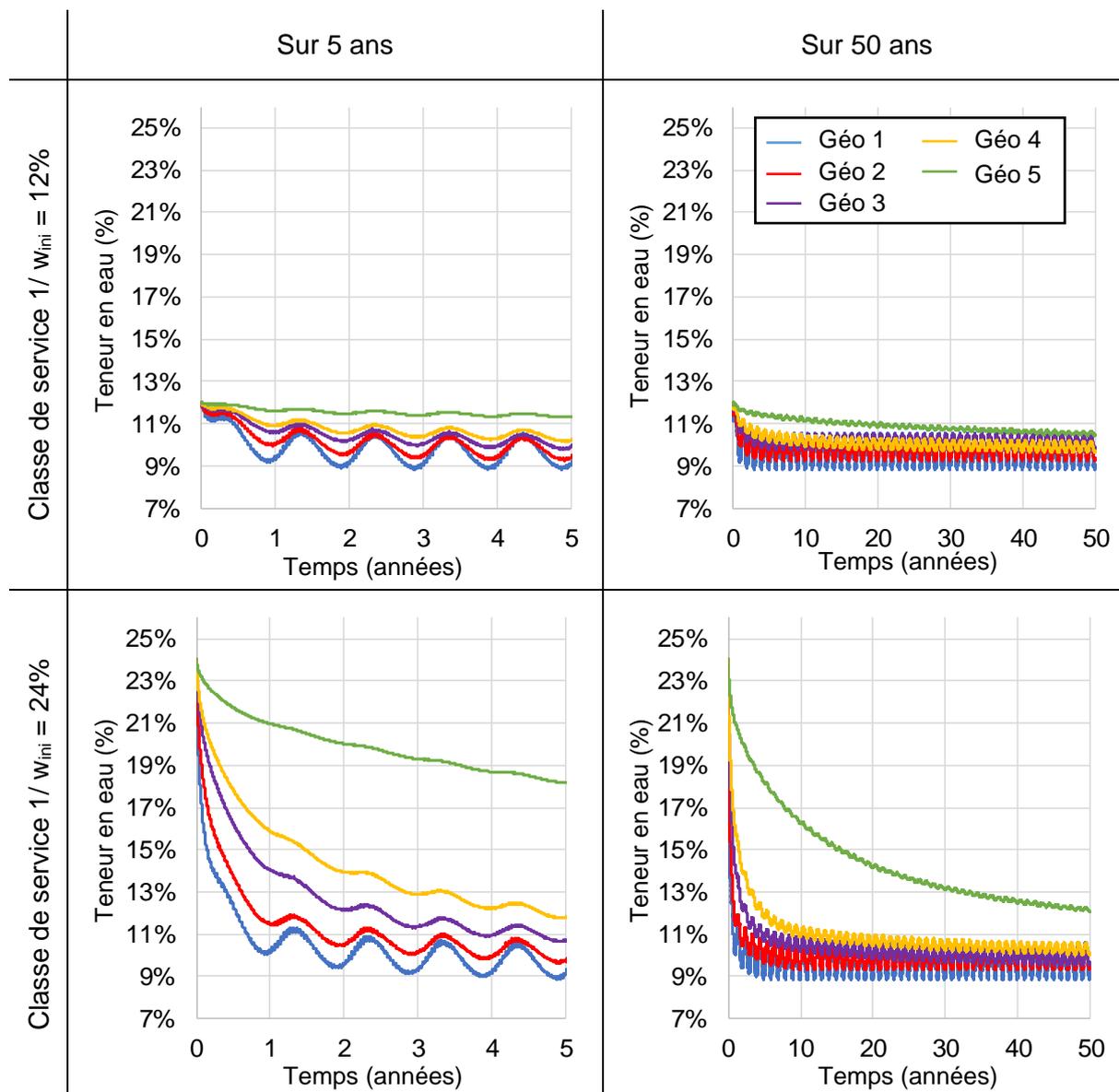


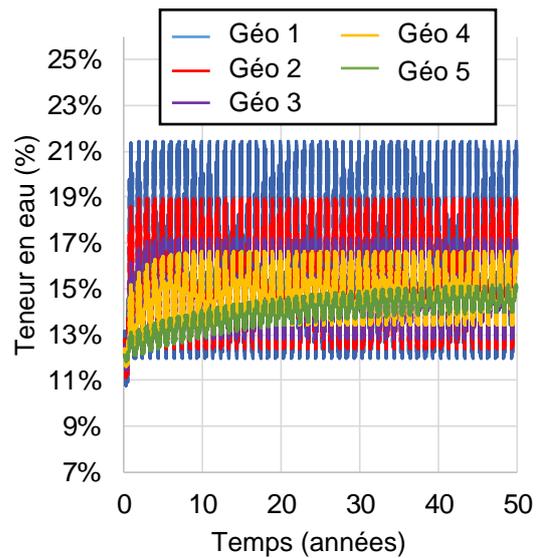
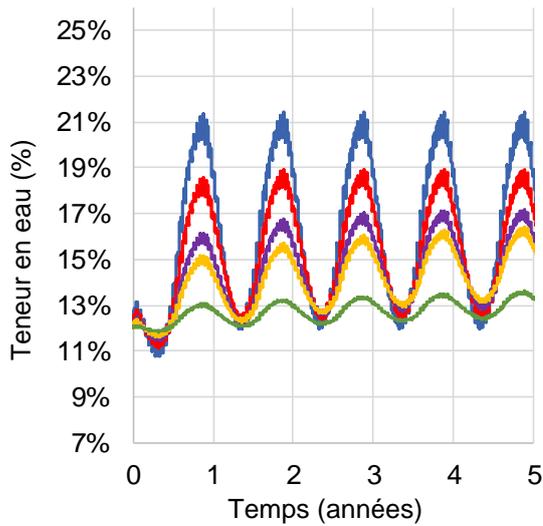
Figure 177 : Algorithme de résolution de l'incrément de déformation viscoélastique

Annexe 5. Influence de la géométrie sur le comportement hydrique long terme : Evolution de la teneur en eau moyenne

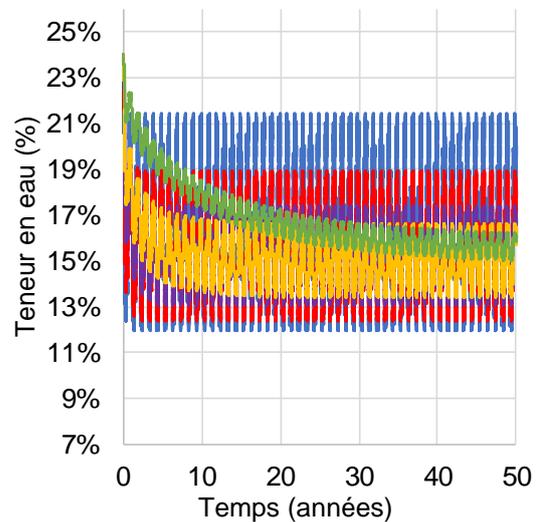
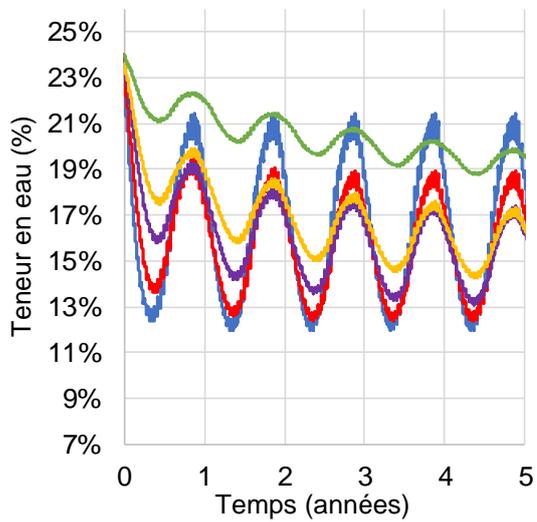
Les évolutions de teneur en eau moyenne renvoyées par les modèles pour les cinq géométries, les trois environnements, et pour les deux humidités initiales sont présentées sur la Figure 178. Afin de mettre en avant les différences de comportement entre les essences. Les évolutions sont représentées sur les 5 premières années et les 50 années de simulation.



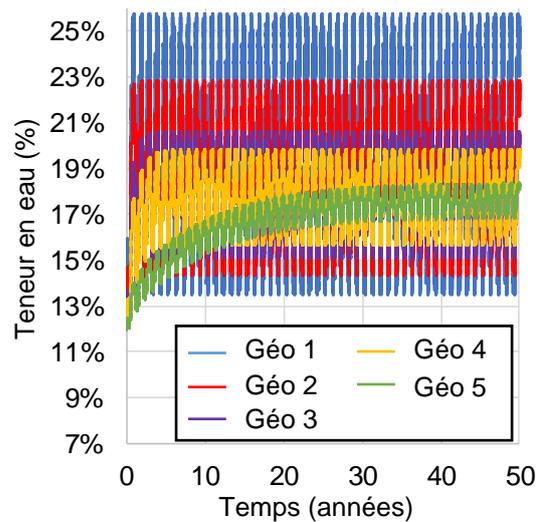
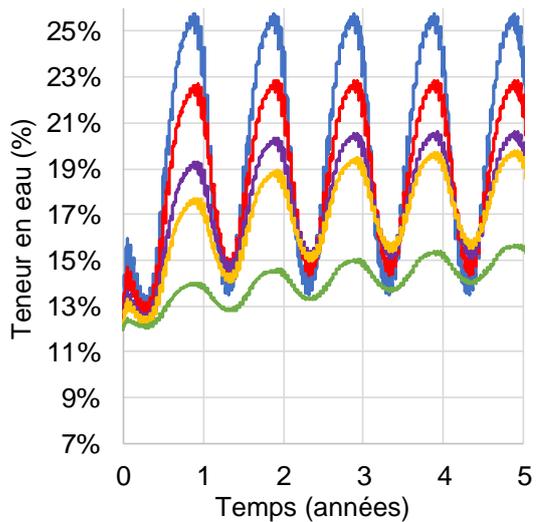
Classe de service 2/ $w_{ini} = 12\%$



Classe de service 2/ $w_{ini} = 24\%$



Classe de service 3/ $w_{ini} = 12\%$



Classe de service 3/ $w_{ini} = 24\%$

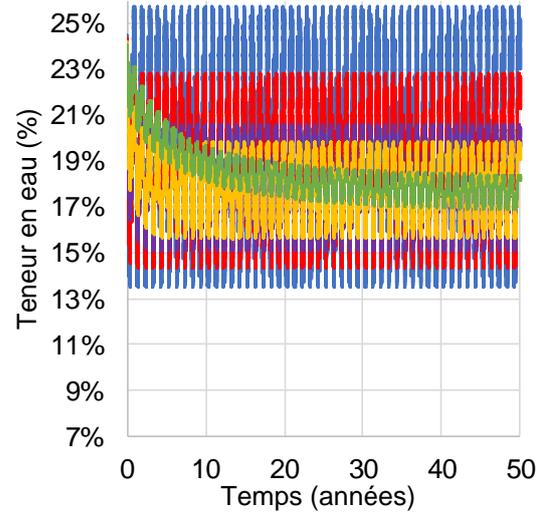
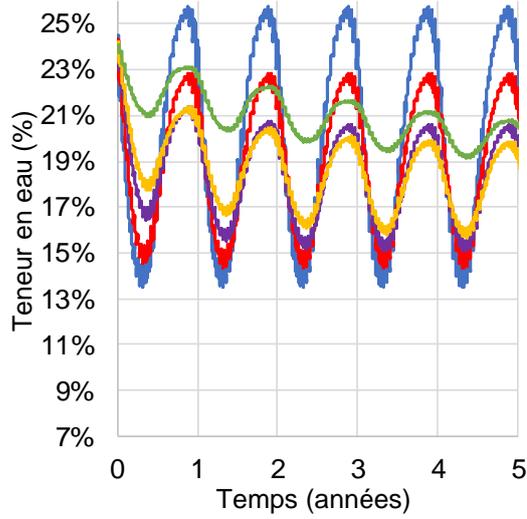
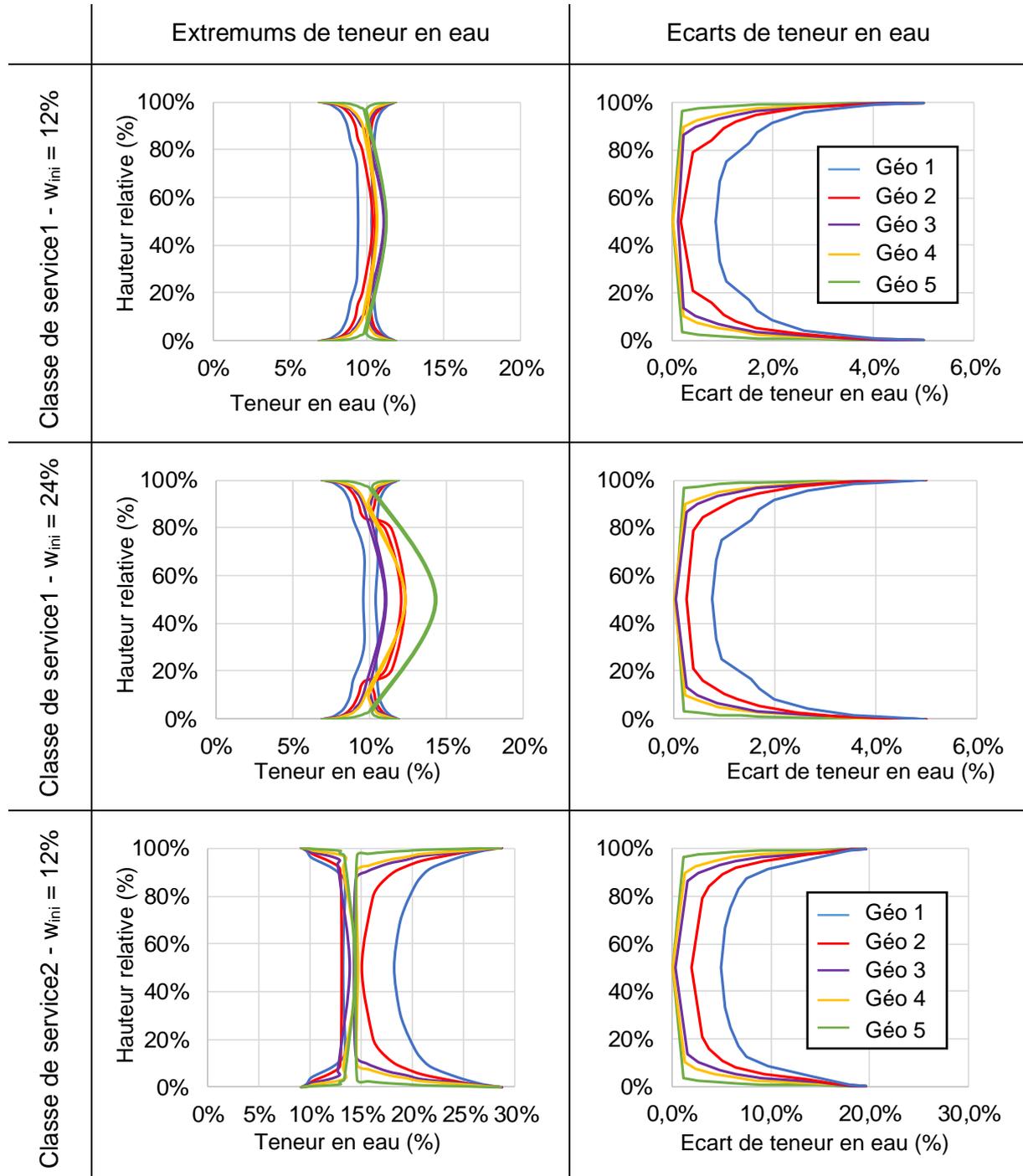


Figure 178 : Evolutions de la teneur en eau pour les 5 géométries, les trois environnements, et les deux humidités initiales

Annexe 6. Influence de la géométrie sur le comportement hydrique long terme : Profil d'humidification

Nous représentons sur la Figure 179 les extremums d'humidification et les variations hydriques dans la hauteur des poutres au cours de la dernière année. Afin de comparer les géométries entre elles nous représentons ces résultats en fonction de leur hauteur relative.



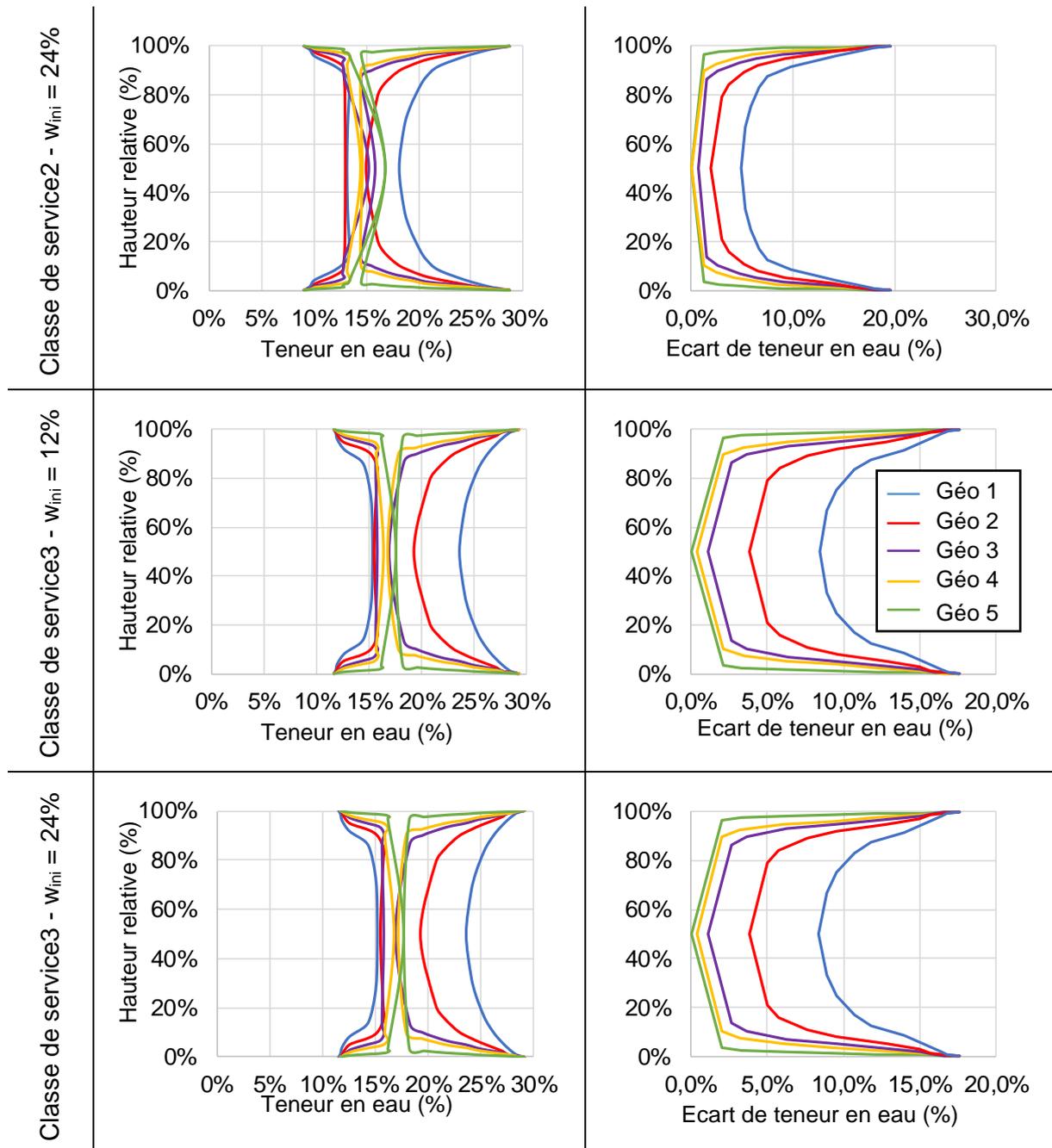


Figure 179 : Extremums et écart hydrique dans la hauteur des poutres cours de la dernière année de simulation

Annexe 7. Identification des paramètres du modèle simplifié

Le protocole d'identification du paramètre de calage A_w , consiste à minimiser l'écart entre la réponse du modèle Castem et du modèle simplifié entre le début de la 4^{ème} année de simulation et la 5^{ème} année. Une prolongation des deux modèles de calcul jusqu'à la 10^{ème} année permet de déduire l'erreur sur 10 ans induite par une interpolation sur 4 ans. Sur la Figure 180 est représenté la réponse du modèle Castem sur 10 ans, ainsi que la réponse du modèle simplifié calée sur 4 ans ($A_w = 130$), encadrée par deux autres réponses. L'écart relatif calculé au cours de la 4^{ème} année est présenté sur la figure.

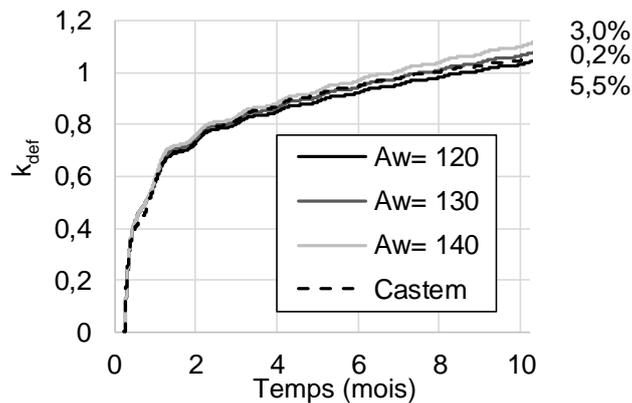


Figure 180 : Géométrie 4 - CS2 – $w_{ini} = 12\%$: Identification du paramètre d'hygro activation A_w , $k_{def-ref} = 1$

L'écart relatif calculé au cours de la 4^{ème} année de simulation montre une identification correcte du paramètre A_w pour un $k_{def-ref} = 1,0$. Cette représentation met également en avant la faible variation de réponse différée au bout de 10 ans entre les trois réponses du modèle simplifié.

Ainsi à la 10^{ème} année, l'écart de comportement mécanique entre les trois modèles et la réponse Castem est de :

- Modèle $A_w = 120$: $\Delta k_{def} (10ans) = -0,013\%$
- Modèle $A_w = 130$: $\Delta k_{def} (10ans) = +0,021\%$
- Modèle $A_w = 140$: $\Delta k_{def} (10ans) = +0,059\%$

Ainsi le protocole d'identification induit au bout de 10 ans un écart de seulement 2% sur le comportement long terme.

Annexe 8. Comportement long terme : Comparaison des deux modèles

Sont représentées sur les figures suivantes les comparaisons entre le modèle aux éléments finis et le modèle simplifié pour les 5 géométries.

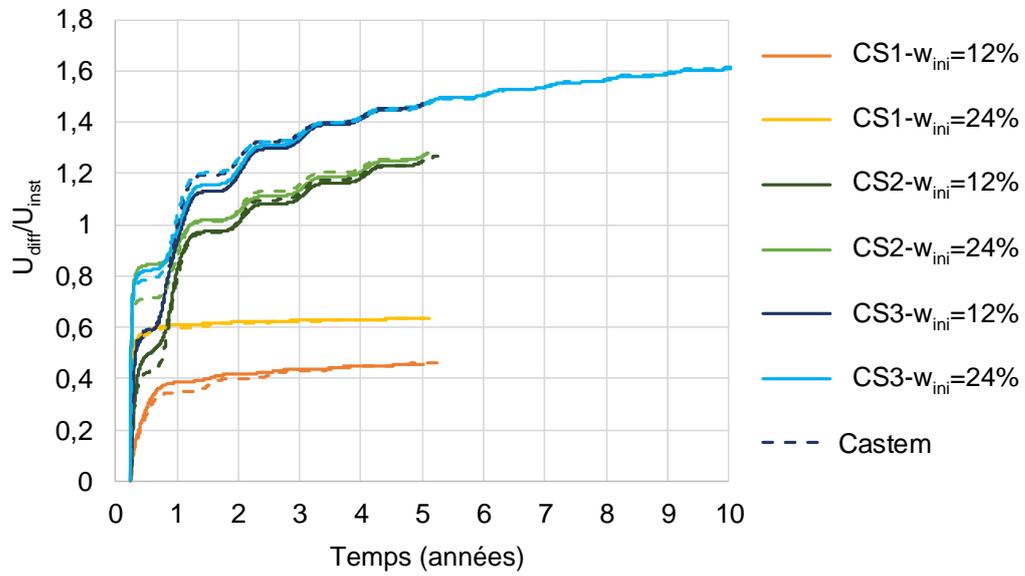


Figure 181 : Géo1 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié, avec validation sur 10ans

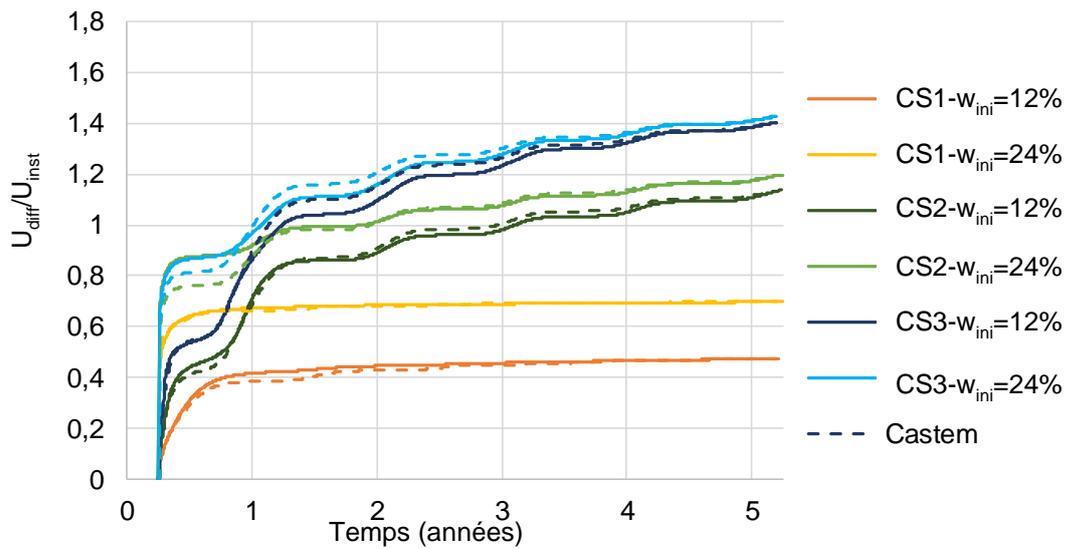


Figure 182 : Géo2 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié

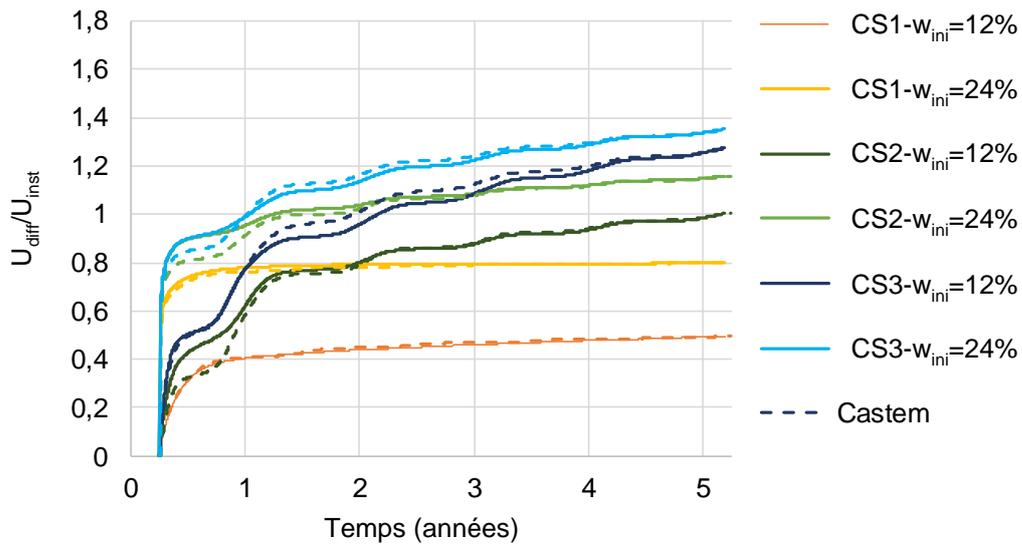


Figure 183 : Géo3 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié

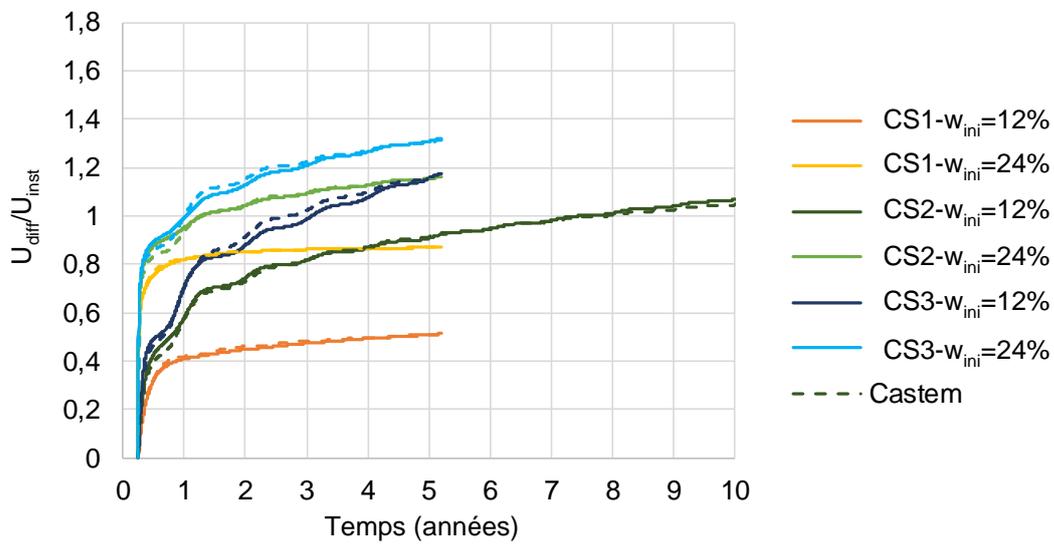


Figure 184 : Géo4 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié

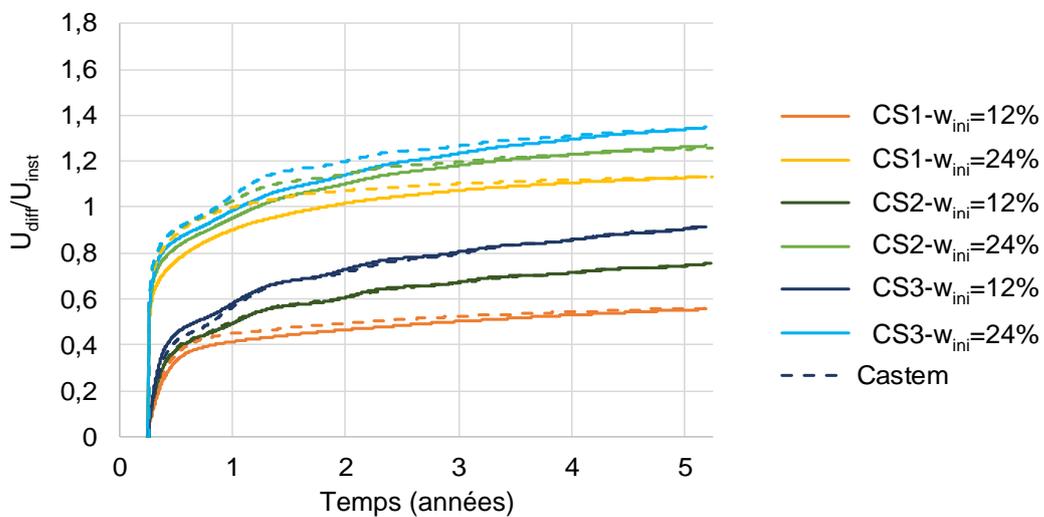


Figure 185 : Géo5 : Comparaison modèle Cast3M et simplifié, avec validation sur 10 ans

Si dessous est présenté le tableau récapitulatif des paramètres viscoélastiques hygro activés identifiés sur 5 ans.

Tableau 49 : Paramètres viscoélastiques du modèle simplifié pour les 5 géométries

Géométrie	Classe de service	Humidité initiale	$K_{\text{def-ref}}$	A_w
Géo1	CS1	$w_{\text{ini}} = 12\%$	0,9	140
	CS1	$w_{\text{ini}} = 24\%$	0,9	99
	CS2	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	133
	CS2	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	134
	CS3	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	125
	CS3	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	123
Géo2	CS1	$w_{\text{ini}} = 12\%$	0,9	146
	CS1	$w_{\text{ini}} = 24\%$	0,9	112
	CS2	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	141
	CS2	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	131
	CS3	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	130
	CS3	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	129
Géo3	CS1	$w_{\text{ini}} = 12\%$	0,9	156
	CS1	$w_{\text{ini}} = 24\%$	0,9	112
	CS2	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	141
	CS2	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	131
	CS3	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	130
	CS3	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	129
Géo4	CS1	$w_{\text{ini}} = 12\%$	0,9	167
	CS1	$w_{\text{ini}} = 24\%$	0,9	114
	CS2	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	133
	CS2	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	121
	CS3	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	126
	CS3	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	124
Géo5	CS1	$w_{\text{ini}} = 12\%$	0,9	220
	CS1	$w_{\text{ini}} = 24\%$	0,9	109
	CS2	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	58
	CS2	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	103
	CS3	$w_{\text{ini}} = 12\%$	1,0	121
	CS3	$w_{\text{ini}} = 24\%$	1,0	110

Annexe 9. Comportement long terme : Evolution sur 50 ans

Sont présentées ci-dessous les évolutions de comportement différé sur 50 ans des cinq géométries.

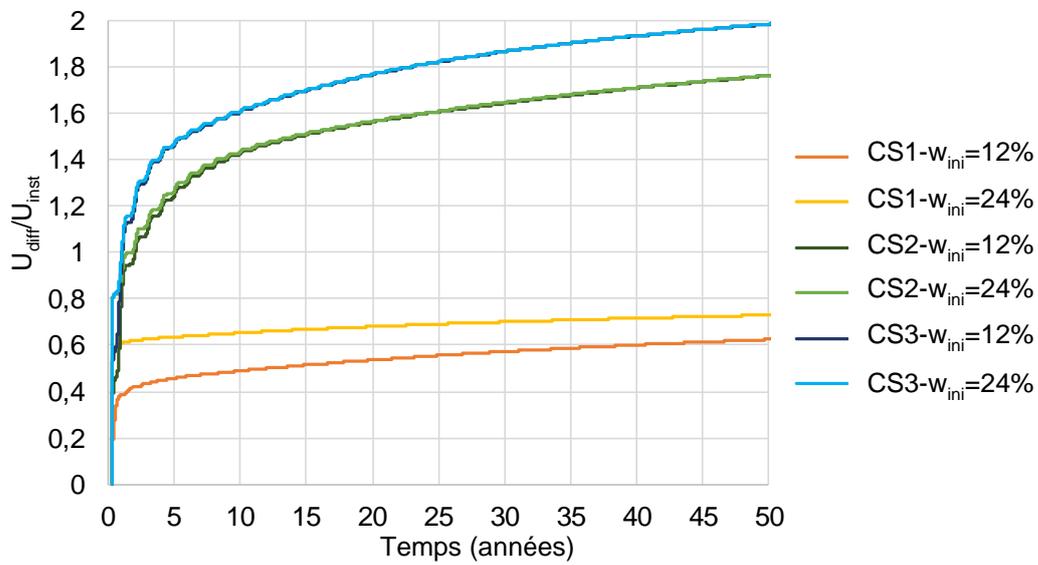


Figure 186 : Géo1 : Comportement différé sur 50 années

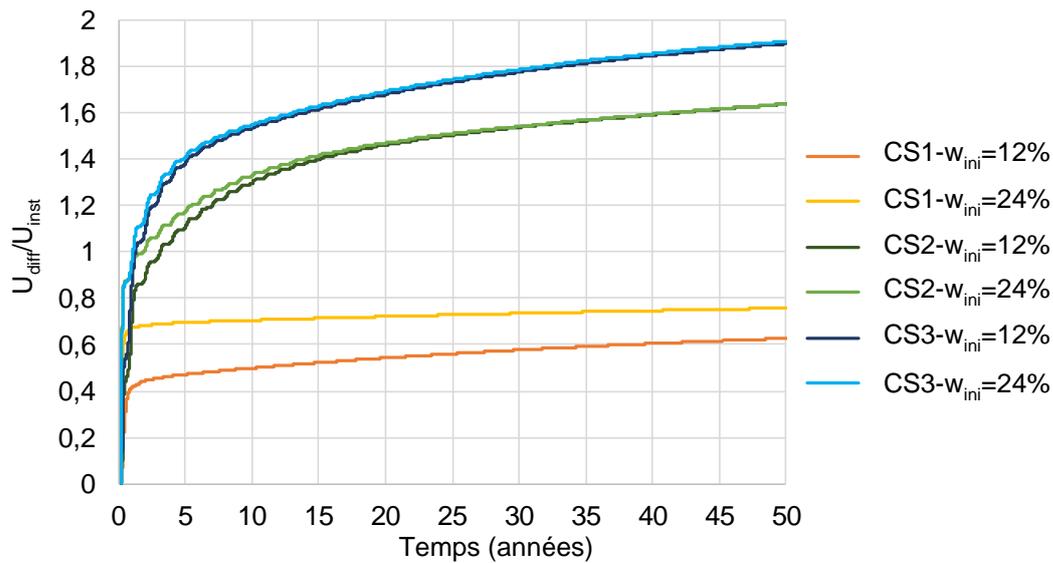


Figure 187 : Géo2 : Comportement différé sur 50 années

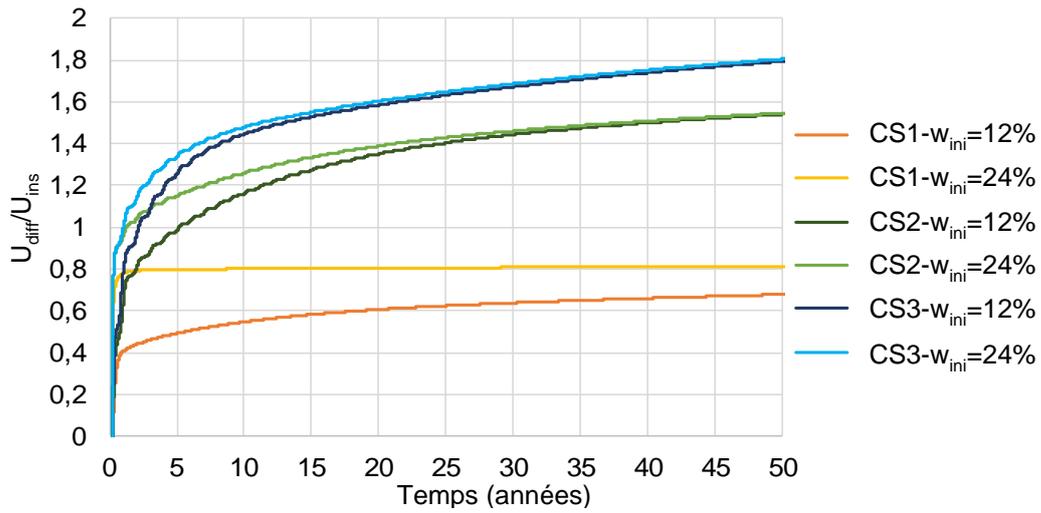


Figure 188 : Géoz3 : Comportement différé sur 50 années

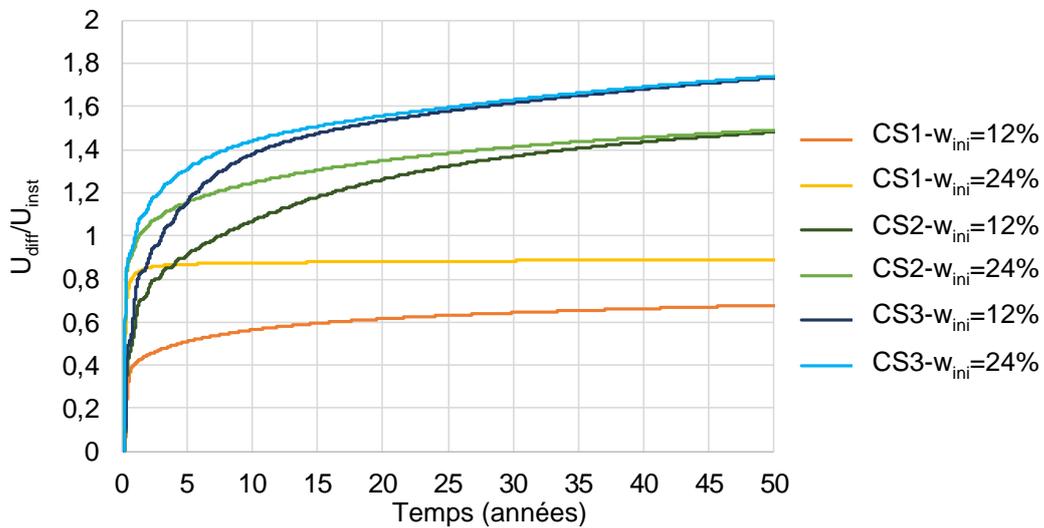


Figure 189 : Géoz4 : Comportement différé sur 50 années

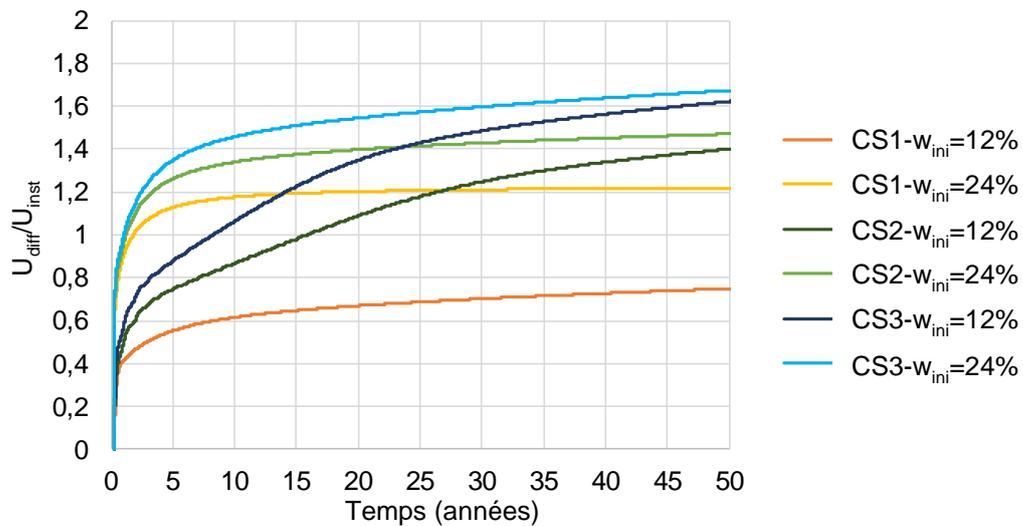


Figure 190 : Géoz5 : Comportement différé sur 50 années