



HAL
open science

Surveillance et Auscultation des Ouvrages en bois par Identification des Champs Hydrique et Mécanique : Couplage des Méthodes Acoustiques et Electromagnétiques

Xi Zhang

► **To cite this version:**

Xi Zhang. Surveillance et Auscultation des Ouvrages en bois par Identification des Champs Hydrique et Mécanique : Couplage des Méthodes Acoustiques et Electromagnétiques. Génie civil. Université de Limoges, 2021. Français. NNT : 2021LIMO0033 . tel-03264682

HAL Id: tel-03264682

<https://theses.hal.science/tel-03264682v1>

Submitted on 18 Jun 2021

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.

Université de Limoges
**ED 609 - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique,
Énergétique (SIMME)**
GC2D

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges
Génie Civil

Présentée et soutenue par
Xi Zhang

Le 31 Mars 2021

**Surveillance et Auscultation des Ouvrages en bois par
Identification des Champs Hydrique et Mécanique : Couplage des
Méthodes Acoustiques et Électromagnétiques**

Thèse dirigée par Frédéric DUBOIS

JURY :

Président du jury
M. Joseph GRIL, Directeur de Recherche, CNRS

Rapporteurs
M. Joseph GRIL, Directeur de Recherche, CNRS
M. Rachid BENNACER, Professeur des Universités Ex, LMT, Université de Paris
Saclay

Examineurs
Mme. [Delphine JULLIEN, Maître de Conférences, HDR, LMGC, Université de
Montpellier]
M. [Éric ROSENKRANTZ, Maître de Conférences, IES, Université de Montpellier]
M. [Zoubir Mehdi SBARTAÏ, Professeur des Universités Ex, I2M, Université de
Bordeaux]



M. [Mokhfi TAKARLI, Maître de Conférences, GC2D, Université de Limoges]
M. [Nicolas SAUVAT, Maître de Conférences, GC2D, Université de Limoges]
M. [Frédéric DUBOIS, Professeur des Universités EX, GC2D, Université de Limoges]

Rien n'est jamais perdu tant qu'il reste quelque chose à trouver

Pierre Dac

Remerciements

Les résultats présentés dans ce manuscrit de thèse n'auraient jamais pu avoir lieu sans l'aide et le soutien très précieux de plusieurs personnes. Ce travail est réalisé au sein du laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D).

Je souhaite remercier mon directeur de thèse, M. Frédéric DUBOIS, professeur de l'université de Limoges. Toutes ses compétences, ses qualités humaines m'ont beaucoup servi au cours de ces trois courtes années. Je lui adresse ici l'expression de ma profonde gratitude, pour avoir dirigé ces travaux, pour sa générosité intellectuelle, ses aides si précieuses, ses conseils et surtout son soutien indéfectible jusqu'aux dernières secondes de ma thèse.

J'adresse mes remerciements à mes co-encadrants de thèse, M. Mohkfi TAKARLI et M. Nicolas SAUVAT, pour leurs aides et leurs conseils tout au long de ces années de thèse. Je tiens également à adresser mes remerciements à mon co-encadrant de thèse M. Mehdi SBARTAI, qui malgré la distance a toujours fait de sa mieux pour répondre à mes questions, et qui m'a accueilli quelques semaines au sein du laboratoire I2M de Bordeaux. Je tiens à remercier à l'association GDR science du bois pour le soutien à cette mobilité inter-équipe.

Je souhaite remercier M. Rachid BENNACER et M. Joseph GRIL pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail. Mes remerciements vont aussi à Mme. Delphine JULLIEN et M. Éric ROSENKRANIZ, pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je souhaite adresser ma gratitude à M. Jérôme DOPEUX, et M. Éric SALAT pour leur grande contribution pour la réalisation du protocole expérimental. Mes remerciements s'étendent également à tout le personnel du Campus Universitaire de Génie Civil d'Égletons, pour leurs disponibilités, leurs gentillesse et leurs soutiens.

Ma sympathie va à tous les permanents et doctorants que j'ai côtoyés pendant ces trois années de thèse, pour leurs amitiés, leurs encouragements et pour les échanges fructueux.

Enfin, je remercie ma famille au sens large (mes grands-parents, mes parents, mon frère, mes oncles et mes tantes), et mes ami(e)s, pour tout le soutien moral, spirituel et familial qu'ils m'ont donné.

感谢我的家人朋友们一直以来对我无私的陪伴与支持，爱你们 😊

感谢老天，我毕业了！

曦

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 matières

Remerciements	5
Droits d'auteurs	6
Table des matières	7
Table des illustrations	9
Table des tableaux	15
Liste des principaux acronymes et notations	19
Introduction générale	21
Chapitre I. Étude bibliographique	25
I.1. Introduction	25
I.2. Le matériau bois	25
I.2.1. Échelle macroscopique	26
I.2.2. Échelle microscopique	28
I.2.3. Constituants chimiques du bois	29
I.2.4. Structure de la paroi cellulaire	29
I.2.5. Hygroscopie du bois	31
I.2.6. Comportement mécanique du bois	33
I.3. Contrôle Non Destructif et Monitoring des champs mécanique et hydrique	38
I.3.1. Méthodes ultrasonores	38
I.3.2. Méthode diélectrique	49
I.3.3. Facteurs influençant les propriétés diélectriques du bois	54
I.4. Conclusion	57
Chapitre II. Modèle analytique vs modèle aux éléments finis	58
II.1. Introduction	58
II.2. Propagation d'ondes dans un milieu orthotrope	58
II.2.1. Orthotropie	58
II.2.2. Vitesses de propagation d'ondes	61
II.3. Approche par les éléments finis	63
II.3.1. Volume et Propriétés élastiques du modèle	63
II.3.2. Vitesses de propagation d'onde de compression de référence	64
II.3.3. Discrétisations spatiale et temporelle	64
II.4. Conditions aux limites et chargement	65
II.4.1. Définition des conditions aux limites	65
II.4.2. Chargement mécanique	66
II.5. Résolution dynamique et post-traitement	67
II.5.1. Définition des points à étudier lors de la propagation de l'onde	67
II.5.2. Algorithme implicite vs. explicite	68
II.5.3. Formes d'ondes obtenues	68
II.5.4. Détermination de la vitesse de propagation	70
II.6. Étude de l'effet de l'angle de propagation	72
II.7. Conclusion	73
Chapitre III. Programme expérimental	75
III.1. Introduction	75
III.2. Matériaux échantillonnage et préparation des éprouvettes	75
III.2.1. Sélection des poutres d'approvisionnement	75

III.2.2. Découpe et codification des éprouvettes	76
III.2.3. Zone expérimentale	77
III.3. Teneur en eau et masse volumique	78
III.3.1. État initial	78
III.3.2. Évolution temporelle de la teneur en eau	80
III.4. Mesures électromagnétiques (Radar)	82
III.4.1. Description du matériel	82
III.4.2. Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques	83
III.4.3. Présentation du protocole expérimental	86
III.4.4. Propriétés diélectriques initiales des poutres CND	89
III.5. Mesure par onde ultrasonore	92
III.5.1. Description des outils de mesure	92
III.5.2. Analyse du signal	94
III.5.3. Présentation du protocole expérimental	100
III.6. Essais mécaniques	103
III.6.1. Essais de flexion 4 points	103
III.6.2. Essais mécaniques en compression transversales	108
III.7. Protocole expérimental de suivi d'humidité	112
III.7.1. Évolution des propriétés diélectriques	113
III.7.2. Évolution des propriétés dynamiques	117
III.7.3. Évolution du module statique	120
III.8. Conclusion	121
Chapitre IV. Protocole de détermination des propriétés matériau à l'échelle d'un élément de structure par optimisation numérique	122
IV.1. Introduction	122
IV.2. Méthodologie d'optimisation des propriétés instantanées	122
IV.2.1. Adaptation du modèle analytique	123
IV.2.2. Traitement des données brutes	124
IV.2.3. Paramètres à optimiser	126
IV.2.4. Choix du critère de convergence	127
IV.2.5. Robustesse vis-à-vis des variables d'entrée	130
IV.2.6. Identification des propriétés mécaniques à l'état initial	133
IV.2.7. Corrélation entre modules dynamiques et masse volumique	134
IV.3. Méthodologie de suivi des propriétés mécaniques en reprise d'humidité	136
IV.3.1. Évaluation des champs hydrique et mécanique par simulation numérique	137
IV.3.2. Évaluation des vitesses de propagation d'ondes par éléments finis	142
IV.3.3. Champs hydriques hétérogènes par mesures radar	144
IV.4. Conclusion	148
Conclusion	150
Références bibliographiques	153

Table des illustrations

Figure 1 : Quelques ouvrages en bois historiques	21
Figure 2 : Quelques références emblématiques de la construction bois en France	21
Figure 3 : Développement du monitoring hydrique sur ouvrages d'art	22
Figure 4 : Mise en application du Contrôle Non Destructif structurel.....	23
Figure I-1 : Matériau bois, une structure définie à plusieurs échelles (Rafsanjani et al., 2012)	26
Figure I-2 : Structure générale d'une grume à l'échelle macroscopique.....	26
Figure I-3 : Directions principales d'orthotropie.....	27
Figure I-4 : Organisation cellulaire type des résineux (Niska and Sain, 2008)	28
Figure I-5 : Couches constituant la paroi cellulaire (Rafsanjani et al., 2012)	30
Figure I-6 : Distribution des trois composantes du bois à l'intérieur de la paroi cellulaire (Navi, 2005).....	31
Figure I-7 : Courbe d'équilibre hygrosopique du bois (AFNOR, 2010)	32
Figure I-8 : Trois phases d'eau dans le bois (Montero, 2011)	33
Figure I-9 : Courbe d'hystérésis du bois de Douglas à une température de 32°C (Ross, 2010)	33
Figure I-10 : Influence de la masse volumique sur le module d'Young longitudinal (Guitard, 1987).....	36
Figure I-11 : Évolution de E_L en fonction de la teneur en eau du bois (Guitard, 1987)	36
Figure I-12 : Courbes de retrait à partir de l'état anhydre du bois typique dans les trois direction principales (Skaar, 1988)	37
Figure I-13 : Variations dimensionnelles après séchage d'une section transversale en fonction de la position de l'échantillons dans le billon (Ross, 2010).....	37
Figure I-14 : Trois dispositions des transducteurs.....	39
Figure I-15 : Quatre formes d'onde différentes	40
Figure I-16 : Repères local et global du vecteur déplacement	42
Figure I-17 : Vitesse de propagation d'onde P en fonction de l'angle de propagation (Armstrong et al., 1991).....	45
Figure I-18 : Relation entre vitesse longitudinale et densité pour différentes essences à 12% d'humidité (de Oliveira and Sales, 2006)	46
Figure I-19 : Relation entre la vitesse transversale et la densité pour du chêne et du pin verts (Zisi et Dix 2017)	46
Figure I-20 : Relation entre la teneur en eau et la vitesse de propagation des ondes de compression dans le Goupia glabra d'Amérique du Sud (de Oliveira et al., 2005).....	47

Figure I-21 : Vitesse compression ultrasonore fonction de la température pour du Pin Rouge (Gao et al., 2012, 2013).....	48
Figure I-22 : Influence de la fréquence sur la vitesse de propagation ultrasonore (Bucur and Bohnke, Bucur and Feeney, 1992)	48
Figure I-23 : Influence de la fréquence sur l'atténuation α (Bucur and Bohnke, Bucur and Feeney, 1992)	49
Figure I-24 : Permittivités réelle ε' et imaginaire ε'' en fonction de la fréquence (Torgovnikov, 1993)	51
Figure I-25 : Constante diélectrique en fonction de la masse volumique humide (Peyskens et al., 1984)	54
Figure I-26 : Constante diélectrique et facteur de perte fonction de la fréquence (Hévéa anhydre 22°C) (Kabir et al., 1997)	55
Figure I-27 : Constante diélectrique ε' et tangente de perte $\tan \delta$ en fonction de la teneur en eau et la direction de propagation (Mélèze et Épicéa) (Hamza, 2015; Torgovnikov, 1993) ...	55
Figure I-28 : Constante diélectrique et tangente de perte fonction de la température (Douglas anhydre) (James, 1975)	56
Figure II-1 : Référentiel orthotrope dans le bois	59
Figure II-2 : Référentiels local et global et rotations	59
Figure II-3 : Propagation d'une onde de compression.....	61
Figure II-4 : Directions de propagation et de polarisation d'une onde de compression.....	63
Figure II-5 : Géométrie de la poutre et schéma de propagation d'onde	63
Figure II-6 : Modèle 3D de l'échantillons.....	65
Figure II-7 : Modèle 3D avec les positions unique de l'émetteur et variables du récepteur ...	66
Figure II-8 : Évolution générale temporelle d'impulsion.....	66
Figure II-9 : Déformé du modèle à l'application du chargement.....	67
Figure II-10 : Illustration du plan LR en 2D	67
Figure II-11 : Évolutions temporelles des déplacements des points P_0 à P_{10}	69
Figure II-12 : Conditions de chargement.....	70
Figure II-13 : Formes d'ondes temporelles pour deux points choisis, P_i et P_j	70
Figure II-14 : Évolutions de la vitesse de propagation $V_{EF} (0^\circ)$ en fonction de N	71
Figure II-15 : Évolutions de l'erreur relative en fonction de N	71
Figure II-16 : Amplitude du déplacement aux instants t_{P_2} , t_{R_8} et t_r pour $\theta=0^\circ$, 45° et 90°	72
Figure II-17 : Évolution des vitesses de propagation V_{EF} et V_{ana} en fonction de θ dans le plan LR.....	73
Figure III-1 : Section des poutres d'approvisionnement LC et BMR.....	76
Figure III-2 : Plan de coupe des poutres d'approvisionnement	76

Figure III-3 : Poutres CND dans la zone expérimentale extérieure	77
Figure III-4 : Dispositions des poutres CND dans la zone expérimentale extérieure	78
Figure III-5 : Masse volumique anhydre moyenne par géométrie de DP1	80
Figure III-6 : Histogramme et loi normale de la masse volumique a) anhydre et b) humide des poutres CND	80
Figure III-7 : Évolution climatique enregistrée pour le lot extérieur	81
Figure III-8 : Fissures discontinués visible en surface (exemple de la poutre CND DG1-2)	81
Figure III-9 : Système d'arrosage pour des quatre poutres CND	81
Figure III-10 : Variation de la teneur en eau des poutres arrosées	82
Figure III-11 : Matériel de mesures électromagnétiques	82
Figure III-12 : Photographie de l'antenne GSSI 1.5GHz avec boîtier ouvert (Warren and Giannopoulos, 2011)	83
Figure III-13 : Propagation schématique des ondes électromagnétiques directe et réfléchié	83
Figure III-14 : Orientation du champ E perpendiculaire aux fibres et parallèle aux fibres	84
Figure III-15 : Exemple de signaux enregistrés en configuration poutre CND E fibre, (DP et DG)	84
Figure III-16 : Points de mesure radar sur la poutre CND	86
Figure III-17 : Constantes diélectriques dans l'épaisseur et la hauteur, avec E fibre et E ⊥ fibre	88
Figure III-18 : Signaux enregistrés dans le Douglas (DP1-1 et DG1-1) aux distances testées différentes	90
Figure III-19 : Effet profondeur de propagation : constantes diélectriques mesurées suivant la hauteur et l'épaisseur	90
Figure III-20 : Effet polarisation : constantes diélectriques suivant E fibre et E⊥fibre	91
Figure III-21 : $\epsilon'_{ }$ et ϵ'_{\perp} en fonction de la teneur en eau pour 36 poutres CND	92
Figure III-22 : Pundit PL-200 et transducteurs	93
Figure III-23 : Ondes de compression et de cisaillement captées par le récepteur (Elsener, 2014)	93
Figure III-24 : Effet de la distance de propagation sur les signaux temporels (onde de compression et de cisaillement)	94
Figure III-25 : Effet de la distance de propagation sur les signaux fréquentiels (onde de compression et de cisaillement)	94
Figure III-26 : Configuration de mesure dans la direction transversale de DP1-1	95
Figure III-27 : Forme d'onde compression d'Ultrason	95
Figure III-28 : Détermination du TOF par la méthode AIC	96
Figure III-29 : Détermination du TOF par la méthode Hinkley	96

Figure III-30 : Détermination du TOF par la méthode MS	97
Figure III-31 : Évolution du TOF vs SNR.....	98
Figure III-32 : Configuration de mesure dans la direction longitudinale de DP1-1	98
Figure III-33 : Signaux temporels des 3 répétitions	99
Figure III-34 : Signaux temporels des 3 reproductions.....	99
Figure III-35 : Schéma représentant les mesures ultrasonores.....	100
Figure III-36 : Distribution de la vitesse de propagation selon les directions principales	100
Figure III-37 : Mesures de vitesses transversales V_{exp_b} et V_{exp_h}	101
Figure III-38 : Évolution de la vitesse expérimentale en fonction de l'angle du fil pour DP1-1	102
Figure III-39 : Vitesses moyennes en fonction de la direction de propagation.....	102
Figure III-40 : Vitesse moyenne de chaque essence	103
Figure III-41 : Dispositif de l'essai de flexion 4 points réalisé	103
Figure III-42 : Dispositif expérimental pour la flexion 4 points sur la poutre CND DP1-1	104
Figure III-43 : Programme de flèche théorique et de force total réel de DP1-1	105
Figure III-44 : Courbe de force/flèche centrale.....	105
Figure III-45 : MOE en fonction de la masse volumique des échantillons de DG, DC, DP et EP, les 9 points de DG et un point de EP entourés sont éliminés de l'analyse	107
Figure III-46 : Dispositif de l'essai mécanique en compression transversale.....	108
Figure III-47 : Programme de force théorique et de déplacement réel de DP1T1	108
Figure III-48 : Courbe de force/déplacement en zone 3.....	109
Figure III-49 : Illustration des essais en compression pour les échantillons E_{RT}	109
Figure III-50 : Corrélation module transversal / masse volumique (échantillons DG, DC, DP et EP), les points DC entourés sont éliminés de l'analyse	111
Figure III-51 : Effet de l'humidité sur le signal Radar dans l'épaisseur et la hauteur de DP1-3	113
Figure III-52 : ε' de DP1-1 à l'état initial et au 20 Mai selon l'épaisseur.....	114
Figure III-53 : Variation de ε' en fonction de l'humidité moyenne (DP1-3)	115
Figure III-54 : Variation de ε' en fonction de l'humidité moyenne (EP3-3)	115
Figure III-55 : ε'' en fonction de la teneur en eau moyenne.....	116
Figure III-56 : ε'' en fonction des teneurs en eau moyenne et données Chinh Mai.....	116
Figure III-57 : Évolution du SNR et de la vitesse en fonction de θ de l'état initial au 20 Mai.....	117
Figure III-58 : Mesures du gradient de vitesses transversales $V_{exp_b_i}$	118

Figure III-59 : Gradients des vitesses de propagation d'onde $V_{exp_b_i}$ (Poutre EP3-3)	119
Figure III-60 : Gradients des vitesses de propagation d'onde $V_{exp_b_i}$ (Poutre DP1-3)	119
Figure III-61 : Gradients des vitesses de propagation d'onde $V_{exp_b_i}$ (Poutre DG2-3)	120
Figure IV-1 : processus général d'optimisation des propriétés d'élasticité	123
Figure IV-2 : Repère principal d'orthotropie, repère local et direction de propagation d'ondes	123
Figure IV-3 : Interpolation des vitesses ultrasonores V_{Exp} en fonction de θ	125
Figure IV-4 : Vitesse $V_{r?f}$ et V_{ana} (Guitard) en fonction de θ	127
Figure IV-5 : Résultats d'optimisation selon les déclinaisons a et b	128
Figure IV-6 : Résultats d'optimisation selon les déclinaisons globales c et d	129
Figure IV-7 : Résultats d'optimisation selon les combinaisons e et f.....	129
Figure IV-8 : Propriétés élastiques de sortie en fonction de la masse volumique (Poutre DP1-1).....	131
Figure IV-9 : Valeur de A et B en fonction du nombre de tirages n	132
Figure IV-10 : Module d'élasticité longitudinale en fonction du nombre de tirages n	132
Figure IV-11 : Corrélation modules d'élasticité dynamique - densité mesurée	136
Figure IV-12 : Corrélations linéaires entre module d'élasticité longitudinal et masse volumique : données mesurées et données de Guitard.....	136
Figure IV-13 : Conditions convectives en reprise d'humidité.....	137
Figure IV-14 : Champs d'humidité simulé au 9 juillet 2020	138
Figure IV-15 : Champs de masse volumique simulé au 9 juillet 2020	138
Figure IV-16 : Champs de propriétés mécaniques simulés au 9 juillet 2020	138
Figure IV-17 : Maillage éléments finis et position des points d'émission et de réception (Poutre DP1-3)	143
Figure IV-18 : Vitesse de propagation d'ondes fonction de l'angle θ au 20 mai 2020 (Poutre DP1-3).....	143
Figure IV-19 : Vitesse de propagation d'ondes fonction de l'angle θ au 9 juillet 2020 (Poutre DP1-3).....	143
Figure IV-20 : Répartition des points de mesure de constantes diélectriques, exemple de la poutre DP1-3.....	145
Figure IV-21 : Projection des humidités issues du champ de constante diélectrique (poutre DP1-3).....	145
Figure IV-22 : Champs d'humidités issus du calcul et de la constante diélectrique (9 juillet, poutre DP1-3).....	146
Figure IV-23 : Vitesse de propagation d'ondes fonction de l'angle θ au 20 mai 2020 (Poutre DP1-3).....	147

Figure IV-24 : Vitesse de propagation d’ondes fonction de l’angle θ au 9 juillet 2020 (Poutre DP1-3).....147

Table des tableaux

Tableau I-1 : Classement es nœuds.....	28
Tableau I-2 : Paramètres élastiques du Douglas et de l'épicéa de France (Guitard and El Amri, 1987).....	35
Tableau I-3 : Paramètres élastiques du Douglas et de l'épicéa d'Amérique (Kretschmann, 1999).....	35
Tableau I-4 : Coefficients de retrait de quelques essences de bois résineux (Simpson and TenWolde, 1999).....	38
Tableau I-5 : Vitesses de propagation d'onde P dans les trois directions principales.....	45
Tableau I-6 : Constantes diélectriques et facteur de perte dans les directions principales....	52
Tableau I-7 : Coefficient de température de la constante diélectrique du bois anhydre, $k_{\epsilon'} \times 10^3 [K^{-1}]$ (Torgovnikov, 1993).....	56
Tableau I-8 : Coefficient de température de la tangente de perte du bois anhydre, $k_{\tan \delta} \times 10^3 [K^{-1}]$ (Torgovnikov, 1993).....	56
Tableau II-1 : Propriétés élastiques du Douglas ($\rho=448\text{kg/m}^3$, humidité 12%) (Kretschmann, 1999).....	63
Tableau II-2 : Discrétisations spatiale et temporelle.....	65
Tableau II-3 : Comparaison des temps de vol théoriques et simulation	67
Tableau II-4 : Erreurs relatives en fonction de N de 2 à 20.....	72
Tableau II-5 : Discrétisations spatiale et temporelle, $N = 10$	72
Tableau III-1 : Dénomination et caractéristiques géométriques des poutres d'approvisionnement	76
Tableau III-2 : Nombre d'échantillon par géométrie à étudier.....	77
Tableau III-3 : Matériels utilisés pour les mesures de masse et de dimension.....	78
Tableau III-4 : Incertitude absolue de mesure pour les Poutres CND	78
Tableau III-5 : Incertitude absolu de mesure pour les Échantillons ERT et à sécher	78
Tableau III-6 : Teneur en eau et masses volumiques pour DP1 (* Valeur estimée)	79
Tableau III-7 : Incertitudes relatives des mesures radar	87
Tableau III-8 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans l'épaisseur selon E // fibre	87
Tableau III-9 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans l'épaisseur selon E \perp fibre	87
Tableau III-9 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans l'épaisseur selon E \perp fibre	88
Tableau III-10 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans la hauteur	88
Tableau III-11 : Constante diélectrique moyenne de la poutre CND DP1-1	88
Tableau III-12 : Constantes diélectrique moyennes mesurés des poutres CND.....	91

Tableau III-13 : Constantes diélectrique moyennes mesurés des poutres CND.....	92
Tableau III-14 : TOF, SNR, V_p et ΔV_p pour trois répétitions d'une même configuration	99
Tableau III-15 : TOF, SNR, V_p et ΔV_p pour trois reproductions d'une même configuration	100
Tableau III-16 : Vitesses transversales pour les poutres CND DG.....	101
Tableau III-17 : Vitesses transversales pour les poutres CND DC.....	101
Tableau III-18 : Vitesses transversales pour les poutres CND DP.....	101
Tableau III-19 : Vitesses transversales pour les poutres CND EP.....	101
Tableau III-20 : Force maximale estimée correspond à chaque essence et géométrie du bois	104
Tableau III-21 : Incertitudes relative, et absolue, et module mesuré de la poutre CND DP1-1	106
Tableau III-22 : Incertitudes de mesure pour chaque terme.....	106
Tableau III-23 : MOE des poutres CND	107
Tableau III-24 : Modules d'élasticités transversaux et incertitudes relatives	109
Tableau III-25 : Module E_{RT}	110
Tableau III-26 : Incertitudes de mesure pour chaque essence.....	111
Tableau III-27 : Module transversal estimé pour les poutres CND	111
Tableau III-28 : Variation de la teneur en eau du lot EXT au 20 Mai par rapport au 28 Février,	112
Tableau III-29 : Évolution de la teneur en eau moyenne des poutres arrosées.....	112
Tableau III-30 : Vitesse longitudinale moyenne $V_{exp_0^\circ}(m/s)$ vs teneur en eau moyenne ...	118
Tableau III-31 : Vitesse longitudinale moyenne $V_{exp_h_90^\circ}(m/s)$ vs teneur en eau moyenne	118
Tableau III-32 : Vitesse longitudinal moyenne $V_{exp_b_90^\circ}(m/s)$ vs teneur en eau moyenne.	118
Tableau III-33 : Module statique MOE (GPa) vs teneur en eau moyenne	120
Tableau IV-1 : Paramètres optimisés, $V(0)$ et $V(90)$ connues.....	126
Tableau IV-2 : Paramètres optimisés, $V(0^\circ)$ et $V(90^\circ)$ inconnues	126
Tableau IV-3 : Propriétés élastiques du Douglas, variables d'entrée (Guitard and El Amri, 1987).....	126
Tableau IV-4 : Corrélation entre $V_{ana}(\theta, x)$ et $V_{r\text{éel}}(\theta)$ selon $\delta(\theta, \bar{x})$	128
Tableau IV-5 : Efficacité des critères d'optimisation	129
Tableau IV-6 : Plages de données pour le tirage aléatoire de \bar{x}_0	130
Tableau IV-7 : Modules d'élasticité dynamiques de DP1-1	131

Tableau IV-8 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres DG	133
Tableau IV-9 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres DC	133
Tableau IV-10 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres DP.....	134
Tableau IV-11 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres EP.....	134
Tableau IV-12 : Corrélation linéaire entre modules d'élasticité dynamique et densité.....	135
Tableau IV-13 : Propriétés de diffusion.....	137
Tableau IV-14 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre DP1-3)	139
Tableau IV-15 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre DG2-3)	140
Tableau IV-16 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre DC3-3)	141
Tableau IV-17 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre EP3-3)	142
Tableau IV-18 : Comparaison des vitesses de propagation longitudinales à plusieurs hauteurs au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalcule via simulations de transfert hydrique) (Poutre DP1-3)	144
Tableau IV-19 : Comparaison des vitesses de propagation radiales à plusieurs abscisses au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalcule via simulation de transfert hydrique) (Poutre DP1-3)	144
Tableau IV-20 : Valeurs moyennes issues du calcul et de la constante diélectrique (Poutre DP1-3).....	146
Tableau IV-21 : Comparaison des vitesses de propagation longitudinales à plusieurs hauteurs au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalcule via mesures radar) (Poutre DP1-3).....	148
Tableau IV-22 : Comparaison des vitesses de propagation radiales à plusieurs abscisses au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalcule via mesures radar) (Poutre DP1-3).....	148

Liste des principaux acronymes et notations

A_0	: Amplitude du signal émis
$A(x)$: Amplitude du signal reçu à une distance de propagation x
C_{ijkl}	: Composantes du tenseur de rigidité $[C]$
D_{US}	: Distance entre l'émetteur et le récepteur d'ultrason
\vec{D}	: Vecteur de déplacement électrique
E_i	: Modules d'Young du bois dans les directions i
\vec{E}	: Intensité du champ électrique
f	: Fréquence ultrasonore
G_{ij}	: Modules de cisaillement du bois dans les plans ij
\vec{k}	: Vecteur d'onde
$[K]$: Matrice d'amortissement
$\vec{L}, \vec{R}, \vec{T}$: Trois directions principales d'orthotropie du bois
m_{anh}	: Masse anhydre
m_{eau}	: Masse d'eau dans le matériau
m_h	: Masse humide
$[M]$: Matrice de masse
\vec{n}	: Vecteur de direction de propagation unitaire
\vec{P}	: Intensité de polarisation diélectrique
$\{R\}$: Vecteur nodal des forces appliquées dépendant du temps
S_{ijkl}	: Composantes du tenseur souple $[S]$ ($[S]=[C]^{-1}$)
Δt	: Discrétisation temporelle
$\{u\}$: Vecteur du déplacement
$\{\dot{u}\}$: Vecteur de la vitesse
$\{\ddot{u}\}$: Vecteur d'accélération
V	: Vitesse de propagation
w	: Teneur en eau
Δx	: Discrétisation spatiale

α	: Facture d'atténuation
Γ_{ij}	: Composantes du tenseur Christoffel
δ	: Erreur relative
ε_{kl}	: Composantes du tenseur des déformations
ε_0	: Permittivité diélectrique du vide, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} [F / m]$
ε_r	: Permittivité relative
ε	: Perméabilité diélectrique absolue
ε'	: Constante diélectrique
ε'_{\parallel}	: Constante diélectrique, champ électrique parallèle aux fibres
ε'_{\perp}	: Constante diélectrique, champ électrique perpendiculaire aux fibres
λ_{\min}	: Longueur d'onde minimale
ν_{ij}	: Coefficients de Poisson dans les plans ij
γ_{ij}	: Déformations angulaire de cisaillement dans les plans ij
τ_{ij}	: Contraintes de cisaillement dans les plans ij
σ_{ij}	: Composantes du tenseur des contraintes
ρ_{anh}	: Masse volumique anhydre du matériau
ρ_h	: Masse volumique homogénéisée du matériau humide
ω	: Pulsation
χ	: Susceptibilité diélectrique complexe du matériau
AIC	: Critère d'information de Akaike
CND	: Contrôle Non Destructive
cov	: Coefficient de variation
H	: Critère de Hinkley
MOE	: Modules statiques
MS	: Méthode du Maximum Glissant
PSF	: Point Saturation des Fibres
SNR	: Rapport signal sur bruit
TOF	: Temps de propagation (Time Of Flight)

Introduction générale

Même si au cours du XXe siècle, l'acier et le béton ont pris une grande place dans la famille des matériaux de construction dans le Génie Civil, le matériau bois demeure aujourd'hui, au même titre que la pierre, un matériau traditionnel de construction aussi bien dans le bâtiment que les ouvrages d'art. Nous parlons aujourd'hui d'ouvrages historiques qui ont traversé les siècles, Figure 1.

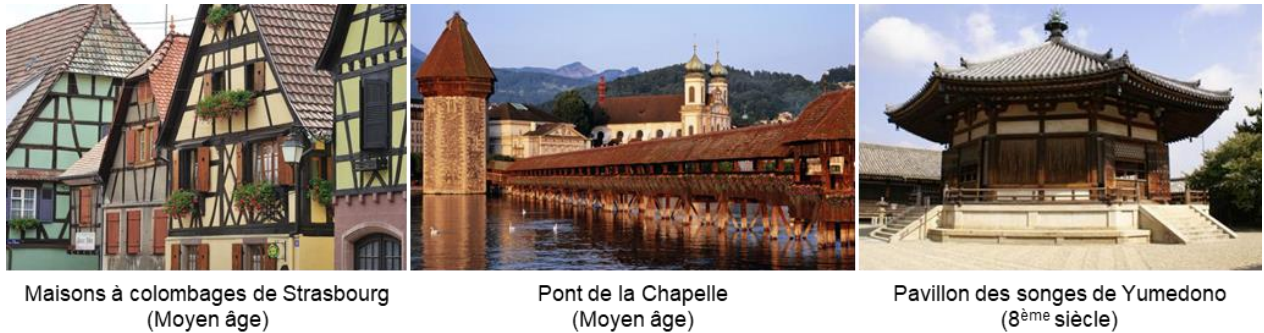


Figure 1 : Quelques ouvrages en bois historiques

Les problématiques environnementales actuelles rebattent les cartes dans le domaine des matériaux de construction. Que ce soit pour des questions d'énergie grise, de circuits courts ou de renouvellement de la ressource, le matériau bois présente un grand nombre d'avantages vis-à-vis d'autres matériaux, dits aujourd'hui traditionnels, qui ont souvent un impact fort vis-à-vis de la raréfaction des énergies fossiles, des gisements naturels, et du dégagement de gaz à effet de serre.

Dans un tel contexte, les usages du bois comme matériau de construction présentent des avantages considérables en termes de baisse de consommation d'énergie grise, de performances énergétiques, de puits de carbone et de circuit court. La réglementation française sur le dimensionnement énergétique et environnemental des bâtiments, future RE 2020, valorise cette origine biosourcée du matériau bois. Dans le domaine du Génie Civil, nous voyons émerger des ouvrages en bois qui permettent de replacer ce matériau comme un matériau d'ingénierie. Quelques exemples, en Figure 2, permettent d'illustrer ce constat au niveau national.



Figure 2 : Quelques références emblématiques de la construction bois en France

Toutefois, de nombreux Maîtres d'Ouvrage et Maîtres d'œuvre sont encore réticents sur l'usage du bois en structure pour des raisons liées à sa durabilité vis-à-vis des risques d'attaques biologiques dans des environnements humides (humidité interne au-dessus de 20%) et de fissurations dues aux phases de séchage en milieu extérieur ou dans des ambiances surchauffées (chauffages radiants et effet de serre). Dans ce contexte, les défis environnementaux passent également par le développement de la surveillance et de la

maintenance des ouvrages en bois. À cette problématique, l'Unité de Recherche Génie Civil, Diagnostic et Durabilité, travaille depuis plus de 25 ans pour apporter des réponses vis-à-vis de cette problématique. Sur des projets concrets, les travaux se sont principalement orientés vers des stratégies de surveillance hydrique en développant des méthodologies de monitoring. Les premiers ouvrages étudiés ont été le pont de Merle et le Passage Supérieur l'aire du Chavanon sur l'A89. À cette époque, le protocole de surveillance consistait à équiper quelques sections de sondes résistives afin de mettre en place des alarmes détectant un environnement hydrique (au-delà de 20%) propice aux attaques biologiques, Figure 3. Plus récemment, le laboratoire a travaillé sur la surveillance du passage à Faune de Lure en déployant des capteurs thermo-hydriques dans les sections courantes des poutres du tablier. Cette méthode, couplée à un algorithme d'analyse inverse et de transfert de masse, a pour but, non seulement de détecter des risques biologiques, mais aussi d'avoir une meilleure connaissance de l'histoire hydrique dans la structure, dès la phase chantier et durant l'exploitation. Ces approches sont cependant légèrement invasives et des procédés de tomographie résistive sont actuellement à l'étude au laboratoire.



Figure 3 : Développement du monitoring hydrique sur ouvrages d'art

La requalification, l'agrandissement et le renforcement des constructions existantes sont aussi des leviers pour apporter des solutions à faible impact environnemental. Si nous nous focalisons sur des ouvrages existant en bois, ces opérations nécessitent de faire un diagnostic des éléments structuraux porteurs précédé de missions d'inspection.

La problématique de l'état hydrique est également présente dans ces approches. Mais la détermination de la résistance résiduelle est également une question soulevée par les maîtres d'œuvre. Cette détermination passe par la confirmation ou l'identification d'une classe de résistance, selon que l'ouvrage a été construit avec une démarche d'ingénierie ou non. Puis l'effet des singularités doit être estimé, comme l'état d'humidité interne, ou les défauts géométriques, ou bien encore la présence de fissures singulières. Les méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) sont alors privilégiées en se basant sur une corrélation entre propriétés d'élasticité et résistance mécanique. Ce travail de thèse entre dans ce contexte avec, à ce jour, deux applications sur les éléments structuraux du parc immobilier « Pont de Flandre » (Paris XIXe arrondissement) et la caractérisation des propriétés mécaniques des éléments de la maquette à l'échelle 1 de la charpente de la cathédrale Notre Dame édifée à Felletin, Figure 4.



Parc du Pont de Flandre (2021) Maquette charpente Notre Dame à Felletin (2021)
 Figure 4 : Mise en application du Contrôle Non Destructif structurel

L'objectif est de proposer une méthodologie de Contrôle Non Destructif (CND) en associant les méthodes d'auscultation par propagation d'ondes ultrasonores et diélectriques (méthode radar ou capacitive), le tout appuyé par de la modélisation avancée, d'une part, du processus de diffusion hydrique et, d'autre part, de la propagation d'ondes en dynamique.

Ce travail se positionne dans le projet SouBois financé par la région Nouvelle Aquitaine intégrant un partenariat entre l'Unité de Recherche Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D) de l'Université de Limoges (localisé à Égletons) et le département Génie Civil et environnemental (GCE) de l'Institut d'Ingénieur et de Mécanique (I2M) de l'Université de Bordeaux (localisé à Talence). Le travail proposé dans ce manuscrit est articulé suivant quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur l'ensemble des domaines abordés tels que le matériau bois sous différentes échelles d'observation, les propriétés mécanique et hydrique du bois et son orthotropie, les techniques de monitoring des champs hydriques et mécaniques par mesures diélectriques et ultrasonores.

Le développement d'un modèle analytique de propagation d'onde ultrasonore dans un matériau anisotrope et son implémentation dans le code aux éléments finis Castem font l'objet du second chapitre. Sur la base de la bibliographie existante, le modèle a été généralisé à un milieu orthotrope élastique. Ce modèle analytique permettra, plus tard, d'alimenter un algorithme d'inversion afin d'exploiter les mesures expérimentales par méthodes ultrasonores en considérant cependant une homogénéité des champs mécaniques et donc des champs hydriques. C'est pour cette raison que le modèle a été implémenté dans une approche éléments finis afin de pouvoir prendre en compte des champs de propriétés mécaniques dont l'hétérogénéité est induite par des champs hydriques hétérogènes.

Une campagne expérimentale a ensuite été réalisée sur des poutres en lamellé collé. L'ensemble de ce programme est exposé dans le troisième chapitre. Il a été pensé pour évaluer les propriétés hydrique et mécanique du bois à l'échelle d'éléments structuraux. Plusieurs géométries sont étudiées ainsi que deux essences résineuses, à savoir le Douglas et l'Épicéa. L'orthotropie du matériau et l'état hydrique ont été le fil rouge de nos réflexions. Ainsi, les méthodes de caractérisation s'articulent en trois parties. Premièrement, les mesures électromagnétiques sont présentées. Elles doivent permettre, à terme, de séparer les propriétés d'élasticité des effets d'humidité du fait de la sensibilité des constantes diélectriques à la présence d'eau liée. Puis, le protocole expérimental employant la propagation d'onde ultrasonore de compression est décrit pour évaluer les propriétés globales d'élasticité dans la définition du comportement structurel. Enfin, des essais mécaniques non destructifs, sur la base d'essais de flexion 4 points et de compression transversale ont été réalisés, à la marge de la campagne expérimentale afin d'étudier l'évolution des propriétés d'élasticité via les

comportements mécaniques globaux et locaux, et ce, en fonction des différents états hydriques.

Le quatrième chapitre présente une synthèse des travaux réalisés durant les trois années de thèse. Dans un premier temps, un protocole d'optimisation est présenté afin d'analyser les mesures ultrasonores dans l'identification des propriétés d'élasticité. Ce protocole est employé dans la caractérisation de l'état mécanique initial supposé homogène après conditionnement des poutres. Une seconde partie présentera notre approche couplée entre une modélisation par éléments finis de la propagation d'ondes ultrasonores en prenant en compte les champs hydriques calculés par simulation et déduit des mesures de constante diélectrique. À ce stade de l'étude, un acteur imprévu s'est invité dans notre travail. Il s'appelle Coronavirus et nous a forcé à modifier au fil de l'eau le plan d'expérience, ce qui a eu un impact direct sur l'exploitation des résultats expérimentaux. Ce travail de synthèse présentera également la corrélation que nous avons pu faire, à ce stade d'avancée des travaux de thèse, entre les vitesses de propagation d'onde calculées et mesurées. Enfin, ce chapitre met en exergue notre vision critique de l'ensemble du protocole expérimental et numérique afin de proposer des perspectives d'ouverture de notre approche du CND en vue d'une inspection et d'un diagnostic structurel d'éléments en bois, même si notre travail a déjà été employé lors de travaux d'inspection pour deux projets sur structures existantes.

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 SouBois soutenu par la région Nouvelle Aquitaine.

Chapitre I. Étude bibliographique

I.1. Introduction

Ce premier chapitre présente l'ensemble de l'état de l'art nécessaire à mener à bien ce travail, à la fois au niveau du matériau bois mais également des techniques de contrôle non destructif mis en œuvre.

Une première partie présente les généralités du matériau en précisant les particularités liées à son orthotropie, les interactions avec l'eau liée et ces conséquences vis-à-vis des propriétés d'élasticité.

Dans un contexte où ce travail consiste à développer une stratégie de diagnostic portant sur la caractérisation des propriétés mécaniques des éléments structuraux en bois impactées par les champs d'humidité, notre travail s'est orienté, dans un premier temps, vers l'utilisation des méthodes ultrasonores dont les vitesses de propagation sont sensibles aux propriétés d'élasticité. La physique de la propagation d'onde dans un milieu élastique est particulièrement abordée afin de nous donner les bases théoriques nécessaires au développement d'un modèle analytique et numérique de propagation d'onde en prenant en compte le caractère orthotrope du milieu. Nous nous limiterons, à ce stade, à travailler dans le domaine de l'élasticité.

Les mesures ultrasonores ne permettant pas de discrétiser les effets d'un champ hydrique hétérogène, nous présentons, dans un second temps, les méthodes diélectriques dont les mesures sont sensibles à la présence d'eau liée. Cela se traduit par la détermination d'une vitesse de propagation des ondes radar.

I.2. Le matériau bois

Le bois est un matériau biologique, poreux, et hétérogène à différentes échelles d'observation. La croissance des arbres dépend de la lumière du soleil, de la nature du terrain et des conditions climatiques de son environnement. Cependant, le processus de croissance peut se décomposer selon deux types de méristèmes distincts, à savoir, les méristèmes primaires (allongement des axes) et les méristèmes secondaires (épaississement des axes) (Pot, 2012) (Thibaut et al., 2001). Les méristèmes primaires reposent sur la division cellulaire de cellules embryonnaires qui sont principalement situées au sein des bourgeons pour les plantes vasculaires. Ces méristèmes s'allongent et se différencient pour produire de nouvelles cellules. Dans un second temps, ils provoquent une augmentation de diamètre du tronc et des branches par la création de couches annuelles successives, nous les appelons alors les méristèmes secondaires (ou méristèmes latéraux). En effet, ils représentent une large variabilité de la structure géométrique, des propriétés mécaniques et des propriétés de transferts (hydrique et thermique).

La variabilité géométrique du bois est identifiée selon plusieurs échelles, comme illustré en Figure I-1 par Rafsanjani (2012). Nous citerons l'échelle macroscopique, l'échelle microscopique et l'échelle de la paroi cellulaire. La structure et la composition chimique du bois sont optimisées par les lois de l'évolution et de l'adaptation. Dans la construction, nous serons plus sensibles aux propriétés mécaniques du bois dans l'arbre et aux propriétés de durabilité.

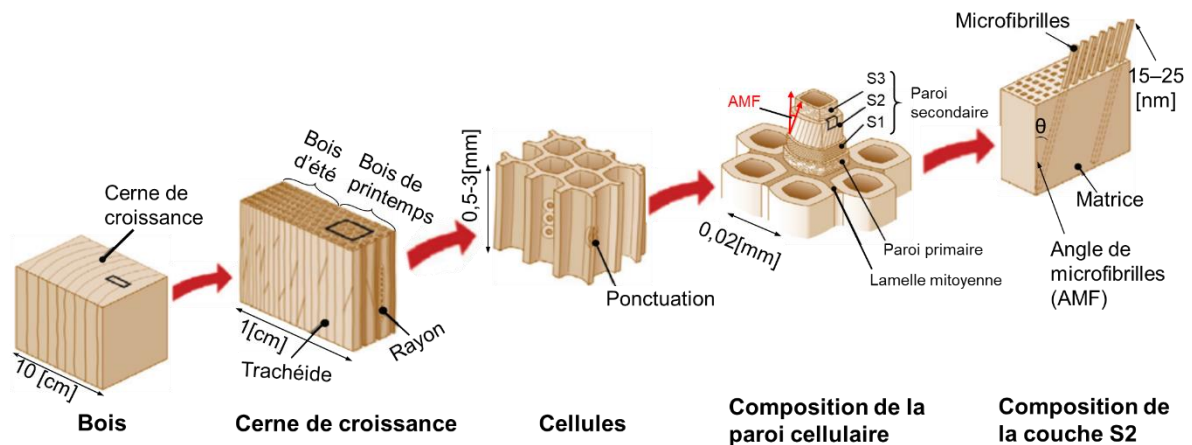


Figure I-1 : Matériau bois, une structure définie à plusieurs échelles (Rafsanjani et al., 2012)

Les cellules sont de différentes natures selon leur fonction et selon les essences. Elles sont généralement classées en fonction des caractéristiques végétales et anatomiques. Dans nos régions tempérées, deux familles prédominent, à savoir, les résineux et les feuillus. Les résineux, de l'embranchement des Pinophyta, comprennent les essences de douglas, épicéa, pin etc. De l'embranchement des dicotylédones, les feuillus comprennent les essences telles que le chêne, l'érable et le frêne, etc.

Dans ce travail orienté vers les techniques de diagnostic d'éléments structuraux en bois, même si les feuillus ont leur place dans la construction ancienne et actuelle, nous focaliserons notre travail sur les résineux qui constituent la famille la plus présente aujourd'hui dans les constructions en bois du Génie Civil. La description multi-échelle à suivre fera donc référence aux résineux.

I.2.1. Échelle macroscopique

I.2.1.1. Plan transversal-croissance du bois

À l'échelle macroscopique, l'observation d'un tronc d'arbre met en exergue, six zones distinctes selon la Figure I-2, en allant de l'extérieur vers l'intérieur d'une grume (direction radiale). Nous rencontrons l'écorce (suber : écorce externe, liber : écorce interne), le phloème, le cambium, l'aubier (bois fonctionnel), le duramen et la moelle (bois de cœur) (Moutee, 2006).

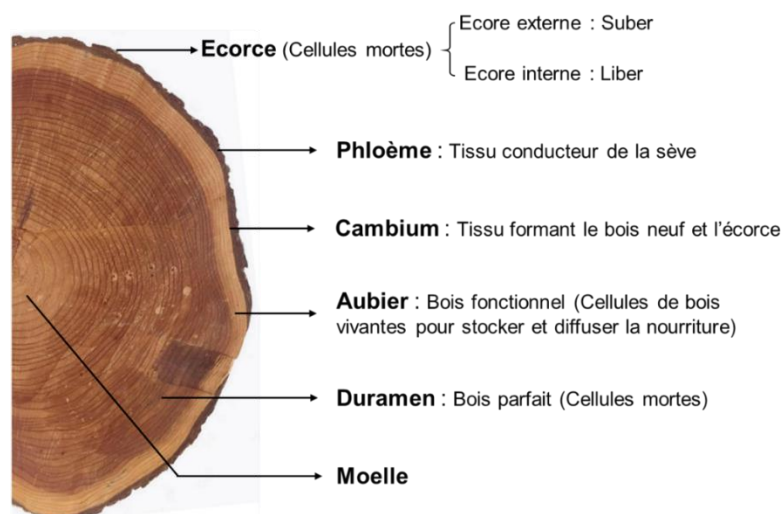


Figure I-2 : Structure générale d'une grume à l'échelle macroscopique

À l'échelle macroscopique, le bois est défini comme un matériau orthotrope. Étant donné que la majorité des cellules et des tissus du bois sont axialement alignés parallèlement au tronc d'arbre (direction privilégiée donnée par la nécessité du maintien physique de l'arbre vis-à-vis des forces gravitaires et des moments de flexion imputés au vent), les fibres et les xylèmes sont disposés en cercles concentriques formant les directions radiale et tangentielle.

Prenons, en illustration, un petit échantillon cubique taillé dans une grume à une certaine distance de la moelle, Figure I-3.

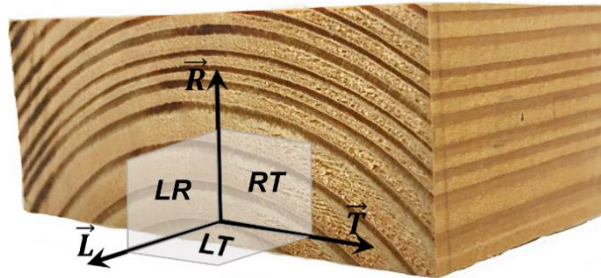


Figure I-3 : Directions principales d'orthotropie

Nous notons trois directions principales de symétrie définies comme suit :

- La direction longitudinale \vec{L} , parallèle à la direction des fibres et dans l'axe du tronc ;
- La direction radiale \vec{R} , orientée de la moelle vers l'écorce ;
- La direction tangentielle \vec{T} , tangentielle aux cernes annuels de croissance et perpendiculaire aux deux autres directions.

Ces trois axes perpendiculaires l'un à l'autre, forment deux à deux trois plans de symétrie, à savoir, le plan radial transversal **RT**, le plan longitudinal radial **LR** et le plan longitudinal tangential **LT**. Les trois directions et les trois plans sont caractérisés par des propriétés mécaniques et de diffusion distincte.

I.2.1.2. Défauts du bois d'œuvre

À l'échelle macroscopique, il est associé un certain nombre d'hétérogénéités ou de singularités qui influencent la qualité du bois. Le bois d'œuvre est issu du tronc de l'arbre pour lequel ces singularités sont moins concentrées dès lors que le diamètre du tronc est important. À chaque partie du tronc est associée une qualité adaptée à des applications spécifiques. Par exemple, le bois de qualité mécanique est généralement réservé pour un usage structurel. Le bois de qualité esthétique sera réservé à l'ébénisterie ou à des applications bardage. Selon les normes NF B52-001-1 (AFNOR, 2011) et NF EN 408+A1 (AFNOR, 2012), les singularités macroscopiques sont majoritairement les nœuds, la variation de pente de fil, les anomalies de croissance, les blessures ou encore les fentes (Bonnet, 2017).

- « Les nœuds » sont des modifications de la structure du bois lié à l'existence d'une branche qui provoque un détournement irrégulier local des fibres. Ceci génère des fragilités localisées et des concentrations de contrainte. L'usinage peut s'avérer également complexe. Il existe plusieurs types de nœuds : le nœud vivant, le nœud mort et le nœud vicieux. Le nœud vivant, issu d'une branche encore vivante au moment de l'abattage, est parfaitement adhérent. Le nœud mort, issu d'une branche morte, peut se détacher au cours de séchage ou d'un usinage. C'est pour cette raison qu'il

est proscrit dans les ouvrages. Les nœuds sont classés généralement par leur diamètre apparent, Tableau I-1.

Tableau I-1 : Classement es nœuds

Classement du nœud	Œil de perdrix (ou pates de chat)	Petit	Moyen	Gros	Très gros
Diamètre (mm)	< 5	5 - 15	16 - 25	26 - 40	>40

- « Les anomalies de croissance » apparaissent durant la croissance de l'arbre, tels que le cœur excentré, le fil tors, la cannelure du tronc, la loupe, la courbure du tronc, etc. Ce type de singularité induit une baisse de résistance à la flexion et à la traction.
- « Les blessures » sont la conséquence des accidents multiples auxquels les arbres sont exposés telles que les brûlures, les inclusions de corps étrangers, les accidents d'abattage et de débit, etc.
- « Les fentes » sont souvent de causes climatiques, comme le climat (froid, chaleur, sécheresse, vent, foudre, neige et pluie). Par exemple, le froid intense et rigoureux en hiver provoque des gélivures, des roulures et n'est pas étranger à l'apparition de certaines maladies physiologiques, ce qui rend le matériau impropre à une utilisation structurelle.

I.2.2. Échelle microscopique

Comme la plupart des matériaux naturels, l'anatomie du bois est complexe. Le bois présente une microstructure cellulaire, poreuse, hiérarchique et présente différentes structures selon la nature de l'essence. Les résineux présentent une structure relativement simple, comme visionnée en Figure I-4. Le plan ligneux est formé de cellules de parenchymes et de trachéides. Les différents types de cellule sont distingués par leurs fonctions.

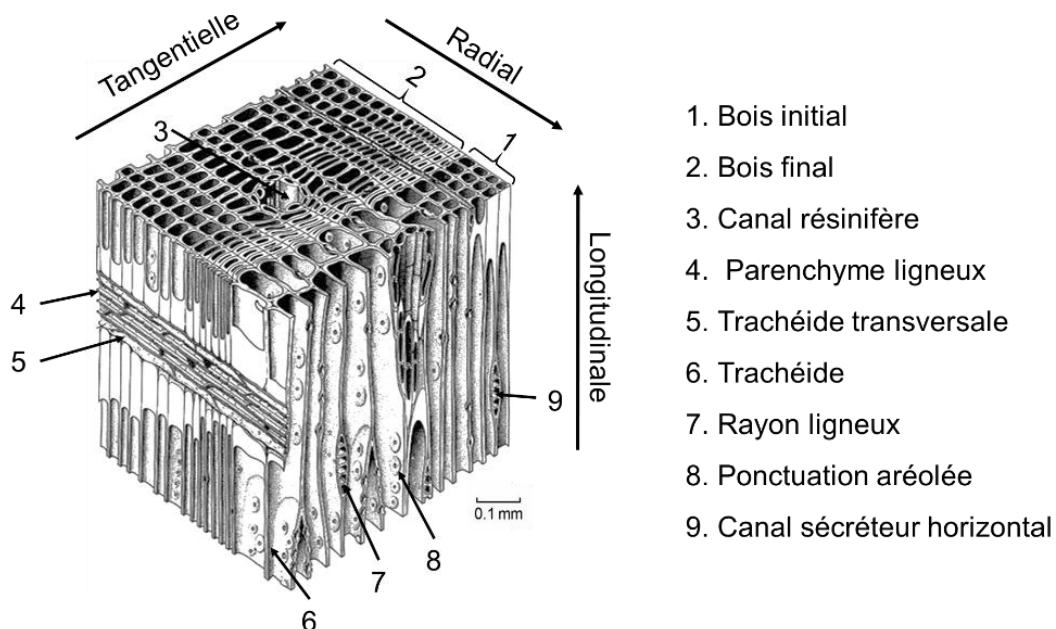


Figure I-4 : Organisation cellulaire type des résineux (Niska and Sain, 2008)

Environ 90% des cellules sont constituées de trachéides. Leurs longueurs vont de 1 à 8mm. Leur section est rectangulaire avec des dimensions allant de 25 à 75 μm (Dinh, 2011). Le soutien mécanique de l'arbre et la conduction de la sève brute de la racine vers les branches sont assurés par les trachéides. Ces cellules sont principalement orientées dans la direction

longitudinale et constituent l'essentiel du tissu cellulaire. Chez certaines espèces comme l'épicéa ou le pin maritime, il existe également des trachéides radiales et transversales dont la fonction est le transport des substances nutritives. La connexion entre cellules se fait par des ponctuations aréolées (Pierre, 2011).

En région tempérée, les arbres poussent plus rapidement au printemps (bois initial) avec une vitesse de croissance qui diminue en été (bois final) pour complètement s'arrêter en hiver. Ainsi, les trachéides de printemps se caractérisent par des diamètres plus importants mais une épaisseur de cellules plus faible, comparées au bois final.

Par ailleurs, les cellules de parenchymes sont constituées de rayons ligneux. Ils assurent le transport et l'accumulation de nutriments. Ces cellules sont orientées dans la direction radiale et longitudinale, elles sont beaucoup plus courtes que les trachéides.

I.2.3. Constituants chimiques du bois

Les principaux composants chimiques à l'échelle de la molécule sont des matrices polymères composites. Quatre constituants principaux peuvent être cités :

- La cellulose est un polymère hydrophile, semi-cristallin dont le monomère de base est le glucose. Elle est le composant principal du bois, avec un ratio de 40% à 50%. Les chaînes moléculaires de cellulose sont alignées les unes aux autres le long de la direction de la longueur de la chaîne, et ce, avec de fortes liaisons hydroxyles formées par les groupes hydroxyles alcooliques pour s'agréger en microfibrilles. Elle joue le rôle de fibre porteuse dans le bois en représentant ainsi les propriétés physiques et mécaniques du matériau.
- L'hémicellulose est un polymère hydrophile, ramifié amorphe, composé de cellulose et de lignine, dont le monomère est un sucre essentiellement non glucosé. Elle représente 15% à 20% de la matière composant les résineux. Sa distribution dépend des essences, de l'âge, du ratio de bois initial et final, du type de cellule et de leur morphologie. Elle joue le rôle de matrice.
- La lignine est un polymère amorphe hydrophobe réticulé tridimensionnel dont le monomère de base est le phénol propane. Elle est principalement située entre la fibre et la cellulose avec une proportion de l'ordre de 25%. Elle a le rôle de colle.
- Les extractibles sont des composants non cellulaires de bas poids moléculaire présents dans les tissus du bois, tels que les tanins, les composants aromatiques des huiles, les alcools et les minéraux. La composition varie selon les espèces. Ils peuvent donc être utilisés pour la classification chimique du bois.

I.2.4. Structure de la paroi cellulaire

Les parois cellulaires du bois sont constituées de trois couches. De l'extérieur vers l'intérieur, nous croiserons une lamelle mitoyenne (LM), une paroi primaire (P), et une paroi secondaire divisée en trois sous couches (S1, S2 et S3), Figure I-5.

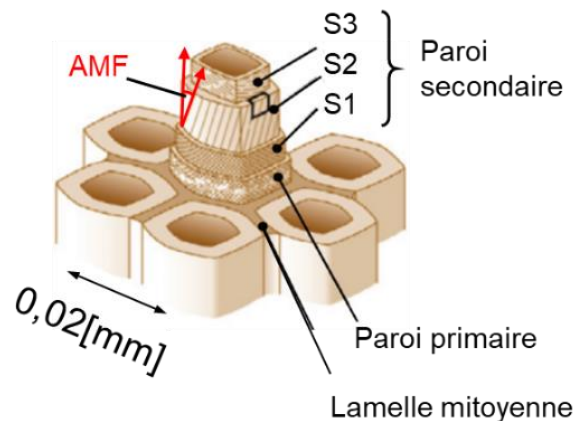


Figure I-5 : Couches constituant la paroi cellulaire (Rafsanjani et al., 2012)

- La lamelle mitoyenne assure la connexion entre les différentes cellules. Elle est constituée de lignine. Son épaisseur oscille entre 0,5 et 1,5 μm dans le bois initial et s'affine dans le bois final (Pierre, 2011). Cette couche est préférentiellement attaquée par certains champignons, réduisant ainsi fortement la résistance mécanique du bois (Clair, 2005).
- La paroi primaire (P) est une paroi très fine et extensive dès la fin de la division cellulaire. Elle se compose de microfibrilles de cellulose enchevêtrées (angle de microfibrilles de 0 à 90 degrés par rapport au grand axe de la cellule), dans lesquelles se déposent de la lignine, de l'hémicellulose et de la pectine. Dans le bois vivant, elle contient beaucoup d'eau avec une épaisseur de l'ordre de 0,1 μm . Lors du séchage, après abatage, le départ de l'eau libre et liée sont accompagnés d'un retrait entraînant une diminution de son épaisseur jusqu'à 0,03 μm .
- La paroi secondaire se dépose sur la paroi primaire lorsque la cellule atteint sa maturité. Elle est composée d'hémicellulose, de lignine et d'une forte proportion de cellulose. Elle présente une paroi relativement dense et rigide. C'est elle qui apporte la majorité de la résistance mécanique de la cellule. Les microfibrilles de cellulose sont enroulées en spirale autour de l'axe de cellule formant un angle (angle de microfibrilles ou AMF) dont la valeur dépend des trois sous-couches S1, S2, S3.
 - La couche S1 est mince. Elle est adjacente à la paroi primaire. L'AMF est de l'ordre de 50 à 70 degrés (Rowell, 2005). Son épaisseur est de l'ordre de 0,1 à 0,35 μm et représente entre 5% et 10% de l'épaisseur totale de la paroi secondaire. Cette couche possède une forte résistance à la traction transversale avec un retrait orienté dans le sens longitudinal (Pierre, 2011).
 - La couche S2 est formée à l'intérieur de la couche S1. Elle se caractérise par un pourcentage de lignine plus faible et un AMF compris entre 5 et 30 degrés. Son épaisseur varie de 1 à 10 μm ce qui représente entre 75 et 85% de l'épaisseur totale de la paroi.
 - La couche S3 est à l'intérieur de la couche S2. D'une épaisseur inférieure à 0,1 μm , elle est la couche la plus mince de la paroi secondaire. Son AMF dépasse 70 degrés. Cette couche a le plus faible pourcentage de lignine de toutes les couches de la paroi secondaire (Rowell, 2005).

Les propriétés physiques des constituants chimiques des parois cellulaires influencent fortement les propriétés mécaniques du bois. La distribution massique de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, est différente selon les couches des parois cellulaires et dépend des essences, Figure I-6 (Navi, 2005).

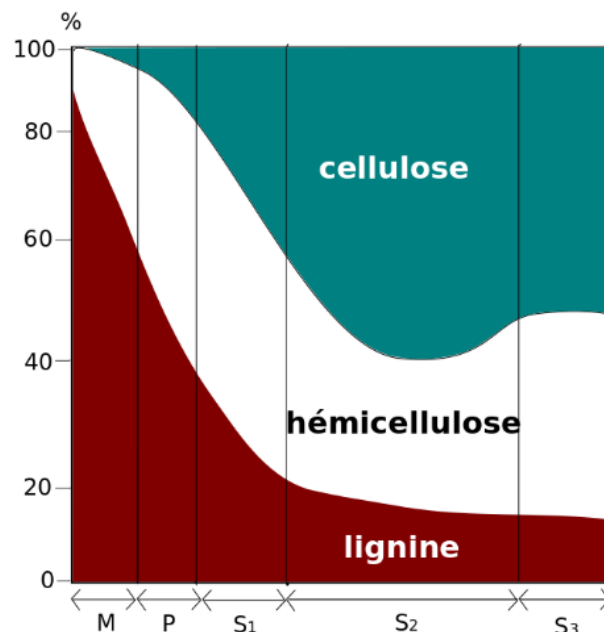


Figure I-6 : Distribution des trois composantes du bois à l'intérieur de la paroi cellulaire (Navi, 2005)

I.2.5. Hygroscopie du bois

La durée de vie des structures en bois prend en compte plusieurs critères tels que la résistance mécanique, la rigidité structurelle des éléments ainsi que la résistance aux attaques biologiques. Dans ce contexte, l'humidité interne joue un rôle prédominant dans le sens où l'ensemble des propriétés mécaniques dépendent de l'humidité interne. Son niveau rend le matériau plus ou moins sensible aux attaques biologiques, et ce, plus particulièrement au-delà de 20%.

Ce taux d'humidité est directement lié aux conditions climatiques de l'environnement caractérisées par la température et l'humidité relative. Le climat étant sans cesse en mouvement, les variations d'ambiance entraînent des variations d'humidité interne via le processus de diffusion. Au-delà de variations globales d'humidité, les éléments structuraux sont le siège de gradients d'humidité entre la surface et le cœur des éléments pouvant induire des amorces de fissure qui vont fragiliser la structure de façon locale ou de façon globale, ce qui justifie, à termes, des besoins de surveillance et de diagnostic structurel.

I.2.5.1. Teneur en eau

Comme tout matériau hygroscopique, le matériau bois absorbe la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère (air humide), et tend à se mettre en équilibre avec l'humidité et la température de l'environnement. L'humidité présente dans le bois w se quantifie sous la forme du rapport de masse d'eau m_{eau} ramenée à la masse anhydre de la matière ligneuse m_{anh} , telle que :

$$w = \frac{m_{eau}}{m_{anh}} \text{ avec } m_{eau} = m_h - m_{anh} \text{ (} m_h \text{ représente la masse du bois humide)} \quad (I-1)$$

La teneur en eau du bois est une propriété dynamique qui change continuellement avec les variations d'humidité relative **HR** et de température **T** de l'air. En régime permanent (stabilité des équilibres thermiques et hydriques), L'humidité dans le bois tend vers un équilibre qui est d'autant plus long que l'échantillon est volumineux et massif. La norme NF EN 1995-1-1/NA (AFNOR, 2010) propose un abaque d'équilibre à usage réglementaire, Figure I-7.

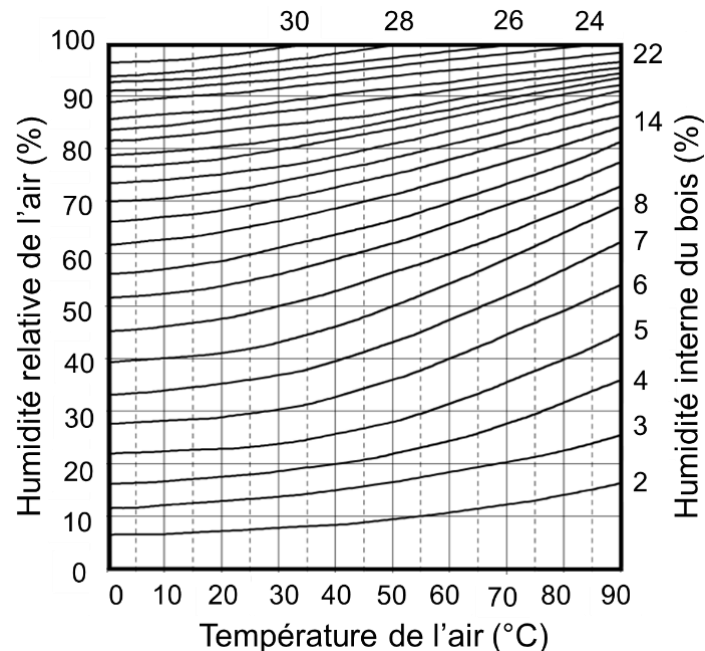


Figure I-7 : Courbe d'équilibre hygroscopique du bois (AFNOR, 2010)

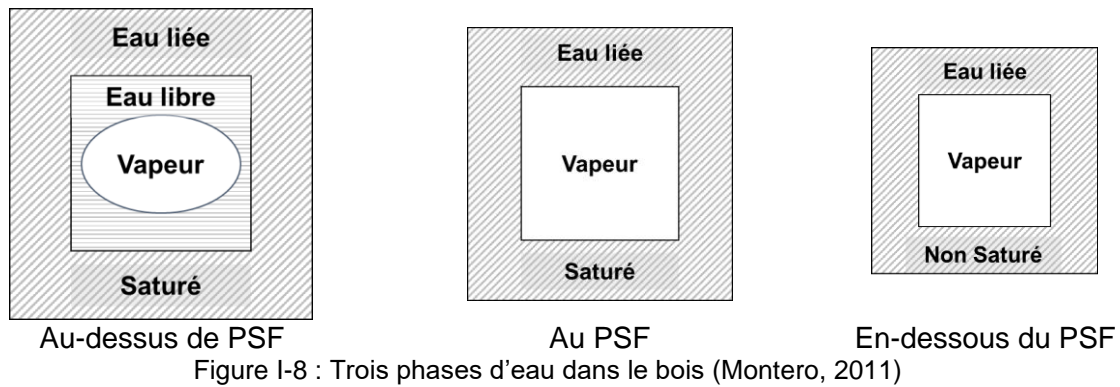
I.2.5.2. Point de saturation des fibres (PSF)

Le point de saturation des fibres (PSF) représente l'humidité du bois en deçà de laquelle les lumens ne contiennent plus d'eau libre tout en ayant les parois cellulaires saturées. Les valeurs des PSF peuvent varier entre 22% et 35% selon les essences (Guitard, 1987). Il est atteint lorsque le matériau est maintenu dans une ambiance saturée (HR = 100%). Cependant, le point de saturation des fibres (PSF) dépend de la température de l'environnement.

I.2.5.3. États de l'eau dans le bois

Quand on parle d'humidité dans le bois, cela concerne la présence de molécules d'eau qui peuvent se trouver sous trois phases distinctes, Figure I-8 (Montero, 2011) :

- L'eau en phase vapeur au niveau des porosités du bois.
- L'eau libre est de l'eau présente dans les lumens ou les pores du bois en phases liquide ou vapeur. Le mouvement de l'eau libre dans le bois est affecté par des forces faibles, telles que les forces capillaires. Lorsque le bois perd toute eau libre, le PSF est atteint.
- L'eau liée est retenue dans les parois cellulaires par des interactions intermoléculaires. Son mouvement se produit par effet de diffusion. Il interagit avec les polymères du bois plus ou moins hydrophiles (Engelund et al., 2013). Par conséquent, la perte d'eau liée est différente de la perte d'eau libre. Elle peut entraîner des variations des propriétés physiques et mécaniques du bois, comme le retrait et le gonflement. Associé à l'orthotropie du milieu, un gradient d'eau liée peut amorcer des fissures dans le bois (Lazarescu et al., 2009) et leur propagation.



I.2.5.4. Hystérésis de sorption

Les interactions entre l'ambiance climatique et l'eau dans le bois reposent sur des échanges thermodynamiques complexes. Comme le montre la Figure I-9, l'équilibre entre humidité relative de l'air et teneur en eau du bois se traduit par une isotherme de sorption. Les échanges énergétiques dans les phase d'adsorption et de désorption étant distincts (chaleur latente de changement de phase de l'eau), cela se traduit par une hystérésis de sorption entre les phases d'humidification et de séchage. La courbe d'adsorption est toujours en dessous de la courbe de désorption, et ce, pour une humidité relative constante (Ross, 2010). Cet effet d'hystérésis varie selon les essences, l'histoire hydrique et la densité du matériau.

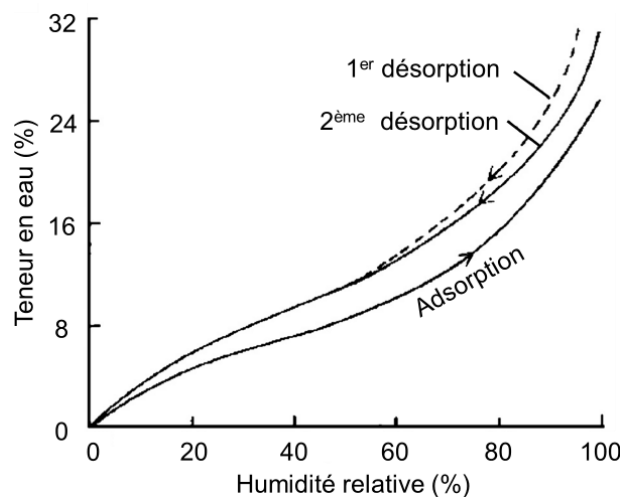


Figure I-9 : Courbe d'hystérésis du bois de Douglas à une température de 32°C (Ross, 2010)

I.2.6. Comportement mécanique du bois

I.2.6.1. Comportement élastique

Dans notre domaine d'étude (solicitation dynamique par ultrason), le bois peut être considéré comme un matériau ayant un comportement élastique linéaire associé à une symétrie orthotrope cylindrique (les effets de fluage étant négligés à haute fréquence). La loi de Hooke, représentant la relation entre le tenseur des contraintes et le tenseur des déformations, s'exprime par l'expression suivante :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}, \text{ ou } \varepsilon_{kl} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{ij}, (i, j, k, l) \in \{1, 2, 3\}^4 \quad (I-2)$$

σ_{ij} et ε_{kl} représentent, respectivement, les composantes des tenseurs des contraintes et des déformations. Le tenseur de rigidité de composantes C_{ijkl} et le tenseur souplesse de composantes S_{ijkl} ($[S]=[C]^{-1}$) sont des fonctions des constantes élastiques du matériau.

Dans le repère principal d'orthotropie, dont la base est formée des directions longitudinale, radiale et tangentielle, 12 paramètres caractérisent l'élasticité du matériau, à savoir :

- 3 modules d'Young : E_L, E_R, E_T .
- 3 modules de cisaillement : G_{LR}, G_{LT}, G_{RT} .
- 6 coefficients de Poisson : $\nu_{LR}, \nu_{RL}, \nu_{LT}, \nu_{TL}, \nu_{RT}, \nu_{TR}$.

Le comportement élastique s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix} \quad (I-3)$$

Avec :

$\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T$: déformations axiales suivant les directions L, R, T ;

$\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T$: contraintes normales suivant les directions L, R, T ;

$\gamma_{LR}, \gamma_{LT}, \gamma_{RT}$: déformations angulaire de cisaillement dans le plans LR, LT et RT ;

$\tau_{LR}, \tau_{LT}, \tau_{RT}$: contraintes de cisaillement dans les plans LR, LT et RT ;

La matrice $[S]$ est symétrique pour un matériau orthotrope, en accord avec les relations suivantes :

$$\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R}, \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad \text{et} \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \quad (I-4)$$

Finalement, les propriétés d'élasticité sont formées de 9 paramètres indépendants dont trois modules d'élasticité, 3 modules de cisaillement et 3 coefficients de Poisson. Plusieurs travaux de caractérisation permettent d'identifier les propriétés d'élasticité selon différentes essences (Guitard and El Amri, 1987; Kretschmann, 1999), Tableau I-2, Tableau I-3.

Les trois modules d'Young sont généralement obtenus par les essais de compression, cependant, les données de E_R et E_T ne sont pas complètes. Des exemples sont présentés respectivement pour le bois américain et français en échelle centimétrique sous forme de rapports avec E_L dans le Tableau I-2 et le Tableau I-3. Pour une même humidité, les propriétés élastiques du bois américain et du bois français sont similaires. Les rapports élastiques et les paramètres élastiques présentent des variations intra et inters spécifiques, en fonction de la teneur en eau et de la masse volumique.

Tableau I-2 : Paramètres élastiques du Douglas et de l'épicéa de France (Guitard and El Amri, 1987)

Essences	Teneur en eau	Densité (kg/m ³)	E_L (MPa)	E_R/E_L	E_T/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L
Douglas	12%	440	16800	0,050	0,050	0,042	0,051
Épicéa	12%	390	11800	0,078	0,043	0,064	0,062
	G_{RT}/E_L	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}
Douglas	0,006	0,641	0,789	0,529	0,525	0,032	0,039
Épicéa	0,003	0,372	0,466	0,442	0,245	0,029	0,020

Tableau I-3 : Paramètres élastiques du Douglas et de l'épicéa d'Amérique (Kretschmann, 1999)

Essences	Teneur en eau	Densité (kg/m ³)	E_L (MPa)	E_R/E_L	E_T/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L
Douglas	12%	450	13600	0,068	0,050	0,064	0,078
Épicéa	12%	350	11200	0,078	0,043	0,064	0,061
	G_{RT}/E_L	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}
Douglas	0,007	0,292	0,449	0,390	0,374	0,036	0,029
Épicéa	0,003	0,372	0,467	0,435	0,245	0,040	0,025

Remarque : Seules les données correspondant aux espèces Épicéa et Douglas sont présentées dans cette partie, car ce sont les deux à avoir été utilisé dans la partie expérimentale de ses travaux.

I.2.6.2. Influence de la masse volumique

La masse volumique (ou densité) du bois est le rapport entre la masse et le volume d'un échantillon à une teneur en eau donnée, qui vise à préciser la quantité massique de matière ligneuse contenue dans un volume donné de bois. La masse volumique du bois fait partie des propriétés les plus importantes pour la prédiction des propriétés mécaniques. Elle varie en fonction des essences de bois, mais présente également des variations intra espèces en fonction de la génétique et des conditions de croissance (Moutee, 2006; Nepveu, 1986; Poku et al., 2007). Comme pour tous matériaux hygroscopiques, la densité humide dépend fortement de la teneur en eau du bois. En effet, la masse volumique du bois a été corrélée positivement avec le module d'élasticité longitudinal. L'évolution du module d'Young longitudinal E_L en fonction de la masse volumique est présentée en Figure I-10 et ce, pour plusieurs essences de résineux et pour une teneur en eau 'de référence' de 12% (Guitard, 1987).

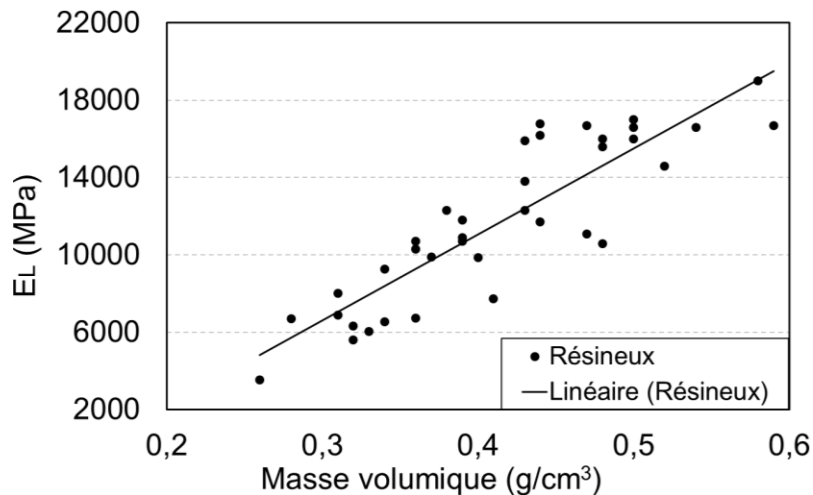


Figure I-10 : Influence de la masse volumique sur le module d'Young longitudinal (Guitard, 1987)

Guitard et El Amri (1987) ont établi un modèle linéaire représentant la relation entre masse volumique et modules d'élasticité pour les résineux. Pour une teneur en eau de 12%, ces relations s'expriment de la façon suivante :

$$\begin{cases} E_L (MPa) = 13100 + 42500 \cdot (\rho - 0.45) \\ E_R (MPa) = 998 + 2360 \cdot (\rho - 0.45) \\ E_T (MPa) = 641 + 2020 \cdot (\rho - 0.45) \end{cases} \text{ et } \begin{cases} G_{LR} (MPa) = 861 + 2080 \cdot (\rho - 0.45) \\ G_{LT} (MPa) = 745 + 989 \cdot (\rho - 0.45) \\ G_{RT} (MPa) = 83,6 + 228 \cdot (\rho - 0.45) \end{cases} \quad (I-5)$$

I.2.6.3. Influence de la teneur en eau

Pour chaque essence, la présence d'eau liée à une forte influence sur les propriétés mécaniques. Dans ce contexte, Guitard (1987) a corréli le module d'élasticité longitudinal à la teneur en eau pour le l'épicéa et le chêne, et ce, à température ambiante, Figure I-11.

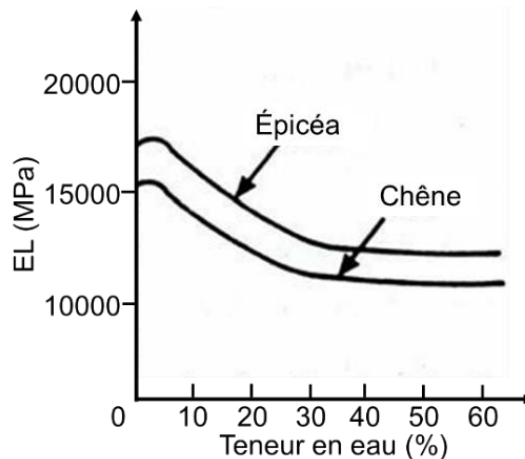


Figure I-11 : Évolution de E_L en fonction de la teneur en eau du bois (Guitard, 1987)

(Guitard, 1987) ont proposé d'apporter les corrections qui peuvent exprimer les variations du module d'élasticité et du module de cisaillement à température ambiante en fonction de la teneur en eau et des modules mesurés à 12%, et ce, pour une plage hydrique allant de 6% à 20%.

$$\begin{cases} E_L = E_L^{12} \cdot [1 - 0.015 \cdot (H - 12)] \\ E_R = E_R^{12} \cdot [1 - 0.030 \cdot (H - 12)] \\ E_T = E_T^{12} \cdot [1 - 0.030 \cdot (H - 12)] \end{cases} \text{ et } \begin{cases} G_{LR} = G_{LR}^{12} \cdot [1 - 0.030 \cdot (H - 12)] \\ G_{LT} = G_{LT}^{12} \cdot [1 - 0.030 \cdot (H - 12)] \\ G_{RT} = G_{RT}^{12} \cdot [1 - 0.030 \cdot (H - 12)] \end{cases} \quad (I-6)$$

I.2.6.4. Retrait et gonflement

Le retrait et le gonflement sont fortement anisotropes. Ils sont nettement plus marqués dans les directions tangentielle et radiale en comparaison à la direction longitudinale, Figure I-12 (Passarini, 2015).

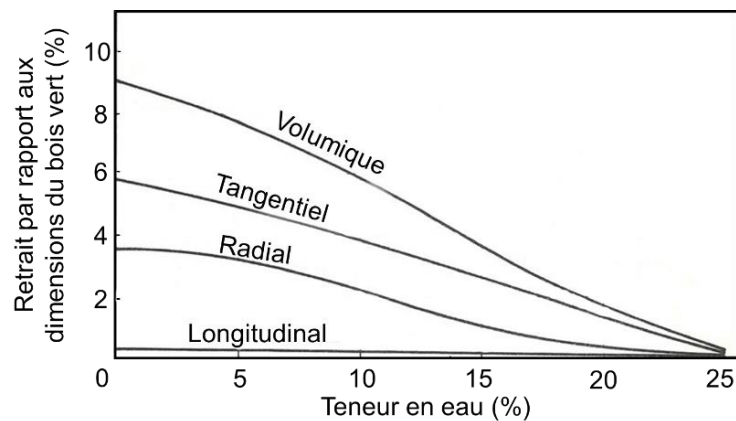


Figure I-12 : Courbes de retrait à partir de l'état anhydre du bois typique dans les trois direction principales (Skaar, 1988)

La présence de rayons ligneux dans la direction radiale fait que le retrait tangentiel est environ deux fois plus grand que radial. Ces variations dimensionnelles peuvent entraîner des effets de fissuration dans le plan RT du fait des déformations gênées par l'orthotropie transverse. La Figure I-13 présente les principaux types de distorsion.

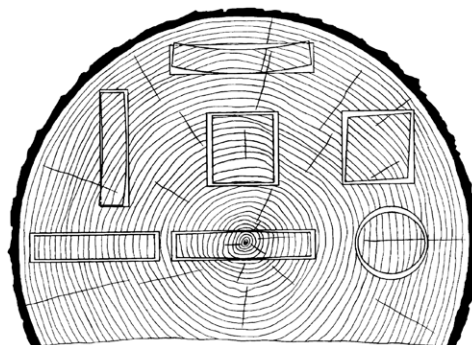


Figure I-13 : Variations dimensionnelles après séchage d'une section transversale en fonction de la position de l'échantillons dans le billon (Ross, 2010)

La diversité des essences de bois représente des propriétés physiques différentes. Le Tableau I-4 présente quelques valeurs de coefficients de retrait-gonflement radial et tangentiel pour quelques essences de résineux.

Tableau I-4 : Coefficients de retrait de quelques essences de bois résineux (Simpson and TenWolde, 1999)

Essences	Retrait radial	Retrait tangentiel
Douglas	4,8%	7,6%
Pin rouge (<i>Pinus resinosa</i>)	3,8%	7,2%
Épicéa	4,3%	7,5%

I.3. Contrôle Non Destructif et Monitoring des champs mécanique et hydrique

Les systèmes de Contrôle Non Destructif (CND) sont utilisés depuis longtemps afin d'évaluer les propriétés physiques, mécaniques ou chimiques des matériaux et des structures pour en évaluer les évolutions de la forme, des déformations, des contraintes ou encore de l'humidité ou tout autre polluant. Le principe du CND est d'effectuer des mesures en minimisant son impact sur les propriétés mesurées et sur l'intégrité de l'élément.

Après plusieurs d'années de recul, (Bucur, 1996; Kollmann et al., 2012; Norimoto and YAMADA, 1970; Ross, 1994; Torgovnikov, 1993), les technologies du CND appliquées au bois font appel à des techniques de mesures transversales qui peuvent être associées à des méthodes inverses faisant appel à de la modélisation en parallèle. Nous citerons en exemple les méthodes d'analyse d'images (corrélation, suivi de marqueurs), les méthodes résistives, diélectriques ou encore électromagnétiques qui sont sensibles à l'humidité. Les analyses ultrasonores sont corrélées aux propriétés d'élasticité ou à la présence de fissure, les techniques d'émission acoustiques permettant une géolocalisation du front de propagation de fissure.

Dans le cadre de notre étude, nous nous focalisons sur les techniques ultrasonores et de radar électromagnétique.

Plusieurs auteurs ont utilisé la vitesse des ondes ultrasonores afin d'ausculter et surveiller les fissures, et évaluer les propriétés élastiques dans les structures du Génie civil, qu'elles soient en béton ou en bois (Alves et al., 2015; Cuxac, 1991a). Les références sont nombreuses sur des échantillons sans défaut (Bucur, 1995; Kabir et al., 1998; Kabir, 2001; Ross, 1994; Wang, 2008). Toutefois, les mesures sur bois d'œuvre sont rares, et avec des champs d'humidité hétérogène inexistantes.

Depuis les années 1980, les techniques de mesures par radar électromagnétique sont employées pour détecter les armatures dans du béton armé, des canalisations, des épaisseurs des couches géotechniques ou des couches de roulement dans les structures de chaussées. Également, le radar électromagnétique est utilisé pour caractériser les contrastes diélectriques en vue de l'estimation des teneurs en eau ou tout autre polluants comme les chlorures, (du Plooy et al., 2015; Sbartai et al., 2006). Cependant, la littérature sur l'interaction physique des ondes radar avec un matériau anisotrope comme le bois est encore pauvre, notamment l'étude de l'effet de l'humidité en fonction de la direction des fibres et de l'essence du bois.

I.3.1. Méthodes ultrasonores

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques, de fréquence supérieure à 20kHz. En tant que perturbations d'un milieu déformable, elles se propagent dans tous les milieux élastiques, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux. L'onde ultrasonore connaît plusieurs perturbations telles que réflexion, réfraction, diffusion et absorption. Les méthodes ultrasonores sont déjà étudiées sur le bois (Bucur, 1996; Cuxac, 1991b; Sakai et al., 1990; Wang, 2008). Les variations des grandeurs caractéristiques (telles que la vitesse ou facteur

d'atténuation) de la propagation des ondes ultrasonores dépendent des propriétés mécaniques du bois (densité, élasticité). La plage de fréquence typique de 20kHz à 200kHz est adaptée à la forte atténuation énergétique dans le matériau bois (Senalik et al., 2014; Zisi and Dix, 2017).

I.3.1.1. Principe de mesure ultrasonore

Il existe trois types de disposition des transducteurs qui sont couramment utilisées, Figure I-14 (AFNOR, 2005) :

- Transmission directe : elle est considérée comme la configuration optimale avec une amplitude du signal maximale. Il s'agit de la méthode la plus précise pour déterminer le temps de propagation de l'onde (TOF : Time Of Flight). La longueur du trajet parcouru par l'onde ultrasonique est mesurée entre chaque centre des transducteurs ;
- Transmission semi-directe : la longueur du trajet est mesurée entre chaque centre des transducteurs ;
- Transmission indirecte : dans le cas de cette transmission, la longueur du trajet peut être incertaine. Afin d'éliminer cette incertitude, il est recommandé d'utiliser le mode vitesse de surface.

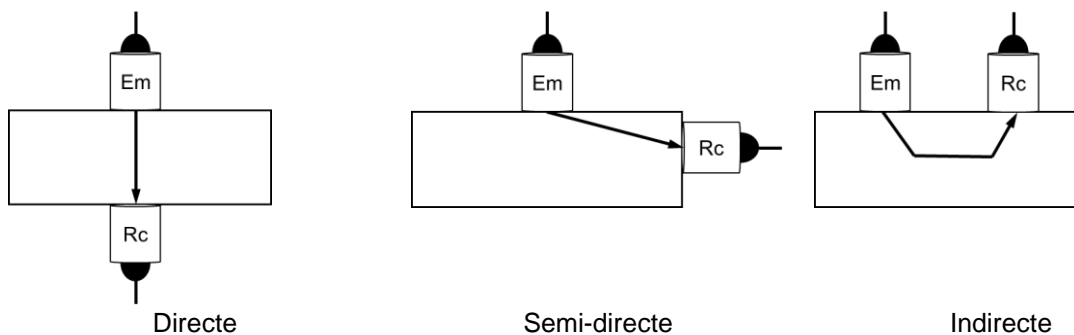


Figure I-14 : Trois dispositions des transducteurs

I.3.1.2. Grandeurs caractéristiques de la propagation d'onde mécanique

I.3.1.2.1. Vitesse de propagation

La méthode ultrasonore consiste à déterminer le TOF d'un émetteur vers un récepteur le long du chemin de propagation (D_{US}). La vitesse moyenne de propagation est calculée selon l'expression suivante :

$$V = \frac{D_{US}}{TOF} \quad (I-7)$$

I.3.1.2.2. Facteur d'atténuation

Le processus de propagation d'onde ultrasonore est affecté par la présence et la localisation des défauts, le caractère dissipatif du milieu (viscoélasticité par exemple), la fréquence de la vibration, le chemin de propagation, etc. L'atténuation énergétique englobe également les effets de réfraction et diffraction. Le facteur d'atténuation α est le rapport entre l'amplitude A_0 du signal émis et l'amplitude du signal reçu $A(x)$ à une distance de propagation x , tel que :

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \frac{A_0}{A(x)} \quad (I-8)$$

Beall (2002) a donné un ordre de grandeur de l'atténuation dans le sens longitudinal de 30dB/m et dans le sens transverse de 200dB/m. Dans les bois résineux, l'effet de l'angle de microfibrille (AFM) est non linéaire. Il présente une atténuation maximale pour un angle de 45 à 60 degrés.

I.3.1.3. Comportement des ultrasons dans les matériaux anisotropes

La propagation des ondes est un phénomène physique qui traduit la progression d'une onde dans un milieu élastique. Lorsqu'une onde est déclenchée (sous la forme d'un déplacement ou d'une pression de contact) via un émetteur en surface, quatre formes d'onde peuvent être générées. Il s'agit des ondes de compression volumique dites primaires (P), des ondes de cisaillement volumique dites secondaires (S), et des ondes de surface (ondes rampantes de Love : L, ondes de Rayleigh : R), Figure I-15. Notre travail sollicitera uniquement les ondes de volume.

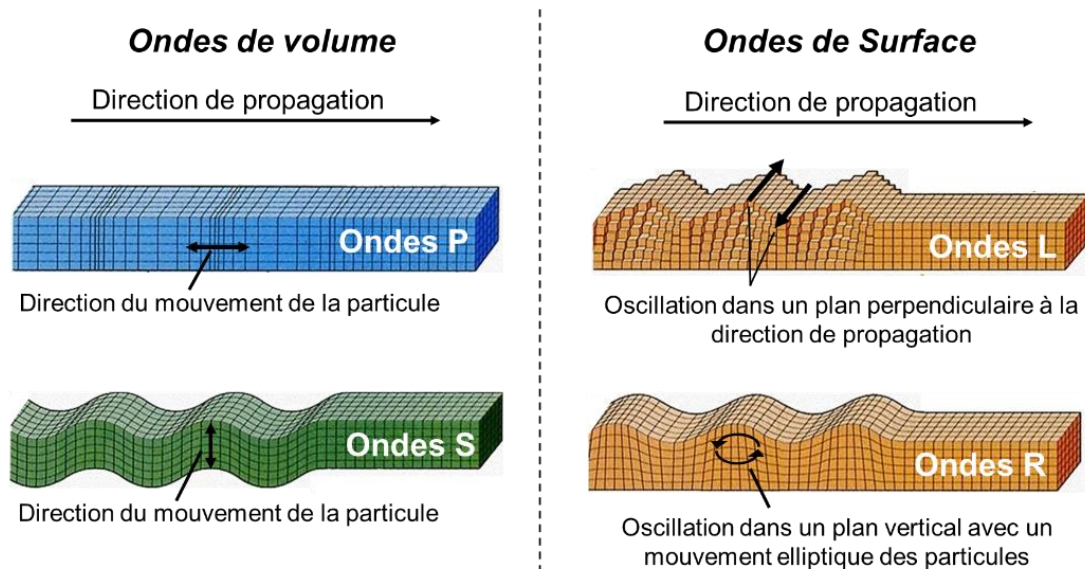


Figure I-15 : Quatre formes d'onde différentes

I.3.1.4. Propagation d'ondes dans un milieu élastique

L'étude de la vitesse de propagation des ondes élastiques (compression « P » et cisaillement « S ») permet de déterminer les propriétés d'élasticité d'un matériau (Cuxac, 1991b; Espinosa et al., 2018).

La propagation d'ondes ultrasonores crée un déplacement spatial de particules (vibration par rapport à la position d'équilibre initiale) au fil du temps. Le déplacement de ces particules provoque une propagation de déformations (de composantes ε_{kl}) et de contraintes (de composantes σ_{ij}), par le biais de la loi de Hooke, et du tenseur de rigidité de composantes C_{ijkl} ou de souplesse $S_{kl ij}$:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \text{ ou } \varepsilon_{kl} = S_{kl ij} \cdot \sigma_{ij} \quad (I-9)$$

Dans le cadre des petites perturbations, rappelons la relation entre le tenseur des déformations et le vecteur de déplacement (composantes u_k ou u_l) :

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (I-10)$$

Les propriétés de symétrie des tenseurs de déformation et de contrainte permettent de réécrire la loi de Hooke (I-9) en considérant l'expression (I-10) :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial u_k}{\partial x_l} = S_{kl ij} \cdot \sigma_{ij} \quad (I-11)$$

La propagation des ondes ultrasonores peut être exprimée via les équations du mouvement déterminées par le principe fondamental de la dynamique (Royer and Dieulesaint, 1996) :

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (I-12)$$

ρ désigne la masse volumique du matériau. En tenant compte de la loi de Hooke (I-11), l'équation du mouvement s'écrit également :

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \cdot \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (I-13)$$

D'après (Alves et al., 2015; Cuxac, 1991a), la solution de l'équation (I-13) prend la forme d'une onde qui se propage à une vitesse de phase et s'écrit comme suit :

$$\vec{u}(\vec{OM}, t) = \vec{U} \cdot f(\omega \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{OM}) \quad (I-14)$$

Le vecteur d'onde \vec{k} est en fonction du type d'onde (onde de compression « P », de cisaillement horizontale « Sh » ou de cisaillement verticale « Sv »). Il est orienté par le vecteur de direction de propagation unitaire \vec{n} tel que :

$$\vec{k} = k_\phi \cdot \vec{n} \quad (I-15)$$

k_ϕ est défini comme le rapport de la pulsation ω par la vitesse de phase, et ce, pour les ondes de compression ($\phi = \phi_P$), de cisaillement horizontale et verticale ($\phi = \phi_{Sv}$ ou $\phi = \phi_{Sh}$, respectivement), Figure I-16.

$$k_\phi = \frac{\omega}{V_\phi} \quad (I-16)$$

\vec{U} est l'amplitude vectorielle du déplacement. L'association des expressions (I-15) et (I-16) permet de réécrire les composantes du vecteur déplacement de la façon suivante :

$$u_i = U_i \cdot \exp(\omega \cdot t - k_\phi \cdot n_j \cdot x_j) \quad (I-17)$$

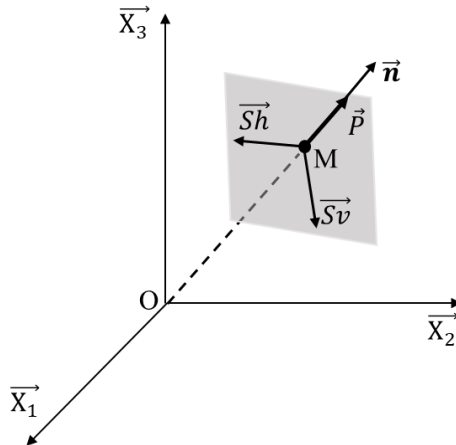


Figure I-16 : Repères local et global du vecteur déplacement

Après avoir substitué l'équation (I-17) dans l'équation (I-13), nous pouvons obtenir les deux équations différentielles suivantes :

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \omega^2 \cdot [U_i \cdot \exp(\omega \cdot t - k_\phi \cdot n_j \cdot x_j)] \quad (I-18)$$

$$\frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} = k^2 \cdot n_j \cdot n_k \cdot [U_l \cdot \exp(\omega \cdot t - k_\phi \cdot n_j \cdot x_j)] \quad (I-19)$$

En combinant les équations (I-18) et (I-19), l'équation (I-13) peut être réécrite comme suit :

$$\rho \cdot \omega^2 \cdot U_i = C_{ijkl} \cdot k_\phi^2 \cdot n_j \cdot n_k \cdot U_l \quad (I-20)$$

En introduisant l'équation (I-16), l'expression (I-20) devient :

$$\rho \cdot U_i = C_{ijkl} \cdot n_j \cdot n_k \cdot \frac{U_l}{V_\phi^2} \quad (I-21)$$

Cette équation est appelée *équation de Christoffel* (Royer and Dieulesaint, 1996) faisant apparaître le tenseur du même nom de composantes Γ_{ij} telles que :

$$\Gamma_{ij} = C_{ijkl} \cdot n_j \cdot n_k \quad (I-22)$$

Ainsi, en considérant l'équation (I-22), l'expression (I-21) devient :

$$\rho \cdot U_i \cdot V_\phi^2 = \Gamma_{il} \cdot U_l \quad (I-23)$$

Elle peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho \cdot V_{\phi}^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho \cdot V_{\phi}^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho \cdot V_{\phi}^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_1^{\phi} \\ U_2^{\phi} \\ U_3^{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (I-24)$$

L'équation (I-24) admet trois solutions non nulles telle que :

$$\det \begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho \cdot V_{\phi}^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho \cdot V_{\phi}^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho \cdot V_{\phi}^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (I-25)$$

La solution de l'équation (I-25) se traduit par trois valeurs de V_{ϕ} , correspondant à une vitesse maximale représentant la vitesse de compression (V_{ϕ_P}) et deux vitesses de cisaillement ($V_{\phi_{Sh}}$, $V_{\phi_{Sv}}$).

Ces vitesses dépendent des propriétés élastiques du matériau et s'expriment généralement comme suit :

$$V_{\phi_1} = m + n + \frac{a}{3} \quad (I-26)$$

$$V_{\phi_2} = \left(\frac{-1 + \sqrt{3} \cdot i}{2} \right) \cdot m + \left(\frac{-1 - \sqrt{3} \cdot i}{2} \right) \cdot n + \frac{a}{3} \quad (I-27)$$

$$V_{\phi_3} = \left(\frac{-1 - \sqrt{3} \cdot i}{2} \right) \cdot m + \left(\frac{-1 + \sqrt{3} \cdot i}{2} \right) \cdot n + \frac{a}{3} \quad (I-28)$$

Avec

$$m = \begin{cases} \sqrt[3]{p+q} & \text{si } |p+q| \geq |p-q| \\ \sqrt[3]{p-q} & \text{si } |p+q| < |p-q| \end{cases} \text{ et } n = \begin{cases} \frac{a^2 + 3 \cdot b}{-9 \cdot m} & \text{si } |m| \neq 0 \\ 0 & \text{si } |m| = 0 \end{cases}$$

$$p = \frac{9 \cdot a \cdot b + 27 \cdot c + 2a^3}{54}$$

$$q = \frac{\sqrt{3 \cdot (-4 \cdot b^3 - a^2 \cdot b^2 + 18 \cdot a \cdot b \cdot c + 27 \cdot c^2 + 4 \cdot a^3 \cdot c)}}{18}$$

$$a = \Gamma_{11} + \Gamma_{22} + \Gamma_{33}$$

$$b = \Gamma_{13}^2 + \Gamma_{23}^2 + \Gamma_{12}^2 - \Gamma_{11} \cdot \Gamma_{22} - \Gamma_{11} \cdot \Gamma_{33} - \Gamma_{22} \cdot \Gamma_{33}$$

$$c = \Gamma_{11} \cdot \Gamma_{22} \cdot \Gamma_{33} + 2 \cdot \Gamma_{12} \cdot \Gamma_{13} \cdot \Gamma_{23} - \Gamma_{22} \cdot \Gamma_{13}^2 - \Gamma_{11} \cdot \Gamma_{23}^2 - \Gamma_{33} \cdot \Gamma_{12}^2$$

Nous obtenons les trois vecteurs qui représentent les trois directions de polarisation :

$$\vec{U}^{Sh} = \begin{pmatrix} U_1^{Sh} \\ U_2^{Sh} \\ U_3^{Sh} \end{pmatrix} \quad \vec{U}^{Sv} = \begin{pmatrix} U_1^{Sv} \\ U_2^{Sv} \\ U_3^{Sv} \end{pmatrix} \quad \vec{U}^P = \begin{pmatrix} U_1^P \\ U_2^P \\ U_3^P \end{pmatrix} \quad (I-29)$$

Ces trois ondes se propagent dans la même direction à des vitesses différentes et présentent des polarisations orthogonales. Le mode de compression \vec{U}^P se propage à une vitesse de compression $V_{\phi P}$ qui est supérieure aux modes de cisaillement horizontale \vec{U}^{Sh} ($V_{\phi Sh}$) et verticale \vec{U}^{Sv} ($V_{\phi Sv}$). Selon la symétrie du matériau étudié, nous pourrions déterminer les directions de propagation et de polarisation nécessaires afin de déterminer tous les paramètres élastiques par la méthode ultrasonore. Les modules sont appelés modules dynamique (MOED) par opposition aux modules statiques (MOE) obtenus lors d'essais mécaniques instantanés.

I.3.1.5. Modèles empiriques

Le modèle d'Hankinson a été développé par Hankinson en 1921 (Hankinson, 1921). Il fournit une relation mathématique reliant les propriétés mécaniques et physiques, telles que le module d'élasticité, la résistance, et la vitesse de propagation des ondes en fonction de l'angle de propagation par rapport à la direction des fibres. L'équation de la vitesse de l'onde de compression est formulée comme suit (Kabir, 2001; Ross, 2010) :

$$V_P(\theta) = \frac{V_P(0) \cdot V_P(90)}{V_P(0) \cdot \sin^n \theta + V_P(90) \cdot \cos^n \theta} \quad (I-30)$$

$V_P(0)$ et $V_P(90)$ sont les vitesses de propagation de l'onde de compression respectivement parallèlement et perpendiculairement aux fibres. n est un coefficient de calage dont la valeur nécessite une optimisation expérimentale.

D'autres expressions empiriques ont été proposées pour le bois. Nous citerons les équations d'Osgood :

$$V_P(\theta) = \frac{V_P(0) \cdot V_P(90)}{V_P(0) + (V_P(0) - V_P(90)) \cdot (\sin^n \theta + \alpha \cdot \cos^n \theta) \cdot V_P(90) \cdot \sin^n \theta} \quad (I-31)$$

Et de Jacoby :

$$V_P(\theta) = V_P(0) \cdot \cos^n \theta + V_P(90) \cdot \sin^n \theta \quad (I-32)$$

Selon (Kabir, 2001), concernant les plans LR et LT les lois d'Hankinson et d'Osgood sont bien adaptées au bois pour une plage d'humidité allant de 2% à 75%. En revanche, l'équation de Jacoby est utilisable pour des angles de propagation en deçà de 50°. Dans le plan RT, toutes ces trois équations peuvent être utilisées pour prédire la vitesse ultrasonore du bois.

I.3.1.6. Effet de l'orthotropie

Plusieurs travaux (Marra et al., 1966) (Dackermann et al., 2016) ont démontré que la vitesse de propagation des ondes dépend du module d'élasticité dynamique dans les directions principales d'orthotropie du bois. Du fait de cette orthotropie, une onde de compression se propage selon différentes vitesses dépendantes de l'angle entre la direction longitudinale et la direction de propagation (angle de propagation) (Bucur and Feeney, 1992; Masumi et al., 2011). Pour illustration, le Tableau I-5 donne les vitesses lorsque l'onde de compression se propage dans les trois directions principales, et ce, pour 4 essences à l'échelle centimétrique.

Tableau I-5 : Vitesses de propagation d'onde P dans les trois directions principales

Essences	V longitudinale (m/s)	V radiale (m/s)	V tangentielle (m/s)
Douglas	5500	2330	1990
Épicéa	5600	2000	1600
Pine	5380	1898	1630
Cyprès japonais	4492	1865	1389

Ces vitesses peuvent être affectées par les singularités du matériau telles qu'une pente de fil, une fissure ou encore un nœud. La Figure I-17 montre une évolution typique de la vitesse de propagation d'onde P en fonction de l'angle de propagation. L'étude a été réalisée sur du Pin.

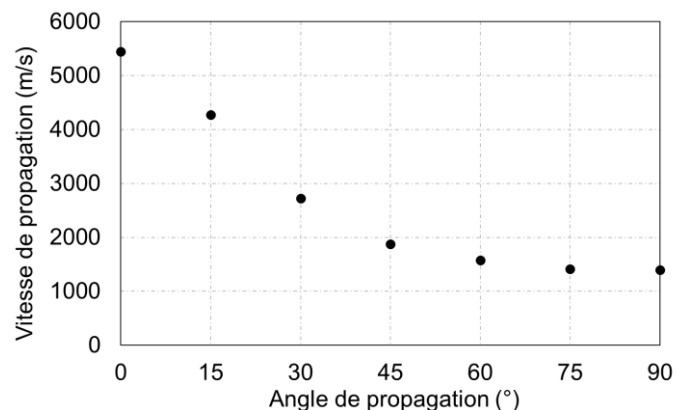


Figure I-17 : Vitesse de propagation d'onde P en fonction de l'angle de propagation (Armstrong et al., 1991)

I.3.1.7. Effet de la densité

L'effet de la densité sur l'onde ultrasonore dépend de l'essence (inter et intra espèces), de la structure du bois et de la direction de mesure. La vitesse de propagation s'exprime par les équations (I-26), (I-27) et (I-28). Cela signifie que les changements de vitesse dépendent du rapport entre la densité et les modules d'élasticité. Par ailleurs, une augmentation de la densité se traduit généralement par une augmentation de la rigidité du matériau. Cependant, si l'augmentation de la densité ne s'accompagne pas d'une augmentation correspondante de la rigidité, la vitesse de propagation diminue avec l'augmentation de la densité. (Baar et al., 2012). La vitesse de propagation d'onde ultrasonore est donc corrélée au ratio E/ρ , nommé module spécifique.

En revanche, De Oliveira et Sales (2006) ont étudié la relation entre la densité et la vitesse de l'onde de compression se propageant dans la direction longitudinale (v_L) pour des bois tropicaux (pinus caribea, eucalyptus citriodora, Goupia glabra et Hymenaea sp.) à une

humidité proche de 12% (de Oliveira and Sales, 2006). Ils ont montré que v_L a tendance à augmenter avec la densité. L'effet inter essence est plus importante que l'effet intra essence, Figure I-18.

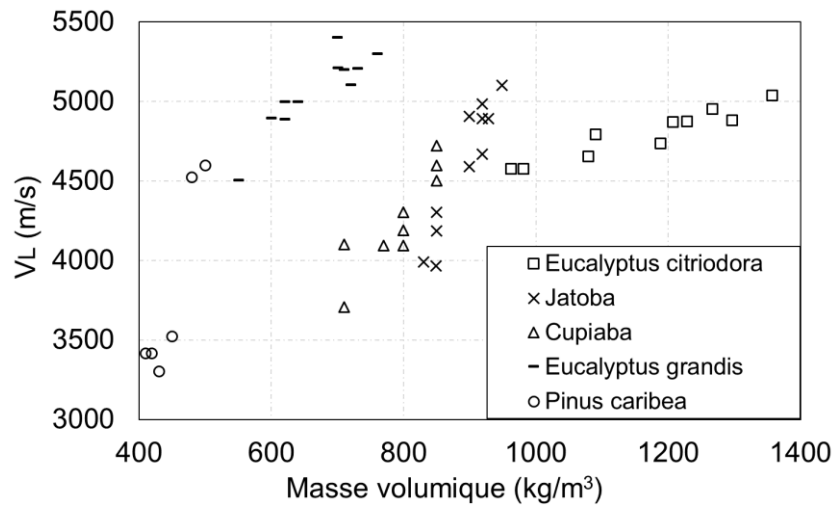


Figure I-18 : Relation entre vitesse longitudinale et densité pour différentes essences à 12% d'humidité (de Oliveira and Sales, 2006)

Zisi et Dix (2017) ont fait les mêmes observations pour les vitesses de compression dans les directions radiale (v_R) et tangentielle (v_T) avec une augmentation de la densité pour une même essence et les essences différentes (chêne et pin), Figure I-18 et Figure I-19.

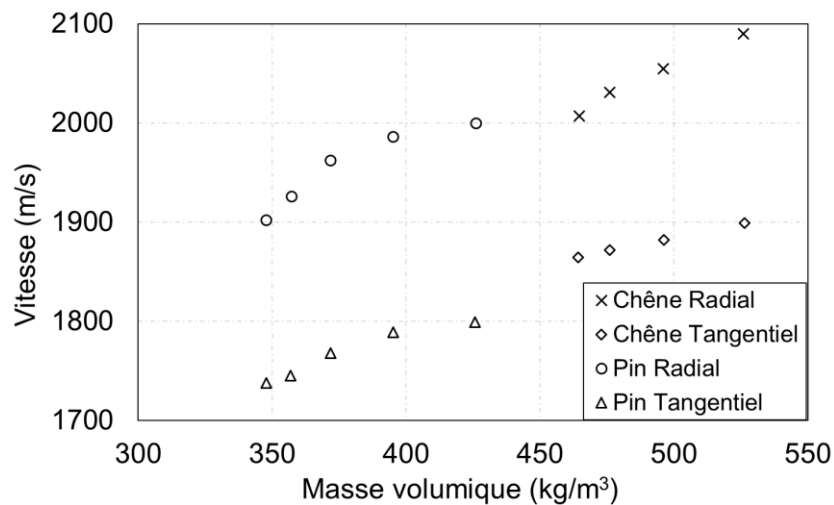


Figure I-19 : Relation entre la vitesse transversale et la densité pour du chêne et du pin verts (Zisi et Dix 2017)

I.3.1.8. Effet de la teneur en eau

La vitesse des ondes ultrasonores est sensible aux changements d'humidité du bois. La vitesse dans des conditions sèches est toujours supérieure à la vitesse dans des conditions plus humides, et ce, dans les toutes directions de propagation (de Oliveira et al., 2005), Figure I-20.

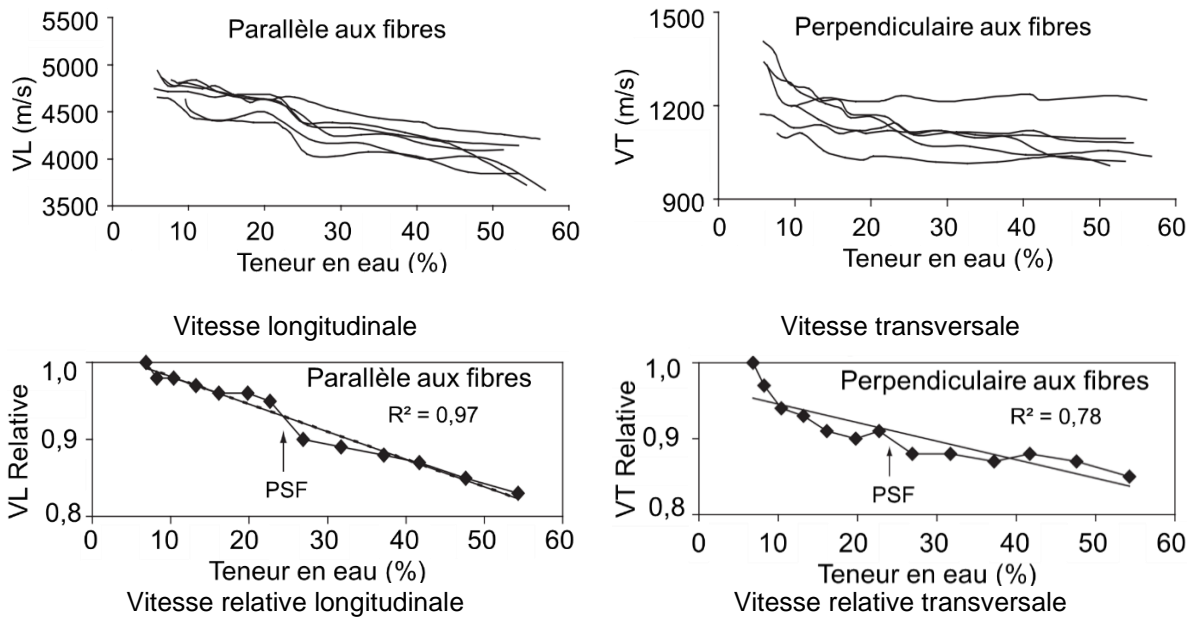


Figure I-20 : Relation entre la teneur en eau et la vitesse de propagation des ondes de compression dans le *Goupia glabra* d'Amérique du Sud (de Oliveira et al., 2005)

Cette approche globale a été améliorée par la suite en dissociant l'effet de l'eau libre. En effet, l'évolution de la vitesse ultrasonore par rapport à la teneur en eau peut être représentée par deux modèles de régression linéaire : au-dessus du PSF et au-dessous du PSF (Gonçalves et al., 2018). Lorsque la teneur en eau au-dessous du PSF, à mesure que la teneur en eau diminue, les vitesses ultrasonores continuent d'augmenter, (Dündar et al., 2016) proposent un modèle de régression de puissance pour représenter cette évolution. Au-dessus du PSF, la vitesse ultrasonique reste presque constante (Sakai et al., 1990). (Sakai et al., 1990) a remarqué que l'atténuation est constante en dessous de 18% d'humidité et augmente au-dessus de ce niveau.

(Bucur, 2006) souligne que la vitesse ultrasonore est directement liée à la présence d'eau liée et non sensible à l'eau libre.

I.3.1.9. Effet de la température

Une réduction linéaire de la vitesse de l'onde de compression dans la direction longitudinale (v_L) avec une augmentation de température de -40°C à 50°C a été observée par Llana et al (Llana et al., 2013) sur le pin anhydre. Sandoz (Sandoz, 1993) a montré que pour l'épicéa et le sapin, pour différentes teneurs en eau constantes (0%, 8%, 12% et au-dessus de FSP), v_L diminue lorsque la température augmente de -40°C à 120°C . Cet effet diminue avec une teneur en eau plus faible lorsque la température est en-dessous de 0°C . Gao et al. (Gao et al., 2012, 2013) ont également mis en évidence l'influence de la température sur v_L pour différentes teneurs en eau (0%, 12%, 24%, 78,6%, 91,4% et 118,3%) lorsque la température varie de -45°C à 45°C , Figure I-22.

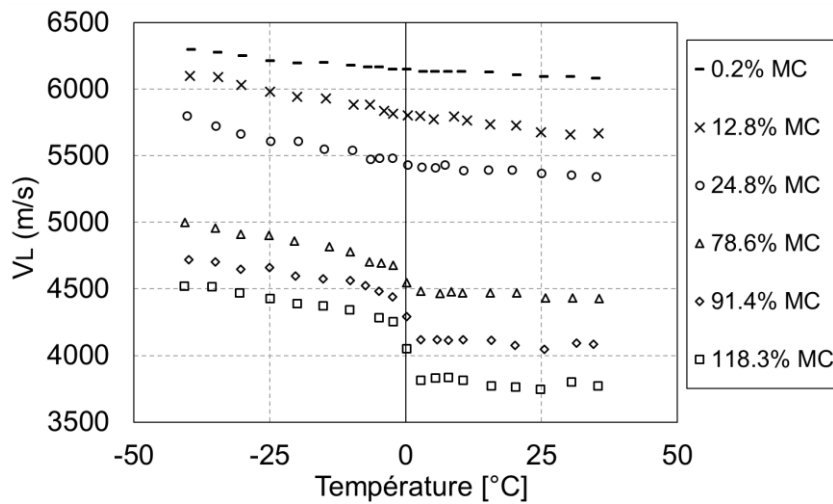


Figure I-21 : Vitesse compression ultrasonore fonction de la température pour du Pin Rouge (Gao et al., 2012, 2013)

I.3.1.10. Effet de la fréquence

Dans les matériaux polymères comme le bois, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est affectée par la fréquence de sollicitation. Celle-ci augmente en fonction de la fréquence avec une limite asymptotique comprise entre 100kHz et 200kHz (Beall, 2002). En revanche, (Bucur and Bohnke, Bucur and Feeney, 1992) ont constaté que la vitesse de l'onde de compression augmentait fortement entre 100kHz et 250kHz dans la direction longitudinale. Lorsque la fréquence est comprise entre 250kHz et 1.5MHz, cette tendance se stabilise, Figure I-22.

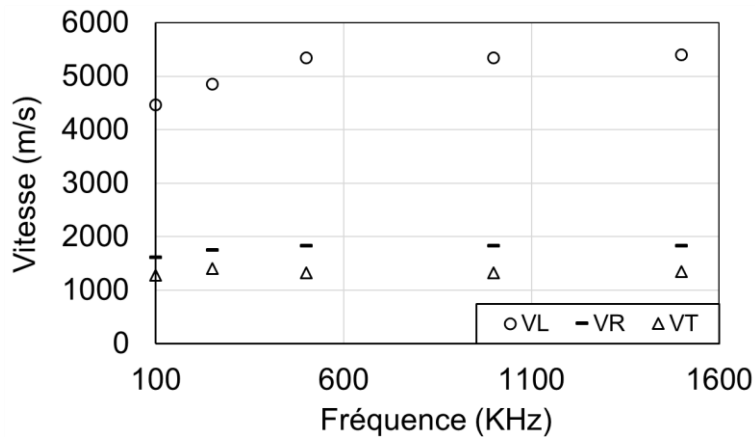


Figure I-22 : Influence de la fréquence sur la vitesse de propagation ultrasonore (Bucur and Bohnke, Bucur and Feeney, 1992)

En contrepartie, dans les directions radiale et tangentielle, la sensibilité fréquentielle de la vitesse est moins marquée. De plus, les coefficients d'atténuation suivent les mêmes variations fréquentielles. En effet, l'atténuation des signaux augmente à mesure que la fréquence augmente, Figure I-23.

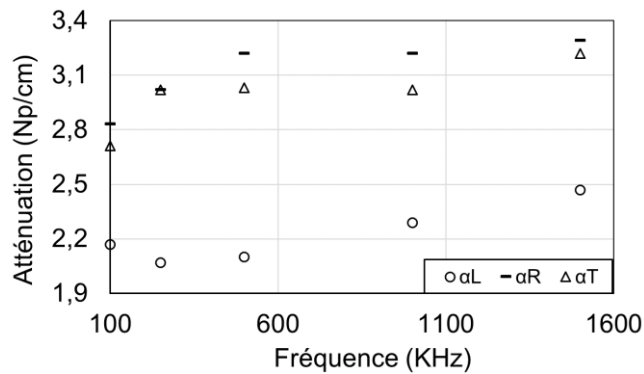


Figure I-23 : Influence de la fréquence sur l'atténuation α (Bucur and Bohnke, Bucur and Feeney, 1992)

I.3.2. Méthode diélectrique

Depuis le début du XXe siècle, les caractéristiques électriques du bois sous l'influence du courant continu et du courant alternatif basse fréquence (20-50 Hz) ont été étudiées. Les effets d'un courant alternatif haute fréquence a été étudiés dès les années 1930. L'une des premières utilisations industrielles de cette technologie est le séchage du bois. Avec l'avènement des micro-ondes dans les années 1950, des protocoles à micro-ondes, pour la mesure de l'humidité en profondeur et la détection des défauts, se sont développés.

Le bois est un matériau naturel avec une structure et une composition complexe. L'interaction entre les champs électromagnétiques alternés et le bois permet de rendre compte de ces propriétés. Le champ électromagnétique se compose d'un champ électrique et d'un champ magnétique. L'intensité du champ magnétique reste faible (de $-0,2 \cdot 10^{-6} (T)$ à $-0,4 \cdot 10^{-6} (T)$) et sera négligé dans la suite de cette étude. En revanche, le champ électrique réagi significativement en développant un courant électrique dans le matériau. Sous l'action de ce champ électrique alternatif, le matériau se caractérisera par plusieurs paramètres diélectriques que nous allons étudier à présent.

I.3.2.1. Paramètres diélectriques du bois

Il existe de nombreux paramètres utilisés pour caractériser les matériaux diélectriques, notamment la permittivité relative, la constante diélectrique, le facteur de perte, le facteur de dissipation diélectrique, la conductivité électrique et la profondeur de pénétration.

I.3.2.2. Permittivité relative

L'intensité de polarisation diélectrique \vec{P} dépend de l'intensité du champ électrique \vec{E} . Si cette dépendance est exprimée par une équation différentielle linéaire (ce qui peut être considéré comme étant le cas pour le matériau bois), nous parlons d'un comportement diélectrique linéaire associé à la loi suivante :

$$\vec{P} = \chi \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (I-33)$$

\vec{E} : Intensité du champ électrique dans le matériau $[V / m]$

χ : Désigne la susceptibilité diélectrique complexe du matériau.

ϵ_0 : Représente la permittivité diélectrique du vide ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} [F/m]$).

Dans un matériau isotrope, les vecteurs \vec{P} et \vec{E} sont colinéaires. En revanche, dans le cas d'un matériau anisotrope, la susceptibilité diélectrique χ dépend de la direction de \vec{E} . Elle prend la structure d'un tenseur d'ordre 2.

Le vecteur de déplacement électrique \vec{D} , traduisant l'effet du champ électrique en un point donné, s'exprime comme suit :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \left[C/m^2 \right] \quad (I-34)$$

En regroupant les équations (I-33) et (I-34), il est possible de définir la permittivité diélectrique du milieu telle que :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (I-35)$$

Dans ces conditions, la permittivité relative ϵ_r , appelée également constante diélectrique, se définit par :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E} \text{ avec } \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = (1 + \chi) \geq 1 \quad (I-36)$$

En fin, la perméabilité diélectrique absolue ϵ s'exprime par :

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \text{ avec } \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (I-37)$$

I.3.2.3. Constante et pertes diélectriques

Les propriétés diélectriques peuvent également être définies par un paramètre complexe s'écrivant sous la forme suivante :

$$\epsilon^* = \epsilon' - i \cdot \epsilon'' = \epsilon' \cdot (1 - i \cdot \tan \delta) \quad (I-38)$$

Où ϵ' et ϵ'' représentent les parties réelle et imaginaire respectives de la constante diélectrique ou permittivité diélectrique. ϵ'' désigne également le facteur de perte.

$\tan \delta$ représente la tangente de perte telle que :

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (I-39)$$

Les propriétés diélectriques montrent deux interactions entre le matériau diélectrique et le champ électrique. Une partie de l'énergie électromagnétique est absorbée sous forme de polarisation. Elle représente la capacité du matériau à absorber l'énergie et est exprimée par la constante diélectrique. Une seconde partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Elle représente le taux de perte d'énergie et est donnée par le facteur de perte diélectrique. La Figure I-24 (Chinh Mai, 2015) met en exergue schématiquement les composantes réelle ϵ' et imaginaire ϵ'' de la permittivité relative en fonction de la fréquence. Sous une augmentation de fréquence, la relaxation conduit à une diminution monotone de ϵ' . Ce phénomène peut s'expliquer par la diminution progressive de la quantité de dipôles et de charges. Ces dipôles et charges changeront avec leurs positions et orientations du champ. La valeur maximale du facteur de perte ϵ'' correspond à la fréquence de résonance. L'augmentation du facteur de

perte aux basses fréquences peut s'expliquer par l'augmentation de la conductance du courant continu (Torgovnikov, 1993).

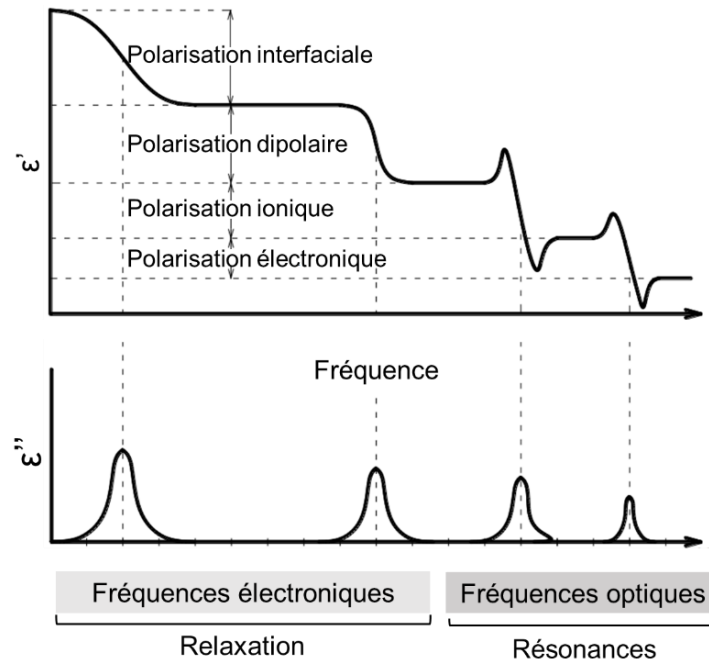


Figure I-24 : Permittivités réelle ϵ' et imaginaire ϵ'' en fonction de la fréquence (Torgovnikov, 1993)

Étant donné que le bois est un matériau orthotrope, ses propriétés diélectriques répondent également à une symétrie orthotrope. Elles peuvent être décrites comme suit :

$$(\epsilon') = \begin{bmatrix} \epsilon'_{LL} & \epsilon'_{LR} & \epsilon'_{LT} \\ \epsilon'_{RL} & \epsilon'_{RR} & \epsilon'_{RT} \\ \epsilon'_{TL} & \epsilon'_{TR} & \epsilon'_{TT} \end{bmatrix} \quad (I-40)$$

$$(\tan \delta) = \begin{bmatrix} \tan \delta_{LL} & \tan \delta_{LR} & \tan \delta_{LT} \\ \tan \delta_{RL} & \tan \delta_{RR} & \tan \delta_{RL} \\ \tan \delta_{TL} & \tan \delta_{TR} & \tan \delta_{TT} \end{bmatrix} \quad (I-41)$$

La rotation du vecteur de champ électrique \vec{E} à 180° ne change pas les propriétés diélectriques du bois (Erchiqui et al., 2015; Torgovnikov, 1993). Dans le repère principal d'orthotropie, les équations (I-40) et (I-41) peuvent être simplifiées ainsi :

$$(\epsilon') = \begin{bmatrix} \epsilon'_L & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon'_R & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon'_T \end{bmatrix} \quad (I-42)$$

$$(\tan \delta) = \begin{bmatrix} \tan \delta_L & 0 & 0 \\ 0 & \tan \delta_R & 0 \\ 0 & 0 & \tan \delta_T \end{bmatrix} \quad (I-43)$$

Lorsque \vec{E} est arbitrairement orienté dans l'espace formant les angles θ_1 , θ_2 , θ_3 avec les axes L, R et T, respectivement, le calcul de la constante diélectrique relative ε'_i et du facteur de perte $\tan \delta_i$ sont déterminés à partir de l'équation suivante (Torgovnikov, 1993):

$$\varepsilon'_i = \varepsilon'_L \cdot \cos^2 \theta_1 + \varepsilon'_R \cdot \cos^2 \theta_2 + \varepsilon'_T \cdot \cos^2 \theta_3 \quad (I-44)$$

L'anisotropie du bois influe considérablement sur son comportement diélectrique. Nous avons présenté ci-dessus les propriétés diélectriques du bois distinguées dans les trois directions longitudinales, radiale et tangentielle. Des expériences menées sur des bois de différentes essences montrent que les propriétés diélectriques dans la direction longitudinale sont plus élevées que celles dans la direction transversale. (Peyskens et al., 1984) ont déterminé les propriétés diélectriques de trois essences différentes de bois (pin, épicéa et pruche), dans les trois directions principales : longitudinale, radiale et tangentielle. Ils montrent que les constantes diélectriques et les facteurs de perte sont 2 à 3 fois plus grands dans le cas d'un champ électrique parallèle à la direction longitudinale, par rapport à une propagation dans la direction transversale. Ce phénomène concorde totalement avec les résultats obtenus par d'autres auteurs (James et al., 1985; Kabir et al., 1998; Rodríguez-Abad et al., 2010; Sahin and Ay, 2004) travaillant sur des essences de bois différentes. Il existe également une légère différence entre les composantes radiale et tangentielle, mais elle est négligeable par rapport à la différence entre la direction longitudinale et transversale. L'anisotropie diélectrique du bois peut résulter de la différence des structures microscopiques et moléculaires ainsi que des constituants chimiques du bois. Le Tableau I-6 représente les constantes diélectriques pour quatre essences de bois, pour des fréquences, des températures et des teneurs en eau données, lorsque le champ électrique est parallèle respectivement aux directions principales.

Tableau I-6 : Constantes diélectriques et facteur de perte dans les directions principales

Essences	Fréquence (MHz)	Température (°C)	Teneur en eau (%)	Constante diélectrique			Facteur de perte		
				ε'_L	ε'_R	ε'_T	ε''_L	ε''_R	ε''_T
Douglas ^a	50	25	0	2,90	2,20	2,50	0,14	0,086	0,09
Chêne ^a	50	25	0	3,00	2,20	2,30	-	-	-
Peuplier ^b	9800	20-24	0	1,62	1,47	1,41	0,052	0,030	0,030
Alune ^b	9800	20-24	0	1,87	1,65	1,58	0,066	0,040	0,040

^a --(James, 1975) , ^b -- (Sahin and Ay, 2004)

(Norimoto and Yamada, 1970) ont proposé une interprétation liée à l'anatomie, et notamment aux effets des parenchymes radiaux et des cellules longitudinales comme les vaisseaux et trachéides. (Norimoto and Yamada, 1972) a conclu que les propriétés diélectriques du bois sont régies par celles de la cellulose et du mannane dans le sens longitudinal, et elles sont considérablement influencées par celles de la lignine dans le sens transversal. Les propriétés diélectriques de la lignine sont inférieures à celles de la cellulose.

I.3.2.4. Conductivité électrique

La conductivité électrique est une grandeur physique complexe liée aux courant de conduction qui permet de décrire la capacité d'un milieu à laisser mouvoir des charges sous l'influence d'un champ électrique appliqué. Ce mouvement est accompagné par des pertes d'énergie

responsables de l'atténuation des ondes électromagnétiques dans le milieu de propagation. Elle prend la forme suivante :

$$\sigma^* = i \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^* = \sigma' + i \cdot \sigma'' \quad (I-45)$$

Avec

- $\sigma' = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon''$, σ' : partie réelle de la conductivité qui représente le transfert d'énergie par migration des charges.
- $\sigma'' = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'$, σ'' : partie imaginaire de la conductivité qui représente la dissipation d'énergie due au déplacement des porteurs de charges, est couramment ignorée. La quantité d'énergie stockée associée à la partie imaginaire est plus faible que l'énergie perdue par la partie réelle de la conductivité (Sow, 2015).

I.3.2.5. Vitesse de propagation

Pour un matériau homogène, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est inversement proportionnelle à la racine carrée de la constante diélectrique ε' telle que :

$$V = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (I-46)$$

C représente la vitesse de la lumière, soit $3 \cdot 10^8$ m/s.

La longueur d'onde λ du milieu est définie de la façon suivante :

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{C/\sqrt{\varepsilon'}}{f} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (I-47)$$

λ_0 est la longueur d'onde dans l'air, et f est la fréquence du champ électrique.

I.3.2.6. Profondeur de pénétration

Lorsqu'une onde électromagnétique atteint la surface de l'élément étudié, une partie de l'onde se réfléchit, une partie pénètre dans le milieu à une profondeur, et ce, avec une atténuation progressive selon l'équation exponentielle suivante :

$$P(z) = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \quad (I-48)$$

P_0 représente la puissance transmise à la surface de l'échantillon. $P(z)$ est la puissance résultante à une distance z de la surface. α est la constante d'atténuation exprimée selon l'expression suivante :

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \cdot (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} [m^{-1}] \quad (I-49)$$

La profondeur de pénétration est calculée sur la base d'une atténuation de 63% de la puissance P_0 . Elle s'exprime par :

$$h_p = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon' \cdot (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}} [m] \quad (I-50)$$

I.3.3. Facteurs influençant les propriétés diélectriques du bois

Les propriétés diélectriques du bois varient en fonction de plusieurs facteurs, tels que la fréquence de l'onde, l'orientation du champ électrique par rapport aux fibres, la teneur en eau, la température et la masse volumique. Dans la suite de ce travail, nous nous focaliserons sur la constante diélectrique.

I.3.3.1. Effet de la densité

Les différences de comportement diélectrique entre les essences de bois sont principalement dues à la quantité d'eau qui peut être absorbée. Cette capacité de sorption est déterminée par les caractéristiques intrinsèques de chaque espèce telles que la densité et le point de saturation des fibres. Selon l'auteur et la fréquence étudiée, la relation entre la densité et la constante diélectrique est notée comme linéaire ou curviligne. Selon (Peyskens et al., 1984), avec une fréquence de mesure à 3GHz et une température d'ambiance de 20°C, sans tenir compte des essences du bois (le ciguë, le pin et l'épicéa), il a illustré une relation linéaire positive de la constante diélectrique en fonction de la masse volumique dans la plage de teneur en eau différente, Figure I-25. Cela devient plus évidente à mesure que la teneur en eau augmente dans la plage de teneur en eau compris de 9% à 34%.

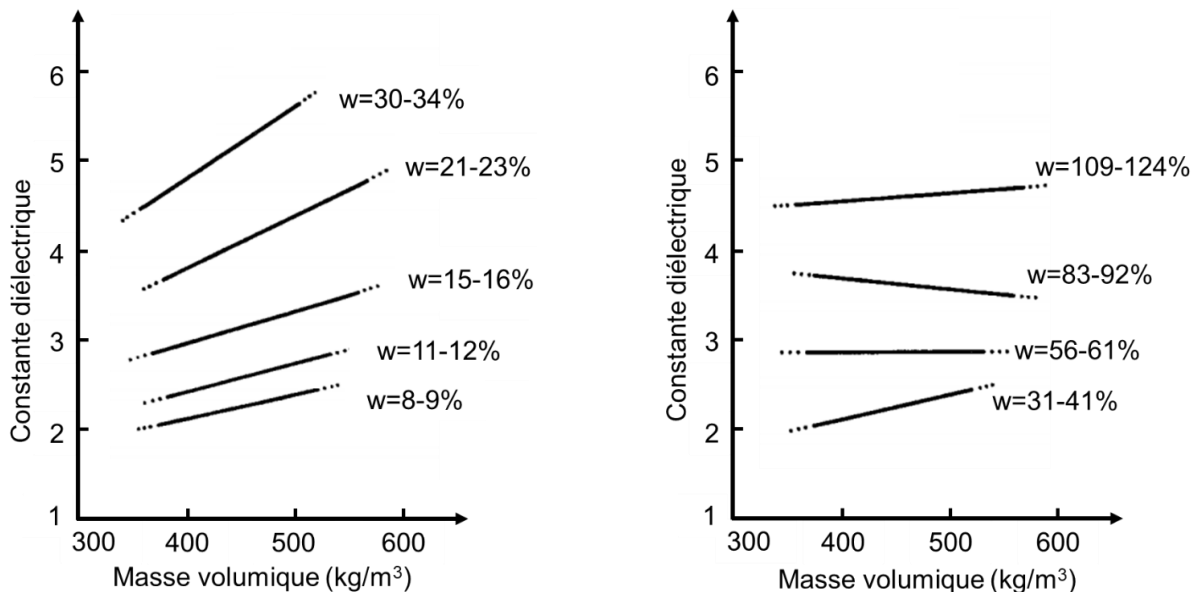


Figure I-25 : Constante diélectrique en fonction de la masse volumique humide (Peyskens et al., 1984)

I.3.3.2. Effet de la fréquence

Le comportement diélectrique du bois dépend fortement de la fréquence étudiée. Plusieurs auteurs ont observé que pour le bois anhydre, plus la fréquence est basse, plus la constante diélectrique est élevée (James, 1975; Kabir, 2001; Kabir et al., 1997; Koubaa et al., 2008; Norimoto and Yamada, 1972; Torgovnikov, 1993), tandis que des tendances inverses ont été observées pour le facteur de perte. Norimoto et Yamada (Norimoto and Yamada, 1972) a

étudié l'effet de la fréquence sur les propriétés diélectriques du bois japonais dans la gamme de 30Hz à 1MHz. Le facteur de perte augmente avec la fréquence. Ces résultats confirment les travaux menés par James (James, 1975) sur le bois anhydre et sur le bois humide dans la gamme de 20Hz à 50Hz, et ce, à différentes températures. Torgovnikov (Torgovnikov, 1993) a montré qu'une large dispersion de la constante diélectrique se produit pour des fréquences inférieures à 1MHz, avec une diminution monotone de la constante diélectrique lorsque que la fréquence augmente. Il a également montré une augmentation du facteur de perte pour atteindre un maximum à une fréquence de 10GHz ce qui a été confirmé, par la suite par Kabir et al.(1997), Figure I-26.

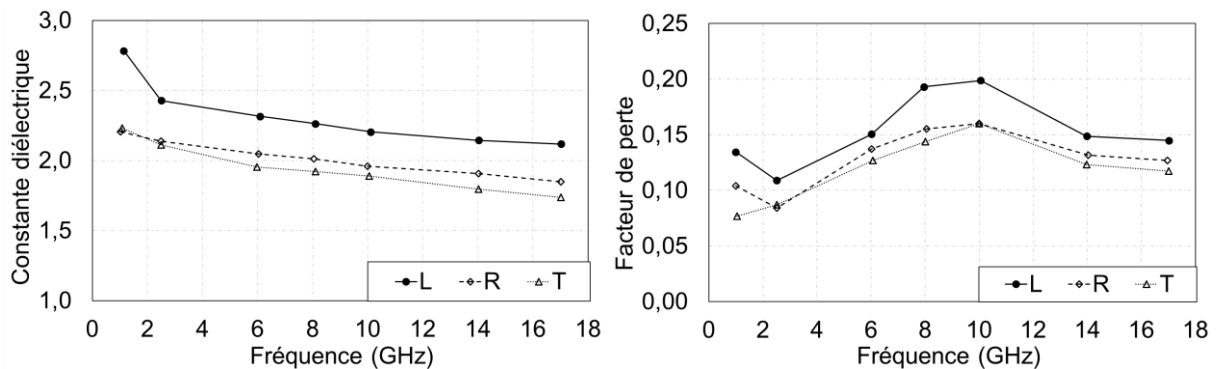


Figure I-26 : Constante diélectrique et facteur de perte fonction de la fréquence (Hvéa anhydre 22°C) (Kabir et al., 1997)

I.3.3.3. Effet de la teneur en eau

La teneur en eau a un effet marqué sur les propriétés diélectriques du bois. Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que la constante diélectrique et le facteur de perte du bois augmentent considérablement avec la teneur en eau dans le domaine hygroscopique. La direction des fibres n'affecte pas la permittivité du bois lorsque la teneur en humidité est basse. En revanche, elle devient plus importante en présence d'humidité plus élevées (Hamza, 2015; Torgovnikov, 1993). L'augmentation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau présente une segmentation. Un changement de pente se produit lorsque le niveau de teneur en eau se situe autour du PSF, Figure I-27.

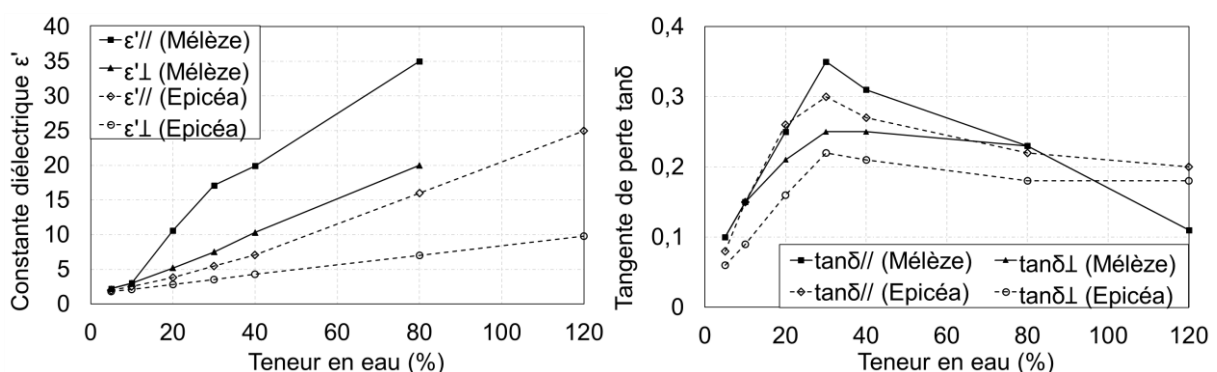


Figure I-27 : Constante diélectrique ϵ' et tangente de perte $\tan \delta$ en fonction de la teneur en eau et la direction de propagation (Mélèze et Épicéa) (Hamza, 2015; Torgovnikov, 1993)

I.3.3.4. Effet de la température

La température affecte considérablement les propriétés diélectriques du bois. Torgovnikov (Torgovnikov, 1993) a mis en avant qu'une augmentation de la température entraîne une réduction de la relaxation. La diminution du temps de relaxation induit un décalage de la valeur

maximale de la tangente de perte à hautes fréquences. La valeur de la constante diélectrique du bois anhydre augmente continuellement avec l'augmentation de la température. Les valeurs de constante diélectrique et de tangente de perte peuvent être corrélées à la température selon les expressions empiriques suivantes :

$$\varepsilon' = \varepsilon'_{20} \cdot [1 + k_{\varepsilon'} \cdot (T - 293)] \quad (I-51)$$

$$\tan \delta = \tan \delta_{20} \cdot [1 + k_{\tan \delta} \cdot (T - 293)], \quad T \text{ est exprimée en Kelvin} \quad (I-52)$$

Où ε'_{20} et $\tan \delta_{20}$ désignent, respectivement, la constante diélectrique et la tangente de perte à la température 20°C. Les valeurs de $k_{\varepsilon'}$ et $k_{\tan \delta}$ sont donnés dans les Tableaux I-7 et I-8 respectivement.

Tableau I-7 : Coefficient de température de la constante diélectrique du bois anhydre, $k_{\varepsilon'} \times 10^3 [K^{-1}]$ (Torgovnikov, 1993)

Température (°C)	Orientation de \vec{E} par rapport à la direction de fibre	Fréquence (Hz)		
		$10^2 \sim 5 \cdot 10^6$	$10^7 \sim 2,4 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9 \sim 10^{11}$
-40 à 20	Perpendiculaire	1,5	1	1
	Parallèle	2,3	1,5	1,5
21 à 100	Perpendiculaire	2,5	1,5	1
	Parallèle	3,8	2,2	1,5

Tableau I-8 : Coefficient de température de la tangente de perte du bois anhydre, $k_{\tan \delta} \times 10^3 [K^{-1}]$ (Torgovnikov, 1993)

Température (°C)	Fréquence (Hz)								
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}
-40 à 20	-20	-20	-15	-10	-1	5	7	7	-
21 à 100	-5	-6	-6	-8	-7	-2	4	4	6

James (1975) a montré que l'augmentation de la température de -20°C à 90°C engendre une augmentation de la constante diélectrique et la tangente de perte dans la gamme de 50MHz pour le bois douglas anhydre, Figure I-28.

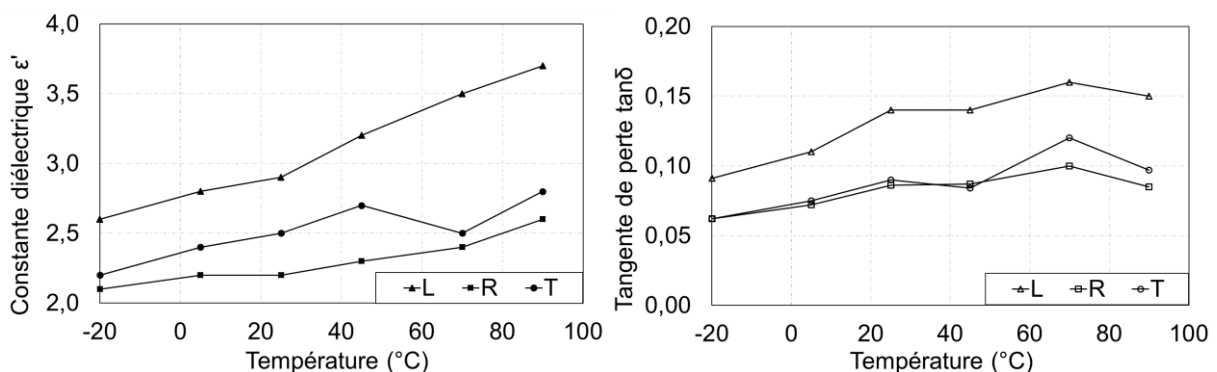


Figure I-28 : Constante diélectrique et tangente de perte fonction de la température (Douglas anhydre) (James, 1975)

I.4. Conclusion

Ce premier chapitre a permis, non seulement, de définir les bases scientifiques nécessaires à mener à bien notre étude mais également à définir les verrous scientifiques que ce travail doit lever.

Nous avons premièrement présenté l'aspect multi-échelle et anisotrope, ainsi que le comportement mécanique et hygroscopique du bois. Bien qu'il s'agisse d'un matériau composite polymère naturel complexe, son comportement peut s'apparenter à un matériau élastique orthotrope cylindrique à l'échelle du bois sans défaut, et ce dans le cadre d'une approche CND sous sollicitations dynamiques. Nous n'intégrerons donc pas les effets viscoélastiques dans ce travail. La variabilité inter espèces ainsi que l'hétérogénéité matérielle, à l'échelle d'éléments structuraux, mettent en avant des variations spatiales importantes de propriétés mécaniques mais corrélées à la densité. Cette variabilité spatiale est accentuée par des profils de teneur en eau en constante adaptation avec l'environnement. Nos futures applications concernant le diagnostic d'éléments structuraux, l'analyse des mesures expérimentales doivent jongler entre une finesse de caractérisation avec des approches locales pertinentes, en termes de distribution des champs hydriques, et une approche plus globale concernant les propriétés d'élasticité pour que ces résultats soient exploitables par un calcul ingénieur, dans le cadre, par exemple, d'un projet de requalification structurelle.

Concernant les techniques de contrôle non destructif employées, nous savons à présent que les trois grandeurs fondamentales à décrire sont la densité du matériau, son humidité et sa distribution spatiale et l'ensemble des propriétés d'élasticité et leur orthotropie.

Dans ce contexte, les notions essentielles concernant la propagation des ondes ultrasonores ont été rappelées. Ce travail nous a permis d'avoir les bases nécessaires pour un développement d'un modèle analytique adapté à l'orthotropie du milieu. Son implantation dans un code aux éléments finis nous permettra de traiter et/ou d'exploiter des mesures réalisées sur des éléments dont l'humidité est hétérogène. Si les techniques ultrasonores sont aujourd'hui employées dans la caractérisation des propriétés soit à l'échelle matériau, soit à l'échelle d'éléments stabilisés en humidité, le défi de notre travail et de valoriser cette méthode de caractérisation pour l'appliquée à des éléments structuraux placés en extérieurs pour qui l'accès aux différentes surfaces n'est pas toujours garanti et pour qui la non-connaissance de la densité rend l'exploitation de la mesure plus délicate. Nous verrons d'ailleurs, par la suite, que cette technique de caractérisation n'est pas toujours suffisante.

C'est pourquoi il était nécessaire de compléter le contrôle non destructif par la méthode radar afin de mesurer les propriétés diélectriques du bois et son comportement sous l'action d'un champ diélectrique externe. Nous avons retenu que la constante diélectrique et le facteur de perte sont tributaires de l'orientation du champ électrique vis-à-vis du repère local d'orthotropie. En revanche, l'augmentation linéaire de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau, dans le domaine hygroscopique, devient un atout majeur dans notre étude car elle va permettre de discrétiser les effets hydriques des propriétés mécaniques.

La suite de notre travail va donc devoir trouver les clés pour mettre en place un protocole expérimental, couplé dans un premier temps avec une approche modèle, pour mener à bien cette discrétisation, approche modèle que nous allons aborder dans le chapitre à suivre.

Chapitre II. Modèle analytique vs modèle aux éléments finis

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter deux approches de modèle parallèles appropriées aux propriétés d'orthotropie caractérisant le matériau bois. Elles seront le support du traitement des données de mesure à la fois par méthodes ultrasonores et radar.

Tout d'abord, la résolution analytique du principe fondamental de la dynamique, évoqué précédemment, est adaptée, d'une part, à l'orthotropie et, d'autre part, à une représentation globale dans un repère indépendant des directions principales d'orthotropie. Plus précisément, le modèle intégrera un angle de propagation d'onde ultrasonores vis-à-vis des directions principales d'orthotropie. Ce développement analytique sera intégré dans le protocole expérimental afin d'analyser les mesures ultrasonores in-situ. Il suppose néanmoins un matériau homogène et donc, pour un matériau hygroscopique comme le bois, une homogénéité de l'humidité interne.

Puis, pour adapter l'approche à des champs hydriques hétérogènes, comme toute variation infinitésimale de la géométrie ou des propriétés mécaniques, nous présenterons l'implémentation du modèle dans le code aux éléments finis Castem en bénéficiant de son environnement de post-traitement. Cette résolution permettra de mettre en place des stratégies numériques couplant des champs hydriques mesurés (méthode radar par exemple) ou calculés par un algorithme de diffusion développé au laboratoire. Afin de se placer dans des configurations réalistes de diagnostic in-situ, nous privilégierons des applications en propagation d'ondes de compression, même si l'approche modèle est totalement compatible avec une propagation d'ondes de cisaillement. Dans ces conditions, un soin sera apporté dans l'optimisation des temps de calcul (méthode incrémentale) et de la définition de la densité de maillage liée aux longueurs d'ondes imposées par la sollicitation dynamique.

II.2. Propagation d'ondes dans un milieu orthotrope

II.2.1. Orthotropie

Par le biais de la symétrie des tenseurs de contrainte et de déformation, les tenseurs de rigidité $[C]$ et de souplesse $[S]$ peuvent être représenté par 9 composantes indépendantes respectives C_{mn} et S_{mn} telles que :

$$\sigma_m = C_{mn} \cdot \varepsilon_n \text{ ou } \varepsilon_m = S_{mn} \cdot \sigma_n \text{ avec } (m,n) \in \{1,2,\dots,6\}^2 \quad (\text{II-1})$$

Par ces notations, les tenseurs de contrainte et de déformation deviennent deux vecteurs $\{\sigma\}$ et $\{\varepsilon\}$ à 6 composantes indépendantes σ_m et ε_n ($(m,n) \in \{1,2,\dots,6\}^2$). Elles sont définies à partir de leurs composantes tensorielles de la façon suivante :

$$\sigma_1 = \sigma_{11}, \sigma_2 = \sigma_{22}, \sigma_3 = \sigma_{33}, \tau_4 = \sigma_{23}, \tau_5 = \sigma_{13}, \tau_6 = \sigma_{12} \quad (\text{II-2})$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{11}, \varepsilon_2 = \varepsilon_{22}, \varepsilon_3 = \varepsilon_{33}, \gamma_4 = 2 \cdot \varepsilon_{23}, \gamma_5 = 2 \cdot \varepsilon_{13}, \gamma_6 = 2 \cdot \varepsilon_{12} \quad (\text{II-3})$$

Dans le repère principal d'orthotropie, Figure II-1, le tenseur de souplesse $[S]$ s'écrit sous la forme de la matrice suivante :

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \quad (II-4)$$

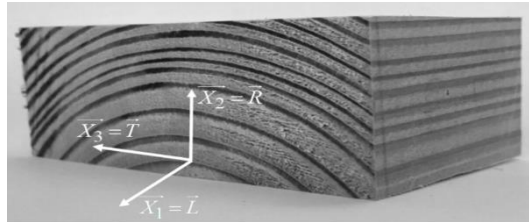


Figure II-1 : Référentiel orthotrope dans le bois

Dans la pratique, le positionnement des émetteurs et récepteurs ultrasonores ne génèrent pas des chemins d'onde systématiquement alignés avec les directions principales d'orthotropie. Cela nécessite donc d'opérer un changement de référentiel pour passer du repère principal d'orthotropie local $(\vec{L}, \vec{R}, \vec{T})$ à un repère global $(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3)$. Considérons que le vecteur de propagation unitaire \vec{n} est colinéaire à la direction \vec{X}_1 . Comme le montre la Figure II-2, ce désalignement est caractérisé par trois rotations notées conformément aux trois matrices de rotation suivantes :

$$[R_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}, [R_2] = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}, [R_3] = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II-5)$$

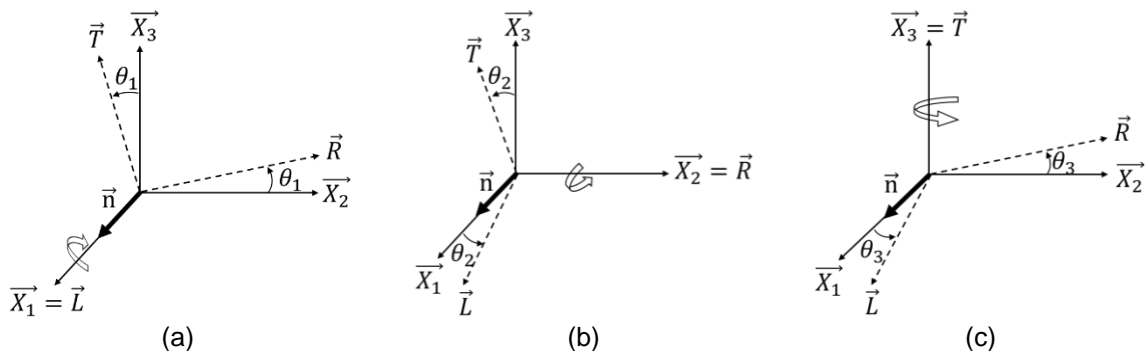


Figure II-2 : Référentiels local et global et rotations

La rotation totale θ est obtenue par combinaison des trois rotations de base. Elle se traduit par la matrice de rotation $[R(\theta)]$ définie comme suit :

$$[R(\theta)] = [R_1][R_2][R_3] \quad (II-6)$$

En considérant les expressions (II-5) dans la définition de $[R(\theta)]$, l'équation (II-6) devient :

$$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \cdot \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_3 & -\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_3 + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 & -\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\ -\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_3 & \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_3 + \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_3 & \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (II-7)$$

Les tenseurs de contrainte et de déformation répondent ainsi aux changements de base suivants :

$$\underline{\underline{\sigma}}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = [R(\theta)] \cdot \underline{\underline{\sigma}}(\bar{L}, \bar{R}, \bar{T}) \cdot [R(\theta)]^T \quad (II-8)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = [R(\theta)] \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}(\bar{L}, \bar{R}, \bar{T}) \cdot [R(\theta)]^T \quad (II-9)$$

Selon les notations (II-2) et (II-3), et en considérant l'expression (II-7), les équations (II-8) et (II-9) deviennent :

$$\{\sigma\}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = [T_\sigma] \cdot \{\sigma\}(\bar{L}, \bar{R}, \bar{T}) \quad \text{et} \quad \{\varepsilon\}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = [T_\varepsilon] \cdot \{\varepsilon\}(\bar{L}, \bar{R}, \bar{T}) \quad (II-10)$$

$[T_\sigma]$ et $[T_\varepsilon]$ sont les matrices de rotation respectives appliquées aux vecteurs contrainte et déformation. Elles sont définies comme suit :

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} R_{11}^2 & R_{12}^2 & R_{13}^2 & 2 \cdot R_{12} \cdot R_{13} & 2 \cdot R_{11} \cdot R_{13} & 2 \cdot R_{11} \cdot R_{12} \\ R_{21}^2 & R_{22}^2 & R_{23}^2 & 2 \cdot R_{22} \cdot R_{23} & 2 \cdot R_{21} \cdot R_{23} & 2 \cdot R_{21} \cdot R_{22} \\ R_{31}^2 & R_{32}^2 & R_{33}^2 & 2 \cdot R_{32} \cdot R_{33} & 2 \cdot R_{31} \cdot R_{33} & 2 \cdot R_{31} \cdot R_{32} \\ R_{21} \cdot R_{31} & R_{22} \cdot R_{32} & R_{23} \cdot R_{33} & R_{23} \cdot R_{32} + R_{22} \cdot R_{33} & R_{23} \cdot R_{31} + R_{21} \cdot R_{33} & R_{22} \cdot R_{31} + R_{21} \cdot R_{32} \\ R_{11} \cdot R_{31} & R_{12} \cdot R_{32} & R_{13} \cdot R_{33} & R_{13} \cdot R_{23} + R_{12} \cdot R_{33} & R_{13} \cdot R_{31} + R_{11} \cdot R_{33} & R_{12} \cdot R_{31} + R_{11} \cdot R_{32} \\ R_{11} \cdot R_{21} & R_{12} \cdot R_{22} & R_{13} \cdot R_{23} & R_{13} \cdot R_{22} + R_{12} \cdot R_{23} & R_{13} \cdot R_{21} + R_{11} \cdot R_{23} & R_{12} \cdot R_{21} + R_{11} \cdot R_{22} \end{bmatrix} \quad (II-11)$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} R_{11}^2 & R_{12}^2 & R_{13}^2 & R_{12} \cdot R_{13} & R_{11} \cdot R_{13} & R_{11} \cdot R_{12} \\ R_{21}^2 & R_{22}^2 & R_{23}^2 & R_{22} \cdot R_{23} & R_{21} \cdot R_{23} & R_{21} \cdot R_{22} \\ R_{31}^2 & R_{32}^2 & R_{33}^2 & R_{32} \cdot R_{33} & R_{31} \cdot R_{33} & R_{31} \cdot R_{32} \\ 2 \cdot R_{21} \cdot R_{31} & 2 \cdot R_{22} \cdot R_{32} & 2 \cdot R_{23} \cdot R_{33} & R_{23} \cdot R_{32} + R_{22} \cdot R_{33} & R_{23} \cdot R_{31} + R_{21} \cdot R_{33} & R_{22} \cdot R_{31} + R_{21} \cdot R_{32} \\ 2 \cdot R_{11} \cdot R_{31} & 2 \cdot R_{12} \cdot R_{32} & 2 \cdot R_{13} \cdot R_{33} & R_{13} \cdot R_{23} + R_{12} \cdot R_{33} & R_{13} \cdot R_{31} + R_{11} \cdot R_{33} & R_{12} \cdot R_{31} + R_{11} \cdot R_{32} \\ 2 \cdot R_{11} \cdot R_{21} & 2 \cdot R_{12} \cdot R_{22} & 2 \cdot R_{13} \cdot R_{23} & R_{13} \cdot R_{22} + R_{12} \cdot R_{23} & R_{13} \cdot R_{21} + R_{11} \cdot R_{23} & R_{12} \cdot R_{21} + R_{11} \cdot R_{22} \end{bmatrix} \quad (II-12)$$

R_{ij} sont les composantes de la matrice $[R(\theta)]$ définies en (II-7). Prenons l'exemple d'une rotation θ_3 représentant, précisément, un désalignement du vecteur d'onde avec l'orientation des fibres dans le plan LR. Considérons la matrice de souplesse $[S']$ définie dans la base $(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3)$. Elle se construit de la façon suivante :

$$[S'](\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) = [T_\varepsilon] \cdot [S](\bar{L}, \bar{R}, \bar{T}) \cdot [T_\sigma]^{-1} \quad (\text{II-13})$$

$$[C'](\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) = [T_\sigma] \cdot [C](\bar{L}, \bar{R}, \bar{T}) \cdot [T_\varepsilon]^{-1} \quad (\text{II-14})$$

Dans la base $(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3)$, les matrices de rigidité $[C']$ et de souplesse $[S']$ s'expriment de la façon suivante :

$$[H'](\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) = \begin{bmatrix} H'_{11} & H'_{12} & H'_{13} & 0 & 0 & H'_{16} \\ H'_{21} & H'_{22} & H'_{23} & 0 & 0 & H'_{11} \\ H'_{31} & H'_{32} & H'_{33} & 0 & 0 & H'_{11} \\ 0 & 0 & 0 & H'_{44} & H'_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H'_{54} & H'_{55} & 0 \\ H'_{61} & H'_{62} & H'_{63} & 0 & 0 & H'_{66} \end{bmatrix}, \text{ avec } H=C \text{ ou } S \quad (\text{II-15})$$

II.2.2. Vitesses de propagation d'ondes

Dans ce travail, nous nous intéressons à la propagation d'onde de compression qui fait le déplacement des milieux par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements sont parallèles à la direction de propagation. À présent, supposons une onde élastique se propageant suivant un chemin de propagation orienté par le vecteur $\vec{n} = (1, 0, 0)$ dont les composantes sont définies dans la base $(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3)$, Figure II-3. L'onde de compression se propage sous la forme d'une onde unidirectionnelle dont la direction relie l'émetteur au récepteur.

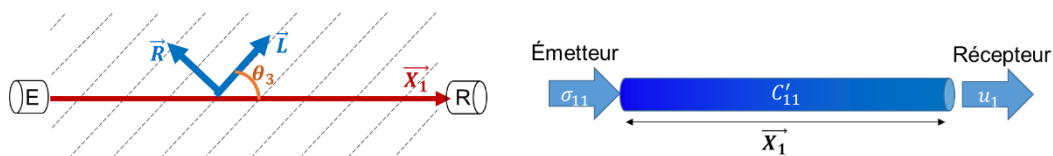


Figure II-3 : Propagation d'une onde de compression

De ce fait, la contrainte appliquée est une contrainte normale suivant la direction \bar{X}_1 . Dans ces conditions, dans la base $(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3)$, elle s'exprime de la façon suivante :

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

La déformation normale, selon \vec{X}_1 , se définit ainsi :

$$\varepsilon_{11} = S_{11}' \cdot \sigma_{11} \quad (\text{II-17})$$

Afin de calculer les vitesses de propagation d'onde en compression et en cisaillement, il est nécessaire de déterminer les trois racines du polynôme caractéristique de Christoffel en concordance avec les expressions (I-24) et (I-25). Dans ces conditions, la vitesse de propagation d'ondes de compression (dans la direction \vec{X}_1) s'écrit comme suit :

$$V_P = \sqrt{\frac{C_{11}'}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{11}' \cdot (\cos \theta_3)^4 + C_{22}' \cdot (\sin \theta_3)^4 + (2 \cdot C_{12}' + 4 \cdot C_{66}') \cdot (\sin \theta_3)^2 \cdot (\cos \theta_3)^2}{\rho}} \quad (\text{II-18})$$

$$\text{Avec } [C] = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR}}{E_R \cdot E_T} & \frac{\nu_{RL} + \nu_{TL} \cdot \nu_{RT}}{E_R \cdot E_T} & \frac{\nu_{TL} + \nu_{RL} \cdot \nu_{TR}}{E_R \cdot E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{LR} + \nu_{LT} \cdot \nu_{TR}}{E_L \cdot E_T} & \frac{1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}}{E_L \cdot E_T} & \frac{\nu_{TR} + \nu_{TL} \cdot \nu_{TR}}{E_L \cdot E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{LT} + \nu_{LR} \cdot \nu_{RT}}{E_L \cdot E_R} & \frac{\nu_{RT} + \nu_{RL} \cdot \nu_{LR}}{E_L \cdot E_R} & \frac{1 - \nu_{RL} \cdot \nu_{LR}}{E_L \cdot E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \cdot G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta \cdot G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta \cdot G_{LR} \end{bmatrix}$$

$$\left(\frac{1}{\Delta} = \frac{E_L \cdot E_R \cdot E_T}{1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL} - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL} - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR} - 2 \cdot \nu_{LR} \cdot \nu_{RT} \cdot \nu_{TR}} \right)$$

Ainsi, cette vitesse de propagation d'onde de compression dépend de 9 paramètres $(\theta, \rho, E_L, E_R, G_{LR}, \nu_{RL}, \nu_{TL}, \nu_{TR})$. Les paramètres d'élasticité complémentaires se détermineront par la mesure des vitesses de propagation d'onde de compression dans les autres directions. Six composantes de la matrice de rigidité $[C']$ sont corrélées aux vitesses de propagation d'onde de compression et à la masse volumique ρ . Les six termes de $[C']$ peuvent être calculés à l'aide des mesures des vitesses ultrasonores V_ϕ telles que :

$$\begin{aligned} \vec{n} &= (1, 0, 0), \quad C_{11}' = \rho \cdot V_{p_L}^2 \\ \vec{n} &= (0, 1, 0), \quad C_{22}' = \rho \cdot V_{p_R}^2 \\ \vec{n} &= (0, 0, 1), \quad C_{33}' = \rho \cdot V_{p_T}^2 \\ \vec{n} &= (0, 1, 1), \quad C_{23}' = \rho \cdot V_{p_RT}^2 \\ \vec{n} &= (1, 0, 1), \quad C_{13}' = \rho \cdot V_{p_LT}^2 \\ \vec{n} &= (1, 1, 0), \quad C_{12}' = \rho \cdot V_{p_LR}^2 \end{aligned} \quad (\text{II-19})$$

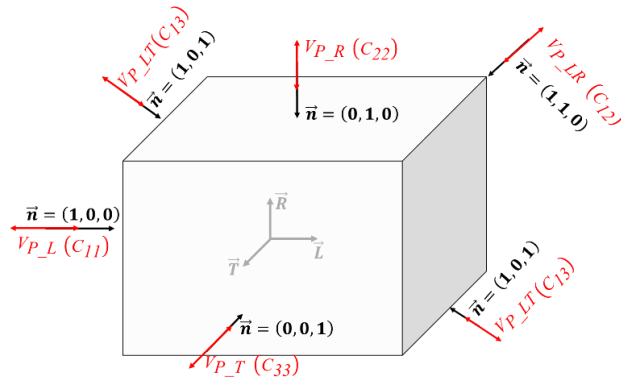


Figure II-4 : Directions de propagation et de polarisation d'une onde de compression

II.3. Approche par les éléments finis

Le logiciel Castem a été utilisé afin d'atteindre nos objectifs. Il s'agit d'un outil de simulation numérique employant la méthode aux éléments finis. Nous proposons une modélisation tridimensionnelle où les transducteurs sont représentés par des surfaces de contact. Sur l'émetteur est imposée une impulsion de pression pour calculer un déplacement normal au niveau de la réception. L'objectif est d'en déduire une vitesse moyenne de propagation entre les deux surfaces, et ce, en fonction des propriétés d'orthotropie élastique du milieu et de l'orientation de l'onde par rapport aux axes principaux d'orthotropie.

II.3.1. Volume et Propriétés élastiques du modèle

Dans notre cas d'étude, nous utilisons les propriétés d'élasticité du Douglas proposées par Kretschmann (1999), Tableau II-1.

Tableau II-1 : Propriétés élastiques du Douglas ($\rho=448\text{kg/m}^3$, humidité 12%) (Kretschmann, 1999)

Modules élastiques (GPa)	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
	13,600	0,925	0,680	0,870	1,060	0,095
Coefficient de Poisson	ν_{LR}	ν_{RL}	ν_{LT}	ν_{TL}	ν_{RT}	ν_{TR}
	0,292	0,036	0,449	0,029	0,39	0,374

Les dimensions géométriques de la poutre sont précisées en Figure II-5. Les axes principaux du matériau ($\vec{L}, \vec{R}, \vec{T}$) coïncident avec le système de coordonnées cartésiennes ($\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3$). Le vecteur de direction de propagation unitaire \vec{n} varie dans le plan LR en faisant un angle θ avec les fibres (angle entre la direction longitudinale \vec{L} et la direction de propagation \vec{n}) correspondant à une rotation autour de l'axe \vec{X}_3 . L'angle varie selon les positions respectives de l'émetteur (E_m) et du récepteur (R_c), et ce, avec une amplitude variant de 0° à 90°

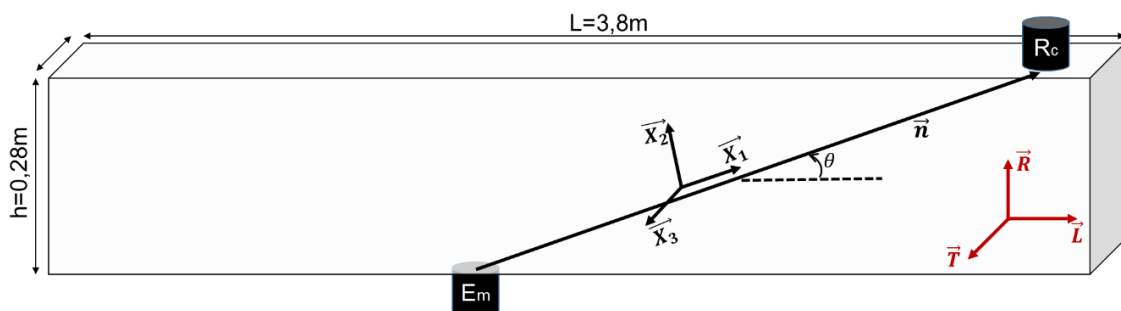


Figure II-5 : Géométrie de la poutre et schéma de propagation d'onde

II.3.2. Vitesses de propagation d'onde de compression de référence

Selon l'expression (II-18), les vitesses de propagation d'onde peuvent être calculées analytiquement pour des angles de 0° et 90° . Elles représentent les vitesses de propagation d'onde analytique de référence, appelée V_{ana} . Selon les propriétés d'élasticité notées dans le Tableau II-1, les valeurs obtenues sont :

$$V_{ana}(0^\circ) = 5694 \text{ m/s} \quad (\text{II-20})$$

$$V_{ana}(45^\circ) = 2146 \text{ m/s} \quad (\text{II-21})$$

$$V_{ana}(90^\circ) = 1636 \text{ m/s} \quad (\text{II-22})$$

Ces ordres de grandeurs correspondent aux données bibliographiques.

II.3.3. Discrétisations spatiale et temporelle

Le modèle aux éléments finis repose sur une discrétisation spatiale (taille des éléments) et sur une discrétisation temporelle induite par la résolution dynamique incrémentale. Afin d'éviter toute erreur de modélisation et de limiter les temps de calcul, il est nécessaire d'optimiser ces discrétisations.

II.3.3.1. Discrétisation spatiale

La taille d'élément Δx dépend principalement de la longueur d'onde de l'onde élastique se propageant à travers l'élément. Elle doit être, d'une part, suffisamment petite pour que le pic d'onde passe aux nœuds des éléments (longueur d'onde minimale λ_{\min}), et d'autre part, d'une taille compatible avec un temps de calcul raisonnable. La taille minimale Δx est définie par :

$$\Delta x = \frac{\lambda_{\min}}{N} \quad (\text{II-23})$$

N est le nombre d'éléments contenus pour une longueur d'onde. λ_{\min} est la longueur d'onde minimale définie comme étant le rapport entre la vitesse minimale de propagation d'onde ultrasonore $V_{P_{\min}}$ ($\theta=90^\circ$) et la fréquence générée par l'ultrason f , telle que :

$$\lambda = \frac{V_{P_{\min}}}{f} \quad (\text{II-24})$$

Dans notre cas, la vitesse minimale de propagation d'onde ultrasonore $V_{ana}(90^\circ)$ est égale à 1636 m/s, ce qui donne une longueur d'onde minimale de 3,0 cm.

II.3.3.2. Discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle minimale Δt est définie comme l'incrément de temps critique défini par :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_{P_{\max}}} \quad (\text{II-25})$$

Dans notre cas, la vitesse maximale de propagation de l'onde ultrasonore $V_{P_{\max}}$ est égale à 5694m/s. Les discrétisations spatiale et temporelle dépendent du nombre d'éléments par longueur d'onde N . Plusieurs travaux (Pradhan, 2014; Seron et al., 1990), pour des matériaux isotropes, recommandent d'utiliser au moins 10 éléments par longueur d'onde ($N=10$). Le Tableau II-2 donne des ordres de grandeur de la discrétisation spatiale et temporelle pour les trois directions d'orthotropie 0, 45° et 90°. La fréquence ultrasonore de 54kHz correspond à celle des capteurs utilisés dans le chapitre 3.

Tableau II-2 : Discrétisations spatiale et temporelle

	f (Hz)	$V_{P_{\max}}$ (m/s)	λ_{\min} (m)	Δx (m)	Δt (μ s)
0°	54000	5694	0,030	0,003	0,53
45°					
90°					

Le maillage éléments finis généré est présenté Figure II-6. Il est composé d'éléments cubiques (8 nœuds) à fonctions de forme linéaires. La taille des mailles est régulièrement espacée de 3mm.

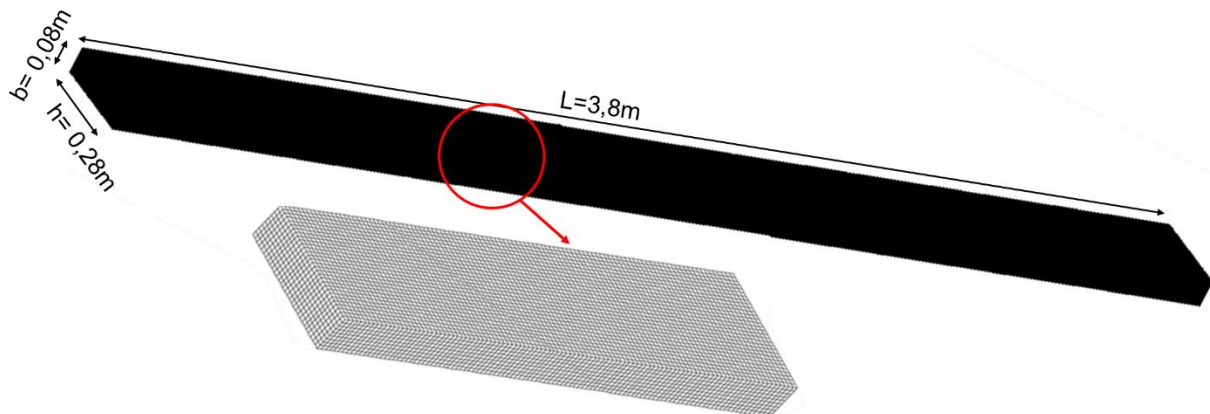


Figure II-6 : Modèle 3D de l'échantillon

II.4. Conditions aux limites et chargement

II.4.1. Définition des conditions aux limites

La surface de contact où nous appliquons le chargement (force d'impulsion de l'onde ultrasonore) a été modélisée comme une surface circulaire d'un diamètre de 4cm (correspondant à la géométrie des transducteurs utilisés par la suite) sur laquelle sera répartie une force d'impulsion ; cette surface est fixe. Les nœuds du maillage serviront de récepteurs par l'analyse du déplacement normal à la surface afin de déterminer le temps de vol nécessaire à l'onde de passer de la surface d'émission au nœud de réception. Afin de couvrir toute la plage angulaire, le récepteur occupe alternativement tous les nœuds appartenant aux surfaces S1, S2 et S3 comme indiquées en Figure II-7. La surface S4 est bloquée en déplacement ainsi qu'une arête pour rendre le système isostatique.

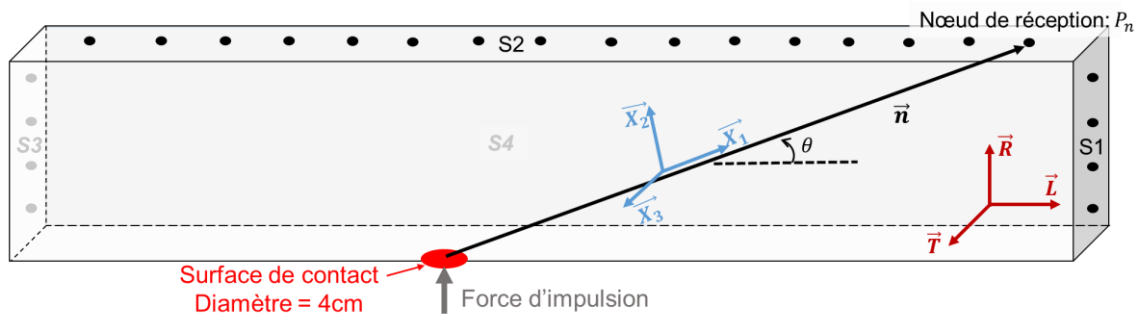


Figure II-7 : Modèle 3D avec les positions unique de l'émetteur et variables du récepteur

II.4.2. Chargement mécanique

Les ondes de compression peuvent être générées par un mécanisme capable de produire une force ou une pression qui varie en fonction du temps. L'objectif est de modéliser l'effet d'un transducteur piézoélectrique ou l'impact entre deux solides. Pour les mesures ultrasonores, les ondes de compression sont générées par des vibrations mécaniques par un émetteur piézoélectrique résonnant sur la surface de l'élément à caractériser (comme une force d'impulsion contre une surface).

La force d'impulsion $F(t)$ peut être assimilée à une fonction temporelle semi-sinusoïdale de fréquence f et d'amplitude F_{\max} pendant une demi-période, Équation (II-26). L'expression de la force est définie de la façon suivante :

$$\text{Pour } t \in [0, t_r], F(t) = F_{\max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot H\left(t - \frac{1}{2 \cdot f}\right) \quad (\text{II-26})$$

Le modèle étant élastique linéaire, la vitesse de propagation n'est pas affectée par l'amplitude F_{\max} , pour laquelle une valeur unitaire est retenue. Chaque simulation a été exécutée pendant un temps de résolution t_r supérieur de 15% au temps de vol estimé t_{P_i} pour arriver au point P_i le plus éloigné du parcours. Le temps de parcours total (jusqu'au point de réception P_n à l'extrémité) est appelé t_{P_n} . La Figure II-8 illustre le schéma de principe temporel.

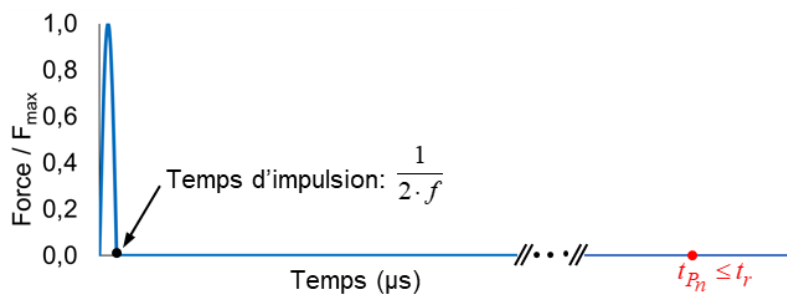


Figure II-8 : Évolution générale temporelle d'impulsion

Pour valider le choix du temps de résolution, le Tableau II-3 rappelle les temps de vol théoriques et numériques. Le temps de vol simulation au point de réception P_n est pris au pic maximum positif, voir Figure II-11.

Tableau II-3 : Comparaison des temps de vol théoriques et simulation

Angle	Distance de propagation (m)	Vitesse théorique (m/s)	Temps de vol théorique (μs)	Temps de vol simulation (μs)	Écart des temps (%)
0°	3,8	5694	667,37	669,93	0,38
45°	0,398	2146	185,46	181,43	-2,21
90°	0,28	1636	171,15	176,52	3,14

Donc, avec un pas de temps de calcul $\Delta t = 0,53\mu\text{s}$, un temps d'impulsion de $9,26\mu\text{s}$, l'erreur numérique sur le temps de vol est très faible.

II.5. Résolution dynamique et post-traitement

En appliquant le chargement suivant la direction radiale, la Figure II-9 montre l'effet de l'impact sur la déformée du maillage.

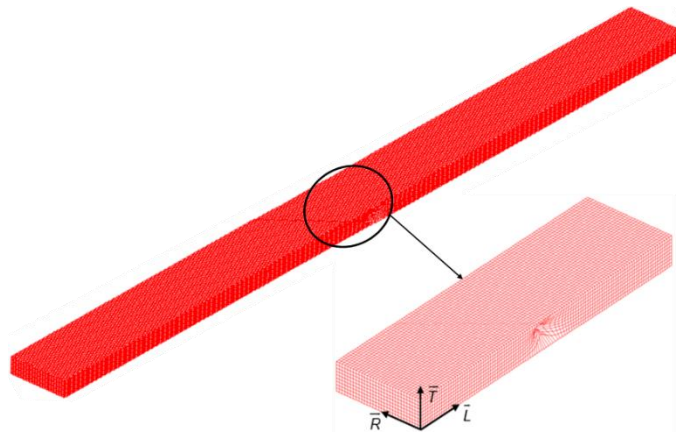


Figure II-9 : Déformé du modèle à l'application du chargement

II.5.1. Définition des points à étudier lors de la propagation de l'onde

L'onde de compression se propage selon la direction \vec{n} dans le plan YZ ou LR. Nous nous intéressons au temps de propagation entre l'émetteur et la récepteur, le matériau étant supposé homogène et isotrope dans la direction d'épaisseur (isotropie transverse). Afin de simplifier la démarche et d'optimiser le temps de simulation, nous proposons de transformer un problème 3D en un problème plan équivalent. Il s'agit donc de représenter l'onde P se propageant dans le plan LR avec une variation de l'angle θ comprise entre 0° et 90°, comme illustré dans la Figure II-10.

Les évolutions des déplacements ont été enregistrées aux nœuds P_i , P_j et P_n ($i, j \in (0, 1, 2, \dots, n)$), au temps de t_i , t_j et t_n à une distance de d_i , d_j et d_n de l'emplacement de la force d'impulsion.

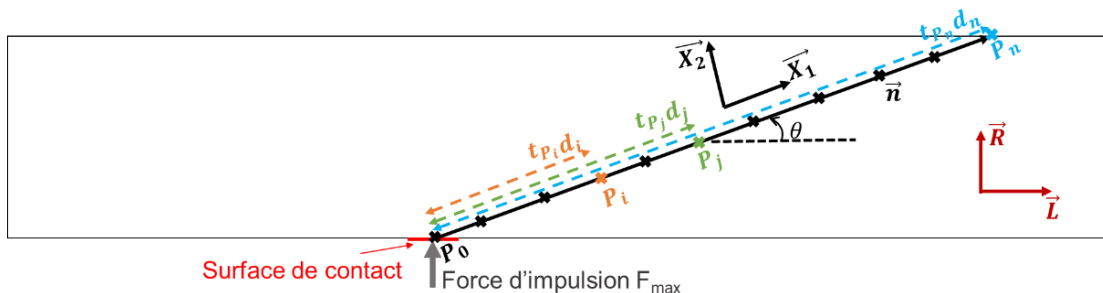


Figure II-10 : Illustration du plan LR en 2D

La propagation des ondes de compression est une procédure dynamique où la réponse du système change avec le temps. Les calculs temporels visent à reproduire ce qu'il se passerait dans la réalité et sont donc les plus généraux. Les calculs temporels peuvent être réalisés sur base physique avec des modèles non linéaires. Dans notre cas, la résolution temporelle d'un problème dynamique est effectuée en utilisant la procédure PASAPAS implémentée dans Castem.

La déformée d'une structure soumise à des efforts statiques est calculée en écrivant l'équilibre entre les efforts internes et les efforts externes. Lorsque les forces varient en fonction du temps, du fait des effets d'inertie, l'équation d'équilibre s'écrit comme suit (Broch, 1984) :

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{R\} \quad (\text{II-27})$$

Ici, $[M]$, $[C]$ et $[K]$ sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité. $\{R\}$ est le vecteur nodal des forces appliquées dépendant du temps. $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$ et $\{\ddot{u}\}$ sont les réponses nodales du système, à savoir les vecteurs déplacement, vitesse et accélération, respectivement.

II.5.2. Algorithme implicite vs. explicite

Les méthodes explicites et implicites représentent des outils de base dans la résolution des problèmes mécaniques aux dérivées partielles dépendant du temps. Le type de schéma d'intégration dynamique, schéma implicite ou schéma explicite, (utilisé dans les algorithmes de résolution dans la méthode aux éléments finis) détermine la taille des éléments et des incréments temporels utilisés pour converger vers la solution de l'équation d'équilibre (II-27). Le choix du schéma d'intégration repose sur une résolution du problème avec précision et stabilité numérique.

Dans le cas d'une analyse implicite, les matrices masse $[M]$ et rigidité $[K]$ sont reconstruites à chaque pas de temps. Pour un grand nombre de degrés de liberté, ces matrices deviennent volumineuses et leur reconstruction augmente considérablement le temps de calcul. L'algorithme implicite est limité aux problèmes quasi statiques, ce qui signifie que, quel que soit le pas de temps utilisé, le résultat est stable. En revanche, la précision peut être fortement affectée.

La formulation explicite consiste à déterminer les vecteurs solution à l'instant t en fonction des valeurs calculées lors de l'incrément de temps précédant. Elle permet de modéliser plus finement les phénomènes mais demeure très gourmande en ressources (nombre d'opérations, durée du calcul, mémoire nécessaire). Elle est réservée à des phénomènes de courte durée tels que des problèmes de dynamique rapide, de chocs ou encore de propagation d'ondes. De telles méthodes ne nécessitent pas la factorisation de la matrice de rigidité et de masse. En revanche, un algorithme explicite est conditionnellement stable impliquant une taille limite de l'incrément de temps à ne pas dépasser $\Delta t_{critique}$ afin de garantir une convergence de la solution.

II.5.3. Formes d'ondes obtenues

Afin d'étudier la propagation d'une onde ultrasonore, nous employons la procédure PASAPAS implémentée dans Castem pour la résolution du problème temporel de façon incrémentale.

Après avoir effectué la résolution, nous pouvons exploiter les déplacements aux points choisis P_i , P_j et P_n ($i, j \in (0, 1, 2, \dots, n)$).

La Figure II-11 montre les déplacements temporels pour une onde se propageant dans la direction longitudinale, et ce pour n égal à 10. P_0 représente l'émetteur, P_{10} désigne le récepteur. Les neuf points intermédiaires sont alignés et répartis de façon équidistance entre ces deux points extrêmes.

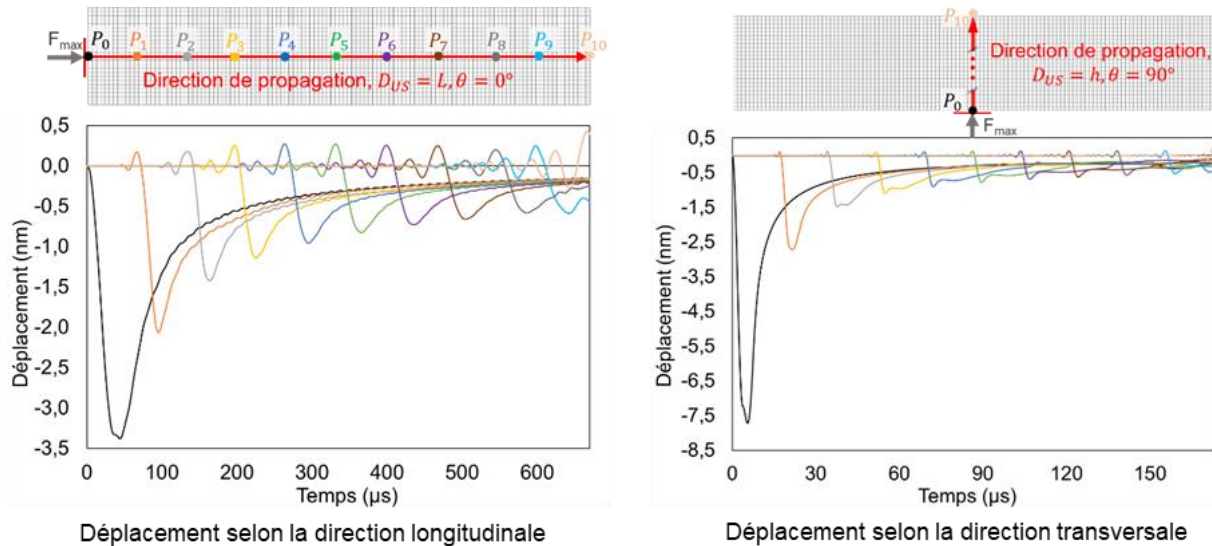


Figure II-11 : Évolutions temporelles des déplacements des points P_0 à P_{10}

Le modèle considérant un matériau orthotrope élastique linéaire, nous supposons que la propagation d'onde n'est pas sujette à de l'amortissement par viscosité. Seul un amortissement de Rayleigh est introduit dans l'algorithme incrémental pour en assurer une convergence numérique. Pourtant, nous observons une atténuation de l'onde au cours de sa propagation ainsi que des phénomènes d'échos. Dans notre cas, nous considérons deux phénomènes concomitants. Le premier est lié à l'étalement géométrique de l'onde par effet dimensionnel. Le deuxième phénomène est l'écho qui traduit la réflexion de l'onde aux frontières extérieures de l'élément considéré. À l'échelle d'un élément structural de type poutre, l'atténuation est peu marquée pour des ondes se propageant selon la direction longitudinale car les frontières délimitées par l'intrados et l'extrados jouent le rôle d'un guide d'ondes générant des échos tout au long du processus de propagation. Cela se traduit par un bruit rendant le calcul du temps de vol au niveau du point de réception (Points P9 et P10 par exemple). En revanche, si nous considérons une direction de propagation transversale, l'atténuation sera surtout provoquée et amplifiée par l'étalement latéral en considérant, dans ce cas, un milieu semi-infini. Dans ces conditions, le calcul de la vitesse au point de réception P10 devra séparer le signal reçu du bruit numérique. Le phénomène d'écho peut être minoré en considérant des frontières absorbantes. Si le logiciel Castem intègre ces frontières pour des milieux isotropes, ce n'est pas le cas pour des matériaux anisotropes. Il s'agit là d'un élément d'amélioration du modèle actuel.

Aujourd'hui, afin de contourner ces difficultés afin de minimiser l'erreur de calcul pour la vitesse de propagation, la vitesse de propagation sera calculée, dans la suite, entre les points P_2 et P_8 .

II.5.4. Détermination de la vitesse de propagation

Plusieurs points (n) ont été choisis sur le vecteur \vec{n} pour le post-traitement, comme montré dans la Figure II-12. En utilisant le temps de propagation et la distance entre les points choisis, la vitesse de propagation estimée par la méthode des éléments finis s'écrit comme suit :

$$V_{EF} = \frac{1}{n} \sum_{i,j=2}^n \frac{(d_j - d_i)}{(t_j - t_i)}, \text{ avec } i, j = 2, \dots, n \text{ et } n = 2, 3, \dots, 8 \quad (\text{II-28})$$

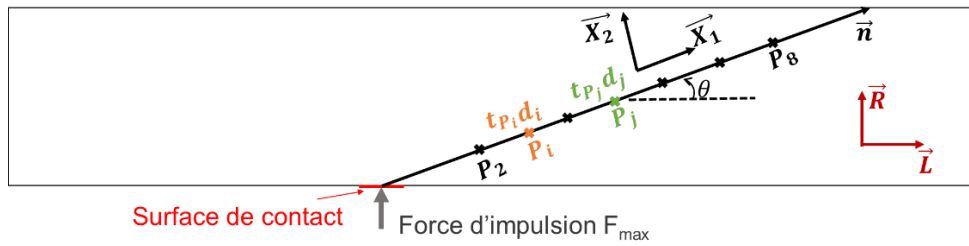


Figure II-12 : Conditions de chargement

La vitesse est calculée par le rapport entre la distance et le temps de propagation points par points. La distance est donnée par la position des points coïncidant avec les nœuds du maillage. Le temps de propagation entre deux points est calculé par le déphasage entre le passage de l'onde entre deux points adjacents, la difficulté étant de déterminer le passage de l'onde selon sa forme. Pour cela, nous définissons un critère sur la base du déplacement maximal positif, appelé PIC+, et un déplacement maximal négatif, appelé PIC-, comme indiqué en Figure II-13.

Le temps de propagation entre les points est calculé par la différence entre les points PIC+ (Δt^+) ou les points PIC- (Δt^-). Théoriquement, le calcul du temps de passage est identique selon PIC+ ou PIC-. Cependant, en raison de la taille finie des mailles du maillage, la différence entre ces deux pics est influencée par N qui est le nombre d'éléments par longueur d'onde. Par conséquent, le choix de N est important pour nos post-traitements permettant le calcul de la vitesse de propagation.

Dans la littérature (Pradhan, 2014; Seron et al., 1990), il est préconisé d'utiliser au moins 10 éléments par longueur d'onde ($N \geq 10$) pour obtenir un bon résultat (étude réalisée sur la base de la propagation d'ondes dans du béton). Dans le cas du bois, et au regard de son hétérogénéité et son orthotropie, nous proposons une étude qualitative pour optimiser la valeur de N à fixer en le faisant varier de 1 à 20.

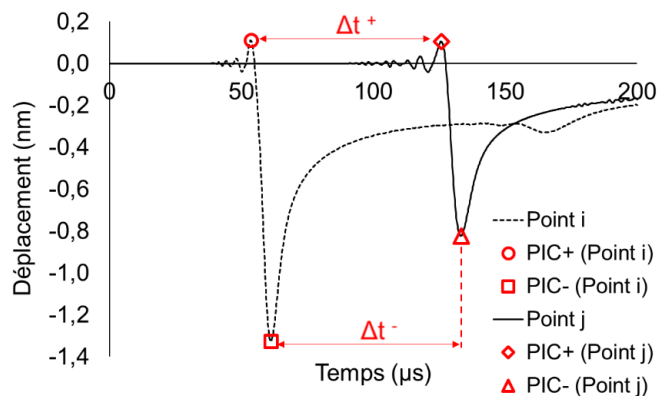


Figure II-13 : Formes d'ondes temporelles pour deux points choisis, P_i et P_j

La Figure II-14 montre l'évolution des vitesses $V_{EF}(0^\circ)$ (dans la direction longitudinale) calculées respectivement par les PIC+ et PIC- en fonction de N et appelées respectivement $V_{PIC+}(0^\circ)$ et $V_{PIC-}(0^\circ)$. La vitesse de référence est la vitesse analytique $V_{ana}(0^\circ)$ issue de l'expression (II-20).

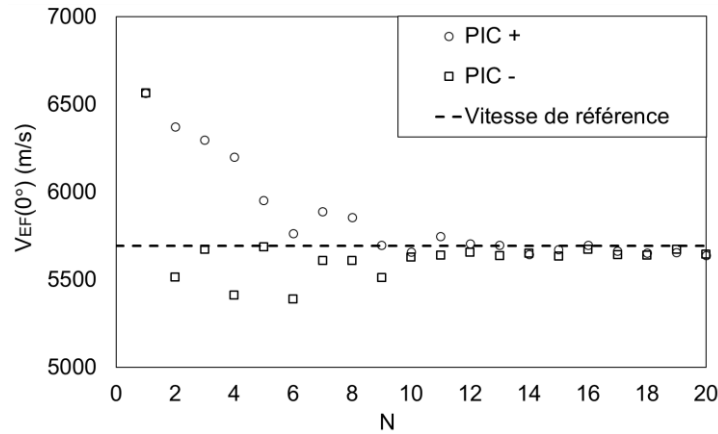


Figure II-14 : Évolutions de la vitesse de propagation $V_{EF}(0^\circ)$ en fonction de N

Pour chaque valeur de N , l'erreur relative de la vitesse calculée par rapport à la vitesse de référence est calculée de la façon suivante :

$$\delta_{PIC+}(0^\circ) = \frac{|V_{PIC+}(0^\circ) - V_{ana}(0^\circ)|}{V_{ana}(0^\circ)} \quad \text{et} \quad \delta_{PIC-}(0^\circ) = \frac{|V_{PIC-}(0^\circ) - V_{ana}(0^\circ)|}{V_{ana}(0^\circ)} \quad (\text{II-29})$$

La Figure II-15 montre l'évolution des erreurs en fonction de N . Les résultats mettent en évidence une diminution de l'erreur avec une stabilisation de l'ordre de 1% pour N égal à 9 et 11, respectivement pour $V_{PIC+}(0^\circ)$ et $V_{PIC-}(0^\circ)$.

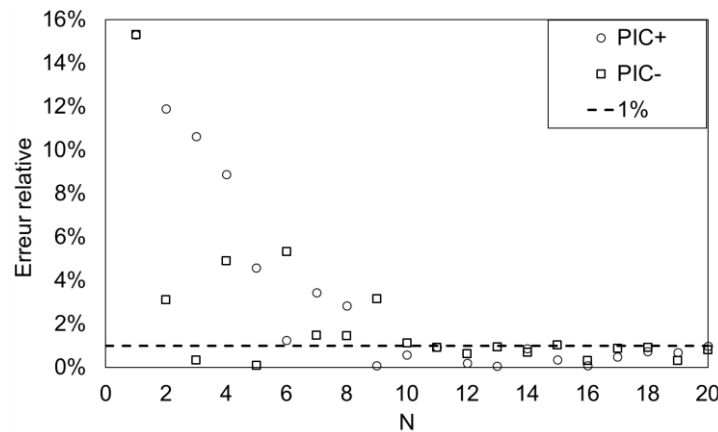


Figure II-15 : Évolutions de l'erreur relative en fonction de N

Selon le Tableau II-4, $\delta_{PIC+}(0^\circ)$ converge à 1% à partir de N égale à 9, et $\delta_{PIC-}(0^\circ)$ converge vers 1% à partir de N égale à 11. Par conséquent, plus N augmente, plus les erreurs sont minimisées, et les vitesses $V_{PIC+}(0^\circ)$ et $V_{PIC-}(0^\circ)$ s'approchent et convergent vers la vitesse référence $V_{ana}(0^\circ)$. Compte tenu de l'optimisation, la précision et le temps de calcul, nous choisissons $N=10$ pour les calculs à venir avec les propriétés de discrétisation spatiale et temporel précisées dans le Tableau II-5.

Tableau II-4 : Erreurs relatives en fonction de N de 2 à 20

N	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$V_{PIC+}(0^\circ)$ (%)	11,9	8,9	1,3	2,8	0,6	0,2	0,9	0,1	0,7	1,0
$V_{PIC-}(0^\circ)$ (%)	3,1	4,9	5,3	1,5	1,1	0,6	0,7	0,3	0,9	0,8

Tableau II-5 : Discrétisations spatiale et temporelle, $N = 10$

N	f (Hz)	$V_{P_{\min}}$ (m/s)	$V_{P_{\max}}$ (m/s)	λ_{\min} (m)	Δx (m)	Δt (μ s)
10	54000	1636	5694	0,03	0,003	0,53

II.6. Étude de l'effet de l'angle de propagation

La Figure II-16 présente la propagation instantanée des ondes en t_{P_2} , t_{P_8} et t_r , pour des angles de θ de 0° , 45° et 90° . Au fur et à mesure de la propagation des ondes dans le plan LR, nous observons des phénomènes d'échos au niveau des frontières géométriques. Ce phénomène pourrait être minimisé en appliquant des conditions limites absorbantes.

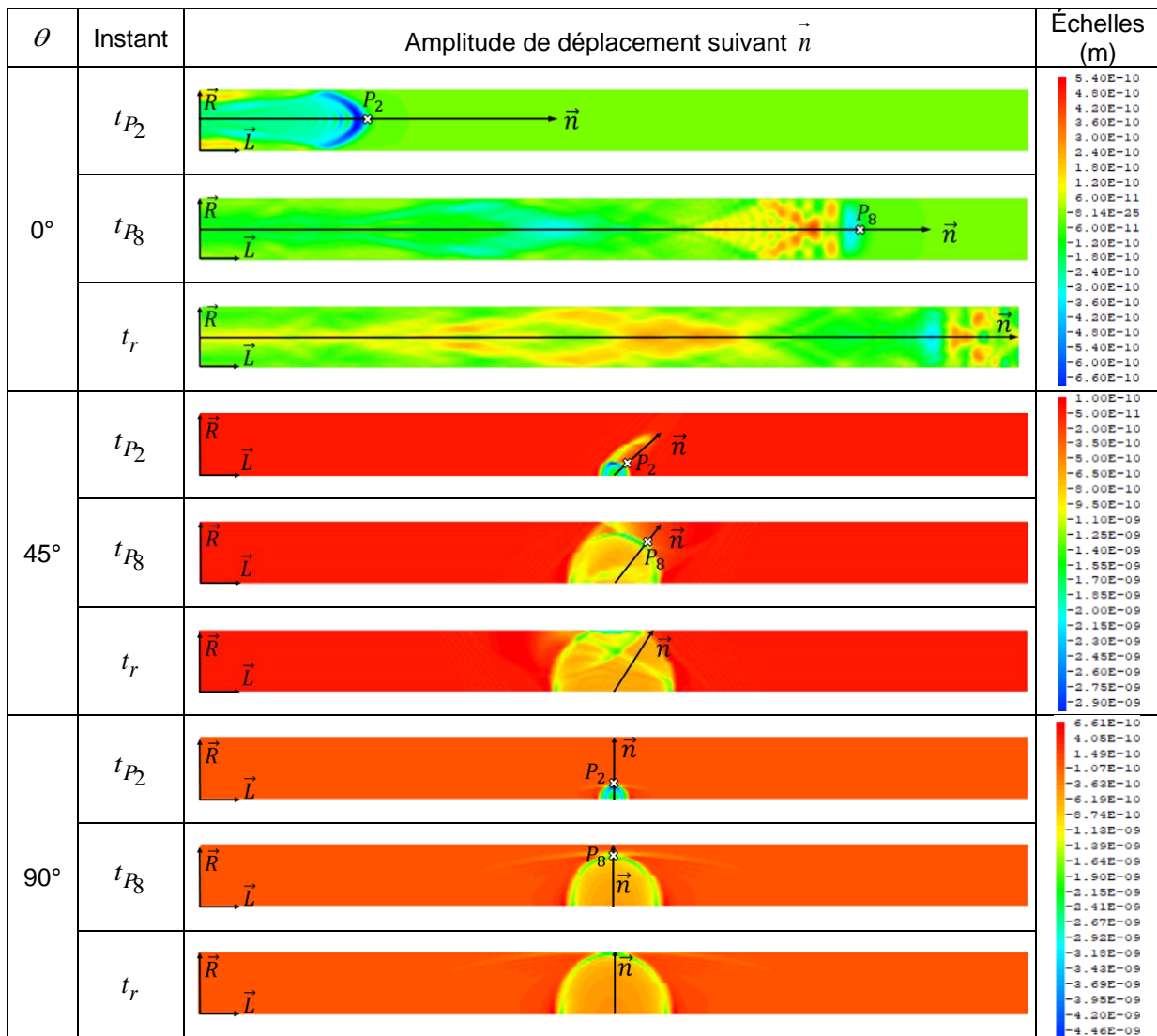


Figure II-16 : Amplitude du déplacement aux instants t_{P_2} , t_{P_8} et t_r pour $\theta=0^\circ$, 45° et 90°

Enfin, la Figure II-17 fait un parallèle entre le modèle par éléments finis et le modèle analytique. Sur la base d'hypothèses compatibles aux deux approches, à savoir, une homogénéité spatiale matérielle (propriétés d'élasticité et repère d'orthotropie). En faisant varier l'angle de propagation θ , avec un pas de 5° , les résultats mettent en exergue un bon comportement du calcul par éléments finis avec une erreur relative inférieure à 2,5%.

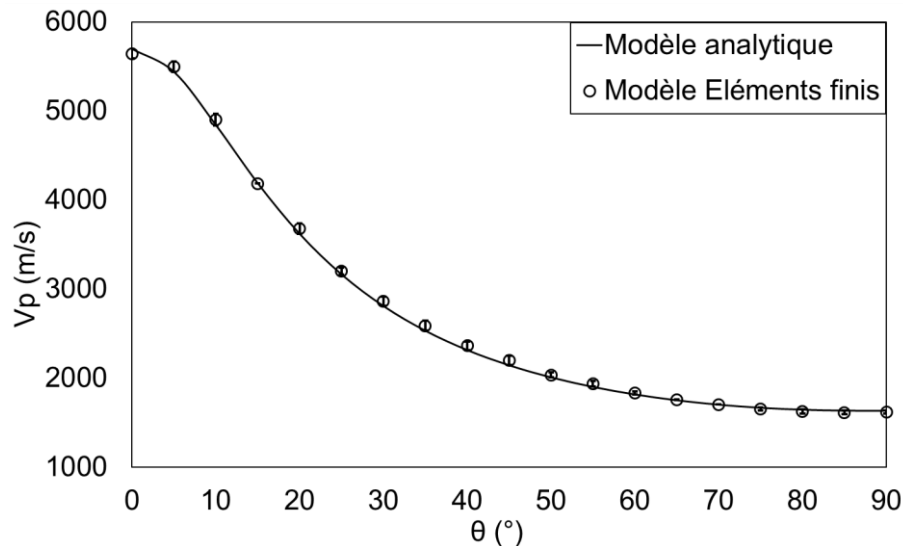


Figure II-17 : Évolution des vitesses de propagation V_{EF} et V_{ana} en fonction de θ dans le plan LR

II.7. Conclusion

L'ensemble des outils numériques de modélisation de la propagation des ondes élastiques développés ont été présentés dans ce chapitre. Ils s'appuient sur un modèle analytique et son implémentation dans une approche par éléments finis du processus de propagation d'onde dans un milieu orthotrope tridimensionnel élastique. Le développement analytique a pour ambition de faire le lien entre une vitesse de propagation d'onde ultrasonore dans un milieu orthotrope et les propriétés d'élasticité du milieu. De plus, l'angle de propagation est pris en compte théoriquement afin d'écrire précisément le lien entre vitesse mesurée et angle de propagation.

Ce modèle analytique est cohérent avec les modèles phénoménologiques de la bibliographie. Il permettra de développer une stratégie d'identification complexe de l'ensemble des composantes du tenseur de rigidité à condition d'avoir des propriétés d'élasticité homogènes dans le milieu, ce qui limite une utilisation à un élément structural considéré comme homogène et stabilisé en humidité interne. D'ailleurs, la principale limitation de ce modèle est, en l'état du développement, qu'il ne peut pas prendre en compte des variations locales de densité, de pente de fil due aux nœuds, ou encore de gradient d'humidité. Un défaut de bois d'œuvre comme la pente de fil globale peut être considéré. De même, la masse volumique est considérée comme globale, en négligeant les variations locales dues aux différentes lamelles. Dans ces conditions, nous ne parlerons que de 'valeurs moyennées' des propriétés d'élasticité le long du chemin de propagation, valeurs homogènes aux grandeurs globales utilisées dans les calculs de dimensionnement d'ingénieur. Une approche plus localisée sera abordée dans le quatrième chapitre.

L'implémentation par éléments finis permet de prendre en compte des tenseurs de rigidité ou de complaisance locaux pouvant dépendre de facteurs géométriques anatomiques tels qu'un désalignement de fil ou encore une hétérogénéité entre lamelles dans le cas d'un élément en

bois lamellé-collé. Dans le cas où les champs hydriques sont calculés par modélisation ou mesurés (dans le cas d'un monitoring hydrique d'ouvrage), le modèle est tout à fait adapté pour prendre en compte des gradients hydriques conduisant à des gradients de propriétés d'élasticité ou encore de densité.

Cependant, comme nous l'avons montré, le calcul reste sensible aux tailles critiques de maille et d'incrément temporel dépendant de la forme d'onde du signal. Également, le modèle montre une plus forte sensibilité aux phénomènes d'échos qui, pour le cas de l'orthotropie, est dépourvu de frontières absorbantes dans le code aux éléments finis Castem. Pour répondre à ces lacunes, il existe des procédures de maillage ou remaillage adaptatif permettant de raffiner la taille des éléments en fonction de la position de l'onde. La généralisation des frontières absorbantes dans un milieu isotrope vers un milieu orthotrope peut être une perspective d'amélioration de l'algorithme. Mais il est démontré que les temps de vol peuvent être déterminés avec précision sur une portion du chemin de propagation, sans perturbations dues aux échos.

Ce travail numérique représente le socle du protocole d'analyse présenté au quatrième chapitre pour traiter les données expérimentales suite aux mesures de vitesses de propagation d'ondes ultrasonores mais également en exploitant les mesures de constante diélectrique par méthode radar. Cela suppose une stratégie d'analyse que nous allons développer dans le Chapitre IV.

Chapitre III. Programme expérimental

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous utiliserons de manière couplée les techniques radar et ultrasonore. La méthode électromagnétique radar, par la mesure de la constante diélectrique du milieu est sensible aux variations de l'humidité du matériau. La méthode ultrasonore, via l'évaluation des vitesses de propagation d'onde mécanique, permet d'évaluer les propriétés d'élasticité du matériau corrigées de la densité. Le couplage des deux approches a pour intérêt de découpler les propriétés d'élasticité et la teneur en eau dans le matériau. La simplicité de mise en œuvre des systèmes radar et ultrason est d'un grand intérêt pour une approche de type monitoring ou d'inspection des structures en bois comme les ouvrages d'art et les œuvres patrimoniales telles que les bâtiments historiques ou les œuvres d'art (panneaux peints par exemple).

Dans un premier temps, notre approche consiste à définir un plan d'expérience basé sur la mesure de la vitesse de propagation d'onde électromagnétique et d'onde ultrasonore de compression, à l'échelle d'éléments structuraux, pour savoir l'homogénéité du champ hydrique et évaluer les propriétés d'élasticité majeures dans la définition du comportement structurel. Les corps d'épreuve choisis sont de la dimension d'éléments de structure. Cette taille réelle permet de prendre en compte l'effet des défauts macroscopiques sur les mesures (nœuds, variations locales de densité, pentes de fil, fissuration, etc.). Afin de s'affranchir de fentes de séchage trop important sur les fortes sections, ces corps d'épreuve sont en Bois Lamellé Collé ou Bois Massif Reconstitué. Ce choix oriente l'étude vers des ouvrages récents à base de produits d'ingénierie collés. L'homogénéité globale sera évaluée en considérant la variation de densité des lamelles. Deux essences de bois, le Douglas et l'Épicéa sont utilisées. Elles représentent la majeure partie des volumes de bois d'ingénierie produits aujourd'hui. L'épicéa est apprécié par sa légèreté et sa relative homogénéité. Le Douglas est un bois plus dense avec une forte nodosité mais présente des qualités de durabilité naturelle.

Dans le cadre de la caractérisation mécanique par méthodes ultrasonore et radar, l'anisotropie du bois a été intégrée dans l'analyse en étudiant plus précisément les configurations de mesures par rapport à l'orientation des fibres. De plus, le type d'essence, l'effet d'échelle et le niveau d'humidité ont été intégrés dans l'étude.

Les essais mécaniques non destructifs en flexion 4 points et en compression transversale ont été réalisés tout au long de la campagne expérimentale afin d'étudier l'évolution des propriétés d'élasticité via les comportements mécaniques globaux et locaux, et ce, en fonction de l'humidité.

III.2. Matériaux échantillonnage et préparation des éprouvettes

III.2.1. Sélection des poutres d'approvisionnement

Les échantillons de lamellé-collé (LC) et de bois massif reconstitué (BMR) correspondent à 12 poutres d'approvisionnement de 13m de classe GL24h selon 3 sections différentes et deux essences (Douglas et Épicéa), Figure III-1. Nous remarquerons que les directions radiale et tangentielle sont orientées aléatoirement selon les lamelles, avec tout de même une orientation radiale préférentielle des cernes de croissance. De ce fait, nous nous permettons de considérer la hauteur comme la direction *Radiale* et l'épaisseur comme la direction *Tangentielle*, la longueur des poutres étant considérée comme la direction *Longitudinale* du bois.

La dénomination des poutres d’approvisionnement ainsi que leurs caractéristiques géométriques sont données respectivement dans la Figure III-1 et le Tableau III-1.

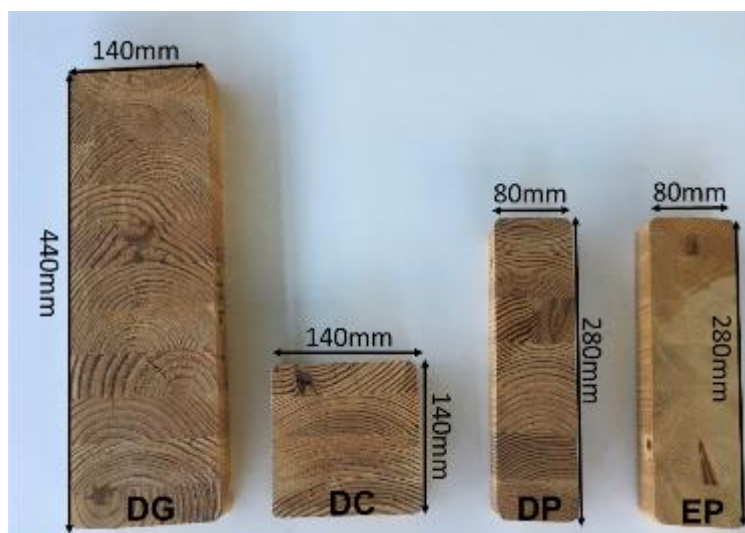


Figure III-1 : Section des poutres d’approvisionnement LC et BMR

Tableau III-1 : Dénomination et caractéristiques géométriques des poutres d’approvisionnement

Essence	Type	Nombre de poutre de 13m	Section (mm ²)	Nombre de Lamelles	Dénomination des poutres d’approvisionnement
Douglas	BMR	3	140*140	4	DC1 DC2 DC3
	BLC	3	140*440	11	DG1 DG2 DG3
		3	80*280	7	DP1 DP2 DP3
Épicéa	BLC	3	80*280	7	EP1 EP2 EP3

III.2.2. Découpe et codification des éprouvettes

La préparation des échantillons consiste à découper les 12 poutres d’approvisionnement selon le plan en Figure III-2 (exemple de la poutre DP1).



Figure III-2 : Plan de coupe des poutres d’approvisionnement

La même dénomination s’applique pour toutes les autres poutres d’approvisionnement de 13m, le seul changement est le sigle de la poutre DP (Douglas Petite) qui est remplacé par DG (Douglas Grande), DC (Douglas Carrée) ou EP (Épicéa Petite). Nous obtenons finalement les éprouvettes suivantes, Tableau III-2 :

- **Poutres CND** : 36 poutres d’une longueur de 3,8m ont été utilisées pour les mesures Ultrason, Radar et les essais mécaniques en flexion ;
- **Échantillons E_{RT}** : 24 échantillons d’une longueur égale à 80 mm et 24 échantillons d’une longueur égale à 140mm ont été employés pour les essais mécaniques en compression transversale ;

- **Échantillons à sécher** : 60 échantillons d'une longueur de 40mm ont été pesées puis mises à l'étuve à 103°C afin d'estimer la teneur en eau moyenne initiale des poutres.

Tableau III-2 : Nombre d'échantillon par géométrie à étudier

	Poutres CND (L=3,8m)	Échantillons E_{RT} (longueur =épaisseur)	Échantillons à sécher (longueur =40mm)
Nombre d'échantillon par géométrie	9	12	15

III.2.3. Zone expérimentale

L'objectif de ce travail étant de proposer une méthodologie globale d'auscultation des ouvrages, le plan d'expérience imaginé consiste à suivre l'évolution des mesures radar et ultrasonores de différentes poutres CND. Trois conditions de vieillissement avaient été imaginées lors de cette campagne. Nous avons divisé les 36 **Poutres CND** en 3 lots de 12 poutres (identifiées par essence, géométrie et densité) correspondant aux expositions hydriques suivantes :

1. Bois en intérieur (**lot Intérieur**) : considéré comme *lot de référence*, il est entreposé à l'abri avec une ambiance intérieure chauffée de type atelier ;
2. Bois en extérieur, sans contact avec le sol, exposé aux intempéries (**lot Extérieur**) : Lot entreposé sur une plate-forme en extérieur sans protection vis-à-vis des intempéries et du soleil. Les poutres exposées dans cette situation à de grandes variations d'humidité et de température connaîtront différentes phases de séchage et d'humidification, et ce dans des conditions naturelles de classe de risque 3 ;
3. Bois sous alternance intérieur/extérieur (**lot Int-Ext**) : Lot exposé à des cycles répétés de réhumidification et de séchage par des allers et retours entre l'espace intérieur et extérieur entraînant une accélération attendue de la fissuration de surface.

En début de protocole, nous avons déplacé le **lot Extérieur** et le **lot Int-Ext** dans la zone expérimentale extérieure, Figure III-3. Cet espace bénéficie d'une mesure en continue de la température et de l'humidité via un capteur thermo hydrique installé sous le rebord de toit d'une maquette en fuste, côté sud. La disposition des poutres est présentée en Figure III-4.



Figure III-3 : Poutres CND dans la zone expérimentale extérieure

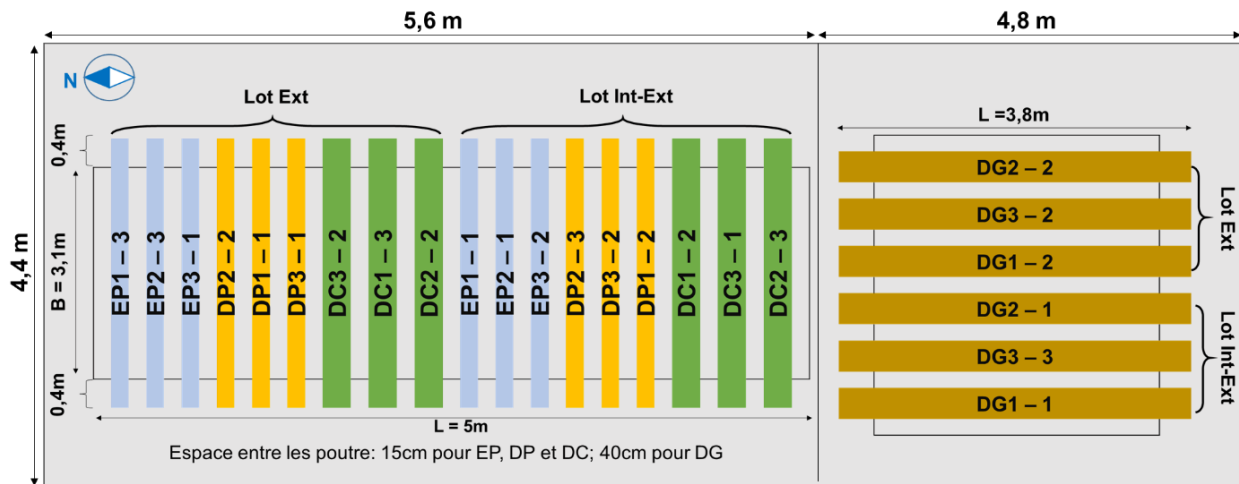


Figure III-4 : Dispositions des poutres CND dans la zone expérimentale extérieure

III.3. Teneur en eau et masse volumique

III.3.1. État initial

III.3.1.1. Matériels et méthode

Le protocole retenu est explicité en basant sur l'échantillon DP1 mais sera employé à l'identique pour les autres échantillons. Les caractéristiques des appareils de mesure de masse et de dimension des éprouvettes et des poutres sont présentées dans le Tableau III-3.

Tableau III-3 : Matériels utilisés pour les mesures de masse et de dimension

Matériel utilisé		Poutres CND	Échantillons E_{RT}	Échantillons à sécher
Mesure de masse	Capacité de balance	150kg	15kg	2.5kg
	Précision	50g	0,5g	0,01g
Mesure de dimension	Mètre ruban	5m	5m	5m
	Précision	2mm	2mm	2mm
	Pied à coulisse	30cm	30cm	30cm
	Précision	0,01mm	0,01mm	0,01mm

Les incertitudes absolues sur les dimensions de de **poutre CND** sont présentées dans le Tableau III-4. Concernant les **Échantillons E_{RT}** et **à sécher**, ces mêmes incertitudes sont présentées dans le Tableau III-5.

Tableau III-4 : Incertitude absolue de mesure pour les **Poutres CND**

Essences		Δm (kg)	ΔL (m)	Δh (m)	Δb (m)
Douglas	DG	0,05	0,002	0,002	0,0001
	DC	0,05	0,002	0,0001	0,0001
	DP	0,05	0,002	0,0001	0,0001
Épicéa	EP	0,05	0,002	0,0001	0,0001

Tableau III-5 : Incertitude absolu de mesure pour les **Échantillons E_{RT}** et **à sécher**

Essences		Δm (kg)	ΔL (m)	Δh (m)	Δb (m)
Douglas	DG	0,0005	0,0001	0,002	0,0001
	DC	0,00001	0,0001	0,0001	0,0001
	DP	0,00001	0,0001	0,0001	0,0001
Épicéa	EP	0,00001	0,0001	0,0001	0,0001

III.3.1.2. Teneur en eau et masse volumique initiale des poutres CND

Dans un premier temps, les éprouvettes (Poutres CND, échantillons E_{RT} et échantillons à sécher) ont été initialement pesées afin de déterminer leur masse volumique humide.

Les **échantillons à sécher** ont été également pesés et mis à l'étuve à 103°C, selon la norme EN NF 13183-1, pour mesurer la masse anhydre. La teneur en eau w , les masses volumiques humide (ρ_h) et anhydre (ρ_a) de bois ont été calculées par les équations (III-1) et (III-2).

$$w = \frac{m_{eau}}{m_a} = \frac{m_h - m_a}{m_a} \quad (III-1)$$

$$\rho_h = \frac{m_h}{V_h} \text{ et } \rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (III-2)$$

m_h et m_a désignent les masses humide et anhydre. V_h et V_a sont les volumes aux états humide et anhydre. Enfin, m_{eau} et V_{eau} est la masse et le volume d'eau liée à l'état humide.

La teneur en eau et les masses volumiques des **échantillons à sécher** sont calculées directement par les équations (III-1) et (III-2). La teneur en eau et la masse volumique anhydre des **Poutres CND** et des **échantillons E_{RT}** sont ensuite estimées à partir de la teneur en eau des **échantillons à sécher** situés aux deux extrémités des spécimens considérés, Tableau III-6. Concernant la poutre DP1, nous constatons que la teneur en eau est homogène quel que soit l'échantillon considéré.

Tableau III-6 : Teneur en eau et masses volumiques pour DP1 (* Valeur estimée)

DP1		w déduit (%)	ρ_h (kg/m ³)	ρ_a (kg/m ³)	ρ_a moy. (kg/m ³)	ρ_a Écart type (kg/m ³)
Échantillons à sécher	DP1T1a	13,4 ± 0,005	543 ± 2,32	524 ± 2,24	492	26
	DP1T1b	13,3 ± 0,005	545 ± 2,35	506 ± 2,18		
	DP1T2b	13,2 ± 0,006	499 ± 2,15	461 ± 1,99		
	DP1T3b	13,1 ± 0,005	539 ± 2,25	499 ± 2,08		
	DP1T4b	12,9 ± 0,006	512 ± 2,17	471 ± 2,00		
Échantillons E_{RT}	DP1T1	*13,4 ± 0,003	543 ± 1,59	*514 ± 1,51	*487	23
	DP1T2	*13,3 ± 0,003	501 ± 1,45	*464 ± 1,35		
	DP1T3	*13,1 ± 0,003	538 ± 1,57	*497 ± 1,46		
	DP1T4	*13,0 ± 0,003	510 ± 1,49	*471 ± 1,37		
Poutres CND	DP1-1	*13,3 ± 0,272	522 ± 4,72	*484 ± 4,37	*474	8
	DP1-2	*13,1 ± 0,278	509 ± 4,60	*471 ± 4,26		
	DP1-3	*13,0 ± 0,279	508 ± 4,59	*469 ± 4,24		

La Figure III-5 affiche les moyennes et les incertitudes de masse volumique anhydre pour les poutres CND, les échantillons E_{RT} et les échantillons à sécher de la poutre d'approvisionnement DP1. Nous constatons que les dispersions les plus faibles sont observées pour le corps d'épreuve le plus grand (poutre CND). Ceci peut être expliqué par un effet d'échelle entraînant une homogénéisation des variations spatiales de la teneur en eau et de la masse volumique anhydre. En effet, la présence locale d'un défaut (nœud, fissure...etc.) peut modifier sensiblement la masse volumique du bois. Par conséquent, sachant que la différence entre la moyenne minimale et maximale est faible (de l'ordre de 15 kg/m³), nous pouvons considérer que la masse volumique anhydre et la teneur en eau sont homogènes à l'échelle d'une poutre d'approvisionnement.

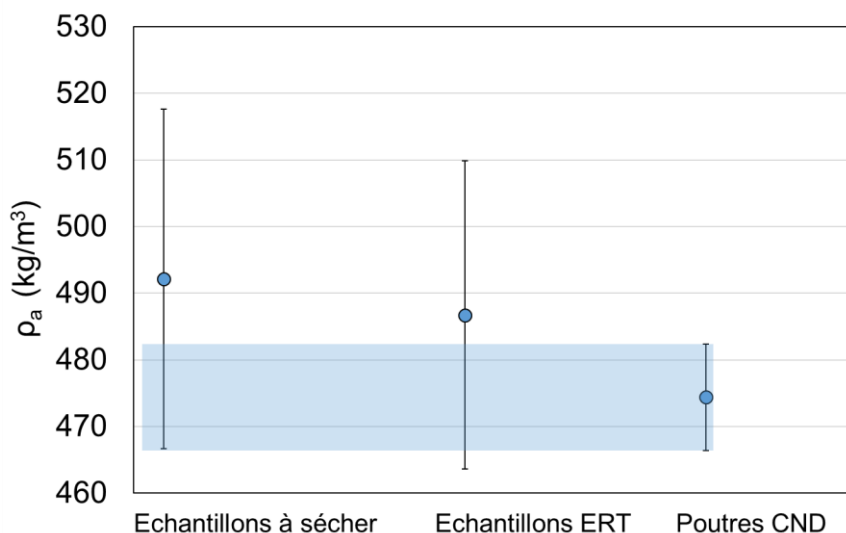


Figure III-5 : Masse volumique anhydre moyenne par géométrie de DP1

Pour les autres poutres d’approvisionnement, l’ensemble des résultats sont présentés dans l’Annexe 1.

Nous constatons que la teneur en eau et les masses volumiques pour les poutres CND issues de la même poutre d’approvisionnement et de même essence présente de faibles dispersions situant dans la plage d’incertitude de mesure.

Le traitement statistique des données (Figure III-6) permet d’observer clairement l’effet de l’essence sur les masses volumiques anhydre et humide des poutres CND. Les masses volumiques des poutres CND d’épicéa sont plus faibles que celles des poutres CND de Douglas. Ceci est en cohérence avec les études bibliographiques citées dans le premier chapitre. Nous pouvons également observer que les masses volumiques des poutres BMR présentent une plus forte dispersion que celles des poutres lamellé-collé, lié à un tri des lamelles moins exigeant que pour le BLC.

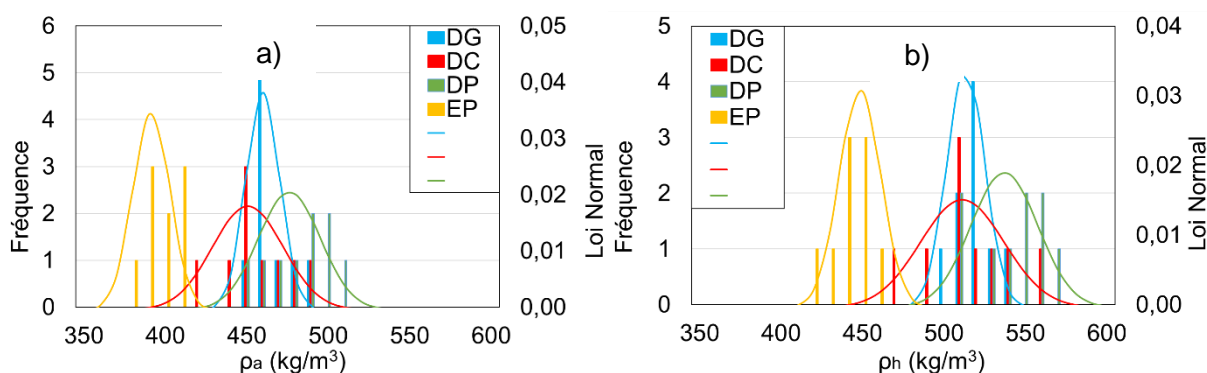


Figure III-6 : Histogramme et loi normale de la masse volumique a) anhydre et b) humide des poutres CND

III.3.2. Évolution temporelle de la teneur en eau

Les essais ont débuté le 18 Février 2020. L’évolution du climat extérieur est donnée sous la forme de température et d’humidité relative, Figure III-7. Nous observons en particulier deux périodes très humides intéressantes pour les mesures CND. Par exemple, du 18 février au 13 mars, nous observons une période très humide avec des pics réguliers à 100%HR.

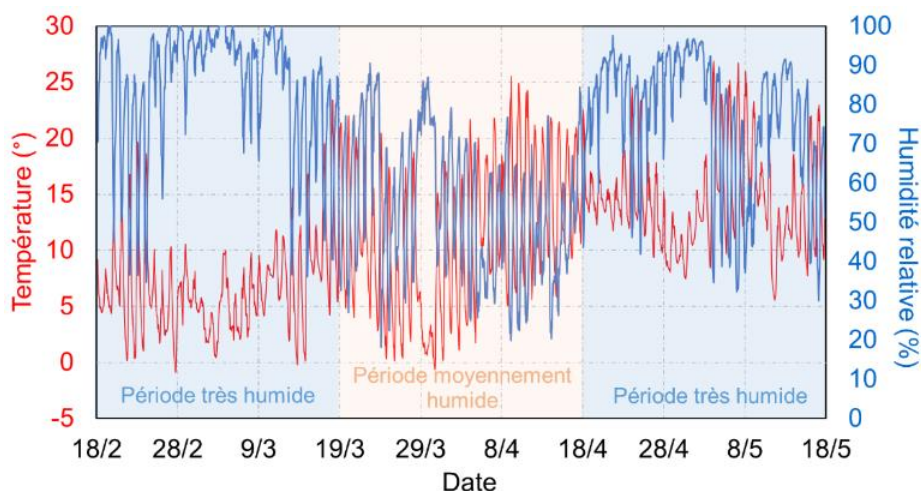


Figure III-7 : Évolution climatique enregistrée pour le lot extérieur

Initialement, nous avons programmé une première mesure de vieillissement sur les poutres extérieures à la mi-mars, lorsqu'un changement d'humidité significatif était attendu. Cependant, à la suite du confinement sanitaire du 11 mars au 18 mai, nous avons dû différer ces mesures au mois de mai durant la période de déconfinement partiel (18 mai), période durant laquelle l'environnement, bien qu'humide, a été plus chaud. Dans ces conditions, la nouvelle campagne de mesure n'a pas permis de mettre en évidence une augmentation notable de l'humidité interne qui n'a jamais dépassé, en relatif, la plage d'incertitude des mesures. En effet, les variations de la teneur en eau moyenne des poutres étaient comprises entre 0% à 2,7%. En revanche, comme le montre la Figure III-8, des fissures discontinues de l'ordre de 1mm à 5mm d'ouverture sont apparues en surface, signe d'un séchage superficiel induit par les périodes de fort ensoleillement.



Figure III-8 : Fissures discontinuées visible en surface (exemple de la poutre CND DG1-2)

Suite à ce constat, nous avons choisi une poutre CND de chaque essence (DG2-3, DC3-3, DP1-3 et EP3-3) dans le lot intérieur (lot référence) afin de refaire les essais en faisant varier artificiellement la teneur en eau. La technique d'immersion n'étant pas envisageable, nous avons opté pour un système d'arrosage automatique sur une enveloppe en tissu épais, limitant les effets convectifs et augmentant l'humidité environnante. À partir du 9 juin 2020, 4 poutres CND ont été réhumidifiées de la sorte, Figure III-9.



Figure III-9 : Système d'arrosage pour des quatre poutres CND

Les évolutions de teneur en eau en fonction du temps (pour les 4 poutres CND arrosées de juin à juillet) sont présentées en Figure III-10. Nous notons que de février à mi-Mai, les quatre poutres CND ont vu un équilibre hydrique avec l'environnement de l'atelier se traduisant par un léger séchage pouvant atteindre, en moyenne, 2%. Entre mi-Mai et juillet, durant la période d'arrosage, l'humidité interne moyenne a significativement augmentée avec un écart atteignant 6% pour la poutre en Épicéa, essence caractérisée par une cinétique de diffusion plus rapide que le Douglas. Dans ce rapport, les dernières mesures considérées datent du 9 juillet 2020.

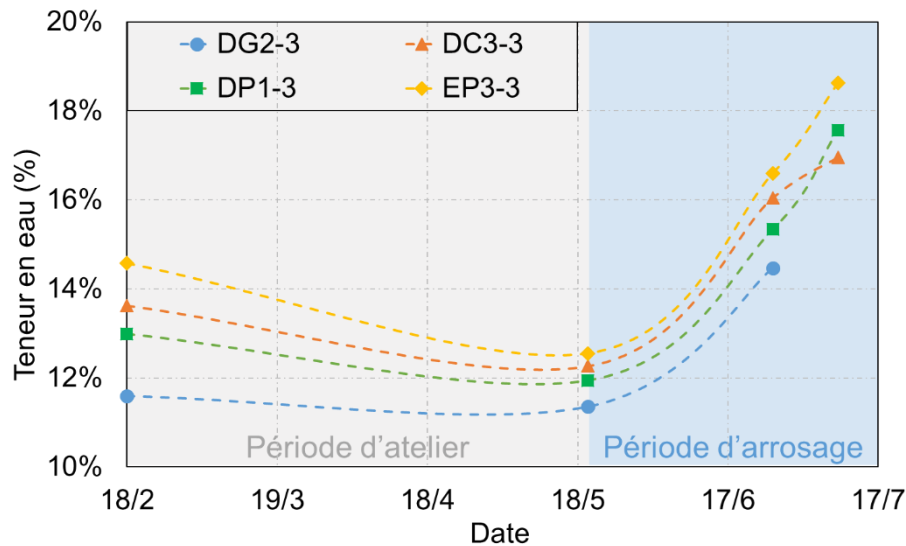


Figure III-10 : Variation de la teneur en eau des poutres arrosées

III.4. Mesures électromagnétiques (Radar)

III.4.1. Description du matériel

Le matériel de mesure est composé d'un système générateur d'impulsion électromagnétique SIR 4000, et d'un couple d'antennes dipolaires (boîtier GSSI 1,5GHz) de transmission (T_x) et de réception (R_x). Une plaque métallique, considérée comme un réflecteur parfait, est utilisée pour chaque mesure afin de faciliter d'identification des réflexions au niveau de la sous-face des poutres, Figure III-11.



Figure III-11 : Matériel de mesures électromagnétiques

L'antenne est caractérisée par une distance (entre émetteur et récepteur) de 6cm dont les principaux composants sont présentés en Figure III-12.

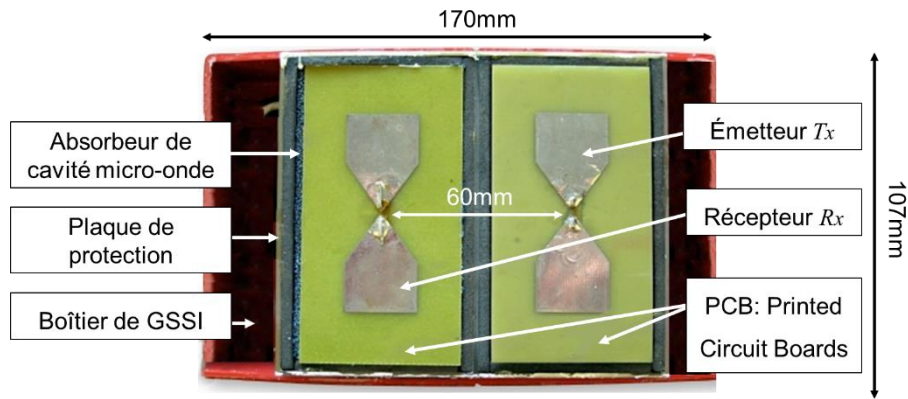


Figure III-12 : Photographie de l'antenne GSSI 1.5GHz avec boîtier ouvert (Warren and Giannopoulos, 2011)

Cette antenne utilise des nœuds papillon avec un angle d'évasement de 76° et des patches rectangulaires supplémentaires ajoutés aux extrémités ouvertes du nœud papillon. Ces extensions fonctionnent comme des sections droites de guide d'ondes. Elles introduisent un déphasage ou retard dans le chemin du signal et créent des modèles d'interférence afin de réduire la résonance parasite. Les nœuds papillons de l'antenne sont fixés sur un circuit imprimé reposant sur un absorbant électromagnétique (mousse à porosité ouverte) dont le rôle est de réduire le phénomène de résonance et réflexions multiples.

III.4.2. Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques

Pour un matériau homogène et isotrope, la vitesse de propagation est indépendante de la direction. Dans un matériau orthotrope, ce n'est pas le cas. Il est donc nécessaire de considérer l'interaction de l'onde avec les fibres du bois selon les deux directions de propagation considérées (hauteur et épaisseur). Une méthodologie de calcul de la vitesse de propagation, adaptée au bois avec la technique Fix-offset (distance constante entre émetteur et récepteur), a été proposée par (Chinh Mai, 2015) et issue des mesures sur le bois. Le principe repose sur la différence du temps d'arrivée entre l'onde réfléchie et l'onde directe qui se propage dans l'air.

La Figure III-13 représente schématiquement les trajets de propagation de l'onde électromagnétique. L'onde directe se propage de l'antenne de transmission (T_x) à l'antenne de réception (R_x), et ce, sur une distance d_{TR} égale, dans notre cas, à 6cm. L'onde réfléchie se propage en suivant un chemin de propagation de longueur d_R dépendant de la dimension testée d_t séparant l'antenne de la plaque métallique de réflexion. La vitesse de propagation dans l'échantillon est alors proportionnelle au temps de vol de l'onde réfléchie.

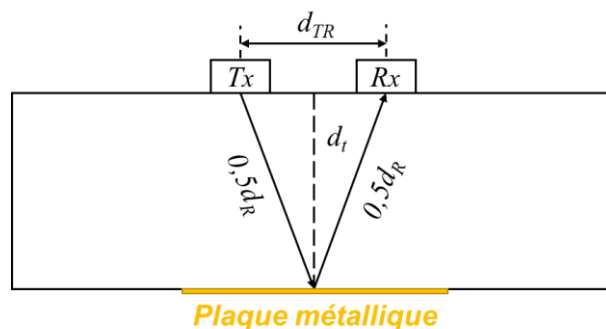


Figure III-13 : Propagation schématisée des ondes électromagnétiques directe et réfléchie

Pour intégrer l'orthotropie du matériau, nous considérons deux configurations d'interaction du champ électromagnétique avec les fibres du bois, Figure III-14. Nous avons :

1. Configuration $E \perp$ fibre : champ électrique perpendiculaire aux fibres ;
2. Configuration $E \parallel$ fibre : champ électrique parallèle aux fibres.

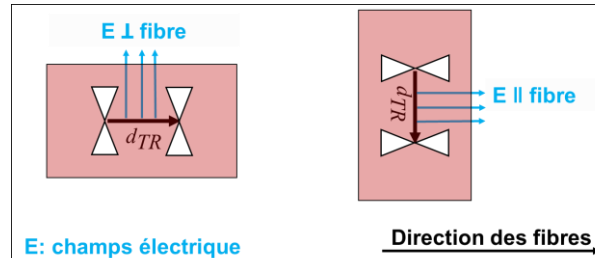


Figure III-14 : Orientation du champ E perpendiculaire aux fibres et parallèle aux fibres

La détermination du temps de vol repose sur la reconnaissance du pic caractéristique des signaux direct et réfléchi. Ainsi, il convient de souligner l'existence d'une inversion de phase entre le pic d'onde directe et le pic d'onde réfléchi, Figure III-15. Un pic positif A^+ caractérise l'arrivée de l'onde directe dans l'air (ou signal de référence). Un pic négatif B^- caractérise l'onde réfléchi dans le bois.

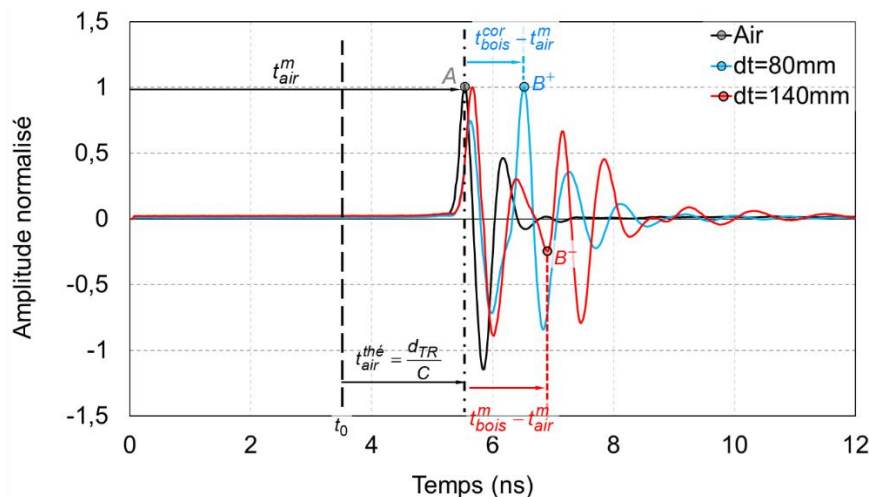


Figure III-15 : Exemple de signaux enregistrés en configuration poutre CND $E \parallel$ fibre, (DP et DG)

Soit t_0 , le temps de latence entre l'action sur le générateur d'onde et la transmission de l'onde à l'émetteur additionné du temps de réponse entre le récepteur et le générateur. Le temps de vol mesuré t_{air}^m de l'onde directe dans l'air se définit en fonction de la distance émetteur/récepteur d_{TR} et de la célérité de l'onde dans l'air C ($C = 3.10^8 m/s$) corrigée de t_0 (de l'ordre de 3,7ns, avec $t_{air}^m \approx 5.7ns$ dans la Figure III-15) intégrant le temps de transmission de la chaîne de mesure et des conditions d'ambiance de l'air. t_{air}^m prend alors la forme suivante :

$$t_{air}^m = t_0 + \frac{d_{TR}}{C} \quad (III-3)$$

Dans le cas de l'onde réfléchie, le temps de vol mesuré dans le matériau t_{bois}^m se définit via le chemin de propagation d_R et la vitesse de propagation V de l'onde réfléchie également corrigée de t_0 . Par analogie à l'expression (III-3), nous obtenons :

Pour l'onde réfléchie :

$$t_{bois}^m = t_0 + \frac{d_R}{V} \quad (III-4)$$

En combinant les équations (III-3) et (III-4), la vitesse de propagation de l'onde réfléchie V s'exprime comme suit :

$$V = \frac{d_R}{\left(t_{bois}^m - t_{air}^m\right) + \frac{d_{TR}}{C}} \quad (III-5)$$

L'équation (III-5) élimine le temps t_0 . Ainsi, la mesure de t_{air}^m fait office de calibration de la chaîne complète de mesure. Dans ce cas, l'expression $\left(t_{bois}^m - t_{air}^m\right)$ représente le décalage du temps d'arrivée du signal transitant dans l'air et dans le matériau. Dans le cas usuel, ce décalage se localise entre les points A et B^- . Dans le cas où le chemin de propagation est court, nous rencontrons un chevauchement entre l'onde directe et l'onde réfléchie. Dans ces conditions, l'expression (III-5) se réécrit avec le temps corrigé t_{bois}^{cor} de la façon suivante :

$$V = \frac{d_R}{\left(t_{bois}^{cor} - t_{air}^m\right)} \quad (III-6)$$

Le chemin de propagation d_R , selon la Figure III-13, se calcule de la façon suivante :

$$d_R = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{d_{TR}}{2}\right)^2 + (d_t)^2} \quad (III-7)$$

L'incertitude relative à la détermination de d_R est calculée comme suit :

$$\frac{\Delta d_R}{d_R} = \frac{d_t \cdot \Delta d_t}{\left(\frac{d_{TR}}{2}\right)^2 + (d_t)^2} \quad (III-8)$$

La constante diélectrique d'un matériau dépend du rapport des célérités dans l'air et dans le matériau :

$$\varepsilon' = \left(\frac{C}{V}\right)^2 \quad (III-9)$$

Selon les équations (III-5) et (III-7), l'incertitude relative de mesure radar est calculé comme suit :

$$\frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon'} = \frac{2 \cdot d_t \cdot \Delta d_t}{\left(\frac{d_{TR}}{2}\right)^2 + (d_t)^2} \quad (\text{III-10})$$

III.4.3. Présentation du protocole expérimental

III.4.3.1. Effet de de l'anisotropie

Le protocole est présenté sur la base la poutre CND DP1-1. Les mesures radar sont effectuées suivant la hauteur et l'épaisseur de la poutre, les constantes diélectriques mesurées étant notées respectivement ε'_h et ε'_b . Les différents points de mesure sont précisés sur la Figure III-16.

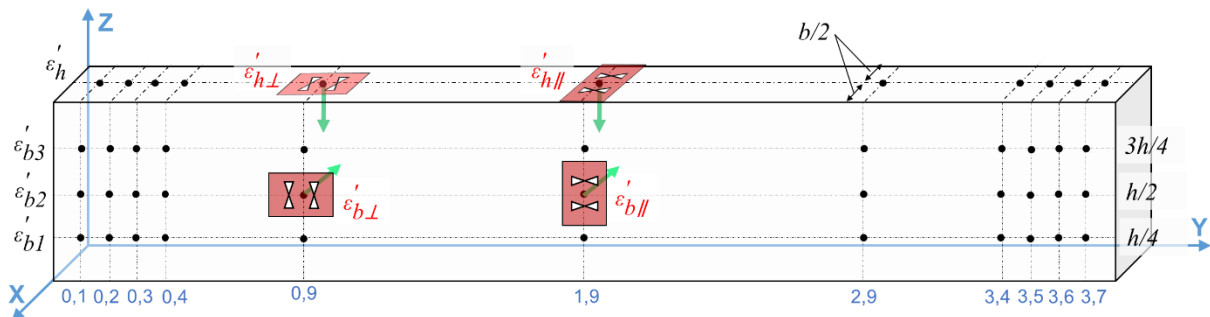


Figure III-16 : Points de mesure radar sur la poutre CND

Les constantes diélectriques mesurées répondent à la nomenclature suivante :

- $\varepsilon'_{h\parallel}$: constante diélectrique suivant la hauteur avec le champ électrique parallèle aux fibres ($d_t = h = 280\text{mm}$) ;
- $\varepsilon'_{h\perp}$: constante diélectrique suivant la hauteur avec le champ électrique perpendiculaire à la fibre ($d_t = h = 280\text{mm}$) ;
- $\varepsilon'_{bi\parallel}$ ($i = (1,2,3)$) : constante diélectrique suivant l'épaisseur à la ligne bi avec le champ électrique parallèle aux fibres, ($d_t = b = 80\text{mm}$) ;
- $\varepsilon'_{bi\perp}$ ($i = (1,2,3)$) : constante diélectrique suivant l'épaisseur à la ligne bi avec le champ électrique perpendiculaire aux fibres, ($d_t = b = 80\text{mm}$).

La densité de mesure est plus importante aux extrémités de la poutre CND pour prendre en compte des cinétiques de diffusion longitudinale plus rapide aux abouts (Varnier, 2019). Compte tenu de la dimension de l'antenne, nous choisissons une distance de 10cm entre les différents points de mesures.

Selon les équations (III-8) et (III-10), les incertitudes de mesure de constante diélectrique dans l'épaisseur (b_{\parallel} et b_{\perp}) et dans la hauteur (h_{\parallel} et h_{\perp}) sont présentées dans le Tableau III-7 prouvant la fiabilité des mesures.

Tableau III-7 : Incertitudes relatives des mesures radar

Configurations	$\Delta d_R/d_R$ (%)				$\Delta \varepsilon'/\varepsilon'$ (%)			
	DG	DC	DP	EP	DG	DC	DP	EP
b et b _⊥	0,07	0,07	0,11	0,11	0,14	0,14	0,22	0,22
h et h _⊥	0,45	0,07	0,04	0,04	0,90	0,14	0,07	0,07

III.4.3.2. Dispersion des mesures pour un échantillon

Les constantes diélectriques ont été calculées à chaque point de mesure et les valeurs sont regroupées dans les Tableau III-8 à Tableau III-11. La répartition spatiale est visualisée en Figure III-17 suivant l'épaisseur et la hauteur, selon E_{||} fibre et E_⊥ fibre, et ce, à l'état initial de réception des poutres correspondant à une humidité interne moyenne de 13,3%.

Selon les distributions de la constante diélectrique, nous constatons que l'orientation du champ électrique (par rapport aux fibres) a une forte influence sur le signal radar. Les constantes diélectriques mesurées sont de 1,38 à 1,41 fois plus élevées lorsque le champ électrique est parallèle aux fibres par rapport à une orientation perpendiculaire, ce qui est cohérent avec la bibliographie. Ce ratio de constante diélectrique entre le champ électrique parallèle et perpendiculaire aux fibres augmente avec une augmentation d'humidité (Torgovnikov, 1993).

Le Tableau III-8 et le Tableau III-10 mettent en évidence une plus forte dispersion des mesures dans le sens de la hauteur que dans l'axe de la poutre. Ceci s'explique par le fait que la distribution horizontale des données (données en ligne) concerne une lamelle particulière que nous pouvons supposer plus ou moins homogène. En revanche, dans le sens de la hauteur (données par colonnes), le champ électrique coupe plusieurs lamelles, ce qui apporte une certaine hétérogénéité aux mesures.

Tableau III-8 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans l'épaisseur selon E // fibre

Abcisse (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,9	1,9	2,9	3,4	3,5	3,6	3,7	Moy	cov
$\varepsilon_{b1 }$	2,43	2,62	2,63	2,55	2,42	2,30	2,21	2,29	2,26	2,14	2,11	2,36	7,8%
$\varepsilon_{b2 }$	2,02	2,08	2,22	2,30	2,14	2,00	1,95	2,09	1,94	1,89	1,86	2,04	6,8%
$\varepsilon_{b3 }$	2,32	2,43	2,43	2,15	2,00	2,12	2,12	2,11	2,21	2,10	2,09	2,19	6,5%
Moy	2,26	2,38	2,43	2,34	2,19	2,14	2,09	2,16	2,14	2,04	2,02	2,20	
cov	9,4%	12%	8,5%	8,6%	9,7%	7,0%	6,3%	5,0%	7,9%	6,7%	7,1%		9,1%

Tableau III-9 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans l'épaisseur selon E ⊥ fibre

Abcisse (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,9	1,9	2,9	3,4	3,5	3,6	3,7	Moy	cov
$\varepsilon_{b1⊥}$	1,70	1,72	1,74	1,73	1,83	1,66	1,62	1,64	1,56	1,55	1,46	1,66	6,3%
$\varepsilon_{b2⊥}$	1,48	1,56	1,73	1,76	1,56	1,55	1,47	1,54	1,48	1,47	1,42	1,55	6,9%
$\varepsilon_{b3⊥}$	1,55	1,74	1,55	1,57	1,55	1,54	1,54	1,57	1,63	1,57	1,56	1,58	3,7%
Moy	1,58	1,68	1,67	1,68	1,65	1,59	1,55	1,58	1,55	1,53	1,48	1,59	
cov	7,2%	5,8%	6,4%	5,9%	9,5%	4,2%	4,9%	3,5%	5,0%	3,4%	4,7%		6,3%

Tableau III-10 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans l'épaisseur selon E ⊥ fibre

Abcisse (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,9	1,9	2,9	3,4	3,5	3,6	3,7	Moy	cov
$\epsilon_{b1\perp}$	1,70	1,72	1,74	1,73	1,83	1,66	1,62	1,64	1,56	1,55	1,46	1,66	6,3%
$\epsilon_{b2\perp}$	1,48	1,56	1,73	1,76	1,56	1,55	1,47	1,54	1,48	1,47	1,42	1,55	6,9%
$\epsilon_{b3\perp}$	1,55	1,74	1,55	1,57	1,55	1,54	1,54	1,57	1,63	1,57	1,56	1,58	3,7%
Moy	1,58	1,68	1,67	1,68	1,65	1,59	1,55	1,58	1,55	1,53	1,48	1,59	
cov	7,2%	5,8%	6,4%	5,9%	9,5%	4,2%	4,9%	3,5%	5,0%	3,4%	4,7%		6,3%

Tableau III-11 : Constante diélectrique mesurée pour DP1-1 dans la hauteur

Abcisse (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,9	1,9	2,9	3,4	3,5	3,6	3,7	Moy	cov
$\epsilon_{h\parallel}$	2,16	2,25	2,25	2,27	2,15	2,18	2,19	2,20	2,19	2,17	2,12	2,19	2,2%
$\epsilon_{h\perp}$	1,56	1,61	1,66	1,54	1,60	1,55	1,57	1,58	1,56	1,55	1,53	1,55	4,0%

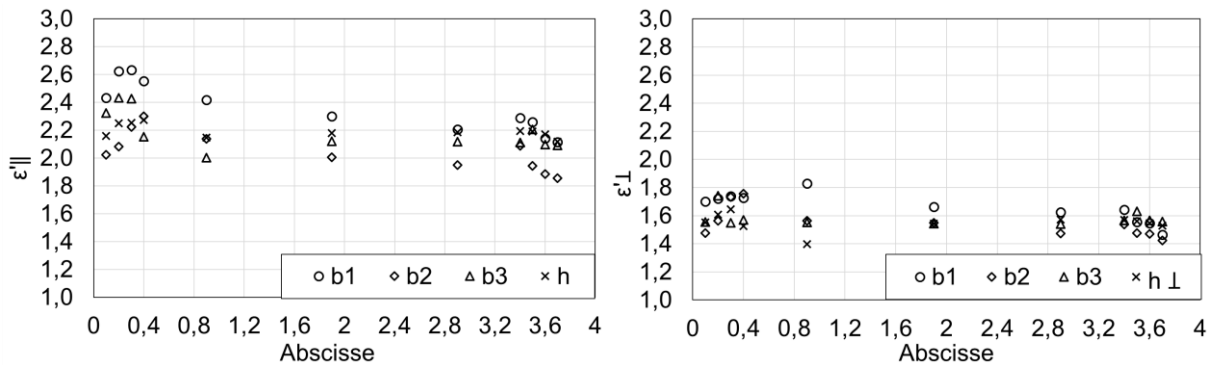


Figure III-17 : Constantes diélectriques dans l'épaisseur et la hauteur, avec E ∥ fibre et E ⊥ fibre

Selon le Tableau III-12, nous observons que le coefficient de variation, pour chaque surface de mesure varie, de 2% à 9% avec un écart type maximal de 0,27. Nous remarquons que les constantes diélectriques moyennes calculée pour les configurations E ∥ fibre est systématiquement supérieures à celles mesurées pour les configuration E ⊥ fibre avec des rapports respectifs de 1,38 et 1,41. Nous constatons également que le coefficient de variation des mesures dans la hauteur est inférieur à la valeur mesurée dans l'épaisseur. Ceci est dû certainement à une masse volumique de lamelle hétérogène. Du fait de la dimension de l'antenne, l'onde réfléchiée mesurée dans l'épaisseur ne peut balayer qu'une ou deux lamelles. En revanche, l'onde réfléchiée mesurée dans la hauteur traverse l'ensemble des lamelles. Par rapport au chemin de propagation dans l'épaisseur, la masse volumique des différentes lamelles est plus dispersée de sorte que le coefficient de variation en devient plus important.

Tableau III-12 : Constante diélectrique moyenne de la poutre CND DP1-1

Configurations		Moy	cov	$\epsilon_{\parallel} / \epsilon_{\perp}$	$\epsilon_{h\parallel} / \epsilon_{b\parallel}$	$\epsilon_{h\perp} / \epsilon_{b\perp}$
Épaisseur	$\epsilon_{b\parallel}$	2,20	9,12%	1,38	1,00	0,97
	$\epsilon_{b\perp}$	1,59	6,34 %			
Hauteur	$\epsilon_{h\parallel}$	2,19	2,18%	1,41		
	$\epsilon_{h\perp}$	1,55	3,97%			

Les variations de constante diélectrique étant assez faible, nous considérerons que l'état hydrique de DP1-1 est homogène à l'état initial. Nous obtenons ainsi les constantes diélectriques moyennes pour l'ensemble de la poutre CND par calcul des moyennes de tous les points de mesure dans l'épaisseur et dans la hauteur avec les configurations longitudinale et transversale. Les moyennes sont calculées ainsi :

$$\varepsilon'_{b\parallel} = moy \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{b\parallel} (Abscisse) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{b2\parallel} (Abscisse) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{b3\parallel} (Abscisse) \right) \quad (III-11)$$

$$\varepsilon'_{b\perp} = moy \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{b1\perp} (Abscisse) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{b2\perp} (Abscisse) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{b3\perp} (Abscisse) \right) \quad (III-12)$$

$$\varepsilon'_{h\parallel} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{h\parallel} (Abscisse) \quad (III-13)$$

$$\varepsilon'_{h\perp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{11} \varepsilon'_{h\perp} (Abscisse) \quad (III-14)$$

III.4.4. Propriétés diélectriques initiales des poutres CND

L'ensemble des constantes diélectriques sont regroupées dans l'Annexe 2.1. Nous notons une homogénéité de l'humidité interne sur l'ensemble des poutres CND. Ceci nous permettra une utilisation des constantes diélectriques moyenne de chaque configuration pour représenter le champ d'humidité pour chaque poutre CND.

III.4.4.1. Effet de la dimension testée

La Figure III-18 montre les signaux enregistrés suivant la hauteur et l'épaisseur des poutres DP1-1 et DG1-1, de ce, les distances testées sont différentes, de 80mm à 440mm. Nous constatons que l'amplitude du pic positif de l'onde directe est quasiment identique, cependant l'amplitude de l'onde réfléchie diminue significativement lorsque la distance testée augmente. L'atténuation est plus forte pour l'onde réfléchie par rapport à celle de l'onde directe. Cela peut s'expliquer par le fait que à distance de propagation de l'onde réfléchie est beaucoup plus longue que celle de l'onde directe, et d'après le chapitre I.2.2.6, la puissance reçue diminue avec la distance de propagation augmente.

Nous remarquons également que lorsque la dimension testée est augmentée à 280mm et 440mm, la localisation des pics négatifs B3(-) et B4(-) de certains points de mesure peuvent ne plus être précises. De ce point, nous voulons savoir si la dimension testée affecte la mesure de la constante diélectrique.

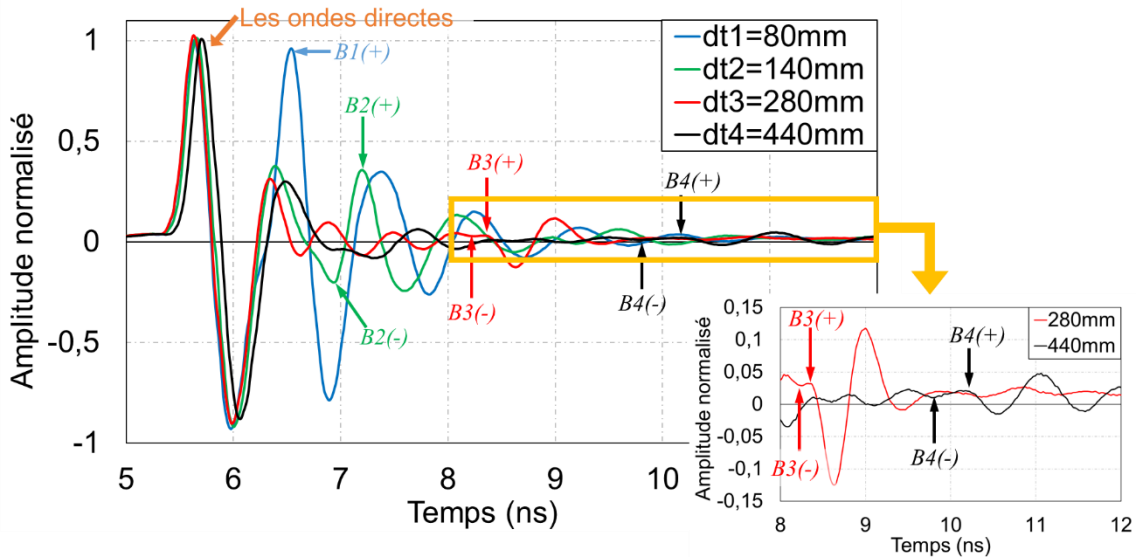


Figure III-18 : Signaux enregistrés dans le Douglas (DP1-1 et DG1-1) aux distances testées différentes

Sur la Figure III-19, nous remarquons que pour une poutre CND qui a une teneur en eau homogène, la constante diélectrique ϵ'_h est quasiment identique à ϵ'_b , même si la hauteur est plus grande que l'épaisseur, à savoir la profondeur de propagation d'onde réfléchie est plus grande.

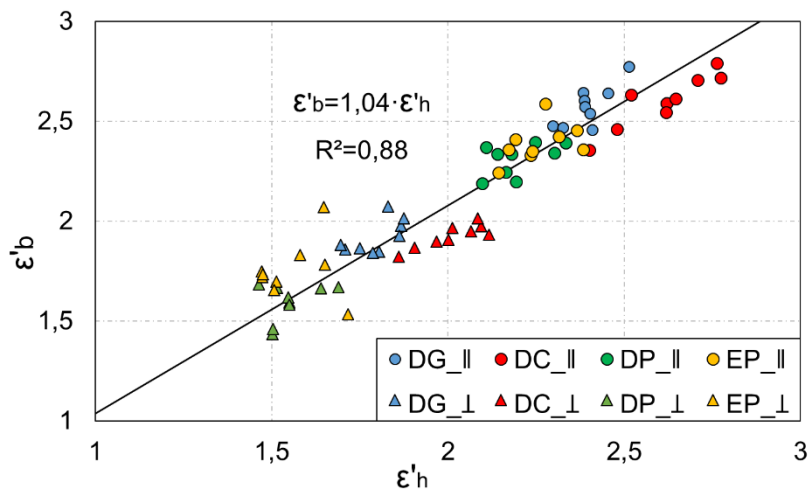


Figure III-19 : Effet profondeur de propagation : constantes diélectriques mesurées suivant la hauteur et l'épaisseur

Le Tableau III-13 regroupe les valeurs des constantes diélectriques moyennes mesurées pour les quatre configurations ($b_{||}$, b_{\perp} , $h_{||}$ et h_{\perp}) des poutres CND DG, DC, DP et EP, et leurs ratios par la géométrie pour les configurations de mesure différente. Selon les coefficients de variation, nous avons remarqué que lorsque l'orientation du champ électrique est identique, pour la même essence de poutre CND, leurs constantes diélectriques présentent une faible variation, de 2,7% à 8,3%, avec un écart type maximal de 0,15. Nous remarquons également que le rapport entre les constantes diélectriques moyennes calculée suivant l'épaisseur et la hauteur est à l'ordre 1 quel que soit la configuration et la géométrie. Le faible écart entre ϵ'_b et ϵ'_h peuvent être causé par l'orientation des fibres (qui ne sont pas parfaitement parallèles) et la faible dispersion de la masse volumique des lamelles.

Tableau III-13 : Constantes diélectrique moyennes mesurés des poutres CND

		$\epsilon'_{b\parallel}$	$\epsilon'_{b\perp}$	$\epsilon'_{h\parallel}$	$\epsilon'_{h\perp}$	$\epsilon'_{b\parallel}/\epsilon'_{h\parallel}$	$\epsilon'_{b\perp}/\epsilon'_{h\perp}$
DG	Moy	2,58	1,92	2,40	1,80	1,08	1,07
	cov	4,0%	4,3%	2,7%	3,8%	2,5%	3,4%
DC	Moy	2,60	1,93	2,61	2,01	1,00	0,96
	cov	5,2%	3,1%	4,9%	4,4%	2,2%	2,3%
DP	Moy	2,32	1,60	2,20	1,55	1,06	1,03
	cov	2,9%	5,8%	3,8%	4,6%	3,8%	6,1%
EP	Moy	2,39	1,75	2,26	1,56	1,06	1,13
	cov	4,0%	8,3%	3,7%	5,9%	4,0%	9,0%

III.4.4.2. Effet de l'orientation du champ électrique par rapport aux fibres

Nous avons observé que la direction relative, entre le champ électrique et les fibres, a une forte influence sur le signal radar pour la poutre CND DP1-1. Nous avons conclu que pour un même point de mesure, lorsque le champ électrique est parallèle aux fibres (E_{\parallel}), la constante diélectrique est supérieure à celle correspondant au champ électrique perpendiculaire aux fibres (E_{\perp}), et ce, avec une très bonne corrélation linéaire et un coefficient directeur de 1,37 indépendant de la géométrie des échantillons et de l'essence, Figure III-20.

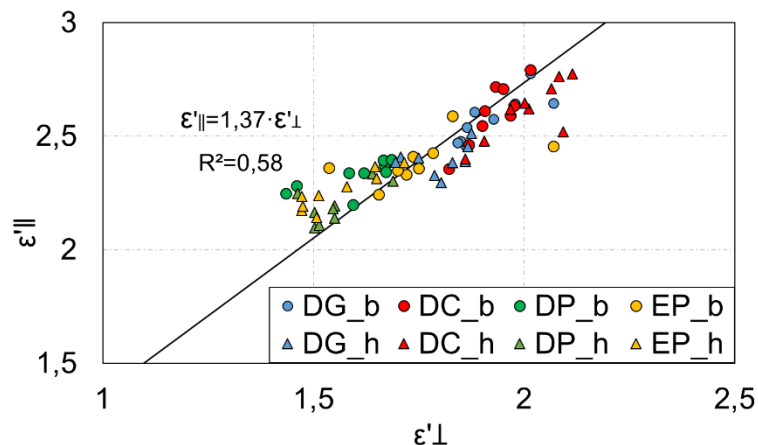


Figure III-20 : Effet polarisation : constantes diélectriques suivant E_{\parallel} fibre et E_{\perp} fibre

Le Tableau III-14 regroupe les valeurs des constantes diélectriques moyennes mesurées pour les quatre configurations (b_{\parallel} , b_{\perp} , h_{\parallel} et h_{\perp}) des poutres CND DG, DC, DP et EP, et leurs ratios par l'orientation de champ électrique par rapport aux fibres. Nous remarquons que les constantes diélectriques moyennes calculée pour les configurations E_{\parallel} fibre est systématiquement supérieures à celles mesurées pour la configuration E_{\perp} fibre avec des rapports respectifs de 1,30 à 1,45.

Tableau III-14 : Constantes diélectrique moyennes mesurées des poutres CND

		$\epsilon'_{b\parallel}$	$\epsilon'_{b\perp}$	$\epsilon'_{h\parallel}$	$\epsilon'_{h\perp}$	$\epsilon'_{b\parallel}/\epsilon'_{b\perp}$	$\epsilon'_{h\parallel}/\epsilon'_{h\perp}$
DG	Moy	2,58	1,92	2,40	1,80	1,34	1,33
	cov	4,0%	4,3%	2,7%	3,8%	2,4%	3,9%
DC	Moy	2,60	1,93	2,61	2,01	1,35	1,30
	cov	5,2%	3,1%	4,9%	4,4%	2,9%	3,0%
DP	Moy	2,31	1,60	2,20	1,55	1,45	1,42
	cov	3,5%	5,8%	3,8%	4,6%	3,9%	3,6%
EP	Moy	2,39	1,75	2,26	1,56	1,37	1,45
	cov	4,0%	8,3%	3,7%	5,9%	6,6%	2,9%

III.4.4.3. Sensibilité de la permittivité

Pour l'ensemble des 36 poutres CND, la Figure III-21 illustre une relation entre la constante diélectrique et la teneur en eau lorsque l'humidité des poutres est homogène. Elles montrent que la constante diélectrique est peu sensible à la teneur en eau, et ce, dans la plage d'humidité 11%-15%.

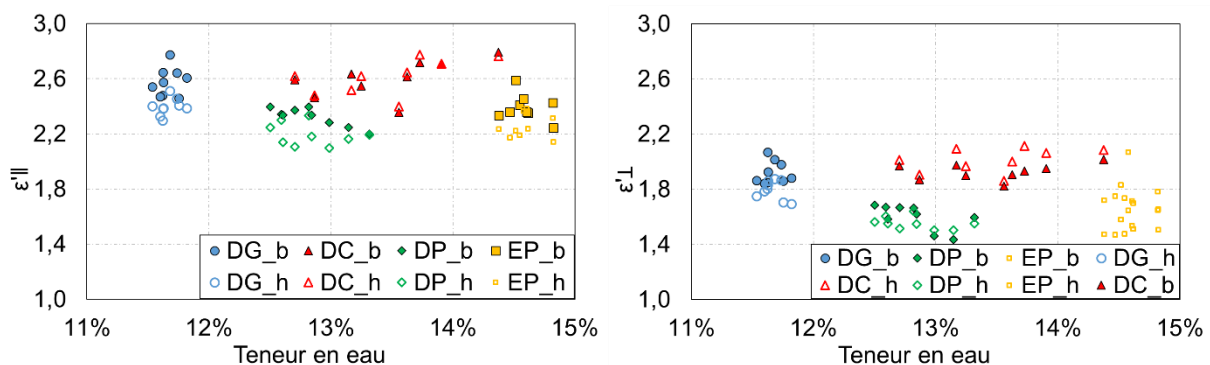


Figure III-21 : ϵ'_{\parallel} et ϵ'_{\perp} en fonction de la teneur en eau pour 36 poutres CND

III.5. Mesure par onde ultrasonore

Ce chapitre présente dans un premier temps le mode opératoire utilisé pour la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les poutres CND. Une attention particulière est accordée au rapport signal/bruit et à la méthode de détermination du temps de vol. La suite du chapitre est consacrée à la présentation des résultats obtenus, à l'état initial, pour l'ensemble des géométries de poutres. L'effet de l'angle de propagation par rapport au sens de fil du bois est principalement discuté.

III.5.1. Description des outils de mesure

III.5.1.1. Appareil d'Ultrason

L'appareil ultrason employé est le Pundit PL-200. Il permet de capter le temps de vol (TOF : Time Of Flight) entre émetteur et récepteur. Selon la Figure III-22, l'unité centrale est composée d'un générateur d'impulsion allant de 100 à 400V avec une définition de 16 bits induisant une incertitude de $\pm 30,52\mu\text{V}$. Le signal transmis par l'émetteur est amplifié avec un gain allant de 1 à 10000. Les résolutions temporelles dépendent de la distance séparant

émetteur et récepteur. Elles s'étendent de $0,1\mu\text{s}$ à $1\mu\text{s}$. Compte tenu de la longueur des poutres CND (3,8m), nous optons pour une résolution de $1\mu\text{s}$.



Figure III-22 : Pundit PL-200 et transducteurs

Pour les essais sur le bois LC en échelle structure, une paire de transducteurs piézoélectriques a été utilisée pour exciter des ondes de compression (onde P) avec une fréquence de $54\text{kHz}\pm 5\text{kHz}$, et un diamètre de $36,77\text{mm}$. Les transducteurs piézoélectriques de type résonant (émetteur et récepteur) ont été choisis pour compenser la forte atténuation dans le bois. Un couplant est utilisé pour garantir un bon contact entre les transducteurs et le matériau. Une paire de transducteurs piézoélectriques d'onde cisaillement (Onde S) à contact sec sont aussi utilisés avec une fréquence de $40\text{kHz}\pm 4\text{kHz}$, et un diamètre de 84mm .

III.5.1.2. Choix du type d'onde

Les transducteurs à ondes de cisaillement qui excitent des impulsions ultrasonores à une fréquence de 40kHz . Cependant, pour des longueurs de propagation importantes, les échos induisent, à terme, une composante d'onde de compression qui prédomine. Pour des échelles centimétriques, cela se traduit par deux pics. En illustration, la Figure III-23 montre des résultats obtenus par Elsener (2014) sur des cubes de $15\times 15\times 15\text{cm}^3$ de *Corymbia maculata* sollicités par une onde de cisaillement de fréquence 250kHz .

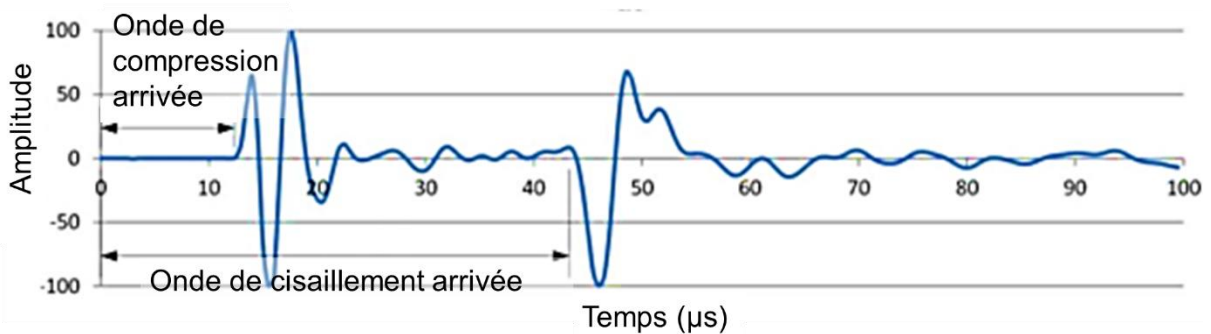


Figure III-23 : Ondes de compression et de cisaillement captées par le récepteur (Elsener, 2014)

En revanche, concernant les poutres CND, nous avons effectué les mesures en employant, successivement des ondes de compression et de cisaillement suivant la hauteur et l'épaisseur, l'atténuation d'onde de cisaillement étant trop forte suivant la longueur. L'analyse des signaux reçus sont présentés dans le domaine temporel et fréquentiel en Figure III-24 et Figure III-25, respectivement, et ce pour la poutre DP1-1 d'une épaisseur de 80mm et d'une hauteur de 280mm

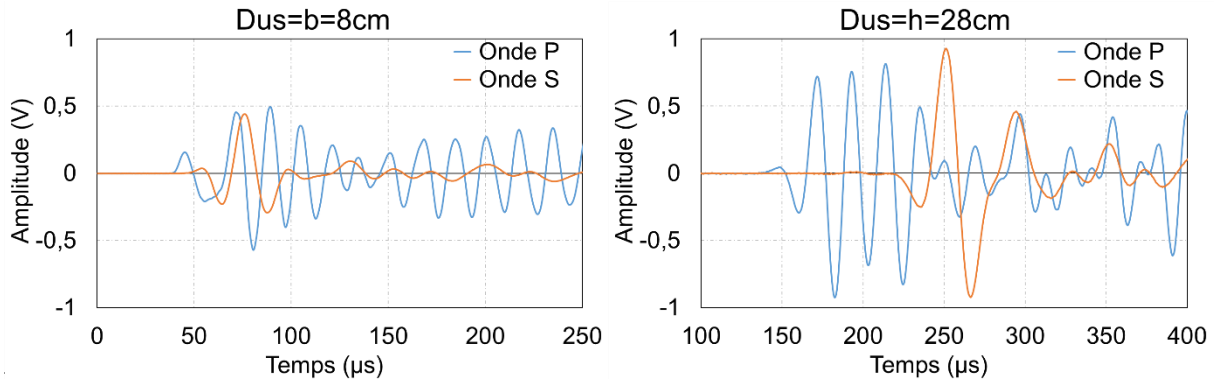


Figure III-24 : Effet de la distance de propagation sur les signaux temporels (onde de compression et de cisaillement)

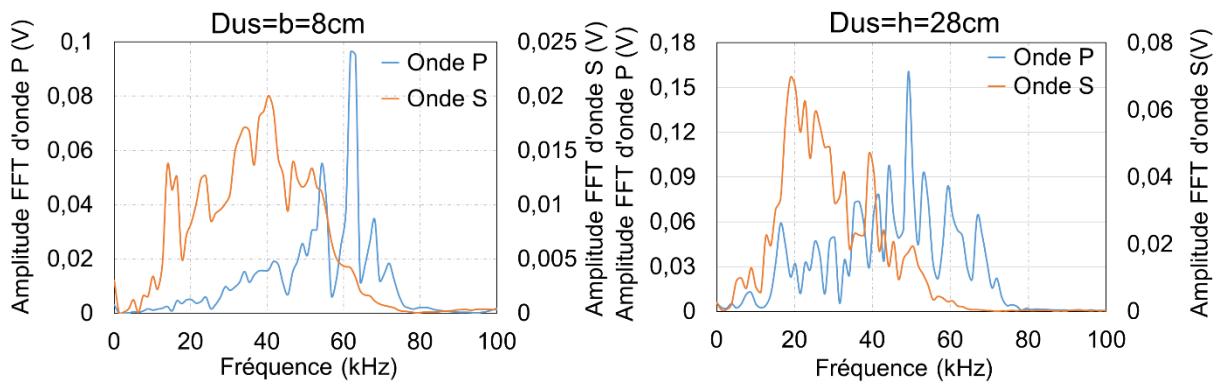


Figure III-25 : Effet de la distance de propagation sur les signaux fréquentiels (onde de compression et de cisaillement)

Nous observons des signaux très mélangés qui ne permettent pas de distinguer le pic de d'onde de cisaillement et celui de l'onde de compression. Dans ces conditions, nous choisissons de n'utiliser que des ondes de compression selon des transmissions directe et semi-directe.

De plus, dans un contexte d'opération de diagnostic in-situ, le fait de n'utiliser que des transmissions d'ondes de compression limite les temps d'acquisition en employant qu'un couple de transmetteur-récepteur. Nous verrons, par la suite, que le manque d'informations, apportées par les ondes de cisaillement, sera compensé, en partie, par un algorithme d'analyse exploitant les différents angles de propagation d'ondes de compression. Nous devons retenir, à ce stade, que l'objectif est d'obtenir les mesures nécessaires pour requalifier un module d'élasticité et une estimation d'un niveau d'humidité interne.

III.5.2. Analyse du signal

Afin d'estimer au mieux la vitesse de propagation, il est nécessaire de déterminer une distance parcourue et le TOF associé. La présence de défauts le long du chemin de propagation (par exemple, les nœuds et les fissures) peut modifier le chemin de propagation. La vitesse de propagation deviendra une vitesse apparente pouvant être différente de la vitesse réelle recherchée. Les seules mesures disponibles sont donc la distance entre les transducteurs (chemin apparent de l'onde, D_{US}) et les signaux reçus par le récepteur.

III.5.2.1. Détermination du temps de vol (TOF)

Le TOF est l'instant où la première onde arrive au récepteur. Les algorithmes de détermination du TOF ont été étudiés dans le passé et adaptés aux mesures dans le béton et le bois massif à des échelles centimétriques (Arciniegas Mosquera, 2014; Kurz et al., 2005; Lasaygues et al., 2014). De ces études ressortent les critères d'Akaike (AIC) et d'Hinkley. Cependant, aucune étude comparative n'a été menée sur du bois lamellé-collé en échelle structure. Une première étude a été réalisée sur la poutre CND DP1-1 (Figure III-26). Les mesures sont effectuées selon la hauteur de 28cm. La Figure III-27 présente le signal transmis par le récepteur. Les signaux d'onde de compression sont, dans un premier temps, enregistrés et exportés via le logiciel PL-Link et analysés, dans un second temps, selon les deux algorithmes d'Akaike et d'Hinkley. Un troisième algorithme sera également testé. Il s'agit de l'algorithme du maximum glissant (Méthode MS : Maximum sliding). Le rapport signal sur bruit servira de critère de comparaison entre les trois algorithmes étudiés.

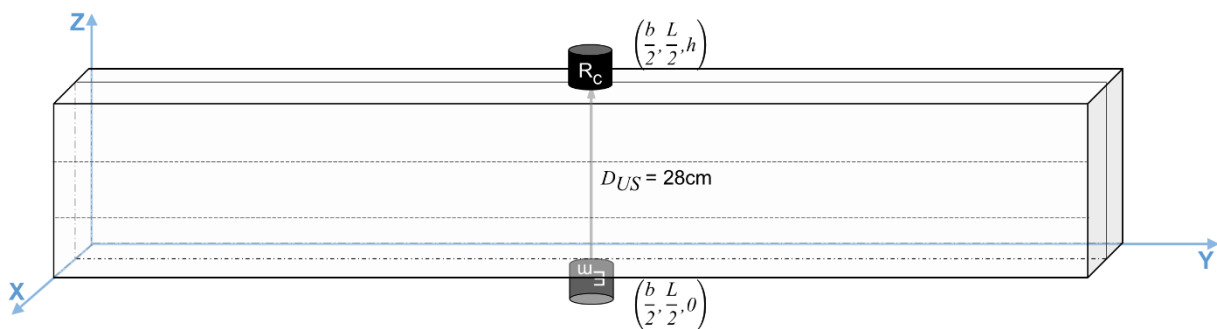


Figure III-26 : Configuration de mesure dans la direction transversale de DP1-1

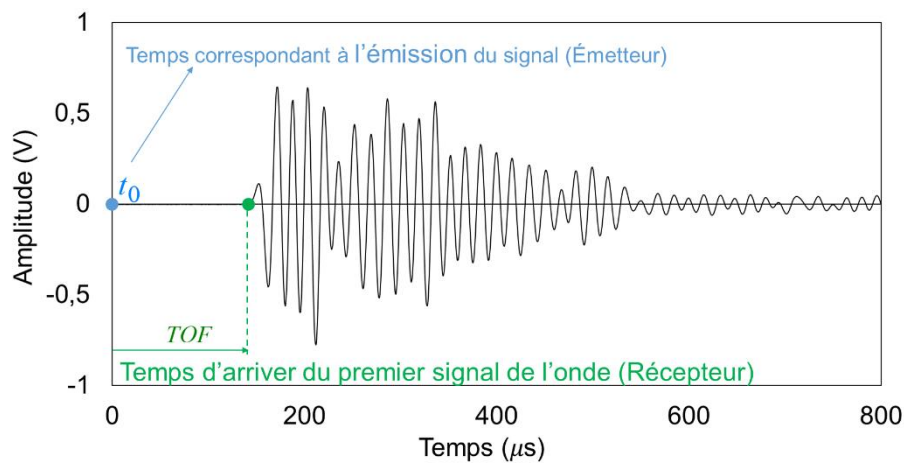


Figure III-27 : Forme d'onde compression d'Ultrason

III.5.2.1.1. Critère d'information de Akaike (AIC)

Le « critère de Akaike » (*AIC*) est une approche utilisée pour estimer l'ordre des modèles autorégressif (AR) afin de déterminer le temps de vol. Dans ce cas, le signal réceptionné est la somme de deux signaux temporels, à savoir, le signal et le bruit. Le TOF est donné par le minimum de la fonction AIC, comme indiqué en Figure III-28 (Carpinteri et al., 2012; Kurz et al., 2005; Zhang, 2003), k variant de 1 à N .

$$AIC(k) = k \cdot \log\left(\text{var}\left(x_1^k\right)\right) + (N - k) \cdot \log\left(\text{var}\left(x_{k+1}^N\right)\right) \quad (\text{III-15})$$

x_i représente l'amplitude de tension au $i^{\text{ème}}$ point de mesure, le nombre total de mesures étant noté N . Les termes de l'équation (III-15) sont détaillés ci-dessous :

$$\text{var}(x_1^k) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_1^k)^2, \quad \text{var}(x_{k+1}^N) = \frac{1}{N-k} \cdot \sum_{i=k+1}^N (x_i - \bar{x}_{k+1}^N)^2, \quad \bar{x}_1^k = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k x_i \quad \text{et}$$

$$\bar{x}_{k+1}^N = \frac{1}{N-k} \cdot \sum_{i=k+1}^N x_i$$

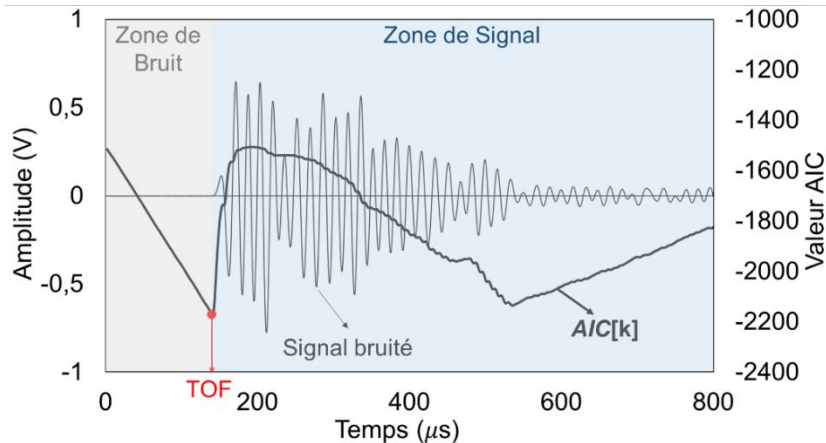


Figure III-28 : Détermination du TOF par la méthode AIC

III.5.2.1.2. Critère de Hinkley

Le « critère de Hinkley » (Hinkley) est une méthode utilisée pour le béton (Arciniegas Mosquera, 2014; Kurz et al., 2005; Lasaygues et al., 2014). Il est basé sur la comparaison entre l'énergie partielle et l'énergie totale transportées par le signal. Ce critère prend la forme de la fonction $H[k]$ suivante :

$$H[k] = \sum_{i=1}^k (x_i^2) - \frac{k}{\alpha \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i^2) \quad (\text{III-16})$$

Le facteur α est un paramètre d'ajustement afin de minimiser la dispersion (erreur de détermination) des mesures de TOF. Pour $\alpha = 1$, le critère repose sur l'analyse de la puissance instantanée du signal et le TOF est donné par le minimum de la fonction d'Hinkley, Figure III-29.

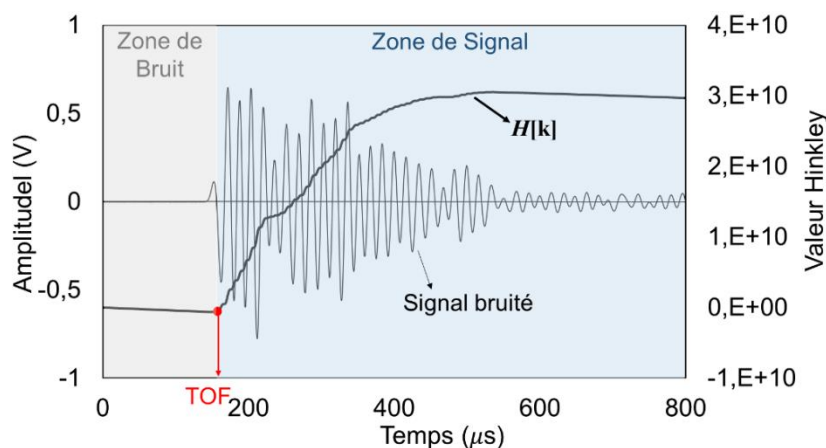


Figure III-29 : Détermination du TOF par la méthode Hinkley

III.5.2.1.3. Méthode du Maximum Glissant (MS : Maximum Sliding)

La méthode du Maximum Glissant (MS) inclut l'évolution de l'amplitude maximale (valeur absolue) de la forme d'onde. Le premier plateau bas correspondant au niveau de bruit. Le plateau le plus élevé désigne l'amplitude maximale du signal, Figure III-30.

$$MS[k] = \max_{i \in [1, \dots, k]} (|x_i|) \quad (\text{III-17})$$

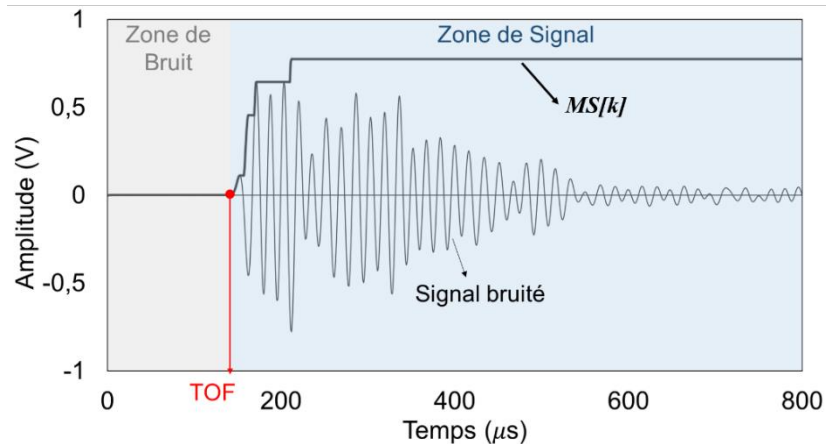


Figure III-30 : Détermination du TOF par la méthode MS

III.5.2.1.4. Comparaison des critères : Rapport signal sur bruit (SNR)

Le rapport signal sur bruit (S/B), appelé communément SNR, permet de mesurer la qualité d'un canal de transmission. Il est défini par le rapport de la puissance moyenne du signal P_S et la puissance moyenne du bruit P_B . Il s'exprime selon l'expression suivante :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_S}{P_B}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{U_S}{U_B}\right) \quad (\text{III-18})$$

L'amplitude U_S et U_B sont les amplitudes des tensions inhérentes au signal et au bruit, ce dernier dépendant du critère de détermination du TOF. Plus le SNR est petit, meilleure est la mesure. Nous utilisons le SNR pour comparer les différentes méthodes de détermination du TOF.

Deux approches ont été réalisées. La première consiste à fixer l'amplitude du signal émis à 300V tout en faisant varier le gain à la réception (20 à 1000), Annexe 3.1. La seconde approche à consister à fixer le gain à la réception de 500 tout en faisant varier l'amplitude du signal émis (100V à 400V), Annexe 3.1. Pour chaque configuration, le TOF, le SNR et les vitesses de propagation d'onde ultrasonore en compression V_p sont donnés selon les trois critères MS, AIC, et Hinkley.

La Figure III-31 présente une synthèse des résultats en termes de TOF fonction du SNR, et ce, pour les trois critères étudiés. Nous remarquons que le critère de Hinkley se distingue par un temps de vol plus élevé associé à un rapport signal/bruit faible (inférieur à 10dB), ce qui met en évidence, d'une part, une surestimation du niveau de bruit entraînant une dispersion du temps de vol mesuré sans espoir de convergence. En revanche, les critères AIC et MS

donnent des résultats similaires avec une diminution du TOF avec l'augmentation du SNR assurant ainsi une convergence du TOF à partir de 25dB de SNR.

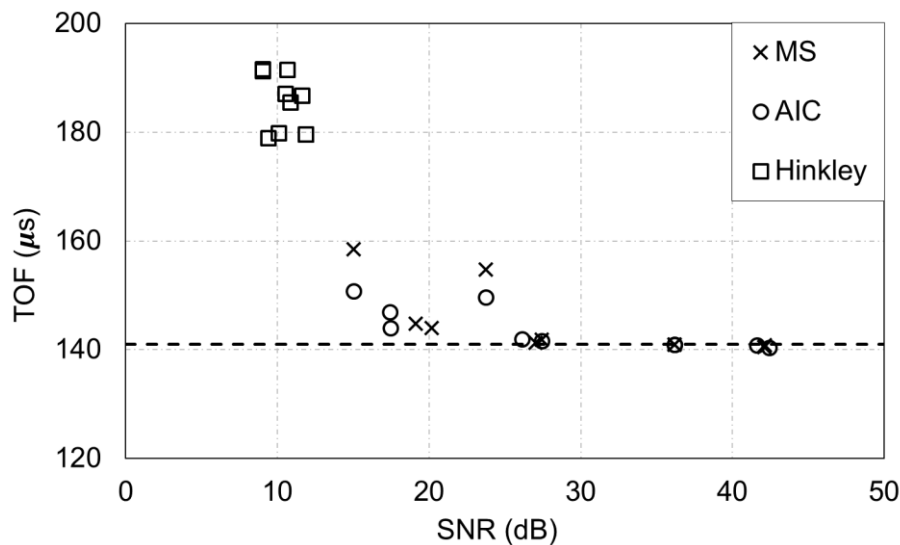


Figure III-31 : Évolution du TOF vs SNR

En conclusion de cette étude, nous choisissons le critère de Akaike pour déterminer le temps de vol en fixant l'amplitude à la capacité maximale du générateur, soit 400V. Le gain est ensuite choisi à la limite de saturation du signal reçu. Dans le cas où, pour un gain minimum de 1 (plus petit gain proposé par le matériel utilisé), le signal reçu s'avère saturer (cas rencontrés pour des petites distances de propagation), nous diminuerons l'amplitude à l'émission.

III.5.2.2. Répétabilité et reproductibilité des mesures

Afin d'avoir des mesures fiables, des études de répétabilité et reproductibilité ont été réalisées sur la poutre CND DP1-1. L'ensemble des points de mesure a fait l'objet d'un test de répétabilité et un test de reproductibilité. Nous nous limitons, dans cette synthèse, à la présentation des résultats obtenus pour une propagation d'onde dans la direction longitudinale, comme illustré par la Figure III-32, et ce, avec une longueur de propagation de 3,80m.

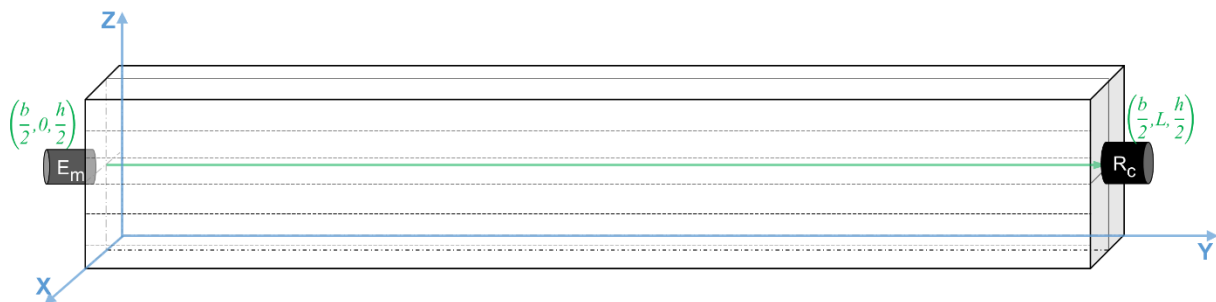


Figure III-32 : Configuration de mesure dans la direction longitudinale de DP1-1

3 répétitions de mesure ont été réalisées sur la configuration de la Figure III-32. Les signaux temporels sont présentés dans la Figure III-33, Celle-ci met en avant une bonne coïncidence des trois signaux. Le coefficient de variation, sur l'évaluation du temps de vol est de 0%, ce qui prouve d'une bonne répétabilité de la mesure, Tableau III-15.

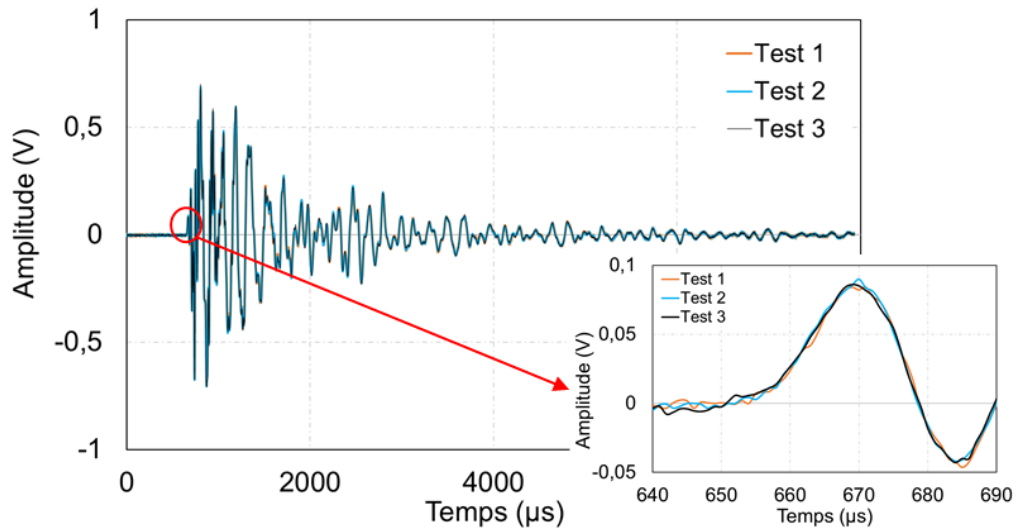


Figure III-33 : Signaux temporels des 3 répétitions

Tableau III-15 : TOF, SNR, V_P et ΔV_P pour trois répétitions d'une même configuration

	TOF (μ s)	SNR	V_P (m/s)	ΔV_P (m/s)
Test 1	647,9	37,83	5865	12
Test 2	647,9	38,03	5865	12
Test 3	647,9	39,13	5865	12
Moyenne	647,9	38,33	5865	12
cov	0,00%	1,83%	0,00%	0,00%

Afin de contrôler la reproductivité de la mesure, le protocole a été répété 3 fois avec le même expérimentateur. Les signaux temporels sont présentés en Figure III-34. Les résultats montrent trois signaux similaires avec un coefficient de variation de 0.2% sur le temps de vol, Tableau III-16.

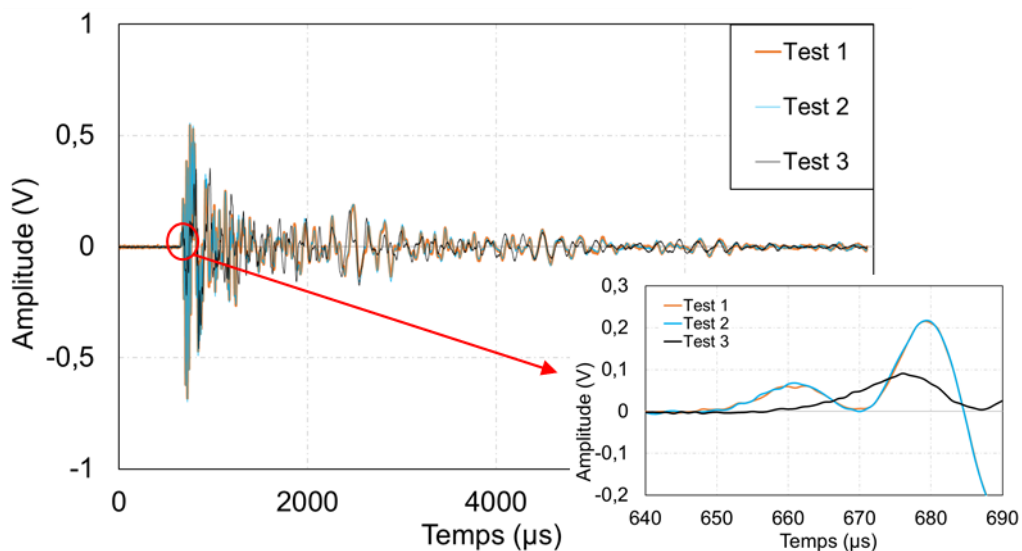


Figure III-34 : Signaux temporels des 3 reproductions

Tableau III-16 : TOF, SNR, V_P et ΔV_P pour trois reproductions d'une même configuration

	TOF (μ s)	SNR	V_P (m/s)	ΔV_P (m/s)
Test 1	647,9	38,03	5865	12
Test 2	648,9	37,83	5856	12
Test 3	650,9	35,94	5838	12
Moyenne	649,2	37,3	5853	12
cov	0,2%	3,1%	0,2%	0,41%

Enfin, au regard de la bonne répétabilité et reproductibilité du protocole de mesure, trois répétitions seront tout de même réalisées et la moyenne sera retenue pour l'exploitation ultérieure des signaux.

III.5.3. Présentation du protocole expérimental

Le protocole est présenté en exemple pour la poutre CND DP1-1. Il s'appuie sur la transmission directe et la transmission semi-directe, Figure III-35.

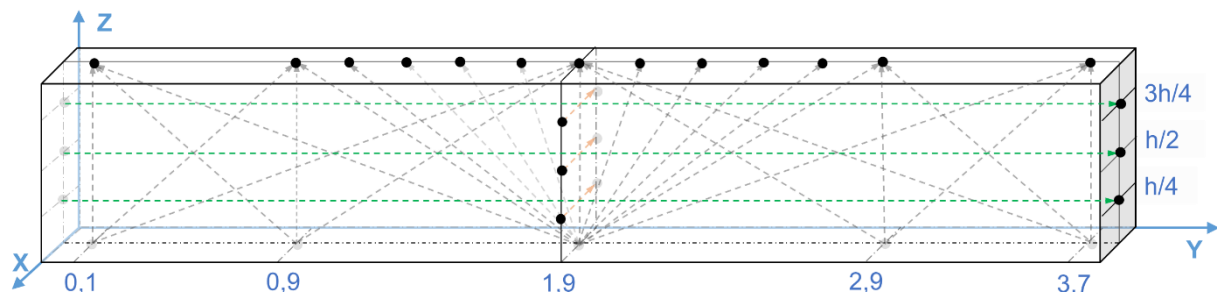


Figure III-35 : Schéma représentant les mesures ultrasonores.

Pour chaque mesure, les coordonnées de la position de l'émetteur et du récepteur, la distance entre émission et réception D_{US} et la direction θ de propagation d'onde par rapport aux fibres sont rappelés dans l'Annexe 3.2, et les vitesses dans les directions principales sont présentées dans l'Annexe 3.3. Selon les résultats présentés en Figure III-36, nous constatons que les vitesses de propagation dans le sens de la hauteur ($D_{US} = 0,28m$) et dans le sens de l'épaisseur ($D_{US} = 0,08m$) sont quasiment identiques, les écarts de vitesse étant dans la plage d'incertitude.

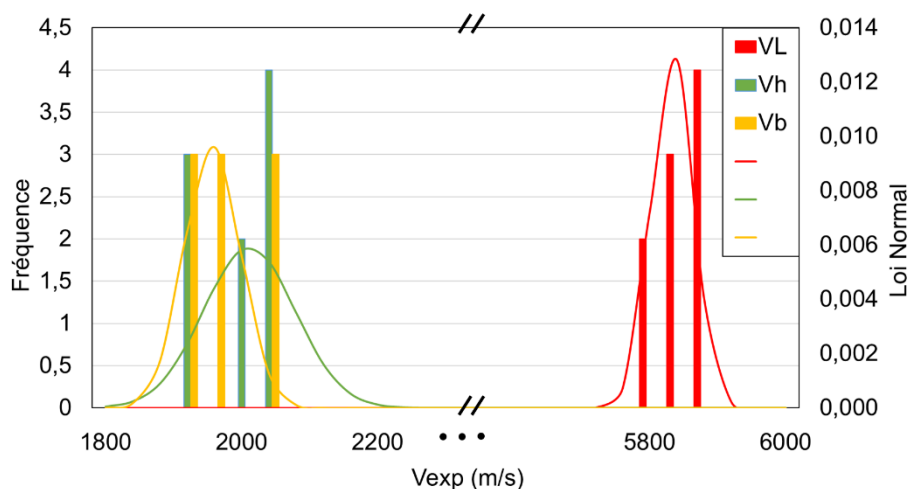


Figure III-36 : Distribution de la vitesse de propagation selon les directions principales

III.5.3.1. Effet de la lamelle

Les vitesses transversales dans l'épaisseur et la hauteur ont été réalisées sur la configuration de la Figure III-37.

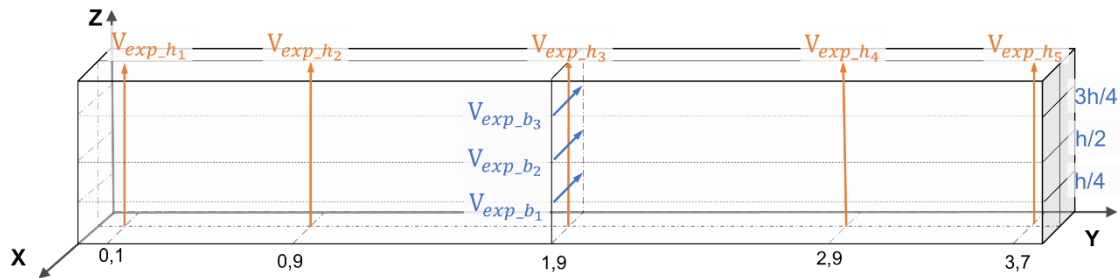


Figure III-37 : Mesures de vitesses transversales V_{exp_b} et V_{exp_h}

Les Tableaux III-17 à Tableau III-20 montrent une plus forte dispersion des mesures de vitesses dans l'épaisseur (V_{exp_b}) que dans la hauteur (V_{exp_h}). Ceci s'explique par une distribution de la masse volumique locale et donc par une distribution des propriétés d'élasticités locale dispersée. De ce point, afin de scanner plus de la poutre possible pour avoir un module élasticité moyen de la poutre, nous nous intéressons aux mesures dans le plan YZ (plan LR) pour la suite.

Tableau III-17 : Vitesses transversales pour les poutres CND DG

DG		DG1-1	DG1-2	DG1-3	DG2-1	DG2-2	DG2-3	DG3-1	DG3-2	DG3-3
V_{exp_b} (m/s)	Min	1895	2299	1903	1861	1975	1861	1947	1821	1950
	Max	1903	2377	2191	1938	1993	2003	2093	1975	1950
	cov	2,2%	12,5%	10,2%	4,7%	1,0%	3,8%	6,4%	8,0%	0,8%
V_{exp_h} (m/s)	Min	1983	1970	2010	2029	2096	2022	2080	2086	2002
	Max	2093	2161	2179	2144	2127	2172	2123	2165	2104
	cov	2,1%	4,1%	3,1%	2,3%	0,7%	2,6%	0,8%	1,5%	1,9%

Tableau III-18 : Vitesses transversales pour les poutres CND DC

DC		DC1-1	DC1-2	DC1-3	DC2-1	DC2-2	DC2-3	DC3-1	DC3-2	DC3-3
V_{exp_h} (m/s)	Min	2191	2146	2124	1965	1923	1894	2052	2124	2025
	Max	2299	2262	2337	2168	2065	2093	2337	2312	2160
	cov	2,0%	1,9%	3,5%	4,0%	2,6%	4,2%	5,6%	3,6%	2,7%

Tableau III-19 : Vitesses transversales pour les poutres CND DP

DP		DP1-1	DP1-2	DP1-3	DP2-1	DP2-2	DP2-3	DP3-1	DP3-2	DP3-3
V_{exp_b} (m/s)	Min	1909	1822	1731	1743	1989	1909	2005	2022	1914
	Max	1956	1894	2093	1909	2188	2005	2057	2093	2027
	cov	2,4%	2,0%	11,4%	6,3%	11,8%	2,8%	2,5%	4,6%	4,9%
V_{exp_h} (m/s)	Min	1897	1955	1910	1819	1937	1889	1876	1959	1925
	Max	2091	2026	2161	2016	2045	2071	2076	2112	1979
	cov	3,6%	1,5%	4,9%	4,2%	2,2%	4,0%	3,9%	2,8%	1,2%

Tableau III-20 : Vitesses transversales pour les poutres CND EP

EP		EP1-1	EP1-2	EP1-3	EP2-1	EP2-2	EP2-3	EP3-1	EP3-2	EP3-3
V_{exp_b} (m/s)	Min	1956	1925	1706	1769	1925	1756	1880	1731	1617
	Max	2271	1956	2057	1822	2228	1972	1909	2022	1977
	cov	7,5%	8,2%	10,4%	2,9%	12,1%	10,4%	3,4%	9,7%	10,1%
V_{exp_h} (m/s)	Min	1906	1932	1941	1941	1893	1969	1987	1893	1886
	Max	2030	2006	2065	2065	1992	2026	2060	1973	1938
	cov	2,5%	1,4%	2,5%	2,5%	2,0%	1,1%	1,5%	1,7%	1,2%

III.5.3.2. Effet de l'orthotropie

L'évolution de la vitesse ultrasonore expérimentale V_{exp} dans le plan YZ (plan LR) en fonction de la direction θ de propagation par rapport aux fibres est représentée Figure III-38. Cette évolution suit une forme parabolique déjà observée dans des travaux similaires. La vitesse maximale de 5865m/s correspond à un angle de 0° tandis que la vitesse minimale de 1897m/s est mesurée pour un angle de 90° . De plus, l'ensemble des points, pour un angle donné, montre une homogénéité des résultats, ce qui met en avant une homogénéité des propriétés d'élasticité de la poutre testée, et l'absence de perturbation par humidité ou défaut.

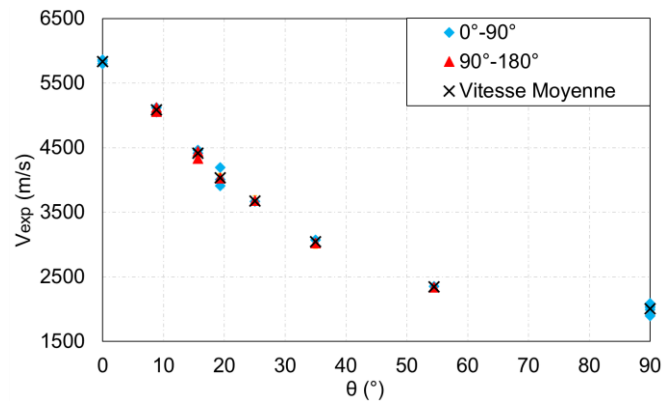


Figure III-38 : Évolution de la vitesse expérimentale en fonction de l'angle du fil pour DP1-1

Le coefficient de variation d'un même angle varie de 0,5% à 3%, cette variation est dans la plage de l'incertitude de mesure de la vitesse de propagation. De ce fait, nous pouvons calculer et présenter la vitesse moyenne aux angles identiques pour la suite. Pour toutes les géométries et les essences, l'ensemble des mesures et de leur traitement est regroupé dans l'Annexe 3.2 (Tableau 163 et Figure 80). En termes de synthèse, la Figure III-39 représente la vitesse ultrasonore d'onde de compression en fonction de la direction de propagation (angle θ) pour les 2 essences et les 3 géométries étudiées.

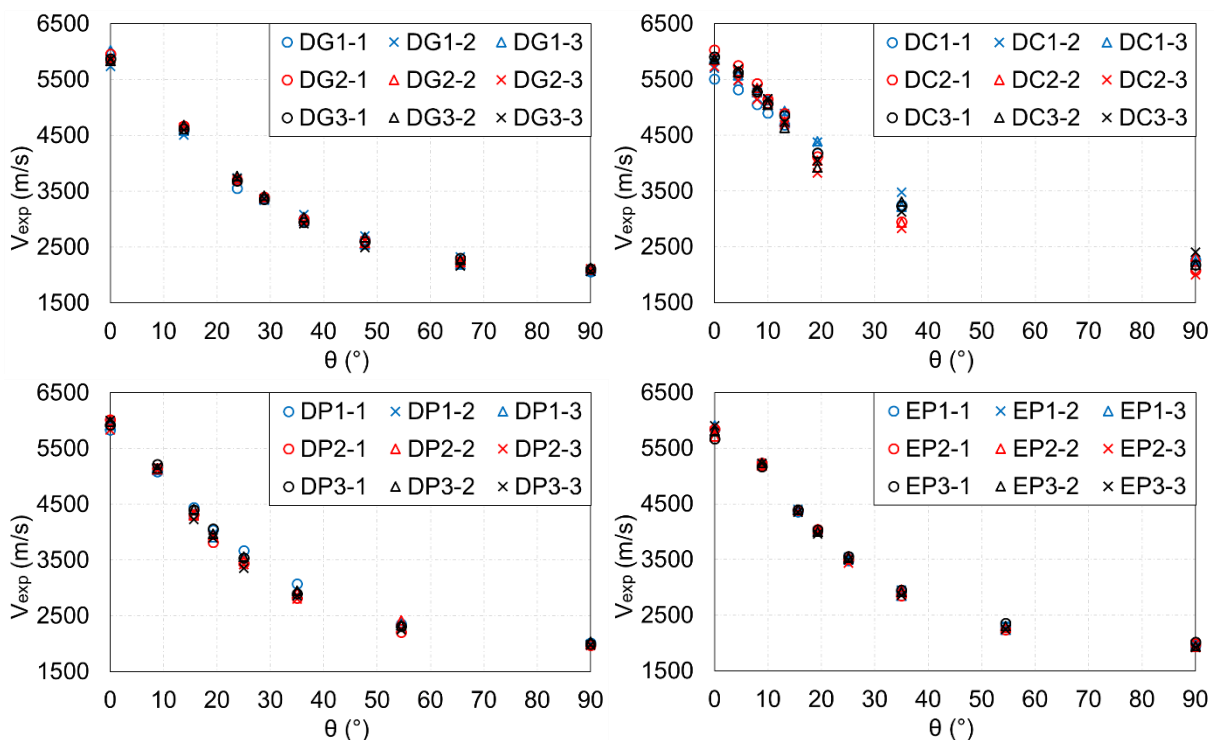


Figure III-39 : Vitesses moyennes en fonction de la direction de propagation

La Figure III-40 montre que les essences et les géométries n'engendrent pas de différences notables. Elles présentent simplement de faibles écarts certainement imputés aux différences de densité.

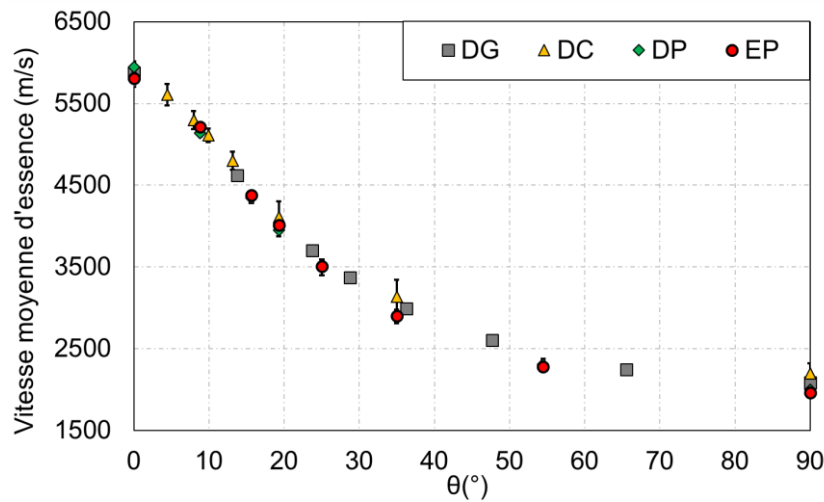


Figure III-40 : Vitesse moyenne de chaque essence

III.6. Essais mécaniques

III.6.1. Essais de flexion 4 points

III.6.1.1. Introduction

Parmi les trois directions d'orthotropie la direction longitudinale occupe une place à part car c'est la direction anatomique privilégiée, qui est mise en avant dans les structures, et plus particulièrement pour reprendre des sollicitations de traction/compression axiale ou de flexion. Afin de croiser les résultats obtenus par méthodes radar et ultrasonore avec une réponse mécanique des éléments structuraux diagnostiqués, nous proposons d'effectuer des tests mécaniques de flexion 4 points en s'inspirant de la norme NF EN 408, illustré dans la Figure III-41.

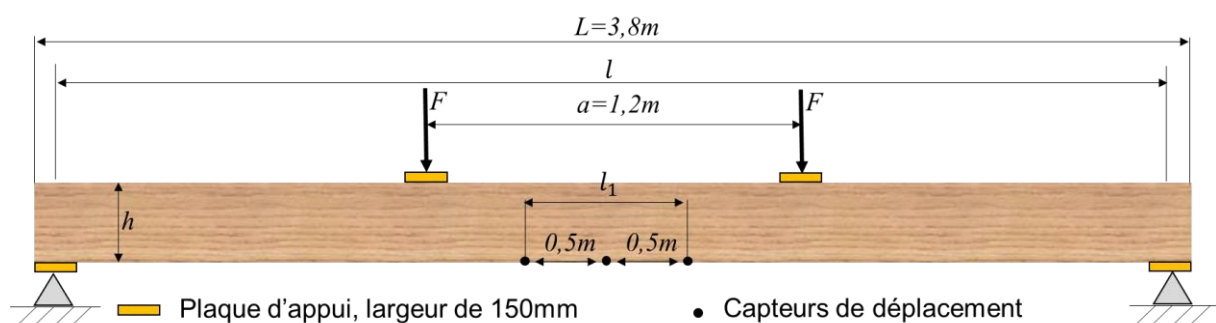


Figure III-41 : Dispositif de l'essai de flexion 4 points réalisé

III.6.1.2. Protocole expérimental

L'essai de flexion 4 points permet de solliciter la poutre CND en flexion pure. Le dispositif expérimental de mise ne charge repose sur le bâti de flexion de la Figure III-42.

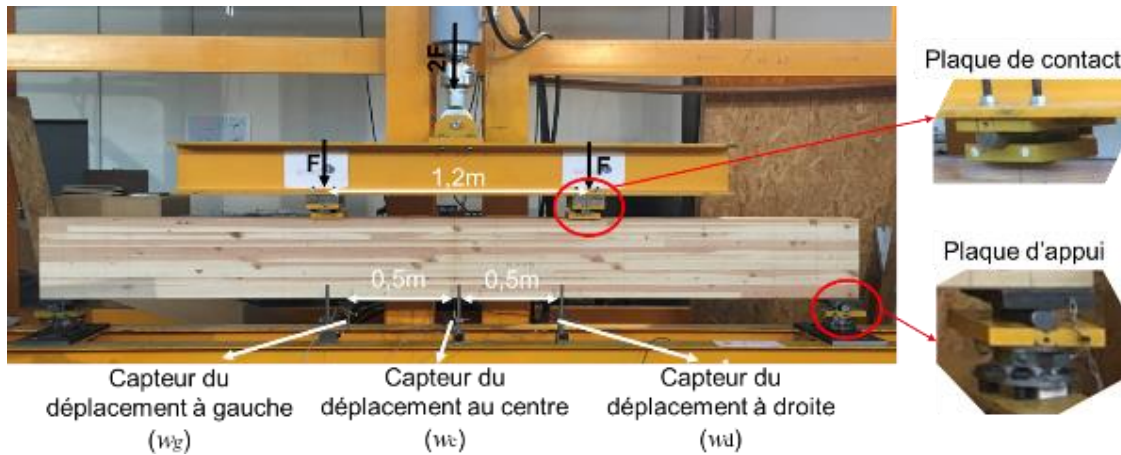


Figure III-42 : Dispositif expérimental pour la flexion 4 points sur la poutre CND DP1-1

La poutre est placée sur deux plaques d'appui de 150mm de largeur posée, elles même, sur deux cylindres libérant ainsi la rotation. Les deux appuis sont distants, d'axe à axe, de 3,65m (portée l). Un chevêtre permet d'appliquer deux efforts symétriques distant de 1,2m, distance notée a . Deux cylindres permettent de libérer la rotation des points d'application d'effort répondant ainsi aux blocages induits par le poinçonnement du bois par les plaques de répartition. Les essais sont menés en pilotage déplacements à vitesse constante pour atteindre une flèche limite de $L/500$. L'effort à appliquer est déterminé en considérant le module d'Young longitudinal moyen $E_{0,m}$ correspondant à une classe de résistance GL24h, soit 11,5GPa, Tableau III-21. La force maximale F_{\max} est calculée selon l'expression suivante :

$$F_{\max} = \frac{12 \cdot E_{0,m} \cdot I}{250 \cdot \left(\frac{a}{l}\right) \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2)} \quad (\text{III-19})$$

Selon les différentes sections se différencient selon le moment quadratique de flexion I .

Tableau III-21 : Force maximale estimée correspond à chaque essence et géométrie du bois

Essences	Géométrie de la poutre CND			$F_{\max} (kN)$
	$b(mm)$	$h(mm)$	$I(mm^4)$	
DG	140	440	$994 \cdot 10^6$	48,8
DC	140	140	$32,0 \cdot 10^6$	15,7
DP/EP	80	280	$146 \cdot 10^6$	7,18

Le dispositif expérimental est complété de 3 capteurs de déplacement linéaire HBM d'une course nominale de 50mm et de précision 0,05mm, afin de mesurer la déflexion durant l'essai au niveau de la fibre inférieure tendue. Un capteur est placé à importer et mesure la flèche centrale w_c . La flèche circulaire est calculée avec les flèches de gauche w_g et de droite w_d . L'ensemble est relié à une chaîne d'acquisition avec une fréquence d'enregistrement de 4,8kHz. Les capteurs utilisés pour la flèche circulaire ne sont pas adaptés, et ne permettent pas d'exploiter les modules locaux.

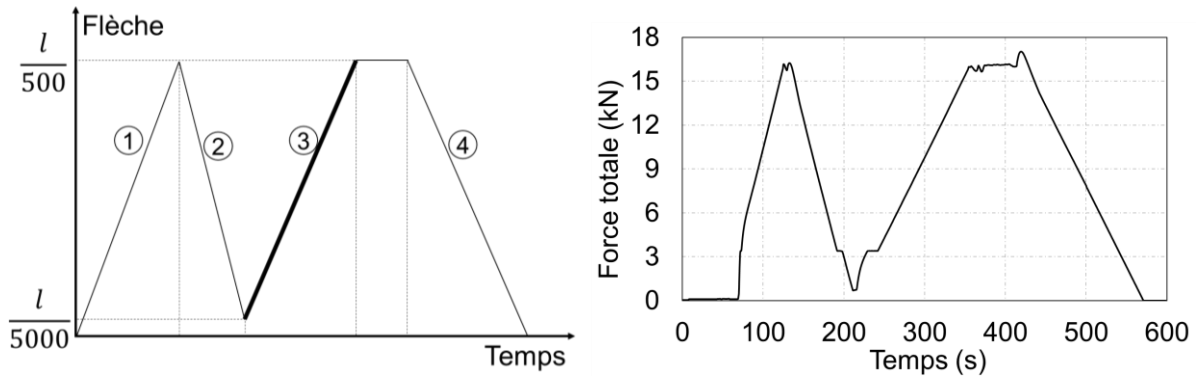


Figure III-43 : Programme de flèche théorique et de force total réel de DP1-1

III.6.1.3. Traitement des données

À partir de ces données, il est alors possible de déterminer les modules local et global d'élasticité. Pour cela, nous exploitons la partie 3 du graphe force/déplacement, Figure III-43, et, plus particulièrement le calcul de la raideur k globale ou locale, Figure III-44.

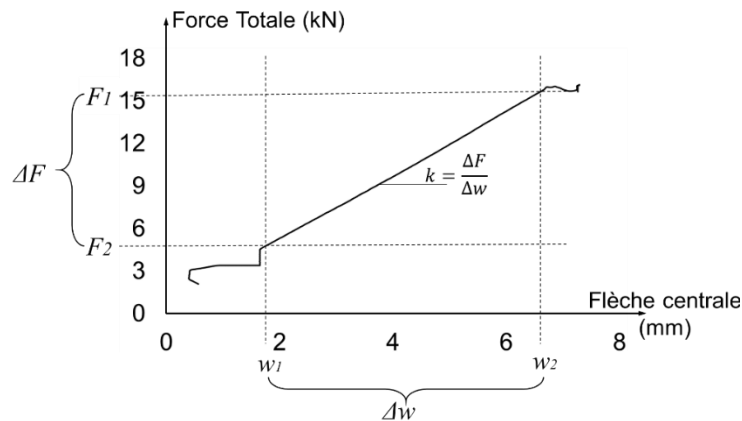


Figure III-44 : Courbe de force/flèche centrale

Le module d'élasticité global s'écrit comme suit :

$$E_{global} = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot \left(2 \cdot \frac{w_c^2 - w_c^1}{F_2 - F_1} - \frac{6 \cdot a}{5 \cdot G \cdot b \cdot h} \right)} \quad (III-20)$$

G désigne le module de cisaillement moyen. Dans le cas d'une classe de résistance GL24h, nous prendrons le module moyen $G_{0,m}$ de 650MPa. Afin de fiabiliser les mesures expérimentales, nous proposons de déterminer l'incertitude de mesure concernant les modules local et global.

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta E_{global}}{E_{global}} = & \left(\left| \frac{3 \cdot l^2 - 12 \cdot a^2}{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3} \right| + \left| \frac{6 \cdot (F_2 - F_1)}{10 \cdot G \cdot b \cdot h \cdot (w_c^2 - w_c^1) - 6 \cdot a \cdot (F_2 - F_1)} \right| \right) \cdot \Delta a \\
& + \left(\frac{4}{h} + \left| \frac{10 \cdot G \cdot (w_c^2 - w_c^1) \cdot b}{10 \cdot G \cdot b \cdot h \cdot (w_c^2 - w_c^1) - 6 \cdot a \cdot (F_2 - F_1)} \right| \right) \cdot \Delta h \\
& + \left(\frac{2}{b} + \left| \frac{10 \cdot G \cdot (w_c^2 - w_c^1) \cdot h}{10 \cdot G \cdot b \cdot h \cdot (w_c^2 - w_c^1) - 6 \cdot a \cdot (F_2 - F_1)} \right| \right) \cdot \Delta b \\
& + \left| \frac{6 \cdot a \cdot l}{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3} \right| \cdot \Delta l \\
& + \left(\left| \frac{6 \cdot a}{10 \cdot G \cdot b \cdot h \cdot (w_c^2 - w_c^1) - 6 \cdot a \cdot (F_2 - F_1)} \right| + \left| \frac{1}{F_2 - F_1} \right| \right) \cdot (\Delta F_2 + \Delta F_1) \\
& + \left| \frac{10 \cdot G \cdot b \cdot h}{10 \cdot G \cdot b \cdot h \cdot (w_c^2 - w_c^1) - 6 \cdot a \cdot (F_2 - F_1)} \right| \cdot (\Delta w_c^2 + \Delta w_c^1)
\end{aligned} \tag{III-21}$$

Selon les équations (III-20) et (III-21), les incertitudes relative et absolue, et le module global mesuré que nous appellerons module statique (MOE) dans la suite sont précisées dans le Tableau III-22.

Tableau III-22 : Incertitudes relative, et absolue, et module mesuré de la poutre CND DP1-1

Incertitude relative $\frac{\Delta E_{global}}{E_{global}}$	Incertitude absolue ΔE_{global} (GPa)	E_{global} (GPa)
7,77%	± 1,12	14,38

III.6.1.4. Caractérisation des modules statiques (MOE) initiaux

Les modules statiques sont mesurés pour chaque poutre CND selon le protocole présenté précédemment. Les incertitudes de mesure pour chaque type d'éprouvettes sont présentées dans le Tableau III-23.

Tableau III-23 : Incertitudes de mesure pour chaque terme

$\frac{\Delta MOE}{MOE}$	DG	DC	DP	EP
	5,44%	8,36%	7,77%	4,37%

Le MOE des 36 poutres CND, sa moyenne et son écart-type sont présentés dans le Tableau III-24. Il se caractérise par une faible dispersion de module global dont les valeurs se situent dans la plage d'incertitude de mesure. Nous notons que les poutres CND-DC présentent les plus grandes dispersions, cette dispersion étant cohérente avec la dispersion de la masse volumique de DC et les caractéristiques du BMR.

Tableau III-24 : MOE des poutres CND

Poutres CND							Moy	cov
DG	DG1		DG2		DG3		10,04	3,61%
	DG1-1	9,94	DG2-1	9,35	DG3-1	10,19		
	DG1-2	10,20	DG2-2	10,60	DG3-2	9,75		
	DG1-3	10,26	DG2-3	10,21	DG3-3	9,83		
	Moy	10,13		10,06		9,92		
cov	1,69%		6,36%		2,37%			
DC	DC1		DC2		DC3		14,46	13,70%
	DC1-1	11,62	DC2-1	18,31	DC3-1	14,35		
	DC1-2	12,05	DC2-2	15,44	DC3-2	15,41		
	DC1-3	14,30	DC2-3	13,71	DC3-3	14,94		
	Moy	12,66		15,82		14,90		
cov	11,36%		14,69%		3,57%			
DP	DP1		DP2		DP3		14,75	9,57%
	DP1-1	14,33	DP2-1	16,55	DP3-1	14,71		
	DP1-2	14,27	DP2-2	13,61	DP3-2	15,30		
	DP1-3	12,43	DP2-3	14,51	DP3-3	17,03		
	Moy	13,67		14,89		15,68		
cov	7,90%		10,13%		7,68%			
EP	EP1		EP2		EP3		12,13	12,11%
	EP1-1	11,35	EP2-1	12,51	EP3-1	11,12		
	EP1-2	15,86	EP2-2	11,08	EP3-2	11,62		
	EP1-3	11,96	EP2-3	11,80	EP3-3	11,87		
	Moy	13,05		11,80		11,54		
cov	18,76%		6,08%		3,30%			

Le module d'élasticité longitudinale moyen du bois lamellé-collé GL24h est de 11,6GPa. Concernant les poutres CND-DG, nous constatons que leur MOE est largement inférieur à 11,6GPa, ceci peut être provoqué par le ratio L/h qui est beaucoup plus petit que la norme. Par conséquent, nous écarterons les valeurs MOE de DG pour la suite de l'étude.

Pour les poutres DP et EP, le Douglas présente un MOE plus important que l'épicéa. Cependant, le MOE de la poutre CND EP1-2 dépasse la moyenne des poutres CND EP de 32%. De ce fait, nous écarterons sa valeur pour la suite de l'étude.

Une corrélation du MOE en fonction de la masse volumique du bois est illustrée dans la Figure III-45. Elle met en évidence une relation linéaire entre le module longitudinal et la masse volumique. Nous retrouvons une relation similaire dans les études antérieures de Guitard (Guitard, 1987) sur des résineux à l'échelle centimétrique.

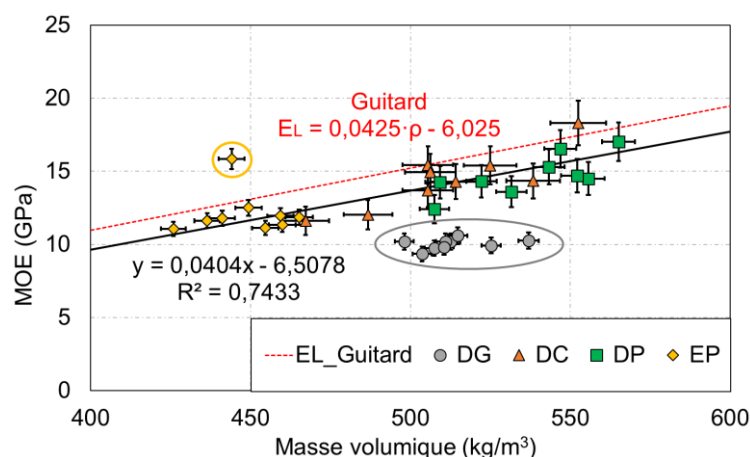


Figure III-45 : MOE en fonction de la masse volumique des échantillons de DG, DC, DP et EP, les 9 points de DG et un point de EP entourés sont éliminés de l'analyse

III.6.2. Essais mécaniques en compression transversales

III.6.2.1. Introduction

Un essai de compression transverse, dans le domaine linéaire, est proposé afin de déterminer le module d'élasticité transversal. Afin d'obtenir une estimation du module d'Young transversale de la poutre CND DP1-1, les tests sont réalisés sur les échantillons DP1T1 et DP1T2 bordant DP1-1, Figure III-2. Le module d'Young transversale de DP1-1 est déterminé comme la moyenne mesurée sur DP1T1 et DP1T2.

III.6.2.2. Protocole expérimental

Les essais ont été réalisés sur la presses électromécanique Zwick équipée d'un capteur de force d'une capacité de 50kN et de deux capteurs de déplacement WI/2mm-T d'une plage de mesure nominale de 2mm garantissant 2% d'erreur de mesure maximal. Le dispositif est complété par deux plaques de répartition des efforts en aluminium, Figure III-46.

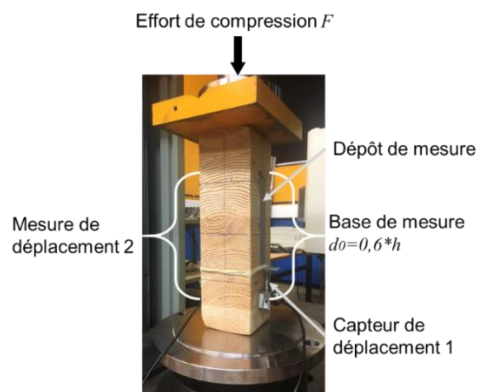


Figure III-46 : Dispositif de l'essai mécanique en compression transversale

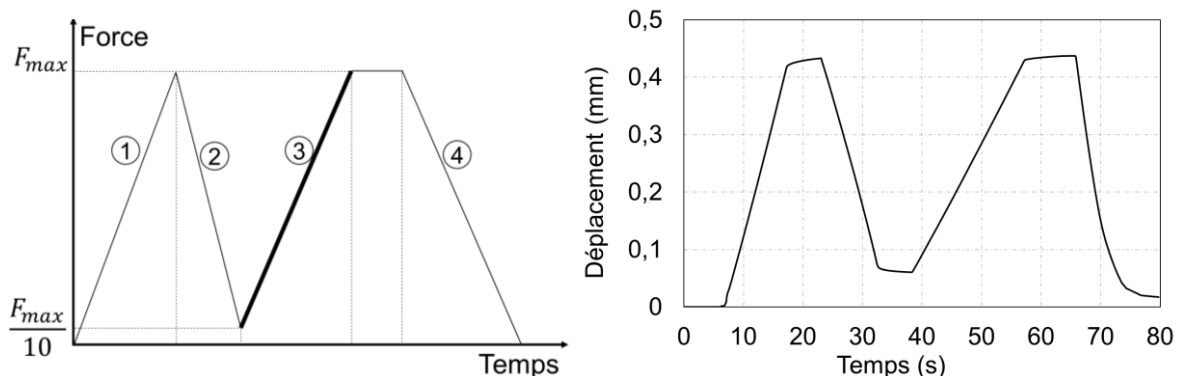


Figure III-47 : Programme de force théorique et de déplacement réel de DP1T1

III.6.2.3. Traitement des données

L'évolution de la force en fonction du déplacement moyen est illustrée en Figure III-48. Le module transversal E_{RT} est calculé selon l'expression suivante :

$$E_{RT} = \frac{(F_1 - F_2)/S}{(u_1 - u_2)/d} \quad (III-22)$$

S désigne la section transversale de l'éprouvette. Enfin, les efforts F_1 et F_2 sont deux efforts extrêmes correspondant aux déplacements moyens u_1 et u_2 .

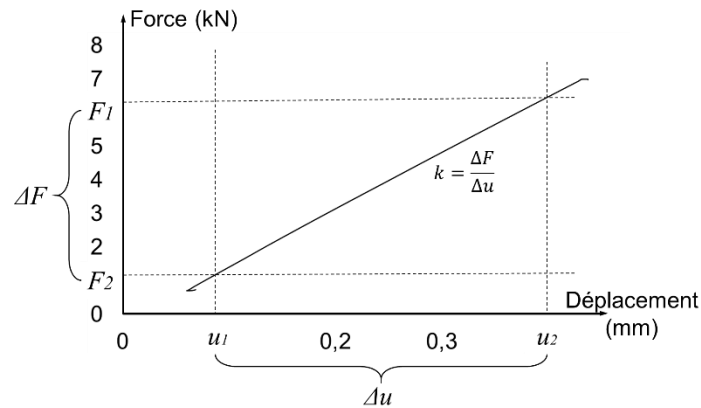


Figure III-48 : Courbe de force/déplacement en zone 3

Un calcul d'incertitude de l'ensemble des mesures nous conduit à l'incertitude des modules transversaux affichés dans le Tableau III-25.

Tableau III-25 : Modules d'élasticités transversaux et incertitudes relatives

	$\frac{\Delta E_{RT}}{E_{RT}}$	E_{RT} (GPa)	ΔE_{RT} (GPa)
DP1T1	3,20%	0,46	0,014
DP1T2	2,97%	0,42	0,012

Finalement, le module transverse de la poutre CND DP1-1 est calculé par la moyenne des modules de DP1T1 et DP1T2, soit :

$$E_{RT}(DP1-1) = 0,44 \pm 0,026 \text{ GPa} \quad (\text{III-23})$$

III.6.2.4. Modules transversaux des 36 poutres CND

Nous avons effectué les essais en compression transverse pour l'ensemble des géométries, Figure III-49.

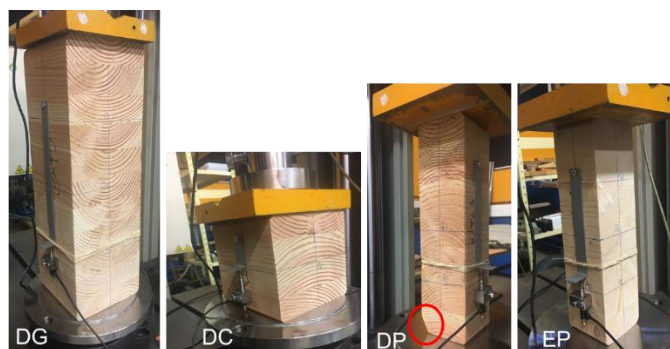


Figure III-49 : Illustration des essais en compression pour les échantillons E_{RT}

Le Tableau III-26, présente l'ensemble des modules transversaux E_{RT} de l'ensemble des échantillons testés en compression transverse, et ce, en adéquation avec le protocole présenté précédemment.

Tableau III-26 : Module E_{RT}

Échantillons E_{RT}						Moy	cov	
DG	DG1		DG2		DG3		0,48	9,40%
	DG1T1	0,51	DG2T1	0,45	DG3T1	0,45		
	DG1T2	0,58	DG2T2	0,47	DG3T2	0,49		
	DG1T3	0,50	DG2T3	0,41	DG3T3	0,44		
	DG1T4	0,52	DG2T4	0,44	DG3T4	0,48		
	Moy	0,53		0,44		0,47		
cov	7,38%		5,37%		5,23%			
DC	DC1		DC2		DC3		0,74	44,85%
	DC1T1	0,58	DC2T1	0,59	DC3T1	0,62		
	DC1T2	0,52	DC2T2	0,59	DC3T2	1,65		
	DC1T3	0,81	DC2T3	0,48	DC3T3	0,44		
	DC1T4	0,94	DC2T4	0,73	DC3T4	0,97		
	Moy	0,71		0,60		0,92		
cov	27,66%		17,20%		58,38%			
DP	DP1		DP2		DP3		0,57	18,30%
	DP1T1	0,46	DP2T1	0,76	DP3T1	0,45		
	DP1T2	0,42	DP2T2	0,59	DP3T2	0,49		
	DP1T3	0,56	DP2T3	0,58	DP3T3	0,55		
	DP1T4	0,69	DP2T4	0,60	DP3T4	0,67		
	Moy	0,53		0,63		0,54		
cov	22,82%		13,50%		17,66%			
EP	EP1		EP2		EP3		0,32	10,90%
	EP1T1	0,34	EP2T1	0,32	EP3T1	0,40		
	EP1T2	0,34	EP2T2	0,28	EP3T2	0,29		
	EP1T3	0,33	EP2T3	0,32	EP3T3	0,32		
	EP1T4	0,34	EP2T4	0,27	EP3T4	0,34		
	Moy	0,34		0,30		0,34		
cov	1,18%		9,87%		14,09%			

Selon la norme NF EN 14080, le module transversal moyen du bois lamellé-collé GL24h est de 360 MPa.

Nous notons que le Douglas affiche un module E_{RT} plus important que l'épicéa pour lequel le module s'approche des valeurs fournies par la norme NF EN 14080.

Les éléments DG et EP présentent une plus faible dispersion des données illustrant ainsi une plus grande homogénéité, et ce, comparé aux éléments DC et DP.

La dispersion plus élevée sur les échantillons DP peut être expliquée par l'inclinaison de la surface de certains échantillons. Par l'exemple illustré dans la Figure III-49, l'échantillon DP1T4 présente une distribution des contraintes de compression transverse hétérogène, ce qui peut fausser l'interprétation en termes de module. Dans ce cas de figure, nous proposons d'éliminer le module transversal de DP1T4 pour la suite de l'étude.

Enfin, le plus grand coefficient de variation des mesures concerne les échantillons DC. Cela peut s'expliquer par une distance de référence de la mesure de déformation plus faible au regard de la petite hauteur d'éprouvette de 140mm. Dans ces conditions, selon le Tableau III-27, l'incertitude relative dépasse 15,6%. Compte tenu cette grande incertitude relative de mesure, nous proposons d'éliminer les modules transversaux obtenus sur les échantillons DC dans la suite de l'étude.

Tableau III-27 : Incertitudes de mesure pour chaque essence

$\frac{\Delta E_{RT}}{E_{RT}}$	DG	DC	DP	EP
	3,12%	15,60%	2,97%	3,71%

La corrélation entre module transversal et masse volumique est proposée en Figure III-50. Comme Guitard (Guitard, 1987) l'avait déjà affirmé dans des études antérieures, une corrélation linéaire sans effet d'échelle ni d'essence.

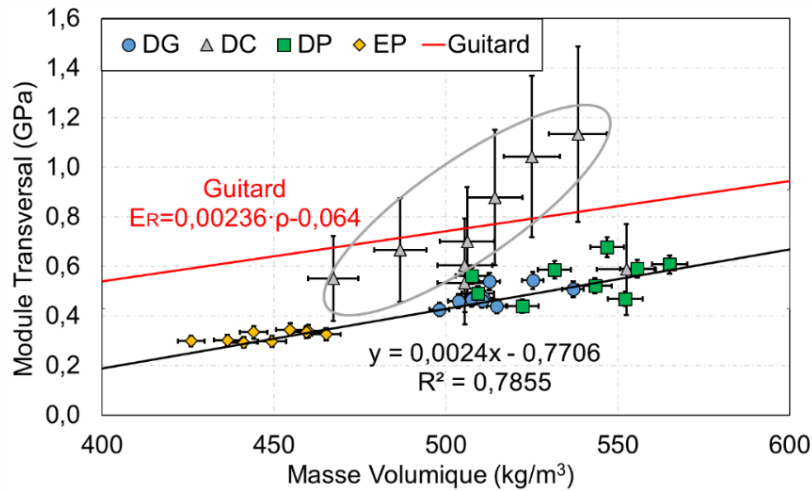


Figure III-50 : Corrélation module transversal / masse volumique (échantillons DG, DC, DP et EP), les points DC entourés sont éliminés de l'analyse

Ainsi, nous pouvons réaliser une estimation de module transversal des poutres CND en nous basant sur les résultats relevés sur les échantillons bordants, comme le montre dans le Tableau III-28.

Tableau III-28 : Module transversal estimé pour les poutres CND

Poutres CND						Moy	cov	
DG	DG1		DG2		DG3		0,48	8,61%
	DG1-1	0,54	DG2-1	0,46	DG3-1	0,47		
	DG1-2	0,54	DG2-2	0,44	DG3-2	0,47		
	DG1-3	0,51	DG2-3	0,43	DG3-3	0,46		
	Moy	0,53		0,44		0,47		
cov	3,65%		3,76%		1,06%			
DC	DC1		DC2		DC3		0,74	29,77%
	DC1-1	0,55	DC2-1	0,59	DC3-1	1,13		
	DC1-2	0,67	DC2-2	0,53	DC3-2	1,04		
	DC1-3	0,88	DC2-3	0,60	DC3-3	0,70		
	Moy	0,70		0,58		0,96		
cov	23,72%		6,44%		23,82%			
DP	DP1		DP2		DP3		0,55	13,78%
	DP1-1	0,44	DP2-1	0,68	DP3-1	0,47		
	DP1-2	0,49	DP2-2	0,59	DP3-2	0,52		
	DP1-3	0,56	DP2-3	0,59	DP3-3	0,61		
	Moy	0,50		0,62		0,53		
cov	12,35%		8,33%		13,25%			
EP	EP1		EP2		EP3		0,32	6,39%
	EP1-1	0,34	EP2-1	0,30	EP3-1	0,35		
	EP1-2	0,33	EP2-2	0,30	EP3-2	0,30		
	EP1-3	0,34	EP2-3	0,29	EP3-3	0,33		
	Moy	0,34		0,30		0,32		
cov	0,76%		0,87%		6,45%			

III.7. Protocole expérimental de suivi d'humidité

La deuxième phase du protocole expérimental consiste à placer une partie des poutres en extérieur afin de générer une remontée d'humidité. Malheureusement, cette phase expérimentale a été bloquée par le confinement sanitaire imposé à la mi-mars 2020. Aucune mesure n'a pas été réalisée durant cette période. Cette phase a donc dû être repoussée à la mi-mai correspondant au déconfinement partiel mais avec des conditions climatiques moins favorables. Le Tableau III-29 présente les valeurs d'humidité des poutres du lot Extérieur au 20 mai.

Tableau III-29 : Variation de la teneur en eau du lot EXT au 20 Mai par rapport au 28 Février,

Variation de la teneur en eau : $\Delta w = w_{20/05} - w_{18/02}$							
DG	DG1-1	DG1-2	DG2-1	DG2-2	DG2-3	DG3-2	DG3-3
Δw	1,5%	2,7%	1,4%	1,5%	-0,2%	1,4%	1,3%
DC	DC1-2	DC1-3	DC2-2	DC2-3	DC3-1	DC3-2	DC3-3
Δw	0,6%	0,7%	0,2%	0,3%	-0,3%	-0,3%	-1,4%
EP	DP1-1	DP1-2	DP1-3	DP2-2	DP2-3	DP3-1	DP3-2
Δw	0,6%	1,2%	-1,0%	1,1%	1,2%	1,0%	1,2%
EP	EP1-1	EP1-3	EP2-1	EP2-3	EP3-1	EP3-2	EP3-3
Δw	-0,1%	0,6%	0,0%	-0,2%	0,1%	-0,6%	-2,0%

Malheureusement l'enchaînement des conditions climatiques n'a généré qu'une faible variation de teneur en eau. La saison humide étant malheureusement terminée à Égletons, un deuxième protocole de secours a été mis en place.

À partir du mois de juin, un deuxième de lot de poutres a été placé en extérieur avec un système d'arrosage pour augmenter la reprise d'humidité. Ces deux étapes ont fait l'objet de caractérisations des propriétés diélectriques et de vitesses de propagation d'ondes ultrasonores complétées par une mesure statique du module d'élasticité global par essai mécanique.

Dans ces dernières conditions, un relevé de l'évolution de la teneur en eau moyenne, par pesée, est détaillée dans le Tableau III-30. Ces résultats confirment un léger séchage des poutres lors de la période de confinement, lorsqu'elles étaient stockées en atelier. En revanche, l'augmentation significative de l'humidité entre le 20 et début juillet montre l'efficacité du système d'arrosage en considérant que les valeurs affichées ne sont que des valeurs moyennes avec une réhumidification beaucoup plus marquée en périphérie et en partie supérieure des poutres. Dans ce contexte, il faut souligner que l'hétérogénéité hydrique est certainement plus marquée pour les géométries de plus grandes dimensions.

Tableau III-30 : Évolution de la teneur en eau moyenne des poutres arrosées

Teneur en eau moyenne	Hauteur de section	18 Février	20 Mai	26 Juin	09 Juillet
DC3-3	140mm	13,6%	12,3%	16,0%	16,9%
DP1-3	280mm	13,0%	11,9%	15,3%	17,6%
DG2-3	440mm	11,6%	11,4%	14,5%	--
EP3-3	280mm	14,6%	12,6%	16,6%	18,6%

III.7.1. Évolution des propriétés diélectriques

Afin d'étudier l'impact des variations d'humidité sur la réponse diélectrique des mesures radar, nous souhaitons simplifier l'étude en se limitant à l'étude des champs électriques parallèles aux fibres. En effet, si nous nous focalisons sur les mesures radar dans l'épaisseur de la poutre DP1-3 avec un champ électrique parallèle et perpendiculaire aux fibres, Figure III-51, nous observons que l'amplitude temporel du signal transmis dans l'épaisseur avec un champ électrique parallèle et beaucoup plus sensible que le signal transmis avec un champ électrique perpendiculaire, et ce, accompagné d'un décalage temporel plus marqué.

Nous observons également que les pics du signal réfléchi dans la hauteur sont à la limite de détecter, et ce, accompagné d'un problème de précisément détecter le temps de propagation d'onde réfléchi. Comme décrit ci-dessus dans la partie III.4.4.1, la constante diélectrique dans l'épaisseur et la hauteur sont quasiment identique quelle que soit l'orientation du champ électrique. Pour la suite, nous présenterons l'évolution des propriétés diélectriques en base de variation dans l'épaisseur.

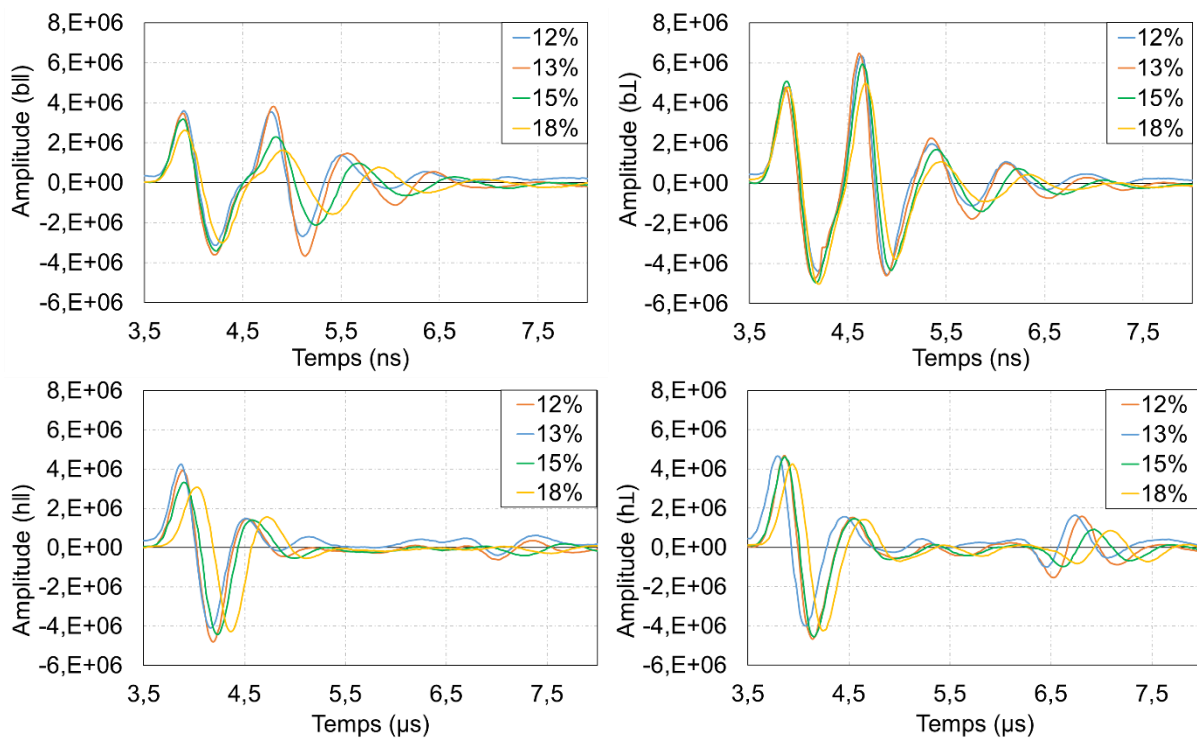


Figure III-51 : Effet de l'humidité sur le signal Radar dans l'épaisseur et la hauteur de DP1-3

III.7.1.1. Évolution des conditions hydriques en période de confinement

La teneur en eau des 24 poutres CND, placées à l'extérieure pendant 3 mois, n'a pas variée de façon significative. Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus sur la poutre DP1-1 en illustration. Entre le 18 février 2020 (état initial) et le 20 mai 2020, l'humidité moyenne a augmenté 0,6%, donc de 13% à 14%, Tableau III-29. Cette variation d'humidité, si elle peut paraître faible, ne reflète qu'un état évolutif moyen. En 3 mois d'exposition, nous pouvons estimer que la cinétique lente de diffusion transversale n'a pas permis au cœur d'atteindre une humidité d'équilibre. Dans ces conditions, la périphérie des éléments a subi de plus fortes variations d'humidité tandis que le cœur n'a pas subi d'évolution significative.

Pourtant, au regard de l'évolution des différentes constantes diélectriques suivant l'épaisseur (trois niveaux b1, b2, b3), Figure III-52, nous observons une franche augmentation de cette constante pouvant atteindre pratiquement 45% (à la hauteur b3, Abscisse=0,4m et 0,8m) en partie supérieure de la poutre sujette plus particulièrement aux intempéries. De plus, nous rappelons que la constante diélectrique est corrélée la quantité d'eau sur le chemin de propagation. Cela a donc bien du sens de parler de corrélation entre sa valeur et l'humidité moyenne sur ce même chemin.

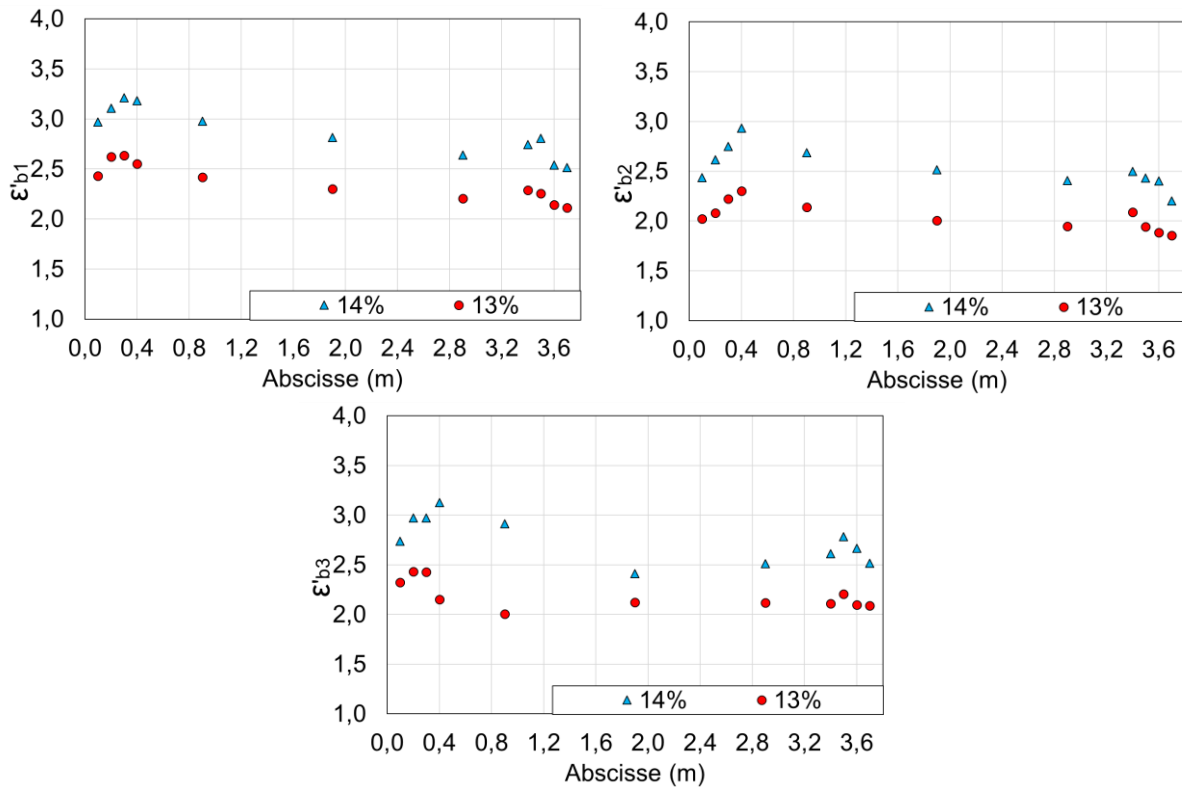


Figure III-52 : ϵ' de DP1-1 à l'état initial et au 20 Mai selon l'épaisseur

III.7.1.2. Protocole modifié de Juin à Aout

Afin de suivre l'humidité des quatre poutres CND arrosées, les mesures radar ont été réalisées avec le même protocole conduit pour la poutre CND P1-1, et ce, à quatre dates correspondant à 4 valeurs moyenne d'humidité selon l'épaisseur. Nous nous limiterons à deux exemples de même géométrie, à savoir les poutres DP1-3 et EP3-3, Figure III-53 et Figure III-54 (Les mesures concernant l'ensemble du lot sont présentées en Annexe 3.2). Concernant les mesures sur l'épaisseur, les variations de constante diélectrique restent limitées. L'arrosage se faisant sur la face supérieure, la mesure sur l'épaisseur ne permet pas toujours d'atteindre, près du bord supérieur, des zones en réhumidification. Nous observons cependant une augmentation sensible au droit des abouts de poutre, là où la diffusion hydrique longitudinale est prédominante et des cinétiques plus rapides. En revanche, les mesures sur la hauteur mettent en exergue une évolution marquée de la constante diélectrique.

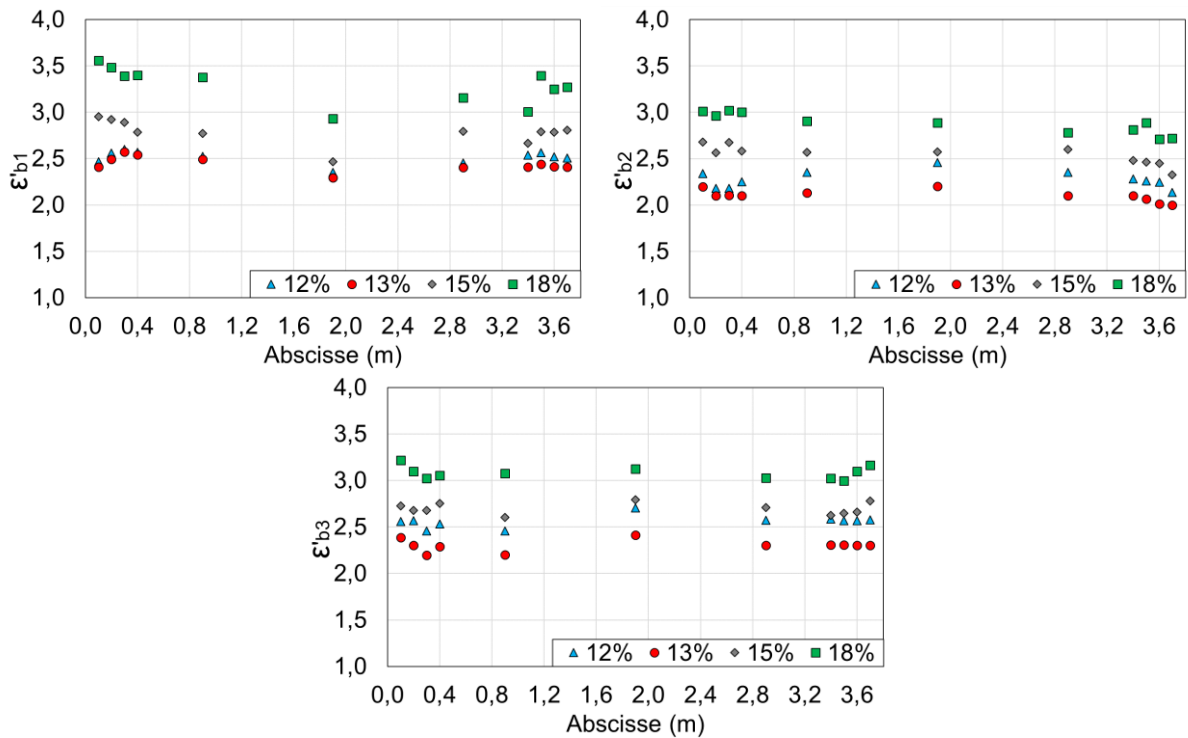


Figure III-53 : Variation de ε' en fonction de l'humidité moyenne (DP1-3)

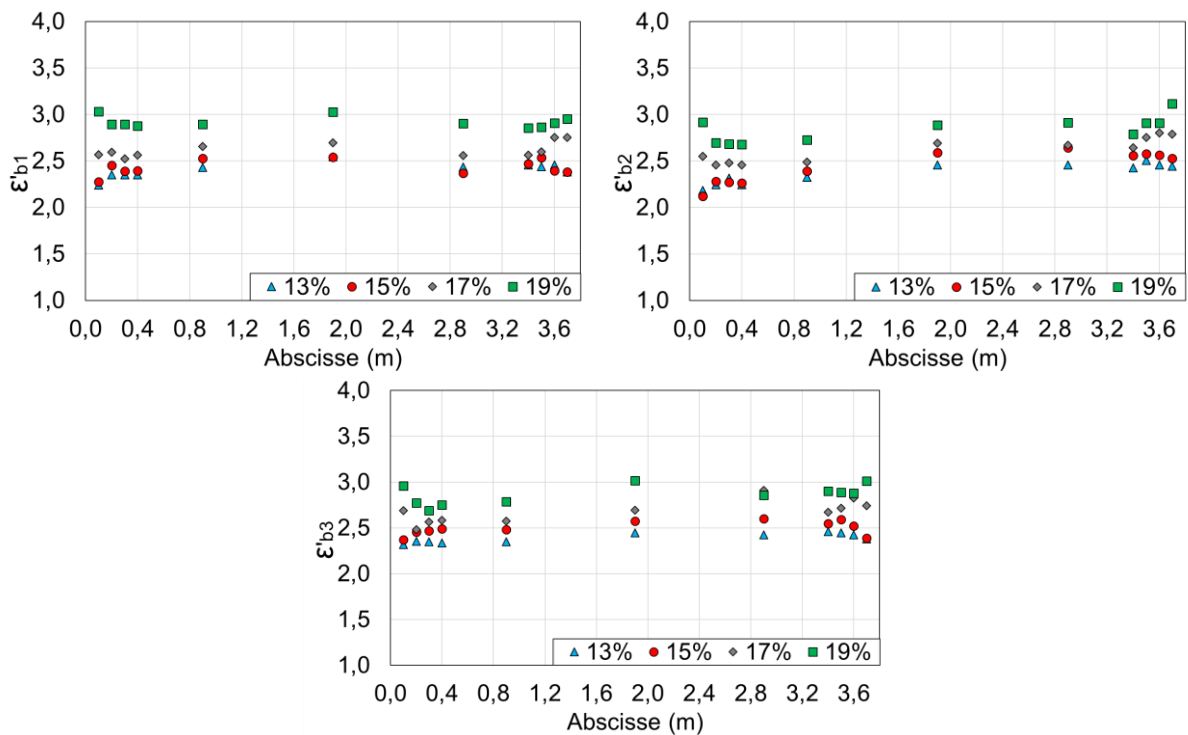


Figure III-54 : Variation de ε' en fonction de l'humidité moyenne (EP3-3)

III.7.1.2.1. Effet de l'humidité

La constante diélectrique ayant une relation avec la quantité d'eau croisée le long du chemin de propagation de l'onde, nous présentons les résultats de variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en eau moyenne. La Figure III-55 présente la corrélation observée sur les quatre typologies de poutres étudiées.

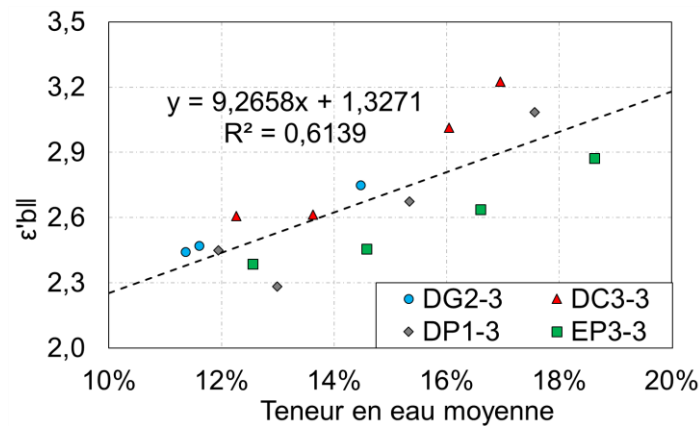


Figure III-55 : $\epsilon'_{||}$ en fonction de la teneur en eau moyenne

III.7.1.2.2. Compléments bibliographiques

Plusieurs résultats expérimentaux ont déjà observé une relation linéaire entre la constante diélectrique et la teneur en eau du bois à l'échelle centimétrique avec une humidité variant de l'état anhydre à 100% (Kabir et al., 1998; Chinh Mai, 2015; Rodríguez-Abad et al., 2010). Un traitement des données issues de la thèse de Chinh Mai (2015), à une échelle décimétrique, nous permet d'obtenir respectivement une corrélation entre constante diélectrique et la teneur en eau moyenne. L'ensemble est intégré à nos mesures pour former le graphique de la Figure III-56, elles présentent un changement de pente au point de saturation des fibres (PSF), au tour de 20%. Notons que ces mesures ont été réalisées avec la même antennes 1,5GHz sur des échantillons d'Épicéa.

$$\epsilon'_{||} = 7,441 \cdot w + 1,6169, R^2 = 0,72, \text{ avec } 0 \leq w \leq 20\% \quad (\text{III-24})$$

$$\epsilon'_{||} = 24,567 \cdot w - 0,9046, R^2 = 0,95, \text{ avec } w > 20\% \quad (\text{III-25})$$

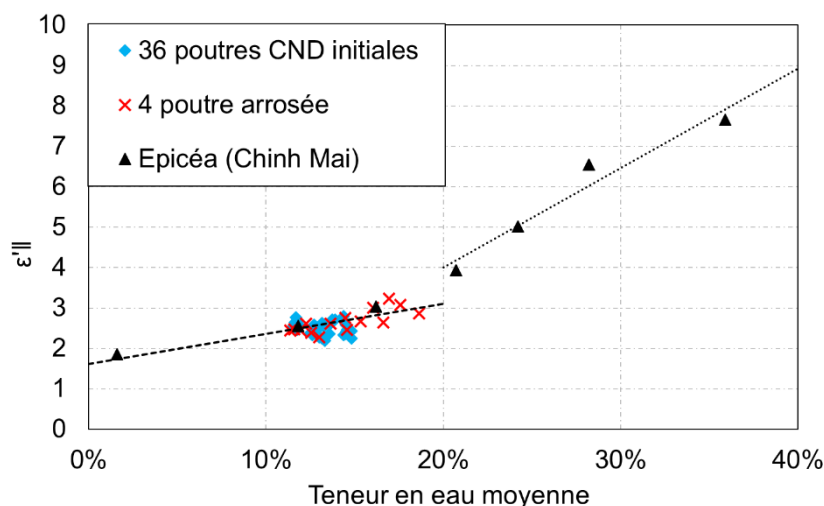


Figure III-56 : $\epsilon'_{||}$ en fonction des teneurs en eau moyenne et données Chinh Mai

Nous observons une bonne concordance entre les deux séries de données, et ce, indépendamment de l'échelle d'étude choisie et de l'essence étudiée. Cela confirme que la constante diélectrique est nettement plus sensible à la quantité d'eau qu'à la matière ligneuse

du bois. Cette étude permet également de montrer une sensibilité différente de la constante diélectrique selon que l'onde croise des molécules d'eau liées ou d'eau libre. Ce processus s'explique par une plus forte polarisation de l'eau libre (en-dessous ou au-dessus du Point de Saturation des Fibres). Cette représentation profonde des pistes afin de calibrer la relation entre constante diélectrique et en multi-échelle du bois afin d'avoir une estimation plus directe de la teneur du milieu étudié.

III.7.2. Évolution des propriétés dynamiques

Nous présentons, dans cette partie, l'impact d'une variation d'humidité moyenne sur les vitesses de propagation d'ondes ultrasonores, et ce, selon les périodes d'exposition présentées précédemment.

III.7.2.1. Protocole initial de Mars à Mai

Comme mentionné dans la partie III.3.2, et la partie III.7.1.1, nous avons conclu que l'état d'humidité de la poutre CND DP1-1 n'a pas manifesté une variation significative. Les graphiques de Figure III-57 montrent respectivement les évolutions du SNR et de la vitesse propagation d'onde P en fonction de la direction de propagation pour l'état initial (teneur en eau égale à 13,3%) et l'état du 20 Mai (teneur en eau égale à 14%). La petite variation de teneur en eau entraîne une petite décroissance de SNR. En revanche, la valeur du SNR est toujours supérieure à 35dB, ce qui montre une bonne qualité du signal. Cela entraîne une diminution de la vitesse de propagation. Bien que cette variation soit dans la plage d'incertitude de mesure, nous montrerons ultérieurement que cette baisse de vitesse s'accorde avec une diminution des propriétés d'élasticité corrélée avec les données de la littérature.

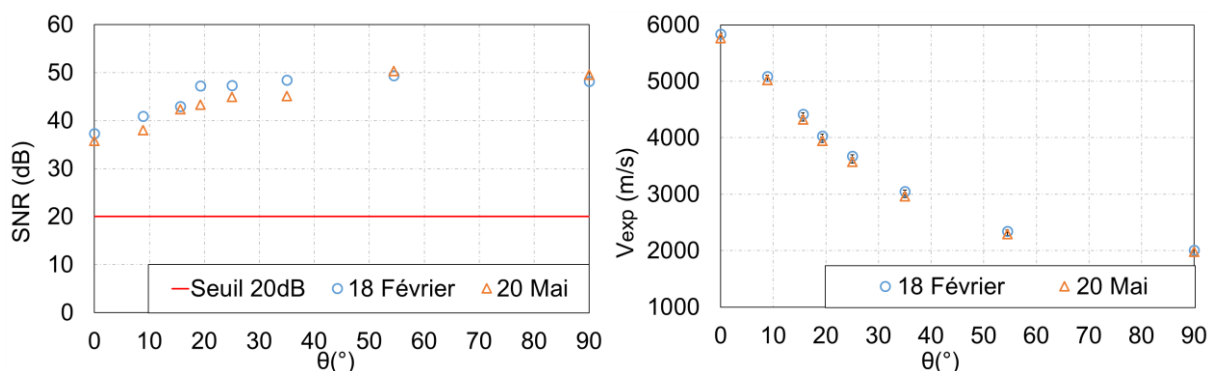


Figure III-57 : Évolution du SNR et de la vitesse en fonction de θ de l'état initial au 20 Mai

III.7.2.2. Protocole modifié de Juin à Aout

Les Tableau III-31, Tableau III-32 et Tableau III-33 renseignent de l'évolution des vitesses moyennes de propagation des ondes ultrasonores, respectivement dans la direction longitudinale, sur la hauteur, et sur l'épaisseur. Nous constatons que la vitesse moyenne d'onde de compression diminue avec une augmentation d'humidité moyenne dans les trois directions. Nous verrons, par la suite, que cette décroissance de vitesse est corrélée à une diminution des modules d'élasticité avec l'humidité moyenne. De Oliveira et al. (de Oliveira et al., 2005; Unterwieser and Schickhofer, 2011) ont constaté que la vitesse longitudinale est plus sensible à l'humidité que les vitesses transversale et radiale. Unterwieser and Schickhofer (Unterwieser and Schickhofer, 2011) ont également proposé une relation linéaire entre la vitesse de propagation d'onde P et la plage de teneur en eau de 10% à 16% pour le bois épicea à l'échelle centimétrique. Cependant, nous ne nous risquons pas, à ce stade de

l'étude, d'effectuer cette corrélation linéaire car l'état hydrique des poutres est hétérogène. Nous reviendrons sur ces observations ultérieurement après en avoir déduit des modules d'élasticité dynamiques.

Tableau III-31 : Vitesse longitudinale moyenne $V_{exp_0^\circ}$ (m/s) vs teneur en eau moyenne

	18 Février	20 Mai	26 Juin	09 Juillet
DC3-3	5863 /13,6%	5909 /12,3%	5857 /16,0%	5827 /16,9%
DP1-3	5923 /13,0%	5978 /11,9%	5830 /15,3%	5817 /17,6%
DG2-3	5827 /11,6%	5832 /11,4%	5802 /14,5%	-
EP3-3	5902 /14,6%	5987 /12,6%	5904 /16,6%	5848 /18,6%

Tableau III-32 : Vitesse longitudinale moyenne $V_{exp_h_90^\circ}$ (m/s) vs teneur en eau moyenne

	18 Février	20 Mai	26 Juin	09 Juillet
DC3-3	2043 /13,6%	2148 /12,3%	2099 /16,0%	2078 /16,9%
DP1-3	2013 /13,0%	2009 /11,9%	1976 /15,3%	1931 /17,6%
DG2-3	2109 /11,6%	2101 /11,4%	2090 /14,5%	-
EP3-3	2232 /14,6%	1970 /12,6%	1908 /16,6%	1880 /18,6%

Tableau III-33 : Vitesse longitudinal moyenne $V_{exp_b_90^\circ}$ (m/s) vs teneur en eau moyenne

	18 Février	20 Mai	26 Juin	09 Juillet
DC3-3	1897 /13,6%	1889 /12,3%	1872 /16,0%	1872 /16,9%
DP1-3	1991 /13,0%	2008 /11,9%	1926 /15,3%	1894 /17,6%
DG2-3	1922 /11,6%	1906 /11,4%	1858 /14,5%	-
EP3-3	1821 /14,6%	1868 /12,6%	1835 /16,6%	1849 /18,6%

En revanche, nous pouvons à ce stade évaluer l'effet du gradient hydrique sur la hauteur des éléments induits par une diffusion verticale descendante due à un arrosage sur les faces supérieures exposées. Cet effet peut être plus ou moins amplifié selon la hauteur des éléments (effet d'échelle). Dans ce contexte, nous focaliserons notre réflexion sur les trois points de mesures $V_{exp_b_i}$ ($i = \{1; 2; 3\}$), Figure III-58.

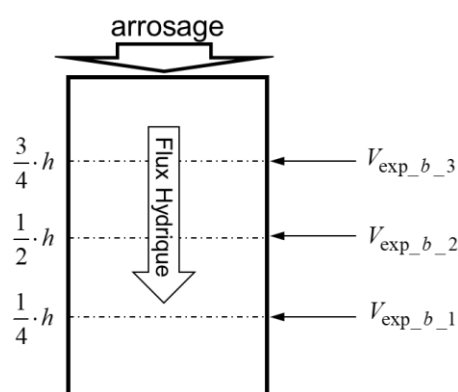


Figure III-58 : Mesures du gradient de vitesses transversales $V_{exp_b_i}$

La Figure III-59 représente le gradient de vitesse transversale, à travers l'épaisseur de la poutre d'épicéa EP3-3 (hauteur de 280mm) aux quatre dates de mesure. Nous observons une évolution différenciée entre les mesures proches de l'extrados et celles proches de l'intrados. Durant la phase de confinement, nous observons une stabilisation à cœur et proche de l'intrados de la vitesse de propagation d'onde vers des valeurs respectives de 1600m/s et 2000m/s. Ces vitesses n'évolueront pas durant la fin du printemps et l'été, preuve que le processus d'arrosage n'a eu d'incidence que sur la partie supérieure de la poutre proche de l'extrados.

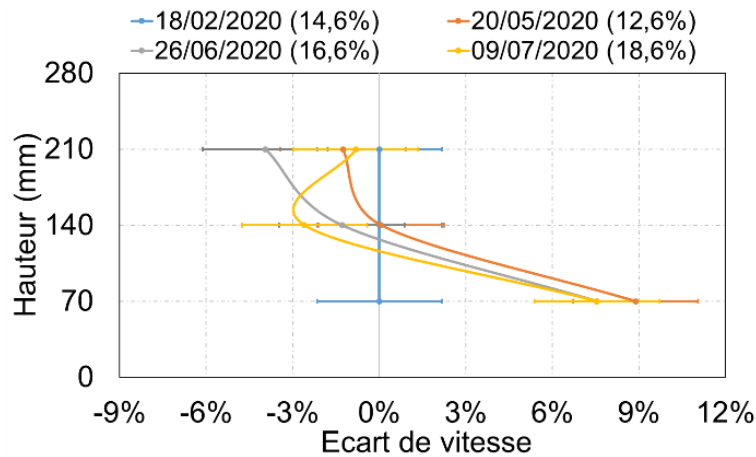


Figure III-59 : Gradients des vitesses de propagation d'onde $V_{exp_b_i}$ (Poutre EP3-3)

À la hauteur de 210mm, nous observons une diminution de la vitesse de propagation d'onde en lien avec une augmentation de l'humidité moyenne. Ceci confirme que l'augmentation mesurée de l'humidité moyenne correspond principalement à une forte augmentation de cette humidité sur le premier quart de la poutre proche de l'extrados. De plus, une diminution de la vitesse confirme une diminution du module dynamique, ce qui est cohérent avec une augmentation d'humidité.

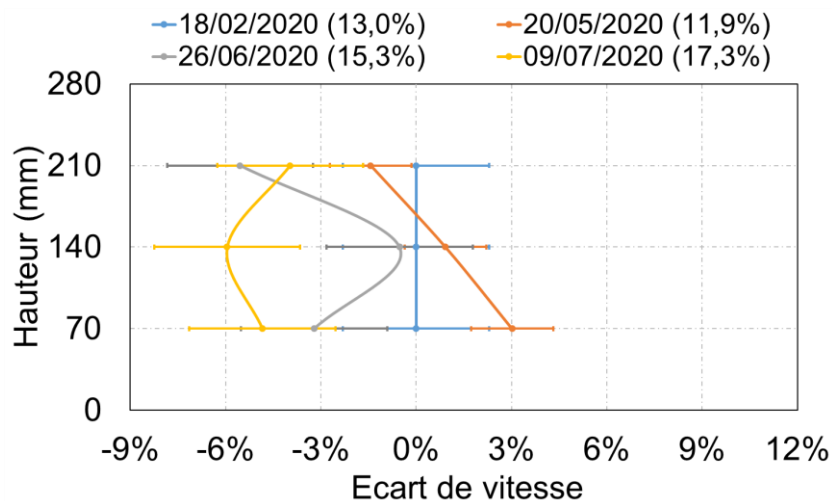


Figure III-60 : Gradients des vitesses de propagation d'onde $V_{exp_b_i}$ (Poutre DP1-3)

Concernant la poutre de même hauteur de Douglas (DP1-3), les observations notées en Figure III-60, les conclusions sont quelques peu différentes dans le sens où les vitesses ne cessent de diminuer durant toute la période. Nous en déduisons que les cinétiques de diffusion ne se sont pas équilibrées après la période de confinement. Le Douglas étant un matériau moins diffusif que l'épicéa, les constantes de temps et les effets d'amortissements sont plus marqués. En revanche, au mois de juillet, les gradients pour l'épicéa et le douglas semblent s'accorder avec une vitesse à cœur de 1600m/s et une vitesse au $\frac{3}{4}$ de la hauteur proche de 2000m/s. Enfin, près de l'extrados, l'évolution des vitesses selon l'humidité moyenne semble plus marquée.

Enfin, concernant la poutre de douglas de 440mm de hauteur, les résultats sont présentés en Figure III-61.

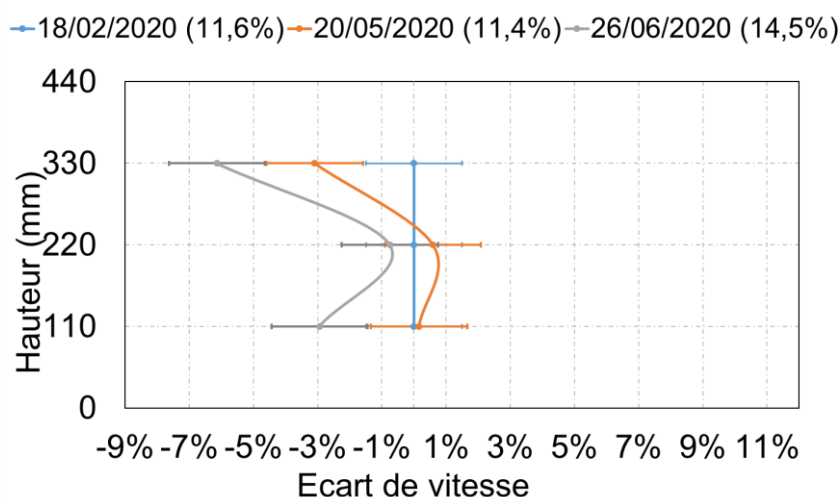


Figure III-61 : Gradients des vitesses de propagation d'onde $V_{exp_b_i}$ (Poutre DG2-3)

Ces résultats nous permettent de faire deux observations. La première est que la mesure de vitesse permet d'estimer la baisse de module d'élasticité près de l'extrados liée à une baisse significative de la vitesse de propagation d'onde ultrasonore. La seconde concerne l'évolution du module à cœur avec une diminution plus marquée durant le mois de juin, cela confirmant un effet retard dû au processus de diffusion. Pourtant, les mesures montrent une tendance à une certaine homogénéisation de cette vitesse, ce qui n'était pas le cas à la date du 18 février.

III.7.3. Évolution du module statique

III.7.3.1. Évolution du module statique en période de confinement

En cohérence avec une évolution peu significative de la teneur en eau de 13,3% à l'état initial et une teneur en eau de 14% au 20 mai, le module longitudinal statique global présente une faible diminution passant de 14,44GPa à 14,37GPa. Bien que cette variation se trouve dans la fourchette d'incertitude de mesures, elle reste cependant cohérente vis-à-vis des variations prédites dans la littérature, à savoir du module d'élasticité à 14% de 14,31GPa.

III.7.3.2. Protocole modifié de Juin à Août

Le Tableau III-34 présente l'évolution du module d'élasticité global en fonction des différents relevés d'humidité moyenne pour les poutres exposées à un arrosage. La variation de teneur en eau moyenne mesurée est comprise entre 5,7% et 3,1%. Ces différences proviennent principalement de l'essence et des différentes hauteurs de poutres si nous supposons que le gradient hydrique va de la surface supérieure vers le cœur (flux hydrique de réhumidification).

Tableau III-34 : Module statique MOE (GPa) vs teneur en eau moyenne

	18 Février	20 Mai	26 Juin	09 Juillet
DC3-3	14,96 /13,6%	14,17 /12,3%	12,67 /16,0%	12,75 /16,9%
DP1-3	12,47 /13,0%	12,23 /11,9%	11,92 /15,3%	12,03 /17,6%
DG2-3	10,28 /11,6%	12,59 /11,4%	12,03 /14,5%	-
EP3-3	11,91 /14,6%	11,78 /12,6%	11,34 /16,6%	10,96 /18,6%

III.8. Conclusion

À ce stade de l'étude, l'évolution du module d'élasticité en fonction de l'humidité est difficilement exploitable, et ce pour plusieurs raisons. Le module global intègre, non seulement, une hétérogénéité d'humidité et donc de module mais également une hétérogénéité de la distribution des contraintes selon Saint Venant. Le calcul du module statique à partir de la flèche globale suppose un module homogène sur la hauteur de la poutre, ce qui est loin d'être le cas lors de nos mesures. De plus, le module statique peut inclure des effets viscoélastiques en relation avec les vitesses de mise en charge. Cela explique, en partie, la faiblesse de ces modules comparés à ce que nous en déduisons, par la suite, via l'exploitation des données fournées par les mesures ultrasonores.

Nous avons établi trois protocoles expérimentaux complémentaires dont l'objectif est de déterminer l'évolution des propriétés d'élasticité d'éléments structuraux et les états hydriques de poutres structurales en bois lamellé-collé. Ainsi, le comportement global, qui intéresse principalement les gestionnaires d'ouvrages, repose sur un essai de flexion 4 points, même si, à ce stade, les résultats semblent difficilement exploitables. Les évolutions spatiale et temporelle des propriétés d'élasticité locales des propriétés d'élasticités sont approchées par des mesures multi-angulaires des vitesses de propagation d'ondes ultrasonores. Dans le but de dissocier les effets d'humidité, des mesures radar permettent d'identifier la constante diélectrique du milieu corrélée aux quantités de molécules d'eau croisées dans un volume sollicité par le champ électromagnétique.

En associant l'ensemble de ces mesures expérimentales au modèle développé dans le second chapitre, nous proposerons dans le chapitre suivant de présenter le protocole de traitement des données en développant un protocole d'analyse inverse permettant d'établir un lien entre les données expérimentales et les résultats issus de la modélisation numérique accompagné d'une correction hydrique dans l'étude des propriétés mécaniques sous gradients hydriques.

Chapitre IV. Protocole de détermination des propriétés matériau à l'échelle d'un élément de structure par optimisation numérique

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de développer une stratégie numérique permettant de caractériser les propriétés d'élasticité sur la base de vitesses expérimentales de propagation d'onde et du modèle analytique développé précédemment.

Deux axes d'auscultation sont étudiés, correspondant à deux niveaux d'inspection possibles. Tout d'abord, un développement d'optimisation est proposé afin d'identifier de la manière la plus robuste possible les caractéristiques élastiques du matériau de manière instantanée. Cette approche s'appuie sur les développements analytiques présentés précédemment, ainsi que sur la base de données expérimentales. Elle permettrait d'identifier la résistance résiduelle des éléments lors d'une étude d'inspection ponctuelle.

Puis, dans un second temps, en s'appuyant cette fois sur les simulations par éléments finis, les effets de l'humidification sont interprétés et confrontés aux mesures CND par radar et ultrasons. Cette deuxième approche ébauchée permettrait, sur la base d'une inspection de référence, d'interpréter le vieillissement des éléments, en se limitant pour l'instant à l'humidification.

Pour la première approche, nous proposons une stratégie numérique n'exploitant que les ondes de compression pour une utilisation à l'échelle d'éléments structuraux.

En raison de l'orthotropie du bois, la dépendance de la vitesse de propagation des ondes en fonction de la direction de propagation contraint à un balayage angulaire des chemins de propagation. Le principe général est de confronter ces ensembles de mesure de vitesses au modèle analytique présenté dans le deuxième chapitre par l'intermédiaire d'une approche par analyse inverse en optimisant les propriétés d'élasticité tridimensionnelles à l'échelle structurelle.

Cependant, malgré la bonne répétabilité de la mesure, les essais montrent des dispersions mesures causées par l'hétérogénéité du milieu (défaut d'alignement de fils, présence de nœuds et de fissures ou encore gradient d'humidité). De plus, dans un cadre plus général et plus concret du diagnostic d'éléments en service, la géométrie étudiée et son accessibilité peuvent induire un balayage angulaire irrégulier. Un protocole de lissage et de compléments de données est alors nécessaire pour parfaire ce protocole de caractérisation.

Pour la deuxième approche temporelle, l'intégration des champs hydriques hétérogènes dans l'analyse des mesures CND montre la capacité de la simulation par éléments finis à s'approcher des perturbations des propriétés élastiques par humidification.

IV.2. Méthodologie d'optimisation des propriétés instantanées

La méthodologie d'optimisation consiste à déterminer les propriétés d'élasticité permettant de minimiser l'écart entre les données d'entrées, qui sont les vitesses expérimentales de propagation d'onde de compression et les vitesses calculées par la formulation analytique. Comme la masse volumique intervient dans la relation entre les vitesses de propagation et les grandeurs élastiques, la démarche est déclinée en deux options, selon que l'on connaît ou non cette information. L'ensemble du processus que nous allons à présent développer repose sur

l'algorithme proposé en Figure IV-1. Les numéros, présents dans la figure, correspondent aux points traités, dans la suite, par ordre chronologique.

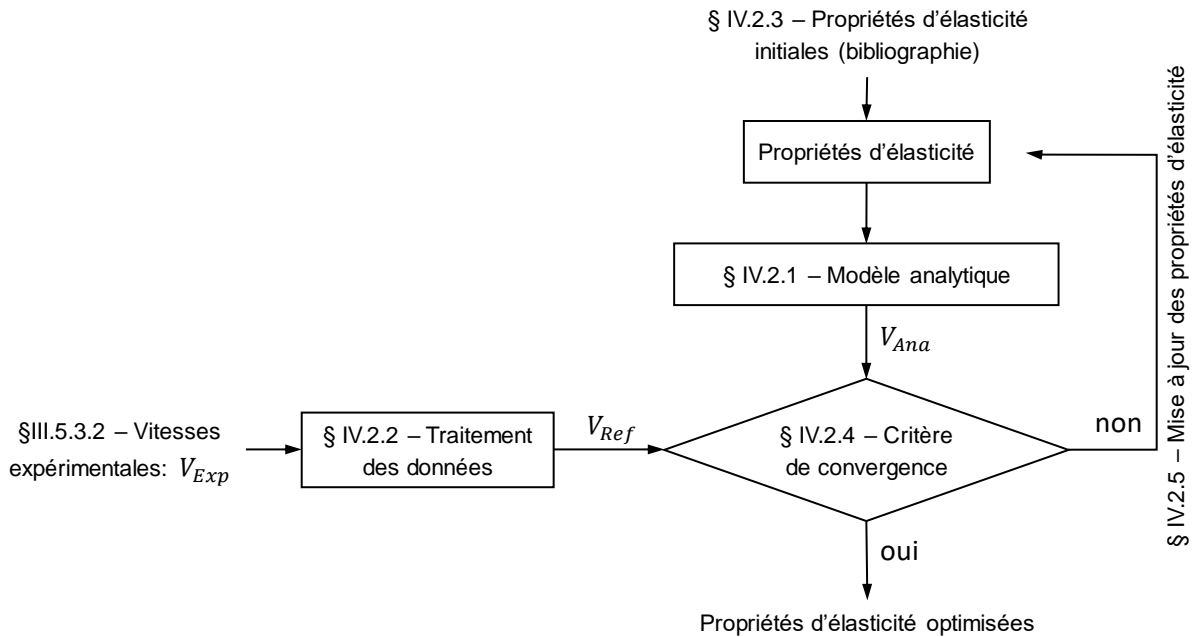


Figure IV-1 : processus général d'optimisation des propriétés d'élasticité

IV.2.1. Adaptation du modèle analytique

Les poutres CND étudiées sont en Douglas ou Épicéa lamellé-collé. Les directions radiale et tangentielle présentent donc des orientations différentes d'une lamelle à l'autre. Cependant, une orientation radiale est présente majoritairement sur la hauteur des poutres. Par déduction, la direction correspondant à l'épaisseur de la poutre présente un alignement plus proche de la direction tangentielle. Dans la suite de l'étude, nous supposons que la direction longitudinale est parallèle à l'axe neutre géométrique de la poutre, Figure IV-2. Ainsi, nous considérerons que la direction de propagation d'onde est orientée suivant \vec{n} faisant un angle θ avec la direction longitudinale \vec{L} . Cet angle permet également de définir un repère local $(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3)$ construit par la rotation d'angle θ du repère principal d'orthotropie $(\vec{L}, \vec{R}, \vec{T})$ autour de l'axe \vec{T} . \vec{X}_1 est alors colinéaire au vecteur \vec{n} .

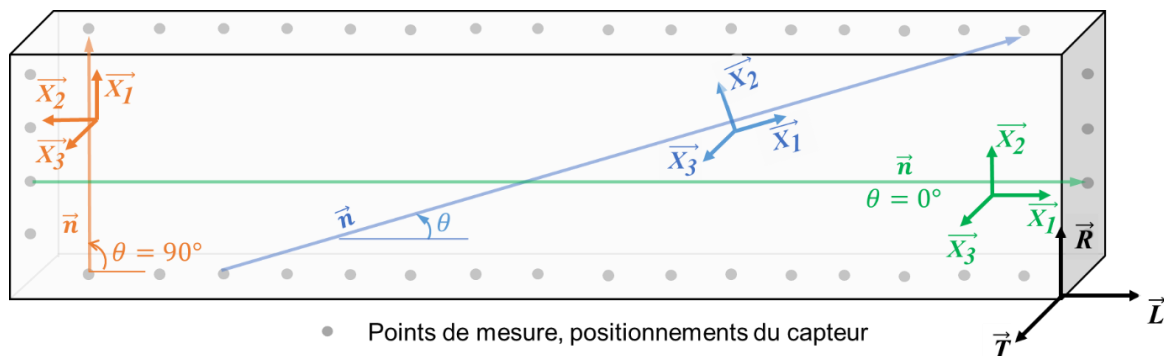


Figure IV-2 : Repère principal d'orthotropie, repère local et direction de propagation d'ondes

Nous avons montré que le long de la direction de propagation, la vitesse des ondes ultrasonores admet la forme analytique V_{Ana} suivante :

$$V_{Ana} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (IV-1)$$

Elle dépend de la rigidité élastique apparente C_{11} vue de la direction $\overline{X_1}$ et de la densité du milieu ρ . C_{11} est définie via les propriétés d'élasticité projetées dans le repère local $(\overline{X_1}, \overline{X_2}, \overline{X_3})$ dont nous rappelons la forme générale :

$$C_{11} = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot (E_3 - E_2 \cdot v_{32}^2)}{E_2 \cdot E_3 - E_1 \cdot E_3 \cdot v_{21}^2 - E_1 \cdot E_2 \cdot v_{31}^2 - E_2^2 \cdot v_{32}^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot v_{21} \cdot v_{32} \cdot v_{31}} \quad (IV-2)$$

Les propriétés d'élasticité locales sont corrélées aux propriétés d'élasticité d'orthotropie selon les expressions rappelées ci-après :

$$E_1 = \frac{1}{\frac{\cos^4 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_R} + \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{G_{LR}} - \frac{2 \cdot v_{RL} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{E_R}}$$

$$E_2 = \frac{1}{\frac{\sin^4 \theta}{E_L} + \frac{\cos^4 \theta}{E_R} + \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{G_{LR}} - \frac{2 \cdot v_{RL} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{E_R}}$$

$$E_3 = E_T$$

$$v_{21} = \frac{\frac{v_{RL}}{E_R} - \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta \cdot \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_R} + \frac{2 \cdot v_{RL}}{E_R} - \frac{1}{G_{LR}} \right)}{\frac{\sin^4 \theta}{E_L} + \frac{\cos^4 \theta}{E_R} + \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{G_{LR}} - \frac{2 \cdot v_{RL} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{E_R}} \quad (IV-3)$$

$$v_{31} = v_{TL} \cdot \cos^2 \theta + v_{TR} \cdot \sin^2 \theta$$

$$v_{23} = \frac{\frac{v_{TL}}{E_T} \cdot \sin^2 \theta + \frac{v_{TR}}{E_T} \cdot \cos^2 \theta}{\frac{\sin^4 \theta}{E_L} + \frac{\cos^4 \theta}{E_R} + \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{G_{LR}} - \frac{2 \cdot v_{RL} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{E_R}}$$

IV.2.2. Traitement des données brutes

Les données expérimentales V_{exp} en termes de vitesse de propagation d'ondes de compression sur une poutre lamellé-collé intègrent un certain nombre d'incertitudes de mesures. Comme précisé précédemment, ces incertitudes proviennent de l'hétérogénéité des échantillons. De plus, dans des conditions d'auscultation in situ, l'accessibilité géométrique des poutres ne permet pas toujours d'avoir une distribution angulaire régulière des vitesses. Ainsi, avant de lancer cet algorithme d'optimisation, nous proposons de traiter les données brutes en les complétant grâce à des modèles empiriques alimentés uniquement par des données expérimentales en vitesses de propagation d'ondes et complètement déconnectées

de données matériau. Dans ce contexte, et au regard de l'état de l'art en la matière, nous avons utilisé trois modèles phénoménologiques proposés par Hankinson, Osgood et Jacoby dont les équations sont rappelées ci-dessous :

$$\text{Modèle d'Hankinson : } \frac{V(0) \cdot V(90)}{V(0) \cdot \sin^n \theta + V(90) \cdot \cos^n \theta} \quad (\text{IV-4})$$

$$\text{Modèle d'Osgood : } \frac{V(0) \cdot V(90)}{V(90) + (V(0) - V(90)) \cdot (\sin^n \alpha + a \cdot \cos^n \alpha) \cdot \sin^n \alpha} \quad (\text{IV-5})$$

$$\text{Modèle de Jacoby : } V(0) \cdot \cos^n \alpha + V(90) \cdot \sin^n \alpha \quad (\text{IV-6})$$

Sur la base de la poutre CND DP1-1, la Figure IV-3 présente les résultats d'optimisation des trois modèles alimentés par les vitesses expérimentales. Deux hypothèses concernant la disponibilité de la plage angulaire des mesures sont retenues. La première considère connues les vitesses particulières pour un angle de 0° et 90° , à savoir respectivement, 5833m/s et 2011m/s . La seconde considère que, comme souvent dans des cas réels, les bouts et les intrados et extrados ne sont pas tous accessibles. Dans ces conditions, nous considérons comme inconnues supplémentaires les vitesses pour 0° et 90° , qui deviennent ainsi deux paramètres supplémentaires à caractériser.

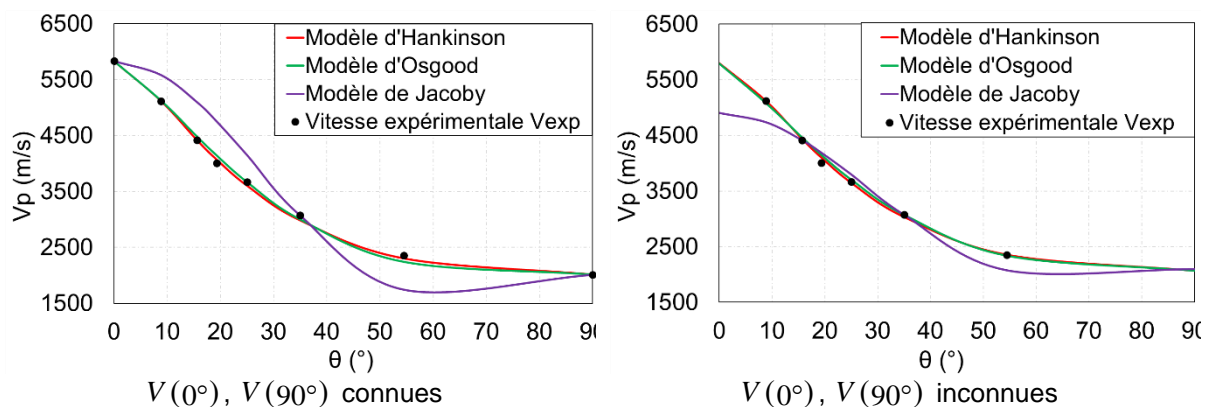


Figure IV-3 : Interpolation des vitesses ultrasonores V_{Exp} en fonction de θ

Les Tableau IV-1 et Tableau IV-2 présentent les paramètres optimisés selon les trois modèles employés. En termes de coefficient de détermination, les résultats montrent que le modèle de Jacoby ne permet pas d'interpoler de façon fiable les résultats expérimentaux, ce qui le met hors concours pour la suite de notre travail. En revanche, les modèles d'Hankinson et d'Osgood donnent des qualités d'interpolations similaires même si, lorsque la vitesse $V(90^\circ)$ n'est pas fournie, les deux modèles peuvent faire des erreurs relatives respectives de 2,7% et 4,38%, ce qui reste cependant raisonnable. Ceci s'explique que, dans l'exemple présenté, nous n'avons pas de données de vitesse pour des angles supérieurs à 55° . En revanche, les paramètres d'Hankinson présentent une meilleure stabilité que celui d'Osgood pour les deux interpolations, ce qui est un gage, pour la suite, de robustesse accrue. C'est pour cette raison que nous retiendrons ce dernier pour la suite de notre travail. Nous prendrons donc, comme référence, les vitesses interpolées et extrapolées que nous noterons $V_{réf}$.

Tableau IV-1 : Paramètres optimisés, $V(0)$ et $V(90)$ connues

Modèle	Paramètres	$V(0^\circ)(m \cdot s^{-1})$	$V(90^\circ)(m \cdot s^{-1})$	R ²
Hankinson	n = 1,55	5833	2011	99,9%
Osgood	n = 1,17 a = 0,55	5833	2011	99,7%
Jacoby	n = 3,66	5833	2011	93,6%

Tableau IV-2 : Paramètres optimisés, $V(0^\circ)$ et $V(90^\circ)$ inconnues

Modèle	Paramètres	$V(0^\circ)(m \cdot s^{-1})$	$V(90^\circ)(m \cdot s^{-1})$	R ²
Hankinson	n = 1,56	5833	2011	99,9%
Osgood	n = 0,95, a = 0,29	5793	2067	99,8%
Jacoby	n = 3,02	4903	2099	93,4%

IV.2.3. Paramètres à optimiser

Les paramètres à optimiser sont les propriétés d'élasticité et la densité du matériau, dans le cas où celle-ci est inconnue. Ils sont employés dans le calcul de la vitesse analytique V_{ana} . Dans notre cas, l'onde P se propageant dans le plan LR, les paramètres sont ρ , E_L , E_R , E_T , G_{LR} , ν_{RL} , ν_{TL} , ν_{RT} . Ils formeront, dans la suite de cette étude, le vecteur \vec{x} à déterminer. Afin d'initier le processus d'optimisation, il s'agit de fixer ces variables d'entrée à des valeurs initiales \vec{x}_0 . Afin de rendre le processus le plus robuste qui soit, ils seront choisis de façon indépendante et aléatoire dans des plages fixées dans la littérature. En revanche, ces variables demeurent indépendantes les unes des autres. Pour illustration, la Figure IV-4 compare les vitesses de référence issues de la poutre DP1-1, corrigées du modèle d'Hankinson, avec les données bibliographiques fournies par Guitard et EL Amri (1987) correspondant au Douglas sans défaut à 12% d'humidité interne dont les valeurs sont indiquées dans Tableau IV-3

Tableau IV-3 : Propriétés élastiques du Douglas, variables d'entrée (Guitard and El Amri, 1987)

$\rho = 448 \text{ kg/m}^3$, $w = 12\%$						
Modules élastiques (GPa)	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
		13,600	0,925	0,680	0,870	1,060
Coefficient de Poisson	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{TR}
	0,036	0,029	0,39	0,292	0,449	0,374

Pour un angle θ variant de 0° à 90° et pour un pas de 5° , la Figure IV-4 présente les vitesses issues de la mesure $V_{réf}$ et la vitesse V_{ana} calculée par notre modèle analytique et alimentée par les données de Guitard et EL Amri. Les résultats mettent en évidence des écarts non négligeables qui demandent à être corrigés. En effet, les données bibliographiques reposent sur des échantillons sans défauts à humidité stabilisée. Concernant nos mesures expérimentales, elles intègrent une hétérogénéité matériau du fait, d'une part, d'un effet d'échelle, et d'autre part de l'utilisation d'une poutre lamellé-collé. La masse volumique,

connue dans ce cas, est également une source d'écart. Cependant, ce calcul initial va être le point de départ d'un processus itératif d'optimisation des données d'entrée.

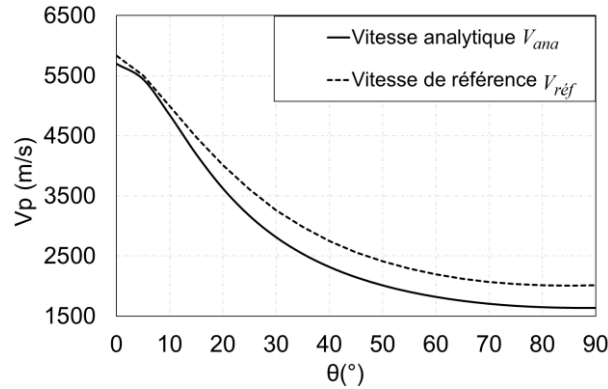


Figure IV-4 : Vitesse V_{ref} et V_{ana} (Guitard) en fonction de θ

IV.2.4. Choix du critère de convergence

Cette caractérisation repose sur un algorithme d'optimisation des propriétés d'entrée afin de minimiser l'écart relatif $\delta(\theta, \vec{x})$ entre la vitesse analytique $V_{ana}(\theta, \vec{x})$ et la vitesse de référence $V_{ref}(\theta)$, et ce, pour chaque angle de propagation θ et un vecteur \vec{x} dont les composantes sont les propriétés à optimiser, à savoir 7 propriétés d'élasticité et la densité :

$$\delta(\theta, \vec{x}) = \frac{|V_{ana}(\theta, \vec{x}) - V_{ref}(\theta)|}{V_{ref}(\theta)} \quad (IV-7)$$

Le principe d'optimisation est de déterminer une valeur particulière du vecteur \vec{x}_{sol} (vecteur solution) qui minimisera l'écart relatif $\delta(\theta, \vec{x}_{sol})$. Pour cela, nous avons employé l'outil Solveur de Microsoft Excel basé sur la méthode de Newton Globale dont l'algorithme corrige le vecteur \vec{x} afin de minimiser, itération après itération l'écart relatif $\delta(\theta, \vec{x})$, évoqué dans l'expression (III-7), tel que :

$$\delta(\theta, \vec{x}_n) - \lambda_n \cdot \delta(\theta, \vec{x}_{n-1}) = 0 \quad (IV-8)$$

La méthode de Newton Globale propose une trajectoire en créant des itérations successives (\vec{x}_n, λ_n) jusqu'à obtenir une convergence théorique à l'incrément n^* telle que :

$$\delta(\theta, \vec{x}_{n^*}) = 0 \text{ et } \lambda_{n^*} = 0 \quad (IV-9)$$

La limite de la méthode réside en la définition de l'écart relatif $\delta(\theta, \vec{x})$ dans le sens où il doit rendre un scalaire pour plusieurs valeurs d'angle θ . Plusieurs déclinaisons de l'écart relatif sont étudiées :

- a. $\delta(0^\circ, \vec{x})$: privilégie la caractérisation de E_L
- b. $\delta(90^\circ, \vec{x})$: privilégie la caractérisation de E_R
- c. $\delta_{\max}(\vec{x}) = \max_{i \in [1, N]} \delta(\theta_i, \vec{x})$: Écart maximum sur l'étendue angulaire θ_i

- d. $\delta_{moy}(\vec{x}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \delta(\theta_i, \vec{x})$: Écart moyen sur l'étendue angulaire θ_i
- e. $\delta_{total}^{max}(\vec{x}) = \delta(0^\circ, \vec{x}) + \delta(90^\circ, \vec{x}) + \delta_{max}(\vec{x})$: Écart combinant les déclinaisons a, b et c
- f. $\delta_{total}^{moy}(\vec{x}) = \delta(0^\circ, \vec{x}) + \delta(90^\circ, \vec{x}) + \delta_{moy}(\vec{x})$: Écart combinant les déclinaisons a, b et d

Le Tableau IV-4 montre que, quelle que soit la déclinaison retenue, les résultats d'optimisation obtenus avec un pas angulaire de 5° montrent de bonnes corrélations.

Tableau IV-4 : Corrélation entre $V_{ana}(\theta, x)$ et $V_{r\overline{ref}}(\theta)$ selon $\delta(\theta, \vec{x})$

$\delta(0^\circ, \vec{x})$	$\delta(90^\circ, \vec{x})$	$\delta_{max}(\vec{x})$	$\delta_{moy}(\vec{x})$	$\delta_{total}^{max}(\vec{x})$	$\delta_{total}^{moy}(\vec{x})$
99,66%	99,54%	99,69%	99,87%	99,87%	99,91%

Pourtant, en observant les résultats de la Figure IV-5 à la Figure IV-7, le tracé des vitesses de référence et analytique montre des écarts significatifs. Les vitesses exprimées pour un angle de 0° et 90° sont directement corrélées au module d'élasticité longitudinal et transversal en minimisant les couplages avec les effets de cisaillement. Ces deux vitesses représentent de bonnes références pour identifier l'écart relatif à employer par la suite.

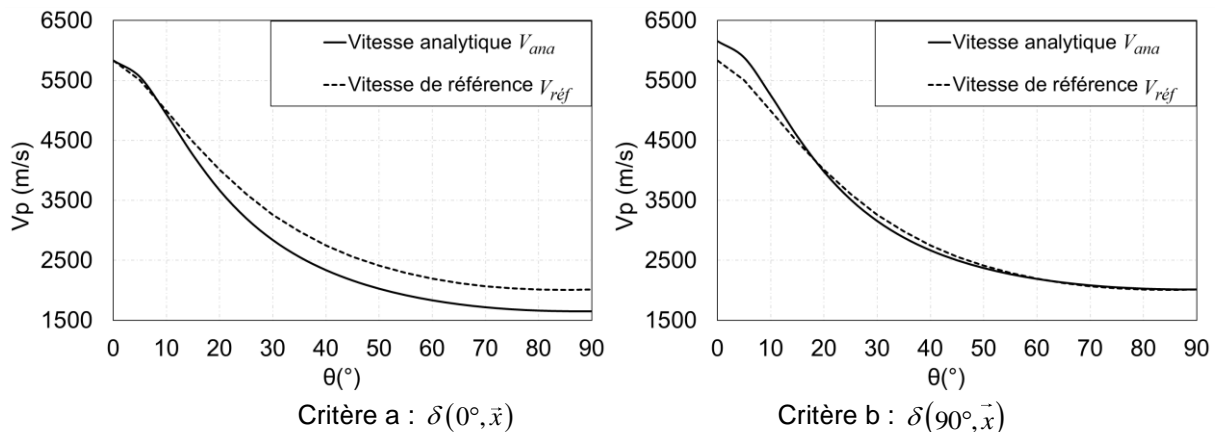


Figure IV-5 : Résultats d'optimisation selon les déclinaisons a et b

Regardons, dans un premier temps, les deux critères se focalisant soit sur la vitesse à 0° ou sur la vitesse à 90° . Nous observons effectivement que le niveau de corrélation est excellent sur les angles visés tout en ayant une dérive pour les autres angles, Figure IV-5.

Regardons, à présent, les deux critères globaux basé sur l'écart relatif maxi et moyen sur l'étendue angulaire globale, respectivement c et d. La Figure IV-6. Nous observons une meilleure corrélation sur l'ensemble de la plage angulaire avec des écarts résiduels pour les deux angles extrêmes.

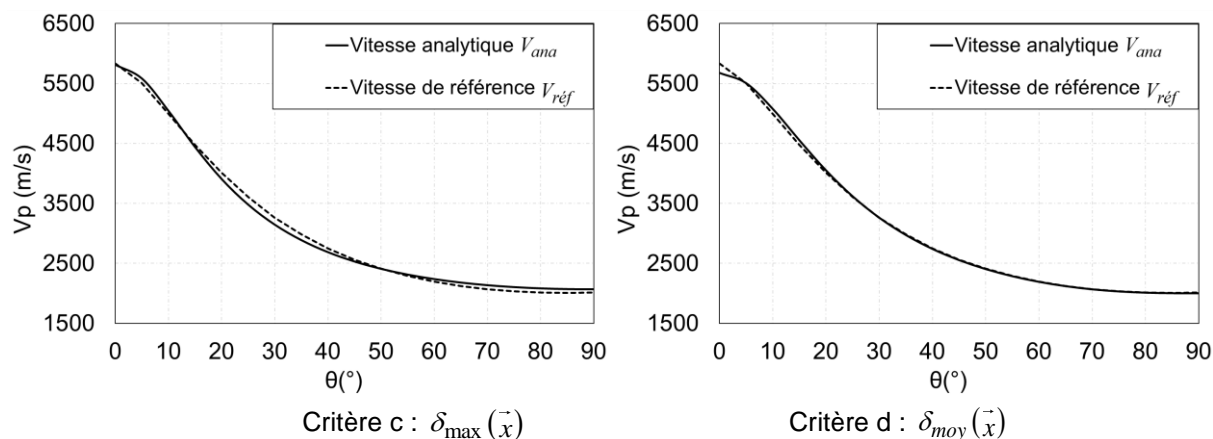


Figure IV-6 : Résultats d'optimisation selon les déclinaisons globales c et d

Enfin, les deux déclinaisons (e et f) montrent un meilleur compromis pour, d'une part, avoir une minimisation raisonnable sur l'ensemble de l'étendue angulaire et, d'autre part, très bien corrélérer les vitesses pour 0° et 90° , et ce, avec un léger avantage pour le critère f, ce qui confirme les résultats du Tableau IV-4.

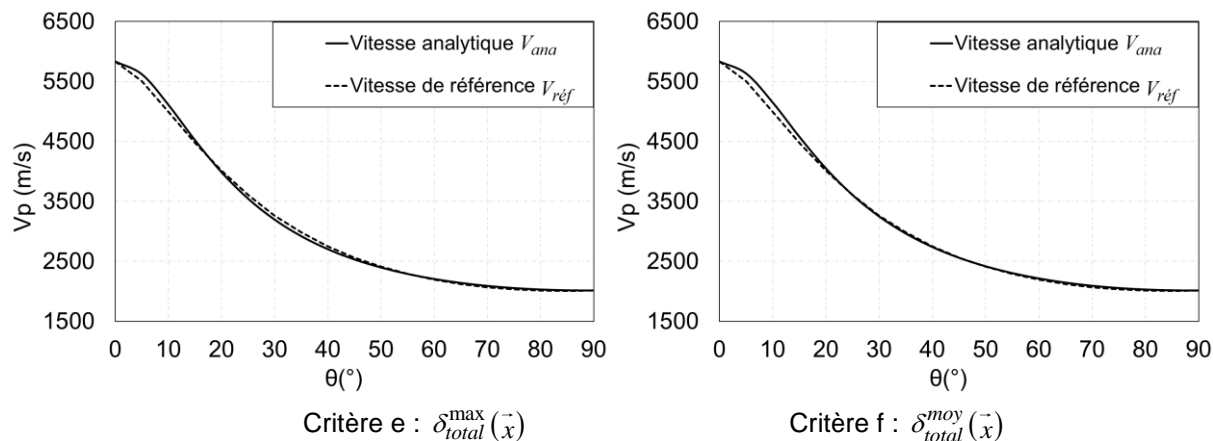


Figure IV-7 : Résultats d'optimisation selon les combinaisons e et f

Finalement, en se référant aux résultats chiffrés du Tableau IV-5, nous retiendrons le critère f pour l'ensemble des traitements expérimentaux.

Tableau IV-5 : Efficacité des critères d'optimisation

	$V_{ana}(0^\circ) - V_{ref}(0^\circ)$ (erreur)	$V_{ana}(90^\circ) - V_{ref}(90^\circ)$ (erreur)
$\delta(0^\circ, \vec{x})$	5833m/s – 5833m/s (0,00%)	1652m/s – 2011m/s (17,9%)
$\delta(90^\circ, \vec{x})$	6153m/s – 5833m/s (5,49%)	2011m/s – 2011m/s (0,00%)
$\delta_{\max}(\vec{x})$	5811m/s – 5833m/s (0,38%)	2069m/s – 2011m/s (2,88%)
$\delta_{\text{moy}}(\vec{x})$	5678m/s – 5833m/s (2,66%)	2002m/s – 2011m/s (0,45%)
$\delta_{\text{total}}^{\max}(\vec{x})$	5832m/s – 5833m/s (0,02%)	2011m/s – 2011m/s (0,00%)
$\delta_{\text{total}}^{\text{moy}}(\vec{x})$	5833m/s – 5833m/s (0,00%)	2011m/s – 2011m/s (0,00%)

L'algorithme de minimisation va donc rechercher un optimum de l'écart relatif suivant le critère f . Cependant, une des faiblesses des algorithmes de minimisation est liée à la présence possible de minima locaux. Ce risque est, de plus, accentué lorsque la dimension du vecteur \vec{x} à optimiser est importante. Dans notre cas, ce vecteur comporte 8 composantes, ce qui représente une dimension considérable. Même si nous avons pris le soin de sélectionner un écart relatif couplé et contraignant, la méthode ne nous met pas à l'abri d'une convergence vers une solution autre que la solution recherchée. Ces minimums locaux peuvent cependant être détectés en étudiant les résultats de corrélation en testant plusieurs tirages aléatoires de vecteurs initiaux \vec{x}_0 (dans des plages physiquement et expérimentalement réalistes) et en analysant les résultats respectifs d'optimisation.

IV.2.5. Robustesse vis-à-vis des variables d'entrée

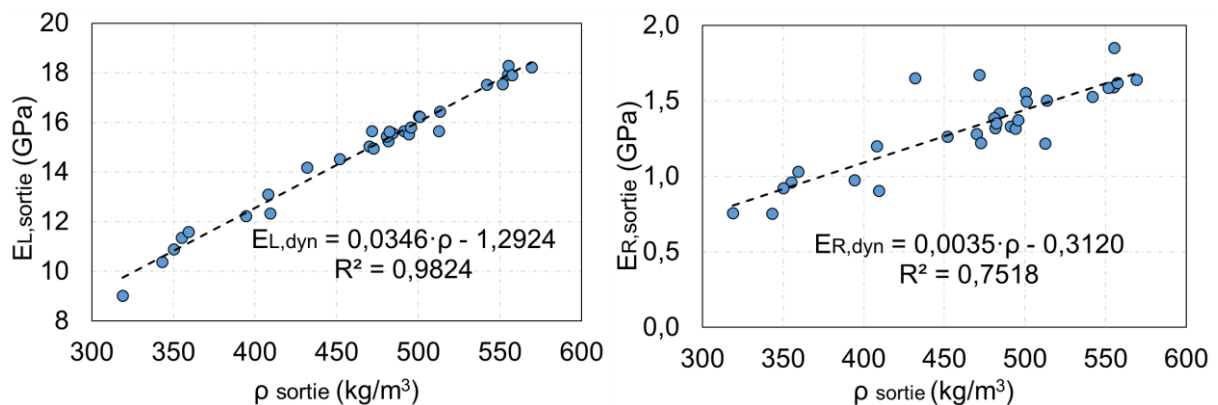
Dans un premier temps, 30 tirages aléatoires de \vec{x}_0 sont effectués en accord avec les plages de données présentées dans le Tableau IV-6. Les 8 paramètres sont tirés au sort de façon indépendante.

Tableau IV-6 : Plages de données pour le tirage aléatoire de \vec{x}_0

	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}	ρ
Min	9,47 GPa	0,67 GPa	0,39 GPa	0,41 GPa	0,11	0,02	0,02	300 kg/m ³
Max	25,4 GPa	2,37 GPa	1,14 GPa	1,79 GPa	0,41	0,06	0,04	800 kg/m ³

IV.2.5.1. Relation entre modules d'élasticité et masse volumique

Comme le montre l'expression (IV-1), les vitesses mesurées ne vont pas permettre de déterminer une solution unique des propriétés d'élasticité car la densité a un rôle indépendant dans la définition de la vitesse analytique de propagation. En revanche, l'algorithme d'optimisation permet d'en déduire des corrélations linéaires entre modules d'élasticité et densité. La Figure IV-8 montre une très bonne corrélation vis-à-vis du module d'élasticité longitudinal E_L et de cisaillement dans le plan LR G_{LR} . Cependant, la corrélation se dégrade concernant les modules d'élasticité radial et tangentiel. Cela s'explique par un repère d'orthotropie transverse cylindrique dans lequel l'orientation des sens radial et tangentiel n'est pas homogène. Enfin, les corrélations vis-à-vis des coefficients de Poisson ne sont pas représentatives car il ne s'agit que de ratios de rigidité ou de complaisance. De plus, ce sont des coefficients que l'on peut supposer constants.



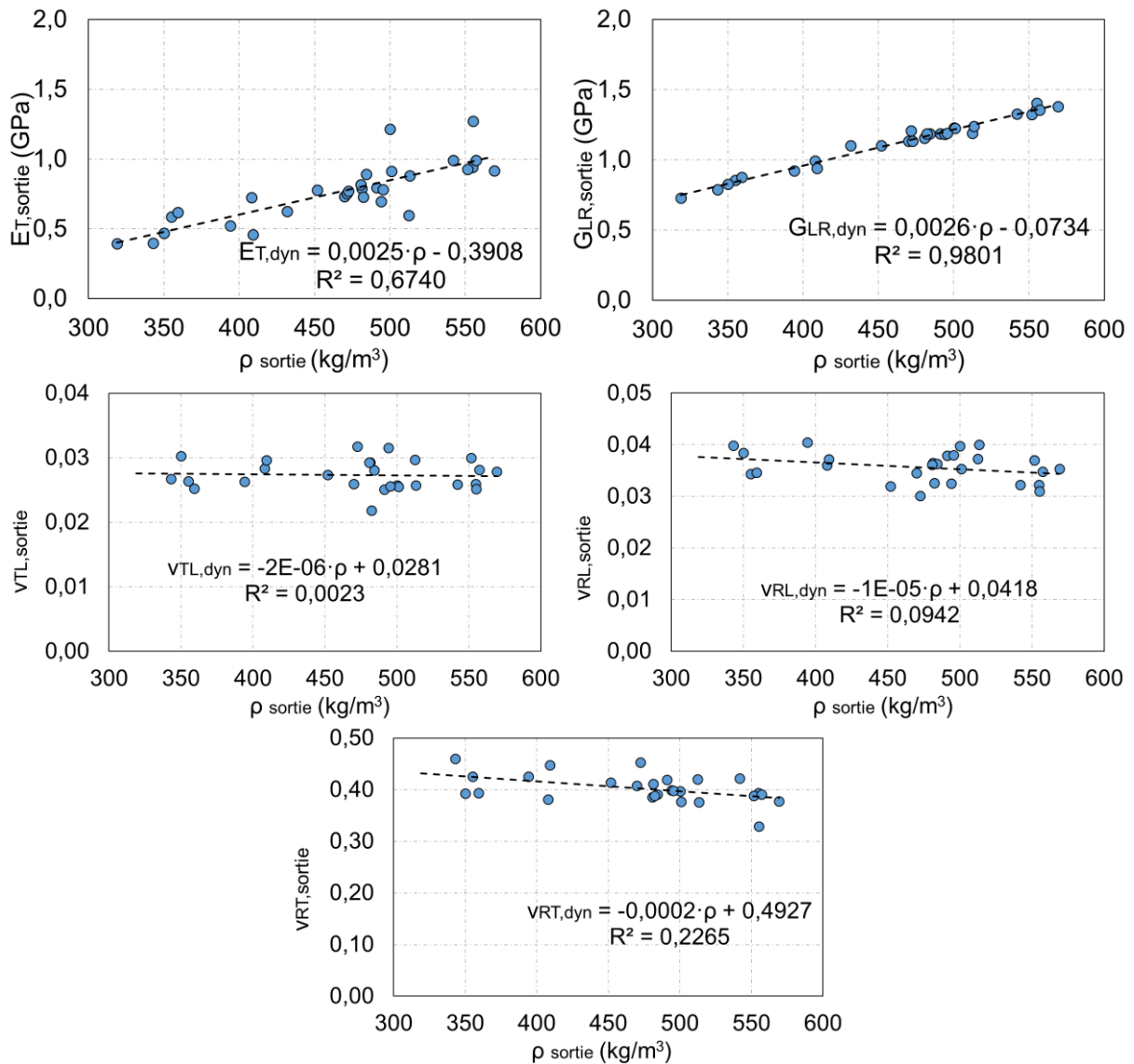


Figure IV-8 : Propriétés élastiques de sortie en fonction de la masse volumique (Poutre DP1-1)

Ces résultats permettent de dessiner deux stratégies de caractérisation :

1. Dans le cadre d'une approche laboratoire, ce qui est notre cas dans cette étude, la masse volumique moyenne des poutres est mesurée. À partir des différentes droites de corrélation, elle permet d'identifier les différentes composantes d'élasticité. Dans le cas de la poutre DP1-1, la masse volumique mesurée étant de 522kg/m^3 , nous obtenons les propriétés d'élasticités précisés dans le Tableau IV-7.

Tableau IV-7 : Modules d'élasticité dynamiques de DP1-1

$\rho_{\text{mesur?}}$	$E_{L,\text{dyn}}$	$E_{R,\text{dyn}}$	$E_{T,\text{dyn}}$	$G_{LR,\text{dyn}}$	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}
522kg/m^3	16,8GPa	1,52GPa	0,91GPa	1,28GPa	0,39	0,03	0,04

2. Dans le cadre d'une approche d'inspection sur site, la masse volumique n'est pas connue. La classe de résistance mécanique de l'élément permet d'identifier une valeur moyenne de la masse volumique. Il peut être également envisager de réaliser un prélèvement ou les rayons X in-situ pour en évaluer une masse volumique locale humide et sèche.

IV.2.5.2. Optimisation du nombre de tirage

Afin d'optimiser le protocole de caractérisation, nous proposons d'étudier le nombre de tirage aléatoire optimum. À partir des mesures précédentes, nous choisissons, de façon aléatoire, n valeurs de $\overline{x_0}$ fournies par l'algorithme d'optimisation afin d'étudier les conséquences sur les droites de corrélation (n variant de 1 à 30). Sur la base du module d'élasticité longitudinal, le paragraphe précédent a montré qu'il était corrélé à la densité de la façon suivante :

$$E_{L,dyn} = A \cdot \rho + B \quad (IV-10)$$

Pour chaque n choisi, 4 tirages aléatoires et indépendants sont réalisés. Sur la base de la poutre DP1-1, la Figure IV-9 présente l'évolution des coefficients de corrélation A et B en fonction du nombre de tirages N . Ces premiers résultats mettent en exergue une convergence normale pour n tendant vers 30. Cependant, si nous nous basons sur ces seuls résultats, nous pourrions conclure à une faible robustesse de la méthode dans le sens où les 4 tirages montrent de légères différences sur le résultat.

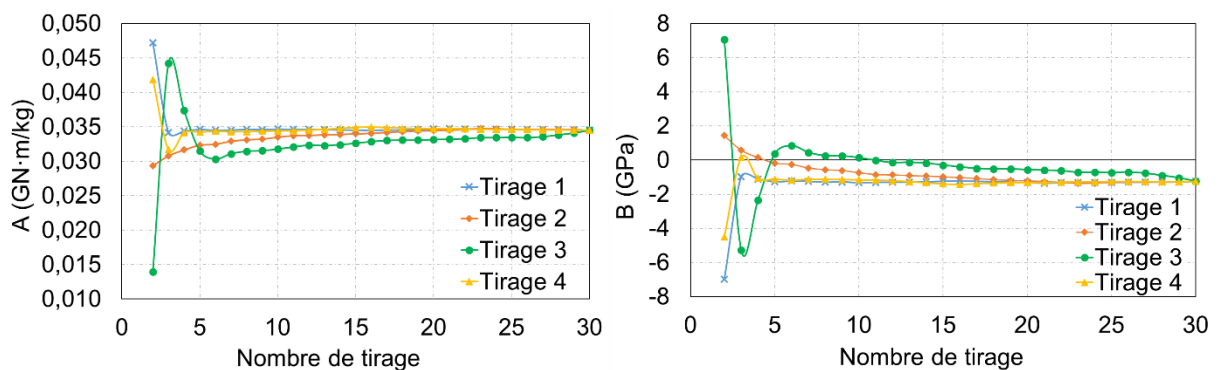


Figure IV-9 : Valeur de A et B en fonction du nombre de tirages n

Mais lorsque nous recalculons le module d'élasticité longitudinal en injectant la masse volumique mesurée, les résultats sont nettement plus encourageants, Figure IV-10. Ils montrent une convergence à partir de 10 tirages avec des écarts relatifs inférieurs à 2% par rapport au module calculé à partir de 30 tirages.

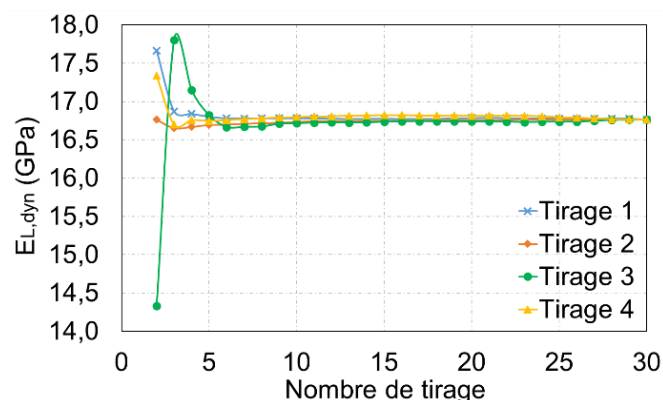


Figure IV-10 : Module d'élasticité longitudinale en fonction du nombre de tirages n

IV.2.6. Identification des propriétés mécaniques à l'état initial

Nous appliquons la méthodologie d'optimisation sur l'ensemble des géométries de poutres (DG, DC, DP et EP). La masse volumique des poutres sont obtenues par une pesée globale. L'ensemble des paramètres d'élasticité sont optimisés sur la base de 10 tirages aléatoires. Les résultats sont présentés par géométrie dans le Tableau IV-8 au Tableau IV-11. Les lignes vertes correspondent aux échantillons retenus, par la suite, pour les phases de réhumidification.

Tableau IV-8 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres DG

Éprouvettes	$\rho_{mesur?}$ (kg/m ³)	$E_{L,dyn}$ (GPa)	$E_{R,dyn}$ (GPa)	$E_{T,dyn}$ (GPa)	$G_{LR,dyn}$ (GPa)	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}
DG1-1	525	17,2	1,58	0,89	1,25	0,36	0,03	0,04
DG1-2	513	15,9	1,55	0,87	1,23	0,40	0,03	0,03
DG1-3	537	18,4	1,67	0,97	1,30	0,41	0,03	0,03
Moyenne DG1	525	17,2	1,60	0,91	1,26	0,39	0,03	0,03
DG2-1	504	16,9	1,57	0,88	1,22	0,38	0,03	0,04
DG2-2	515	16,9	1,67	0,88	1,45	0,37	0,03	0,04
DG2-3	498	16,0	1,54	0,87	1,22	0,40	0,03	0,03
Moyenne DG2	506	16,6	1,59	0,88	1,29	0,38	0,03	0,04
DG3-1	511	16,6	1,56	0,89	1,18	0,40	0,03	0,04
DG3-2	507	16,3	1,63	0,91	1,31	0,39	0,03	0,03
DG3-1	511	16,5	1,54	0,88	1,22	0,41	0,03	0,04
Moyenne DG3	510	16,5	1,58	0,89	1,24	0,40	0,03	0,04
Moyenne	513	16,7	1,59	0,89	1,27	0,39	0,03	0,03
COV	2,3%	4,5%	3,3%	3,6%	6,3%	4,4%	1,1%	4,8%

Tableau IV-9 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres DC

Éprouvette	$\rho_{mesur?}$ (kg/m ³)	$E_{L,dyn}$ (GPa)	$E_{R,dyn}$ (GPa)	$E_{T,dyn}$ (GPa)	$G_{LR,dyn}$ (GPa)	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}
DC1-1	467	13,2	1,56	0,82	1,33	0,40	0,03	0,04
DC1-2	487	15,0	1,69	0,93	1,63	0,39	0,03	0,03
DC1-3	514	17,0	1,81	1,01	1,45	0,40	0,03	0,03
Moyenne DC1	489	15,1	1,69	0,92	1,47	0,40	0,03	0,03
DC2-1	552	19,0	1,7	1,04	1,4	0,37	0,03	0,03
DC2-2	506	16,5	1,89	1,04	1,51	0,37	0,03	0,04
DC2-3	506	15,7	1,48	0,88	1,34	0,39	0,03	0,04
Moyenne DC2	521	17,0	1,69	0,99	1,42	0,38	0,03	0,04
DC3-1	538	17,9	1,84	1,08	1,39	0,38	0,03	0,03
DC3-2	525	17,2	1,8	1,02	1,51	0,38	0,03	0,03
DC3-3	506	16,4	1,52	0,88	1,28	0,40	0,03	0,03
Moyenne DC3	523	17,2	1,72	0,99	1,39	0,39	0,03	0,03
Moyenne	511	16,42	1,7	0,97	1,43	0,39	0,03	0,03
COV	5,0%	10,2%	8,8%	9,6%	7,7%	3,3%	1,8%	4,1%

Tableau IV-10 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres DP

Éprouvettes	$\rho_{mesur?}$ (kg/m ³)	$E_{L,dyn}$ (GPa)	$E_{R,dyn}$ (GPa)	$E_{T,dyn}$ (GPa)	$G_{LR,dyn}$ (GPa)	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}
DP1-1	522	16,8	1,52	0,91	1,28	0,39	0,03	0,04
DP1-2	509	16,9	1,49	0,87	1,02	0,41	0,03	0,04
DP1-3	508	16,8	1,50	0,88	1,10	0,41	0,03	0,04
Moyenne DP1	513	16,8	1,50	0,89	1,13	0,40	0,03	0,04
DP2-1	547	18,5	1,52	0,91	1,09	0,40	0,03	0,04
DP2-2	532	18,1	1,56	0,95	1,13	0,39	0,03	0,04
DP2-3	556	18,1	1,58	0,90	1,21	0,39	0,03	0,03
Moyenne DP2	545	18,2	1,55	0,92	1,14	0,39	0,03	0,04
DP3-1	552	18,4	1,63	1,01	1,31	0,39	0,03	0,04
DP3-2	543	18,3	1,62	0,97	1,21	0,36	0,03	0,04
DP3-3	565	19,2	1,60	1,00	1,17	0,40	0,03	0,03
Moyenne DP3	553	18,6	1,62	1,00	1,23	0,38	0,03	0,04
Moyenne	537	17,9	1,56	0,94	1,17	0,39	0,03	0,04
COV	3,8%	4,8%	3,4%	5,5%	8,1%	4,2%	1,1%	3,7%

Tableau IV-11 : Propriétés d'élasticité obtenues pour les poutres EP

Éprouvettes	$\rho_{mesur?}$ (kg/m ³)	$E_{L,dyn}$ (GPa)	$E_{R,dyn}$ (GPa)	$E_{T,dyn}$ (GPa)	$G_{LR,dyn}$ (GPa)	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}
EP1-1	460	14,8	1,33	0,80	1,10	0,38	0,03	0,04
EP1-2	444	13,9	1,27	0,75	1,09	0,38	0,03	0,04
EP1-3	459	15,1	1,36	0,79	1,04	0,38	0,03	0,04
Moyenne EP1	454	14,6	1,32	0,78	1,08	0,38	0,03	0,04
EP2-1	449	14,5	1,34	0,76	1,03	0,37	0,03	0,04
EP2-2	426	13,1	1,15	0,71	1,10	0,39	0,03	0,03
EP2-3	441	14,0	1,28	0,76	1,04	0,38	0,03	0,04
Moyenne EP2	439	13,9	1,26	0,74	1,06	0,38	0,03	0,04
EP3-1	455	13,8	1,37	0,78	1,15	0,39	0,03	0,04
EP3-2	436	13,9	1,21	0,72	1,03	0,39	0,03	0,04
EP3-3	465	15,3	1,30	0,81	1,10	0,38	0,03	0,04
Moyenne EP3	452	14,3	1,29	0,77	1,10	0,38	0,03	0,04
Moyenne	448	14,3	1,29	0,76	1,08	0,38	0,03	0,04
COV	2,8%	5,0%	5,6%	4,6%	4,1%	1,8%	0,5%	3,1%

L'ensemble des résultats mettent en avant une bonne homogénéité des propriétés mécaniques intra-géométrie.

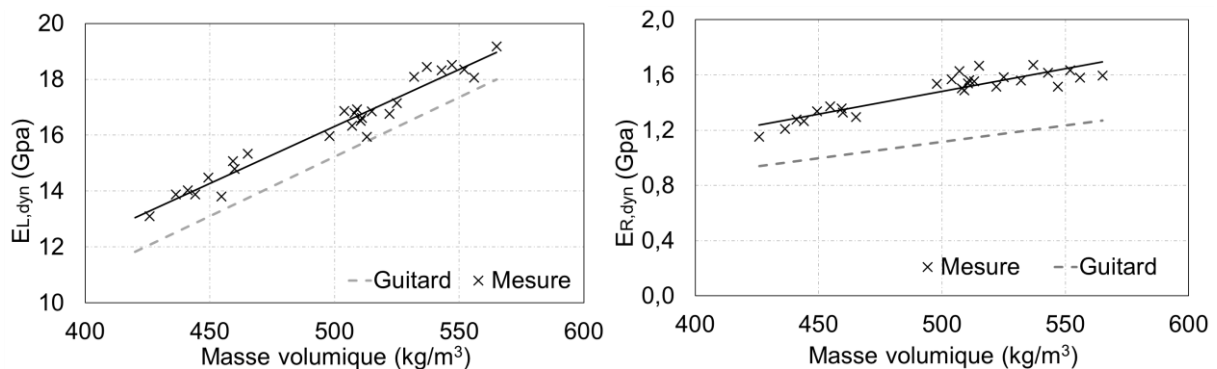
IV.2.7. Corrélation entre modules dynamiques et masse volumique

Comme l'a proposé Guitard *et al.* (1987), nous présentons les résultats de corrélation des modules d'élasticité dynamique avec la densité mesurée en Figure IV-11. Les données de Guitard sont fournies pour des résineux quelconques à 12% d'humidité. L'ensemble de nos mesures ont été réalisées sur des éléments à 13% d'humidité en moyenne. Les résultats montrent une plus ou moins bonne corrélation linéaire. Ce fait s'explique en partie par la présence des poutres DC, réalisées en bois massif reconstitué, et pour lequel les critères de tri des lamelles sont moins sévères que pour le lamellé collé des autres géométries.

Tableau IV-12 : Corrélation linéaire entre modules d'élasticité dynamique et densité

	A (G.N.m/kg)	B (GPa)	R ²
$E_{L,dyn}$ avec DC	$4,27 \cdot 10^{-2}$	-5,15	0,92
$E_{L,dyn}$ sans DC	$4,08 \cdot 10^{-2}$	-4,09	0,95
Données Guitard	$4,25 \cdot 10^{-2}$	-6,02	-
$E_{R,dyn}$ avec DC	$3,50 \cdot 10^{-3}$	-0,22	0,56
$E_{R,dyn}$ sans DC	$3,29 \cdot 10^{-3}$	-0,16	0,82
Données Guitard	$2,36 \cdot 10^{-3}$	-0,06	-
$E_{T,dyn}$ avec DC	$2,20 \cdot 10^{-3}$	-0,21	0,74
$E_{T,dyn}$ sans DC	$1,97 \cdot 10^{-3}$	-0,12	0,92
Données Guitard	$2,02 \cdot 10^{-3}$	-0,27	-
$G_{LR,dyn}$ avec DC	$1,70 \cdot 10^{-3}$	0,39	0,16
$G_{LR,dyn}$ sans DC	$1,47 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,32
Données Guitard	$2,08 \cdot 10^{-3}$	-0,075	-

La Figure IV-12 montre les effets sur la corrélation en omettant les échantillons DC. L'ensemble des résultats de corrélation est regroupé dans le Tableau IV-12 sous la forme $E_{dyn} = A \cdot \rho + B$. Plusieurs constatations méritent d'être faites. Premièrement, les mesures sur la géométrie DC dégradent les résultats de corrélation, même si pour le module longitudinal, cette dégradation est minimale. En revanche, au regard des corrélations proposées par Guitard, les résultats que nous obtenons, en englobant toutes les géométries, mettent en évidence une bonne correspondance avec les données bibliographiques. Enfin, la caractérisation du module de cisaillement demeure non satisfaisante. En effet, l'utilisation exclusive des vitesses de propagation d'ondes de compression privilégie la caractérisation des modules normaux.



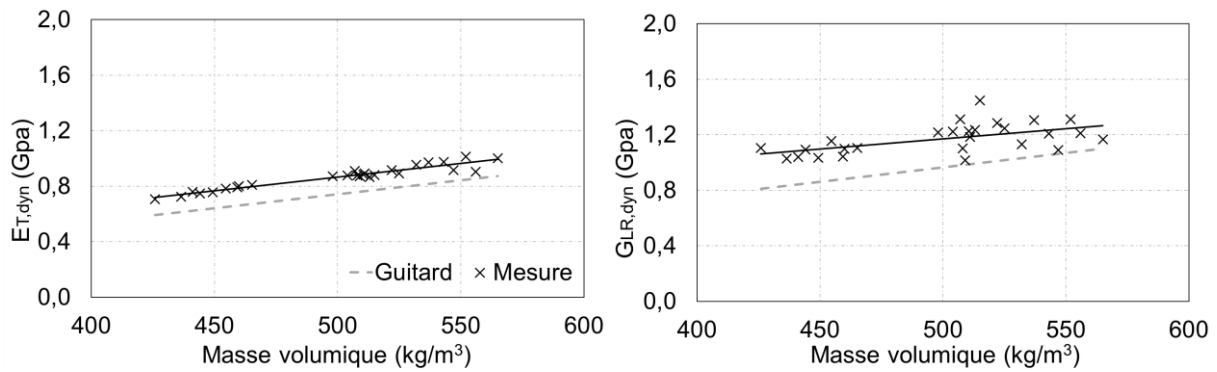


Figure IV-11 : Corrélation modules d'élasticité dynamique - densité mesurée

Enfin, en se focalisant sur les résultats obtenus en termes de module longitudinal, la Figure IV-12 montre deux droites de corrélation quasi-parallèle. Or, les résultats montrent un module mesuré supérieur aux données de Guitard. Mais il faut rappeler que nous comparons un module dynamique à un module statique. Le ratio entre les deux est de l'ordre de 10%.

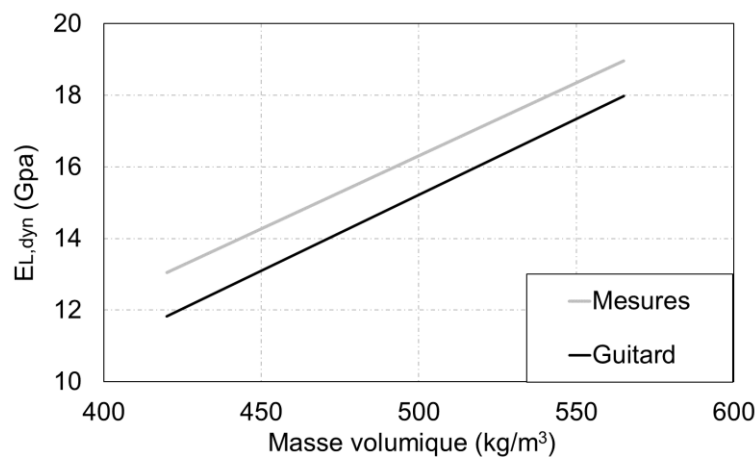


Figure IV-12 : Corrélations linéaires entre module d'élasticité longitudinal et masse volumique : données mesurées et données de Guitard

IV.3. Méthodologie de suivi des propriétés mécaniques en reprise d'humidité

Le processus de réhumidification a débuté le 20 mai 2020. Des mesures de caractérisation ont été réalisées le 26 juin et le 9 juillet 2020, correspondant à la fin de l'expérimentation. Dans ce contexte, les mesures ultrasonores et radar sont confrontées à une hétérogénéité d'humidité. Le protocole d'optimisation, proposé précédemment et basé sur un modèle analytique de conversion entre vitesses de propagation d'ondes et propriétés d'élasticité, est pour l'instant trop simpliste dans le sens où le modèle ne prend pas en compte ni d'hétérogénéité de propriétés élastiques ni d'hétérogénéité de densité. Comme nous le montrons dans cette partie, ce protocole permet seulement d'avoir une indication moyenne des propriétés indépendante de considérations de chargement comme par exemple, un état de traction ou compression homogène ou encore un état de flexion. En revanche, le modèle éléments finis développés dans le second chapitre est tout à fait compatible avec cette hétérogénéité. C'est pour cela que, dans un premier temps, nous allons évaluer l'état hydrique des quatre poutres employées dans le processus de réhumidification ainsi que leur réponse à la propagation d'ondes ultrasonores.

IV.3.1. Évaluation des champs hydrique et mécanique par simulation numérique

Lors de la période de confinement, les poutres ont été stockées dans l'atelier avec un conditionnement que nous pourrions qualifier de constant en termes de température et d'humidité relative. À partir du 20 mai 2020, quatre poutres ont donc été placées en extérieur.

Afin de reproduire numériquement la reprise d'humidité en prenant en compte un arrosage sur l'extrados des poutres, nous avons employé le modèle de diffusion développé par N. Manfoumbi (2012) à l'échelle structurelle. Pour simplifier l'approche, nous avons considéré une modélisation 2D en admettant que le processus d'humidification se fera, en section courante, par un flux hydrique descendant vertical avec des iso-valeurs d'humidité horizontal.

Les conditions convectives du modèle sont représentées en Figure IV-13.

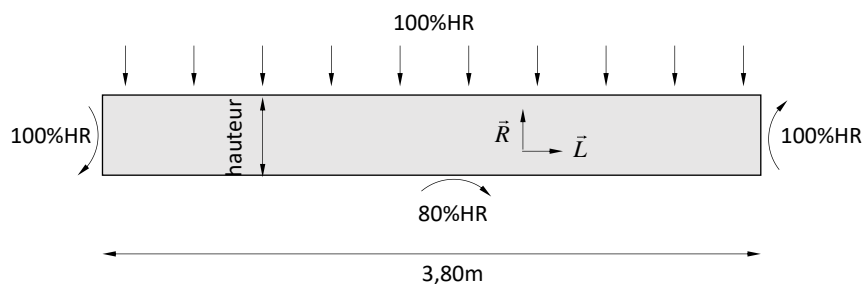


Figure IV-13 : Conditions convectives en reprise d'humidité

Le modèle de diffusion employé ne prenant pas en compte la présence d'eau libre, nous considérons que les surfaces arrosées et les deux abouts de poutre, qui vont subir un ruissellement, seront exposées à une humidité relative saturée de 100% avec une humidité interne équivalente de 30%. Dans une première approche, nous ne prenons pas en compte la différence de PSF entre le Douglas et l'Épicéa. La surface de l'intrados n'étant pas en contact direct avec l'eau, nous considérons qu'elle est exposée à un environnement équivalent à une classe de service 3 correspondant à une humidité relative de 80% pour une humidité interne correspondante de 20%. Enfin, le modèle de diffusion prenant en compte l'orthotropie matérielle, nous allons l'employer dans un plan LR.

Les coefficients de diffusion $D^\alpha(w)$ ($\alpha = L$ ou R), utilisés dans la modélisation, répondent à un modèle non linéaire de type :

$$D^\alpha(w) = D_o^\alpha \cdot \exp(k^\alpha \cdot w) \quad (IV-11)$$

D_o^α désigne le coefficient de diffusion à l'état anhydre tandis que k^α représente l'effet non linéaire. Les simulations à suivre sont réalisées avec les propriétés d'un résineux déterminées par N. Manfoumbi et rappelées dans le Tableau IV-13

Tableau IV-13 : Propriétés de diffusion

Sens longitudinal	Sens radial
$D_o^L = 1,04 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$	$D_o^R = 2,48 \cdot 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$
$k^L = 0,0$	$k^R = 0,25$

Les conditions hydriques initiales sont fixées homogènes et calculées à partir de la masse volumique mesurée le 18 février 2020. Après calcul, le champ hydrique est corrigé, de façon

homothétique, de l'humidité moyenne mesurée les 20 mai, 26 juin et 9 juillet. Afin d'illustrer la modélisation, nous présentons les résultats obtenus avec la poutre DP1-3. Au-delà des abouts, le modèle représente une stratification de l'humidité répartie sur la hauteur de la poutre, Figure IV-14.

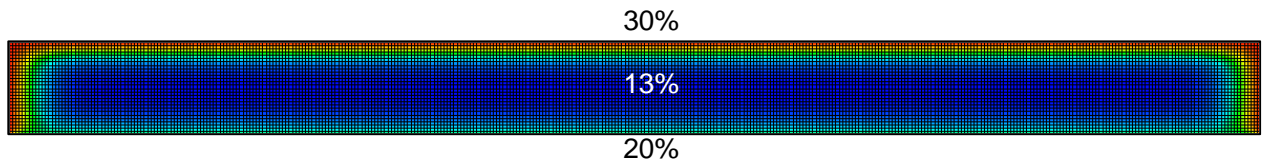


Figure IV-14 : Champs d'humidité simulé au 9 juillet 2020

À partir du champs d'humidité, le code aux éléments finis permet de calculer le champ de masse volumique, Figure IV-15 ou tout champ représentant une propriété d'élasticité, comme par exemple, le module d'élasticité longitudinal et radial et de cisaillement, Figure IV-16. Ces derniers sont estimés selon les expressions proposées par Guitard, à savoir :

$$E_L(w) = E_L(12) \cdot (1 - 0.015 \cdot ((w * 100) - 12)) \quad (IV-12)$$

$$E_R(w) = E_R(12) \cdot (1 - 0.03 \cdot ((w * 100) - 12)) \quad (IV-13)$$

$$G_{LR}(w) = G_{LR}(12) \cdot (1 - 0.02 \cdot ((w * 100) - 12)) \quad (IV-14)$$

Les valeurs à 12% des modules d'élasticité sont calculés à partir des mesures dynamiques initiales à humidité homogène également mesurée, et ce, en réemployant les équations (IV-12) à (IV-14).

Nous observons, à ce stade, une forte hétérogénéité des propriétés d'élasticité.

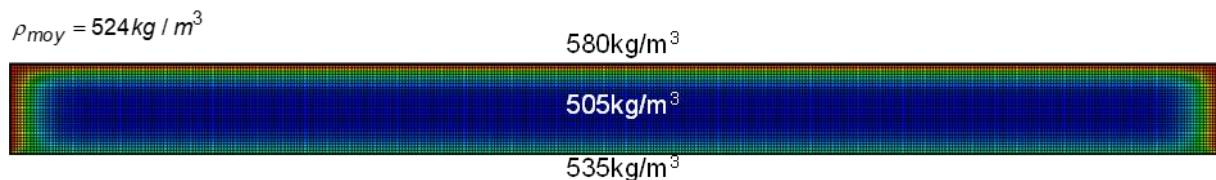


Figure IV-15 : Champs de masse volumique simulé au 9 juillet 2020

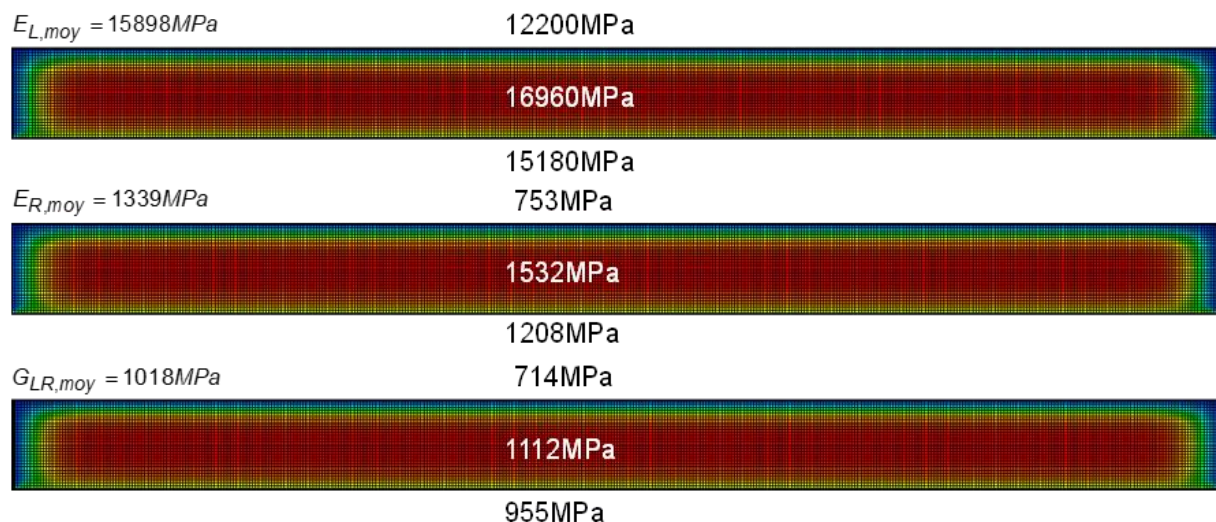


Figure IV-16 : Champs de propriétés mécaniques simulés au 9 juillet 2020

Afin de comparer aux valeurs globales expérimentales, nous calculons les valeurs moyennes de ces différents champs par intégration surfaciques. Les résultats sont présentés du Tableau IV-14 au Tableau IV-17.

Au regard de l'évolution des masses volumiques, nous constatons que les hypothèses du modèle conduisent à augmentation d'humidité trop rapide. Cela provient de deux aspects. Le premier est en relation avec les conditions aux limites simplifiées appliquées au modèle qui ne correspondent pas exactement aux variations climatiques diurnes. Le second point concerne un modèle 2D qui ne prend pas en compte les échanges hydriques (adsorption et désorption) sur les faces latérales des poutres.

D'un point de vue expérimental, les modules dynamiques, provenant du processus d'optimisation présenté précédemment, ne permet pas de mesurer une valeur moyenne réaliste car l'ensemble des chemins de propagation ne permet pas une tomographie complète des volumes.

Tableau IV-14 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre DP1-3)

	20 mai	26 juin	9 juillet
$\rho(kg / m^3)$ simulée	503	519	529
$\rho(kg / m^3)$ mesurée	503	516	518
Erreur relative	0,0%	0,6%	2,1%
$E_L(GPa)$ simulée	17,05	16,18	15,61
$E_{L,dyn}(GPa)$ US mesurée	16,9	16,45	16,5
Erreur relative	0,8%	1,6%	5,2%
$E_R(GPa)$ simulée	1,55	1,39	1,29
$E_{R,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,50	1,47	1,45
Erreur relative	3,3%	5,4%	11,0%
$G_{LR}(GPa)$ simulée	1,12	1,05	0,95
$G_{LR,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,06	1,11	1,06
Erreur relative	5,7%	5,4%	6,1%

Tableau IV-15 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre DG2-3)

	20 mai	26 juin
$\rho(kg / m^3)$ simulée	500	514
$\rho(kg / m^3)$ mesurée	496	506
Erreur relative	0,8%	1,6%
$E_L(GPa)$ simulée	16,0	15,28
$E_{L,dyn}(GPa)$ US mesurée	15,85	16,01
Erreur relative	0,9%	4,6%
$E_R(GPa)$ simulée	1,55	1,41
$E_{R,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,54	1,52
Erreur relative	0,6%	7,2%
$G_{LR}(GPa)$ simulée	1,22	1,15
$G_{LR,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,18	1,20
Erreur relative	3,4%	4,2%

Pourtant, en se focalisant sur la mesure du module d'élasticité longitudinal, malgré les hypothèses fortes de simulation et un scan partiel de la mesure par ultrason, les résultats mettent en exergue une estimation d'un module moyen proche du module simulé avec une erreur relative qui ne dépasse pas 6%. En revanche, les écarts sont plus importants concernant le module d'élasticité radial. Cela s'explique par une hétérogénéité plus importante du repère d'orthotropie cylindrique de chaque lamelle. Nous considérons que, vis-à-vis d'un chemin de propagation suivant la hauteur des poutres, le module mesuré est majoritairement radial. Cependant, la courbure des cernes de croissance induit une interaction hétérogène de la direction tangentielle, hétérogénéité accentuée dans le contexte du lamellé-collé.

Tableau IV-16 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre DC3-3)

	20 mai	26 juin	9 juillet
$\rho(kg / m^3)$ simulée	499	517	521
$\rho(kg / m^3)$ mesurée	503	514	515
Erreur relative	0,8%	0,6%	1,2%
$E_L(GPa)$ simulée	16,8	15,8	15,6
$E_{L,dyn}(GPa)$ US mesurée	16,6	16,72	16,6
Erreur relative	1,1%	5,5%	6,1%
$E_R(GPa)$ simulée	1,60	1,41	1,36
$E_{R,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,67	1,58	1,58
Erreur relative	4,2%	10,8%	13,9%
$G_{LR}(GPa)$ simulée	1,32	1,21	1,19
$G_{LR,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,43	1,44	1,42
Erreur relative	7,7%	16,0%	16,2%

Enfin, le module d'élasticité en cisaillement présente les plus gros écarts entre la mesure et son protocole d'optimisation, et la simulation. Au-delà de l'hétérogénéité induite par les gradients hydriques, évoquée précédemment, le module de cisaillement présente un impact plus faible pour les angles de propagation ultrasonore proches de 0° et proches de 90° . Et, pour des angles intermédiaires, le cisaillement a un rôle secondaire par rapport aux modules longitudinaux et radiaux. Avec des erreurs pouvant dépasser 16%, pour la poutre DC3-3 (Tableau IV-16), cela montre que le parti pris de focaliser le protocole de mesure sur les ondes de compression, a un impact sur la caractérisation des propriétés mécaniques de cisaillement.

Tableau IV-17 : Valeurs moyennes de densité et de propriétés d'élasticité (Poutre EP3-3)

	20 mai	26 juin	9 juillet
$\rho(kg / m^3)$ simulée	457	473	481
$\rho(kg / m^3)$ mesurée	468	475	477
Erreur relative	2,4%	0,4%	0,8%
$E_L(GPa)$ simulée	15,8	14,8	14,4
$E_{L,dyn}(GPa)$ US mesurée	15,9	15,6	15,3
Erreur relative	0,4%	4,5%	6,1%
$E_R(GPa)$ simulée	1,39	1,22	1,13
$E_{R,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,37	1,29	1,24
Erreur relative	1,5%	5,4%	8,9%
$G_{LR}(GPa)$ simulée	1,07	0,98	0,98
$G_{LR,dyn}(GPa)$ US mesurée	1,43	1,44	1,42
Erreur relative	7,5%	7,1%	3,1%

IV.3.2. Évaluation des vitesses de propagation d'ondes par éléments finis

Afin de compléter l'analyse précédente, nous proposons dans cette section de mobiliser l'algorithme de propagation d'ondes par la méthode aux éléments finis pour chaque poutre en y introduisant les champs de propriétés mécaniques (masse volumique et modules d'élasticité), puis de confronter les vitesses de propagation déduites aux mesures expérimentales. Nous nous limiterons dans cette partie à une modélisation 2D, ayant modélisé la distribution des modules d'élasticité basées sur un processus de diffusion hydrique également 2D. La discrétisation spatiale du domaine, Figure IV-17, est définie afin de respecter le critère de longueur le plus contraignant, c'est-à-dire pour la propagation d'onde dans le sens radial ($\theta = 90^\circ$). Ainsi, les éléments iso-paramétriques à 8 nœuds ont des côtés homogènes égaux à 3mm. Une attention particulière pour placer les points d'émission et de réception dans les sens longitudinal et radial afin d'obtenir une stratification des vitesses en accord avec les gradients hydriques calculés en Figure IV-14. Deux types de mesures sont proposées. Tout d'abord trois mesures directes longitudinales et cinq directes transversales sont réalisées. Puis en plaçant l'émetteur à mi-travée et en intrados de poutre, l'émetteur est déplacé sur l'extrados afin d'obtenir une distribution de l'angle de propagation.

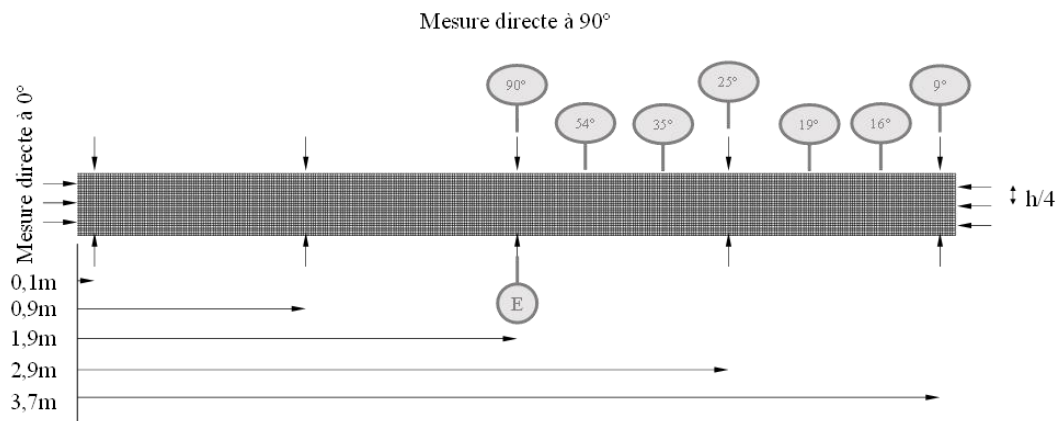


Figure IV-17 : Maillage éléments finis et position des points d'émission et de réception (Poutre DP1-3)

La Figure IV-18 présente une comparaison entre les vitesses de propagation mesurées et calculées pour la poutre DP1-3 au 20 mai 2020. Un lissage par une fonction d'Hankinson des données expérimentales permet de mieux visualiser les écarts induits par la modélisation aux éléments finis, les écarts relatifs n'excédant pas 4%.

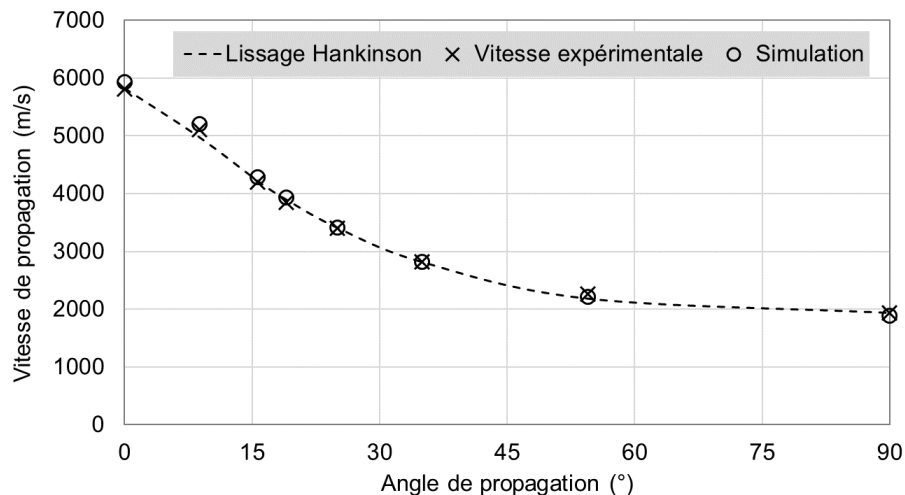


Figure IV-18 : Vitesse de propagation d'ondes fonction de l'angle θ au 20 mai 2020 (Poutre DP1-3)

La même comparaison a été réalisée avec les mesures prises le 9 juillet 2020, Figure IV-19. Dans ce cas, les erreurs relatives sont inférieures à 3%.

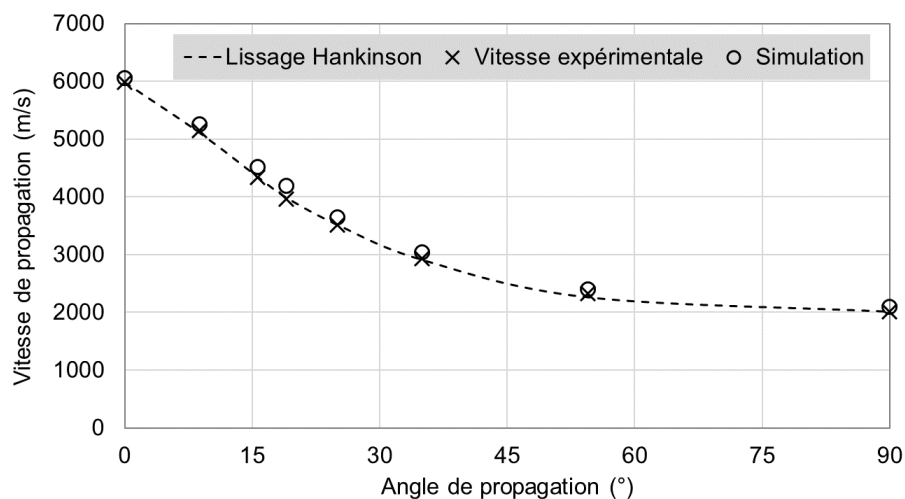


Figure IV-19 : Vitesse de propagation d'ondes fonction de l'angle θ au 9 juillet 2020 (Poutre DP1-3)

Les trois chemins de propagation longitudinaux sur la hauteur permettent de caractériser la stratification des vitesses de propagation. Le Tableau IV-18 compare les données expérimentales aux vitesses de propagation simulées par éléments finis. Les résultats mettent en avant quelques différences avec une erreur relative atteignant près de 5%. Ces erreurs relatives peuvent s'expliquer par la non-maîtrise des échanges hydriques sur les abouts de poutre. Le modèle présente un fort gradient sur les 20 premiers centimètres induits par une diffusion longitudinale importante. Cela conduit certainement à une sous-évaluation des modules d'élasticité conduisant ainsi une sous-évaluation des vitesses de propagation dans ces zones.

Tableau IV-18 : Comparaison des vitesses de propagation longitudinales à plusieurs hauteurs au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalculé via simulations de transfert hydrique) (Poutre DP1-3)

h(mm)	Vitesse expérimentale (m/s)	Vitesse recalculée (m/s)	Erreur relative
210mm	5996	5886	1,8%
140mm	5762	5975	3,7%
70mm	5693	5950	4,5%

Dans le cas des vitesses de propagation dans le sens radial, le Tableau IV-19 compare les données mesurées et simulées. Les données mesurées mettent en avant une dissymétrie des vitesses aux deux extrémités de la poutre. Comme précédemment, cela s'explique par la mauvaise maîtrise de réhumidification aux abouts. Également, en partie centrale, nous observons un écart de 6% entre la mesure et la simulation. Nous avançons deux causes possibles de cet écart.

- Premièrement, le modèle suppose que l'ensemble de la poutre est soumis à une diffusion d'eau liée. Cependant, le protocole d'arrosage peut induire la présence d'eau liée en surface, processus qui n'est pas pris en compte dans notre modélisation.
- Deuxièmement, les conditions de convection sur l'intrados ne sont pas spécifiquement définies dans le modèle de diffusion, ce qui peut engendrer une erreur de conditions aux limites et donc des erreurs de gradients localisés.

Tableau IV-19 : Comparaison des vitesses de propagation radiales à plusieurs abscisses au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalculé via simulation de transfert hydrique) (Poutre DP1-3)

Abscisse (mm)	Vitesse expérimentale (m/s)	Vitesse recalculée (m/s)	Erreur relative
100	1979	1848	6,6%
900	1903	1901	0,1%
1900	2062	1938	6,0%
2900	1865	1894	1,6%
3700	1845	1848	0,2%

IV.3.3. Champs hydriques hétérogènes par mesures radar

L'étude précédente se basant sur des cartographies hydriques simulées, nous proposons, dans cette partie, d'étudier l'apport des mesures de constantes diélectriques par mesures radar.

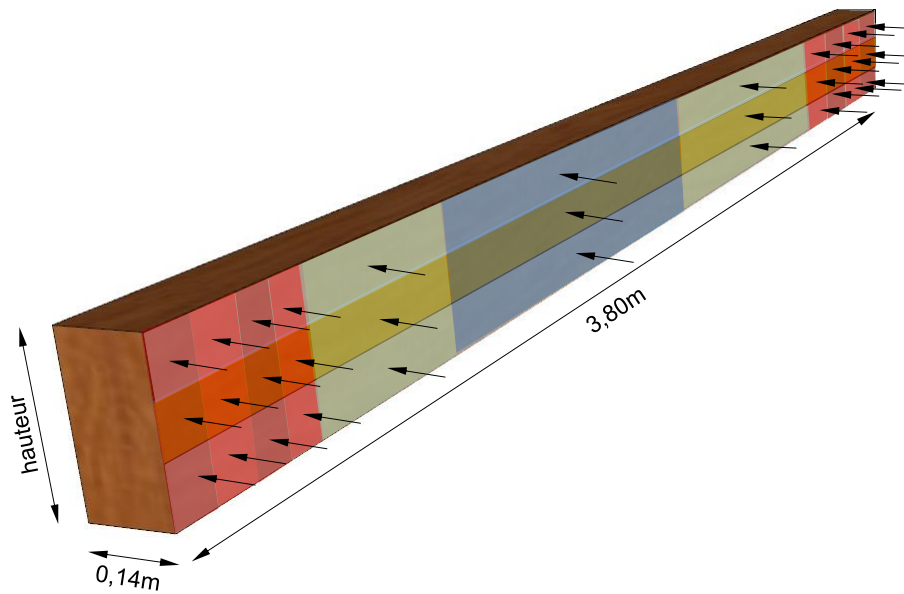


Figure IV-20 : Répartition des points de mesure de constantes diélectriques, exemple de la poutre DP1-3

À partir des mesures de constantes diélectriques, selon l'épaisseur des poutres et la répartition spatiale visualisée en Figure IV-20, le champ ponctuel d'humidité est recalculé à partir de la loi linéaire de corrélation entre constantes diélectriques et humidité dans le bois, rappelée ci-dessous :

$$\varepsilon_{ij}' = 7,441 \cdot w + 1,6169 \quad (\text{IV-15})$$

Par inversion de l'équation (IV-15), le calcul de l'humidité dans le matériau peut être projeté directement sur le maillage éléments finis. Celle-ci est cependant corrigée de la valeur moyenne de l'humidité issue de la pesée des poutres. Les prises de mesure demeurent localisées en considérant que dans chaque zone d'influence des points de mesure (Figure IV-20), l'humidité est constante.

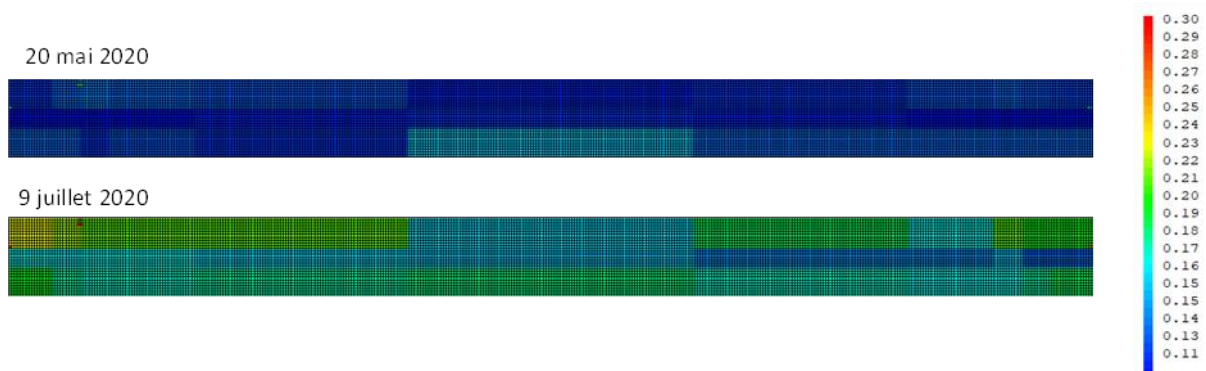


Figure IV-21 : Projection des humidités issues du champ de constante diélectrique (poutre DP1-3)

Contrairement au calcul par éléments finis de diffusion 2D pour lequel la diffusion transversale est occultée, la mesure d'humidité par la constante diélectrique permet d'avoir une valeur moyenne sur l'épaisseur de l'élément. En revanche, la simulation numérique permet d'avoir une vision plus proche de l'état hydrique proche des surfaces, là où les gradients sont les plus marqués, Figure IV-22.

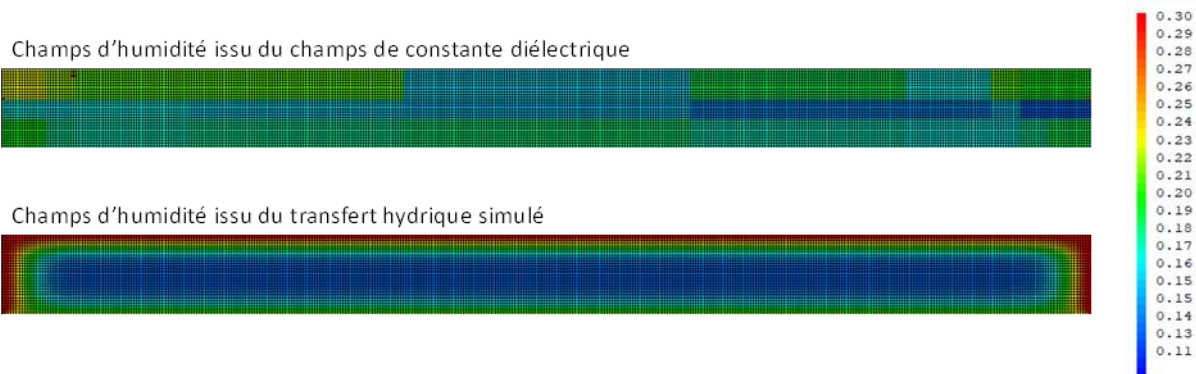


Figure IV-22 : Champs d'humidités issus du calcul et de la constante diélectrique (9 juillet, poutre DP1-3)

Pourtant, au regard des différences entre les deux champs d'humidité, nous allons constater qu'en termes de valeurs moyennes des champs mécaniques déduits, les deux estimations convergent. En effet, en projetant les champs de masse volumique et de modules d'élasticité à partir des champs d'humidité obtenus par simulation et par constantes diélectriques, les résultats se rejoignent. Concernant la poutre DP1-3, les valeurs moyennes obtenues les 20 mai et 19 juillet sont présentés dans le Tableau IV-20.

Tableau IV-20 : Valeurs moyennes issues du calcul et de la constante diélectrique (Poutre DP1-3)

	20 mai	9 juillet
$\rho(kg / m^3)$ simulée	503	529
$\rho(kg / m^3)$ radar-Guitard	503	529
Erreur relative	0,0%	0,0%
$E_L(GPa)$ simulée	17,05	15,6
$E_L(GPa)$ radar-Guitard	17,05	15,6
Erreur relative	0,0%	0,0%
$E_R(GPa)$ simulée	1,55	1,29
$E_R(GPa)$ radar-Guitard	1,55	1,29
Erreur relative	0,0%	0,0%
$G_{LR}(GPa)$ simulée	1,12	0,95
$G_{LR}(GPa)$ radar-Guitard	1,12	0,995
Erreur relative	0,0%	0,05%

Ces bons résultats peuvent cependant être expliqués par le fait que la moyenne des valeurs dissimule les écarts de gradients.

En termes de vitesses de propagation d'ondes ultrasonores, étant donné que le champ hydrique est construit à partir du champ de constantes diélectriques non symétrique, nous dupliquons les points de mesures, visualisés en Figure IV-17, par symétrie sur le côté gauche du maillage. Dans ces conditions, nous avons une couverture angulaire de 0° à 180° . Les résultats sont présentés pour la poutre DP1-3 le 20 mai, Figure IV-23 et le 9 juillet, Figure IV-24. Ces résultats montrent une bonne corrélation entre les mesures expérimentales et les simulations issues des champs de constantes diélectrique. Dans les deux cas, les erreurs relatives n'excèdent pas 5%.

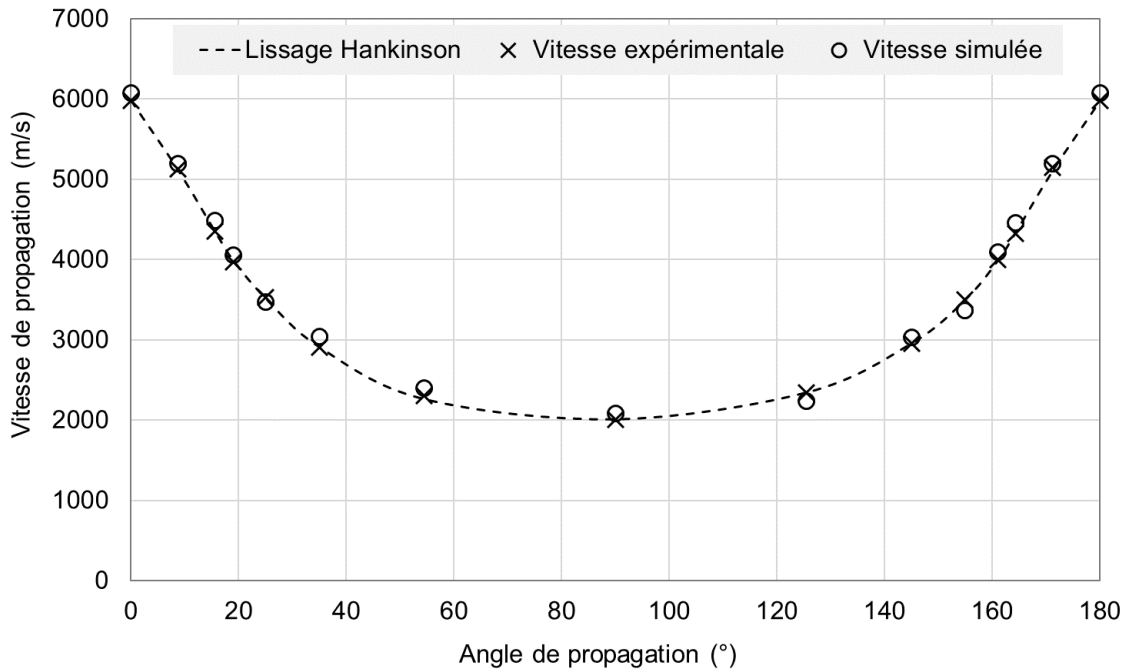


Figure IV-23 : Vitesse de propagation d'ondes fonction de l'angle θ au 20 mai 2020 (Poutre DP1-3)

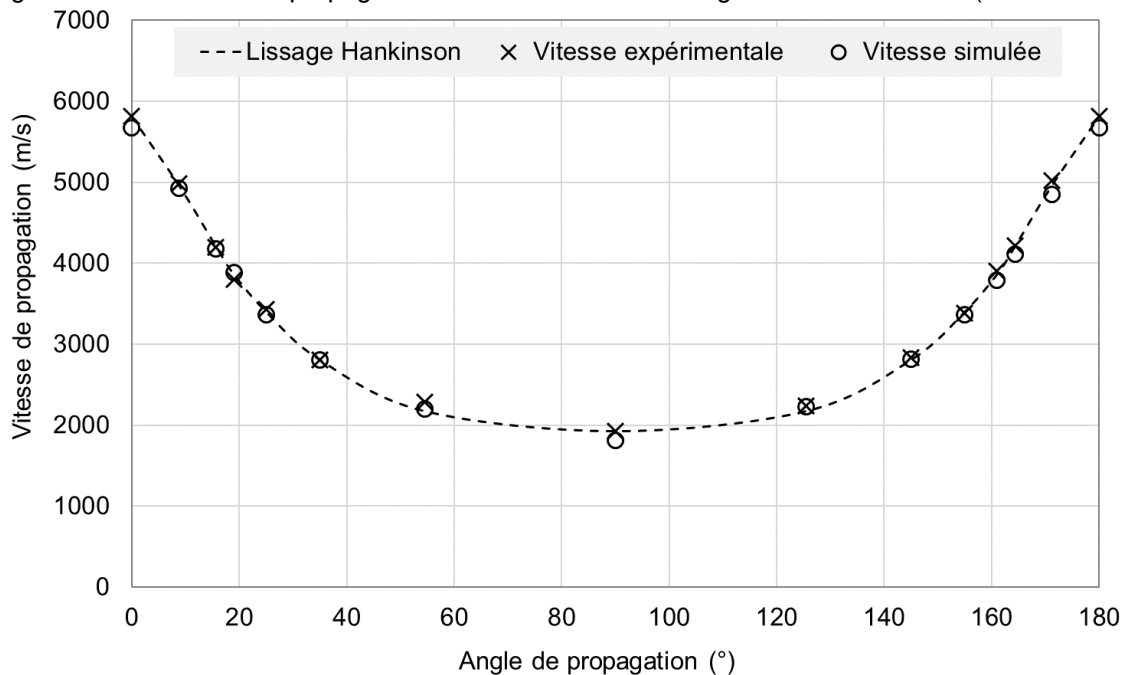


Figure IV-24 : Vitesse de propagation d'ondes fonction de l'angle θ au 9 juillet 2020 (Poutre DP1-3)

Pour les mesures du 9 juillet, le Tableau IV-21 présente la stratification des vitesses horizontales mesurées et calculées, selon les expressions (IV-12), (IV-13) et (IV-14), à partir de l'humidité déduite des mesures radar. Nous observons des erreurs accrues proche de l'extrados. C'est certainement une des limites de la méthode dans le sens où la projection sur le maillage éléments finis se fait en imposant les constantes diélectriques sur tout un ensemble de volume sollicité. Une solution d'amélioration serait de réaliser des projections en employant des fonctions de forme intégrant un gradient logarithmique ou exponentiel pour reproduire artificiellement un gradient de surface.

Tableau IV-21 : Comparaison des vitesses de propagation longitudinales à plusieurs hauteurs au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalculé via mesures radar) (Poutre DP1-3)

h(mm)	Vitesse expérimentale (m/s)	Vitesse recalculée (m/s)	Erreur relative
210mm	5996	5536	7,7%
140mm	5762	5843	1,4%
70mm	5693	5647	0,9%

Dans le cas des vitesses de propagation dans le sens radial, le Tableau IV-22 compare les données mesurées et simulées. Les résultats mettent en évidence une erreur relative importante. Cela vient certainement du fait des forts gradients hydriques mal appréhendés par la mesure de constantes diélectriques. Le processus d'arrosage génère certainement un dépassement en surface du point de saturation des fibres. Or, nous savons que les droites de corrélations liant constante diélectrique et humidité interne changent au-delà du PSF.

Tableau IV-22 : Comparaison des vitesses de propagation radiales à plusieurs abscisses au 9 juillet 2020 (Mesures expérimentales / Recalculé via mesures radar) (Poutre DP1-3)

Abscisse (mm)	Vitesse expérimentale (m/s)	Vitesse recalculée (m/s)	Erreur relative
100	1979	1721	13,0%
900	1903	1810	4,9%
1900	2062	1877	9,0%
2900	1865	1874	0,5%
3700	1845	1769	4,1%

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, deux méthodologies d'analyse sont proposées, correspondant à deux étapes rencontrées lors d'un diagnostic de structures bois.

Une première méthode d'optimisation est proposée en s'appuyant sur l'ensemble des développements réalisés dans ce travail de thèse. L'estimation par optimisation des propriétés élastiques s'appuie sur le modèle analytique. Elle est alimentée par une base de données expérimentale issue des travaux présentés au chapitre III. Le protocole numérique consistant à consolider les données expérimentales d'entrée, puis à choisir un critère de minimisation d'erreur le plus adéquat possible, permet de déterminer les propriétés élastiques avec une bonne précision. Ce protocole est d'autant plus efficace que la masse volumique globale est connue avec précision.

Pour un suivi temporel des propriétés élastiques, le modèle par éléments finis permet de prendre en compte les champs hydriques hétérogènes. L'humidité interne de poutres humidifiées artificiellement en extérieur a été estimée selon des hypothèses simplifiées, pour s'accorder au mieux au protocole expérimental de secours mis en place pour donner suite au confinement sanitaire du printemps 2020. Les premiers résultats montrent la faisabilité de l'alimentation du modèle éléments finis soit par un calcul de diffusion hydrique, soit par les mesures radar. Ce modèle est capable d'actualiser le calcul des vitesses de propagation en fonction de l'humidité variable rencontrée sur le chemin de propagation.

Bien qu'une consolidation des méthodes et hypothèses soit nécessaires, ces approches peuvent d'ores et déjà être appliquées à des auscultations in situ, voire du monitoring de structures bois.

Conclusion

L'objectif globale de ce travail de thèse consiste à proposer un protocole d'Evaluation Non Destructive de la performance mécanique des structures en bois. Le développement d'outils performants de diagnostic, ou de maintenance, adaptés aux structures en bois, est nécessaire pour consolider la position de ce matériau dans les solutions d'ingénierie de la construction. En analysant les caractéristiques principales du matériau bois, le protocole proposé s'appuie sur deux techniques de **mesures non destructives** de temps de vol, d'une part d'ondes électromagnétique, et d'autre part d'ondes élastiques ultrasonores. Ces deux techniques sont parfaitement adaptées à des mesures **in situ**. Les ondes électromagnétiques générées par radar sont retenues pour leur capacité à être dépendante de la teneur en eau d'un matériau **hygroscopique**. Le potentiel de détection de cavité ou d'altérations biologiques n'est pas exploité dans un premier temps et sera développé dans les perspectives. La propagation des ondes ultrasonores, en sollicitant localement le matériau, est, elle, dépendante des propriétés élastiques sur le chemin parcouru. Elle est liée aux propriétés élastiques **orthotropes** du matériau, et peut renseigner sur les défauts d'alignement entre direction matériau et géométrie des pièces de structures. Suivant les longueurs d'ondes utilisées, des défauts locaux peuvent également influencer ces deux mesures.

L'idée force était ici d'estimer le champ hydrique à l'aide des mesures radar, afin de corriger l'influence de l'humidité sur les vitesses ultrasonores, pour finalement proposer une évaluation des propriétés élastiques globales d'éléments bois à l'échelle structurelle.

Dans cet optique, les **expressions analytiques** reliant vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement, aux propriétés du tenseur ont été écrites afin d'intégrer toutes les rotations possibles dans le repère principal d'orthotropie du matériau. Ces expressions ont été confrontées à une simulation par éléments finis. Les contraintes liées à la discrétisation spatiale et temporelle du problème incrémental numérique sont exposées. Si le modèle analytique est limité à la propagation dans un milieu homogène, les **simulations par éléments finis** ont pour objectif de prendre en compte des champs hétérogènes, principalement d'humidité locale, mais potentiellement aussi de densité matériau. Bien que n'ayant pas mis en place de gestion du signal aux frontières du maillage, comme des frontières absorbantes, l'implémentation par éléments finis permet de retrouver avec précision les temps de vol analytiques selon n'importe quel angle de propagation par rapport au fil du bois.

La bibliographie étant pauvre en **essais** ultrasonores et radar à **l'échelle du bois d'œuvre**, une campagne expérimentale a été conduite pour établir une première base de données. En supposant que seuls les ouvrages en bois les plus techniques pourraient, dans un premier temps, bénéficier de budget pour leur maintenance, notre choix s'est porté vers des pièces en lamellé collé. L'hétérogénéité induite par les lamelles est finalement beaucoup plus faible que les hétérogénéités de bois massif pour des sections importantes. Les différences d'orientation des cernes dans les lamelles sont faibles, comme les variations de densité. A l'inverse, l'usage de bois massif aurait fait apparaître de fortes variations de repère d'orthotropie en fonction de la position de la moelle, ainsi que des fissures de séchage inévitables. Grâce aux trois sections courantes choisies, les méthodes d'analyse proposées permettent de s'affranchir des effets d'échelles. Les poutres en GL24 testées étant en Douglas et en Epicéa, les analyses globales ne montrent pas d'effet essence mais confirment l'importance de la connaissance de la densité. La caractérisation initiale des poutres a permis de valider des protocoles de mesures US et

radar permettant d'approcher des répartitions globales de propriétés mécaniques et hydriques. Le manque de précision des résultats mécaniques en flexion statique n'a toutefois pas permis de faire le lien entre le module d'élasticité global de la poutre E_{global} , prenant en compte le module de cisaillement G dans le cas de la flexion 4 points, le module d'élasticité local de la poutre E_{local} indépendant du cisaillement, et les modules dynamiques E et G obtenus par les vitesses ultrasonores. Une campagne de vieillissement était envisagée afin de faire apparaître des champs hydriques hétérogènes ainsi que des fissures de séchage. Malgré le confinement sanitaire du printemps 2020 qui a perturbé le plan d'expérience initial, un suivi d'humidification a été réalisé pour valider la sensibilité de l'outil radar, et calibrer l'impact sur les mesures ultrasonores. Les résultats sont obtenus sur l'étude de 36 poutres et de leurs éprouvettes complémentaires. Ils ont nécessité l'analyse d'environ 1000 mesures ultrasonores, et 1400 mesures radar, complétés par des essais mécaniques de compression et de flexion.

Finalement, le chapitre IV propose une utilisation combinée des résultats des chapitres précédents pour deux objectifs :

- **L'estimation à l'instant t des propriétés élastiques globales.** Une méthode d'optimisation est proposée, utilisant comme moteur de calcul le modèle analytique, et comme données d'entrées les mesures expérimentales. Différents critères d'optimisation sont présentés. Le protocole permet une bonne estimation des propriétés élastiques, mais nécessite cependant la connaissance de la masse volumique, mesure complémentaire à inclure au protocole in situ.
- **Le suivi temporel des perturbations des propriétés élastiques par des champs hydriques hétérogènes :** Le champ hydrique reconstitué à partir des mesures radar est comparé à une simulation de diffusion hydrique. Quelle que soit la source des champs hydriques injectés dans le modèle par éléments finis, ce dernier fournit une actualisation des vitesses ultrasonores et du module d'élasticité global.

Cette thèse est le premier travail d'application de la combinaison des outils radar et ultrasonore pour l'auscultation de pièces de bois d'œuvre. En l'état, les travaux présentés dans ce mémoire ont permis des applications simples sur des structures anciennes. Mais de nombreuses **perspectives** peuvent être avancées afin de consolider ces travaux. Ces perspectives sont listées sans ordre de priorité, mais en les regroupant par thématiques :

Modélisation

- Le modèle analytique pourrait être complété pour inclure la prise en compte du gradient d'humidité sur le chemin de propagation,
- Le modèle par éléments finis pourrait être complété par des éléments absorbants aux frontières pour faciliter la détermination des temps de vol,
- Le calcul des temps de vol nécessite le développement d'un algorithme d'automatisation,

Outils de mesure

- La consolidation des résultats par l'emploi de transducteurs ultrasonores de plusieurs fréquences renseignerait sur les effets d'échelle sur le matériau. L'usage de transducteurs exponentiels ne nécessitant pas de couplant, et donc adaptés à l'auscultation in situ, doit être intégré dans des essais comparatifs,
- L'exploitation des ondes de cisaillement permettrait d'affiner la connaissance de la matrice d'élasticité, même si son utilisation alourdirait le protocole d'inspection,

- L'antenne radar utilisée avait comme contraintes sa fréquence et ses dimensions. Tester des antennes plus petites autoriserait un maillage de mesure plus fin pour les singularités d'humidité en périphérie. Jouer sur la fréquence permettrait d'augmenter la distance de propagation.

Méthodes de mesure

- Les protocoles de mesures présentés ici permettent d'identifier les propriétés globales des poutres. Cependant, l'accessibilité des poutres lors d'applications in situ n'autorise pas autant de mesures. Une optimisation du nombre et des angles de mesures pour les tirs ultrasonores permettrait d'alerter lorsque le protocole est trop dégradé pour approcher le comportement mécanique global
 - La connaissance de la densité est nécessaire pour compléter l'auscultation. Une validation de l'usage d'essais semi destructifs comme le carottage est nécessaire pour des applications in situ.

Recherche de défauts

- Les défauts tels que les fissures ou les cavités, dues aux attaques fongiques, ont un impact sur ces mesures qu'il conviendrait d'estimer. Les ondes radar sont déjà utilisées pour repérer des variations locales de densité. L'augmentation du temps de propagation ultrasonore est également utilisée pour mesurer la profondeur des fissures.

Outils complémentaires :

- La modélisation hydrique fine dans le bois demande des modèles et des temps de calcul qui n'ont pas pu être mis en œuvre dans ce travail. Les outils développés précédemment par le laboratoire permettrait une approche plus fine des gradients, afin de valider les protocoles de mesure radar.

Paramètre supplémentaire :

- Enfin, l'influence du taux de charge sur les vitesses ultrasonores n'a pas encore fait l'objet de publications. Des essais complémentaires à ce travail ont permis de montrer une influence très forte sur les vitesses de propagation axiale. Cet effet doit être intégré dans le protocole d'auscultation in situ.

Références bibliographiques

AFNOR (2005). NF EN 12504-4.

AFNOR (2010). NF EN 1995-1-1/NA.

AFNOR (2011). NF B 52-001-1.

AFNOR (2012). NF EN 408+A1.

Alves, R.C., Mantilla, J.N.R., Bremer, C.F., and Carrasco, E.V.M. (2015). Application of Acoustic Tomography and Ultrasonic Waves to Estimate Stiffness Constants of Muiracatiara Brazilian Wood.

Arciniegas Mosquera, A.F. (2014). Analyse de méthodes statistiques en traitement du signal pour les tomographies acoustique et ultrasonore des arbres sur pied. Université d'Aix-Marseille.

Armstrong, J.P., Patterson, D.W., and Sneckenberger, J.E. (1991). Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle. *Wood Fiber Sci.* 23, 32–43.

Baar, J., Tippner, J., and Gryc, V. (2012). The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 70, 767–769.

Beall, F.C. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Sci. Technol.* 36, 197–212.

Bonnet, M. (2017). Analyse multi-échelle du comportement hygromécanique du bois : Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesure de champs volumique de l'influence de l'hétérogénéité. Université Paris-Est.

Broch, J.T. (1984). *Mechanical Vibration and shock measurement.*

Bucur, V. (1995). *The Acoustics of Wood* (CRC Press).

Bucur, V. (1996). Acoustics of Wood. *Mater. Sci. Forum* 210–213, 101–108.

Bucur, V., and Bohnke, I. (1993). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood.

Bucur, V., and Feeney, F. (1992). Attenuation of ultrasound in solid wood. *Ultrasonics* 30, 76–81.

Carpinteri, A., Xu, J., Lacidogna, G., and Manuello, A. (2012). Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures. *Cem. Concr. Compos.* 34, 529–537.

Clair, B. (2005). Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire. Université Montpellier 2.

Cuxac, P. (1991a). Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes (Vandoeuvre-les-Nancy, INPL).

- Cuxac, P. (1991b). Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes. Université de Lorraine.
- Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., and Crews, K. (2016). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. ELSEVIER.
- Dinh, A.T. (2011). Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure. Agro Paris Tech.
- Dündar, T., Wang, X., As, N., and Avcı, E. (2016). Potential of ultrasonic pulse velocity for evaluating the dimensional stability of oak and chestnut wood. *Ultrasonics* 66, 86–90.
- Elsener, R.M. (2014). Material characterization of timber utility poles using experimental approaches. PhD Thesis.
- Engelund, E.T., Thygesen, L.G., Svensson, S., and Hill, C.A.S. (2013). A critical discussion of the physics of wood–water interactions. *Wood Sci. Technol.* 47, 141–161.
- Erchiqui, F., Annasabi, Z., Souli, M., and Slaoui-Hasnaoui, F. (2015). 3D numerical analysis of the thermal effect and dielectric anisotropy on thawing frozen wood using microwave energy. *Int. J. Therm. Sci.* 89, 58–78.
- Espinosa, L., BRANCHERIAU, L., PRIETO, F., and LASAYGUES, P. (2018). Sensitivity of Ultrasonic Wave Velocity Estimation Using the Christoffel Equation for Wood Non-Destructive Characterization.
- Gao, S., Wang, X., Wang, L., and Allison, R.B. (2012). Effet of température on acoustic evaluation of standing trees and logs_part 1--Laboratory investigation. *Wood Fiber Sci.* 44, 286–297.
- Gao, S., Wang, X., Wang, L., and Allison, R.B. (2013). Effet of température on acoustic evaluation of standing trees and logs_part 2--Laboratory investigation. *Wood Fiber Sci.* 45, 15–25.
- Gonçalves, R., Lorensani, R.G.M., Negreiros, T.O., and Bertoldo, C. (2018). Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural lumber of plantation hardwood. *Wood Mater. Sci. Eng.* 13, 254–261.
- 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.
- Hamza, R. (2015). Non-destructive evaluation of moisture content of wood material at GPR frequency. *Constr. Build. Mater.*
- Hankinson, R.L. (1921). Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. *Air Serv. Inf. Circ.* 3.

James, W.L. (1975). Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content, and grain orientation (Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory).

James, W.L., Yen, Y.-H., and King, R.J. (1985). A microwave method for measuring moisture content, density, and grain angle of wood (US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory).

Kabir, M.F. (2001). Prediction of ultrasonic properties from grain angle.pdf. 12.

Kabir, M.F., Khalid, K.B., Daud, W.M., and Aziz, S.H. (1997). Dielectric properties of rubber wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line. *Wood Fiber Sci.* 29, 319–324.

Kabir, M.F., Daud, W.M., Khalid, K., and Sidek, H.A.A. (1998). Effect of moisture content and grain direction on the dielectric properties of rubber wood at low frequencies. *Holzforschung* 52, 546–552.

Kollmann, F.F.P., Kuenzi, E.W., and Stamm, A.J. (2012). *Principles of Wood Science and Technology: II Wood Based Materials* (Springer Science & Business Media).

Koubaa, A., Perré, P., Hutcheon, R.M., and Lessard, J. (2008). Complex Dielectric Properties of the Sapwood of Aspen, White Birch, Yellow Birch, and Sugar Maple. *Dry. Technol.* 26, 568–578.

Kretschmann, D.E. (1999). Mechanical Properties of Wood. *J. Inst. Wood Sci.* 46.

Kurz, J.H., Grosse, C.U., and Reinhardt, H.-W. (2005). Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete. *Ultrasonics* 43, 538–546.

Lasaygues, P., Arciniegas, A., and Brancheriau, L. (2014). Comparaison de méthodes de détection de TOF adaptées à la tomographie ultrasonore des arbres sur pied. *CFM* 5.

Lazarescu, C., Avramidis, S., and Oliveira, L. (2009). Modeling Shrinkage Response to Tensile Stresses in Wood Drying: I. Shrinkage-Moisture Interaction in Stress-Free Specimens. *Dry. Technol.* 27, 1183–1191.

Llana, D.F., Iniguez-Gonzalez, G., Arriaga, F., and Niemz, P. (2013). Influence of Temperature and Moisture Content in Non-destructive values of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *USDA For. Serv. For. Prod. Lab. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-226* 451–458.

chinh Mai, T. (2015). Evaluation non destructive des matériaux de construction par technique électromagnétique aux fréquences radar : modélisation et expérimentation en laboratoire. PhD Thesis. Bordeaux.

Manfoumbi, N. (2012). Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement. Université de Limoges.

Marra, G.G., PELLERIN, R.F., and GALLIGAN, W.L. (1966). Nondestructive determination of wood strength and elasticity by vibration. *Holz Als Roh- Werkst.* 24, 460–466.

- Masumi, H., Masato, T., Junji, M., and Kazuyuki, O. (2011). Effet of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood.
- Montero, C. (2011). Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois. Université Montpellier 2.
- Moutee, M. (2006). Modélisation du comportement mécanique du bois au cours de séchage. Université Laval.
- Nepveu, G. (1986). Variabilité génétique de la qualité du bois chez l'épicéa et le douglas. *Rev. For. Fr.* 4, 303–312.
- Niska, K.O., and Sain, M. (2008). Wood-Polymer composites (Boca Raton, Boston, NY, Washington, DC: CRC Press).
- Norimoto, M., and YAMADA, T. (1970). The dielectric properties of wood IV: On dielectric dispersions of oven-dried wood.
- Norimoto, M., and Yamada, T. (1970). The dielectric properties of wood IV: On dielectric dispersions of oven-dried wood.
- Norimoto, M., and Yamada, T. (1972). The dielectric properties of wood VI: on the dielectric properties of the chemical constituents of wood and the dielectric anisotropy of wood.
- de Oliveira, F.G.R., and Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresour. Technol.* 97, 2443–2446.
- de Oliveira, F.G.R., Candian, M., and Lucchette, F.F. (2005). Moisture content effect on Ultrasonic Velocity in *Goupia Glabra*. *Mater. Res.* 8, 11–14.
- Passarini, L. (2015). Etude du comportement physique des bois au-dessus et au-dessous du point de saturation des fibres. Université de Laval.
- Peyskens, E., De Pourcq, M., Stevens, M., and Schalck, J. (1984). Dielectric properties of softwood species at microwave frequencies. *Wood Sci. Technol.* 18, 267–280.
- Pierre, F. (2011). Traitement thermique du bois en vue de sa valorisation énergétique : effet de l'intensité de traitement sur la composition chimique, les propriétés énergétiques et la résilience mécanique. PhD Thesis.
- du Plooy, R., Villain, G., Palma Lopes, S., Ihamouten, A., Dérobert, X., and Thauvin, B. (2015). Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study. *Mater. Struct.* 48, 369–386.
- Poku, K., Wu, Q., and Vlosky, R. (2007). Wood properties and their variations within the tree stem of lesser-used species of tropical hardwood from Ghana. *Wood Fiber Sci.* 33, 284–291.
- Pot, G. (2012). Caractérisation mécanique du bois vert au cours de sa maturation et modélisation de la réaction gravitropique de jeunes peupliers. Thèse. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

- Pradhan, T. (2014). Finite Element Modeling of Impact-Generated stress wave propagation in concrete plates for non-destructive evaluation. Lehigh University.
- Rafsanjani, A., Derome, D., Wittel, F.K., and Carmeliet, J. (2012). Analyse multi-échelle du comportement hygromécanique du bois_Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesure de champs volumique de l'influence de l'hétérogénéité. *Compos. Sci. Technol.* 72, 744–751.
- Rodríguez-Abad, I., Martínez-Sala, R., García-García, F., and Capuz-Lladro, R. (2010). Non-destructive methodologies for the evaluation of moisture content in sawn timber structures: ground-penetrating radar and ultrasound techniques. *Surf. Geophys.* 8, 475–482.
- Ross, R.J. (1994). *Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review* (U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory).
- Ross, R.J. (2010). *Wood handbook: wood as an engineering material*. USDA For. Serv. For. Prod. Lab. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190 2010 509 P 1 V 190.
- Rowell, R.M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites* (Boca Raton, Fla: CRC Press).
- Royer, D., and Dieulesaint, E. (1996). *Ondes élastiques dans les solides Tome 1 Propagation libre et guidée* (Paris : Masson).
- Sahin, H., and Ay, N. (2004). Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies. *J. Wood Sci.* 50, 375–380.
- Sakai, H., Minamisawa, A., and Takagi, K. (1990). Effet of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics* 28, 383–385.
- Sandoz, J.L. (1993). Moisture Content and Temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Sci. Technol.* 373–380.
- Sbartai, Z.M., Laurens, S., Balayssac, J.-P., Ballivy, G., and Arliguie, G. (2006). Effect of concrete moisture on radar signal amplitude. *ACI Mater. J.* 103, 419.
- Senalik, C.A., Schuenneman, and Ross, R. (2014). Creep behavior of structural insulated panels (SIPs): results from a pilot study. *USDA For. Serv. For. Prod. Lab. Res. Note FPL-RN-0332 2014 16 P 332*, 1–16.
- Seron, F.J., Sanz, F.J., Kindelan, M., and Badal, J.I. (1990). *Finite-Element Method for Elastic Wave Propagation*.
- Simpson, W., and TenWolde, A. (1999). *Physical properties and moisture relations of wood*. Chapter 3, 2–1.
- Skaar, C. (1988). *Wood-Water Relations* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).
- Sow, M. (2015). *Contribution à la conception de radars géologiques impulsifs fonctionnant dans un milieu complexe*. PhD Thesis.

- Thibaut, B., Gril, J., and Fournier, M. (2001). Mechanics of wood and trees : some new highlights for an old story *Mécanique du bois et biomécanique des arbres : nouveaux regards sur une vieille question*. *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. IIB - Mech.* 329 (9), 701–716.
- Torgovnikov, G.I. (1993). *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).
- Unterwieser, H., and Schickhofer, G. (2011). Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 69, 171–181.
- Varnier, M. (2019). *Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus-Des sciences du bois à l'ingénierie*. Université de Limoges.
- Wang, X. (2008). Effects of Size and Moisture on Stress Wave E-rating of Structural Lumber. *Proc. 10th World Conf. Timber Eng.* 8.
- Warren, C., and Giannopoulos, A. (2011). Creating finite-difference time-domain models of commercial ground-penetrating radar antennas using Taguchi's optimization method. *GEOPHYSICS* 76, G37–G47.
- Zhang, H. (2003). Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 93, 1904–1912.
- Zisi, A., and Dix, J.K. (2017). Simulating mass loss of decaying waterlogged wood: A technique for studying ultrasound propagation velocity in waterlogged archaeological wood. *J. Cult. Herit.* 33, 39–47.

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet SouBois financé par la région Nouvelle Aquitaine. L'objectif est de proposer une méthodologie de couplage de méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) basées sur la propagation des ondes électromagnétiques (Radar) et mécaniques (Ultrasons) afin de fiabiliser l'auscultation et la surveillance des éléments structuraux en bois pour prolonger la durée de vie de ce type de construction. Une méthodologie de mesure et d'analyse est proposée. Dans un premier temps, un développement analytique du modèle de propagation des ondes mécaniques dans un matériau anisotrope a été approfondi. Puis des simulations numériques par la méthode aux éléments finis ont été réalisées afin de préparer un couplage avec des champs d'humidité hétérogènes ou des comportements à long terme. Ensuite, une campagne expérimentale est proposée pour caractériser les propriétés d'élasticité d'éléments en lamellé collé, corrélées aux variations d'humidité par méthodes radar et ultrasonore. Plusieurs facteurs pouvant présenter une sensibilité sur la propagation des ondes électromagnétique et mécanique dans le bois sont introduits comme la géométrie, l'espèce, l'humidité, la densité et la direction de propagation de l'onde par rapport à l'angle du fil. Finalement, dans une perspective d'auscultation in situ des structures, une méthodologie d'optimisation numérique, basée sur la propagation d'ondes ultrasonores, est proposée afin d'estimer les modules d'élasticité (E , G , ν) globaux des éléments à différents états d'humidité.

Mots-clés : Contrôle Non Destructif (CND), Radar, Ultrason, Méthode des Éléments Finis (MEF), Bois

Abstract

This work is developed in the context of the SouBois project funded by the Nouvelle Aquitaine region. The target is to propose a methodology for coupling non-destructive testing (NDT) techniques based on the propagation of electromagnetic (Radar) and elastic (Ultrasound) waves. This makes the auscultation and monitoring of wooden structural elements more reliable for extending the timber construction's life. As a first step, an analytical development of the mechanical ultrasonic wave propagation model in anisotropic material has been improved. Then a Finite Element Method simulation is realized to prepare a coupling with heterogeneous moisture fields or long-term behaviors. In a third step, an experimental campaign is introduced to identify the continuous of humidity (w) and mechanical (E , G , ν) in glulam beams at a structural scale using electromagnetic and ultrasonic waves. Several factors that could present sensitivities on the electromagnetic and mechanical waves propagation in wood are introduced like species, geometry, moisture content, density and direction of wave propagation relative to the grain angle. Finally, with a view to in situ assessment of structures, a numerical optimization methodology is proposed according to the ultrasonic measurement results which allows the estimation of global elasticity moduli (E , G , ν) through a linear relation with density under different moisture conditions.

Keywords: Non-Destructive testing (NDT), Radar, Ultrasonic, Finite Element Method (FEM), Wood

