



HAL
open science

Approche expérimentale-numérique basée sur la résistivité électrique pour l'évaluation de l'état hydrique du Douglas-fir

Wael Hafsa

► **To cite this version:**

Wael Hafsa. Approche expérimentale-numérique basée sur la résistivité électrique pour l'évaluation de l'état hydrique du Douglas-fir. Autre. Université de Limoges, 2021. Français. NNT : 2021LIMO0048 . tel-03350896

HAL Id: tel-03350896

<https://theses.hal.science/tel-03350896v1>

Submitted on 21 Sep 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

**École Doctorale Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique,
Énergétique ED 609**

Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D)

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

Présentée et soutenue par
Wael Hafsa

Le 13 juillet 2021

**Approche expérimentale-numérique basée sur la résistivité
électrique pour l'évaluation de l'état hydrique du Dougals-fir**

Thèse dirigée par Ion Octavian POP

JURY :

Président du jury

Mme. Evelyne Toussaint, Professeure des Universités, Institut Pascal, Polytech
Clermont Ferrand

Rapporteurs

Mme. Aveline Darquennes, Professeure des Universités, LGCGM, INSA Rennes
M. Samir Hamza, Professeur des Universités, INSAT, Université de Carthage

Examineurs

M. Nicolas Angellier, Maître de Conférences, GC2D, Université de Limoges
M. Mokhfi Takarli, Maître de Conférences, GC2D, Université de Limoges
M. Ion Octavian Pop, Maître de Conférences HDR, GC2D, Université de Limoges

Invité :

Julien Gance, Ingénieur docteur en géophysique, R&D, Iris Instruments d'Orléans



A ma mère : Sonia,
A mon père : Chaker (paix à son âme),
A ma sœur : Wiem.

Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D) de l'Université de Limoges (UL). Il s'inscrit dans le cadre d'un financement de la Région Nouvelle-Aquitaine.

Je tiens d'abord à remercier Mme. Aveline Darquennes, professeure des universités à l'INSA de Rennes, Mme Evelyne Toussaint, professeure des universités à Polytech Clermont Ferrand et M. Samir Hamza, professeur des universités à l'INSAT de Tunis, qui m'ont fait l'honneur de rapporter ce travail de thèse.

Mes sincères mots de remerciement se dirigent vers mes encadrants :

Je remercie M. Nicolas Angellier, qui est à l'origine de ce projet de thèse. Je lui exprime mes sincères remerciements pour le soutien qu'il m'a apporté et pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail. Je remercie également M. Mokhfi Takarli, qui a supervisé ce travail et dont les compétences et la vision aiguisée de la problématique traitée ont été des éléments clefs dans le choix de la méthodologie de l'étude. Mes sincères reconnaissances vont tout particulièrement à M. Ion Octavian Pop, mon directeur de thèse, pour sa disponibilité, son aide et son soutien tout au long de mes travaux de thèse.

Au-delà de leur encadrement scientifique, je tiens à leur exprimer ma reconnaissance pour leurs qualités humaines qui ont grandement contribué à l'avancement de ce travail.

Je remercie également, Nicolas Sauvat responsable de l'équipe Bois et Frédéric Dubois le directeur du laboratoire GC2D de l'université de Limoges, pour m'avoir donné l'opportunité d'évoluer dans le monde de la recherche scientifique et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à l'aboutissement de ce travail de thèse.

Je remercie vivement les personnels techniques, administratifs et à toute l'équipe de GC2D pour m'avoir soutenu et accompagné tout le long de ces années de thèse. Je remercie mes collègues doctorants, en insistant particulièrement sur mon cher colocataire Christian, mes ami(e)s Amina, Xi, Sofyane et Minh Dung. Mes remerciements vont également à tous mes ami(e)s, qui m'ont apporté le soutien moral.

Enfin, je tiens à rendre hommage à ma famille qui m'a toujours soutenu au cours de ces années malgré la distance qui nous sépare.

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/>



Résumé

La gestion de la durabilité du matériau bois représente un enjeu socio-économique dans un premier temps, mais aussi des intérêts environnementaux et culturels importants. Dans ce contexte, ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une problématique générale qui porte sur la durabilité des structures en bois. Le travail de recherche réalisé a eu pour objectif d'étudier le comportement hydrique de ce matériau en utilisant une approche de Contrôle Non Destructif (CND) basée sur la mesure de la résistivité électrique.

Ce travail de recherche repose principalement sur l'utilisation d'une méthode électrique habituellement employée pour des mesures multiplexées de prospection hydrogéologique en géophysique. La démarche suivie est basée sur le développement d'une approche mixte par le couplage des mesures électriques et inversion numérique afin de déterminer le taux d'humidité à l'échelle du matériau bois, la répartition spatiale de l'humidité à l'échelle intermédiaire d'un élément et in-situ à l'échelle d'une structure. Des études paramétriques sont menées en parallèle pour caractériser l'influence des différentes conditions environnementales (humidité et température) sur les mesures expérimentales in-situ.

Abstract

Moisture is a major factor that influence the service life durability of wood-based structures. In order to establish an optimal and reliable diagnostic of the hydric state of these structures, this work proposes on the use of a Non Destructive Testing (NDT) approach based on the electrical resistivity measurements. The aim of this work is to develop a mixed experimental-numerical approach to evaluate the wood moisture content (MC) in Douglas-fir wood. Therefore, a parametric study was set up to analyze the effect of some operational and material variables on resistance measurements. An experimental protocol was implemented to evaluate spatial distribution of MC in wood element. Electrical resistivity measurements on a timber construction are also presented to highlight the experimental strategy concerning in-situ monitoring.

Table des symboles

a	écartement entre les électrodes	m
A, B	Positions des électrodes d'injection de courant	/
C_1, C_2, C_3	Constantes de calibration	/
D_0	Coefficient de diffusion	m^2/s
\bar{D}	Tenseur de diffusivité massique	/
E	Espérance mathématique (moyenne)	/
E	Module de Young	$N.mm^{-2}$
f	Fonction de distribution	/
F	Fonction de répartition	/
HR	Humidité relative	%
I	Courant électrique	Ampère (A)
I_s	Seuil d'injection de courant électrique	μA
\vec{J}	Vecteur de flux massique	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
\vec{j}	Densité de courant	$A.m^{-2}$
k	Coefficient de non-linéarité	/
k_T	Coefficient de variation de la résistivité par degré de température	$^{\circ}C^{-1}$
k_w	Coefficient de variation de la résistivité vs. la teneur en eau	/
k_x	Facteur géométrique de la configuration x	m
L	Fonction de vraisemblance	/
$Log L$	Fonction de Log-vraisemblance	/
m_e	Masse d'eau dans le bois	kg
m_s	Masse sèche (ou anhydre) du bois	kg
m_t	Masse totale du bois	kg
M	Chargeabilité apparente	mV/V ou %
M, N	Positions des électrodes de mesure de tension	/
R	Résistance électrique	Ω
R_{exp}	Résistance électrique expérimentale	Ω
R_{num}	Résistance électrique numérique	Ω
S	Coefficient d'échange surfacique	m/s
t	Temps	s
T	Température	$^{\circ}C$
T_{ref}	Température de référence	$^{\circ}C$
V	Tension ou différence de potentiel (d.d.p)	Volts (V)
w	Teneur en eau	%
w_{eq}	Teneur en eau d'équilibre	%
w_{exq}	Teneur en eau expérimentale	%
X	Variable aléatoire	/

Table des symboles grecs

α	Configuration d'électrodes Wenner alpha	/
β	Configuration d'électrodes Wenner beta	/
γ	Configuration d'électrodes Wenner gamma	/
ρ	Résistivité électrique	$\Omega.m$
ϑ	Variance mathématique	/
δ_I	Résolution de courant du résistivimètre	μA
δ_V	Résolution de tension du résistivimètre	μV
μ	Espérance mathématique	/
σ_x	Ecart type de x	/
σ	Conductivité électrique	S
\vec{V}_W	Concentration de la teneur en eau	$kg.m^{-3}$

Liste des Abréviations

CA	courant alternatif
CC	courant continu
CND	contrôle non destructif
CS	classe de service
DD	dispositif de mesure Dipôle-Dipôle
DDE	dispositif de mesure Dipôle-Dipôle Equatorial
EA	émission acoustique
END	essai non destructif
GRP	ground penetrating radar
HAM	heat, air and moisture
IE	Imagerie électrique
L, R, T	les directions longitudinales, radiale et tangentielle, respectivement
PSF	point de saturation des fibres
SHM	structural health monitoring
TRE	tomographie de résistivité électrique
TIR	thermographie infrarouge
UT	ultrason

Table des matières

Résumé.....	6
Abstract.....	7
Table des symboles	8
Table des symboles grecs.....	9
Liste des Abréviations	10
Introduction générale.....	21
I.1. Objet et but de la thèse	21
I.2. Motivations.....	21
I.3. Problèmes posés	21
I.4. Axe de recherche retenu.....	22
I.5. Méthodologie	22
I.6. Structure de la thèse.....	23
I.7. Publications	24
Partie I. La durabilité des structures en bois : contexte et problématique	27
I.1. Introduction	27
I.2. Construction en bois	27
I.3. Le bois : un matériau hétérogène.....	29
I.3.1. Structure multi-échelle : anatomie et orthotropie.....	29
I.3.2. L'humidité interne du bois.....	32
I.3.2.1. Teneur en eau.....	32
I.3.2.2. Point de saturation des fibres.....	33
I.3.2.3. Diffusion hydrique	33
I.3.2.4. Equilibre hygroscopique.....	35
I.3.3. Phénomène de retrait-gonflement	37
I.4. Influence de l'état hydrique sur l'état de santé des structures en bois	38
I.4.1. Les types de pathologies dans les structures en bois	38
I.4.2. Classification climatique : les classes de services	41
I.4.3. Diversité des risques biologiques	42
I.4.3.1. Les attaques d'insectes et les champignons	42
I.4.3.2. Durabilité naturelle	45
I.4.3.3. Cas particulier du Douglas-fir.....	47
I.4.4. Pathologies biologiques : analyse de causes.....	47
I.4.5. Déformation et fissuration dues aux gradients d'humidité	49
I.4.5.1. Zones active et passive.....	49
I.4.5.2. Déformations.....	50
I.4.5.3. Fissurations.....	52
I.5. Les politiques de maintenance préventive pour la durabilité des structures bois.....	53
I.5.1. Stratégies de maintenance préventive.....	53
I.5.1.1. Définitions	53
I.5.1.2. Généralités sur le processus SHM.....	54
I.6. Les méthodes CND pour les structures bois	56
I.7. Estimation de l'état hydrique	57
I.7.1.1. Méthode radiométriques : la gammadensimétrie.....	58
I.7.1.2. Méthodes diélectriques/électromagnétiques.....	58

I.7.1.3. Méthodes résistives	60
I.8. Conclusion	62
Partie II. Evaluation de l'état hydrique par mesures résistives	63
II.1. Introduction	63
II.2. Résistance et résistivité électriques	63
II.3. Mesures résistives dans le bois	63
II.4. Données bibliographiques.....	65
II.4.1. Type et classification des données	65
II.4.2. Modélisation statistique	67
II.5. Les paramètres explicatifs	71
II.5.1. Influence de la teneur en eau	72
II.5.2. Influence de l'anatomie du bois	73
II.5.3. Influence de la température	73
II.5.4. Influence de l'orthotropie	74
II.5.5. Couplage résistance, température et teneur en eau	75
II.6. Imagerie électrique (IE) : de la géophysique au bois.....	76
II.6.1. IE en milieu semi infini.....	76
II.6.1.1. Résistivité apparente : équations fondamentales	77
II.6.1.2. Polarisation provoquée (PP)	79
II.6.1.3. Configurations des électrodes	81
II.6.1.4. Multiplexage.....	83
II.6.1.5. Modèle direct et inversion	84
II.6.2. Adaptation de l'imagerie électrique au milieu fini	85
II.6.3. IE appliquée au bois	87
II.6.3.1. Domaine capillaire.....	88
II.6.3.2. Domaine hygroscopique.....	88
II.7. Conclusion	89
Partie III. Approche mixte expérimentale-numérique basée sur la résistivité électrique	91
III.1. Introduction	91
III.2. Approche expérimentale	92
III.2.1. Présentation des résistivimètres	92
III.2.2. Adaptation du matériel.....	94
III.2.2.1. Gammes d'injection et de résolution.....	94
III.2.2.2. Electrodes	94
III.2.3. Tri de données : limites du matériel	95
III.3. Protocole expérimental	97
III.3.1. Préparation et conditionnement des éléments d'études.....	97
III.3.2. Etude préliminaire.....	99
III.3.2.1. Configurations et direction de multiplexage	99
III.3.2.2. Variation de température.....	100
III.3.3. Etude paramétrique	101
III.4. Approche numérique.....	101
III.4.1. Modèle par éléments finis.....	102
III.4.2. Analogie thermique électrique	104
III.4.3. Applications numériques.....	106
III.4.3.1. Détermination des facteurs géométriques	106
III.4.3.2. Isolation et enfoncement de l'électrode	108

III.4.3.3. Variation des dimensions de l'échantillon.....	110
III.5. Conclusion.....	111
Partie IV. Etude paramétrique et caractérisation d'une loi de passage entre résistivité et teneur en eau.....	112
IV.1. Introduction.....	112
IV.2. Etude préliminaire.....	112
IV.2.1. Mode et durée d'injection.....	112
IV.2.2. Effet de la configuration.....	114
IV.2.3. Application de différents niveaux de température.....	116
IV.3. Etude paramétrique.....	118
IV.3.1. Limite de la mesure à faibles teneurs en eau et températures : Syscal Junior et Syscal Pro.....	118
IV.3.2. Multiplexage des électrodes et évaluation de la résistivité homogène.....	121
IV.3.3. Résistivité électrique vs l'orthotropie du matériau.....	123
IV.3.4. Relation entre la résistivité et la température.....	124
IV.3.5. Relation entre la résistivité et la teneur en eau.....	125
IV.4. Identification globale de la loi de passage.....	127
IV.5. Conclusion.....	128
Partie V. Applications à différentes échelles.....	130
V.1. Introduction.....	130
V.2. Echelle laboratoire intermédiaire.....	130
V.2.1. Protocole expérimentale.....	130
V.2.2. Modèle éléments fini et inversion numérique.....	132
V.2.3. Champ hydrique homogène.....	134
V.2.3.1. Mesures dans la direction N.....	135
V.2.3.2. Algorithme de tri de données.....	136
V.2.4. Champ hydrique hétérogène : diffusion hydrique.....	138
V.2.4.1. Mise à jour des paramètres de diffusion par méthode inverse.....	138
V.2.4.2. Identification des paramètres de la loi passage.....	140
V.2.5. Synthèse bibliographique.....	142
V.3. Echelle structurale.....	143
V.3.1. Les assemblages dans les structures bois.....	143
V.3.2. Protocole expérimental in-situ.....	144
V.3.3. Modèle par éléments fini de la poutre.....	146
V.3.4. Evaluation de l'état hydrique in-situ.....	148
V.4. Conclusion.....	150
Conclusion et perspectives.....	151
Conclusions.....	151
Perspectives.....	153
Références bibliographiques.....	154
Normes.....	165
Annexes.....	166

Table des illustrations

Figure 0-1 : Schéma descriptif de la structure de la thèse	26
Figure I-1 : Evolution de la construction en bois en 2018 par rapport à 2016.....	28
Figure I-2 : Quelques exemples de construction en bois en France depuis l'année 2000	28
Figure I-3 : Schéma explicatif de la structure du bois à différentes échelles	30
Figure I-4 : a) Schémas explicatifs de la structure d'un résineux et d'un feuillu ; b) Vue du plan RT au microscope électronique à balayage (Douglas-fir et Chêne) prise à l'IUT d'Egletons pour la fête de la science 2020	31
Figure I-5 : Les directions et les plans ligneux dans le bois	32
Figure I-6 : Illustration de la variation de l'humidité interne dans le bois au cours des différentes phases de transformation (Gamper et al. 2014)	33
Figure I-7 : a) Isothermes de sorption pour différentes essences (Manfoumbi Boussougou 2012) ;	36
Figure I-8 : a) Abaque d'équilibre hygroscopique normative (EN 1995-1-1/NA 2010) ; b) Identification des isothermes de sorption par familles (Varnier 2019)	36
Figure I-9 : La linéarité du phénomène de retrait dans le domaine hygroscopique : exemple de mesures expérimentales dans le plan transverse (Kelsey 1963)	38
Figure I-10 : Les types et les causes des pathologies issus d'une évaluation de 245 structures en bois (Dietsch, Gamper, et al. 2015).....	39
Figure I-11 : Les risques liés aux gammes de teneur en eau du bois (Dietsch, Franke, et al. 2015).....	40
Figure I-12 : a) illustration de l'effet de la teneur en eau sur le module d'Young en direction tangentielle pour différentes essences (Goulet et Ouellet 1968) ; b) Influence de la teneur en eau du bois sur quelques propriétés mécaniques du bois (Kollmann et Côte 1968)	40
Figure I-13 : Exemples d'espèce de coléoptères et les dégâts sur le bois	43
Figure I-14 : a) Termites de la famille des Reticulitermes flavipes ; b) Aspect feuilleté du bois résultant des attaques de termites.....	43
Figure I-15 : Les dégâts de l'application de différents types de champignons sur des échantillons d'Epicéa (Reinprecht, Novotná, et Štefka 2007).....	44
Figure I-16 : Distribution de la teneur en eau durant un processus d'adsorption et distinction entre les zones active et passive	50
Figure I-17 : Les variations hydriques dans la hauteur de 4 poutres d'essences différentes en CS3	50
Figure I-18 : Diagramme de déformations pour un échantillon en Chêne rouge séché à 110 °F (McMillen 1955)	51
Figure I-19 : a) déchaussement de connecteur métallique dû à une déformation horizontale ;	51

Figure I-20 : Exemples de fentes sur des ouvrages en bois : a) fente présentant une teneur en eau localement élevée due au retrait du bois ; b) fentes de retrait créant des pièges à eau ; c) bois rond sensible au retrait.....	52
Figure I-21 : Répartition des contraintes de compression et de traction provoquant le développement de fissures (Dietsch, Franke, et al. 2015)	52
Figure I-22 : Architecture d'un processus SHM multidisciplinaire.....	54
Figure I-23 : Protocole expérimental pour les mesures gammadensimétriques (Nguyen et al. 2013).....	58
Figure I-24 : Protocole expérimental pour l'étude de l'effet de l'anisotropie sur les mesures Radar sur des éléments en Douglas-fir (DG, DC, DP) et en Epicéa (EP) ($\varepsilon'_{ }$: parallèle aux fibres, ε'_{\perp} : perpendiculaire aux fibres)	59
Figure I-25 : Mesures de capacité électrique en fonction de l'humidité pour des échantillons simples et lamellé collé de (espacement d'électrodes = 16,5 mm)	60
Figure I-26 : Exemples de stratégies d'électrodes utilisées pour les mesures résistives.....	61
Figure I-27 : Exemples d'applications de méthodes électriques.....	61
Figure II-1 : Cartographie de quelques laboratoires qui travaillent sur le développement des méthodes résistives (pour des raisons de simplicité de lecture, les noms des universités correspondantes aux laboratoires sont marqués sur la cartographie).....	64
Figure II-2 : Les données bibliographiques des essais expérimentaux de la résistance électrique en fonction la teneur en eau du bois.....	66
Figure II-3 : Les lois de probabilité pour les données bibliographiques de résistance à 14% de teneur en eau : a) fonction de densité ; b) fonction de répartition.....	68
Figure II-4 : Les fonctions de densité de la résistance électrique dans le domaine hygroscopique.....	69
Figure II-5 : Les fonctions de répartitions de la résistance électrique dans le domaine hygroscopique.....	70
Figure II-6 : Evolution de l'espérance de la loi normale dans le domaine hygroscopique.....	71
Figure II-7 : Résistance électrique du Pin en fonction des trois directions d'orthotropie (Nota : les 3 courbes se chevauchent) (Samuelsson 1990)	75
Figure II-8 : Mesures de résistance électrique à différents températures et teneurs en eau pour du Pin du Nord (Forsen et Tarvainen 2000).....	75
Figure II-9 : Injection de courant dans : a) un milieu infini, homogène et isotrope ; b) un milieu semi-infini homogène et isotrope ; c) un sol homogène en utilisant pour 2 électrodes d'injection A et B en surface (vue en plan, vue en coupe et voltage le long de l'axe recoupant A et B) (Chouteau et Giroux 2006)	78
Figure II-10 : Dispositif à 4 électrodes positionnées en surface	78
Figure II-11 : a) Forme de courant et b) principe de mesure de la polarisation provoquée (Florsch et al. 2017)	80
Figure II-12 : Position des électrodes pour les différentes configurations	81

Figure II-13 : Les différentes sensibilité de mesures en géophysique pour les configurations a) Wenner-Alpha, b) Wenner-Bêta et c) Wenner-Gamma	82
Figure II-14 : Exemple de multiplexage d'électrodes pour le dispositif « dipôle-dipôle »	83
Figure II-15 : Modèle direct et inversion via Res2Dinv (Hebbache 2017).....	85
Figure II-16 : a) Installation des électrodes sur la surface d'un échantillon en béton ; b) Les 26 points de mesures de résistivités apparentes ; c) Les résultats d'inversion (du Plooy et al. 2013).....	86
Figure II-17 : Localisation et caractérisation des fissures dans le béton (Karhunen et al. 2010).....	86
Figure II-18 : Capteur installé sur site avant coulage du béton et modèle numérique de l'ensemble ferrailage, capteur, béton d'enrobage (Priou et al. 2019)	87
Figure II-19 : Etude bibliographique des mesures de résistivité électrique du bois	87
Figure II-20 : Les résultats de l'application de l'IE sur un tronc d'Epicéa après une période de sécheresse (Ganthaler et al. 2019).....	88
Figure II-21 : Stratégies expérimentale et numériques de caractérisation des champs hydriques.....	89
Figure III-1 : présentation générale de l'approche mixte (expérimentale-numérique).....	91
Figure III-2 : Processus de mesure et logiciels utilisés.....	92
Figure III-3 : Installation de diviseurs de courant : a) Syscal Junior ; b) Syscal Pro.....	94
Figure III-4 : Electrodes isolées à base de vis	95
Figure III-5 : Essai d'imbibition sur un échantillon en Douglas-fir	96
Figure III-6 : Mesures de Q et I_{AB} pour un essai d'imbibition (1 ^{er} jour et après 24 jours).....	96
Figure III-7 : L'ensemble d'éléments en bois testés dans le travail de thèse.....	97
Figure III-8 : Conditionnement des échantillons D1 et D2	98
Figure III-9 : Protocole expérimental de l'étude préliminaire	99
Figure III-10 : a) Les 3 configurations (α , β et γ) testées ; b) Les combinaisons testées pour la configuration β avec 2 directions de multiplexage.....	100
Figure III-11 : Protocole expérimental pour l'étude paramétrique.....	101
Figure III-12 : Modélisation de l'électrode cylindrique	102
Figure III-13 : Modélisation de la zone d'implantation de l'électrode	103
Figure III-14 : Maillage éléments finis d'un échantillon 50x50x50 mm ³	104
Figure III-15 : Analogie thermique électrique	105
Figure III-16 : Injection électrique et multiplexage pour les configurations β , γ et α ($\rho = 1000 \Omega.m$).....	107
Figure III-17 : Les facteurs géométriques calculés par le modèle numérique pour les différentes configurations	107

Figure III-18 : Champs de potentiel dans le matériau en fonction de l'isolation de l'électrode (configuration β ; $I_{AB} = 1A$).....	108
Figure III-19 : Variation de la longueur de la partie isolée de l'électrode (L_{is})	109
Figure III-20 : Influence de la variation de l'enfoncement de l'électrode sur le facteur géométrique	109
Figure III-21 : Effet de la variation des dimensions de l'échantillon sur l'erreur relative sur le facteur géométrique k par rapport à la solution analytique k_{infini}	110
Figure IV-1 : Mesures de résistances en mode Rho et Rho/IP et de chargeabilité totale à différentes durées d'injection (configuration β).....	113
Figure IV-2 : Les résultats expérimentaux et numériques pour l'échantillon D1 (toutes les combinaisons de configurations testées).....	115
Figure IV-3 : Modélisation de l'évolution des mesures de résistance électrique pour l'échantillon D2 en fonction du temps d'application de différents niveaux de température ..	116
Figure IV-4 : Comparaison entre les mesures de résistances électriques en utilisant les deux résistivimètres Syscal Junior et Syscal Pro.....	119
Figure IV-5 : Ecart relatif entre les mesures des deux résistivimètres en fonction des niveaux d'humidité et de températures	120
Figure IV-6 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_4 = 25\%$).....	121
Figure IV-7 : Exemple de la sélection des points rejetés pour $w = 25\%$ et $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$	122
Figure IV-8 : Résistivités électriques pour les différentes directions L, R et T (en jaune : $w_1 = 11.6\%$; en rouge : $w_2 = 14.1\%$; en bleu : $w_3 = 16.8\%$; en vert : $w_4 = 25\%$).....	123
Figure IV-9 : Résistivités en échelle logarithme en fonction de la température pour différents niveaux de teneurs en eau	124
Figure IV-10 : Résistivités en fonction de la teneur en eau à différentes températures	126
Figure V-1 : Instrumentation de l'échantillon D21	131
Figure V-2 : Protocole expérimental pour l'échantillon D21	131
Figure V-3 : Evolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon D21	132
Figure V-4 : Modèle numérique, multiplexage et grille de discrétisation.....	133
Figure V-5 : Résultats d'inversion pour la direction N	135
Figure V-6 : Principe de l'algorithme de tri de données pré-inversion	136
Figure V-7 : Résultats d'inversion des mesures dans la direction N, R et après tri	137
Figure V-8 : Comparaison de la teneur en eau moyenne par pesée et celle du modèle par différences finies (DF)	139
Figure V-9 : Résultats numériques des profils spatiaux temporels de la teneur en eau pour l'échantillon D21	140
Figure V-10 : Profils spatiaux de résistivités électriques	140
Figure V-11 : Identification globale et pondérée des paramètres de la loi de passage.....	141

Figure V-12 : Données de résistivité (échelles laboratoire et laboratoire intermédiaire)	142
Figure V-13 : Comparaison des mesures résistives en fonction de la teneur en eau avec les données bibliographiques.....	143
Figure V-14 : Fissuration d'un poteau au niveau d'un assemblage	144
Figure V-15 : Zone d'étude in-situ et station météo	144
Figure V-16 : Suivi des conditions thermohydrauliques	145
Figure V-17 : Répartition des données HR	145
Figure V-18 : Protocole expérimental et exemple d'injection électrique via la configuration équatoriale	146
Figure V-19 : Modèle numérique et multiplexage pour le poteau ($\rho=10^4 \Omega.m$)	147
Figure V-20 : Facteurs géométriques numériques des configurations testées sur le poteau	148
Figure V-21 : Résistances expérimentales et numériques pour la mesure à 1 jour.....	148
Figure V-22 : Résultats de teneurs en eau mesurées par la méthode résistive	149
Figure 0-1 : Fonctions de densité de probabilités pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 45 % et 54 %.....	168
Figure 0-2 : Fonctions de répartition de probabilités pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 45 % et 54 %.....	168
Figure 0-3 : Fonctions de densité de probabilité pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 157 % et 192 %.....	169
Figure 0-4 : Fonctions de densité de probabilité pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 157 % et 192 %.....	169
Figure 0-5 : Mesures de résistances en mode Rho et Rho/IP et de chargeabilité totale à différentes durées d'injection (configuration γ).....	171
Figure 0-6 : Mesures de résistances en mode Rho et Rho/IP et de chargeabilité totale à différentes durées d'injection (configuration α).....	171
Figure 0-7 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_1 = 11.6$ %).	172
Figure 0-8 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_2 = 14.1$ %).	172
Figure 0-9 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_2 = 16.8$ %).	173
Figure 0-10 : Résistances expérimentales et numériques (poteau)	175

Table des tableaux

Tableau I-1 : Constitution chimique de quelques essences de bois	30
Tableau I-2 : Exemples de valeurs de coefficient de diffusion D_0 en m^2/s	35
Tableau I-3 : Coefficients de rétractibilité de quelques essences de bois (LCPC 2008)	38
Tableau I-4 : Les classes de service selon EN 335 (2013)	41
Tableau I-5 : Exemples de durabilité naturelle de quelques essences vis-à-vis 3 agresseurs particuliers (SETRA 2006)	45
Tableau I-6 : Relation entre la durabilité naturelle de quelques essences vis-à-vis les champignons et les classes de service	46
Tableau I-7 : Exemples de pathologies d'origine biologique et leurs causes de développement	48
Tableau I-8 : Classification des données utilisées dans le SHM pour les constructions en bois (Riggio et Dilmaghani 2019)	55
Tableau I-9 : Aperçu de quelques outils CND utilisées pour la caractérisation des propriétés physiques du bois	56
Tableau II-1 : Résultats de l'analyse de vraisemblance pour les lois Normale, Weibull et Gamma ($w=14\%$)	69
Tableau II-2 : Résultats de la modélisation statique dans le domaine hygroscopique	70
Tableau II-3 : Classification des variables affectant la résistance électrique du bois	72
Tableau II-4 : Caractéristiques des différents dispositifs : Wenner, Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle (Hebbache 2017)	82
Tableau III-1 : Caractéristiques des résistivimètres utilisés dans cette étude	93
Tableau III-2 : Conditionnement des échantillons pour une étude paramétrique	98
Tableau III-3 : Les grandeurs équivalentes par analogie thermique électrique	105
Tableau IV-1 : Les résultats expérimentaux et numériques pour les configurations β , γ et α	115
Tableau IV-2 : Résultats expérimentaux de l'échantillon D2 à différents niveaux de température	117
Tableau IV-3 : Résultats de la modélisation de l'évolution de la résistance à différents niveaux de températures	118
Tableau IV-4 : Moyennes des rapports entre les mesures de Syscal Pro et les mesures de Syscal Junior en fonction de T et w	120
Tableau IV-5 : Résistivités moyennes et dispersion des mesures pour différents T et w	122
Tableau IV-6 : Les coefficients de régression de la relation linéaire résistivité-température pour différentes teneur en eau	125
Tableau IV-7 : Les coefficients de régression de la relation résistivité-teueur en eau à différentes températures	126

Tableau IV-8 : Quelques exemples du coefficient k_M trouvés dans la littérature.....	127
Tableau V-1 : Les quadripôles présentant une déviation standard élevée dans la direction N	135
Tableau V-2 : Identification des paramètres de diffusion pour l'échantillon D21	139
Tableau V-3 : Exemple de 2 configurations d'électrodes DD équatorial.....	146
Tableau V-4 : Evaluation des résistivité, température et teneur en eau	149
Tableau 0-1 : Les fonctions de densité et de log-vraisemblance des lois de Weibull et Gamma	167
Tableau 0-2 : Combinaisons testées pour les configurations γ et α (A et B pour l'injection ; M et N pour la mesure de tension)	170
Tableau 0-3 : Configurations DD équatorial testées sur le poteau	174

Introduction générale

I.1. Objet et but de la thèse

L'objectif de ce travail de thèse est l'évaluation de l'humidité interne dans le matériau bois par une approche expérimentale-numérique utilisant une méthode électrique résistive. Les outils et les méthodes développés visent à terme des applications sur des structures en bois soumises à des sollicitations thermo-hydriques in-situ.

I.2. Motivations

La gestion de la durabilité du matériau bois représente un enjeu socio-économique dans un premier temps, mais aussi des intérêts environnementaux et culturels importants.

Deux motivations principales sont à l'origine de cette étude :

- La première concerne une volonté forte de *développer l'usage du bois dans la construction* ; la RE 2020 impose une transformation progressive des techniques de construction avec une prépondérance du bois, matériau qui répond aux exigences de la nouvelle réglementation environnementale.
- La deuxième est en relation avec la question de *la durabilité du matériau* qui est intimement liée aux variations d'humidité interne ; un taux d'humidité élevée est souvent la cause de désordres et de pathologies que nous pourrions rencontrer dans des éléments de structures en bois. La mise en place des stratégies d'inspection et de surveillance de l'humidité interne des ouvrages permet d'anticiper des stratégies de maintenance préventive.

I.3. Problèmes posés

L'humidité interne est un paramètre important qui peut conditionner les propriétés physiques et mécaniques des éléments de structure en bois. Cependant, la mesure du taux d'humidité peut s'avérer complexe à cause de la variabilité du matériau et/ou des capacités des outils de mesure. En effet, le bois par sa variabilité naturelle, son hétérogénéité, son anisotropie et sa forte sensibilité aux conditions climatiques complique souvent la tâche de l'expérimentateur. A ces difficultés peut s'ajouter la fiabilité des techniques de contrôle et de diagnostic mises en œuvre. Ainsi, pour définir une mesure optimale de l'humidité interne, il y a lieu de réaliser deux investigations approfondies et distinctes. La première devra définir les effets éventuels des propriétés du matériau sur la mesure de l'humidité. La deuxième investigation, quant à elle, devra définir les capacités de l'instrument de mesure et son adaptation par rapport à la problématique de l'échelle et les conditions d'exploitation. Nous proposons par la suite le développement d'une méthodologie expérimentale et numérique permettant de traiter les problématiques d'accessibilité et de mise en œuvre in-situ et de la prise en compte de la répartition spatiale de la teneur en eau.

I.4. Axe de recherche retenu

Face à la demande des maîtres d'ouvrage en techniques de contrôle et évaluation non destructifs (CEND) destinées à l'évaluation de l'état hydrique des structures en bois, l'équipe Bois du laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D) met en place des outils et des techniques non destructifs afin d'améliorer les stratégies de diagnostic et de monitoring des ouvrages (radar, ultrason et prospection électrique).

Ce travail de recherche repose principalement sur l'utilisation d'une méthode électrique habituellement employée pour des mesures multiplexées de prospection hydrogéologique en géophysique. La démarche suivie repose sur le développement d'une approche mixte par le couplage des mesures électriques et l'inversion numérique afin de déterminer le taux d'humidité à l'échelle du matériau bois, la répartition spatiale de l'humidité à l'échelle intermédiaire d'un élément et in-situ à l'échelle d'une structure. Des études paramétriques sont menées en parallèle pour caractériser l'influence des différentes conditions environnementales (humidité et température) sur les mesures expérimentales in-situ.

I.5. Méthodologie

L'essence du bois qui a été mise en avant dans le cadre de ce travail de thèse est le Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), une essence prédominante dans notre région.

Dans le cadre de ce travail, l'étude de la teneur en eau a été réalisée pour plusieurs échelles d'observation :

- A l'échelle du matériau (échelle laboratoire), des échantillons ont été prélevés sur la même poutre afin de limiter la variabilité des échantillons et d'avoir le même conditionnement thermo-hydrique. Sur le plan méthodologique, le travail a comporté notamment les étapes suivantes :
 - 1) Une adaptation de l'outil de mesure à l'échelle du matériau bois et le développement de l'approche mixte expérimentale-numérique ;
 - 2) Une identification des facteurs liés aux propriétés du matériau, aux configurations expérimentales utilisées et aux limites du matériel de mesure ;
 - 3) Une détermination du comportement de la mesure d'humidité interne en tenant compte des différentes conditions expérimentales et environnementales ;
- A l'échelle de l'élément de structure (échelle laboratoire intermédiaire), un protocole expérimental a été proposé pour l'évaluation d'un gradient d'humidité unidirectionnel à travers une cartographie de résistivité électrique. Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux précédents réalisés dans la thèse de Nguyen (2014) au sein du laboratoire GC2D.
- A l'échelle de la structure (in-situ), un protocole de mesure basé sur l'utilisation des organes des assemblages comme électrodes est proposé.

I.6. Structure de la thèse

Partie I :

Ce premier chapitre est consacré à l'analyse de la problématique posée dans le cadre de cette étude. En premier lieu, nous examinons la structure du bois à différentes échelles et ses différentes propriétés physiques. Ensuite, nous mettons l'accent sur l'influence de l'état hydrique sur l'état de santé des structures et nous identifions l'ensemble des risques biologiques associés à son emploi. Par ailleurs, nous présentons d'une façon générale le contexte de la durabilité des structures en bois et les politiques de maintenance préventive utilisées dans la construction, et ce, afin que ce matériau puisse retrouver sa position de choix dans la famille des matériaux de construction en Génie Civil compte tenu des challenges environnementaux actuels. La dernière section de ce chapitre porte sur les différents techniques de Contrôle Non Destructif (CND) utilisées pour l'évaluation de l'état de santé des structures en bois. Une réflexion particulière est faite sur les techniques dévolues à l'inspection de l'état hydrique.

Partie II :

La deuxième partie de la thèse est une étude bibliographique sur les méthodes électriques basées sur la mesure de la résistance/résistivité électrique. Le chapitre décrit une approche à la fois bibliographique et statistique probabiliste qui traite les mesures résistives afin d'identifier les paramètres impliqués dans la mesure et les verrous liés à cette technique.

Nous décrivons ensuite une approche résistive habituellement utilisée pour estimer la distribution de l'humidité dans le sol. Nous introduisons aussi des exemples d'adaptation de cette méthode aux matériaux de génie civil.

Partie III :

Cette partie présente l'approche mixte (expérimentale et numérique) proposée pour la mesure de l'humidité interne. L'architecture de cette approche ainsi que ses différentes étapes sont présentées principalement sur deux sections :

- (i) La première section est consacrée à la présentation de l'approche expérimentale en mettant l'accent sur l'adaptation de l'outil de mesure de la géophysique au matériau bois. Par la suite, nous abordons par la suite ses différentes spécificités par rapport à l'injection du courant électrique et le tri de données expérimentales. Il convient de souligner qu'une partie importante de notre travail a été consacrée à la préparation et à la mise au point des protocoles expérimentaux. Cette partie est incontournable dans le déroulement de notre thèse.
- (ii) Dans la deuxième section, nous avons considéré l'approche numérique qui se repose sur la modélisation par la méthode aux éléments finis de notre expérience et l'analogie thermique-électrique. L'objectif est de reproduire un dispositif fidèle aux configurations expérimentales étudiées.

L'apport du couplage expérimental et numérique sera défini en minimisant les écarts entre les mesures et les simulations.

Partie IV :

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'application de l'approche mixte sur des échantillons en Douglas-fir à l'échelle laboratoire. Dans le cadre de cette approche la teneur en eau dans les échantillons est homogène.

Comme nous allons le voir par la suite, cette partie comporte deux sections :

- La première présente les résultats d'une étude préliminaire ayant comme objectif d'étudier la faisabilité des mesures électriques et les limites du dispositif de mesure ;
- La deuxième présente une étude paramétrique plus complète afin de caractériser la mesure électrique en fonction de différents paramètres explicatifs tels que les propriétés du matériau et les conditions climatiques.

Partie V :

Cette partie est dévolue à l'application de l'approche mixte proposée à différentes échelles d'éléments de structure. D'abord, nous présentons une application à l'échelle laboratoire intermédiaire sur un échantillon de dimensions décimétriques afin d'évaluer la distribution de la teneur en eau dans l'élément. Ensuite, nous avons évalué la capacité de notre démarche à surveiller un élément de structure en bois en service dans des environnements climatiques variables.

Conclusion et perspectives :

Ce chapitre conclut sur les travaux réalisés en résumant les avancés obtenus. Les perspectives de nos travaux de recherche sont également présentées.

I.7. Publications

L'ensemble des travaux et résultats présentés dans cette thèse a fait l'objet de publications dans des revues et des conférences nationales et internationales :

Revues internationales à comité de lecture

W. Hafsa, N. Angellier, M. Takarli, I. O. Pop (2021). A mixed experimental-numerical electrical resistivity-based method for moisture content assessment in wood tested using the example of Douglas fir. *Wood Science and Technology*, 55(3), 697-718. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01281-x>.

Communications dans des congrès internationaux avec comité de lecture

W. Hafsa, N. Angellier, M. Takarli, I. O. Pop (2019). Monitoring of timber structures: moisture content evaluation by using electrical resistivity method », 5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures SHATiS, 658-670. Guimarães.

M. D. Pham, T. A. Nguyen, **W. Hafsa**, N. Angellier, L. Ulmet, M. Takarli, I. O. Pop, F. Dubois (2018). Experimental-numerical resistivity measurements approach for characterization in

structural timber. The 4th conference on Science and Technology (CoREST VI), 27-28 (168-173). Ho Chi Minh City. (*Prix du meilleur papier*)

Communications dans des congrès nationaux avec comité de lecture

Hafsa, W., Angellier, N., Takarli, M., POP, I. O. (2020). Usage des méthodes résistives pour la qualification de l'état hydrique des éléments de structure en bois », Colloque "Intervenir sur le bâti en bois du patrimoine : méthodes d'hier à aujourd'hui", ICOMOS-France, Paris.

Hafsa, W., Angellier, N., Takarli, M., POP, I. O. (2019). Usage de la méthode résistive pour l'évaluation de l'état hydrique des éléments de structure en bois », 24^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM), Brest.

Hafsa, W., Pham, M. D., Angellier, N., Takarli, M., Ulmet, L., Nguyen, T. A., Pop, I. O., Dubois, F. (2018). Evaluation de Champs de Résistivité Electrique de Matériaux Hygroscopiques : vers le Monitoring et le Diagnostic Hydrique des Structures », 36^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Saint-Etienne.

Hafsa, W., Angellier, N., Takarli, M., POP, I. O. (2018). Vers la qualification in-situ de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive », 7^{èmes} journées du GDR 3544, Sciences du bois, Cluny.

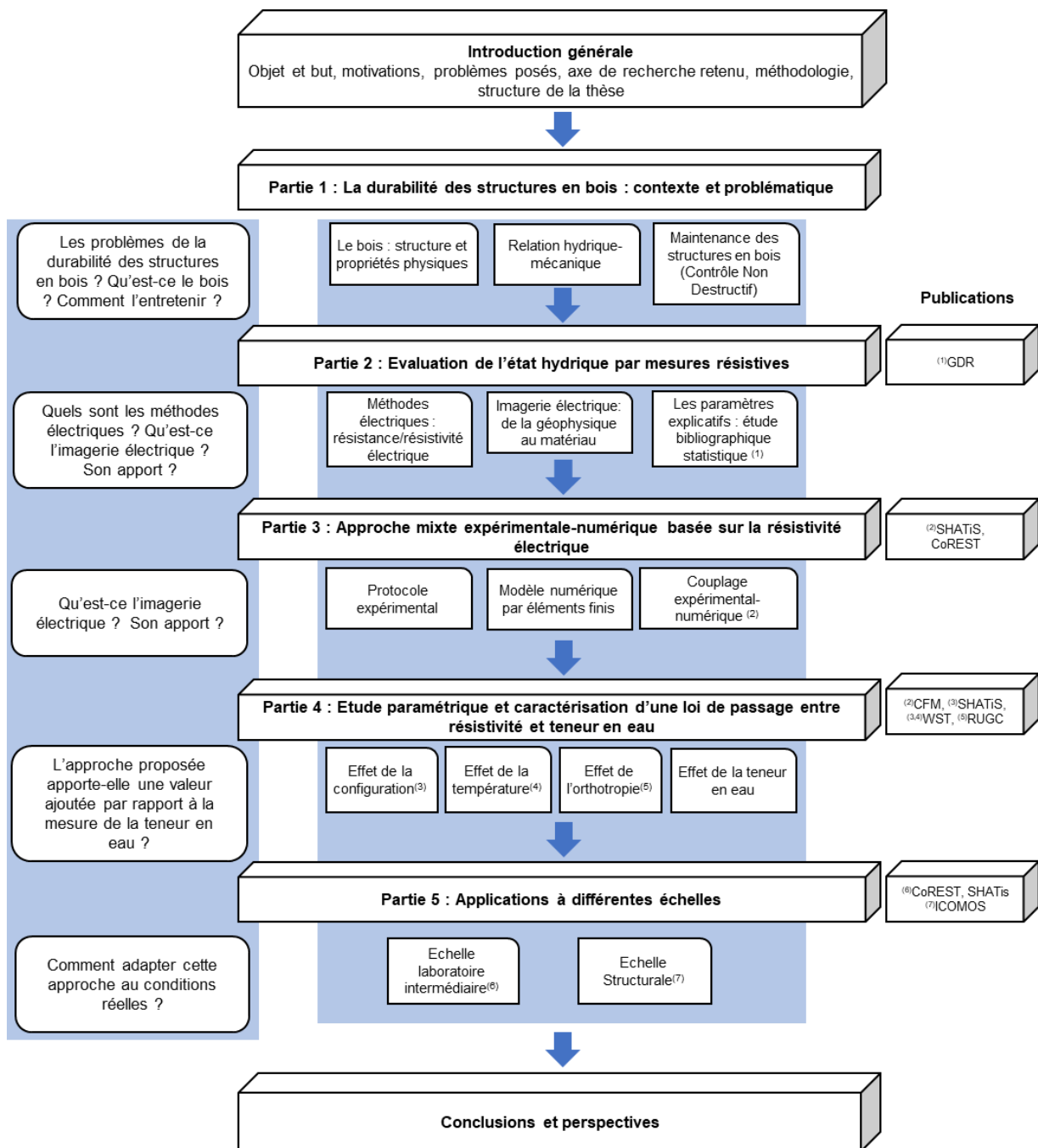


Figure 0-1 : Schéma descriptif de la structure de la thèse

Partie I. La durabilité des structures en bois : contexte et problématique

I.1. Introduction

La durabilité des structures en bois et la garantie de leur disponibilité à moindre coût sont parmi les enjeux les plus importants pour les maîtres d'ouvrage. La disponibilité correspond à la durée pendant laquelle la structure est capable de remplir sa mission. Elle dépend de l'efficacité des politiques de maintenance mises en place. La maintenance a ainsi pris une part croissante dans la construction en bois d'aujourd'hui. Les stratégies ont évolué au cours des dernières années pour passer d'une maintenance purement corrective à une maintenance qui prend en compte l'état de santé de la structure pour anticiper ses défaillances. La mise en œuvre des nouvelles démarches requiert une approche scientifique impliquant différentes tâches telle que la surveillance, le monitoring, le diagnostic et l'aide à la décision. Ces tâches font partie du concept de *Structural Health Monitoring (SHM)* que l'on peut traduire en *Contrôle de Santé Intégré (CSI)*.

Pour expliquer l'émergence de l'évaluation de l'état hydrique d'une structure en bois, nous avons jugé utile de présenter les différentes politiques de maintenance déployées dans la construction en bois. De manière plus ciblée, l'effet de l'état hydrique sur le comportement mécanique d'une structure ainsi que des exemples d'application sont également présentés. Le matériau bois ainsi que ses différentes propriétés physiques sont auparavant définis. À la fin de cette partie, les verrous des différentes stratégies et l'orientation vers une évaluation non destructive de l'état de santé des structures sont présentés.

I.2. Construction en bois

Dans un contexte environnemental bénéfique à son utilisation, le bois a longtemps occupé une place de choix dans la construction. Il a toujours présenté des avantages considérables allant jusqu'à être considéré comme un puits de carbone qui stocke le CO₂ et qui contribue à la lutte contre l'effet de serre. Pendant les dernières décennies, le bois s'est retrouvé en concurrence suite à la découverte et la mise au point de nouveaux matériaux. Cependant, des nouveaux challenges environnementaux ont renouvelé l'intérêt de l'usage de cette ressource écologique renouvelable dans la construction. La première impulsion a été donnée par le Grenelle de l'Environnement en 2007, avec l'objectif de définir des mesures de transition énergétique pour la croissance verte. Plus récemment, la nouvelle réglementation environnementale essaye de limiter l'impact carbone des bâtiments et améliorer leur bilan énergétique (RE 2020). Le plan recherche & innovation 2025 de la filière forêt-bois, signé en décembre 2014, se donne également comme objectif de rendre ce matériau plus robuste du point de vue technique, environnemental et socio-économique afin de mieux se positionner sur les marchés d'avenir. Le dernier observatoire réalisé par le CODIFAB et France Bois Forêt (AFCOBOIS 2019) dans le cadre de la 5^{ème} enquête nationale sur le secteur de la construction bois a montré qu'en 2018, le bois a gagné des parts de marché dans le secteur de la construction. Par exemple, en ce qui concerne les logements collectifs, le nombre de bâtiments en bois passe de 8960 en 2016 à 10700 en 2018. La Figure I-1 résume quelques chiffres de cette enquête concernant l'évolution du marché de la construction bois en France en 2018 par rapport à 2016.

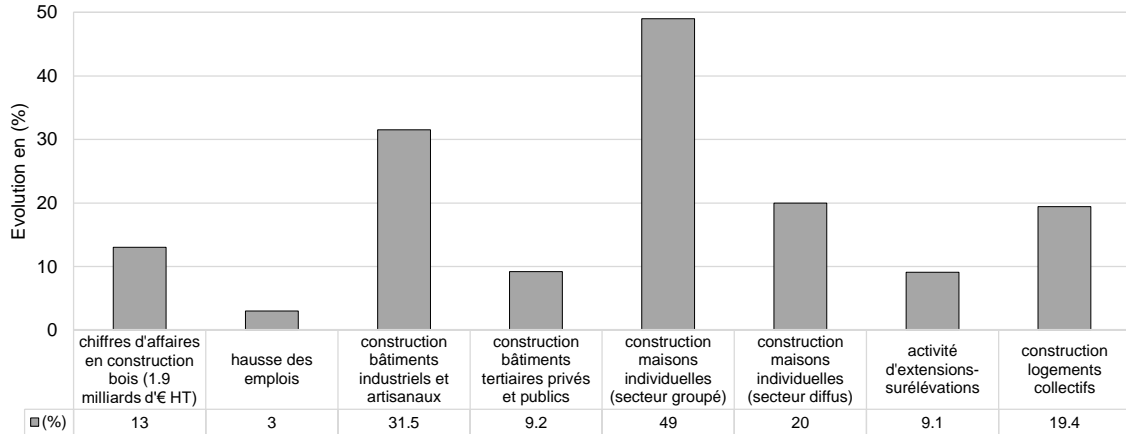


Figure I-1 : Evolution de la construction en bois en 2018 par rapport à 2016

En effet, l'histoire récente a connu des conceptions hors norme utilisant le bois comme matériau principal de structure, notamment pour des ouvrages et des infrastructures d'envergure (Bowyer et al. 2016; M. Green et Taggart 2020). La Figure I-2 montre quelques représentations d'une ville durable habitée, et aussi de certains ouvrages de génie civil réalisés en France.



(a) Ajout d'un auvent au pôle Haluchère pour améliorer le confort des usagers du train et du tramway (2011, Nantes)



(b) Modernisation de l'aéroport principal de Mayotte (2014, Mayotte)



(c) Bâtiment grande hauteur en bois massif (140 logements sur 4 étages) (2017, Ris-Orangis)



(d) Pont de Merle - pont à béquilles (1999, Corrèze)



(e) Pont d'Avoudrey – Pont à haubanage et suspension (2005, Doubs)



(f) Pont des Fayettees - Pont à poutres latérales en treillis (2000, Isère)

Figure I-2 : Quelques exemples de construction en bois en France depuis l'année 2000

À plus grande échelle, l'architecte canadien Michael Green et l'ingénieur J. E. Karsh ont étudié la possibilité de l'utilisation du bois massif dans la construction de bâtiments de grande hauteur, tout en exposant les impacts écologique et économique (M. C. Green et Karsh 2012). L'étude introduit un nouveau modèle de construction qui répond aux besoins de sécurité (une vitesse de combustion de 0.7mm/min) et de facilité de mise en œuvre tout en répondant aux

besoins du marché. En effet, la valorisation du matériau bois dans la construction soulève de nouveaux challenges techniques et réglementaires en termes de durabilité (comportement à long terme et durée de vie de l'ouvrage) et de performances (procédés de mise en œuvre, sécurité).

Néanmoins, les caractéristiques variables de ce matériau compliquent souvent les tâches de contrôle et de surveillance de l'état de santé d'une structure. Son usage dans la construction est peut-être alors freiné par les problématiques de durabilité liées à sa forte sensibilité aux conditions environnementales. Dans la suite, nous proposons donc une présentation plus détaillée de l'anatomie et des propriétés physiques du matériau.

I.3. Le bois : un matériau hétérogène

Le bois est un matériau biologique de construction issu d'une espèce végétale, cultivable et renouvelable qui se caractérise par sa variabilité naturelle. Les essences de bois sont généralement classées en deux grandes familles, les résineux et les feuillus. Les résineux sont très utilisés en construction grâce à leur faible coût, leur grande disponibilité et leurs bonnes propriétés mécaniques. Les résineux les plus utilisés dans la construction sont le pin sylvestre, le pin maritime, le sapin, l'épicéa, le douglas-fir et le mélèze (LCPC 2008). L'emploi des feuillus est plus faible par rapport aux résineux en raison de leur coût plus élevé et leur faible disponibilité. Parmi ces essences, nous citons le chêne, le châtaignier, le hêtre ainsi que la plupart des essences exotiques.

Chaque essence se caractérise par une organisation spécifique des cellules (formes et dimensions). Enfin, le bois se caractérise aussi par son hétérogénéité, son anisotropie, sa viscoélasticité et sa forte sensibilité hygrothermique. Il est important alors d'avoir des connaissances élémentaires de sa structure et de sa composition.

I.3.1. Structure multi-échelle : anatomie et orthotropie

L'anatomie du bois peut être considérée suivant trois échelles : l'échelle macroscopique, microscopique et moléculaire, comme le présente la Figure I-3 (Harrington 2002). A l'échelle macroscopique, sur une coupe transversale d'un tronc, nous distinguons 5 couches principales : (1) *l'écorce* qui assure la protection vis-à-vis les agressions extérieurs ; (2) *le liber* (ou écorce interne) qui est une zone libéro-ligneuse permettant la conduction de la sève élaborée ; (3) *le cambium* responsable de la croissance de l'arbre et le développement des cellules du liber ; (4) *l'aubier* qui désigne la partie la plus poreuse et la plus légère du bois, située entre le bois de cœur et le cambium, permettant d'acheminer la sève brute grâce à ses vaisseaux conducteurs et (5) *le duramen*, appelé aussi le bois parfait, qui se distingue de l'aubier par sa couleur et sa résistance naturelle aux attaques d'origine biologique. Ce duramen est composé d'anciennes cellules d'aubier mortes qui se sont étanchéifiées en s'imprégnant de tanins et de résine au cours du temps (la duraménisation).

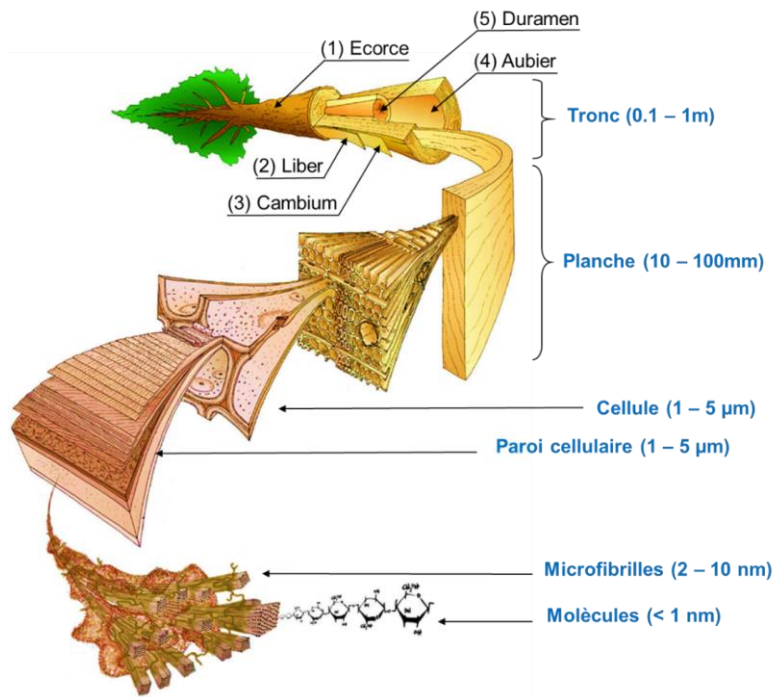


Figure I-3 : Schéma explicatif de la structure du bois à différentes échelles

A l'échelle microscopique, les cellules de bois peuvent être comparées à un matériau composite naturel composé principalement de 3 polymères, des microfibrilles de cellulose qui sont un polymère hydrophile ayant une affinité pour les molécules d'eau, engluées dans une matrice composée de deux autres polymères, la lignine et les hémicelluloses. Comme le présente le Tableau I-1, les proportions de ces 3 polymères sont variables d'une essence à une autre (Sjostrom 1993). Le bois contient aussi des substances extractibles (tanin, résines, cires, colorants) ainsi que des minéraux (teneur en cendres).

Tableau I-1 : Constitution chimique de quelques essences de bois

	Essence		Constituant (en % massique)		
	Nom latin	Nom commun	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Résineux	<i>Pseudotsuga Menziesii</i>	Douglas-fir	38.8	22.9	29.3
	<i>Pinus radiata</i>	Pin de Monterey	37.4	28.9	27
	<i>Pinus sylvestrus</i>	Pin sylvestre	40	24.9	28
	<i>Picea abies</i>	Epicéa commun	41.7	24.9	27
Feuillus	<i>Acer rubrum</i>	Erable rouge	42	25	25.4
	<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre commun	39.4	29.1	25
	<i>Betula papyrifera</i>	Bouleau blanc	39.4	31.1	21
	<i>Eucalyptus globulus</i>	Gommier bleu	51.3	21.3	22

A l'échelle moléculaire (Figure I-4), la structure des résineux est relativement simple comparée à celle des feuillus. Les trachéides verticales alignées dans le sens longitudinal de l'arbre, ont un rôle de conduction de la sève brute et de soutien mécanique. Des ponctuations aréolées présentes sur les faces radiales des trachéides permettent de faire passer la sève d'une trachéide à une autre. D'autre part, la structure des feuillus est plus complexe dû à la présence de divers éléments constructifs tels que les trachéides, les vaisseaux (pour la conduction de la sève brute) et les fibres (pour le soutien mécanique) (Schweingruber 1990).

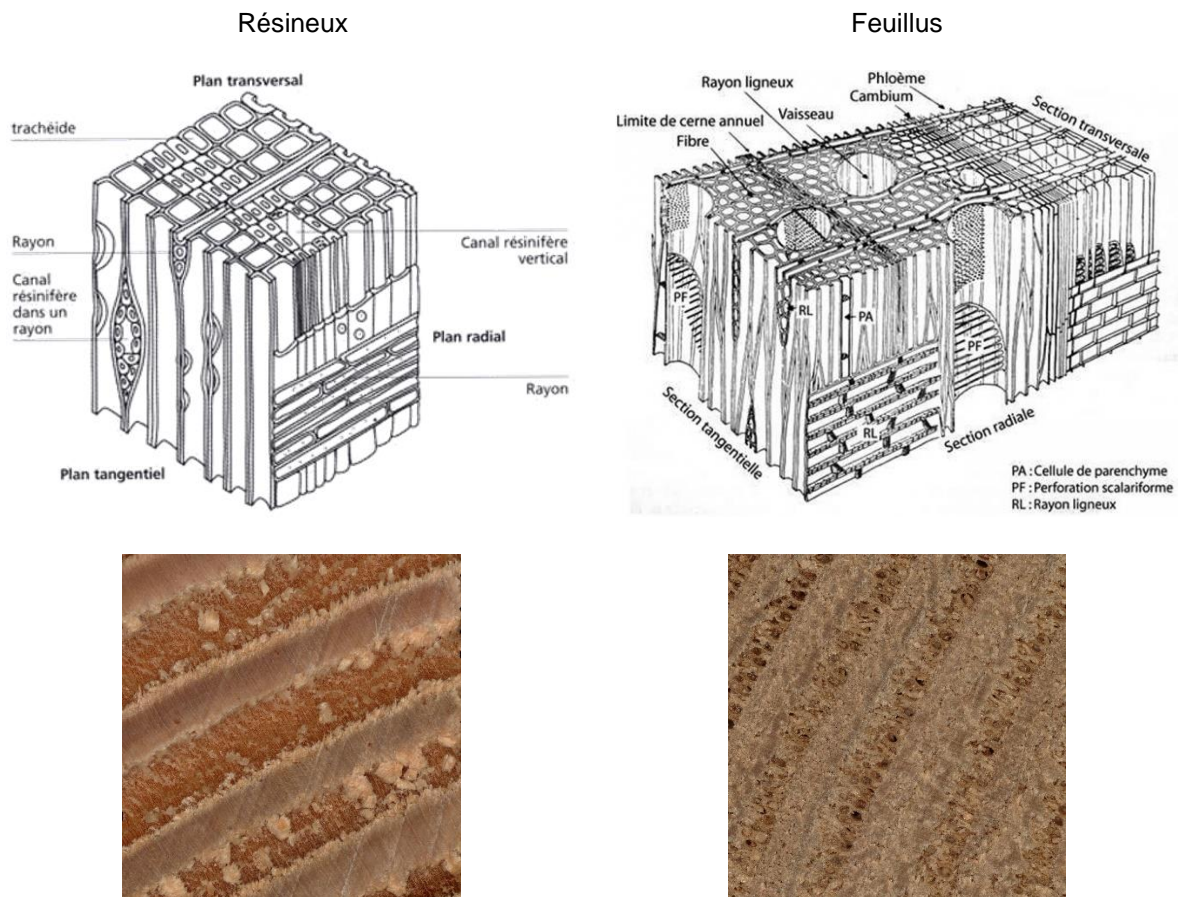


Figure I-4 : a) Schémas explicatifs de la structure d'un résineux et d'un feuillu ; b) Vue du plan RT au microscope électronique à balayage (Douglas-fir et Chêne) prise à l'IUT d'Egletons pour la fête de la science 2020

Il est à noter que la répartition des trachéides et des vaisseaux pour les résineux et les feuillus respectivement, diffère d'une saison à une autre. Au printemps, les trachéides et vaisseaux formés ont principalement un rôle de conduction de la sève brute, alors que, ceux formés à la fin de la saison de végétation, ont un rôle de soutien. Ainsi, les vaisseaux du bois initial (bois de printemps) sont plus grands que ceux du bois final (bois d'été).

Cette analyse multi-échelle met en évidence l'anisotropie du bois (Figure I-5) et permet de distinguer 3 directions principales Longitudinale (L), Radiale (R), Transversale (T) et 3 plans ligneux selon une organisation spécifique des cellules (formes et dimensions). Les 3 plans de référence sont : le plan Radial-Transversal (RT) ; le plan Longitudinal-Radial (LR) et le plan Longitudinal-Tangentiel (LT).

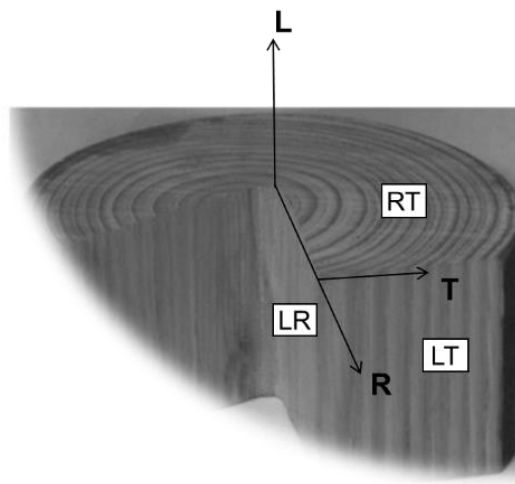


Figure I-5 : Les directions et les plans ligneux dans le bois

I.3.2. L'humidité interne du bois

I.3.2.1. Teneur en eau

Dû à son caractère hygroscopique, le matériau bois contient de l'eau sous trois formes :

- L'eau libre, appelée aussi l'eau capillaire : elle circule librement dans les cavités cellulaires ou lumens, les espaces intercellulaires, les ponctuations ;
- L'eau liée, appelée aussi eau hygroscopique : elle est présente dans la paroi cellulaire et intercalée entre les chaînes de cellulose ;
- L'eau de constitution : elle fait partie intégrante des chaînes de cellulose et contribue à l'élaboration des molécules de la structure du bois.

Définition 1 : la teneur en eau

La teneur en eau du bois, exprimée généralement en %, est définie comme le rapport entre la masse d'eau (m_e) et la masse sèche (ou anhydre) d'un échantillon (m_s). Expérimentalement, la masse d'eau est calculée en considérant la différence entre la masse totale (m_t) d'un échantillon et sa masse anhydre obtenue après séchage en étuve à 103 °C (EN 13183-1 2002) :

$$w = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (I-1)$$

Au cours des différentes phases de transformation d'un élément en bois, du bois vert en passant par le séchage et jusqu'à la construction, la teneur en eau varie comme l'illustre la Figure I-6. Il faut ajouter qu'elle varie d'une espèce à l'autre et dépend beaucoup de la densité (aubier ou duramen).

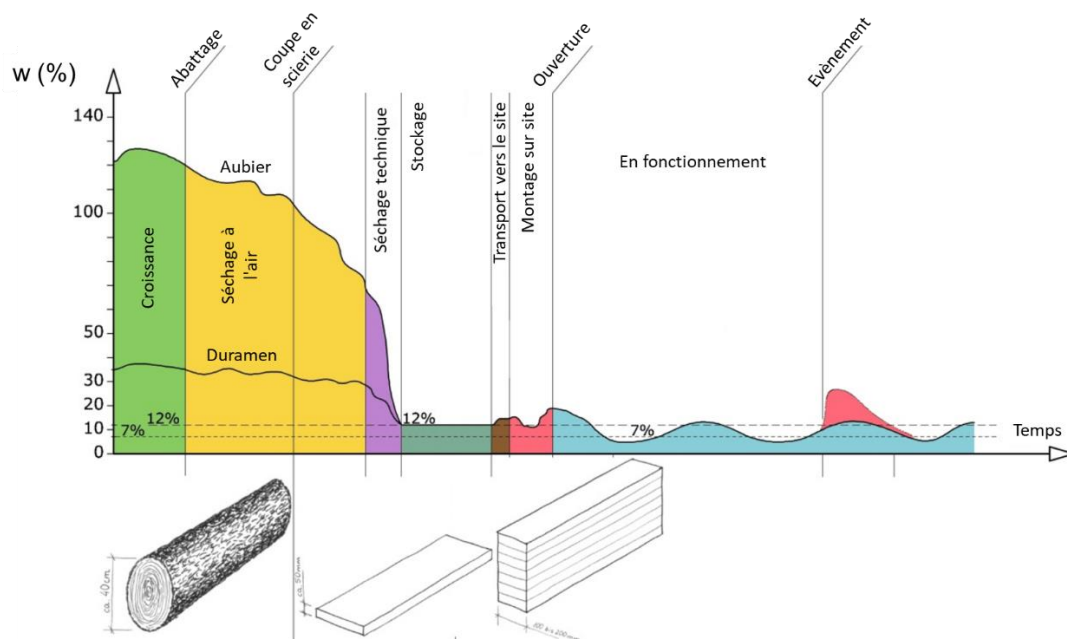


Figure I-6 : Illustration de la variation de l'humidité interne dans le bois au cours des différentes phases de transformation (Gamper et al. 2014)

I.3.2.2. Point de saturation des fibres

Le processus du séchage du bois consiste à évacuer toute l'eau libre. Une fois qu'elle a disparu et que l'eau liée demeure intégralement, nous atteignons le Point de Saturation des Fibres (PSF), ou plus justement le point de saturation des parois cellulaires.

Définition 2 : le point de saturation des fibres

Le point de saturation des fibres désigne l'étape dans le processus de séchage, pour laquelle il ne reste que l'eau liée dans les parois cellulaires - toute autre eau, appelée eau libre, ayant été retirée des cavités cellulaires (OQLF 2020). Pour la plupart des essences, sa valeur se situe entre 25 et 30 % (Paradis et al. 2015).

Selon la valeur de la teneur en eau, deux phases peuvent être donc distinguées, la phase capillaire pour $w > \text{PSF}$ et la phase hygroscopique pour $w \leq \text{PSF}$. Dans le cadre de ce travail, seule la phase hygroscopique sera abordée. Nous supposons par ailleurs que la masse de l'eau de constitution est négligeable par rapport à la masse de l'eau liée, et qu'elle ne présente aucun effet sur l'estimation de la teneur en eau.

I.3.2.3. Diffusion hydrique

En dessous du PSF, l'eau est transportée principalement par diffusion. Ce processus dépend principalement de la structure du matériau, de ses propriétés physiques et chimiques, de sa

teneur en eau et des forces motrices de pression, de diffusion ou d'autres (Elaieb 2014). Dans le domaine hygroscopique, il peut s'avérer très complexe et ce, pour différentes raisons. D'abord, à l'échelle microscopique, il existe deux modes de transfert différents qui interviennent d'une façon couplée : la diffusion gazeuse de la vapeur d'eau dans les vides cellulaires et la migration de l'eau liée dans les parois cellulaires. Ensuite, la complexité de l'anatomie du matériau influence d'une manière significative le chemin pris par l'eau dans le bois (Stamm et Nelson 1961). L'analyse de différentes caractéristiques telles que la densité, le diamètre, la longueur et l'épaisseur des parois cellulaires des vaisseaux a révélé leurs impacts sur la perméabilité du bois (Ahmed et Chun 2011). De plus, le caractère orthotrope du bois favorise le transfert de l'eau dans la direction longitudinale plus que dans les deux autres directions.

La diffusion hydrique est généralement décrite par le coefficient de diffusivité D en $m^2.s^{-1}$. Dans le domaine hygroscopique, le phénomène est présenté par une équation obéissant à la première loi de Fick (1855) généralisée aux trois directions d'orthotropie.

$$\vec{j} = -\bar{D} \vec{\nabla} w \quad (I-2)$$

avec :

- \vec{j} est le vecteur de flux massique ($kg.m^{-2}.s^{-1}$);
- \bar{D} est le tenseur de diffusivité massique orthotrope avec D_L, D_R et D_T représentant les valeurs propres suivant la direction longitudinale, radiale et tangentielle, respectivement ;
- $\vec{\nabla} w$ est la concentration de la teneur en eau ($kg.m^{-3}$);

Il est à noter que par analogie, cette loi correspond à la loi d'Ohm et à la loi de Fourier dans les cas de transport d'électricité et de la conduction thermique, respectivement.

Par ailleurs, dans des conditions isothermes, la seconde loi de Fick permet de décrire l'évolution temporelle de l'état hydrique dans un régime transitoire en utilisant le principe de la conservation de la masse. Elle peut également se généraliser pour le cas tridimensionnel, comme suit :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div} (\bar{D} \vec{\nabla} w) \quad (I-3)$$

Afin de représenter l'influence de la teneur en eau sur le coefficient de diffusion, une loi exponentielle (Rosen 1976) peut être utilisée dans le cas d'un processus de diffusion isotherme unidirectionnelle et non linéaire, suivant l'expression suivante :

$$D = D_0 \exp(k.w) \quad (I-4)$$

où D_0 est le coefficient de diffusion à l'état anhydre et k est une constante traduisant la non linéarité du phénomène. Pour le matériau bois, la teneur en eau w est généralement mesurée grâce à la méthode de la gravimétrie (des pesées successives) permettant de suivre son évolution au cours du temps (Kouchade 2004; Nguyen 2014). Plusieurs travaux ont été menés afin d'identifier le coefficient de diffusion de différentes essences de bois et ce, dans les différentes directions d'orthotropie. Nous citons quelques exemples dans le Tableau I-2.

Tableau I-2 : Exemples de valeurs de coefficient de diffusion D_0 en m^2/s

Essence/Référence	Direction		
	L	R	T
Pin Sylvestre (Agoua, Zohoun, et Perré 2001)	$1,80 \cdot 10^{-9}$	$4.29 \cdot 10^{-11}$	$2.87 \cdot 10^{-10}$
Sapin (Nguyen 2014)	$1,04 \cdot 10^{-9}$	$2.47 \cdot 10^{-11}$	$1.24 \cdot 10^{-11}$
Epicéa BLC (Bettina Franke, Franke, Schiere, et al. 2016)	$10.42 \cdot 10^{-10}$	$2.89 \cdot 10^{-10}$	$1.61 \cdot 10^{-10}$
Douglas-fir (Jamaaoui 2017)	$1,92 \cdot 10^{-10}$	$4.36 \cdot 10^{-11}$	$9.29 \cdot 10^{-11}$

I.3.2.4. Equilibre hygroscopique

Définition 3 : la teneur en eau d'équilibre

La teneur en eau d'équilibre w_{eq} est la teneur eau que le bois atteint lorsqu'il est soumis à une condition constante de température (T) et d'humidité relative (HR) de l'air (OQLF 2020).

La courbe qui décrit les états d'équilibre successifs du matériau avec le milieu ambiant, dans des conditions de température uniforme, est appelée « isotherme de sorption ». Le processus de l'humidification du bois allant de 0 à 100 % d'HR définit l'enveloppe d'adsorption, et pour un processus de séchage, l'enveloppe de désorption (de 100 à 0 % d'HR). Comme le montre la Figure I-7-a, l'équilibre hygroscopique en adsorption est plus faible qu'en désorption. Ce phénomène a été étudié par plusieurs auteurs (Merakeb 2006 ; Manfoumbi Bousougou 2012 ; Thybring, Thygesen, et Burgert 2017) et a été expliqué par la différence d'énergie nécessaire pour la liaison des molécules d'eau à la matrice solide (liaisons hydrogène ou forces de Van Der Waals) et ce, non seulement entre les deux phases adsorption/désorption, mais aussi entre deux essences différentes. Plus récemment, la caractérisation des génotypes a également permis de comprendre l'impact du patrimoine génétique du Douglas-fir sur le comportement hydrique du matériau (Jamaaoui 2017) (Figure I-7-b).

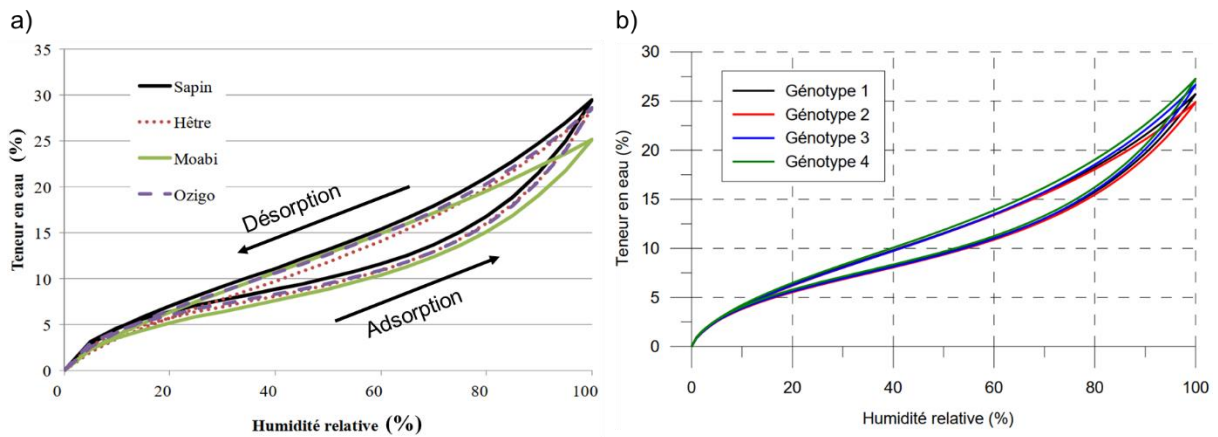


Figure I-7 : a) Isothermes de sorption pour différentes essences (Manfoumbi Boussougou 2012) ; b) Isothermes de sorption de 4 géotypes de Douglas-fir (Jamaoui 2017)

Aujourd'hui, l'Eurocode 5 propose un abaque qui permet d'estimer l'équilibre hygroscopique (EN 1995-1-1/NA 2010) en fonction de T et HR (Figure I-8-a). Ce diagramme a été conçu par Keylwerth (1964) pour répondre à une problématique de séchage (phase de désorption) pour différentes essences de résineux. Des nouvelles études permettant de relier l'équilibre hygroscopique et les cinétiques hydriques à la température ont été proposées par Varnier (2019). Elles permettent de classifier les données par famille résineux et feuillus et selon la forme des hystérésis de sorption, tout en prenant en compte le chemin de sorption (Figure I-8-b). Par exemple, selon ces études, pour le Douglas-fir, pour une température de 20 °C et 65 % HR, la prise en compte du chemin de sorption et la correction de l'influence de la température font varier l'humidité d'équilibre entre 11.2 % et 14.5 %, alors que l'estimation de l'Eurocode 5 nous donne une valeur de 12.5 %.

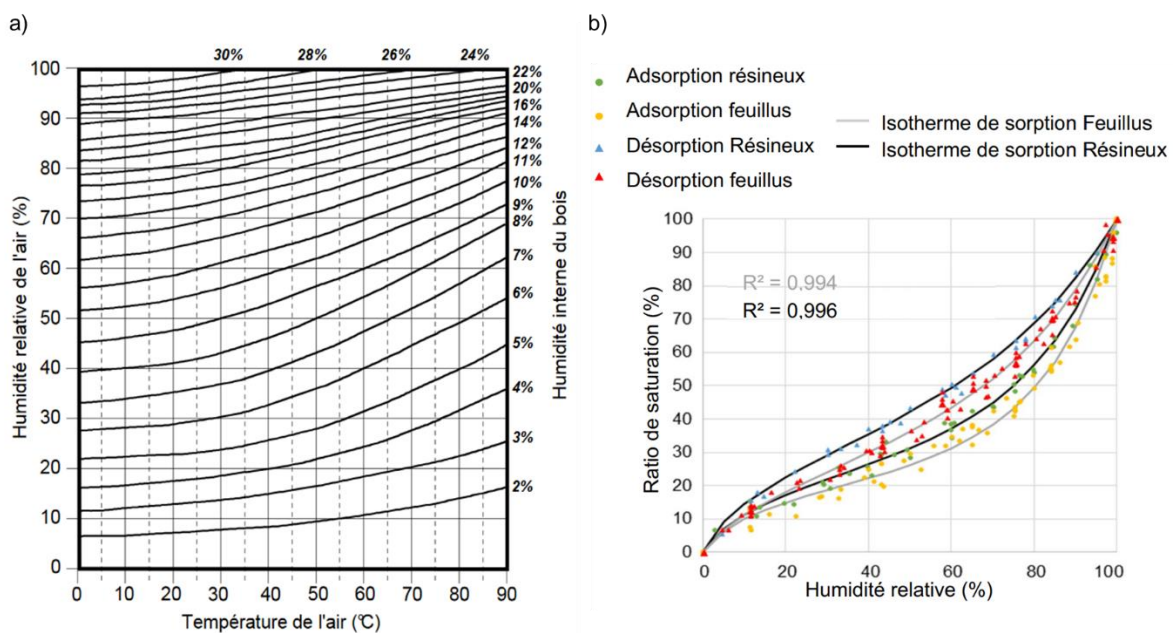


Figure I-8 : a) Abaque d'équilibre hygroscopique normative (EN 1995-1-1/NA 2010) ; b) Identification des isothermes de sorption par familles (Varnier 2019)

I.3.3. Phénomène de retrait-gonflement

Le bois est considéré comme un matériau hygromorphe qui réagit aux variations d'humidité en modifiant sa géométrie (forme et volume). Ce phénomène appelé retrait-gonflement, existe en dessous du PSF. L'eau hygroscopique est absorbée grâce aux fonctions hydroxyles des constituants chimiques de la paroi cellulaire qui est considérée comme un matériau composite avec des fibrilles de cellulose rigides presque verticales et parallèles (Stamm et Smith 1969; Derome et al. 2012). De plus, chaque polymère (c'est-à-dire la lignine et les diverses hémicelluloses) réagit différemment aux changements d'humidité (Cousins 1976).

Au sens mécanique du terme, le retrait-gonflement est caractérisé par une déformation due aux variations dimensionnelles. Ce phénomène est anisotrope en raison de l'orientation des cellules (c-à-d de l'angle entre la verticale et les microfibrilles (H. Yamamoto 1999). Les variations dimensionnelles sont évaluées par des coefficients de retrait gonflement qui prennent en compte l'anisotropie du matériau. Dans le domaine hygroscopique, ces déformations suivent généralement une loi linéaire en fonction du gain ou de la perte d'humidité dans un élément en bois Figure I-9.

Entre un état de référence (*Ref*) (l'état saturé *S* pour le retrait ou l'état anhydre *A* pour le gonflement) et un point du domaine hygroscopique ($w < PSF$), le gonflement ou le retrait peuvent s'écrire suivant l'équation suivante (Badel 1999) :

$$\varepsilon_x(w) = \pm \frac{l_w - l_{Ref}}{l_{Ref}} \quad (I-5)$$

avec :

$\varepsilon_x(w)$: déformation de retrait/gonflement suivant la direction x entre l'état de référence *Ref* et le taux d'humidité w ;

l_{Ref} : longueur de retrait/gonflement suivant la direction x à l'état de référence *Ref* ;

l_w : longueur de retrait suivant la direction x au taux d'humidité w .

En utilisant l'hypothèse de la linéarité du phénomène, le coefficient de retrait α_x dans une direction x peut s'écrire selon (I-6).

$$\alpha_x(w) = \left| \frac{\Delta \varepsilon_x}{\Delta w} \right| \quad (I-6)$$

Le gonflement est défini de la même façon en remplaçant l'état saturé par l'état anhydre dans le rôle de la référence.

Pour une variation de 1 % de teneur en eau, chaque essence présente un coefficient de retrait spécifique (appelé aussi coefficient de rétractibilité) pour chacune des trois directions. Par exemple, pour l'Epicéa, la relation de rétractibilité dans les directions L, R et T est de l'ordre de 0.01/0.17/0.31. Le phénomène de retrait/gonflement est nettement plus prononcé dans les directions radiale et tangentielle (α_R et α_T), et généralement négligé dans la direction longitudinale.

Le Tableau I-3 donne quelques exemples de valeurs de coefficients de rétractibilité (%) dans les directions R et T.

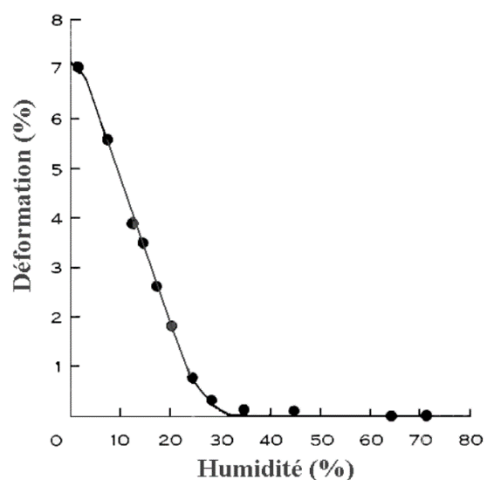


Figure I-9 : La linéarité du phénomène de retrait dans le domaine hygroscopique : exemple de mesures expérimentales dans le plan transverse (Kelsey 1963)

Tableau I-3 : Coefficients de rétractibilité de quelques essences de bois (LCPC 2008)

Essence	Rétractibilité (%/%)	
	α_R	α_T
Chêne	0.20	0.32
Douglas-fir	0.17	0.27
Epicéa	0.17	0.31
Mélèze	0.17	0.30
Pin maritime	0.15	0.30
Pin sylvestre	0.17	0.31

Nous pouvons observer que le retrait tangentiel est environ deux fois plus important que le retrait radial.

I.4. Influence de l'état hydrique sur l'état de santé des structures en bois

Bien que le matériau bois présente de nombreux avantages, l'apparition de certaines pathologies liées à sa sensibilité thermohydrigue risque de limiter son usage dans la construction. L'étude de ces pathologies, leurs causes et leurs conséquences sera présentée dans ce paragraphe.

I.4.1. Les types de pathologies dans les structures en bois

Selon plusieurs études, les pathologies rencontrées sur les ouvrages en bois peuvent être classées en différentes familles (LCPC 2008) :

- 1) des pathologies dues aux déformations du bois (retrait-gonflement) ;
- 2) des pathologies d'origine mécanique ;
- 3) des pathologies d'origine biologique.

Les pathologies d'origine mécaniques sont souvent attribuées aux défauts de conception ou à des erreurs de calcul/dimensionnement. Quant aux problématiques de retrait/gonflement et aux pathologies d'origine biologique, leur apparition est particulièrement liée à l'état hydrique défini par les variations de l'humidité et de la température.

Une étude réalisée en Allemagne par Dietsch, Gamper, et al. (2015) sur plus de 245 structures en bois de grande portée a montré que les endommagements sont dus aux conditions

climatiques dans environ la moitié des cas signalés. Ces endommagements sont attribués principalement à des variations importantes de la teneur en eau (Figure I-10).

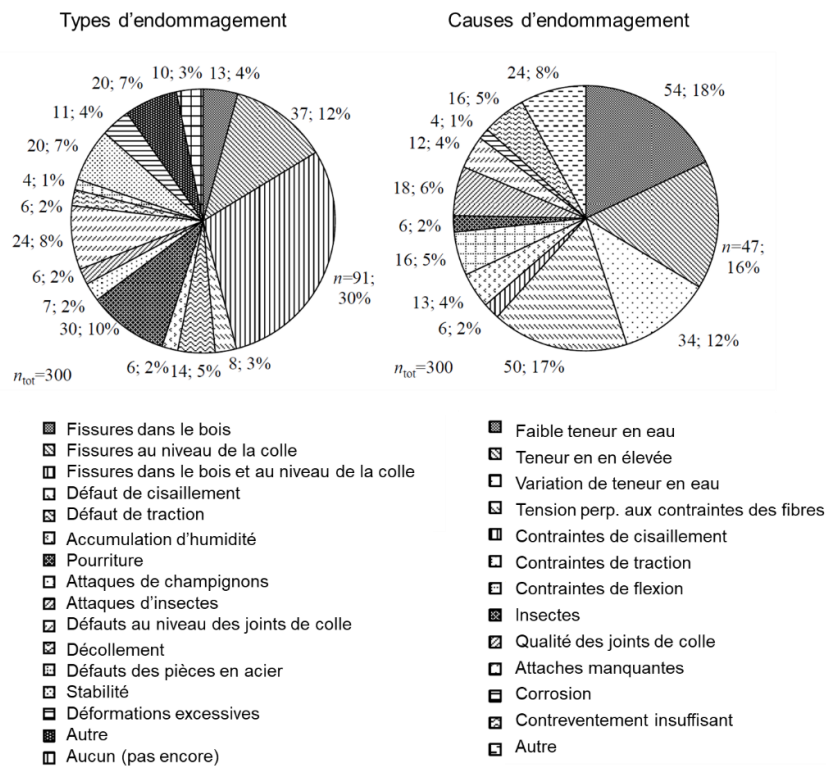


Figure I-10 : Les types et les causes des pathologies issus d'une évaluation de 245 structures en bois (Dietsch, Gamper, et al. 2015)

D'autre part, des défauts de conception ont été expliqués par une mauvaise estimation de la capacité d'adaptation du bois aux variations du climat ambiant, en particulier en ce qui concerne les éléments structurels en bois lamellé-collé (BLC) avec de grandes sections transversales. Cet aspect est moins prononcé dans les éléments structuraux du bois massif. Ces études montrent que la question de la durabilité des structures en bois est particulièrement liée au caractère hygroscopique du bois qui le rend sensible aux variations de l'humidité relative et de la température. En effet, le bois conserve ses propriétés biologiques qui lui garantissent des relations d'équilibre avec son environnement, même après l'abattage et malgré son séchage. Cependant, ses dimensions et ses propriétés mécaniques, élastiques et thermiques dépendent fortement de sa teneur en eau. Une forte teneur en eau, supérieure à 20 %, amène un risque d'attaque fongique (Figure I-11).

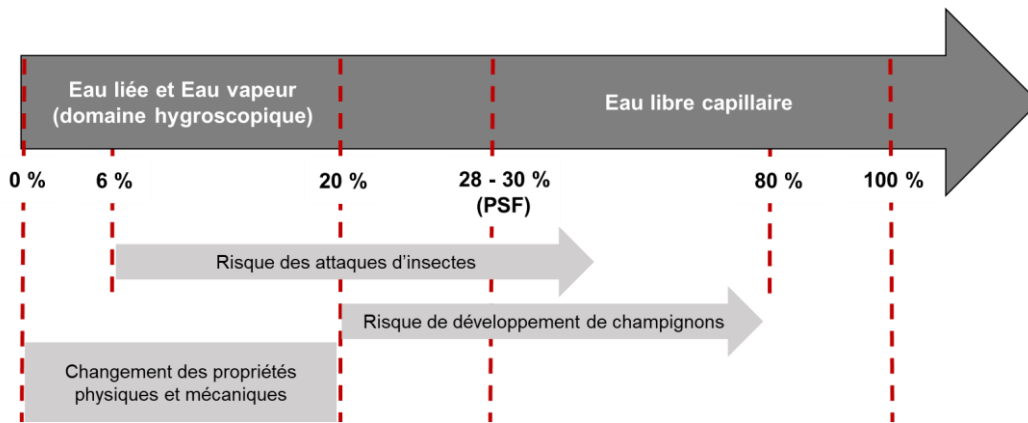


Figure I-11 : Les risques liés aux gammes de teneur en eau du bois (Dietsch, Franke, et al. 2015)

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont montré l'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques et physiques du matériau bois (Kollmann et Côte 1968; Moutee 2006; Dubois et al. 2012). En ce qui concerne l'influence de w sur les propriétés mécaniques, la Figure I-12-a illustre l'allure générale de cet effet sur le module d'Young dans la direction tangentielle, et ce, pour différentes essences de bois. Ainsi, le taux d'humidité dans le bois représente un paramètre important affectant le comportement mécanique (Kollmann et Côte 1968) (Figure I-12-b).

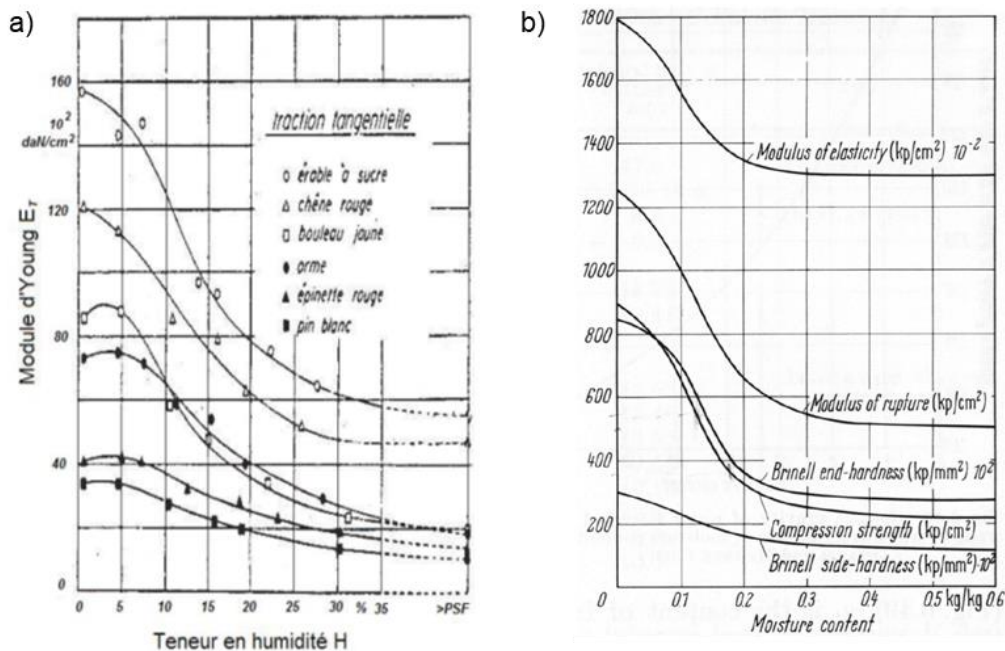


Figure I-12 : a) illustration de l'effet de la teneur en eau sur le module d'Young en direction tangentielle pour différentes essences (Goulet et Ouellet 1968) ; b) Influence de la teneur en eau du bois sur quelques propriétés mécaniques du bois (Kollmann et Côte 1968)

Pour $w \in [6\%, PSF]$, Guitard (1987) a proposé d'adopter des corrections sur le module d'élasticité pour une valeur de référence à 12% (Eq. (I-7)).

$$E_i^w = E_i^{12}(1 - 0.015(w - 12)) \quad (I-7)$$

avec E_i^w est le module d'élasticité à une teneur en eau w et pour une direction i et E_i^{12} est le module d'élasticité de référence à 12 %.

Le risque de pathologies liées à la variation de l'humidité est bien entendu plus faible pour le bois abrité que pour le bois en contact permanent avec de l'eau. Par conséquent, des classes de service (CS) et des classes de durabilité peuvent être définies en tenant compte respectivement des conditions climatiques et des risques d'attaques fongiques.

I.4.2. Classification climatique : les classes de services

Les limites de teneur en eau permettant de définir les 5 classes de services selon les normes de conception des structures en bois (EN 335 2013), sont rappelées dans le Tableau I-4. Un ouvrage de génie civil (charpentes, ponts, bâtiments, bardages, ...) se trouve généralement en classe de service 2 et 3.

Tableau I-4 : Les classes de service selon EN 335 (2013)

Classes	Situation de service	Exemples d'application	Zone sensible	Risques biologiques
1	Bois sec toujours placé à l'intérieur, $w < 20\%$	Parquets, menuiseries intérieures	0 à 3 mm	Insectes Termites
2	Bois à l'abri des intempéries, humidité peut occasionnellement dépasser 20 %	Charpentes, bois de toiture	0 à 3 mm	Insectes Termites Champignons de surface de faible impact
3 (*)	Bois placé en extérieur soumis à des alternances rapides d'humidité, humidité fréquemment supérieure à 20 %	Fenêtres, portes, revêtements extérieurs	Toute la partie humidifiable de la zone non durable naturellement : 0 à 3 mm (pas de stagnation d'eau) ou 5 à 10 mm (avec stagnation d'eau)	Insectes Termites Pourriture
4	Bois placé en extérieur et soumis à des humidifications fréquentes ou permanentes (bois en contact avec le sol ou l'eau douce), humidité toujours supérieure à 20 %	Bois extérieurs horizontaux (lisse de garde-corps, platelage) et en contact avec le sol	Dégradation totale de toute la zone non durable naturellement	Insectes Termites Pourriture

5	Bois en contact avec l'eau de mer	Jetées, pontons	Dégradation totale de toute la zone non durable naturellement	Pourriture Térébrants marins
----------	-----------------------------------	-----------------	---	---------------------------------

(¹) Cette classe peut être subdivisée en 3a (risque d'humidification fréquent sans stagnation d'eau) et 3b (risque d'humidification fréquent avec stagnation d'eau).

I.4.3. Diversité des risques biologiques

I.4.3.1. Les attaques d'insectes et les champignons

Les agresseurs biologiques qui attaquent le matériau bois cherchent à se nourrir soit des substances de réserve du bois (matière lignocellulosique), soit du bois lui-même. Leur type dépend généralement de l'environnement climatique. Girometta et al. (2020) montrent aussi que la diversité de certaines attaques biologiques dépend fortement de la biogéographie et mettent en évidence la nécessité d'un concept plus large que la classification climatique.

Les attaques d'insectes :

Plusieurs familles d'insectes sont susceptibles d'attaquer le matériau, notamment les coléoptères, les isoptères et les hyménoptères. Le cycle de développement des insectes varie de plusieurs mois à plusieurs années et peut être inhibé par des températures et des humidités basses ou élevées (Gray 1968). Par exemple, les coléoptères à larves xylophages attaquent l'aubier et le bois parfait non duraminisé des résineux dont le taux d'humidité est inférieur à 20%. Les capricornes, les vrillettes et dans certaines régions, les termites représentent les 3 types d'insectes les plus connus et la plus destructeurs.

Par exemple, les capricornes pondent entre 40 et 100 œufs dans les fentes du bois. Les larves pénètrent dans le bois en creusant des galeries pour se nourrir des sucres. Les trous d'envol des adultes à la surface du bois sont de forme elliptique, d'environ 6 à 10 mm de long et 1 à 3 mm de diamètre selon les espèces. Elles sortent du bois en y laissant d'autres larves à l'intérieur qui, au fil de leur développement et des années vont aggraver la dégradation du matériau (Figure I-13). Dans ce cas, un traitement curatif des bois concernés devient nécessaire.



Figure I-13 : Exemples d'espèce de coléoptères et les dégâts sur le bois¹
 a) Capricorne des maisons ; b) Capricorne du chêne

En France, les termites ont été introduits par des bois importés. Nous recensons aujourd'hui 54 départements infestés en métropole (Sud-ouest, côtes atlantique et méditerranéenne, Ile de France, aux bords des vallées du Rhône, de la Garonne et de la Loire ...). Souvent présent sous forme de colonies très importantes, les termites sont des xylophages et se nourrissent du bois, principalement de cellulose. Généralement, les termites sont souterraines, elles accèdent au bois en étant protégées de la lumière. Pour avoir une humidité, une obscurité et une température minimum (inférieur à 32 °C), les termites développent un système de galeries creusées donnant un aspect feuilleté au bois (Figure I-14) et permettant d'utiliser la fraîcheur relative du sol pour tempérer l'air traversant la termitière (Louppe et Zaremski 2016). La réalisation des barrières (physique-chimique) ou/et de l'intoxication (utilisation de pièges) permet de lutter contre ce type d'insectes.

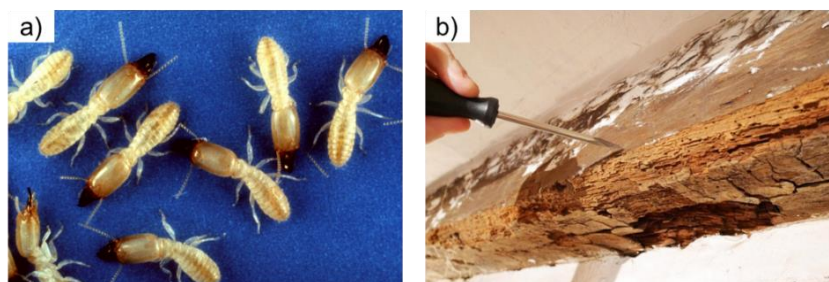


Figure I-14 : a) Termites de la famille des Reticulitermes flavipes ; b) Aspect feuilleté du bois résultant des attaques de termites

¹ <https://www.penntybio.com/content/60-le-capricorne>

Les champignons :

Les champignons représentent le risque majeur pour le bois. Il faut rappeler qu'en dessous de 20 %, la quantité d'eau est insuffisante à leur développement. Le même phénomène peut être observé au-dessus de 80% lorsque l'oxygène est rare. Les champignons peuvent alors se développer sur tous les bois présentant une humidité comprise entre 20 % et 80 %. Il existe généralement deux types de champignons :

- Les champignons lignicoles (bleuissement) : ils se développent dans l'arbre fraîchement abattu qui sèche trop lentement. Ils ne se nourrissent que des sucres et ne provoquent que des désordres esthétiques. Ils n'ont pas un impact sur les fonctions mécaniques du bois.
- Les champignons lignivores : ils sont à l'origine de la pourriture et se nourrissent de la totalité du bois en réduisant la matière ligneuse. Cela se manifeste au début par des désordres esthétiques (bois décoloré avec des zones brunes), puis mécaniques (installation d'une pourriture blanche fibreuse). Parmi les champignons les plus destructeurs, nous citons la mэрule (*Serpula lacrymans*), qui attaque principalement les bois résineux.

La Figure I-15 nous montre les changements de forme des échantillons de bois d'Epicéa tout au long d'un processus de pourriture en appliquant différents types de champignons lignivores de 4 à 24 semaines.

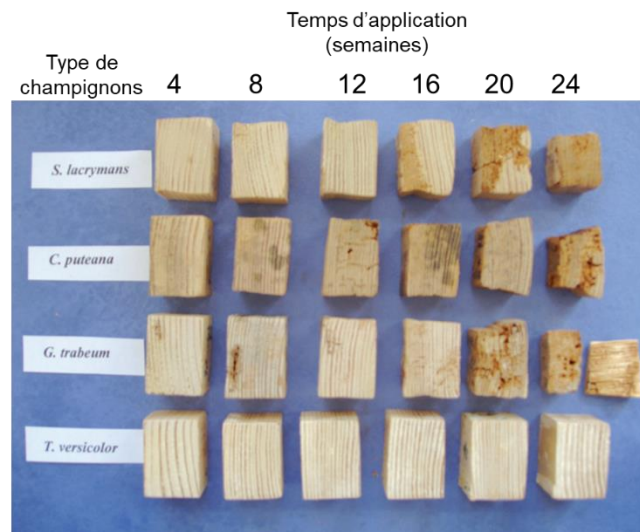


Figure I-15 : Les dégâts de l'application de différents types de champignons sur des échantillons d'Epicéa (Reinprecht, Novotná, et Štefka 2007)

Au cours de ces dernières décennies, des progrès significatifs ont été réalisés pour l'identification des différentes familles de champignons et des conditions favorisant leur développement (Gáper et al. 2018; Reinprecht 2016). Les études montrent que leur développement nécessite un minimum d'humidité de 20 % (avec un optimum à 35 %) et une température de 25 à 30 °C. Par conséquent, la problématique de l'attaque par champignons sera plus significative lorsque nous nous intéressons aux ouvrages en extérieur soumis à des

humidités élevées. Pour se prémunir de ces attaques, une conception permettant au bois de rester sec est à privilégier ($w < 20\%$).

I.4.3.2. Durabilité naturelle

Comme nous l'avons présenté ci-dessus, plusieurs facteurs d'origine biologique ont un impact sur la durabilité du bois. Cependant, la résistance intrinsèque du matériau (appelée durabilité naturelle) face à ces risques, dans des conditions climatiques données, est définie au sens de la norme EN 350 (2016). Cette durabilité naturelle varie selon les essences et dépend aussi du patrimoine génétique (Jamaaoui 2017) et du site de culture (Jacobs et al. 2019). Le Tableau I-5 présente une classification de la durabilité naturelle de quelques essences vis-à-vis 3 agresseurs particuliers (EN 252, 113, 46, 49-1, 20-1, 118 et 275) avec :

- La durabilité des duramens face aux attaques de champignons : cinq classes de 1 (essence très durable) à 5 (essence non durable) ;
- La durabilité des essences face aux insectes à larve xylophage et aux termites : Durable (D) ; Moyennement durable (M) ; Sensible (S) ; Bois parfaits non duraminisés (SH).

Les valeurs données dans le tableau ci-dessus relèvent que le Douglas-fir, l'essence qui sera à l'étude dans le cadre de cette thèse, présente une bonne durabilité naturelle.

Tableau I-5 : Exemples de durabilité naturelle de quelques essences vis-à-vis 3 agresseurs particuliers (SETRA 2006)

Essences	Champignons	Capricorne	Termites
Azobé	2	D	D
Chêne	2	D	M
Douglas-fir	3	S	S
Doussié	1	D	D
Epicéa	4	SH	S
Iroko	1 à 2	D	D
Mélèze	3 à 4	S	S
Pins	3 à 4	S	S
Sapin	4	SH	S

Afin de caractériser le domaine d'utilisation des essences, la norme EN 460 (1994) relie la durabilité naturelle aux classes de service, comme il est montré dans le Tableau I-6.

Tableau I-6 : Relation entre la durabilité naturelle de quelques essences vis-à-vis les champignons et les classes de service

Classes de service	Classes de durabilité				
	1	2	3	4	5
1	o	o	o	o	o
2	o	o	o	(o)	(o)
3	o	o	(o)	(o) – (x)	(o) – (x)
4	o	(o)	(x)	x	x
5	o	(x)	(x)	x	x

- o durabilité naturelle suffisante ;
- (o) durabilité naturelle normalement suffisante, mais un traitement de préservation peut être recommandé ;
- (o) – (x) durabilité naturelle peut être suffisante, mais un traitement de préservation peut être nécessaire selon l'emploi final et selon la perméabilité de l'essence ;
- (x) un traitement de préservation est recommandé, mais pour certains emplois la durabilité naturelle peut être suffisante ;
- x traitement de préservation nécessaire.

Pour accroître la durabilité naturelle du bois, plusieurs stratégies sont utilisées tels que les traitements chimiques de préservation. Leurs applications dépendent de la nature biologique des essences et de leurs propriétés physico-chimiques, principalement de l'imprégnabilité définie par la norme EN 350 (2016). L'imprégnabilité représente la capacité du bois à faire diffuser le produit de préservation de la surface vers le cœur de l'élément traité. Parmi ces procédés chimiques nous citons l'acétylation (anhydride acétique) et la furfurylation (alcool furfurylique) qui visent principalement à améliorer la stabilité dimensionnelle du bois (Wang et al. 2018). Ces traitements permettent également d'abaisser le taux d'humidité afin d'augmenter la résistance du bois aux attaques fongiques (Kumar 1994; Rowell 2007). Néanmoins, ces produits chimiques représentent un risque important vis-à-vis de l'environnement et la santé humaine. Des travaux ont été aussi menés sur l'influence de l'application de ces traitements vis-à-vis des propriétés physiques (teneur en extractibles) et mécaniques du matériau (variation du module d'élasticité et de la résistance à la compression) (Kučerová et al. 2016; Yildiz, Gezer, et Yildiz 2006). Il a été observé que ces traitements modifient les propriétés physiques et peuvent affaiblir la résistance mécanique du matériau et diminuer le caractère ductile de sa rupture. Afin de limiter le recours systématique aux traitements chimiques de préservation, d'autres solutions visant l'amélioration de la durabilité naturelle ont été développées ces dernières années. Parmi ces solutions permettant de réduire les échanges hygroscopiques, nous distinguons les lasures, les vernis et les peintures. Ces finitions ne jouent pas le rôle de préservation et leur durée de vie s'échelonnent de 4 à 8 ans, ce qui nécessite un entretien régulier et conséquent. Les dégradations que nous pouvons observer généralement sur ce type de finitions sont le farinage pour les lasures ou l'écaillage pour le vernis et la peinture.

I.4.3.3. Cas particulier du Douglas-fir

Comme il a été annoncé dans l'introduction, ce travail porte sur l'évaluation de l'état hydrique du Douglas-fir (nom latin : *Pseudotsuga menziesii*) par les méthodes résistives, et ce, pour les 2 raisons suivantes :

- (i) Le Douglas-fir représente une ressource prédominante dans notre région (Nouvelle-Aquitaine), une essence de résineux originaire des zones tempérées situées à l'ouest du continent Nord-Américain. Aujourd'hui, elle est largement implantée en France, avec un volume de production de sciages qui est passée de 200 000 à 1 200 000 m³ entre 1990 et 2018 (AGRESTE 2021). Plus de 80% de cette ressource est concentrée dans les zones de moyenne montagne du Massif Central. L'utilisation du Douglas en construction est très prometteuse en France et s'inscrit dans le cadre de la feuille de route régionale Néo Terra dédiée à la transition énergétique et écologique de la région Nouvelle Aquitaine (Néo Terra 2019). Le Douglas couvre 73 000 ha pour 16 millions m³ sur pied en Nouvelle-Aquitaine.
- (ii) Le Douglas-fir présente une bonne durabilité naturelle vis-à-vis des attaques biologiques (Tableau I-5 : classe de risque 3). Il présente une densité moyenne de 540 kg.m⁻³ supérieure à celle des sapins (490 kg.m⁻³) et des épicéas (450 kg.m⁻³), ce qui lui confère une meilleure résistance contre les attaques fongiques. Comparativement aux autres résineux, il se caractérise aussi par une bonne stabilité dimensionnelle (Tableau I-3) et d'excellentes caractéristiques mécaniques (résistances mécaniques allant de C18 à C30 et un module d'Young proche de 17 GPa pour une humidité interne de référence de 12%).

I.4.4. Pathologies biologiques : analyse de causes

Généralement, l'évaluation de la gravité des attaques biologiques se base sur la notion d'endommagement volumique définie par la perte de masse qui en résulte selon le type de pourriture (Reinprecht, Novotná, et Štefka 2007). Les origines de ces pathologies sont diverses comme une humidification du bois trop élevée ou des dispositions constructives peu adaptées au matériau bois. Ces conditions favorisent en général le développement de champignons (§ I.4.3.1). D'autres pathologies assez fréquentes sont issues de l'action des termites, souvent développées à l'intérieur des bâtiments. Le Tableau I-7 présente quelques exemples de pathologies entraînant une dégradation du bois (LCPC 2008; X, B, et B 2020).

Tableau I-7 : Exemples de pathologies d'origine biologique et leurs causes de développement



Figure	Pathologies	Causes
(a)	Développement fongique sur les bois horizontaux	Surface de bois horizontale non protégée ; Infiltration d'eau et difficulté d'évacuation.
(b)	Dégradation avancée au niveau du bas du pilier	Pilier immergé dans les eaux souterraines ; Difficulté d'évaporation de l'eau à cause du revêtement
(c)	Présence de champignons apparents sur le bois rond	Fente sur un bois rond exposé directement aux intempéries ; Absence de fente décharge (créée volontairement pour éviter des fentes indésirables)
(d)	Zones pourries conséquentes et ruine du platelage sur une passerelle	Création des pièges à eau sur des poutres en bois lamellé collé non protégées
(e) et (f)	Liaison poutre tablier et chaussée d'accès	Absence ou mauvaise étanchéité et stagnation de l'eau au contact direct de la poutre ; Chaussée humide et mauvaise ventilation du bois du bois à l'interface de la chaussée
(g)	Développement de champignons au niveau du contact bois-matière organique	Absence d'entretien et accumulation des matières organiques (terre végétale, débris, végétation, boue) au contact du bois

(h)	Apparition de mэрule	Un mauvais entretien de la peinture extэrieure
(i)	Piэges ą eau sur un assemblage bois sur bois exposэ aux intempэries	Mauvaise conception causant un mauvais drainage de l'eau

Les diffэrentes dэgradations constatэes sur les ouvrages d'art en bois montrent bien la sensibilitэ du matэriau vis-ą-vis de son environnement et confirment la nэcessitэ de mesures prэservatives pour amэliorer la durabilitэ du matэriau. La connaissance du niveau d'humiditэ interne est donc un point majeur pour limiter l'apparition de ces pathologies.

I.4.5. Dэformation et fissuration dues aux gradients d'humiditэ

Les dэsordres qui peuvent apparaître par les phэnomэnes de retrait/gonflement et de fissuration sont fortement liэes au gradient spatial de teneur en eau dэfinie par les variations de l'humiditэ et de la tempэrature.

I.4.5.1. Zones active et passive

L'эtude d'un gradient spatial de la teneur en eau dans un эlэment de structure en bois dans des environnements thermo-hydriques diffэrents a fait l'objet de plusieurs эtudes (McMillen 1955; Kouchade 2004; Franke et al. 2016; Nguyen et al. 2017). Cette approche est trэs importante pour caractэriser le phэnomэne de diffusion et mieux connaitre l'эquilibre hydrique vis-ą-vis du risque de dэgradations. Эtant donnэ que dans le domaine hygroscopique, l'eau est transportэe principalement par diffusion, les couches extэrieures de la section s'adaptent plus rapidement aux conditions climatiques que les couches internes. Franke et al. (2016) ont montrэ que la distribution de la teneur en eau dans la section transversale peut ętre divisэe de l'extэrieur vers l'intэrieur, en une zone active (entre 15 et 20 mm de profondeur) et une zone passive (

Figure I-16). Cette conclusion a ętэ confirmэe par Varnier (2019) en эtudiant les profils d'humiditэ pour 4 essences diffэrentes placэes en CS3 en montrant que les эchanges hydriques se font majoritairement sur les 20 premiers millimэtres de hauteur de la section (Figure I-17).

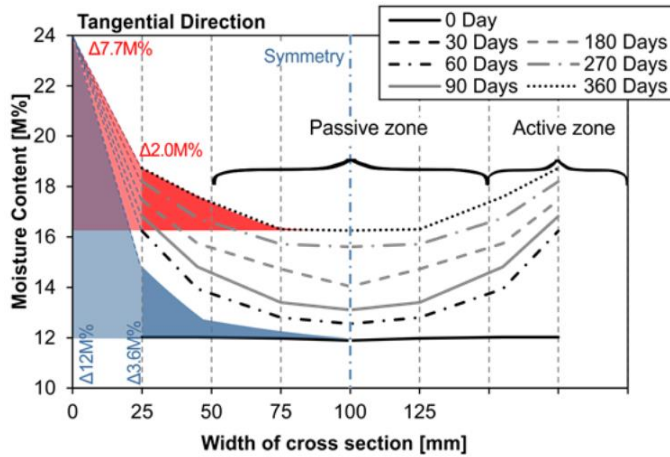


Figure I-16 : Distribution de la teneur en eau durant un processus d'adsorption et distinction entre les zones active et passive

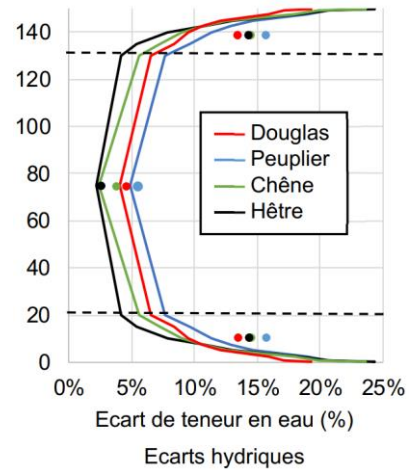


Figure I-17 : Les variations hydriques dans la hauteur de 4 poutres d'essences différentes en CS3

Ces résultats montrent que le gradient d'humidité résultant dépend de l'humidité relative et de la durée de l'exposition. C'est pourquoi, les couches internes mettent plus de temps à atteindre la teneur en eau d'équilibre, que la zone active est très sensible à l'humidité et que le couplage thermo-hydrrique est moins prononcé dans la partie passive.

I.4.5.2. Déformations

En dessous du PSF, les propriétés élastiques du matériau sont influencées par les variations d'humidité (§ I.4.1, Eq. (I-2)). Le phénomène de retrait/gonflement peut conduire à des déformations non homogènes dans l'ouvrage à cause de l'anisotropie du matériau. Les premiers travaux qui ont permis de quantifier les déformations liées aux gradients d'humidité ont été menés par McMillen (1955) en enregistrant les dimensions d'un échantillon en bois (Chêne rouge d'Amérique) durant un processus de séchage. Les échantillons ont ensuite été découpés en tranches afin de soulager la tension et d'enregistrer le changement des dimensions géométriques de chaque tranche (Figure I-18).

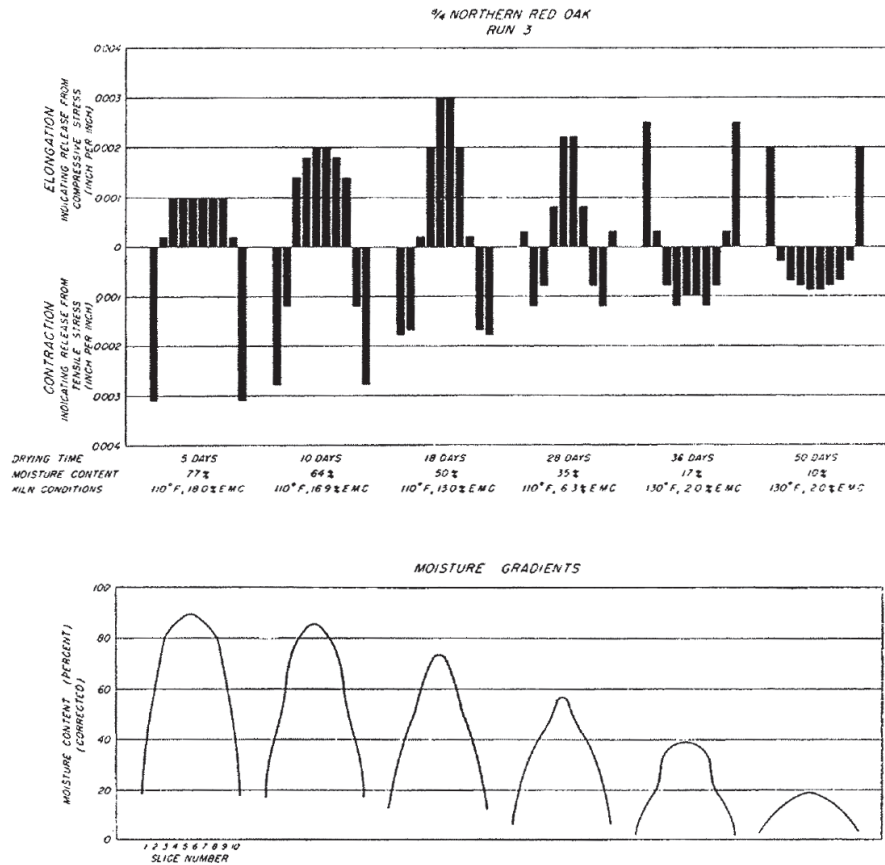


Figure I-18 : Diagramme de déformations pour un échantillon en Chêne rouge séché à 110 °F (McMillen 1955)

Les conséquences de ces déformations sont le plus souvent seulement inesthétiques, mais peuvent parfois engendrer des défaillances de fixations comme le déclouage ou le déchaussement des connecteurs (Figure I-19-a). L'exemple de la poutre en bois d'une passerelle (Figure I-19-b) met bien en évidence un retrait différent selon l'exposition des faces.

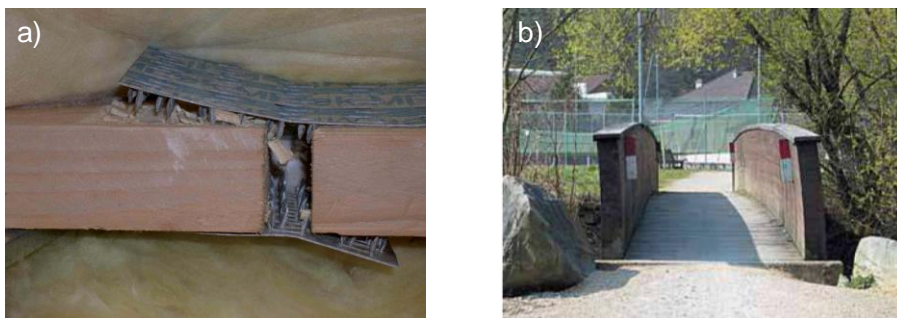


Figure I-19 : a) déchaussement de connecteur métallique dû à une déformation horizontale ;
b) déversement de poutres latérales d'une passerelle (la face ensoleillée se rétracte)

La Figure I-19-b montre que les poutres se sont incurvées vers le côté sud et que la face ensoleillée a subi un retrait plus important que la face opposée. Ce phénomène est amplifié d'autant que le rapport entre la hauteur de la poutre et son épaisseur augmente (LCPC 2008).

En présence de déformations importantes, la stabilité générale de la structure devrait être vérifiée. Des rétractions locales peuvent apparaître sous l'effet de la température avec la création de fentes qui peuvent piéger l'eau en favorisant le développement fongique.

I.4.5.3. Fissurations

Pour les éléments de structures en bois, le chargement hydrique lié aux conditions climatiques peut présenter des risques d'endommagement par fissuration. Les fissures dues à l'action du retrait (appelées aussi des fentes) se distinguent assez difficilement des fissures ayant pour origine une contrainte mécanique trop élevée. Elles sont généralement orientées dans le sens des fibres du bois. La Figure I-20 présente quelques exemples de fentes de retrait sur des différents ouvrages en bois (LCPC 2008).

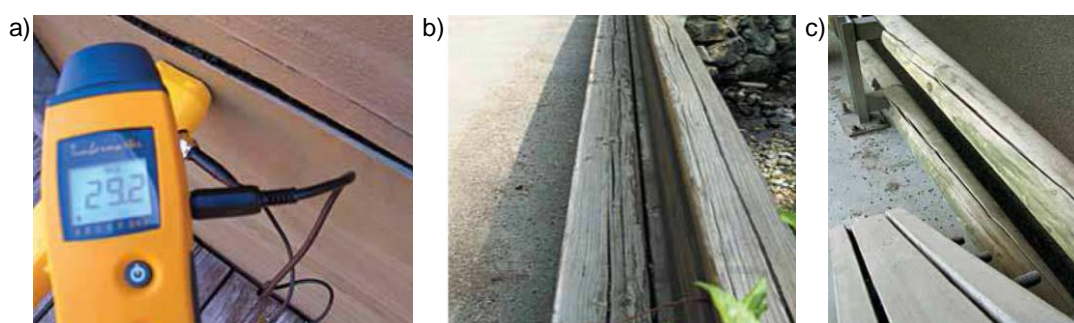


Figure I-20 : Exemples de fentes sur des ouvrages en bois : a) fente présentant une teneur en eau localement élevée due au retrait du bois ; b) fentes de retrait créant des pièges à eau ; c) bois rond sensible au retrait

Dietsch, Franke, et al. (2015) a expliqué le phénomène de fissuration par un déséquilibre entre les contraintes de compression σ_c dans la zone passive et les contraintes de traction σ_t dans la zone active durant le processus de séchage, et vice versa durant l'humidification (Figure I-21).

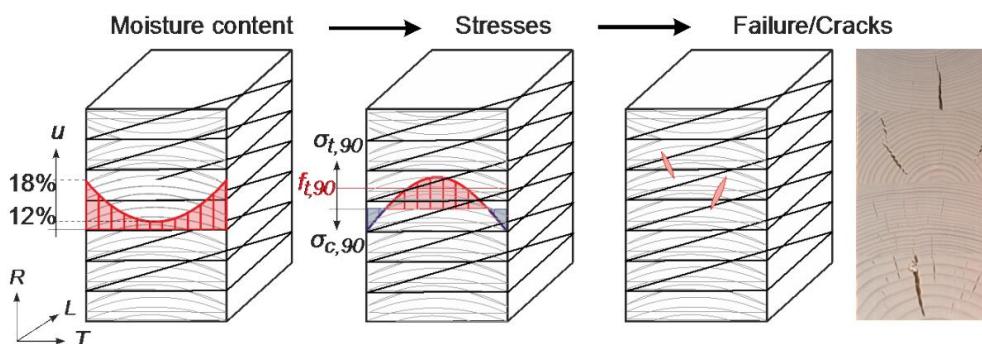


Figure I-21 : Répartition des contraintes de compression et de traction provoquant le développement de fissures (Dietsch, Franke, et al. 2015)

Tous ces exemples de pathologies biologiques, de déformations et de fissurations qui apparaissent sur les ouvrages en bois montrent que l'humidité est le facteur déclenchant. De ce fait, afin d'améliorer la durabilité et la durée de vie des structures en bois, il est nécessaire de connaître et de maîtriser le niveau d'humidité. Il est donc important de mettre en place des stratégies de maintenance adéquates liées à des inspections ciblées et des outils performants ce qui permettra d'établir un diagnostic optimal de leur état de santé.

I.5. Les politiques de maintenance préventive pour la durabilité des structures bois

Dans cette section, nous présenterons d'une manière générale les différentes stratégies de maintenance, et nous mettrons l'accent sur les techniques utilisées pour assurer la maintenance préventive des structures bois.

I.5.1. Stratégies de maintenance préventive

I.5.1.1. Définitions

Selon la norme française EN 13306-X-60-319 (2001), la maintenance et la durabilité peuvent être définies comme suit :

Définition 4 : la maintenance

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Définition 5 : la durabilité

Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données d'usage et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

La maintenance englobe ainsi toute action (dépannage, réparation, contrôle ou vérification) permettant de garantir à un bien une certaine durabilité. De manière générale, elle est divisée en deux catégories : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Au cours des dernières années, les politiques de maintenance ont évolué pour passer d'une maintenance corrective à une maintenance plutôt préventive qui s'appuie sur des inspections périodiques permettant de réduire les risques d'apparition d'un désordre. Selon EN 13306-X-60-319 (2001), elle peut être définie comme suit :

Définition 6 : la maintenance préventive

La maintenance préventive est exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien.

Dans le secteur de la construction en bois, l'évolution des politiques de maintenance et leur orientation vers la prévention s'explique par la demande croissante des maitres d'ouvrage en termes de sûreté de fonctionnement et de sécurité à moindre coût. Une bonne connaissance de leur état ainsi que la mise en œuvre d'une maintenance préventive sont de nature à prévenir leur dégradation et donc les incidents. En outre, les conditions d'exploitation et la qualité de leur entretien allongent sensiblement leur durée de vie. La mise en œuvre de ce type de maintenance « intelligente » nécessite toute une démarche impliquant la surveillance des conditions hygrothermiques et des sollicitations mécaniques. Ces conditions font partie d'un processus de contrôle de santé des structures appelé *Structural Health Monitoring (SHM)* ou en français *Contrôle de Santé Intégré (CSI)*. La définition de ce processus ainsi que la présentation de ses différentes catégories sont présentées ci-après.

I.5.1.2. Généralités sur le processus SHM

Définition et Objectifs

Le processus SHM peut être défini comme suit :

Définition 7 : Structural Health Monitoring

Le SHM est un processus de mise en œuvre d'une stratégie de détection et de caractérisation des dommages dans les structures. Cette stratégie regroupe des activités dans lesquelles des paramètres et des conditions sont observés, mesurés, enregistrés et traités (Santos et al. 2016).

L'objectif principal de l'implantation d'un processus SHM est de déterminer et de surveiller la disponibilité (aptitude au service) et la sécurité des structures afin d'évaluer leurs performances (en termes de sécurité face aux événements climatiques et de service, de confort, de consommation énergétique) et leur durabilité (Cremona et Santos 2018).

Principe

Le processus SHM consiste à surveiller en temps réel ou à intervalles réguliers l'intégrité d'une structure via l'installation des capteurs couplés à des systèmes de traitement des signaux, afin de prévoir ou détecter l'apparition des défauts. Cette démarche est illustrée dans la Figure I-22 (Medeiros 2016).

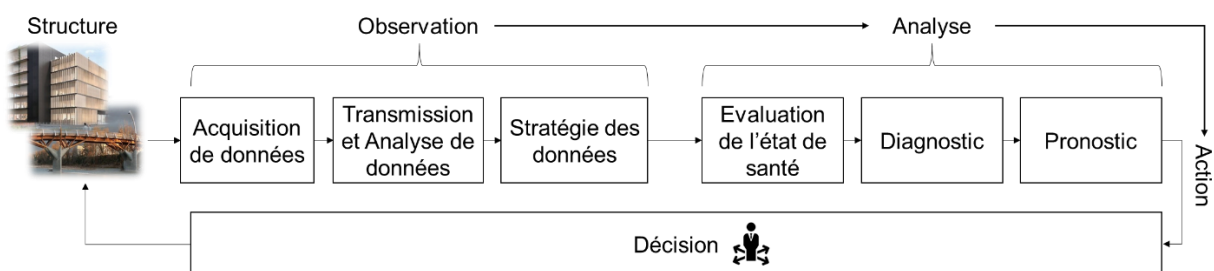


Figure I-22 : Architecture d'un processus SHM multidisciplinaire

Domaines d'application

Depuis une vingtaine d'années, grâce aux évolutions technologiques et scientifiques des systèmes de mesure, le champ d'application du SHM a évolué considérablement via l'utilisation des capteurs adaptés et précis (Chintalapudi et al. 2006). Le SHM est utilisé dans plusieurs secteurs d'activité tels que l'aéronautique, l'énergie, l'automobile, le transport ferroviaire, l'industrie chimique, la construction navale mais aussi le génie civil. Depuis les années 1990, le SHM n'a cessé de progresser et de gagner en intérêt dans la surveillance des ouvrages d'art et des structures de génie civil (ponts, tunnels, barrages, bâtiments). La première ligne directrice a été proposée par l'organisation Canadienne « Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) » en mettant l'accent sur des méthodologies qui visent à caractériser le comportement statique et dynamique des ponts en utilisant des mesures ponctuelles, périodiques ou continues (Mufti 2002). Les progrès technologiques permettent aujourd'hui une instrumentation multi-échelle de la structure (à titre d'exemple, le Nouveau pont du Forth construit en 2016 a été instrumenté avec plus de 2000 capteurs contre moins de 500 capteurs sur le Viaduc de Millau, un ouvrage construit en 2004). Les systèmes de surveillance impliquent notamment des accéléromètres, des capteurs de déformations (conventionnels ou à fibres optiques), des capteurs de déplacement (conventionnels ou laser), des capteurs d'humidité et des systèmes d'analyse d'images.

Pour les ouvrages en bois, Riggio et Dilmaghani (2019) ont présenté un modèle de classification des données illustré dans le Tableau I-8. La classification s'appuie sur 5 items : le cadre, le phénomène, le paramètre mesuré, l'échelle et la durée.

Tableau I-8 : Classification des données utilisées dans le SHM pour les constructions en bois (Riggio et Dilmaghani 2019)

Cadre	Phénomène	Paramètre mesuré	Echelle	Durée
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation d'un défaut • Evaluation de la sécurité et de l'aptitude au service • Planification du cycle de vie • Evaluation de performance • Validation/calibration du modèle numérique 	<ul style="list-style-type: none"> • Comportement hygrothermique • Comportement dynamique • Comportement élastique/viscoélastique • Evolution d'un défaut 	<ul style="list-style-type: none"> • Statique • Dynamique • Environnemental 	<ul style="list-style-type: none"> • Globale • Locale 	<ul style="list-style-type: none"> • Long terme • Court terme

Dans le travail présenté dans ce mémoire, nous nous intéressons au comportement hygrothermique dans le cadre de l'évaluation de la sécurité et de l'aptitude au service et ce, en tenant compte de la mesure des conditions climatiques (T, HR) et des propriétés hygrothermiques du matériau à savoir les phénomènes de transfert de type HAM (*heat, air and moisture*). Ces phénomènes ont un impact significatif sur les performances et la durabilité à long terme des structures en bois. La prise en compte de l'effet des conditions hygrothermiques et les mécanismes de détérioration liés au HAM peut aider à déterminer les mesures préventives nécessaires (AISayegh 2014).

Un processus SHM complet des structures en bois nécessite une approche multi-physique en combinant plusieurs méthodes de mesure via l'utilisation des systèmes multi-capteurs. Un seul paramètre à surveiller est généralement insuffisant pour décrire de manière cohérente l'état d'un l'élément en bois (Niemz 2012). En complément des inspections visuelles, plusieurs techniques de suivi peuvent être mises en place afin de recueillir davantage d'informations sur la santé structurale des ouvrages. De ce fait, les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) sont de plus en plus utilisées grâce à leur potentiel évident face aux questions posées en termes de diagnostic et d'évaluation de l'état des ouvrages.

Nous allons détailler dans le paragraphe suivant quelques techniques CND, leurs principes et quelques exemples d'applications.

I.6. Les méthodes CND pour les structures bois

Selon COFREND (2017), le Contrôle Non Destructif (CND) peut être défini comme suit :

Définition 8 : le contrôle non destructif

Le Contrôle Non Destructif (CND), appelé aussi Essai Non Destructif (END), est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader et à différents stades de leur cycle de vie.

Les outils CND sont généralement utilisés dans deux domaines d'applications principaux :

- Détecter, positionner, identifier et dimensionner les défauts dans les éléments, les structures ou les assemblages en bois ;
- Mesurer de façon directe ou indirecte des caractéristiques des matériaux.

Plusieurs études ont montré que le choix d'une méthode CND est un compromis entre l'échelle d'étude, le coût financier du matériel, la facilité de son utilisation et de sa mise en œuvre et la pertinence des résultats et du diagnostic (Niemz 2012; Riggio et al. 2014; Palma et Steiger 2020). Le Tableau I-9 donne un aperçu non exhaustif de quelques techniques CND couramment utilisés pour l'évaluation des éléments de structure en bois.

Tableau I-9 : Aperçu de quelques outils CND utilisées pour la caractérisation des propriétés physiques du bois

Objectif cible	Méthodes CND
Composition chimique	La spectroscopie infrarouge (SIR) ou proche infrarouge (SPIR)
Mesure de teneur en eau Distribution de la teneur en eau Détection de pourriture fongique	Carottages et séchage – SIR (seulement pour l'humidité de surface) – Les méthodes électriques et diélectriques – la méthode gammadensimétrique

Délaminage des joints collés, revêtements	Ultrason – Radiographie (rayons X) – Thermographie
Détection de défauts internes (attaque d'insectes, pourriture, fissures)	Radiographie (rayons X) – Emission Acoustique – Résistance électrique – Résistographie
Evaluation des propriétés mécaniques	Emission acoustique – Ultrasons
Déformations Evaluation des contraintes mécaniques ou induites par le climat	Corrélation d'image – Photogrammétrie – Interférométrie – Scan3D

Le laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D) développe également une série d'approches basées sur des méthodes CND afin d'établir un diagnostic et un monitoring des ouvrages. Parmi ces techniques, nous citons les mesures ultrasonores (Zhang et al. 2018), l'émission acoustique (Lamy et al. 2015), les méthodes optiques (Pop, Dubois, et Absi 2013), la résistivité électrique (Wael Hafsa et al. 2021), les méthodes gamma-densimétriques (Nguyen et al. 2017), la photogrammétrie et le scanner 3D (Gerbaud et al. 2020). Ces études ont montré que les techniques CND appliquées au bois sont souvent associées à des méthodes inverses faisant appel à de la modélisation numérique en parallèle.

Comme il a été annoncé dans l'introduction, dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux outils CND utilisés pour l'évaluation de l'état hydrique des éléments en bois. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter un état de l'art de ces méthodes.

I.7. Estimation de l'état hydrique

Pour évaluer le taux d'humidité, de nombreuses méthodes sont proposées. Ces méthodes peuvent être directes ou indirectes (Dietsch, Franke, et al. 2015) :

- Les méthodes directes consistent à mesurer la teneur en eau par carottages et dessiccation. Dans le cadre de cette méthode, la carotte prélevée est pesée (masse humide) puis séchée dans une étuve à $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ selon le mode opératoire décrit par la norme EN 13183-1 (2002) pour avoir la masse anhydre. Cette technique nécessite un carottage destructif et un temps de conditionnement assez long pour le séchage.
- Les méthodes indirectes, regroupant principalement des méthodes CND, sont basées sur la corrélation entre les propriétés physiques et le taux d'humidité interne. Parmi ces méthodes, nous présentons comme exemple les méthodes radiométriques qui est une méthode appliquée en laboratoire. Pour des auscultations in-situ, nous proposons les méthodes corrélées aux propriétés électriques du matériau. Selon les paramètres mesurés, deux approches sont proposées dans la littérature : une approche basée sur le courant alternatif (CA) (les méthodes diélectriques) et une approche basée sur le courant continu (CC) (les méthodes résistives).

I.7.1.1. Méthode radiométriques : la gammadensimétrie

Parmi les techniques radiométriques les plus adaptées et développées au matériau bois, nous distinguons la méthode employant des rayons X permettant essentiellement d'observer des défauts internes (Badel 1999), et les rayons Gamma qui permet de déterminer la densité et les profils spatiaux de teneur en eau dans le bois. Cette méthode appelée méthode gammadensimétrique, met à profit le phénomène d'absorption des rayonnements électromagnétiques de type gamma par la matière (Ferraz et Aguiar 1985; Laufenberg 1986). Le principe de cette méthode est illustré dans la Figure I-23.

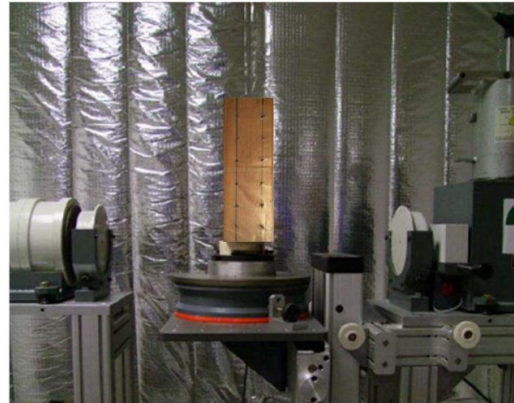
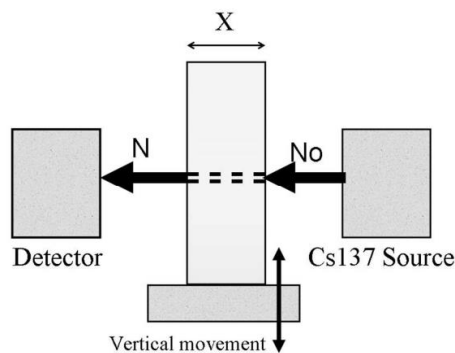


Figure I-23 : Protocole expérimental pour les mesures gammadensimétriques (Nguyen et al. 2013)

Nguyen et al. (2017) propose une relation permettant de relier la teneur en eau au rayonnement :

$$w = \left| \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{x d_b} - \mu_s \right| \frac{d_a}{\mu_w \rho_w} \quad (I-8)$$

avec :

- I et I_0 : les intensités initiale et réduite du rayonnement, respectivement ;
- x : l'épaisseur de l'échantillon testé ;
- d_b : la masse volumique apparente, définie comme le rapport entre la masse sèche et le volume total de système (bois + eau + air) ;
- d_a : la masse volumique de l'eau absorbée dans les parois cellulaires (g/cm^3)
- μ_s et μ_w : les coefficients d'atténuation massique du bois, de l'eau et de l'air (cm^2/g) ;
- ρ_w : la masse volumique de l'eau et de l'air (g/cm^3).

I.7.1.2. Méthodes diélectriques/électromagnétiques

Les méthodes diélectriques sont basées sur l'action d'un champ électrique alternatif sur les charges électriques liées au matériau bois. En effet, le bois, un matériau légèrement

conducteur et permettant la propagation des ondes électromagnétiques, est caractérisé par une permittivité diélectrique qui peut s'écrire sous la forme d'un paramètre complexe :

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' - i\varepsilon_r'') \quad (I-9)$$

ε' est la partie réelle qui représente la constante diélectrique, ε'' est la partie imaginaire désignant le facteur de perte, ε_0 est la permittivité diélectrique du vide, ε_r' et ε_r'' sont les permittivités relatives du bois.

Parmi les techniques CND basées sur l'approche diélectrique, le radar électromagnétique (Ground Penetrating Radar GRP en anglais) est utilisé pour caractériser les constantes diélectriques. Cela consiste en la propagation d'ondes électromagnétiques de fréquences comprises entre 300 mégahertz et 300 gigahertz. Des sondes de transmission et de réception séparées peuvent être utilisées, ou une sonde simple qui joue à la fois le rôle de l'émetteur et du récepteur. Cette méthode a été récemment développée pour caractériser l'interaction physique entre les ondes radar et le bois, et ce, en étudiant l'effet de l'humidité, de la direction des fibres et de l'essence du bois (Schajer et Orhan 2006; Mai et al. 2015; Zhang 2021). Par exemple, afin de prendre en compte l'effet de l'anisotropie, les mesures radar dans le cadre des travaux de Zhang (2021) sont effectuées suivant la hauteur et l'épaisseur de la poutre comme le montre la Figure I-24. A l'échelle structurale, le GPR peut être envisagé pour déterminer des zones de plus forte humidité sur un ouvrage (Stedman et al. 2006).

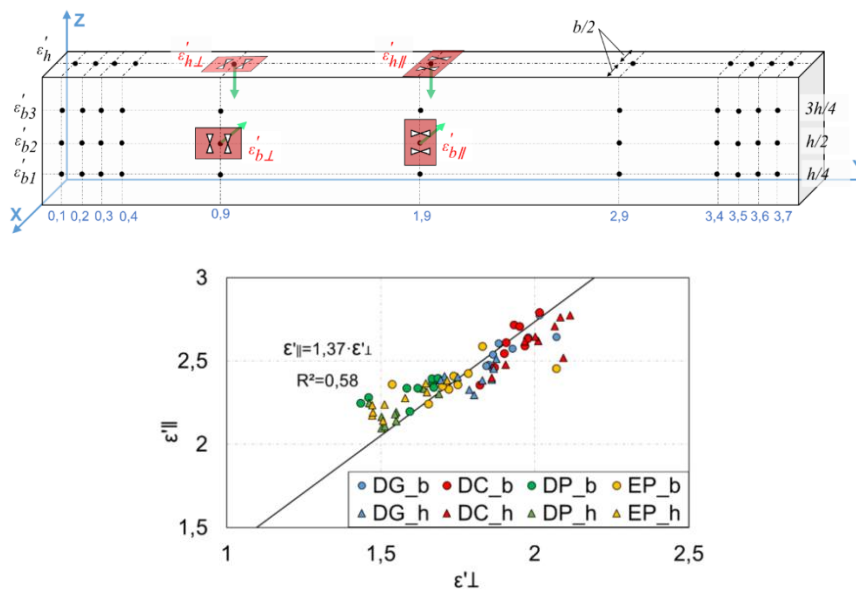


Figure I-24 : Protocole expérimental pour l'étude de l'effet de l'anisotropie sur les mesures Radar sur des éléments en Douglas-fir (DG, DC, DP) et en Epicéa (EP) (ε'_{\parallel} : parallèle aux fibres, ε'_{\perp} : perpendiculaire aux fibres)

Pour du bois lamellé-collé, Li (2017) a utilisé le même principe pour effectuer des mesures capacitives en utilisant des électrodes sous formes de patches en cuivre intégrées entre les lamelles. Dans ce cas, la capacité (C) entre deux plaques parallèles, exprimée en Farad, est définie par l'équation suivante :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (I-10)$$

où A est l'aire des plaques (m^2) et d est la distance (m) entre les plaques.

La Figure I-25 présente les mesures de capacité sur une large gamme de teneur en eau (de 10 à 70%).

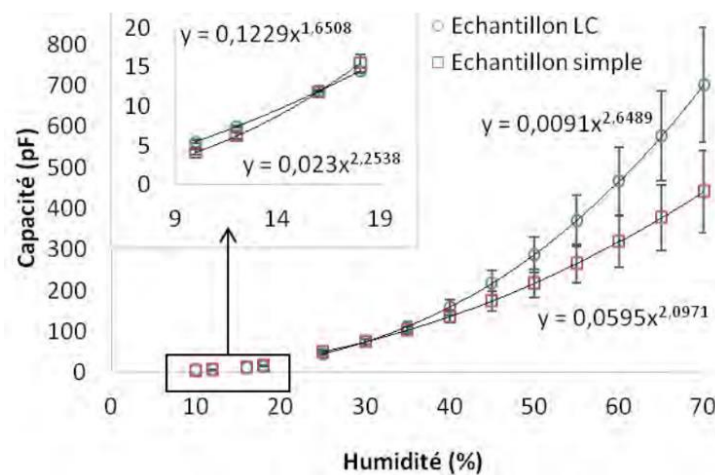


Figure I-25 : Mesures de capacité électrique en fonction de l'humidité pour des échantillons simples et lamellé collé de (espacement d'électrodes = 16,5 mm)

Ces mesures montrent une sensibilité à la taille des électrodes et à la pression de collage. D'autres paramètres tels que la présence de fente et de résine peut aussi influencer la précision de la mesure.

I.7.1.3. Méthodes résistives

Largement intégrée à la politique d'évaluation de l'état hydrique dans un élément en bois, la méthode résistive présente une bonne corrélation entre la résistance électrique et la teneur en eau. Cette méthode repose sur la mesure de la résistance électrique suite à l'injection d'un courant électrique continu entre deux d'électrodes. La Figure I-26 nous montre quelques stratégies de mesures résistives en utilisant différents types d'électrodes que nous retrouvons dans la littérature. Dans la configuration (a), la mesure est assurée entre une électrode positionnée à la surface et une barre métallique insérée dans le bois qui sert comme une deuxième électrode (Zelinka, Stone, et Rammer 2007). Dans le cas du bois lamellé-collé (b et c), certaines études proposent de placer les électrodes entre les lamelles, soit sous forme d'un fil en acier inoxydable traversant la longueur de la poutre (Björngrim, Fjellström, et Hagman 2017), ou sous forme de patches (Li 2017). La méthode utilisant des électrodes sous forme de pointes métalliques (ou aiguille) ou de vis (d) représente la solution la plus utilisée (Vermaas 1975; Fredriksson 2010; Dietsch, Franke, et al. 2015). La méthode utilisant des électrodes en « aiguilles » est employée pour les humidimètres à deux pointes utilisés pour des inspections (EN 13183-2 2002). La gamme de mesure varie généralement de 7 à 30% de teneur en eau avec une précision d'environ 1%.

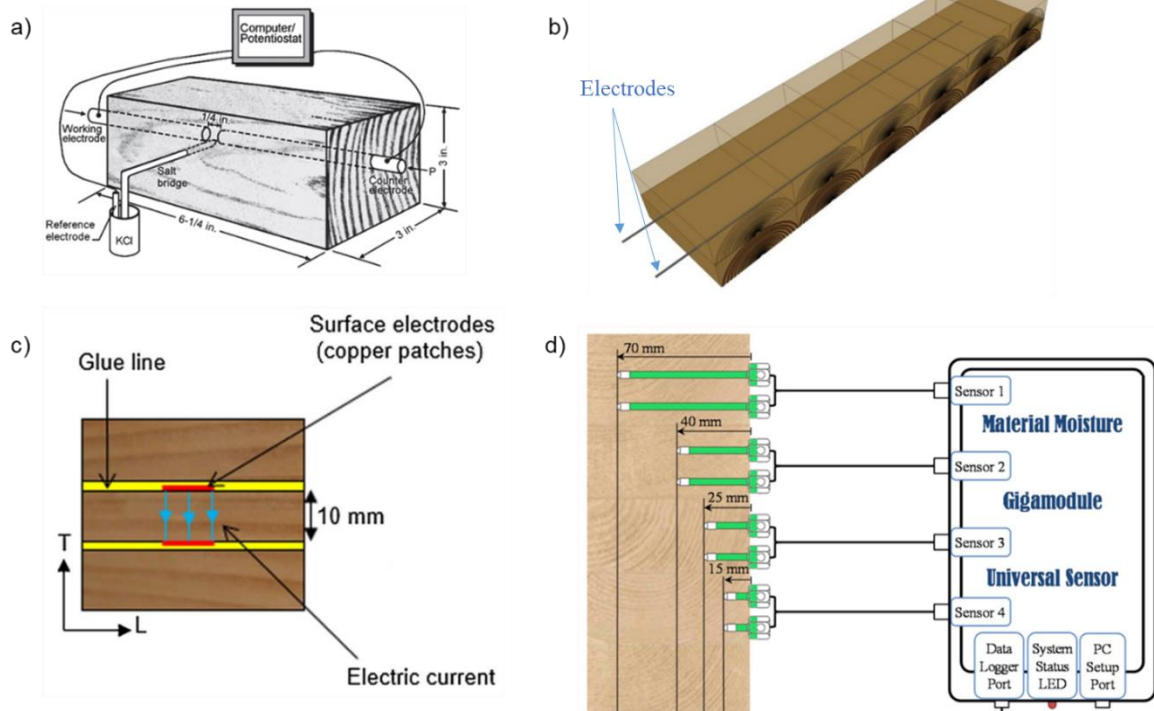


Figure I-26 : Exemples de stratégies d'électrodes utilisées pour les mesures résistives

Aujourd'hui, des nouvelles techniques sont mis en œuvre pour améliorer le contact entre le bois et l'électrode (Skaar 1988; Norberg 2000) afin d'assurer une surveillance en continu de zones critiques des ouvrages (Figure I-27) (Björngrim, Hagman, et Wang 2016a).



RTU 600 GANN (électrode en aiguilles)



HygroTrac de General Electric (électrode à vis)

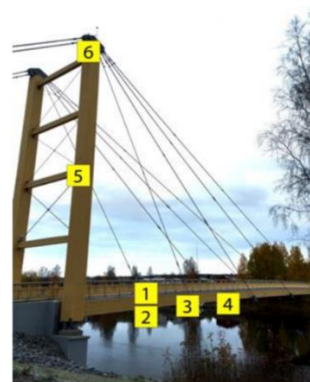


Figure I-27 : Exemples d'applications de méthodes électriques

Ces mesures sont souvent limitées à la surface des éléments investigués et demeurent insuffisantes pour définir la répartition de l'humidité. Pour mieux répondre à ce besoin, ce travail propose de mettre en œuvre une approche basée sur une technique de tomographie électrique utilisée pour estimer la distribution de la teneur en eau dans le sol.

I.8. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur l'utilisation du bois dans la construction, ainsi que les caractéristiques physiques de ce matériau et plus particulièrement sur son hétérogénéité et sa sensibilité hygrothermique. Nous constatons ainsi un fort lien entre l'humidité et le développement de nombreuses pathologies. Les endommagements associés sont souvent liés à des valeurs excessives de teneurs en eau ou aux cycles d'humidification/séchage. C'est pourquoi, l'évolution des politiques de maintenance est présentée pour expliquer l'émergence du processus SHM dédié à la surveillance de l'état de santé d'une structure en bois. Ce dernier est introduit par la description de ces différents modules qui le composent. En effet, cette étude a montré qu'il existe plusieurs méthodes qui visent à améliorer la durabilité du matériau et donc, la durée de vie des ouvrages. Quelques méthodes de diagnostics non destructifs sont présentées à la fin de ce chapitre. Leurs principes de mesure ainsi que des exemples d'application sont aussi présentés. Pour évaluer l'humidité interne dans le bois, les méthodes résistives électriques se révèlent intéressantes. Quelques verrous techniques et scientifiques ont été identifiés, en particulier concernant la caractérisation de la résistivité électrique à des faibles teneurs en eau. De plus, peu de travaux ont été réalisés pour identifier le gradient d'humidité dans un élément en bois et ce, en utilisant les méthodes résistives.

Pour répondre à ces besoins, les 3 étapes suivantes seront abordées dans les prochains chapitres :

- Une étude statistique basée sur des données bibliographiques permettant d'identifier les paramètres impliqués dans la méthode électrique et leurs effets sur la mesure de la résistance électrique (partie 2) ;
- La présentation de l'approche expérimentale-numérique utilisée pour l'évaluation de la teneur en eau (partie 3) ;
- Une étude paramétrique pour caractériser la loi de passage entre la résistivité électrique et la teneur en eau du bois ;
- Des exemples d'application à différentes échelles (partie 4).

Partie II. Evaluation de l'état hydrique par mesures résistives

II.1. Introduction

Les méthodes électriques, brièvement présentées dans § I.7.1.3, sont largement utilisées pour l'évaluation de la teneur en eau dans le bois. Elles consistent à estimer sa valeur par l'intermédiaire des mesures de résistances électriques. En revanche, ces mesures sont sensibles à plusieurs paramètres liés aux conditions expérimentales et au matériau. Dans ce contexte, nous proposons une étude à la fois bibliographique et statistique qui traite la mesure de l'humidité dans le bois par les méthodes résistives. Cette étude nous permettra d'identifier les paramètres significatifs qui influencent ces mesures.

Sur la base de cette étude, nous allons proposer par la suite une approche résistive à courant continu (CC) basée sur une technique d'imagerie électrique. Le principe de cette méthode, généralement utilisée pour estimer la distribution de la teneur en humidité dans le sol, sera introduit. Des exemples d'adaptation de cette technique aux matériaux de génie civil seront également présentés.

II.2. Résistance et résistivité électriques

La résistance et la résistivité électriques peuvent être définies comme suit :

Définition 9 : la résistance électrique

La résistance électrique, souvent désignée par la lettre R exprimée en Ohm (Ω), représente la propriété d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique. La loi d'Ohm définit la résistance comme le rapport entre la différence de potentiel (V) exprimée en Volts, et l'intensité du courant (I) exprimée en Ampères :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{II-1})$$

Définition 10 : la résistivité électrique

La résistivité électrique (ρ), exprimée en $\Omega \cdot \text{m}$, ou son inverse la conductivité en Siemens par mètre ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$), est une propriété intrinsèque du matériau. A une température donnée, la résistance (R) d'un cylindre de section S (en m^2) et d'une longueur L (en m) est exprimée en fonction de sa résistivité par l'expression suivante :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{II-2})$$

II.3. Mesures résistives dans le bois

Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope, la résistivité correspond à la résistivité vraie du milieu, ce qui n'est pas valable pour un milieu hétérogène ou anisotrope comme le bois. Par conséquent, pour estimer les niveaux d'humidité dans le bois, la plupart des études se basent sur la mesure de la résistance plutôt que la mesure de la résistivité.

Dans ce paragraphe, nous proposons une étude bibliographique sur le développement des mesures résistives dans le bois. Cette étude nous a permis de référencer quelques équipes de recherche européennes qui portent un intérêt au développement des approches résistives durant ces dernières années (Figure II-1).

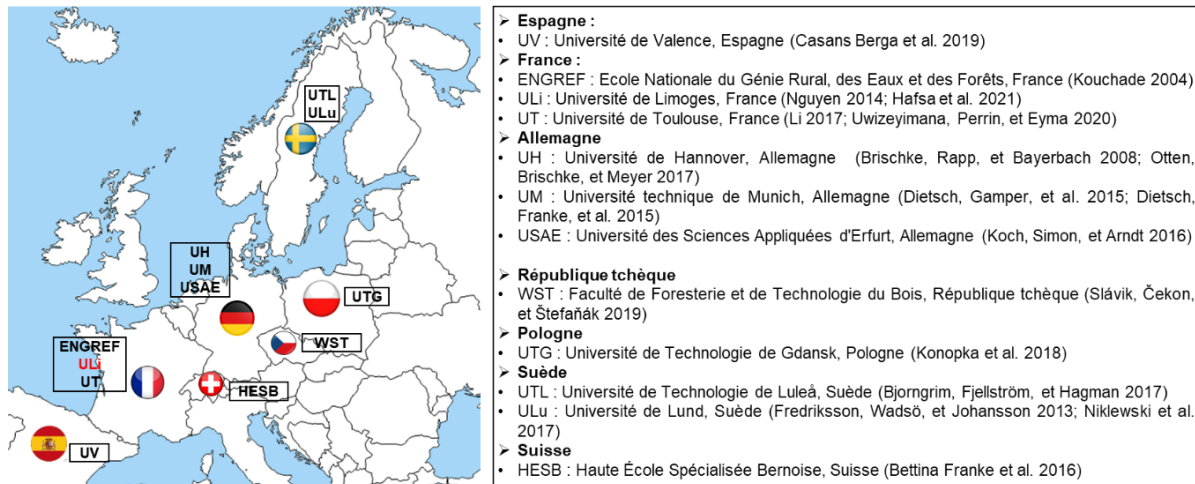


Figure II-1 : Cartographie de quelques laboratoires qui travaillent sur le développement des méthodes résistives (pour des raisons de simplicité de lecture, les noms des universités correspondantes aux laboratoires sont marqués sur la cartographie)

La majeure partie des travaux qui existent dans la littérature s'intéresse à la problématique de la durabilité du matériau bois et au monitoring des ouvrages afin de développer des stratégies de fiabilité prédictive des structures. Parmi les unités de recherche présentées sur la cartographie, nous trouvons par exemple l'Université de Hannover qui travaille sur l'enregistrement des données délivrées par des Gigaohmmètres afin d'évaluer une large gamme de teneurs en eau. Ces bases de données enregistrées sur des longues périodes, permettent aujourd'hui d'avoir des approches prédictives pour estimer la durée de vie des structures en bois (Brischke, Rapp, et Bayerbach 2008; Brischke et Rapp 2008; Otten, Brischke, et Meyer 2017). D'autres études réalisées en Allemagne par l'Université Technique de Munich permettent d'avoir un suivi d'un gradient d'humidité dans une structure via l'installation de plusieurs électrodes de différentes longueurs et à différents endroits (Dietsch, Franke, et al. 2015; Dietsch, Gamper, et al. 2015). L'Université de Technologie de Lulea (Suède) étudie la pertinence des méthodes résistives pour la surveillance en continu de la teneur en eau in-situ sur des ponts en bois (Björngrim, Hagman, et Wang 2016b; Björngrim, Fjellström, et Hagman 2017). Toujours en Suède, des modèles empiriques ont été établis par l'Université de Lund afin de déterminer la relation entre la résistance électrique et la teneur en eau (de 15 à 27 %) (Fredriksson, Wadsö, et Johansson 2013; Niklewski et al. 2017). En France, la méthode résistive est utilisée par l'Université de Limoges et l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts pour évaluer la diffusion hydrique dans le bois (Kouchade 2004; Nguyen 2014) et par l'Université de Toulouse pour déterminer la teneur en eau dans le bois lamellé-collé.

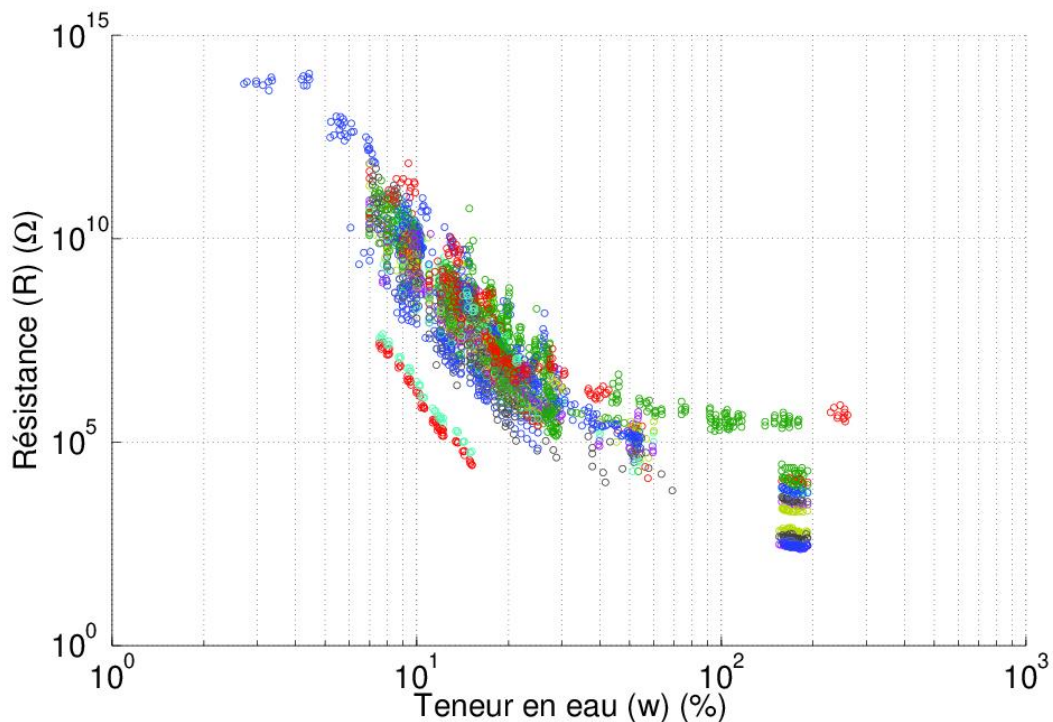
II.4. Données bibliographiques

Dans les sous-sections qui suivent, nous allons présenter une approche statistique qui traite les données de résistance électrique trouvées dans la littérature (Skaar 1988; Brischke, Rapp, et Bayerbach 2008; Hiroyuki Yamamoto et al. 2013; Fredriksson 2010; Otten, Brischke, et Meyer 2017; Sandoz 1993; Konopka et al. 2018; Nguyen 2014; Forsen et Tarvainen 2000; William L. James 1963; Du, Geissen, et Noack 1991; Hartley et Marchant 1995; Niklewski et al. 2017; Nursultanov, Altaner, et Heffernan 2017; Slávik, Čekon, et Štefaňák 2019) afin d'identifier les différents paramètres qui affectent la mesure et qui peuvent nous être utiles pour optimiser notre approche, présentée par la suite. Afin de centraliser l'ensemble de données, les résultats expérimentaux ont été numérisés en utilisant l'outil de digitalisation du logiciel Grapher™ (2017).

II.4.1. Type et classification des données

L'étude bibliographique concerne 82 résineux et 27 feuillus. Les mesures des résistances sont répertoriées selon l'essence du bois, sa famille, son origine géographique, son état thermo-hydrrique, et la direction d'injection du courant par rapport à l'alignement des fibres (L, R et T).

Les mesures collectées et représentées sur la Figure II-2 ont été réalisées sur du bois vert, des éléments en bois in-situ ou conditionnés et contrôlés en laboratoire.



- Pseudotsuga menziesii L(26.6°C) (US) [C. Skaar 1988]
- Pseudotsuga menziesii L(20°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pseudotsuga menziesii L(20°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pseudotsuga menziesii L(20°C) (US) [C. Brischke 2007]
- Pseudotsuga menziesii L(36°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pseudotsuga menziesii L(36°C) (US) [C. Brischke 2007]
- Pseudotsuga menziesii L(4°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pseudotsuga menziesii L(4°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pseudotsuga menziesii L(4°C) (US) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(20°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(20°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(20°C) (DK NO SE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(36°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(36°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(36°C) (DK NO SE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(4°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(4°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Picea abies L(4°C) (DK NO SE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(20°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(20°C) (DK NO SE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(20°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(36°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(36°C) (DK NO SE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(36°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(4°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(4°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Pinus sylvestris L(4°C) (DE) [C. Brischke 2007]
- Cryptomeria japonica L(50°C) (JP) [H. Yamamoto 2013]
- Picea abies L(20°C) (UE) [M. Fredriksson 2010]
- Picea abies T(20°C) (SE) [M. Fredriksson 2013]
- Picea abies L(20°C) (DE) [K. A. Otten 2017]
- Picea abies L(36°C) (DE) [K. A. Otten 2017]
- Picea abies L(4°C) (DE) [K. A. Otten 2017]
- Picea Abies L(20°C) (CH) [J. L. Sandoz 1993]
- Pinus sylvestris T(25°C) (PL) [A. Konopka 2018]
- Pseudotsuga menziesii L(20°C) (FR) [T. A. Nguyen 2013]
- Pinus sylvestris L(20°C) (DE FINO SE) [H. Forsen 2000]
- Picea abies L(20°C) (DE FINO SE AT DK) [H. Forsen 2000]
- Quercus L(20°C) (DE FR DK) [H. Forsen 2000]
- Pinus sylvestris L(20°C) (DE) [H. Forsen 2000]
- Pinus pinaster L(20°C) (FR) [H. Forsen 2000]
- Picea abies L(20°C) (FINO SE) [H. Forsen 2000]
- Betula L(20°C) (FI SE) [H. Forsen 2000]
- Fagus L(20°C) (DE DK) [H. Forsen 2000]
- Alnus L(20°C) (SE) [H. Forsen 2000]
- Larix L(20°C) (DK) [H. Forsen 2013]
- Pinus sylvestris L(40°C) (DE) [H. Forsen 2000]
- Pinus sylvestris L(60°C) (DE) [H. Forsen 2000]
- Pinus sylvestris L(70°C) (DE) [H. Forsen 2000]
- Pinus sylvestris L(5°C) (DE) [H. Forsen 2000]
- Pinus sylvestris L(-10°C) (DE) [H. Forsen 2000]
- Taxodium distichum L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Pseudotsuga menziesii L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Picea abies L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Abies concolor L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Tsuga canadensis L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Larix occidentalis L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Pinus banksiana L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Pinus palustris L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Pinus resinosa L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Pinus strobus L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Picea abies R(20°C) (SE) [Q. P. Du 1991]
- Quercus robur R(20°C) (DE) [Q. P. Du 1991]
- Fagus sylvatica R(20°C) (DE) [Q. P. Du 1991]
- Pinus ponderosa L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Pinus echinata L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Sequoia sempervirens L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Picea mariana L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Picea sitchensis L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Fraxinus nigra L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Fraxinus americana L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Populus grandidentata L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Tilia L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Betula L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Betula papyrifera L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Ulmus americana L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Carya L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Khaya L(26°C) (MG) [W. L. James 1963]
- Magnolia virginiana L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Swietenia mahagoni L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Acer saccharum L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Quercus rubra L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Quercus alba L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Shorea L(26°C) (MY) [W. L. James 1963]
- Liquidambar styraciflua L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Nyssa sylvatica L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Juglans nigra L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Liriodendron tulipifera L(26°C) (US) [W. L. James 1963]
- Pseudotsuga menziesii R(20°C) (US) [J. Hartley 1995]
- Tectona grandis R(20°C) (IN) [Q. P. Du 1991]
- Entandrophragma utile R(20°C) (CG) [Q. P. Du 1991]
- Shorea R(20°C) (MY) [Q. P. Du 1991]
- Pinus sylvestris R(20°C) (DE) [Q. P. Du 1991]
- Picea abies R(20°C) (SE) [J. Niklewski 2017]
- Pinus radiata L(20°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata L(40°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata L(60°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata L(90°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata T(20°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata T(40°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata T(60°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata T(90°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata R(90°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata R(60°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata R(40°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Pinus radiata R(20°C) (NZ) [N. Nursultanov 2017]
- Picea L(20°C) (CZ) [R. Slávik 2019]
- Picea R(20°C) (CZ) [R. Slávik 2019]

Figure II-2 : Les données bibliographiques des essais expérimentaux de la résistance électrique en fonction la teneur en eau du bois

Comme nous pouvons le constater, les données couvrent une large gamme de teneur en eau allant de 2 jusqu'au 260% qui correspondent respectivement à des résistances électriques de $1.14E+14$ à 231Ω . Cependant, l'étude montre une lacune de données de résistances électrique en dessous de 7% de teneur en eau. Cette limite de 7 % correspond à la limite inférieure définie par EN 13183-2 (2002) décrivant le mode opératoire des humidimètres basés sur la mesure de la résistance électrique. Ces données montrent bien qu'en-dessous du point saturation des fibres (environ 30%), une relation log-linéaire existe entre la résistance et la teneur en eau. Cette relation a été démontrée suite aux travaux de A. J. Stamm (1927) qui a décrit quantitativement la diminution de la résistance du bois vs. l'augmentation de la teneur en eau. Entre 7 et 30 % et à une température constante, A. J. Stamm (1927) a montré que la relation entre le logarithme de la teneur en eau (w) et le logarithme de la résistance est une relation linéaire qui s'écrit selon (II-5) :

$$\ln(R) = k_w \ln(w) + C_1 \quad (II-3)$$

où k_w et C_1 sont deux constantes matériau.

La relation log-linéaire a été utilisé dans plusieurs études (Norberg 1999; Fredriksson, Wadsö, et Johansson 2013) pour relier R à w . D'autres formes ont été adoptées telle que l'équation suivante (Forsen et Tarvainen 2000), où les constantes a et b dépendent de l'essence du bois :

$$\log \log (R + 1) = a \cdot w + b \quad (II-4)$$

II.4.2. Modélisation statistique

Afin de modéliser les données bibliographiques et d'évaluer la dispersion des mesures de résistances pour chaque teneur en eau, nous proposons une approche statistique-probabiliste. Cette analyse, développée en utilisant le logiciel MATLAB (2018), a été réalisée dans le but d'identifier le poids des paramètres qui conditionnent la mesure. Dans ce cas, pour chaque valeur de teneur en eau, nous supposons que la résistance électrique est une variable aléatoire discrète qui suit une loi statistique quelconque caractérisée par des paramètres inconnus. Pour calculer les meilleures estimations des paramètres du modèle à partir de données observées, nous avons employé la technique du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Estimator en anglais) (Fisher 1922). Cette dernière permet de mesurer l'adéquation entre la distribution des résistances observées pour une teneur en eau donnée, et la loi de probabilité utilisée. Plus la vraisemblance est importante, plus l'adéquation à la loi statique est assurée. Afin de choisir le modèle le plus adéquat, nous comparons les résultats de la fonction de la log-vraisemblance, de la moyenne et de la variance de différentes lois statistiques, à savoir la loi normale, la loi de Weibull et la loi Gamma. Les fonctions de densité et de log-vraisemblance des autres lois probabilistes (Weibull et Gamma) sont décrites en Annexe 1.1.

Si une variable aléatoire X suit une loi normale $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, avec une moyenne (espérance mathématique) μ et un écart type σ , sa fonction de densité et sa fonction de répartition s'écrivent sous les formes suivantes :

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{II-5})$$

$$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{II-6})$$

Afin de d'estimer les deux paramètres de la loi normale (μ, σ^2) au regard de n observations indépendantes de la même variable aléatoire $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, la fonction de vraisemblance (L) s'écrit comme suit :

$$L(x_1, \dots, x_n, \mu, \sigma) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{II-7})$$

L'expression de la fonction de vraisemblance peut être simplifiée de la manière suivante :

$$L(x_1, \dots, x_n, \mu, \sigma) = \frac{1}{(\sigma\sqrt{2\pi})^n} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i-\mu)^2} \quad (\text{II-8})$$

La fonction de log-vraisemblance s'écrit alors de la forme suivante :

$$\text{Ln } L(x_1, \dots, x_n, \mu, \sigma) = -\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i-\mu)^2 \quad (\text{II-9})$$

Les estimateurs du maximum de vraisemblance de l'espérance μ et la variance σ d'une loi normale sont (Taboga 2017) :

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{II-10})$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2 \quad (\text{II-11})$$

La Figure II-3 présente les résultats de la simulation des fonctions de densité de probabilité et de répartition pour un exemple d'une teneur en eau $w = 14\%$.

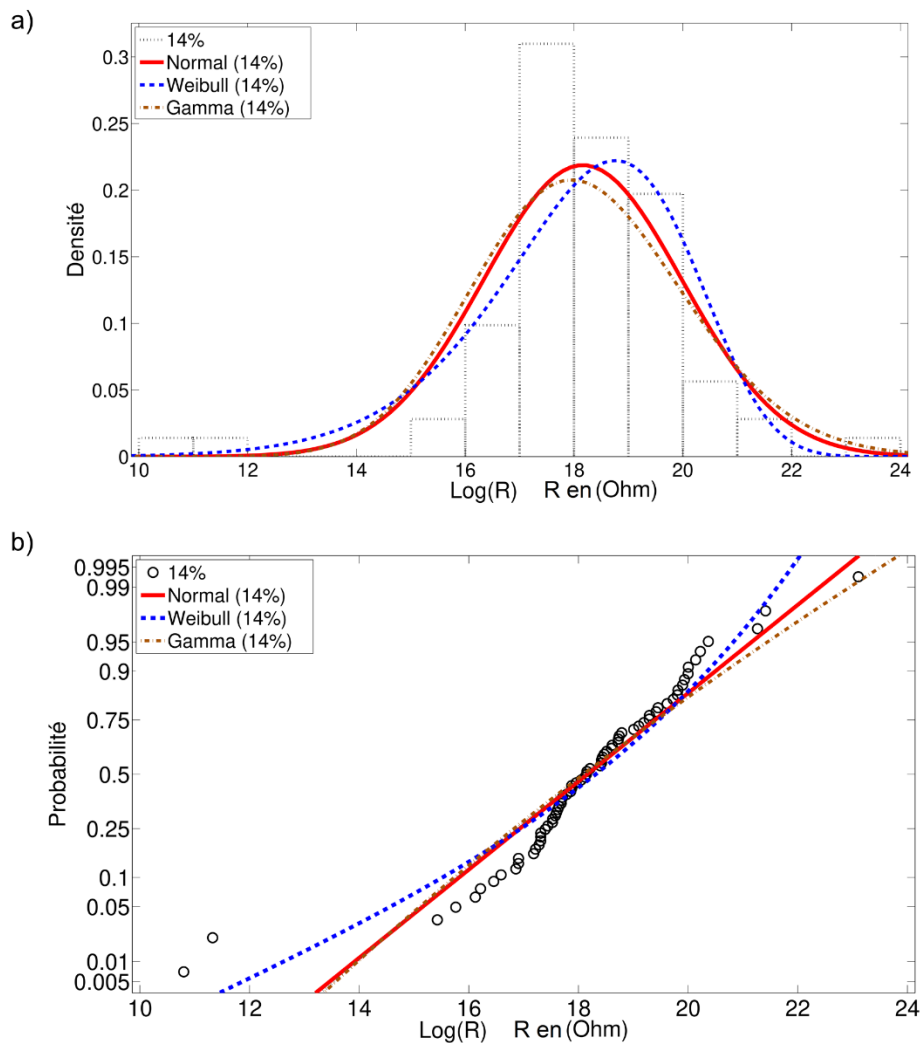


Figure II-3 : Les lois de probabilité pour les données bibliographiques de résistance à 14% de teneur en eau : a) fonction de de densité ; b) fonction de répartition

Les résultats de cette analyse présentés dans le Tableau II-1, révèlent que la vraisemblance des lois Normale et Weibull sont légèrement plus importantes que celle de la loi Gamma, ce qui se répercute par une plus faible variance, donc un faible écart type, en particulier pour la loi Normale.

Tableau II-1 : Résultats de l'analyse de vraisemblance pour les lois Normale, Weibull et Gamma (w=14%)

Loi statistique	Normale	Weibull	Gamma
Log L	-142.899	-141.137	-147.163
Espérance E	7.71E+07	7.16E+07	7.71E+07
Variance ϑ	2.78E+01	4.07E+01	4.15E+01

Un petit décalage en moyenne est remarqué entre la loi Normale et la loi de Weibull. Ainsi, notre choix porte sur la loi Normale. En effet, beaucoup d'études utilisent cette loi dans le domaine de l'analyse de données (Ahsanullah, Kibria, et Shakil 2014). Elle se caractérise par une symétrie et une nette tendance centrale. De plus, elle est adaptée pour modéliser des observations issues de plusieurs événements aléatoires indépendants. Ceci est tout à fait en cohérence avec la mesure de la résistance électrique qui se caractérise par plusieurs paramètres explicatifs expérimentaux.

Les Figure II-4 et Figure II-5 montrent les résultats pour des teneurs en eau dans le domaine hygroscopique. D'autres exemples pour des teneurs en eau plus élevées sont présentés en Annexe 1.2 et Annexe 1.3.

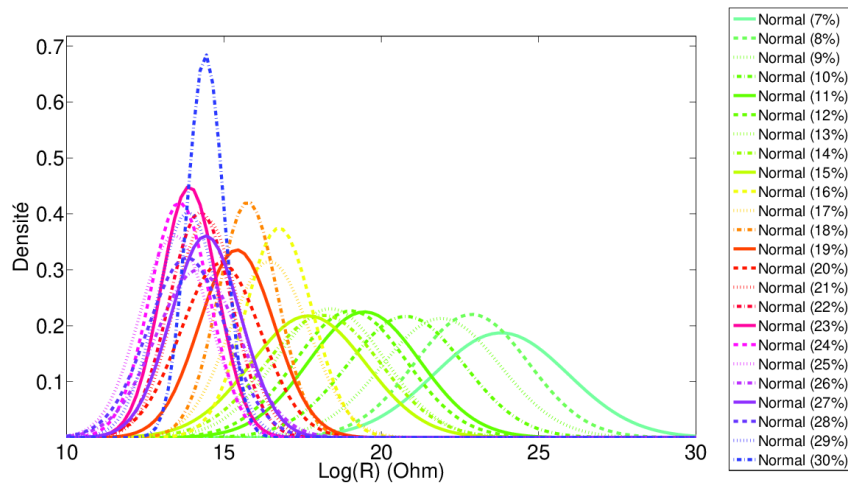


Figure II-4 : Les fonctions de densité de la résistance électrique dans le domaine hygroscopique

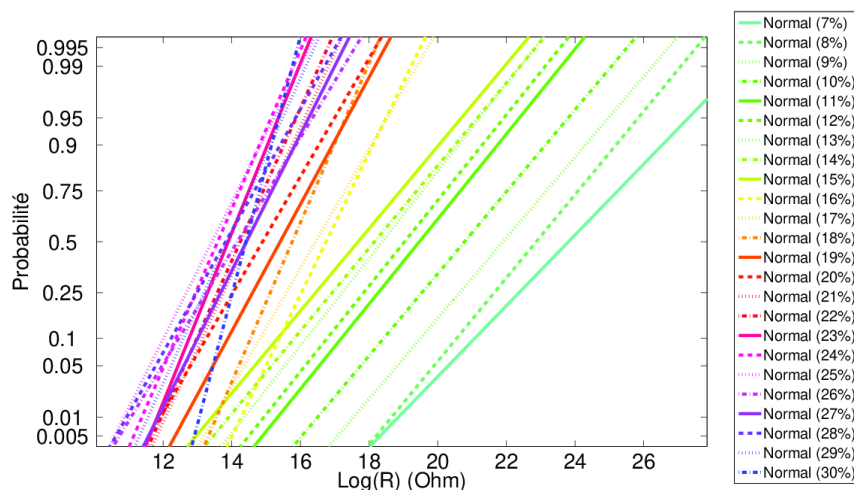


Figure II-5 : Les fonctions de répartition de la résistance électrique dans le domaine hygroscopique

Le Tableau II-2 résume les résultats de la modélisation statistique à savoir, la fonction de log-vraisemblance (Log L), de l'espérance μ et de la variance σ .

Tableau II-2 : Résultats de la modélisation statique dans le domaine hygroscopique

w (%)	7	8	9	10	11	12
Log L	-1.02E+02	-1.14E+02	-1.20E+02	-1.07E+02	-9.91E+01	-1.23E+02
μ (Ω)	2.19E+10	8.58E+09	3.26E+09	1.06E+09	2.85E+08	1.85E+08
σ (Ω)	8.41E+00	6.11E+00	6.50E+00	6.29E+00	5.90E+00	5.82E+00
w (%)	13	14	15	16	17	18
Log L	-1.25E+02	-1.43E+02	-1.49E+02	-8.25E+01	-9.37E+01	-7.18E+01
μ (Ω)	9.67E+07	7.71E+07	4.79E+07	1.88E+07	1.39E+07	7.01E+06
σ (Ω)	5.64E+00	6.19E+00	6.25E+00	2.90E+00	3.54E+00	2.58E+00
w (%)	19	20	21	22	23	24
Log L	-8.23E+01	-8.27E+01	-6.85E+01	-6.70E+01	-5.81E+01	-5.96E+01
μ (Ω)	4.93E+06	2.95E+06	1.88E+06	1.55E+06	1.09E+06	7.99E+05
σ (Ω)	3.28E+00	3.59E+00	2.77E+00	2.69E+00	2.43E+00	2.58E+00
w (%)	25	26	27	28	29	30
Log L	-6.16E+01	-3.36E+01	-3.14E+01	-4.20E+01	-1.64E+01	-4.77E+00
μ (Ω)	6.77E+05	1.42E+06	1.84E+06	1.01E+06	1.05E+06	1.82E+06
σ (Ω)	3.01E+00	3.79E+00	3.02E+00	3.45E+00	2.69E+00	1.79E+00

Les résultats montrent que la dispersion des mesures de résistance qui se traduit par le paramètre σ , diminue lorsque la teneur en eau augmente. Cela est dû aux faibles valeurs de résistances facilitant la circulation du courant électrique et améliorant la qualité de la mesure. De plus, l'influence de certains paramètres sur la mesure de la résistance est moins significative à des taux d'humidité élevés tels que la densité ou l'orthotropie du matériau (Forsen et Tarvainen 2000; Venkateswaran 1974). Ces observations seront détaillées dans le paragraphe suivant.

L'espérance de la résistance estimée pour les différentes teneurs en eau dans le domaine hygroscopique, est présenté dans la Figure II-6.

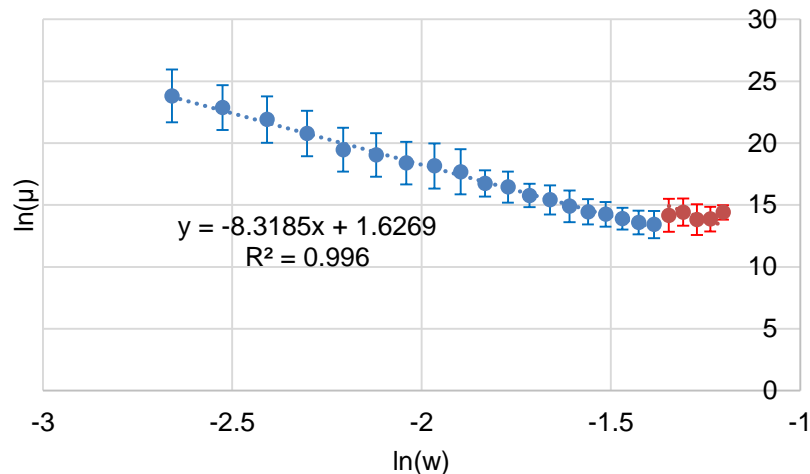


Figure II-6 : Evolution de l'espérance de la loi normale dans le domaine hygroscopique

La log-linéarité est bien vérifiée jusqu'à 25 %. Au-delà, la perte de cette linéarité peut être expliquée par le fait que certaines essences ont atteint le PSF. Sur la partie linéaire, les deux constantes de l'équation (I-3) ont été identifiées avec $C_1 = 1.63$ et $k_w = -8.32$. Selon plusieurs études, le paramètre k_w est négatif et quasi-constant quelle que soit l'essence du bois (William L. James 1963; Carll et TenWolde 1996).

Cette base de données bibliographique met aussi en évidence une dispersion importante des données qui est due à un nombre important de paramètres intervenant dans la mesure, ces aspects seront discutés dans le paragraphe suivant.

II.5. Les paramètres explicatifs

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont mis à jour des travaux pour déterminer les facteurs explicatifs qui ont un impact sur la mesure de la résistance électrique (Stamm 1927; William Lanpheer James 1963; Skaar 1988; Hartley et Marchant 1995; Norberg 1999; Forsen et Tarvainen 2000). Fort de plusieurs constats, Vermaas (1975) a répertorié ces facteurs en proposant de les classer en deux catégories comme le montre le Tableau II-3 (Vermaas 1975).

Tableau II-3 : Classification des variables affectant la résistance électrique du bois

Variables inhérentes	Variables expérimentales
Teneur en eau	Type et configuration des électrodes
Essence	Pression de contact
Température	Forme et dimensions de l'échantillon
Anisotropie	Effets électrolytiques
Constituants chimiques	Amplitude de voltage
Densité	Durée de l'application du voltage
	Température

Ces deux catégories sont :

- les variables expérimentales en relation avec les dimensions des éprouvettes, le choix du matériel (comme les dimensions des électrodes et l'espacement) et le protocole expérimental ;
- les variables inhérentes liées aux propriétés du matériau, telles que l'essence et l'anisotropie.

L'analyse de ces résultats nous conduit à constater que les configurations expérimentales et l'instrumentation influencent significativement les mesures. En outre, l'hétérogénéité du matériau rajoute d'autres variables : par exemple, l'orientation des fibres ont un impact sur les mesures de résistance et peuvent conduire à des erreurs dans l'évaluation de la teneur en eau. L'anisotropie du bois induit des contraintes géométriques supplémentaires qui provoquent la « tortuosité » des lignes de courant électrique. Dans la pratique, certains de ces facteurs sont rarement pris en considération dans des conditions environnementales non contrôlées. En effet, les corrections à mettre en œuvre dans la mesure de la résistance électrique doivent tenir compte par exemple de la température ambiante et également de l'essence du bois.

Sur la base de cette analyse, dans le cadre de ce travail de thèse, nous allons traiter les paramètres les plus présents dans le cas d'une mesure de résistance in-situ à savoir :

- type et configuration des électrodes, forme et dimensions de l'échantillon, amplitude et durée de l'application de l'injection ;
- température, teneur en eau et anisotropie.

II.5.1. Influence de la teneur en eau

Comme il a été montré dans § II.4, en dessous du PSF, l'effet de la teneur en eau (w) sur la résistance électrique (R) du bois est significatif. Torgovnikov (1993) a étudié la différence du comportement électrique/diélectrique du bois selon la nature de l'interaction du type d'eau (mono/polymoléculaire, capillaire ou libre), et explique que l'humidification du bois facilite la pénétration des molécules d'eau entre les molécules de cellulose, ce qui facilite la mobilité des dipôles. Nous pouvons distinguer 3 intervalles différents :

- (1) teneur en eau faible ($w < 5\%$) : une évolution non significative de la résistance en raison de la haute résistance et stabilité des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau (eau mono-moléculaire) et la paroi cellulaire ;
- (2) teneur en eau moyenne ($w \in [5, PSF]$) : le caractère polymoléculaire et la présence de l'eau capillaire condensée augmente la mobilité des molécules. Pour $w \in [7, 30\%]$, Skaar (1988) montre que la résistance électrique augmente d'environ 2 à 4 fois pour une diminution de 1 % de w ;
- (3) en dessus du PSF : l'effet de w sur R est faible car la conduction du courant électrique dépend principalement de la composition ionique des échantillons et de la distribution de l'eau libre.

Figure II-2 met également en exergue la présence de ces trois intervalles. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons aux intervalles (2) et (3).

II.5.2. Influence de l'anatomie du bois

Plusieurs auteurs ont étudié les relations entre la teneur en eau et la résistance de différentes essences de bois (William Lanpheer James 1963; Du, Geissen, et Noack 1991; Forsen et Tarvainen 2000; Brischke, Rapp, et Bayerbach 2008). Ces auteurs ont mis en évidence l'influence de la composition chimique du bois sur l'identification des paramètres de la relation entre w et R .

En effet, Venkateswaran (1974) a montré une relation linéaire entre la conductivité électrique et le pourcentage de lignine et d'hémicellulose dans le matériau. Pour la même essence, la différence de provenance et de densité joue aussi un rôle déterminant. Il a été montré que pour $w = 8\%$, la résistance électrique du duramen du Pin du Nord est 2 fois plus importante que celle de l'aubier, et que pour $w > 12\%$, cette différence n'était pas aussi significative. Pour des échantillons d'Epicéa, aucune différence n'a été observée.

II.5.3. Influence de la température

Une étude de l'impact de la température sur la résistivité électrique est nécessaire car ce paramètre représente probablement le facteur explicatif le plus important dans le cas d'une application in-situ (Koch, Simon, et Arndt 2016; Wael Hafsa et al. 2019).

Stamm (1927) a confirmé que R doublait lorsque la température était abaissée de 11 °C et une augmentation de la température du bois entraîne à l'inverse une diminution de la résistance électrique (Norberg 1999; Nursultanov, Altaner, et Heffernan 2017). Les premières études menées sur la variation de la résistance électrique du bois avec la température (Clark et Williams 1933; Davidson 1958) ont expliqué ce phénomène par un processus de conduction ionique plutôt qu'électronique. En effet, la résistivité du bois est affectée par le comportement des ions qui représentent les « porteurs » des charges électriques. Le comportement des ions quant à lui-même est défini par l'amplitude des charges, leur concentration et leur mobilité (Allen et Larry 2002). L'amplitude des charges ioniques et leur concentration sont relativement constantes dans un petit échantillon (échelle centimétrique), cependant, la mobilité des ions dépend fortement de la température sous une tension appliquée donnée (Kolavali 2013).

A une teneur en eau donnée dans le domaine hygroscopique, une dépendance linéaire basée sur la version logarithmique de l'équation d'Arrhenius, entre le logarithme de la résistance et la température T a été décrite par plusieurs études (Skaar 1988; Carll et TenWolde 1996) comme suit :

$$\ln(R) = k_T T + C_2 \quad (\text{II-12})$$

où k_T est une constante négative et C_2 est une constante de calibration.

Davidson (1958) a indiqué que la valeur de k_T est essentiellement indépendante des essences.

Dans le cadre d'une étude sur du bois vert, Luo et al. (2020) a proposé récemment un modèle basé sur la loi de Matthiessen, reliant la température à la résistivité électrique ρ ($\Omega.m$) des matériaux conducteurs/semi-conducteurs :

$$\rho = \rho_{ref} e^{\alpha_T(T_{ref}-T)} \quad (\text{II-13})$$

avec ρ_{ref} la résistivité de référence à une température de référence $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, et α_T ($^\circ\text{C}^{-1}$) est un paramètre de calage.

Dans les deux modèles des Eqs (II-12) et (II-13), k_T et α_T ont des valeurs négatives et symbolisent les facteurs de changement de résistivité par degré de changement de température.

II.5.4. Influence de l'orthotropie

L'anisotropie du matériau bois a un impact sur son comportement électrique, en effet, ses propriétés varient selon les 3 directions : longitudinale, radiale et tangentielle. Stamm (1927) est parmi les premiers auteurs à avoir traité la problématique de l'orientation des fibres par rapport à la résistance électrique. Il a mentionné que la résistance dans la direction tangentielle R_T est légèrement supérieure à celle dans la direction radiale R_R , mais environ 2 fois plus grande que dans la direction longitudinale R_L , et ce, indépendamment de l'essence. Dans ces conditions, le facteur d'orthotropie entre les deux directions R et T peut être négligé. Ce constat a été également confirmé par Hartley et Marchant (1995) qui montrent que cette différence de résistances provoque une à deux unités de pourcentage de teneur en eau plus élevée pour un courant circulant parallèlement à la direction des fibres que pour un courant circulant perpendiculairement à leur direction.

En revanche, selon Forsen et Tarvainen (2000) et Samuelsson (1990), aucune différence n'a été observé entre les différentes directions (Figure II-7).

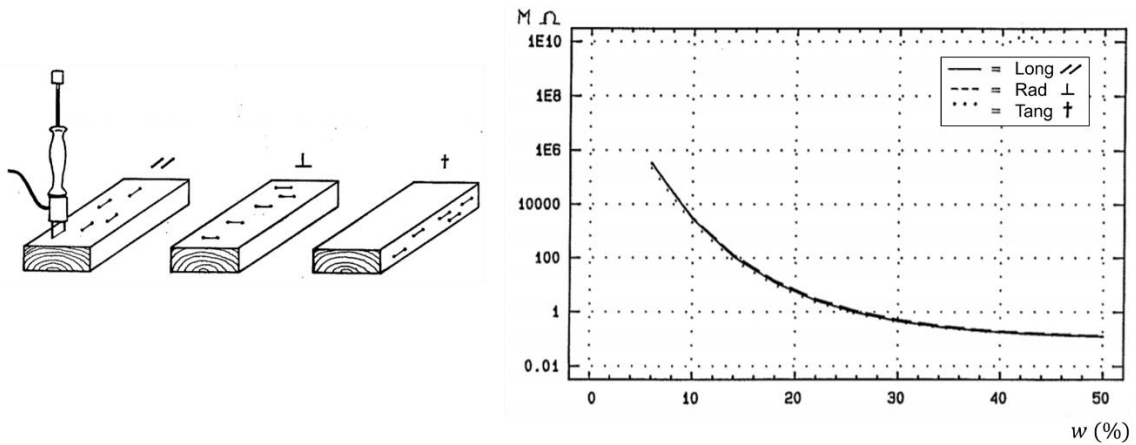


Figure II-7 : Résistance électrique du Pin en fonction des trois directions d'orthotropie (Nota : les 3 courbes se chevauchent) (Samuelsson 1990)

II.5.5. Couplage résistance, température et teneur en eau

Afin de traduire la corrélation de la teneur eau w à la résistance R et à la température T , nous présentons quelques modèles mathématiques, proposés dans la littérature. Pour du Pin Nordique, Forsen et Tarvainen (2000) ont effectué des mesures à des niveaux de T allant de -10 °C à 70 °C et ont proposé le modèle suivant :

$$\log(\log R + 2) = -0.00147 \cdot T - 0.0262 \cdot w - 0.000158 \cdot T \cdot w + 1.075 \quad (\text{II-14})$$

Ce modèle est basé sur les mesures expérimentales illustrées dans la Figure II-8.

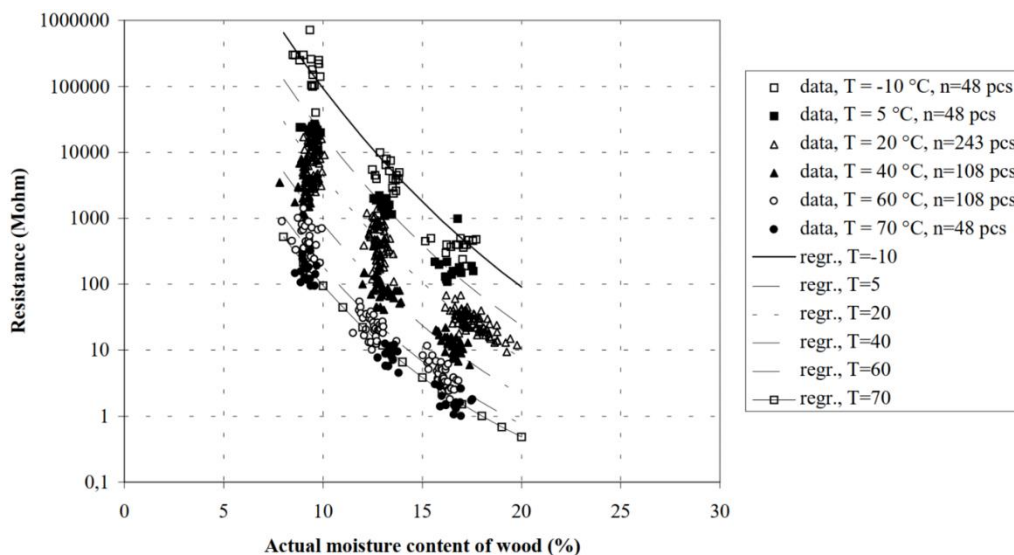


Figure II-8 : Mesures de résistance électrique à différents températures et teneurs en eau pour du Pin du Nord (Forsen et Tarvainen 2000)

Ces résultats mettent en évidence la dépendance linéaire entre résistance-teneur en eau et résistance-température. Ces relations définissent le principe d'équivalence des effets de la teneur en eau et de la température.

Otten, Brischke, et Meyer (2017) ont eu recours au modèle développé par Brischke et Lampen (2014) pour les matériaux à base du bois et ont proposé un modèle simplifié basé sur une fonction exponentielle :

$$w(R; T) = (a.T + b)e^{(-c.x+d)} + e \quad (\text{II-15})$$

avec R exprimée en $10 \log \Omega$; a, b, c, d et e sont des constantes matériaux.

Carll et TenWolde (1996) et Norberg (1999) proposent également l'expression suivante :

$$\ln(w) = \frac{1}{k_w} \ln(R) - \frac{k_T}{k_w} T - \frac{C_3}{k_w} \quad (\text{II-16})$$

k_w et k_T sont déterminées selon les équations (II-3 et (II-12) et C_3 est un paramètre de calage. Cette relation sera utilisée par la suite afin d'évaluer le taux d'humidité dans le cas de nos expérimentations.

Dans cette sous-section, nous avons présenté les paramètres qui affectent la mesure de la résistance électrique. Le principe de toutes ces études repose sur la mesure de résistance en utilisant deux électrodes (une mesure à 2 points). Ce type de mesure, souvent limité à la surface, ne permet pas d'évaluer facilement le gradient hydrique. Pour répondre à ce besoin, nous allons présenter dans la suite de ce chapitre, une approche électrique habituellement utilisée dans le domaine de la géophysique et qui suggère l'emploi de quatre électrodes (une mesure à 4 points) pour mesurer la résistance à courant continu dans un milieu conducteur.

II.6. Imagerie électrique (IE) : de la géophysique au bois

L'imagerie électrique (IE) appelée aussi tomographie de résistivité électrique (TRE), a été développée par C. Schlumberger en (1912) et F. Wenner (1915) pour l'étude des sols. L'objectif de cette technique est de réaliser un relevé tridimensionnel des propriétés électriques intrinsèques (la résistivité ou la chargeabilité due à la polarisation du milieu) dans les milieux hydrogéologiques. Le principe de l'IE est basé sur la mesure du potentiel électrique généré par l'injection d'un courant continu dans le sol.

II.6.1. IE en milieu semi infini

L'imagerie électrique appliquée à l'étude des sols se base sur l'hypothèse d'un milieu semi-infini étant donné l'étendue du domaine investigué par rapport à la taille et l'écartement des électrodes. Dans le cas du bois cette méthode sera adaptée à des mesures en milieu fini.

II.6.1.1. Résistivité apparente : équations fondamentales

Notons que la loi d'Ohm décrite dans l'équation (II-1) est une forme simplifiée de la forme généralisée (loi de Coulomb) qui exprime la densité de courant \vec{j} en fonction du champ électrique \vec{E} et de la conductivité électrique σ (l'inverse de la résistivité ρ), qui s'écrit :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (\text{II-17})$$

où le champ électrique \vec{E} dérive d'un champ de potentiel scalaire V et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (\text{II-18})$$

Dans le cas d'une source ponctuelle dans un milieu homogène et isotrope (Figure II-9-a), le courant suit un chemin radial provenant de l'électrode et les équipotentielles sont sphériques. S'il s'agit du cas du milieu semi-infini (Figure II-9-b), le courant traversant la surface d'une demi-sphère de rayon r est égale à :

$$I = 2\pi r^2 \vec{j} \quad (\text{II-19})$$

En considérant le potentiel V nul si r tend vers l'infini, l'intégration de (II-18) donne :

$$V = \frac{I \rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (\text{II-20})$$

La Figure II-9 schématise les lignes de courant et équipotentielles dans le cas de deux électrodes d'injection A et B positionnées au-dessus d'un sol homogène.

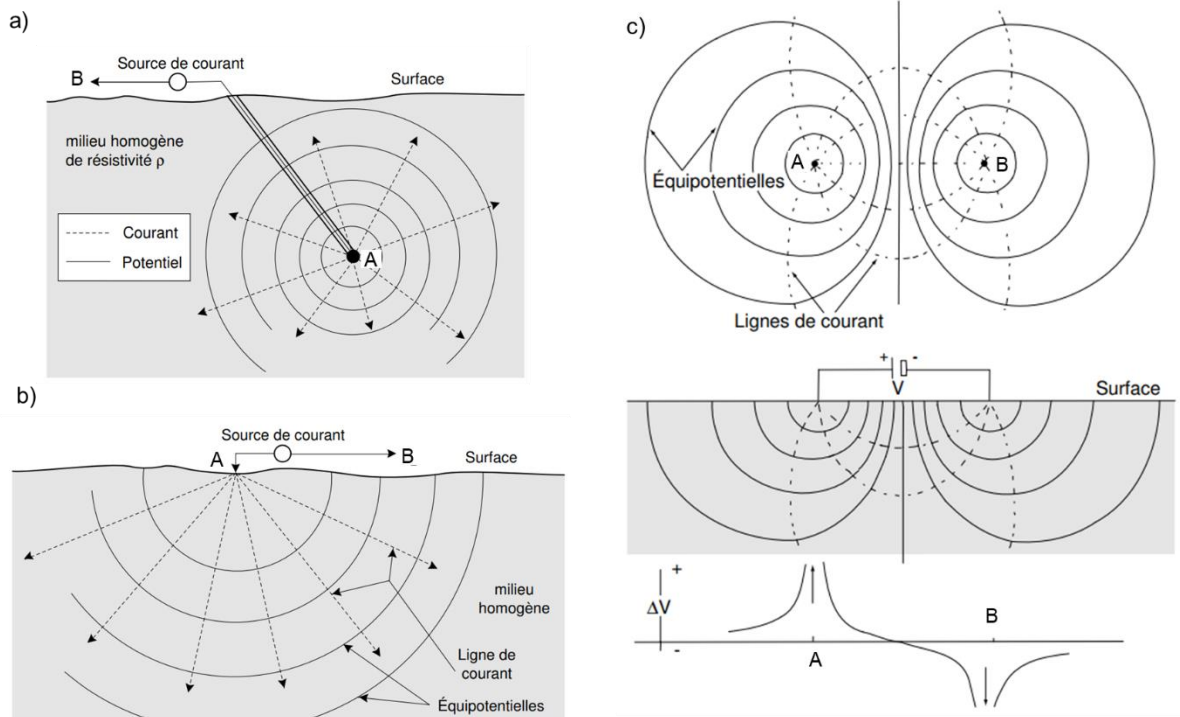


Figure II-9 : Injection de courant dans : a) un milieu infini, homogène et isotrope ; b) un milieu semi-infini homogène et isotrope ; c) un sol homogène en utilisant pour 2 électrodes d'injection A et B en surface (vue en plan, vue en coupe et voltage le long de l'axe recoupant A et B) (Chouteau et Giroux 2006)

Le principe de l'imagerie électrique en utilisant 4 électrodes (quadripôle) repose sur l'injection de courant par des électrodes A et B connectées à la surface du milieu investigué et l'étude de la répartition du potentiel des électrodes M et N (Figure II-10).

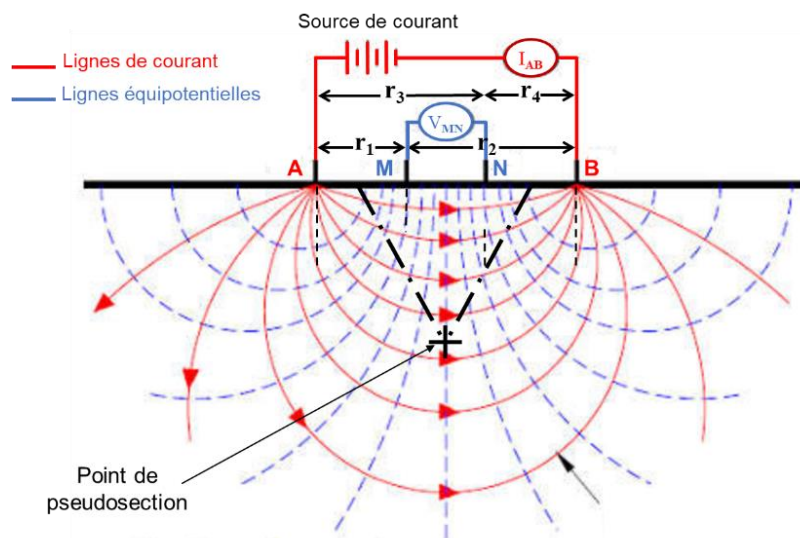


Figure II-10 : Dispositif à 4 électrodes positionnées en surface

En connaissant la distance entre les électrodes et en utilisant (II-20), les potentiels aux niveaux de l'électrode M dû à l'injection des électrodes A et B s'écrivent comme suit :

$$V_M^A = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} \right) \quad \text{et} \quad V_M^B = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{II-21})$$

Par conséquent, vu que le courant I_A de l'électrode A est égal à l'opposé du courant I_B de l'électrode B, le voltage total au point M est donc :

$$\Delta V_M = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{II-22})$$

De la même façon, la différence de potentiel (d.d.p.) au niveau de l'électrode N due à l'injection des électrodes A et B :

$$\Delta V_N = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (\text{II-23})$$

Ainsi, la d.d.p. ΔV_{MN} entre les deux électrodes M et N est :

$$\Delta V_{MN} = \Delta V_M - \Delta V_N = \frac{I \rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (\text{II-24})$$

Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope, la résistivité correspond à la résistivité vraie du milieu, ce qui n'est pas valable pour les milieux hétérogènes ou anisotropes. Dans les milieux hétérogènes, la résistivité mesurée est définie comme la résistivité apparente ρ_{app} (en $\Omega.m$) et est donnée par (Loke 2004) :

$$\rho_{app} = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)} \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} \quad (\text{II-25})$$

$$\rho_{app} = k R_{app} \quad (\text{II-26})$$

avec k (en mètres) et R_{app} (en Ω) qui désignent le facteur géométrique et la résistance apparente et qui représentent respectivement la dimension de la configuration des électrodes utilisée et la nature du milieu.

II.6.1.2. Polarisation provoquée (PP)

Le processus de la polarisation se crée au niveau des interfaces entre des milieux de propriétés physiques différentes (Blondel 2014). Dans la géophysique, on distingue 3 mécanismes qui induisent la polarisation :

- la polarisation d'électrode due à deux modes de conduction différents entre un métal et une solution ionique ;
- la polarisation de membrane appelée aussi polarisation électrolytique présente généralement dans les argiles ou dans les électrolytes à très faible salinité ;
- la polarisation électrochimique qui découle de la nature chimique des surfaces et des propriétés texturales des minéraux.

Pour compléter les mesures résistives, la méthode de la Polarisation Provoquée (PP) peut être définie comme une extension de la méthode électrique à courant continu. La mesure de la PP nécessite l'utilisation d'un quadripôle d'électrodes composé d'un dipôle d'injection et d'un dipôle de mesure de d.d.p. Il s'agit de mesurer un paramètre appelé la chargeabilité apparente en utilisant un courant électrique sous forme de créneaux bipolaires séparés par des interruptions d'injection de courant (Figure II-11-a). Suite à la coupure du courant injecté par deux électrodes (A et B), un phénomène de relaxation apparaît grâce à un faible potentiel résiduel qui se manifeste sous la forme d'une d.d.p. décroissante entre les deux autres électrodes (M et N) (Figure II-11-b).

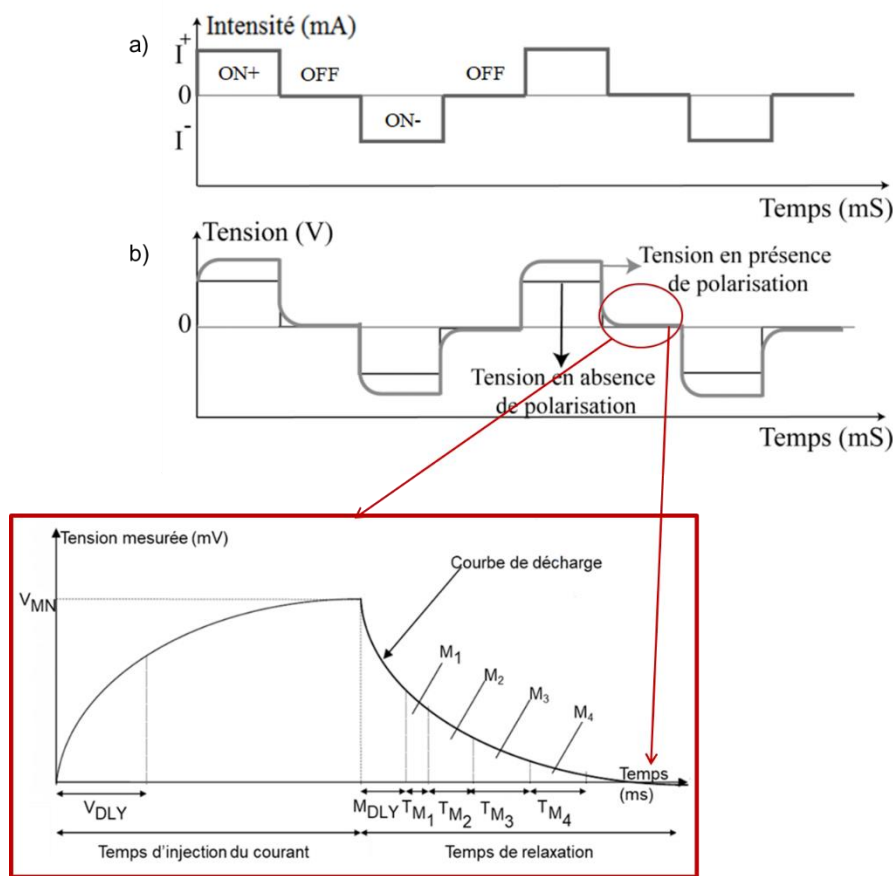


Figure II-11 : a) Forme de courant et b) principe de mesure de la polarisation provoquée (Florsch et al. 2017)

La plupart des mesures en PP sont effectuées dans le domaine temporel. Lors de l'application d'un courant en créneaux d'intensité I (Figure II-11-a), le milieu se charge jusqu'à une différence de potentiel V_{MN} (mV). Comme le montre la Figure II-11-b, la chargeabilité peut être déterminée en calculant :

- des chargeabilités partielles grâce à des fenêtres choisies (M_1, M_2, M_3, \dots) ;
- la chargeabilité apparente totale M (en mV/V ou en %) exprimée comme suit :

$$M = \frac{1}{V_{MN}} \int_a^b V_t(t) dt \quad (II-27)$$

où V_t dépend de l'instant $t \in [a, b]$ (en ms) choisi sur la courbe de décroissance du potentiel (autrement dit aussi le nombre de fenêtres). La mesure correspond ainsi à l'intégrale de l'aire sous la courbe de décroissance (la durée TM_i multiplié par le potentiel V_t) pondérée par V_{MN} . Les paramètres V_{DLY} et M_{DLY} représentent le temps après le début et la coupure du courant, respectivement, à partir duquel les échantillons de tension seront pris en compte. Ces paramètres dépendent de la durée d'injection fixée par l'expérimentateur.

II.6.1.3. Configurations des électrodes

Il existe dans la littérature plusieurs configurations appelées aussi dispositifs (Loke 2004; Mahammed 2012). Ces configurations se différencient par :

- l'écartement entre électrodes (a) ;
- la position respective des électrodes d'injection et de mesure de potentiel.

Les expressions du coefficient géométrique (k) pour un milieu semi-infini (équations (II-25) et (II-26)) sont indiquées sur la Figure II-12.

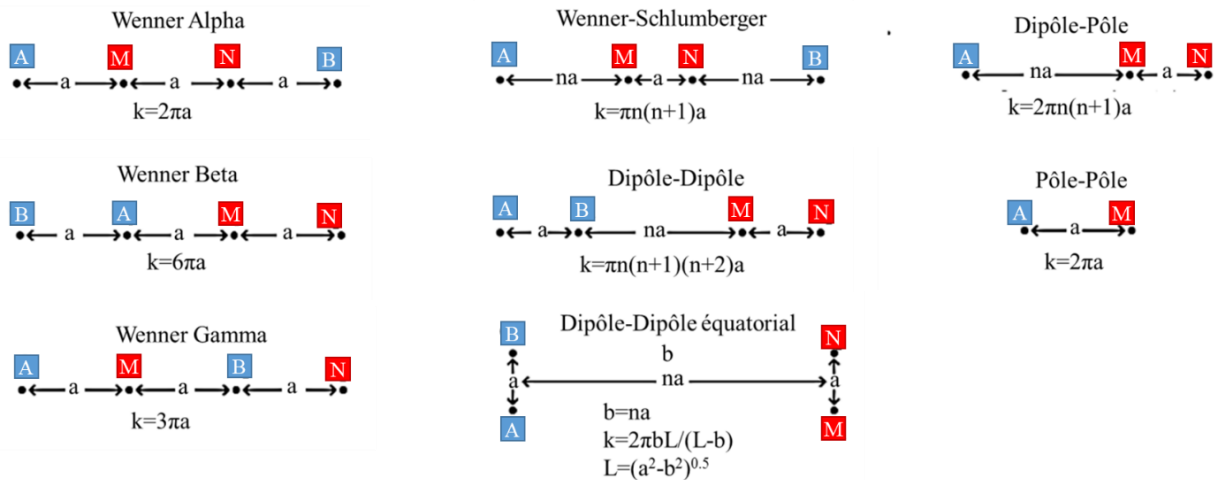


Figure II-12 : Position des électrodes pour les différentes configurations

Chaque configuration présente une sensibilité de mesure différente au bruit et une qualité de résolutions (horizontale et verticale) différente et dépend de la profondeur d'investigation. Le Tableau II-4 résume ces aspects en fonction de quelques exemples de dispositifs d'électrodes.

Tableau II-4 : Caractéristiques des différents dispositifs : Wenner, Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle (Hebbache 2017)

Critères \ Dispositifs	Wenner	W-Schlumberger	Dipôle-Dipôle
Résolution verticale	+++	++	+
Profondeur d'investigation	+	++	+++
Convenable au sondage électrique vertical (SEV)	++	+++	+
Convenable au Trainé (cartographie)	+++	-	+++
Sensible à l'orientation	Oui	Oui	modéré
Sensible aux inhomogénéités latérales	Fort	Modéré	modéré

+ : faible, ++ : modéré, +++ : bonne, - : non convenable

Dans le cas du dispositif dipôle-dipôle par exemple, la séparation entre les circuits de courant et de potentiel par une distance (na) permet d'obtenir un très faible couplage électromagnétique. Ce dispositif se caractérise notamment par une sensibilité aux variations horizontales de la résistivité plus élevée que celle du dispositif Wenner.

La Figure II-13 présente les cartographies la sensibilité pour les différentes configurations α , β et γ liées au dispositif Wenner et définies précédemment dans la Figure II-12.

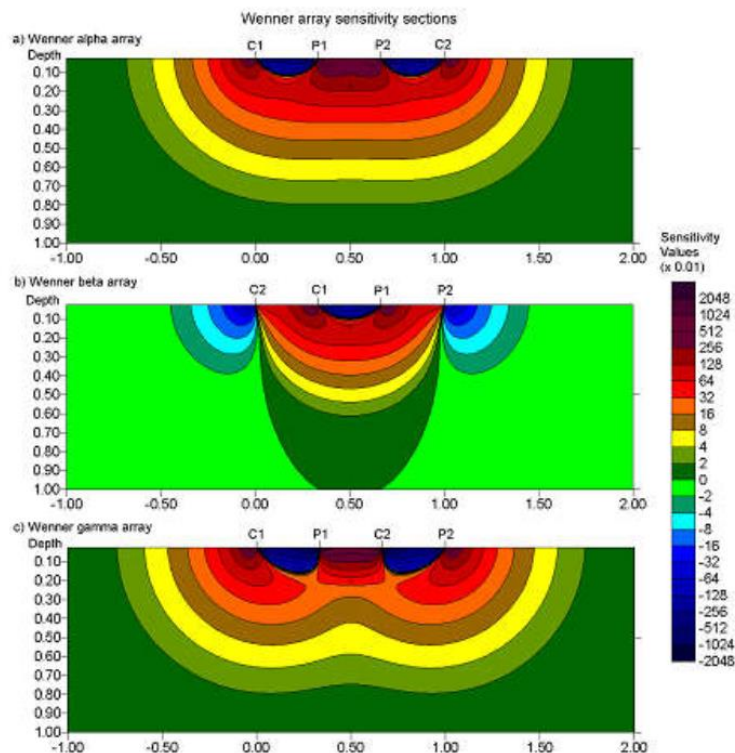


Figure II-13 : Les différentes sensibilité de mesures en géophysique pour les configurations a) Wenner-Alpha, b) Wenner-Bêta et c) Wenner-Gamma

Le dispositif Wenner se caractérisant par un espacement inter-électrodes constant, se distingue par une force de signal élevée et une bonne résolution verticale. La notion de profondeur d'investigation a été étudiée par Edwards (1977) qui a défini le rapport entre cette profondeur (z_e) et la distance entre les électrodes extrêmes (L) pour les configurations Wenner (α) et Wenner beta (β), avec $\left(\frac{z_e}{L}\right)_\alpha = 0.173$ et $\left(\frac{z_e}{L}\right)_\beta = 0.139$.

Dans ce travail de thèse, nous nous focalisons sur 5 dispositifs, à savoir, Wenner alpha (α), Wenner beta (β) et Wenner gamma (γ), Dipôle-Dipôle (DD) et Dipôle-Dipôle Equatorial (DDE). Le choix des configurations a été effectué en fonction de l'échelle des échantillons en bois étudiés et la disponibilité des électrodes. Les configurations α , β et γ seront utilisées pour mener une étude paramétrique à l'échelle laboratoire sur des échantillons de dimensions $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ (Partie III). Le dispositif DD sera utilisé pour une étude de diffusion hydrique sur un échantillon de dimensions $320 \times 95 \times 95 \text{ mm}^3$ (Partie V). Finalement, le dispositif DDE sera adapté à des éléments d'assemblage métalliques d'une structure en bois. Pour cette application ces éléments joueront le rôle d'électrodes (Partie V).

II.6.1.4. Multiplexage

Afin de construire une cartographie de résistivités (Figure II-14), un balayage vertical et horizontal peut être effectué en modifiant la distance entre les électrodes. La profondeur d'investigation augmente avec l'écartement entre les électrodes. Dans ces conditions, la cartographie bidimensionnelle est une représentation géophysique simplifiée qui définit les points de mesures de résistivités apparentes d'une pseudo-section illustrée précédemment dans la Figure II-10. La position de ces points de mesure indique le quadripôle utilisé le long du profil. Généralement, les mesures sont adaptées à des séquences de multiplexage entièrement automatisées permettant des acquisitions rapides.

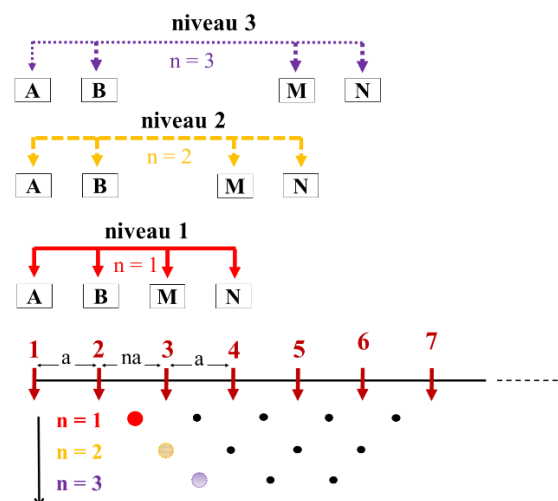


Figure II-14 : Exemple de multiplexage d'électrodes pour le dispositif « dipôle-dipôle »

II.6.1.5. Modèle direct et inversion

Le traitement de données dans l'imagerie électrique se fait sur deux étapes indispensables, la modélisation directe et l'inversion. Comme expliqué dans le §II.6.1.1, dans le cas d'un milieu homogène, la résistivité apparente peut être interprétée directement comme une résistivité vraie du milieu. Lorsque le milieu est hétérogène, les mesures sont reproduites en résolvant la loi d'Ohm (II-17) et l'équation de Laplace exprimant la diffusion dans le cas tridimensionnel, et ce, à travers un processus de modélisation directe. La simulation du modèle direct est généralement effectuée en utilisant la modélisation par éléments finis ou par différences finies. Les données mesurées expérimentalement sont modélisées d'abord en fixant arbitrairement l'ensemble de paramètres représentant les propriétés physiques du milieu étudié. Nous rappelons que le problème électrique sous forme différentielle peut être écrit ainsi (Marescot 2004) :

$$\nabla(\sigma \nabla V) = -q \quad (\text{II-28})$$

avec V est le champ de potentiel, σ est la conductivité électrique et q étant une fonction de la forme $\sum I_s = \delta(r - r_s)$, où I_s est l'intensité d'une source de courant, $r_s(x_s, y_s, z_s)$ est la position de la source, $r(x, y, z)$ est la position d'un point quelconque de l'espace et δ est la fonction de Dirac.

En considérant un volume élémentaire V_0 , la relation entre la densité de courant et le courant peut donc s'énoncer :

$$\nabla J = \frac{I_s}{V_0} \delta(x - x_s)(y - y_s)(z - z_s) \quad (\text{II-29})$$

Par la suite, une procédure d'inversion, itérative et automatique, est effectuée afin de remonter à des mesures quantitatives de la résistivité vraie. L'inversion se base sur des méthodes d'optimisation qui permettent de minimiser les écarts entre les résistivités apparentes mesurées et celles calculées par le modèle direct. Parmi ces méthodes, nous retrouvons la méthode d'optimisation par moindres-carrés de Gauss-Newton ou de Levenberg-Marquardt (Loke et Barker 1996; Loke et Dahlin 2002). Le résultat d'une inversion n'est pas unique, il peut être influencé par le choix du modèle, de l'adéquation des paramètres d'inversion et du niveau du bruit dans le signal mesuré. La réalisation de l'inversion nécessite aussi le recours à des logiciels d'analyse de données tel que Res2Dinv (Geotomosoft 2010) qui représente aujourd'hui l'outil le plus utilisé sur le marché. La Figure II-15 représente les modalités du processus de modélisation et d'inversion en utilisant le logiciel Res2Dinv.

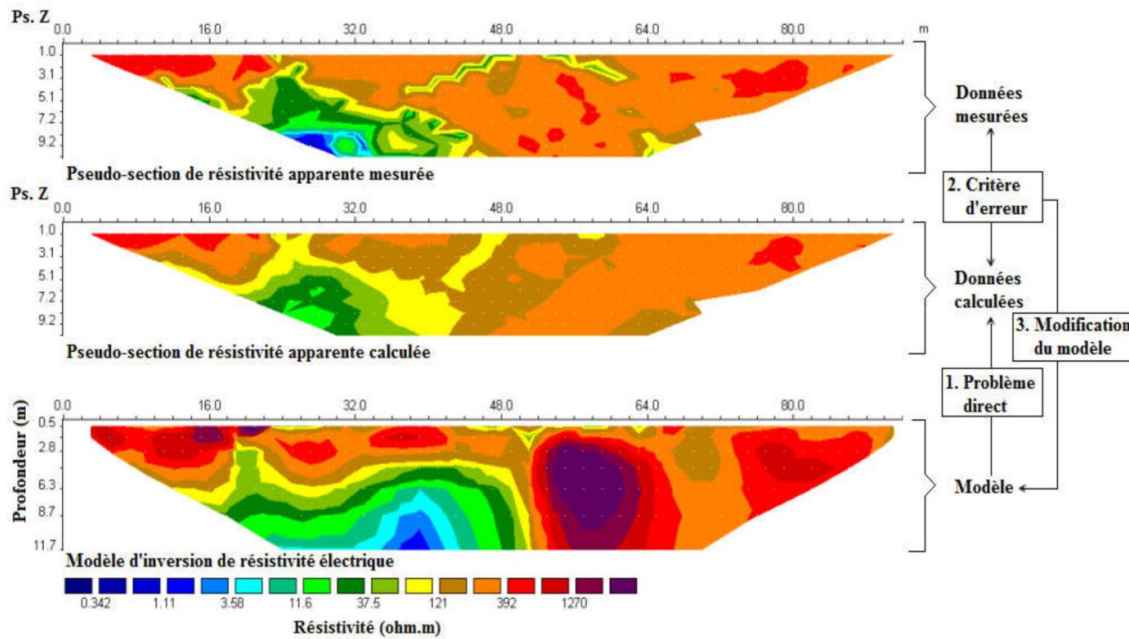


Figure II-15 : Modèle direct et inversion via Res2Dinv (Hebbache 2017)

II.6.2. Adaptation de l'imagerie électrique au milieu fini

Ces dernières années, la technique l'imagerie électrique est devenue un outil important de prospection géophysique. Les récentes études montrent le potentiel de cette technique pour des applications diverses telles que :

- l'étude des couches géologiques profondes (Mahammed 2012) ;
- des études environnementales concernant la pollution des aquifères et la caractérisation des sites et sols pollués aux hydrocarbures (Blondel et al. 2014) ;
- la protection des ressources hydrogéologiques via l'estimation du degré de saturation des sols (Baltassat, Maurice, et Reninger 2017) ;
- la conservation du patrimoine historique (Xu et al. 2015) ou la volcanologie (Girard et al. 2008).

Ce domaine a été notamment développé pour des applications en génie civil pour la réalisation des études géotechniques (Longo et al. 2012) et pour le suivi des structures en béton (barrages, ponts), la détection des fissures et l'identification de la présence des objets enterrées (Samouëlian et al. 2004).

Cette technique a été récemment adaptée pour des applications sur des milieux finis, à savoir des échantillons en béton instrumentés par des électrodes en surface (Karhunen et al. 2010; du Plooy et al. 2013). Pour ces applications, l'hypothèse d'une injection ponctuelle dans un milieu semi-infini et le facteur géométrique présenté dans l'équation (II-25) ne peuvent plus s'appliquer. Afin de corriger les facteurs géométriques et obtenir les vraies valeurs de résistivités, du Plooy et al. (2013) ont utilisé à la modélisation numérique. Les résultats ont montré que dans des conditions expérimentales contrôlées, la technique d'IE a permis de caractériser un gradient dû à la diffusion de chlorure dans le béton, et ce en investiguant 4 niveaux de profondeur (Figure II-16).

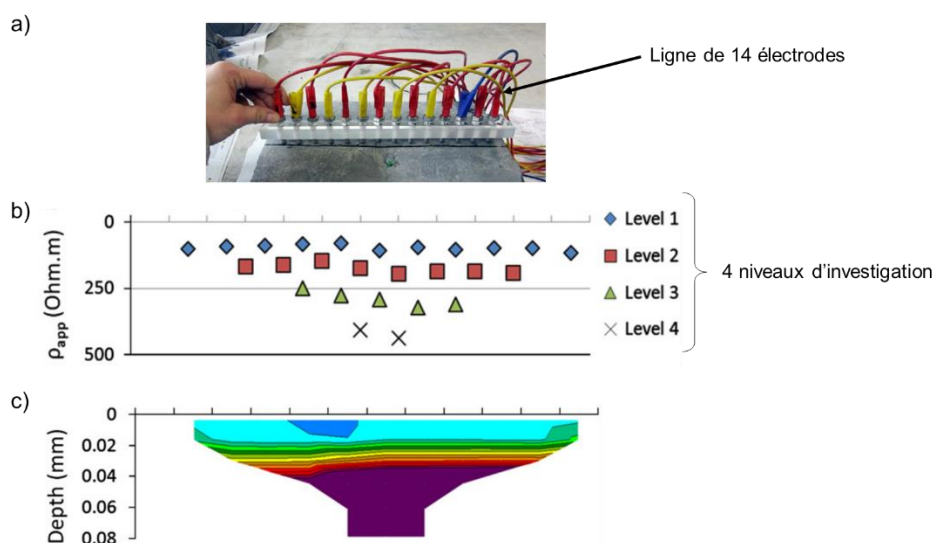


Figure II-16 : a) Installation des électrodes sur la surface d'un échantillon en béton ; b) Les 26 points de mesures de résistivités apparentes ; c) Les résultats d'inversion (du Plooy et al. 2013)

Karhunen et al. (2010) ont recours à la même technique pour prendre en compte la géométrie réelle des volumes étudiés. Cette étude a permis de localiser et de caractériser les fissures dans le béton (Figure II-17). Pour cette expérience, les échantillons ont été humidifiés en exposant une surface à l'eau pendant deux jours, et ce pour éviter les problèmes de faibles valeurs de conductivités.

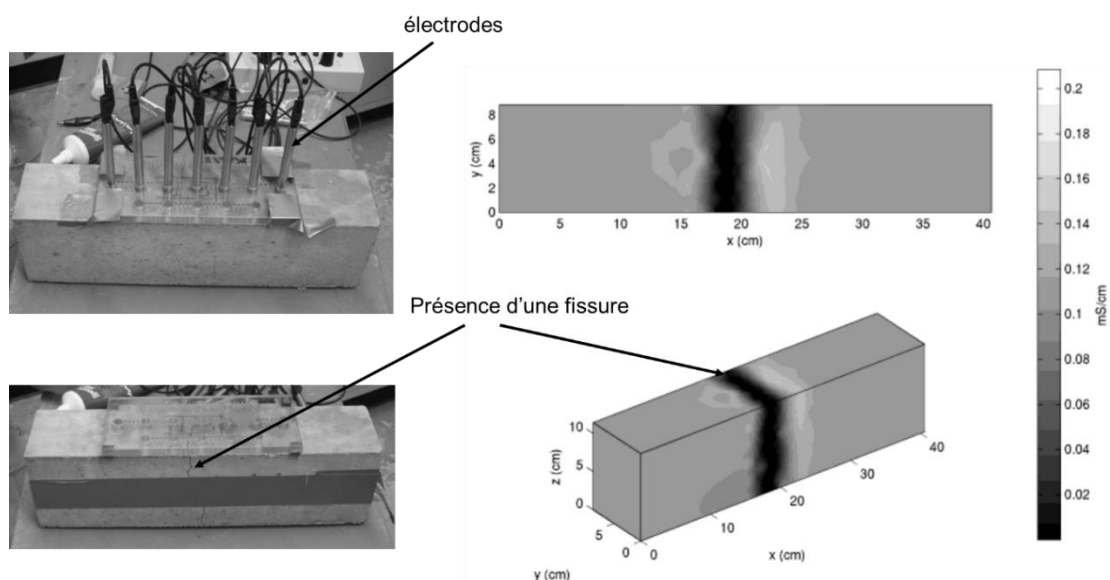


Figure II-17 : Localisation et caractérisation des fissures dans le béton (Karhunen et al. 2010)

A l'échelle in-situ, Priou et al. (2019) ont utilisé un capteur multi-électrodes noyé dans le béton lors de la construction de l'ouvrage pour détecter le front des chlorures avant qu'il n'atteigne les armatures.

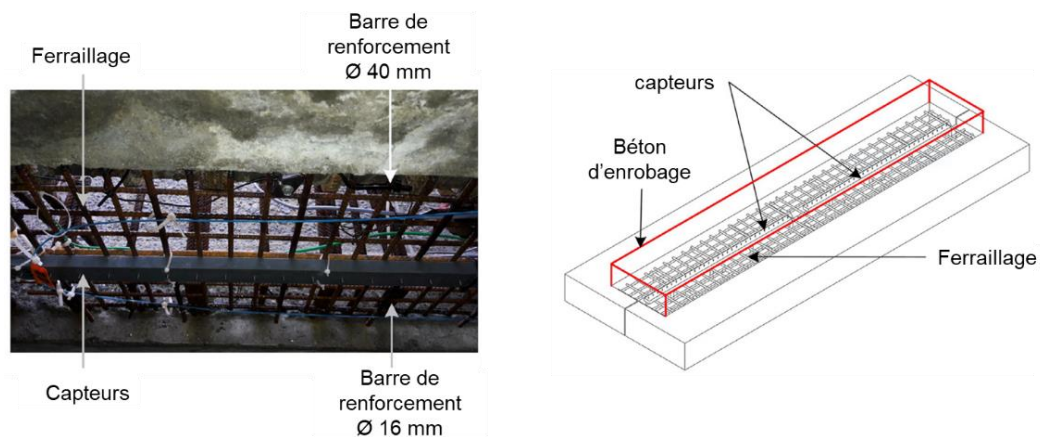


Figure II-18 : Capteur installé sur site avant coulage du béton et modèle numérique de l'ensemble ferrailage, capteur, béton d'enrobage (Priou et al. 2019)

II.6.3. IE appliquée au bois

Le matériau bois a été intégré dans le champ d'applications de l'imagerie électrique ces dernières années. La plupart des travaux se concentrent sur du bois vivant ou du bois avec des taux d'humidité $w > PSF$, un choix qui pourra s'expliquer par la facilité du passage du courant grâce à des faibles résistivités électriques.

Cependant, comme il a été discuté dans le §II.3, l'hétérogénéité et l'anisotropie du matériau bois a limité les études permettant de réaliser de mesures de la résistivité électrique du bois. La Figure II-19 présente les résultats de quelques études traitant de cette approche (Stamm 1929; 1964; Sandoz 1993; Aoki, Tanaka, et Yamamoto 1998; Bieker et al. 2010; Hiroyuki Yamamoto et al. 2013; Nursultanov, Altaner, et Heffernan 2017).

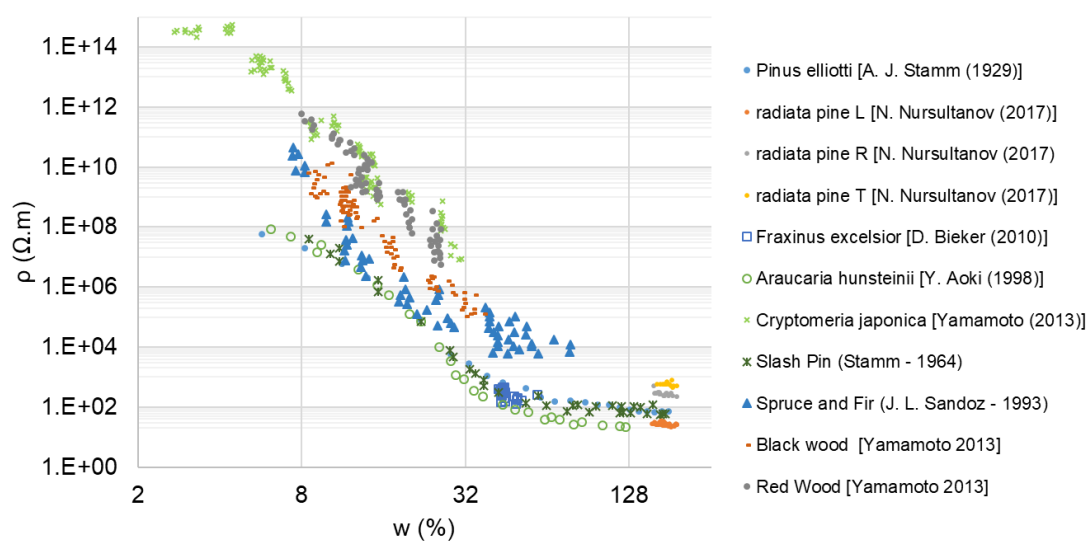


Figure II-19 : Etude bibliographique des mesures de résistivité électrique du bois

Ces résultats illustrés sur la figure montrent que la résistivité du bois est d'environ $10^{14} \Omega\text{m}$ à l'état anhydre et de 10^3 à $10^4 \Omega\text{m}$ pour un bois proche du PSF.

II.6.3.1. Domaine capillaire

L'imagerie électrique a montré un potentiel important pour déterminer l'état hydrique des arbres sur pied en plaçant des électrodes autour du tronc (Lin et al. 2012; Ganthaler et al. 2019; Luo et al. 2020). Cela semble être très intéressant pour les scientifiques et les gestionnaires forestiers qui sont à la recherche de données complémentaires aux mesures de résistivité appliquées sur le sol et sur le réseau racinaire des arbres afin d'évaluer l'état de santé des arbres. En effet, des facteurs de stress tels que les valeurs extrêmes de teneur en eau, la salinité et l'infection peuvent entraîner la pourriture du bois et la modification de sa densité et de sa teneur en eau, en ions, en cellulose et en lignine (Attia al Hagrey 2007). Le suivi du fonctionnement physiologique de l'arbre en utilisant l'imagerie électrique permet donc une détection pré-symptomatique de certaines maladies et d'éviter l'apparition des endommagements (Bieker et al. 2010).

Par exemple, les travaux de Ganthaler et al. (2019) ont porté sur l'étude des tomographies de résistivité électrique des troncs de quelques essences de bois après des périodes de sécheresse. La Figure II-20 présente un exemple pour l'Epicéa et démontre des changements considérables asymétriques dans les valeurs de résistivité électrique en raison d'une déshydratation non homogène.

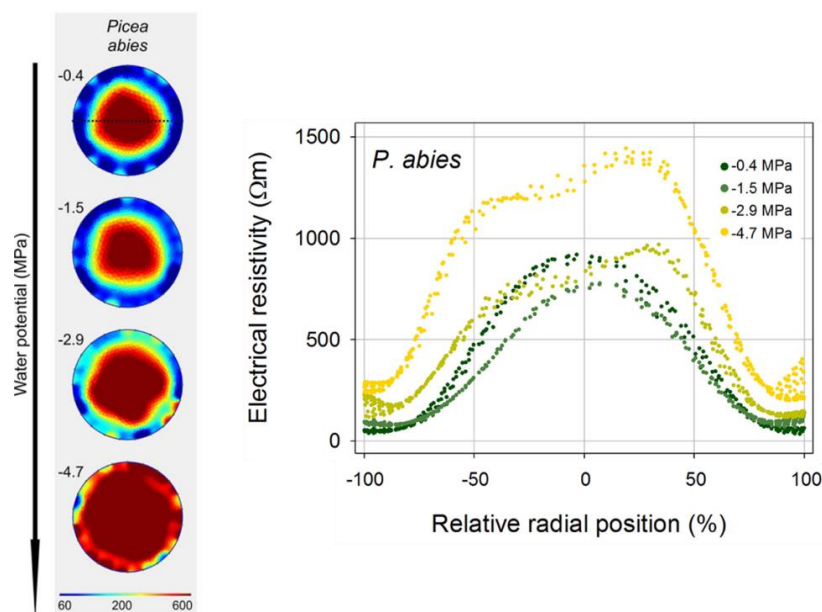


Figure II-20 : Les résultats de l'application de l'IE sur un tronc d'Epicéa après une période de sécheresse (Ganthaler et al. 2019)

II.6.3.2. Domaine hygroscopique

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une application sur du bois avec des teneurs en eau qui appartiennent au domaine hygroscopique. Ce travail fait la suite d'une première

application réalisée par Nguyen (2014) qui a porté sur la caractérisation de la diffusion hydrique dans le matériau bois en utilisant les méthodes résistives. Deux stratégies ont été développées (Figure II-21) : une stratégie 1D appropriée au suivi d'un profil hydrique pour caractériser les propriétés de la diffusion unidirectionnelle en utilisant un peigne d'électrodes, et une stratégie 2D pour déterminer les champs hydriques dans une section transversale en utilisant un ceinturage d'électrodes.

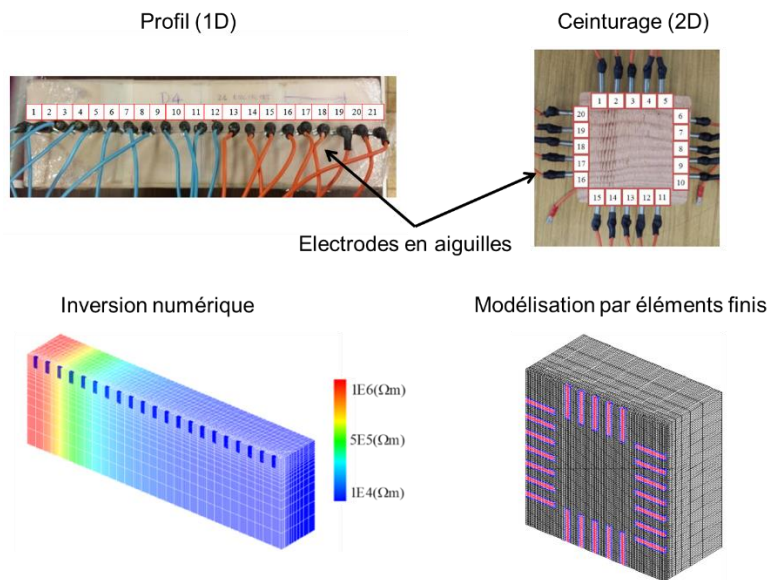


Figure II-21 : Stratégies expérimentale et numériques de caractérisation des champs hydriques

Dans le cadre de cette étude, le matériel de mesure a été adapté au matériau bois qui présente des gammes de résistivité différentes (par rapport aux sols), et ce, en fabriquant des électrodes et des câbles spécifiques et en modifiant les gammes d'injection et de résolution. La construction du champ de résistivité a été effectuée par le développement d'un modèle numérique éléments finis en premier temps, et le recours à une inversion numérique visant à minimiser l'écart entre les mesures expérimentales et la simulation du modèle en deuxième temps.

Ces essais en laboratoire ont montré des difficultés en ce qui concerne la gestion des plages de résistivité élevées (grandes lignes de courant) et des problèmes de contact électrode/bois. Dans le cadre de notre travail, nous visons à développer la stratégie expérimentale et optimiser les mesures de résistivité afin d'établir les limites opérationnelles liées à la fois aux propriétés des matériaux et aux performances des outils de mesure. Notre étude illustrera donc des protocoles expérimentaux adaptés à ces besoins y compris les difficultés liées aux électrodes (emplacement des électrodes, problème de contact) et aux conditions climatiques à savoir la variation de la température et les faibles teneurs en eau (<14%).

II.7. Conclusion

Ce deuxième chapitre présente une étude bibliographique sur les méthodes résistives destinées à l'évaluation de l'état hydrique dans le bois. En premier lieu, cela nous a permis de

présenter quelques généralités sur les principes fondamentaux de mesure. Sur la base d'une analyse statistique probabiliste, une étude paramétrique a permis également d'identifier les paramètres intervenant dans la mesure de la résistance électrique tels que la teneur en eau, la température et l'orthotropie.

Ce chapitre rappelle également la technique de l'imagerie électrique ou la tomographie traitant la mesure de la résistivité électrique en géophysique. Dans la présentation de cette technique nous avons abordé ses principes de bases et la description des configurations et des dispositifs de mesure (les configurations) utilisés, ainsi que leur sensibilité de mesure. Nous avons également mis en exergue les champs d'application de l'imagerie électrique et la possibilité de transposer les principes de cette méthode pour des milieux finis notamment au bois.

Nous présenterons donc dans le chapitre suivant, l'approche expérimentale et numérique utilisée dans ce travail thèse pour évaluer la teneur en eau dans le bois.

Partie III. Approche mixte expérimentale-numérique basée sur la résistivité électrique

III.1. Introduction

Dans le cadre de cette partie de l'étude, nous nous intéressons au développement de l'approche mixte expérimentale/numérique, destinée à la mesure de l'humidité interne dans le bois en utilisant l'imagerie électrique. Comme il est illustré dans la Figure III-1, la démarche s'appuie sur un couplage entre des mesures expérimentales et des modélisations par la méthode des éléments finis.

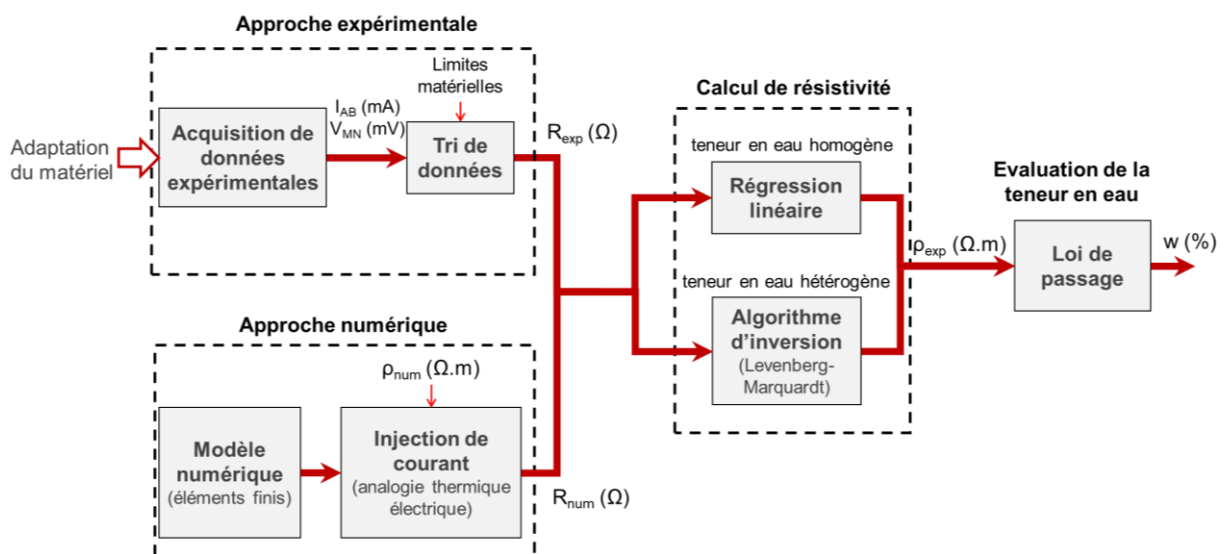


Figure III-1 : Présentation générale de l'approche mixte (expérimentale-numérique)

A partir de ce couplage, nous allons pouvoir :

- Déterminer la résistance électrique apparente R_{exp} via la technique de l'imagerie électrique adaptée au matériau bois, à partir des mesures de tension V_{MN} et de courant I_{AB} issues du système de mesure ;
- Déterminer la résistivité numérique ρ_{num} via une modélisation par éléments finis, en créant un modèle conforme à la réalité expérimentale en termes de géométrie de l'élément étudié et de la configuration des électrodes. Le processus de la conduction électrique dans le matériau implanté dans le modèle, est défini par analogie avec le processus de transfert de chaleur.

Dans ces conditions la résistivité électrique est estimée en minimisant l'écart entre les mesures de résistances expérimentales et la simulation numérique. Dans le cas d'un milieu homogène cette résolution est basée sur une régression linéaire, alors que pour un milieu hétérogène, nous utilisons une inversion basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Finalement, l'estimation de la résistivité électrique doit nous permettre de déduire une relation avec la teneur en eau.

Il faut également rappeler que dans le cadre de l'approche expérimentale, le processus de mesure par imagerie électrique peut être séquencé en 3 étapes principales. La Figure III-2 illustre ces étapes pour des mesures en géophysique :

- 1- Création et transfert d'une séquence de mesure : une séquence de mesure permettant de sélectionner les électrodes dédiées à l'injection et à la mesure de d.d.p. est programmée sur les logiciels Electre II ou Electre Pro, et transférée par la suite via une liaison série RS 232/USB ;
- 2- Mesure : les mesures sont réalisées en utilisant deux résistivimètres (Syscal Junior ou Pro) connectés à plusieurs électrodes ;
- 3- Transfert et traitement : les données stockées dans une mémoire interne sont transférées via la liaison série vers une station d'acquisition. La lecture des mesures mémorisées est réalisée en utilisant le logiciel Prosys. En géophysique, ces données sont interprétées en employant le logiciel d'inversion Res2DInv.

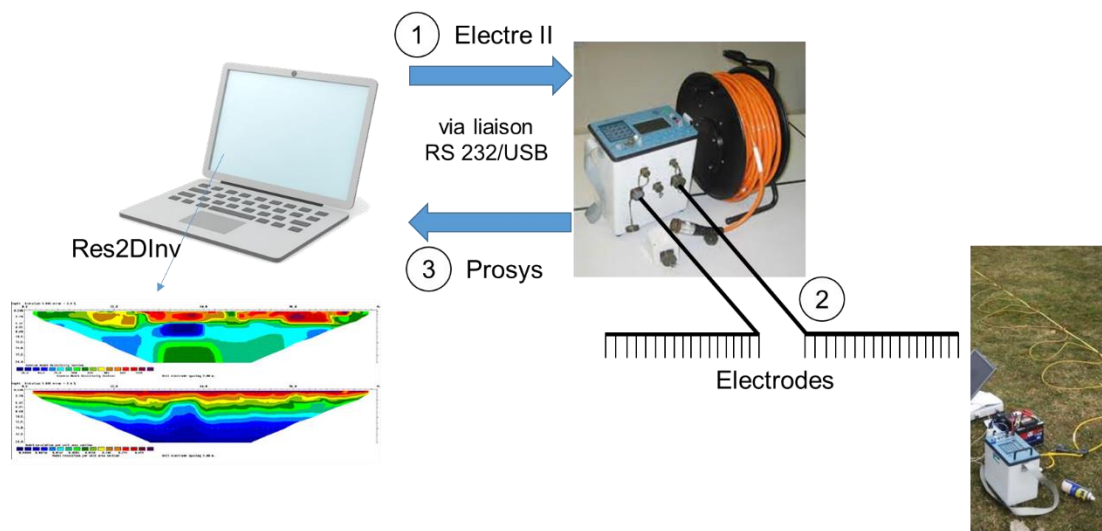


Figure III-2 : Processus de mesure et logiciels utilisés

III.2. Approche expérimentale

III.2.1. Présentation des résistivimètres

Les mesures expérimentales rapportées dans ce travail de thèse ont été réalisées en utilisant deux systèmes multi-électrodes fabriqués par Iris Instruments et dédiés à l'imagerie de résistivité et de chargeabilité (Polarisation Provoquée) : le Syscal Junior Switch 48 et le Syscal Pro Switch 48. Les deux versions sont polyvalentes et permettent de mesurer, traiter et interpréter les données de terrain. Ils sont conçus pour différentes applications géophysiques telles que les études géotechniques, l'exploration minière et la recherche d'eau. Les dispositifs sont composés d'un système « émetteur » permettant de transmettre le courant et d'un système « récepteur » pour la mesure de la différence de potentiel. Le

Tableau III-1 présente les principales caractéristiques des deux appareils.

Tableau III-1 : Caractéristiques des résistivimètres utilisés dans cette étude

	Caractéristiques	Syscal Junior Switch 48	Syscal Pro Switch 48
Émetteur	Puissance (Watts)	100	250
	Tension (V)	+/- 400	+/- 800
	Durée d'impulsion (s)	0.25, 0.5, 1 ou 2	0.25, 0.5, 1, 2, 4 ou 8
	Courant injecté (A)	1.25	2.5
	Nombre d'électrodes	48	
Récepteur	Impédance d'entrée (MΩ)	20 MΩ	100 MΩ
	Résolution tension (μV)	10	1
	Résolution courant (μA)	10	10
	Voies de réception	1	10
	Mémoire (points de mesure)	2700	20000

Pour ces appareils, l'injection du courant peut être assurée suivant deux modes :

- le mode Rho qui est un mode résistif permettant de mesurer la résistivité (ρ en $\Omega.m$) ;
- le mode Rho/IP, un mode résistif capacitif permettant de mesurer en plus de ρ , la chargeabilité (M en %) (voir Figure II-11 dans le §II.6.1.2).

Ces appareils permettent aussi de déterminer un facteur qualité Q (en %) appelé facteur de déviation standard du rapport V/I . Ce dernier évalue la qualité des mesures de résistances expérimentales R_i et leur dispersion autour de la valeur moyenne \bar{R} pendant la réalisation de S mesures. Une valeur minimale de Q peut être fixée (par exemple à 5%) et le nombre des mesures S dépend de la mise à jour de la valeur de Q comme suit :

$$Q [\%] = 100 \times \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{i=0}^S (R_i - \bar{R})^2} \quad (\text{III-1})$$

$$\text{avec } \bar{R} = \frac{1}{S} \sum_{i=0}^S R_i \quad \text{et} \quad S = \begin{cases} 3 & \text{si } Q \leq 5\% \\ 6 & \text{si } Q > 5\% \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

Pour le Syscal Junior, la valeur du courant injecté est régie par le choix de la valeur de la tension V_{MN} recherchée par l'utilisateur. La tension appliquée est donc automatiquement ajustée en fonction de ce paramètre. Dans cette étude, nous avons choisi de configurer la valeur de la tension V_{MN} à sa valeur maximale en raison de la résistance électrique importante

dans le bois comparée à la résistance d'un sol. Dans le cas du Syscal Pro, la tension d'entrée peut être sélectionnée, cependant nous avons opté pour le même mode d'injection que celui du Syscal Junior afin de pouvoir comparer leurs résultats.

III.2.2. Adaptation du matériel

Compte tenu de la spécificité du matériau qui sera investigué, le bois, la gamme de mesure de résistivité a été augmentée, des câbles et des électrodes spécifiques ont été mis au point, afin de s'assurer l'injection de courant électrique.

III.2.2.1. Gammes d'injection et de résolution

Pour augmenter la gamme de résistivités mesurées, un « diviseur de courant » a été intégré via une résistance de précision calibrée qui permet ainsi de mesurer des courants plus faibles (Figure III-3). Ce module modifie les gammes d'injections qui passent à 50 et 25 mA pour les résistivimètres Syscal Junior et Pro, respectivement. Par conséquent, les gammes de résolution de courant (notée δ_I) passent à 0.4 μA et 0.2 μA , respectivement.

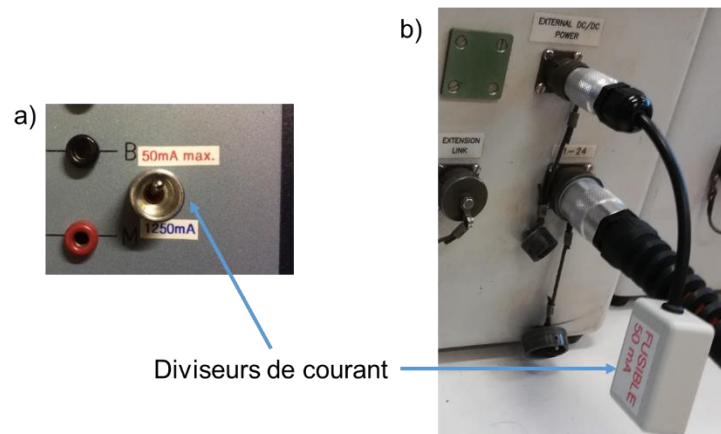


Figure III-3 : Installation de diviseurs de courant : a) Syscal Junior ; b) Syscal Pro

III.2.2.2. Electrodes

Il est important de noter que dans le cas du monitoring in-situ, les électrodes maintiennent difficilement le contact mécanique et électrique en raison du phénomène de retrait-gonflement. En effet, dans le cas du monitoring in-situ à long terme, deux problématiques sont à résoudre à savoir :

- (i) L'entrée de l'eau dans les interstices capillaires tout au long de l'électrode ;
- (ii) La diminution de la pression de contact entre le bois et l'électrode entraînant le desserrage de cette dernière.

Afin de remédier au problème de contact, des électrodes à base de vis ont été développées dans le cadre de ce travail. La conception des électrodes, que nous proposons combine des solutions éprouvées par Koch, Simon, et Arndt (2016) et Brischke, Rapp, et Bayerbach (2008).

Dans ces conditions, des vis en acier inoxydable ont été choisies du fait de leur simple manipulation et leur disponibilité à différents diamètres et longueurs, ce qui pourrait fournir des informations supplémentaires, notamment dans la zone passive intérieure caractérisée par une faible variation d'humidité. Les vis utilisées dans notre étude font 15 mm de longueur et 3 mm de diamètre. Pour assurer une certaine profondeur d'investigation, le corps de l'électrode est isolé par l'ajout d'une gaine thermo-rétractable sur une longueur de 10 mm, ce qui permet de mesurer la teneur en eau en bout de pointes (Figure III-4). L'absorption d'eau capillaire est évitée à l'aide d'un joint d'étanchéité placé sur la partie supérieure de l'électrode.

De plus, une connexion durable et conductrice entre la tête de mesure et le matériau est assurée grâce à une graisse conductrice (ref : Chemtronics CW7100) caractérisée par une résistivité inférieure à $0.01 \Omega.m$. Afin d'installer ces électrodes, des trous pré-perçés dans le bois (4 mm de diamètre et 10 mm de profondeur) ont été réalisés.

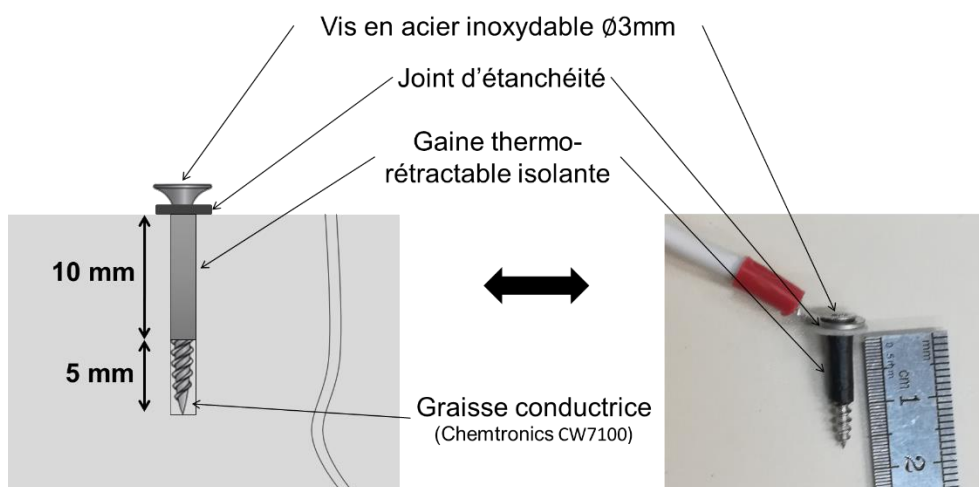


Figure III-4 : Electrodes isolées à base de vis

Il est à noter que ces électrodes peuvent être reliées à l'appareil de mesure en utilisant un ensemble de deux faisceaux permettant de connecter 48 électrodes en total.

III.2.3. Tri de données : limites du matériel

Afin de mieux comprendre les limites du matériel pouvant provoquer des valeurs aberrantes du facteur de déviation standard Q , un premier test a été effectué sur un échantillon en Douglas-fir de dimensions $250 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ usiné selon les directions LxRxT. L'objectif est de déterminer la valeur du courant électrique à partir de laquelle nous obtenons des mesures de résistances présentant des facteurs de déviation admissibles. Afin d'observer la diffusion tangentielle, l'échantillon instrumenté avec 11 électrodes espacées de 20 mm, a été placé dans un bac d'eau pour un essai d'imbibition (Figure III-5).

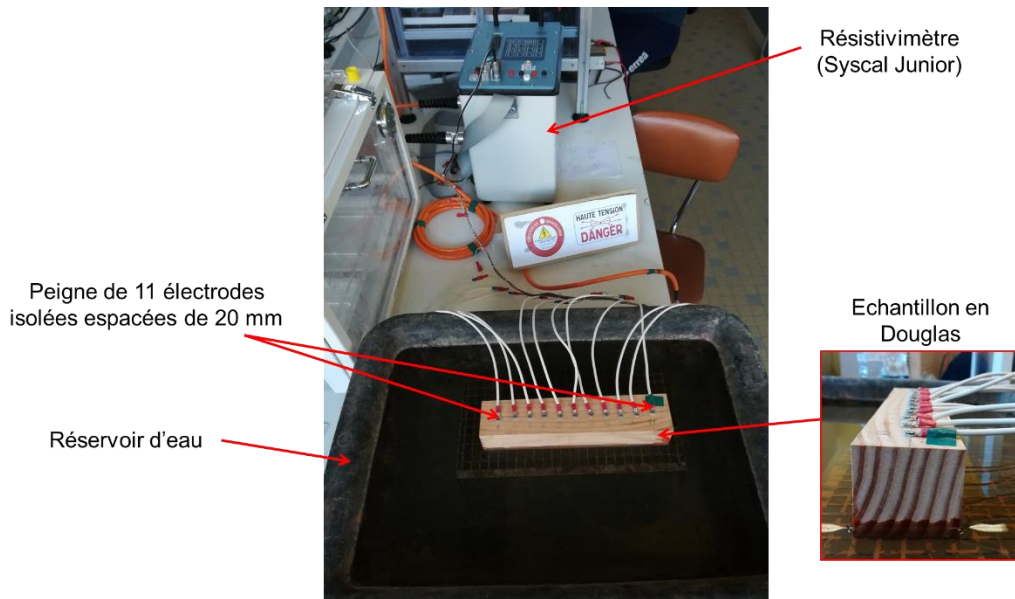


Figure III-5 : Essai d'imbibition sur un échantillon en Douglas-fir

Les mesures de résistances ont été effectuées quotidiennement en utilisant le résistivimètre Syscal Junior qui présente des gammes de résolution de courant moins importantes que le Syscal Pro. Le dispositif Dipôle-Dipôle permettant d'avoir un faible couplage électromagnétique, a été utilisé. Les résultats des premières injections (Figure III-6) montrent que les mesures présentent des facteurs de déviations très élevés.

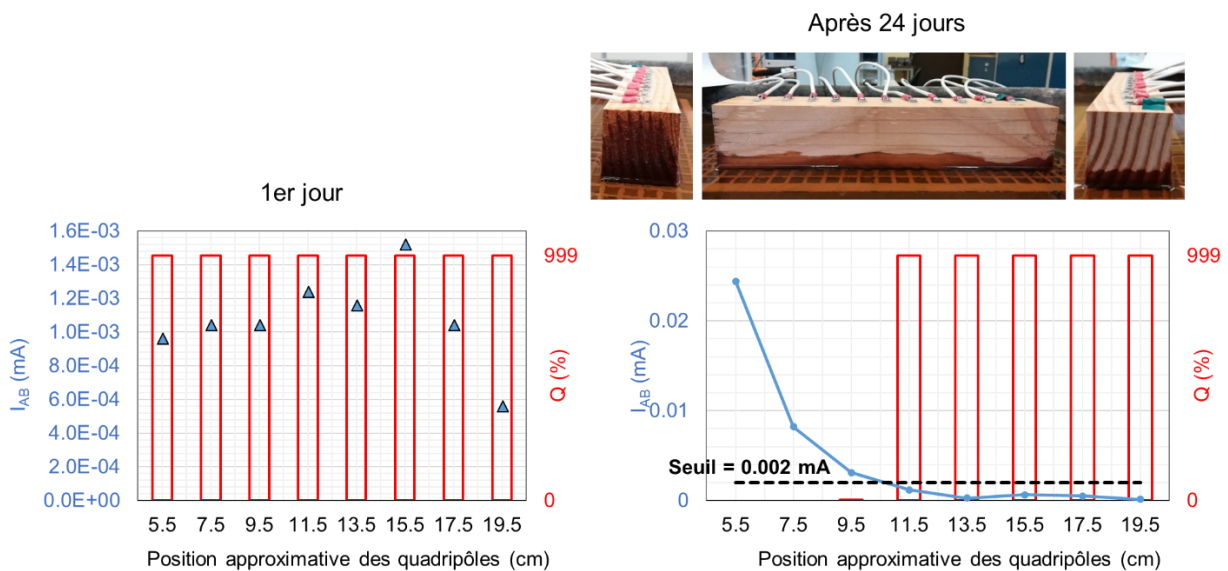


Figure III-6 : Mesures de Q et I_{AB} pour un essai d'imbibition (1^{er} jour et après 24 jours)

En analysant les résultats, nous constatons que seulement après 24 jours, les mesures ont commencé à présenter des Q plus faibles ($< 5\%$). Ces mesures correspondent au dépassement d'un seuil de $I_s = 2\ \mu\text{A}$ de courant injecté, ce qui présente 5 fois la résolution du résistivimètre ($\delta_I = 0.4\ \mu\text{A}$).

Les travaux de Nguyen (2014) employant le résistivimètre Syscal Junior, avaient montré qu'en dessous de 14 % de teneur en eau, des difficultés d'injection ont été observées. Un résistivimètre avec une résolution d'injection de courant plus faible (Syscal Pro) devrait donc nous permettre de viser des teneurs en eau plus faibles.

Pour le Syscal Junior, les mesures doivent être triées pour qu'elles soient exploitables. Pour ce faire, prendre en compte la résolution du système d'injection représente un moyen pour filtrer les données. Cette stratégie a été appliquée dans la suite de ce travail.

III.3. Protocole expérimental

L'approche mixte que nous proposons dans la suite de ce travail sera appliquée à 3 échelles dimensionnelles différentes : laboratoire ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$), laboratoire intermédiaire ($320 \times 95 \times 95 \text{ mm}^3$) et in-situ ($230 \times 310 \text{ mm}^2$ de section).

Dans le cadre de cette partie du travail, nous nous intéressons dans un premier temps à l'échelle laboratoire où nous avons utilisé des échantillons homogènes en teneur en eau afin de réaliser des études paramétriques permettant d'identifier l'effet de certains paramètres explicatifs sur la mesure résistive. Les deux autres échelles (laboratoire intermédiaire et in-situ) seront présentées et traitées par la suite dans la Partie V.

III.3.1. Préparation et conditionnement des éléments d'études

Des échantillons cubiques de dimensions $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ont été usinés selon les directions d'orthotropie (Figure III-7).

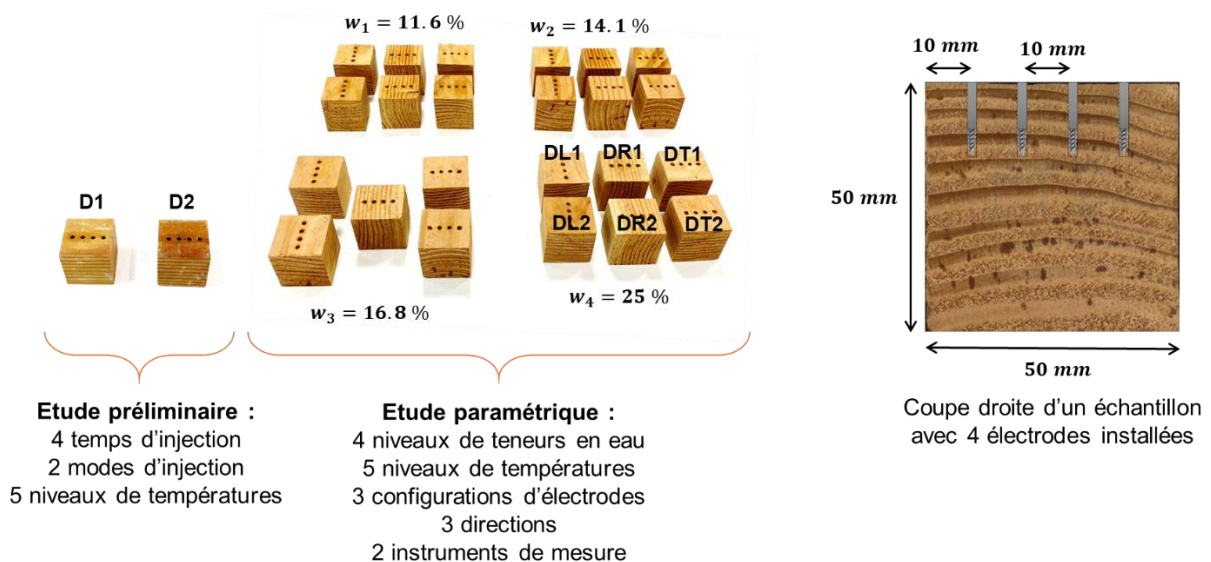


Figure III-7 : L'ensemble d'éléments en bois testés dans le travail de thèse

Ces dimensions spécifiques sont un compromis permettant d'installer 4 électrodes espacées de 10 mm. Le choix de la géométrie ne remettra pas en cause l'application de la méthode

proposée à un élément de structure. De plus, afin de minimiser la variabilité entre les échantillons dans cette étude en laboratoire, ils ont été extraits de la même planche.

Les échantillons D1 et D2 instrumentés par 4 électrodes à vis dans la direction longitudinale, ont été utilisés pour réaliser une étude préliminaire. Pour cela, ils ont été conditionnés dans un dessiccateur ventilé et régulé à une humidité relative $HR = 72 \pm 2\%$ en utilisant une solution saline saturée de chlorure de sodium (NaCl). L'évolution de la teneur en eau de D1 et D2 en fonction de la période de conditionnement est illustrée dans la Figure III-8. Les échantillons ont été stockés pendant une période prolongée (plus de 250 jours) jusqu'à ce que l'équilibre hygroscopique soit atteint selon ISO 12571 (2013).

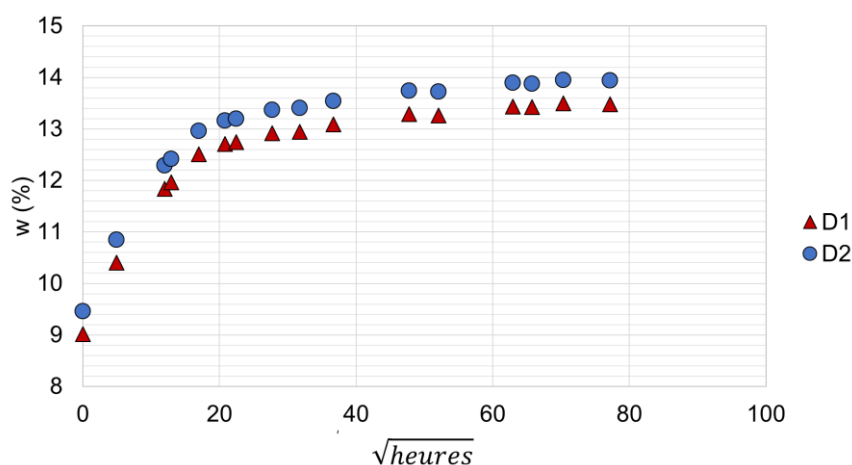


Figure III-8 : Conditionnement des échantillons D1 et D2

Après séchage à l'étuve, les échantillons ont été pesés pour déterminer leur teneur en eau selon l'Eq. (I-1), avec $w_{D1} = 13.48\%$ et $w_{D2} = 13.94\%$.

Pour déterminer une relation entre la teneur en eau et la résistivité, une étude paramétrique a été effectuée pour 4 taux d'humidité. Pour cela, 23 échantillons ont été extraits de la même planche de bois et ont été instrumentés par 4 électrodes à vis chacun et ce, dans les 3 directions d'orthotropie (Figure III-7). Deux échantillons ont été pris par direction et par taux d'humidité (Tableau III-2). Ils ont été conditionnés jusqu'à l'équilibre dans des dessiccateurs placés dans une chambre climatique conditionnée à une température de 20°C . A la fin des essais, les échantillons ont été séchés dans une étuve à une température de 103°C , et la teneur en eau moyenne (w_i) a été mesurée par pesée. Ces teneurs en eau moyennes seront notées w_i avec $i \in [1, \dots, 4]$.

Tableau III-2 : Conditionnement des échantillons pour une étude paramétrique

Conditionnement		Direction – N° d'échantillon						Teneur en eau	
		L		T		R		w_i	écart type
Solution	HR (%)	1	2	1	2	1	2		
NaBr	62	11.50	11.49	11.64	11.60	11.71	11.66	11.60	0.09
NaCl	72	14.00	14.18	13.88	14.27	13.94	14.37	14.10	0.20
KCl	86	16.87	16.95	16.89	16.74	16.74	(*)	16.84	0.10
H2O	94	25.18	25.11	24.66	24.95	25.00	25.00	24.98	0.18

(*) un seul échantillon a été considéré pour w_3 dans la direction R

III.3.2. Etude préliminaire

Le protocole expérimental utilisé dans cette étude est illustré dans la Figure III-9. Cette étude a été effectuée en utilisant le résistivimètre Syscal Junior.

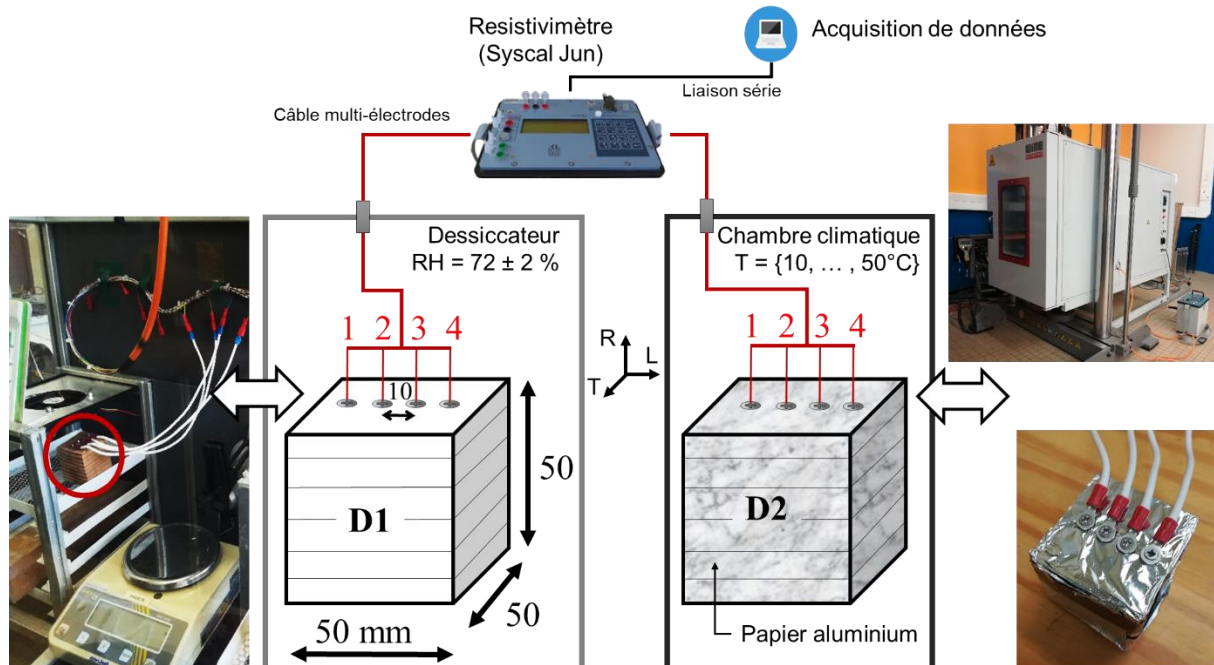


Figure III-9 : Protocole expérimental de l'étude préliminaire

L'échantillon D1 sera utilisé pour analyser l'effet de certains paramètres expérimentaux tels que la durée/le mode d'injection (résistif ou capacitif) et la configuration d'électrodes. L'échantillon D2 permettra d'étudier l'effet de la diffusion thermique dans le bois sur la mesure de la résistance électrique.

III.3.2.1. Configurations et direction de multiplexage

La première campagne des mesures a été réalisée en conservant l'échantillon D1 dans le dessiccateur, à une température d'environ 20 °C. Une variation maximale de 2 °C a été notée pendant la durée de de la campagne de mesures.

Pour cette étude, 3 configurations ont été testées, à savoir, Wenner Alpha (α), Wenner Beta (β) et Wenner Gamma (γ). Pour chaque configuration, plusieurs combinaisons ont été également testées. En effet, les dipôles d'injection et de potentiel ont été inversés pour définir 2 directions de multiplexage : N pour « Normal » et R pour « Reverse ». Pour chaque direction de multiplexage, les dipôles d'injection ou les dipôles de tension ont également été inversés, comme l'illustre la Figure III-10 qui prend l'exemple des combinaisons possibles pour la configuration β . Pour les configurations α et γ , les combinaisons testées sont données dans l'Annexe 2.

Une séquence de multiplexage basée sur 20 quadripôles est donc appliquée à l'échantillon : 8 de type β , 8 de type γ et seulement 4 de type α car il n'y aura pas d'inversion des dipôles

d'injection et de potentiel dans ce dernier cas (les dipôles d'injection A et B sont toujours ceux qui sont positionnés sur les extrémités).

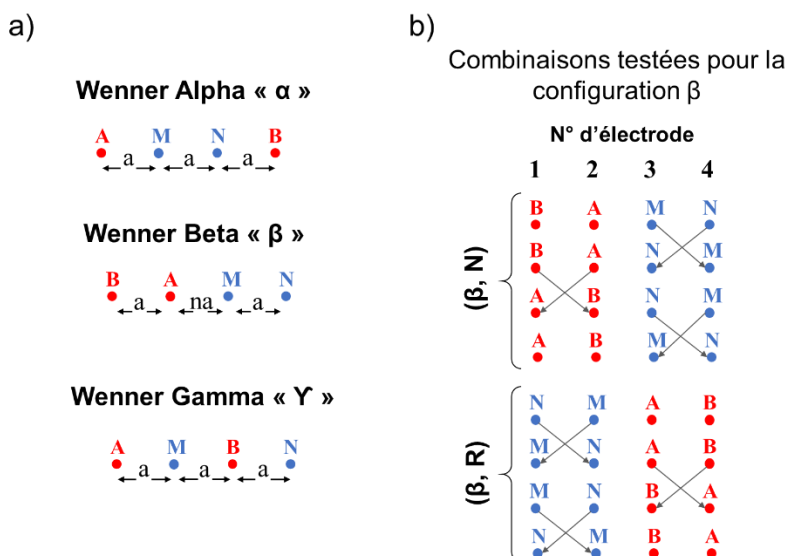


Figure III-10 : a) Les 3 configurations (α , β et γ) testées ; b) Les combinaisons testées pour la configuration β avec 2 directions de multiplexage

Les mesures ont été effectuées en utilisant deux modes d'injection : (i) le mode Rho qui permet d'injecter de manière alternative une succession d'impulsions de courant positives et négatives et (ii) le mode RhoIP qui se caractérise par des coupures entre les impulsions et qui permet de calculer la chargeabilité comme expliqué dans § II.6.1.2. Il faut préciser que dans le cadre de notre étude, seule la chargeabilité totale sera traitée. De plus, nous avons réalisé toutes les injections avec les 4 durées d'injection disponibles à savoir 0.25, 0.5, 1 et 2 s.

III.3.2.2. Variation de température

L'effet du gradient de température dans le bois sur la mesure de la résistance électrique est étudié en plaçant l'échantillon D2 dans une chambre climatique, où la température peut être ajustée sans affecter la teneur en eau de l'échantillon. En effet, l'équilibre hygroscopique reste inchangé en recouvrant l'échantillon avec un matériau imperméable (du papier d'aluminium ou du parafilm) (Figure III-9). Dans le cas de l'installation du papier aluminium, il faut s'assurer de l'absence du contact entre le papier et l'électrode.

La température de l'échantillon a été stabilisée à 10 °C avant d'être exposé à d'autres niveaux de température croissantes 20, 25, 30, 40 et 50 °C. Pour chaque niveau de température, entre 8 et 12 mesures de résistance ont été enregistrées à des intervalles d'environ 15 minutes. L'expérience a été réalisée sur un court intervalle de temps (< à 24 h). Des pesées avant et après l'expérience ont permis de vérifier que la teneur en eau de l'échantillons n'a pas été affectée.

III.3.3. Etude paramétrique

L'étude paramétrique a été réalisée en utilisant les 23 échantillons en Douglas-fir conditionnés à 4 niveaux de teneurs en eau. Chaque ensemble d'échantillons correspondant à un niveau de teneur en eau, a été placé dans la chambre climatique en utilisant un faisceau de 24 électrodes (Figure III-11). Afin d'étudier les limites du matériel, les deux résistivimètres ont été utilisés. Il s'agit d'identifier les limites du Syscal Junior et déterminer l'apport du Syscal Pro par rapport aux faibles teneurs en eau.

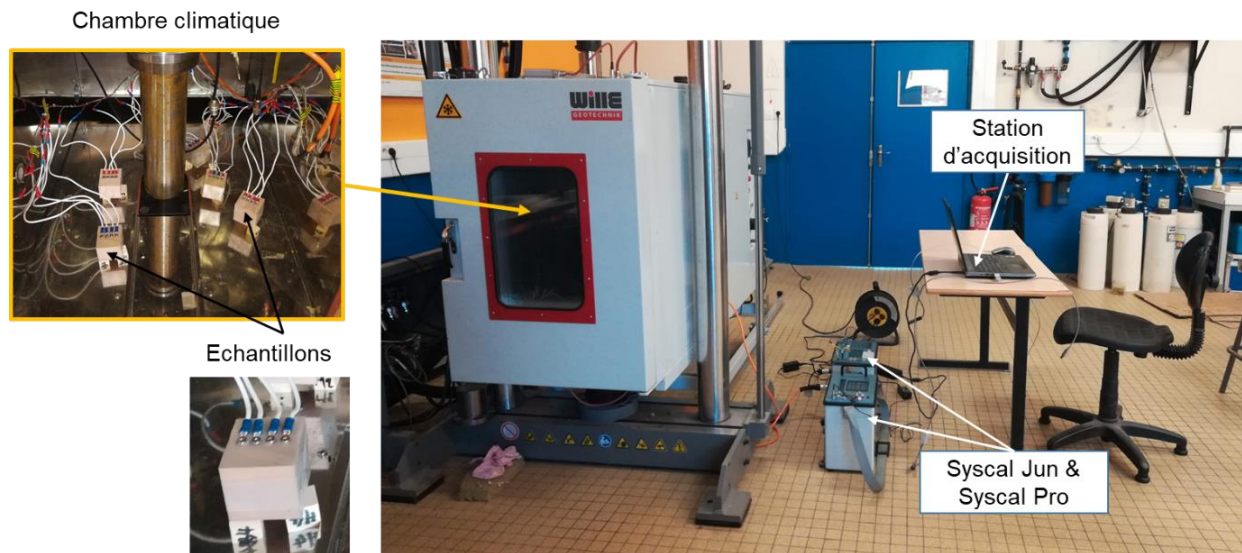


Figure III-11 : Protocole expérimental pour l'étude paramétrique

Les mesures ont été effectuées sur les 3 directions d'injection L, R, T, et ce, à 5 niveaux de températures différentes 5, 15, 25, 35 et 45 °C. Chaque échantillon a été recouvert par un parafilm afin de conserver sa teneur en eau. Afin de s'assurer de la conservation de w des échantillons, des pesées ont été effectuées avant et après l'expérience. Les 3 configurations (α , β et γ) ont été également testées.

III.4. Approche numérique

L'approche numérique consiste à développer un modèle numérique, appelé aussi modèle direct, non restreint aux hypothèses usuelles de la géophysique. Notre approche numérique a été adaptée pour passer d'une injection ponctuelle dans un milieu semi-infini à une injection prenant en compte la géométrie réelle des électrodes et des volumes étudiés. Afin de simuler la mesure d'un quadripôle électrique, où un courant électrique est injecté en utilisant un dipôle et la d.d.p est mesurée aux bornes d'un autre, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- La distance entre les électrodes n'est pas considérée grande par rapport à la taille des électrodes. Les électrodes sont espacées d'une distance $a = 10 \text{ mm}$.

- La modélisation des électrodes sous forme de cylindres parfaitement conducteurs en prenant en compte leur diamètre et leur longueur réels peut être considérée comme une modélisation réaliste de leur géométrie ;
- Un modèle isotrope est considéré dans cette étude. Cette hypothèse est une première approche simplifiée pour des échantillons de petites dimensions (échelle laboratoire) avec une homogénéité en termes de distribution de la teneur en eau.

Notre approche numérique se repose donc sur deux étapes principales :

- (i) La modélisation par éléments finis (MEF) ;
- (ii) L'injection électrique s'appuyant sur l'analogie thermique-électrique.

III.4.1. Modèle par éléments finis

Le modèle numérique direct est basé sur la méthode des éléments finis (MEF) et a été développé sur le logiciel Cast3M (2017) en utilisant un maillage de type éléments quadratiques (CU20). Le modèle par éléments finis d'un échantillon de dimensions (L_{fx} , L_{fy} , L_{fz}) consiste à définir dans un premier temps le maillage des électrodes et de son environnement, et dans un deuxième temps, le volume restant de l'échantillon. Grâce à la symétrie de la configuration expérimentale de l'échantillon et des électrodes, seule la moitié du domaine a été discrétisée. La modélisation numérique proposée passe donc par 3 étapes principales :

1- Modélisation de l'électrode :

En premier lieu, la surface correspondant à la zone d'application de la densité de flux, appelée cosse, est modélisée avec un diamètre $d_e = 3 \text{ mm}$. Cette surface est extrudée par la suite pour développer le volume de l'électrode modélisé sous forme d'un demi-cylindre de longueur $L_e = 5 \text{ mm}$, ce qui correspond à la longueur de la partie non isolée de l'électrode. L'électrode est modélisée par des éléments cubiques de taille moyenne $e_1 = 1 \text{ mm}$ (Figure III-12).

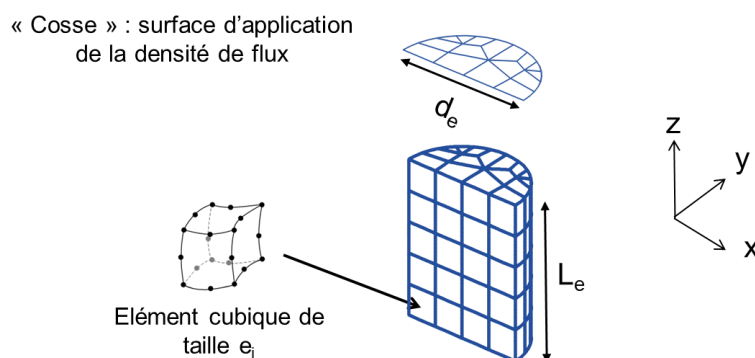


Figure III-12 : Modélisation de l'électrode cylindrique

2- Création de la zone d'implantation de l'électrode :

Une première surface du matériau est modélisée en intégrant la zone d'implantation de la cosse, et ce, afin de permettre l'insertion de l'électrode par la suite. En premier lieu, aucun volume de matière n'est ajouté là où la partie isolée de l'électrode a été préservée. En

supprimant la cosse, la surface résultante est extrudée dans la direction OZ afin de modéliser un premier volume de l'échantillon, appelé pavé de l'électrode de dimensions $L_{1x} \times L_{fy} / 2 \times L_{1z}$. Cette partie représente le domaine dans lequel l'électrode sera installée en prenant en compte, l'espacement entre les électrodes (a) et la longueur de la partie isolée L_{is} , avec $L_{1x} = d_e + a/2$ et $L_{1z} = L_e + L_{is}$. Ce domaine est constitué d'éléments cubiques de taille e_2 avec un rapport moyen e_2/e_1 d'environ 0,5. Le choix de la taille du maillage de l'électrode et de son environnement est imposé pour garantir un compromis entre la continuité du domaine étudié et la résolution de l'injection de courant par la suite. Un deuxième parallélépipède rectangle de dimensions $L_{2x} \times L_{fy} / 2 \times L_{2z}$ intégrant la surface de cosse est ensuite extrudé jusqu'à l'extrémité inférieure de l'échantillon pour atteindre la hauteur réelle de l'échantillon (Figure III-13). La cosse doit donc être modélisée sous forme d'un cylindre vertical.

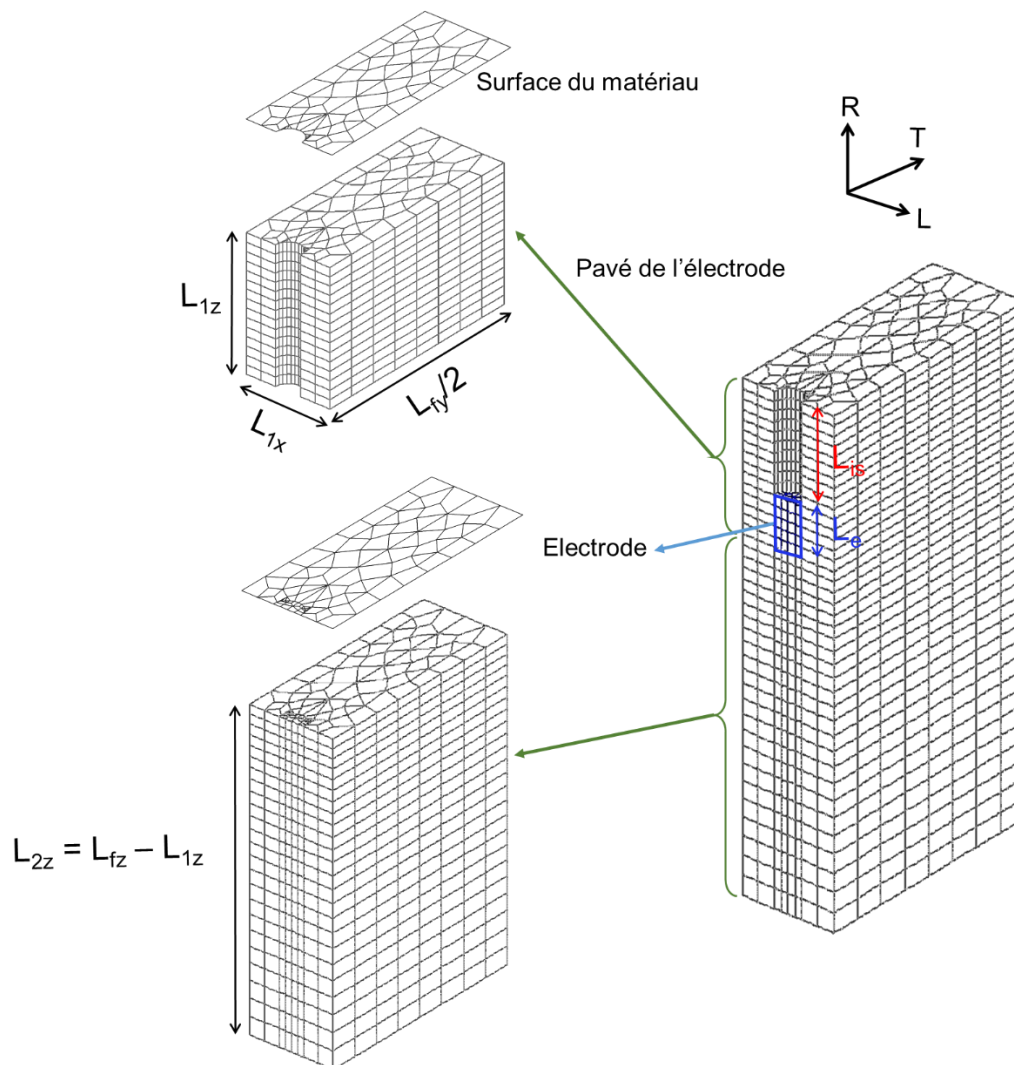


Figure III-13 : Modélisation de la zone d'implantation de l'électrode

La dernière étape consiste à intégrer l'électrode dans l'échantillon. Le contact est assuré via les éléments quadrilatéraux représentant les points de raccordement entre le matériau et l'électrode.

3- Développement du volume de l'échantillon :

En raison de la symétrie du volume étudié, le maillage présenté précédemment a été repris pour créer la zone totale au voisinage de toutes les électrodes (présentées en bleu dans la Figure III-14). Cette zone est raccordée aux volumes restants permettant d'atteindre les dimensions réelles de l'échantillon, appelés domaines extérieurs. Cela permettra par la suite de limiter la durée de résolution du système. Le domaine extérieur est constitué d'éléments parallélépipédiques dont la taille est égale à la même taille que la zone d'implantation des électrodes.

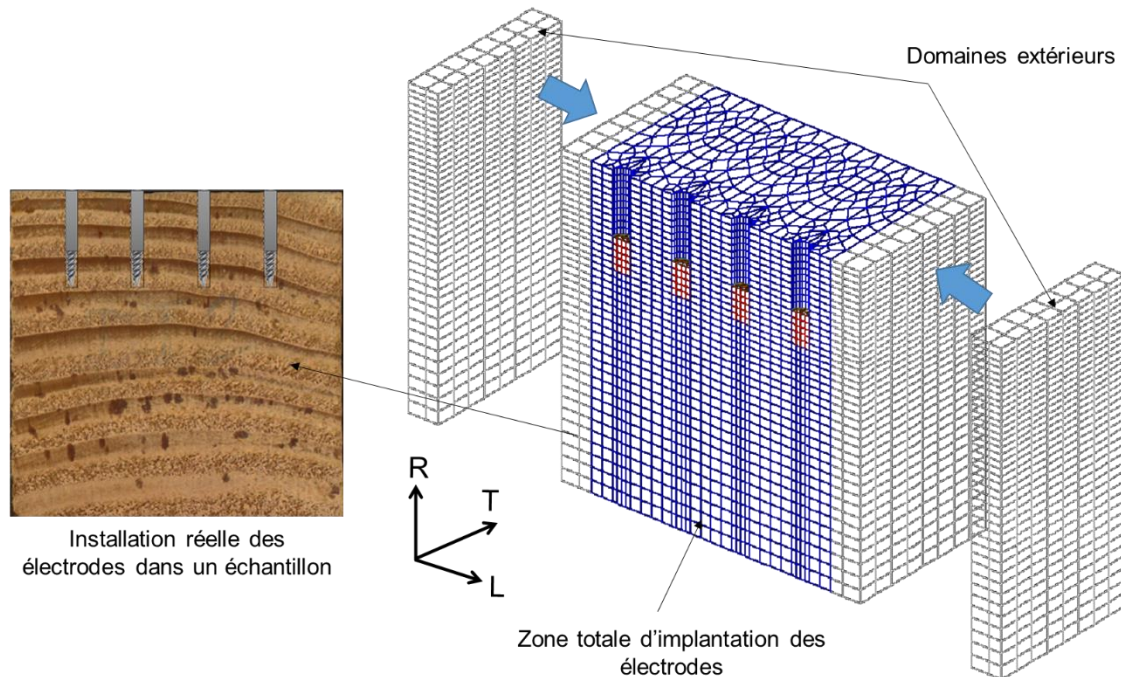


Figure III-14 : Maillage éléments finis d'un échantillon 50x50x50 mm³

Dans le cas d'un élément plus grand où le nombre d'éléments est plus important, une augmentation progressive de la taille des éléments peut être envisageable afin de limiter le temps de calcul (Nguyen 2014). Dans notre cas d'étude où les dimensions d'un échantillon restent sur une échelle laboratoire, des simulations avec un maillage plus fin ont montré que la différence de la taille des éléments peut être négligée.

III.4.2. Analogie thermique électrique

Afin de déterminer les mesures numériques d'injection de courant et de tension, nous avons eu recours à l'analogie entre un système de transfert de chaleur et un circuit électrique comme le montre la Figure III-15. Dans ce circuit, le flux de chaleur $\vec{\varphi}$ est équivalent à la densité de courant \vec{j} . La différence de température est remplacée par la différence de tension, et les résistances thermiques sont équivalentes aux résistances électriques.

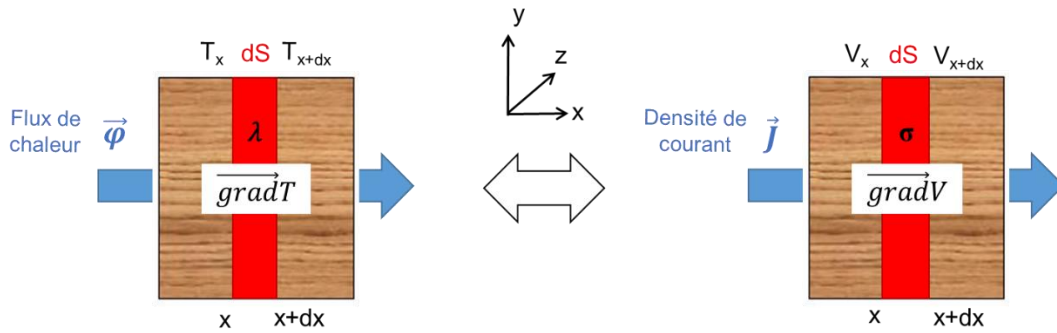


Figure III-15 : Analogie thermique électrique

En ce qui concerne la conduction électrique dans le matériau, elle est basée sur la résolution de la loi d'Ohm généralisée telle que présentée comme suit :

$$\vec{j} = -\sigma \overrightarrow{\text{grad}V} \quad (\text{III-3})$$

De plus, la réponse du matériau à l'injection du courant électrique est parfaitement analogue au processus de transfert de chaleur en régime permanent présentée par la loi de Fourier qui s'écrit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{III-4})$$

Par analogie entre ces deux processus, le Tableau III-3 résume les notions équivalentes :

Tableau III-3 : Les grandeurs équivalentes par analogie thermique électrique

Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
Température T (K)	Tension V (V)
Flux de chaleur ϕ (W)	Courant I (A)
Densité de flux de chaleur φ ($W \cdot m^{-2}$)	Densité de courant J ($A \cdot m^{-2}$)
Conductivité thermique λ ($W \cdot m^{-1}K^{-1}$)	Conductivité électrique σ (S/m)
Conductance thermique UA ($W \cdot K^{-1}$)	Conductance électrique G (Ω^{-1} ou S)
Résistance thermique R_{th} ($K \cdot W^{-1}$)	Résistance électrique R (Ω)

Les outils de transfert de chaleur présentés ont été implémentés dans le code aux éléments finis. En utilisant les opérateurs classiques de thermique stationnaire disponibles sur Cast3M, les équations différentielles linéaires de Laplace sont résolues.

Il faut également préciser que, comme expliqué dans §III.2.1, la valeur de l'intensité du courant injecté I_{AB} est automatiquement ajustée en fonction de la valeur de la tension V_{MN} souhaitée.

Ce mode de fonctionnement du résistivimètre nous permet de modéliser l'électrode comme un milieu conducteur parfait avec $\sigma = 10^6 \text{ S/m}$ et un courant d'intensité 1 A générée à la surface supérieure du cylindre (appelée précédemment cosse). Ainsi, le courant électrique entrant par l'électrode A et sortant par l'électrode B, est délivrée dans le volume de l'échantillon via les points de raccordement entre la surface de l'électrode et la surface de contact électrode/bois.

III.4.3. Applications numériques

Nous proposons dans ce paragraphe quelques applications numériques basées sur le modèle numérique développé pour simuler l'injection électrique en prenant en compte les différentes configurations d'électrodes. Ces études vont être analysées par le biais des facteurs géométriques k . Nous rappelons que dans le cas d'un milieu semi infini, l'expression analytique du facteur géométrique correspondant à un quadripôle quelconque peut être déterminée comme suit :

$$k = \rho_{app} \frac{I_{AB}}{\Delta V_{MN}} \quad (\text{III-5})$$

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)} \quad (\text{III-6})$$

Dans les 3 cas de configurations qui nous intéressent (α , β et γ), les quatre électrodes sont espacées régulièrement d'une distance $a = 10 \text{ mm}$. Les solutions analytiques sont $k_{infini}(\beta) = 6\pi a$, $k_{infini}(\gamma) = 3\pi a$ et $k_{infini}(\alpha) = 2\pi a$.

III.4.3.1. Détermination des facteurs géométriques

En utilisant un multiplexage intégré dans le code éléments finis, l'injection électrique en A et B et la mesure du potentiel en M et N est adaptée au type de configuration d'électrodes testée. Soit un matériau de résistivité homogène $\rho_{num} = 1000 \text{ }\Omega\text{m}$, la Figure III-16 illustre les cartographies du potentiel obtenu pour les différentes configurations et ce pour un courant $I_{AB} = 1\text{A}$.

Grâce à une régression linéaire des données simulées, la relation entre la résistivité électrique numérique homogène ρ_{num} et la résistance R_{num} est déterminée. La variation des valeurs de résistivité suit une fonction linéaire par rapport aux valeurs de résistance calculée par la méthode numérique, comme indiqué sur la Figure III-17.

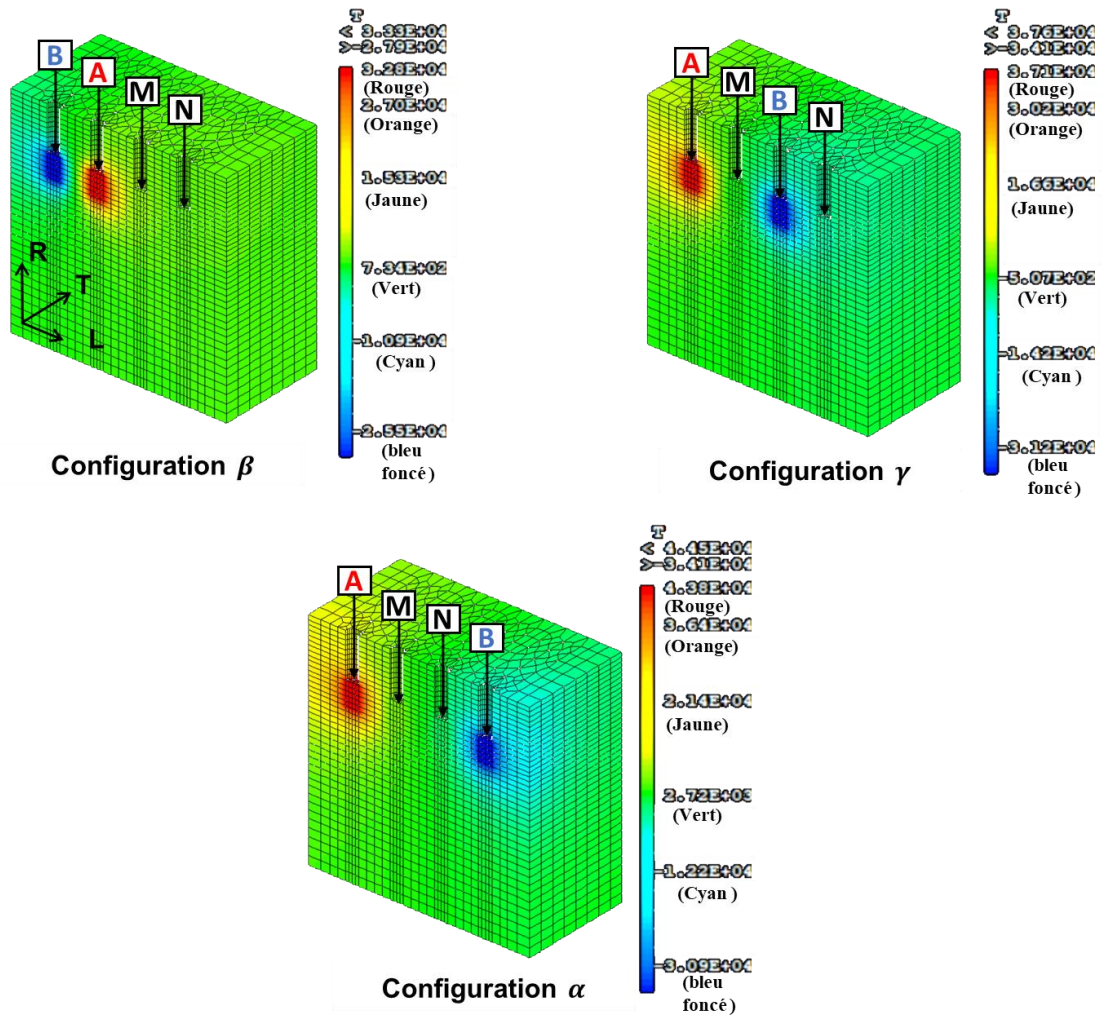


Figure III-16 : Injection électrique et multiplexage pour les configurations β , γ et α ($\rho = 1000 \Omega.m$)

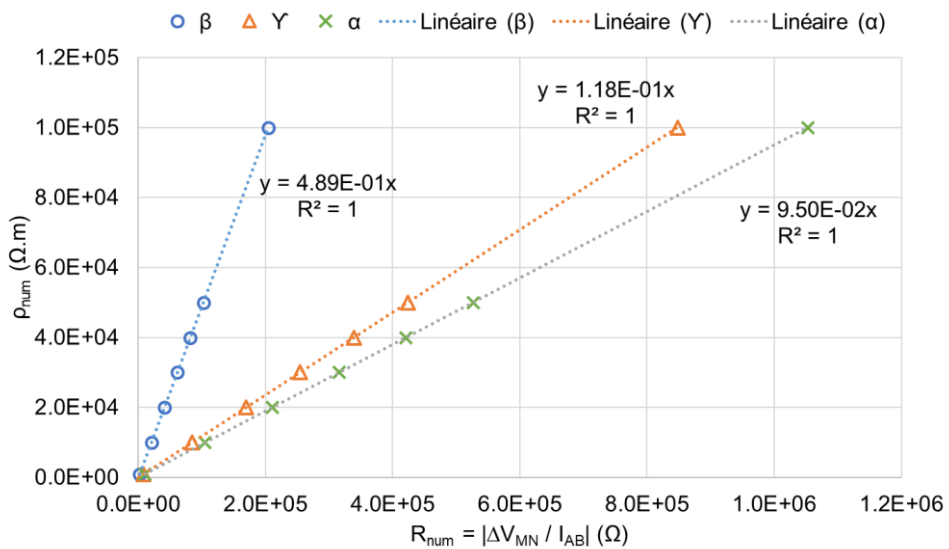


Figure III-17 : Les facteurs géométriques calculés par le modèle numérique pour les différentes configurations

Les pentes des fonctions linéaires représentent ainsi les valeurs des facteurs géométriques correspondants à chaque configuration avec $k_{\text{fini}}(\beta) = 4.89\text{E-}01$ m, $k_{\text{fini}}(\gamma) = 1.18\text{E-}01$ m ; et $k_{\text{fini}}(\alpha) = 9.5\text{E-}02$ m. Ces valeurs seront utilisées pour déterminer les résistivités électriques expérimentales.

III.4.3.2. Isolation et enfoncement de l'électrode

Nous souhaitons maintenant réaliser des études numériques complémentaires permettant également de déterminer l'influence de la géométrie réelle des électrodes par rapport au cas des électrodes ponctuelles. Cela sera mis en exergue en variant en premier lieu l'isolation et l'enfoncement des électrodes. Nous considérons pour cela l'exemple d'un quadripôle de type β .

L'étude sera menée sur la variation de la longueur de la partie isolée de l'électrode L_{is} et son influence sur la résistance calculée numériquement R_{num} et sur le facteur géométrique k , avec L_{is} qui varie entre 0 (électrode non isolée) et 14 mm sur une longueur totale de 15mm. La Figure III-18, présentant les deux cas limites de l'isolation de l'électrode, montre que plus la surface de contact entre l'électrode et le matériau est grande plus la d.d.p au niveau des électrodes d'injection est faible. En revanche en augmentant L_{is} , on constate une augmentation de la valeur de la résistance qui se manifeste par des valeurs de d.d.p V_{MN} plus élevées et ce, pour une intensité d'injection I_{AB} donnée ($I_{\text{AB}} = 1\text{A}$) (Figure III-19).

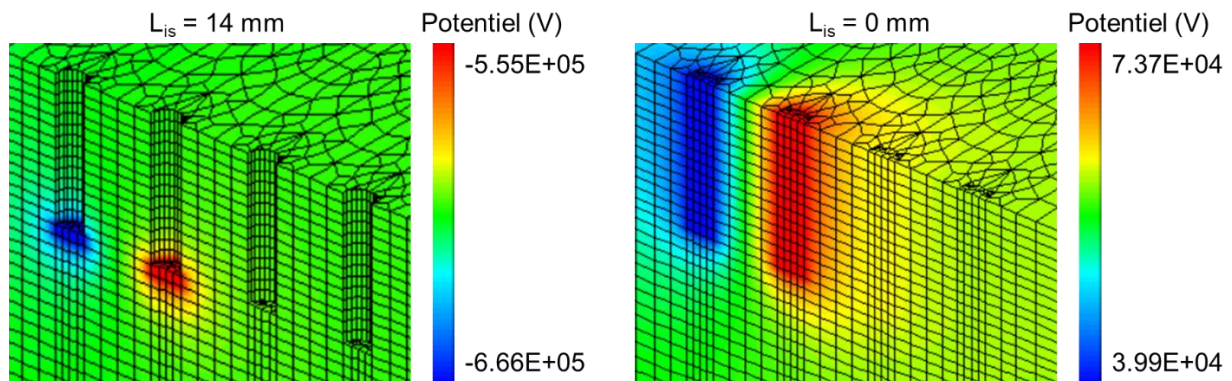


Figure III-18 : Champs de potentiel dans le matériau en fonction de l'isolation de l'électrode (configuration β ; $I_{\text{AB}} = 1\text{A}$)

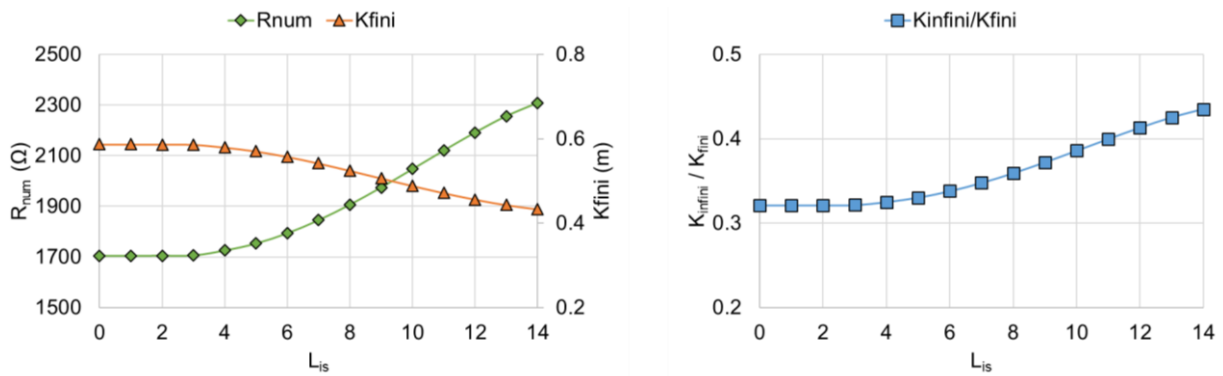


Figure III-19 : Variation de la longueur de la partie isolée de l'électrode (L_{is})

Cette analyse relève une diminution de la valeur du facteur géométrique calculé k_{fini} et son écart par rapport au facteur analytique dans le cas d'un milieu semi-infini k_{infini} . Ceci peut être donc attribué à la distribution du champ de potentiel autour des électrodes M et N liée à la surface électrode/matériau.

Nous souhaitons ainsi aller plus loin dans cette analyse en étudiant l'impact de l'enfoncement de l'électrode non isolée qui consiste à modifier la longueur de l'électrode L_e qui passe de 15 à 1 mm (cas d'une injection surfacique). L'objectif est de pouvoir comparer nos résultats numériques avec les solutions analytiques valables dans un milieu semi-infini homogène sur lequel le courant est injecté en utilisant des électrodes ponctuelles. Ainsi, nous pouvons déterminer dans quelle mesure le milieu étudié est considéré comme un milieu semi-infini.

La Figure III-20 présentant l'évolution du facteur géométrique numérique en fonction de l'enfoncement de l'électrode, confirme un point bien conjecturable qui concerne le rapprochement du modèle numérique du cas du milieu semi-infini.

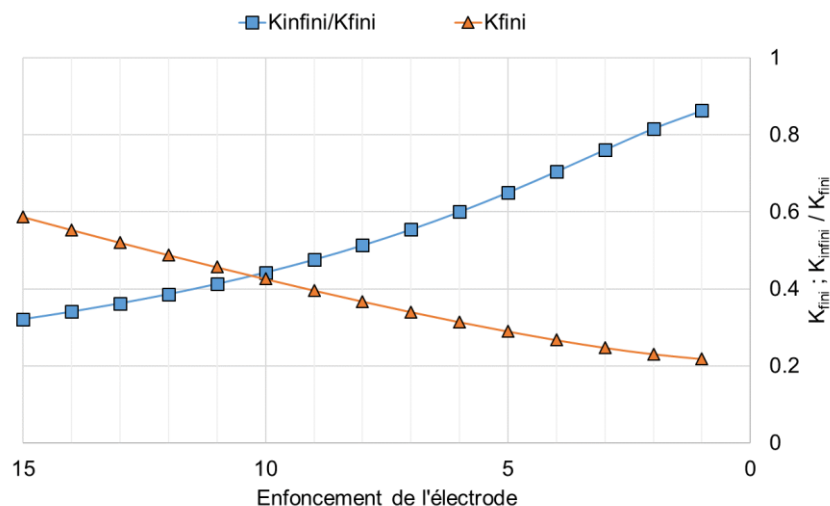


Figure III-20 : Influence de la variation de l'enfoncement de l'électrode sur le facteur géométrique

En effet, le facteur géométrique k_{fini} se rapproche plus du cas de l'injection ponctuelle (k_{infini}) en diminuant l'enfoncement / la longueur de l'électrode. Nous constatons que lorsque l'enfoncement de l'électrode passe de 1.5 à 0.1 fois l'espacement entre les électrodes, le facteur k_{fini} diminue de 62.8 %. Ce dernier est donc perturbé d'une manière significative lorsque la longueur de l'électrode est non négligeable par rapport à l'écartement entre les électrodes.

Néanmoins, l'écart entre les deux facteurs est de l'ordre de 13.7 %. Cela est sans doute lié à la présence des effets de bords qui perturbent les champs de potentiels. Le paragraphe suivant permettra donc d'étudier leur influence sur le facteur géométrique.

III.4.3.3. Variation des dimensions de l'échantillon

Comme présenté dans §II.5, les résistances électriques peuvent être influencées par les dimensions des échantillons. Afin de mieux se rapprocher du cas d'un milieu semi-infini, nous augmentons progressivement et simultanément les dimensions $L_x \times L_y \times L_z$ du domaine parallélépipédique étudié, et ce dans les directions L, T et R, respectivement. Nous allons donc étudier numériquement l'influence des frontières dues aux géométries de l'échantillon étudié. Cette influence est mise en évidence par des courbes présentant l'évolution du rapport entre le facteur géométrique fini et le facteur géométrique analytique pour des électrodes surfaciques enfoncées à 1 mm de profondeur (Figure III-21).

Les résultats montrent que l'hypothèse d'un milieu semi-infini est satisfaite à partir d'une étendue de dimensions de $120 \times 120 \times 120 \text{ mm}^3$, et ce avec une erreur relative de k d'environ 2.39 %. Nous constatons également que le facteur k_{fini} a diminué de 11.6 % lorsque les dimensions de l'échantillon passent de 5 à 12 fois l'espacement entre électrodes.

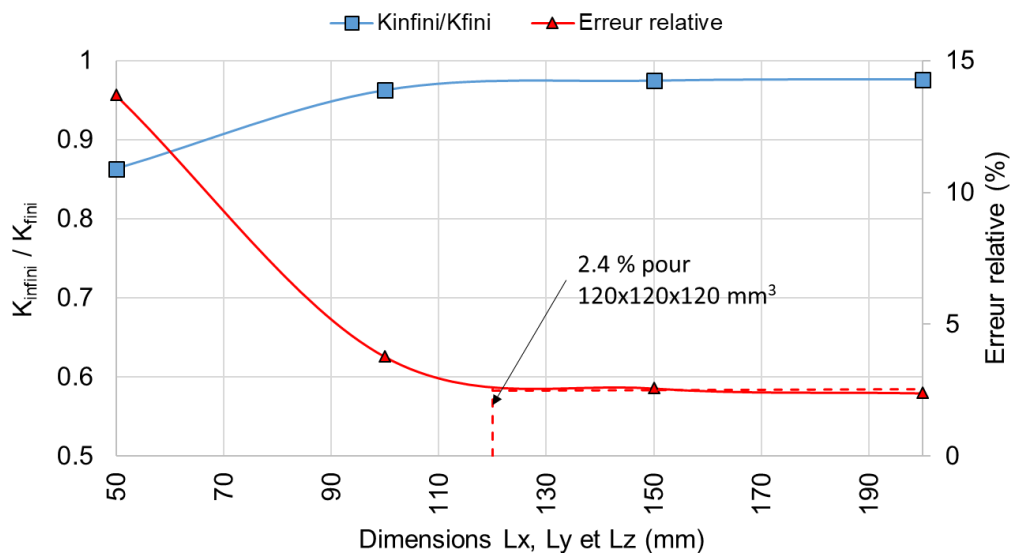


Figure III-21 : Effet de la variation des dimensions de l'échantillon sur l'erreur relative sur le facteur géométrique k par rapport à la solution analytique k_{infini}

Pour conclure, ces études montrent que le facteur géométrique dépend bien des dimensions de l'électrode et de son isolation ainsi que des dimensions de l'échantillon étudié. On constate également que le facteur géométrique est plus sensible aux dimensions de l'électrode que les

dimensions de l'échantillon. Il est donc nécessaire de prendre en compte la géométrie réelle de l'échantillon et des électrodes pour développer le modèle numérique direct.

III.5. Conclusion

Ce chapitre s'est focalisé sur la présentation du protocole expérimental en utilisant deux résistivimètres afin d'évaluer une gamme de teneur en eau allant de 11.6 à 25 %, et ce sur la base d'échantillons de Douglas-fir conditionnés. Le protocole prend en compte l'effet de la température et de l'orthotropie, ainsi que de la configuration des électrodes utilisées.

Nous avons présenté par ailleurs une stratégie numérique dédiée à la modélisation de la conduction électrique. Cette stratégie est basée sur l'analogie entre le processus thermique et électrique. Un modèle aux éléments finis est développé pour un quadripôle utilisant des électrodes isolées, et ce afin d'identifier le facteur géométrie correspondant à chaque type de configuration d'électrodes. L'influence de la longueur des électrodes et celle de la partie isolée sur le facteur géométrie a permis de confirmer l'importance de la modélisation des dimensions réelles des électrodes. Nous avons également étudié l'influence des effets de bords liés à la géométrie de l'échantillon étudié, ce qui nous a permis aussi de valider notre modélisation.

Le quatrième chapitre de ce mémoire sera dévolu à la mise en œuvre de cette approche expérimentale-numérique afin de montrer son apport en termes d'évaluation de la teneur en eau à l'échelle laboratoire mais également dans une optique de monitoring à des plus grandes échelles.

Partie IV. Etude paramétrique et caractérisation d'une loi de passage entre résistivité et teneur en eau

IV.1. Introduction

Cette partie du travail présente les résultats de la mesure résistive par l'approche mixte présentée dans le chapitre précédent. Nous allons nous intéresser aux paramètres impliqués dans l'évaluation de la teneur en eau du bois afin de s'assurer de la fiabilité du système de mesure dans le cadre des mesures réalisées in-situ.

Dans un premier temps, nous allons effectuer des études préliminaires ayant pour but :

- 1) de vérifier la faisabilité des mesures électriques dans le bois avec les différentes configurations d'électrodes ;
- 2) d'identifier le mode d'injection le plus adapté au matériau, à savoir le mode résistif (Rho) ou capacitif (Rho/IP) ;
- 3) de caractériser le comportement résistif du matériau en fonction de la température.

Suite à ces études, nous allons approfondir notre étude paramétrique dédiée à l'évaluation de la teneur en eau dans des échantillons de Douglas-fir conditionnés à différentes humidités relatives et températures. Nous traiterons également l'effet de l'orthotropie sur la mesure électrique, ce qui permettra d'observer les limites du matériel de mesure.

Ces mesures expérimentales effectuées par les résistivimètres seront par la suite corrélées avec les résultats obtenus par la modélisation numérique. L'objectif sous-jacent est d'établir une relation permettant d'évaluer la teneur en eau en prenant en compte les variations climatiques (T et HR) et la configuration des électrodes utilisée.

IV.2. Etude préliminaire

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'étude préliminaire réalisée sur les échantillons D1 et D2. Le protocole expérimental a été présenté dans §III.3.2.

IV.2.1. Mode et durée d'injection

En utilisant le résistivimètre Syscal Junior, cette première étude vise à caractériser la mesure de la résistance électrique en fonction du mode et de la durée d'injection. Nous rappelons que l'outil de mesure permet d'injecter d'une manière alternative une succession d'impulsions de courant en créneaux positifs et négatifs (mode Rho) ou avec des coupures entre les impulsions (mode Rho/IP).

La Figure IV-1 présente les résultats obtenus pour la résistance électrique R_{exp} pour la configuration β , en utilisant les deux modes d'injection et 4 durées d'injection 250 ms, 500 ms, 1 s et 2 s.

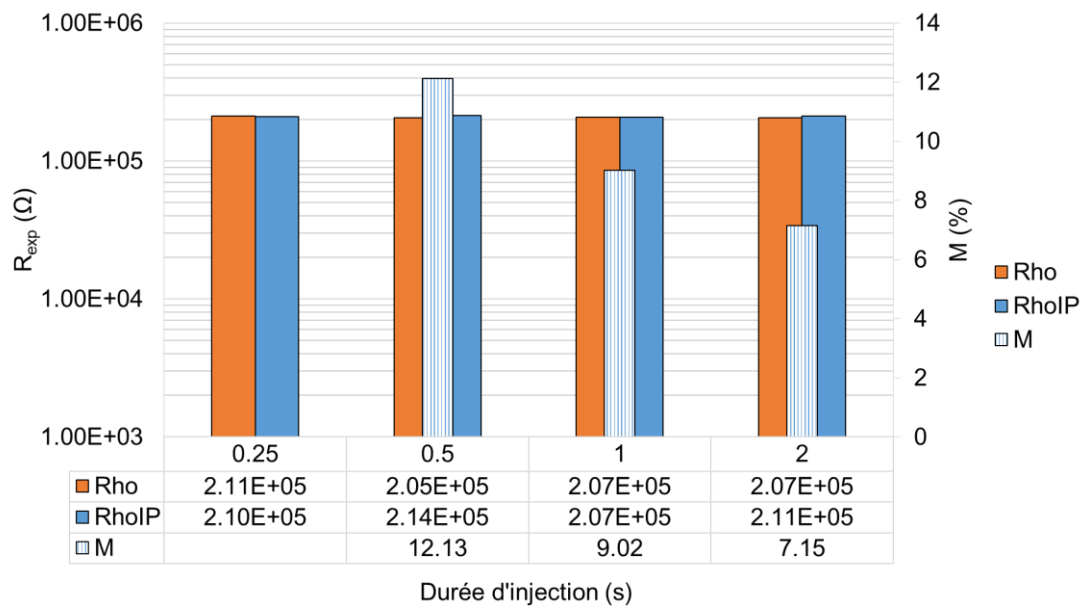


Figure IV-1 : Mesures de résistances en mode Rho et Rho/IP et de chargeabilité totale à différentes durées d'injection (configuration β)

Pour les deux modes, les résultats montrent un niveau relativement constant de résistance quelle que soit la durée d'injection. Cela veut dire qu'une injection durant 250 ms est suffisante pour atteindre la valeur maximale de la tension V_{MN} et que la durée d'injection n'influe pas d'une manière significative sur les mesures résistance dans notre cas d'étude.

Pour aller plus loin dans l'analyse, nous présentons également les mesures de la chargeabilité totale M . Cette mesure ne peut pas être effectuée à 250 ms du fait de la trop faible durée d'injection. En augmentant la durée d'injection de 500 ms à 2 s, nous observons une diminution de la valeur de la chargeabilité totale qui passe de 12 à 7 %. Dans la géophysique, cela peut être expliqué par le fait que les longues périodes d'injection permettent d'atteindre l'équilibre de la tension V_{MN} , d'éviter les effets de la polarisation provoquée et les effets de couplage électromagnétique (Sophocleous 2017). Il est donc évident que l'injection alternative du courant permet d'éviter la polarisation résiduelle dans le matériau (Casans Berga et al. 2019). Cette hypothèse a été confirmée aussi par du Plooy et al. (2013) qui ont montré que l'effet de polarisation est moins présent dans le cas d'une mesure indirecte à 4 points. Néanmoins, une coupure entre deux injections successives devrait permettre d'éviter la polarisation résiduelle qui est due à la différence de conductivités électriques entre l'électrode et le matériau. En effet, cette différence provoque la polarisation des électrodes, ce qui génère un courant inverse provoquant « une résistance de contact ». La présence de la graisse conductrice au niveau de l'interface électrode/bois pourrait réduire l'accumulation de charges et faciliter leur mobilité. Cela n'a pas été vérifié dans le présent travail.

Dans le cadre de ce travail, le mode RhoIP sera choisi et une durée d'injection de 2s.

Les résultats obtenus pour les deux autres configurations γ et α , sont disponibles dans l'Annexe 2.

IV.2.2. Effet de la configuration

Dans le cadre de cette étude, les essais ont été menés en testant 3 configurations d'électrodes (α , β et γ) et 2 directions de multiplexage, ce qui correspond à 20 combinaisons de quadripôles (§III.3.2.1). L'incertitude de mesure de résistance $\delta_{R_{exp}}$ correspondant à chaque combinaison est calculée en fonction de la résolution du résistivimètre en termes d'injection de courant et de mesure de d.d.p. (§III.2.2), et peut être définie comme suit :

$$\delta_{R_{exp}} = R_{exp} \left(\frac{\delta_V}{V_{MN}} + \frac{\delta_I}{I_{AB}} \right) \quad (IV-1)$$

En utilisant la régression linéaire via un programme macro complémentaire sur Excel (Solveur), les carrés des erreurs entre les mesures de résistance et les simulations du modèle numérique sont minimisées afin d'estimer la résistivité homogène (ρ_{exp}) déduite comme suit :

$$\begin{cases} \rho_{num} = k R_{num} = k \frac{\Delta V_{num}}{I_{num}} \\ \rho_{exp} = k R_{exp} = k \frac{\Delta V_{exp}}{I_{exp}} \end{cases}$$
$$\rho_{exp} = \rho_{num} \frac{I_{num}}{I_{exp}} \frac{\Delta V_{exp}}{\Delta V_{num}} \quad (IV-2)$$

Avec :

- $\rho_{num} = 1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$: résistivité numérique initiale utilisée pour le calcul numérique ;
- $I_{num} = 1 \text{ A}$: courant injecté dans le modèle numérique ;
- ΔV_{num} : d.d.p calculée par le modèle numérique ;
- ΔV_{exp} : d.d.p mesurée par le résistivimètre ;
- I_{exp} : courant mesuré par le résistivimètre.

Les mesures de résistance électrique R_{exp} et les résultats des résistances numériques issues du modèle R_{num} sont présentées dans la Figure IV-2, où les barres d'erreur verticales présentent les incertitudes de mesures liées à la résolution du résistivimètre. En considérant les 20 combinaisons testées, la minimisation de l'écart entre les deux valeurs présente une erreur moyenne de 5.7 %.

Expérimentalement, les résultats montrent bien que l'inversion des électrodes d'injection (A et B) ou de mesure de d.d.p. (M et N) ne modifie pas la mesure de la résistance électrique, et ce, quelle que soit la configuration testée. De plus les valeurs de résistances sont similaires dans les deux directions de multiplexage N et R.

Nous observons aussi 3 niveaux de résistances cohérents avec les différents facteurs géométriques définis par le modèle numérique (§III.4.3.1), en particulier pour la configuration β qui présente la résistance la plus faible et le facteur géométrique le plus élevé. Au contraire,

la configuration α présente la résistance la plus élevée et le facteur géométrique le plus faible et se caractérise par une incertitude de mesure $\delta_{R_{exp}}$ élevée.

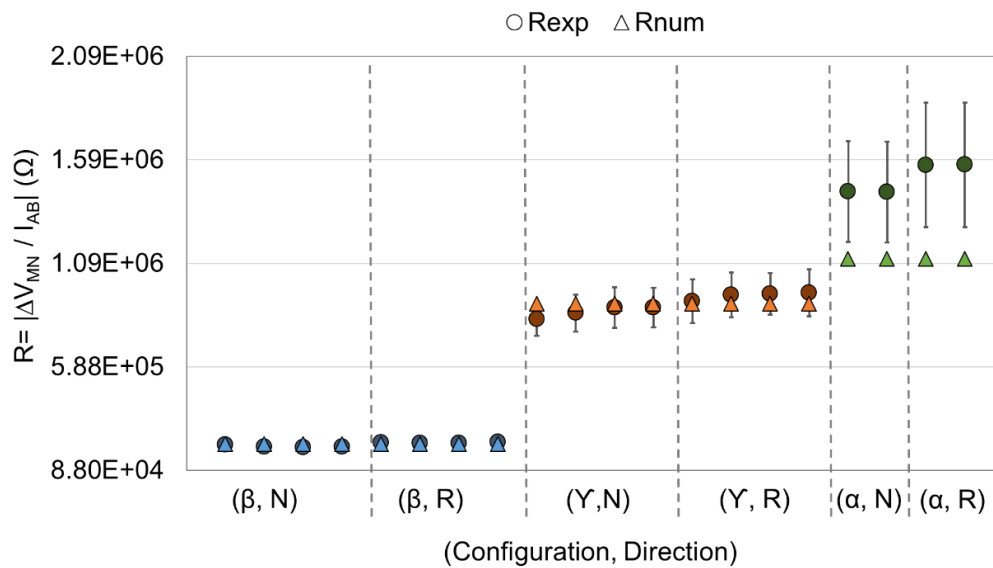


Figure IV-2 : Les résultats expérimentaux et numériques pour l'échantillon D1 (toutes les combinaisons de configurations testées)

Le Tableau IV-1 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques basée sur les valeurs moyennes présentées dans la Figure IV-2.

Tableau IV-1 : Les résultats expérimentaux et numériques pour les configurations β , γ et α

Approche	Paramètres	β	γ	α
		k (m)	48.9	11.8
Numérique (initiale)	R_{num} ($10^3 \Omega$)	2.05	8.48	10.5
	ρ_{num} ($10^3 \Omega$)	1		
Expérimentale	I_{AB} (μA)	14.8	3.64	2.22
	V_{MN} (V)	3.14	3.24	3.32
	R_{exp} ($10^5 \Omega$)	2.13	8.93	15
	$\delta_{R_{exp}}$ ($10^5 \Omega$)	0.10	0.47	0.75
Numérique (optimisée)	R_{num} ($10^5 \Omega$)	2.16	8.93	11.1
	ρ_{num} ($10^5 \Omega$)	1.05		
Mixte	ρ_{exp} ($10^5 \Omega$)	1.04	1.05	1.42

Les résultats montrent que le modèle reproduit d'une manière satisfaisante les mesures expérimentales pour les configurations β et γ . Concernant la configuration α , cette correspondance est limitée. Cela peut être expliqué par la distance qui sépare les deux électrodes d'injection (A et B). Il faut préciser que la configuration α présente la distance la plus élevée (30mm) par rapport aux configurations β et γ (10 et 20 mm respectivement) (Figure III 11-a). Ainsi, en augmentant la distance entre les dipôles d'injection, l'intensité du courant diminue et les valeurs de résistance deviennent plus importantes. En effet, la valeur du courant injecté pour la configuration α est 5.55 fois la résolution du courant du résistivimètre Syscal Junior, ce qui peut s'avérer difficile à mesurer. Le recours à un résistivimètre présentant des résolutions d'injection de courant plus faible semble intéressant pour atteindre des niveaux de résistances plus importants.

Cependant, les résistivités apparentes ρ_{exp} basées sur l'approche mixte expérimentale-numérique montre une dispersion relativement faible, en particulier pour les configurations β et γ , ce qui confirme l'homogénéité de la distribution de la teneur en eau de l'échantillon.

IV.2.3. Application de différents niveaux de température

Dans le cadre de cette étude, nous avons donc retenu la configuration β afin de limiter les erreurs de mesure. L'étude de l'influence de la température a été réalisée sur l'échantillon D2 à 6 niveaux de température 10, 20, 25, 30, 40 et 50 °C. Les résultats sont présentés dans la Figure IV-3.

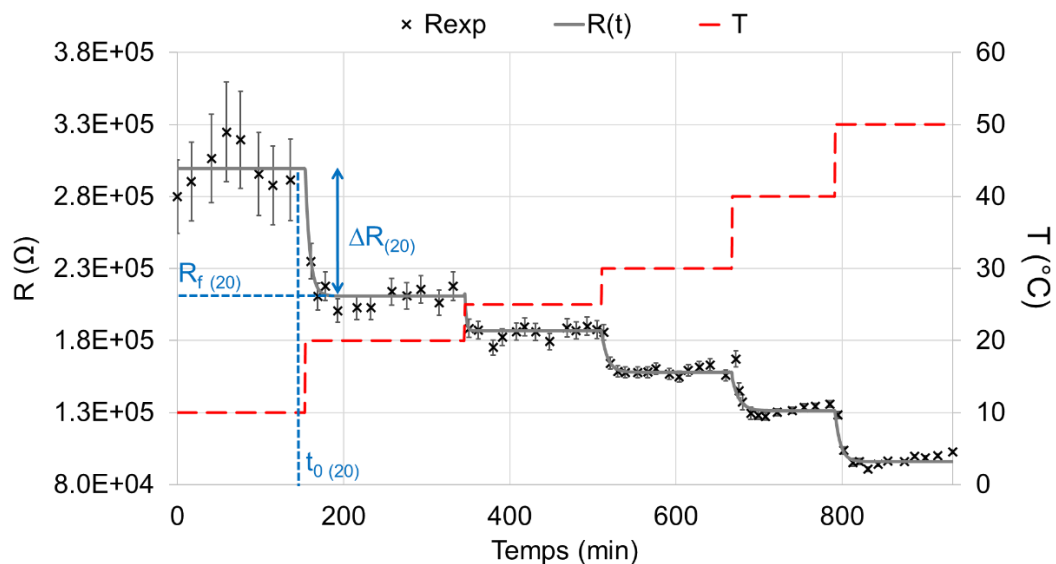


Figure IV-3 : Modélisation de l'évolution des mesures de résistance électrique pour l'échantillon D2 en fonction du temps d'application de différents niveaux de température

Ces résultats confirment qu'une augmentation de la température du bois provoque la diminution de la résistance électrique. Il est à noter aussi que la qualité de la mesure s'améliore progressivement en augmentant le niveau de température comme le montre le Tableau IV-2

présentant les valeurs moyennes des mesures de courant I_{AB} , de tension V_{MN} , de la résistance R_{exp} , et son erreur de mesure correspondant $\delta_{R_{exp}}$ calculée par l'Eq. (IV-1).

Tableau IV-2 : Résultats expérimentaux de l'échantillon D2 à différents niveaux de température

T (°C)	10	20	25	30	40	50
I_{AB} (μA)	4.08	9.16	12.36	16.31	21.2	32.42
V_{MN} (V)	1.22	1.94	2.29	2.62	2.87	3.22
R_{exp} ($10^5 \Omega$)	3	2.12	1.86	1.61	1.36	1
$\delta_{R_{exp}}$ ($10^4 \Omega$)	1.59	0.97	0.45	0.78	1.14	0.96

En effet, la valeur moyenne du courant injecté pour une température de 10 °C est environ 10 fois supérieure à la résolution du courant du résistivimètre, ce qui augmente probablement la dispersion des mesures.

Selon la Figure IV-3, il a été également observé que les valeurs de résistances prennent un certain temps pour se stabiliser suite au changement du niveau de la température. Ce temps est corrélé à la durée de diffusion de la température dans le matériau, d'autant plus que les électrodes ont été installées à une profondeur de 15 mm. Ainsi, nous admettons que la stabilisation des mesures de résistance confirme l'homogénéité de la température dans l'échantillon.

Pour représenter ce phénomène nous proposons de modéliser l'évolution des mesures de résistances $R(t)$ en fonction du temps d'application d'une température croissante à l'aide d'un modèle exponentiel :

$$R(t) = \Delta R e^{\left(\frac{t_0-t}{\tau}\right)} + R_f \quad (IV-3)$$

Avec :

- ΔR : la variation moyenne de résistance (en Ω) correspondant à un niveau de température, définie comme la différence entre la moyenne des mesures de résistance (uniquement celles à l'état permanent) pour deux niveaux de température successifs ;
- R_f : la résistance finale de stabilisation (en Ω) correspondant à un niveau de température ;
- t_0 : temps de début de l'application d'un niveau de température (en min) ;
- τ : la constante du temps (en min) qui définit le temps nécessaire pour atteindre 63 % de la valeur de la résistance finale de stabilisation R_f .

Les paramètres ΔR et t_0 ont été définis au préalable pour chaque niveau de température, et les paramètres R_f et τ ont été déterminées via le solveur d'Excel. La Figure IV-3 illustre un exemple des paramètres ΔR , R_f et t_0 pour une température de 20 °C.

Le Tableau IV-3 présente les résultats de la modélisation avec t_s désignant le temps nécessaire pour atteindre 100 % de la valeur de la résistance de stabilisation pour chaque niveau de température.

Tableau IV-3 : Résultats de la modélisation de l'évolution de la résistance à différents niveaux de températures

T (°C)	10	20	25	30	40	50
t_0 (min)	0	154	346	511	668	792
ΔR ($10^5 \Omega$)	-	0.87	0.25	0.26	0.22	0.31
R_f ($10^5 \Omega$)	3	2.11	1.87	1.58	1.32	0.96
τ (min)	-	5.41	1.74	6.97	8.99	6.97
t_s (min)	-	41.5	13.5	53	69	53

En excluant les résultats obtenus à 25 °C à cause du manque de données durant le régime de transition, la stabilisation des mesures de résistance pour un échantillon de dimensions 50x50x50 mm³ est atteinte après une durée moyenne de 54 minutes. Ce temps de stabilisation sera pris en compte par la suite dans l'étude paramétrique.

IV.3. Etude paramétrique

Cette section aborde l'étude paramétrique effectuée sur les 23 échantillons en Douglas-fir conditionnés à différents teneurs en eau afin d'établir une loi de passage résistivité-teneur en eau en fonction de la température (Figure III-7). Les essais sont menés en utilisant les deux résistivimètres Syscal Junior et Syscal Pro.

Nous présenterons dans un premier temps une comparaison entre ces deux outils de mesure afin d'identifier leurs limites. Nous considérerons ensuite les mesures de résistance pour les 3 configurations β , γ et α . Ces mesures nous permettront de vérifier l'homogénéité de la distribution de la teneur en eau et de calculer la résistivité apparente en ayant recours à l'approche expérimentale-numérique. Dans la suite de cette étude, nous allons comparer les résultats des mesures de résistivité obtenus dans les différentes directions d'orthotropie. L'effet de la température à différents niveaux d'humidité sera également mis en évidence. Il est à noter la gamme de température dans cette étude varie de 5 à 45 °C (par palier de 10 °C) ce qui nous permet de viser des températures plus faibles tout en évitant la désactivation de la mobilité des molécules d'eau (à 0 °C).

IV.3.1. Limite de la mesure à faibles teneurs en eau et températures : Syscal Junior et Syscal Pro

Une étude préalable qui porte sur l'ensemble de 364 données obtenues à l'aide des deux résistivimètres Syscal Junior et Syscal Pro, est présentée dans la Figure IV-4.

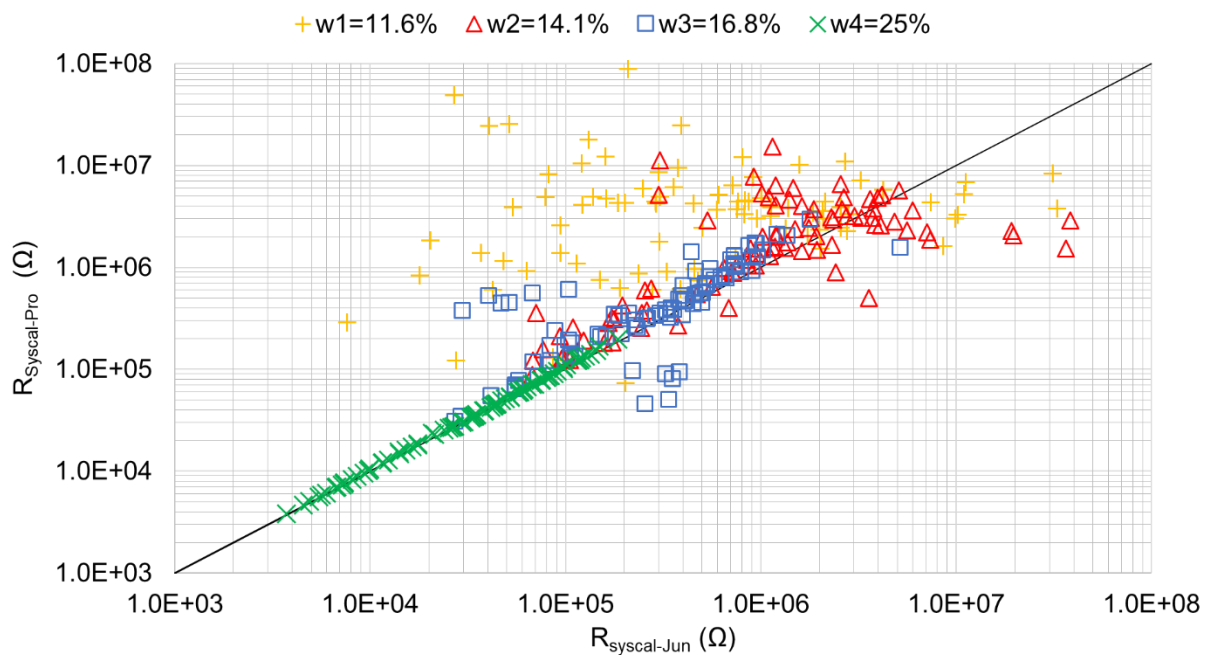


Figure IV-4 : Comparaison entre les mesures de résistances électriques en utilisant les deux résistivimètres Syscal Junior et Syscal Pro

Les résultats montrent une bonne cohérence entre les mesures des 2 résistivimètres à 25 % de teneur en eau avec un coefficient de corrélation d'environ $R^2 = 0.99$. En effet, l'ensemble des mesures présente un coefficient de déviation standard Q inférieur à 5%. Cette cohérence est bien moins marquée pour $w = 16.8\%$ avec $R^2 = 0.22$. En revanche, aucune corrélation ne peut être établie entre les mesures des 2 résistivimètres aux teneurs en eau de 11.6 et 14.1 %.

En se basant sur l'études préliminaire montrant les limites du Syscal Junior à des basses températures, nous proposons d'étudier l'écart entre les mesures en fonction de ce paramètre.

En considérant le Syscal Pro comme un outil de référence grâce à sa meilleure résolution de courant, la Figure IV-5 présente les écarts relatifs des mesures du Syscal Junior par rapport au Syscal Pro en fonction de la température de conditionnement.

D'une manière générale, les résultats confirment que plus la température est grande, plus l'écart relatif entre les mesures des deux résistivimètres est faible (sauf pour w_3 à 35 °C). Pour w_2 , la moyenne des écarts passe d'environ 57 % pour $T = 5\text{ °C}$, à 26 % pour $T = 45\text{ °C}$. Néanmoins, pour w_2 et w_1 , on observe une moyenne d'écarts assez élevée allant jusqu'à 26.7 et 44.5 % respectivement et ce, à $T = 45\text{ °C}$. Nous remarquons également une dispersion importante en particulier pour w_2 et w_1 . Cette dispersion est confirmée en investiguant le critère du seuil de courant $I_{AB} = 2\text{ }\mu\text{A}$ identifié dans le §III.2.3. En effet, pour w_1 et w_2 , environ 50 et 60 %, respectivement, des mesures de Syscal Junior ne répondent pas à ce critère, ce qui provoque des valeurs de déviation standard maximales ($Q = 999\%$).

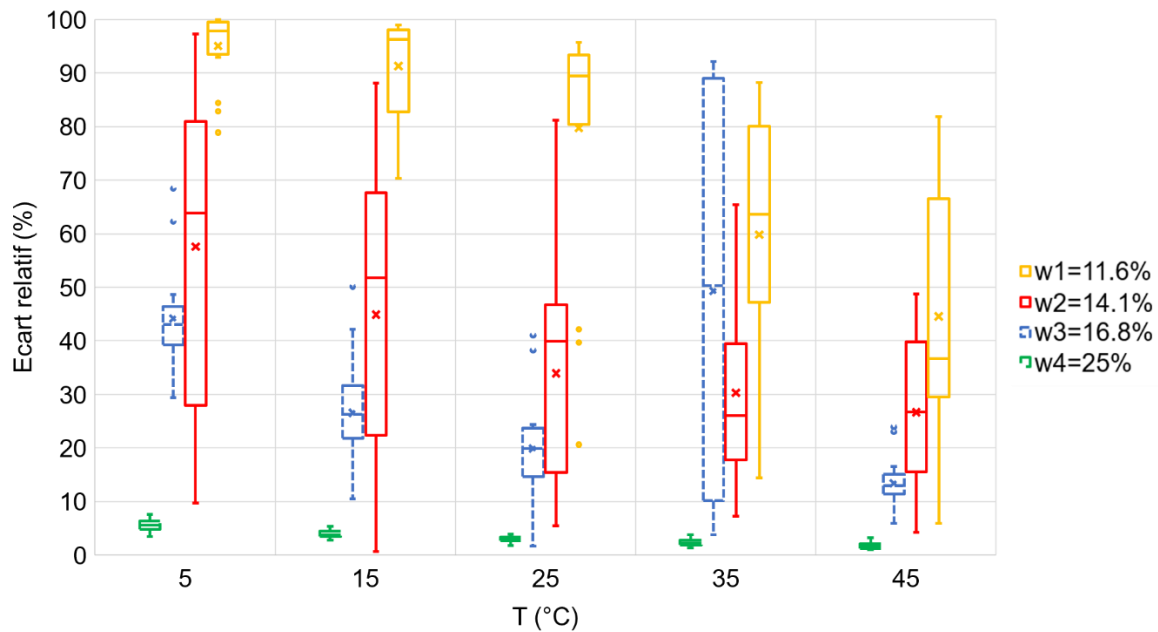


Figure IV-5 : Ecart relatif entre les mesures des deux résistivimètres en fonction des niveaux d'humidité et de températures

Afin d'identifier les limites du Syscal Junior en fonction des différentes températures et teneurs en eau, nous présentons également dans le Tableau IV-4 les moyennes des rapports entre les mesures fournies par le Syscal Pro et celles données par le Syscal Junior.

Tableau IV-4 : Moyennes des rapports entre les mesures de Syscal Pro et les mesures de Syscal Junior en fonction de T et w

T (°C) w (%)	w ₁ = 11.6	w ₂ = 14.1	w ₃ = 16.8	w ₄ = 25
5	13.31	1.7	1.68	1.06
15	0.30	0.31	1.33	1.04
25	0.15	0.11	1.19	1.03
35	0.72	0.81	1.32	1.02
45	0.66	1.2	1.14	1.01

*mesure correcte (en vert) ; mesure moyenne (en orange) ; mesure impossible (en rouge)

En définissant une gamme d'erreur sur ce rapport de ± 0.2 , les résultats montrent les difficultés de mesure du Syscal Junior. Pour une teneur en eau de 14.1 %, la mesure est pratiquement impossible en dessous d'une température de 35 °C. Pour une teneur en eau de 16.8 %, la mesure n'est pas fiable en dessous de 15 °C. Nous rappelons que dans le cadre de notre étude préliminaire, les mesures ont été effectuées via le Syscal Junior pour des teneurs en eau évaluées à 13.48 et 13.94 %, ce qui semble ne pas être loin de la limite de mesure. Néanmoins, cela ne remet pas en question la fiabilité des mesures traitées dans cette étude

vue que la configuration β a été utilisée et le critère de la déviation standard maximale (répétabilité) a été vérifié.

Pour la suite de cette étude, seules les données fournies par le résistivimètre Syscal Pro seront traitées.

IV.3.2. Multiplexage des électrodes et évaluation de la résistivité homogène

En se basant sur les 4 électrodes installées sur chaque échantillon, les essais ont été menés en considérant les 3 configurations α , β et γ . Les résultats de résistances sont multipliés par le facteur géométrique correspondant à chaque configuration pour obtenir la résistivité. Les mesures de résistances et le résultat de la résistivité sont présentes dans la Figure IV-6, pour tous les échantillons conditionnés à $w_4 = 25\%$. Les résultats des autres teneurs en eau sont donnés dans l'Annexe 4.

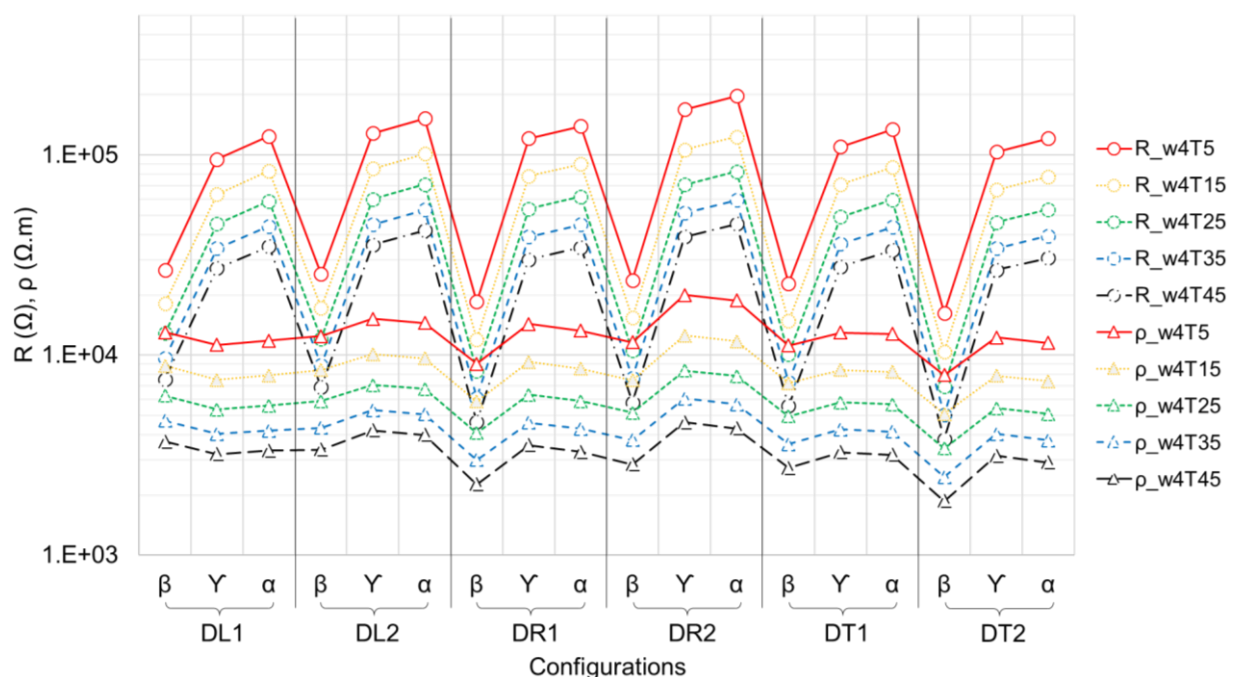


Figure IV-6 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_4 = 25\%$)

Pour chacun des échantillons, les résultats des mesures de résistances électriques mettent en évidence les 3 niveaux communs liés au facteurs géométriques. Plus le facteur géométrique est faible plus R est grand. On observe un niveau de résistivité relativement constant mis à part quelques points de mesure qui représentent une erreur significativement plus élevée par rapport à la moyenne, ce qui augmente significativement la dispersion entre les échantillons. La Figure IV-7 illustre l'exemple des données pour une teneur en eau $w = 25\%$ et $T = 25\text{ °C}$.

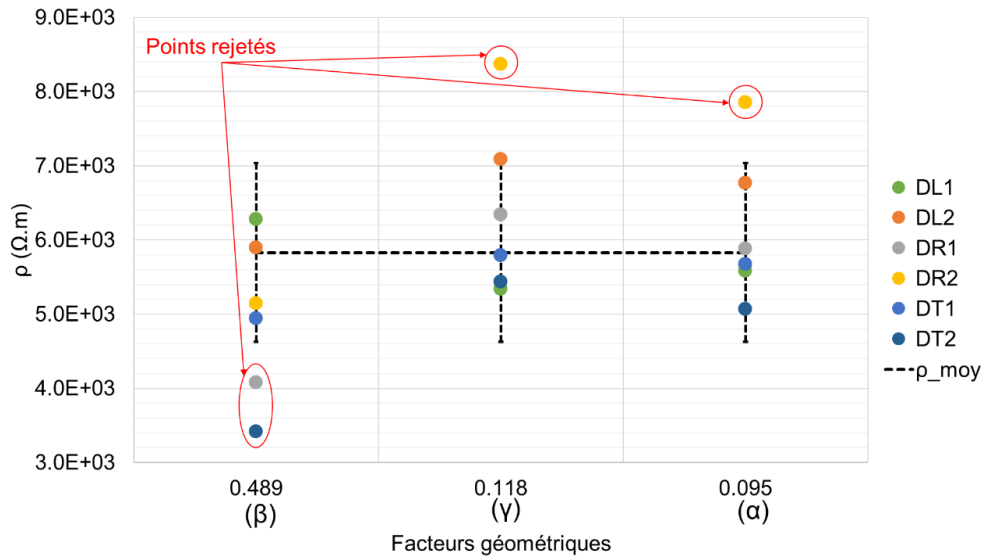


Figure IV-7 : Exemple de la sélection des points rejetés pour $w = 25 \%$ et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Cette représentation montre que ces points appelés en géophysique « bad data points » (Loke 2004), ne sont pas forcément liés à un échantillon ou une configuration donnée. Ces valeurs expérimentales aberrantes, qui représentent 20 % des 346 données de mesures, se manifestent dans certain cas par une déviation standard et/ou chargeabilité élevées et peuvent être les conséquences d'un mauvais contact électrode/bois ou d'un pic de courant lors du début de l'injection. Dans ces conditions, un tri des données doit être systématiquement réalisé.

En fonction des niveaux de w et de T , le Tableau IV-5 présente ainsi les résultats des résistivités calculées (ρ) et les écarts types correspondants (σ_ρ en %) par rapport à la moyenne. Nous rappelons que ces écarts types sont liés à la dispersion entre les échantillons en prenant en compte les 3 configurations testées pour chacun.

Tableau IV-5 : Résistivités moyennes et dispersion des mesures pour différents T et w

w (%)	T ($^\circ\text{C}$)	5	15	25	35	45
$w_1 = 11.6$	ρ ($\Omega.m$)	1.06E+06	8.53E+05	5.49E+05	4.29E+05	3.33E+05
	σ_ρ (%)	53.6	62.4	17.1	9.7	17
$w_2 = 14.1$	ρ ($\Omega.m$)	5.20E+05	2.84E+05	2.10E+05	1.43E+05	1.12E+05
	σ_ρ (%)	38.9	26.4	21.6	24.6	37.2
$w_3 = 16.8$	σ_ρ ($\Omega.m$)	1.53E+05	1.02E+05	6.51E+04	4.42E+04	3.29E+04
	σ_ρ (%)	17.7	12.9	14.3	13	11.8
$w_4 = 25$	ρ ($\Omega.m$)	1.27E+04	8.35E+03	5.80E+03	4.28E+03	3.33E+03
	σ_ρ (%)	9.9	10.4	10.9	11.4	12.5

IV.3.3. Résistivité électrique vs l'orthotropie du matériau

Comme présenté dans le §II.5.4, deux interprétations majeures sont proposées dans la littérature vis-à-vis la caractérisation de la mesure de résistance/résistivité en fonction de la nature du matériau. Le premier considère que la résistivité/résistance électrique dépend l'orthotropie du matériau, alors que le deuxième fait abstraction de cette orthotropie.

Dans l'objectif d'étudier ces interprétations, la Figure IV-8 reprend les moyennes de résistivités et ce, en fonction de l'orthotropie. Les écarts types prennent toujours en compte la dispersion des mesures entre les échantillons et les configurations des électrodes.

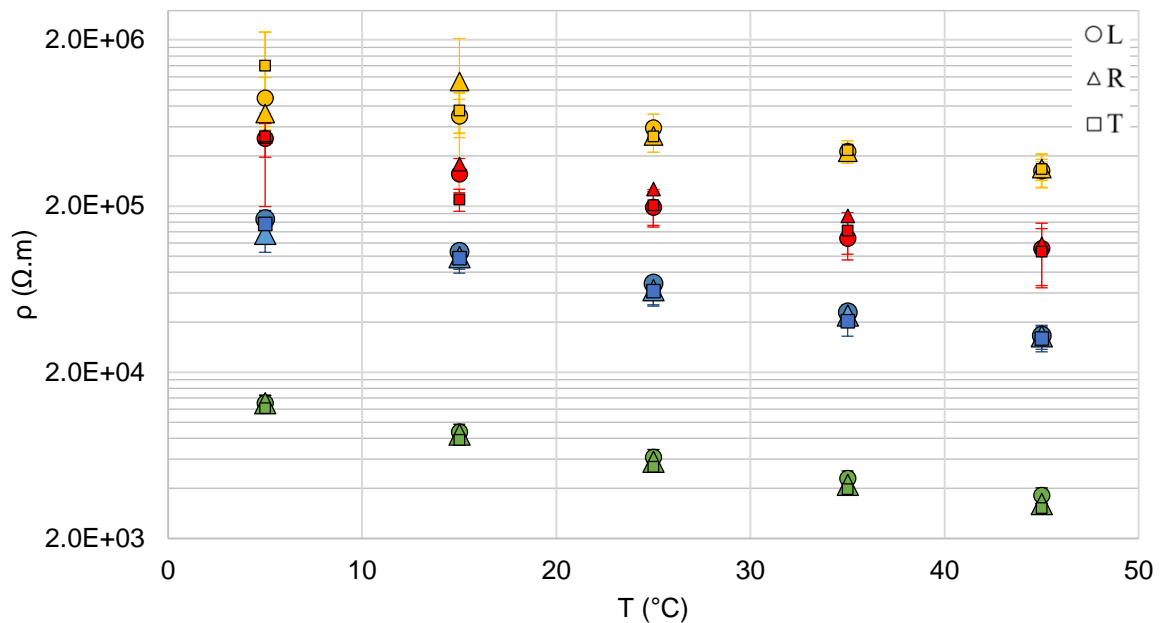


Figure IV-8 : Résistivités électriques pour les différentes directions L, R et T (en jaune : $w_1 = 11.6 \%$; en rouge : $w_2 = 14.1 \%$; en bleu : $w_3 = 16.8 \%$; en vert : $w_4 = 25 \%$)

Les résultats montrent des faibles variations de résistivités entre les différentes directions et aucune influence d'orthotropie n'a été observée, en particulier dans les cas où les teneurs en eau et les températures sont élevées (w_3 et $w_4 / 35$ et $45 \text{ }^{\circ}C$). Cependant, nous observons des variations plus importantes dans les cartes de données présentant des faibles teneurs en eau et températures basses. Néanmoins, ceci peut être attribué à la limite d'injection de courant du système de mesure par exemple, dans le cas de $w = 11.6 \%$ et $T = 5 \text{ }^{\circ}C$, la moyenne du courant injecté est $I_{AB} = 4.3 \mu A$ ce qui représente environ 2 fois la résolution d'injection du Syscal Pro.

Les résultats montrent ainsi que la méthode n'est pas adaptée pour différencier les résistivités dans les différentes directions, ce qui peut être lié au caractère indirect de la mesure. En effet, tous les travaux traitant l'influence de l'orthotropie sur la résistivité électrique sont basés sur des mesures directes (2 points), toutefois, aucune étude réalisée à ce jour n'a abordé une mesure à 4 points. Cependant, les résultats de notre étude sont en accord avec les observations publiés par Forsen et Tarvainen (2000) et Samuelsson (1990) qui ont souligné que l'effet de la direction des fibres peut être négligé dans le cas de la mesure de la résistance

électrique par courant continu. En pratique, l'égalité de la résistance selon L, R et T reste intéressante car elle élimine le facteur "orthotropie" en tant que variable dans la détermination de la relation qui relie la résistivité à la teneur en eau.

IV.3.4. Relation entre la résistivité et la température

L'étude qui suit porte sur l'influence de la température sur la mesure de résistivité électrique. Pour les différents teneurs en eau, nous présentons les résultats de l'évolution de la résistivité suite à l'application des différents chargements thermiques (Figure IV-9).

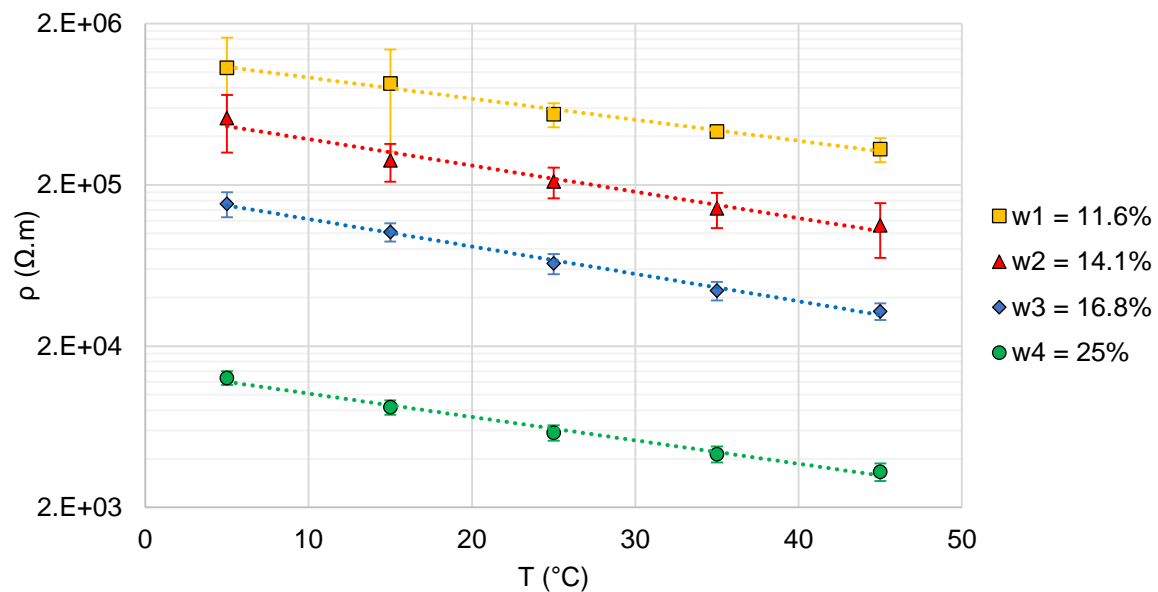


Figure IV-9 : Résistivités en échelle logarithme en fonction de la température pour différents niveaux de teneurs en eau

Les résultats montrent une évolution décroissante de la résistivité en fonction de la température. La tendance uniforme de décroissance confirme que la résistivité diminue quand on augmente la température, pour toute teneur en eau. Ce phénomène devrait donc être bien pris en compte pour obtenir une évaluation fiable de la teneur en eau.

Comme nous l'avons présenté dans le §II.5.3, le croisement entre le logarithme de la résistivité électrique et la température permet d'identifier les paramètres de la relation linéaire basée sur l'Eq. (II-12) et ce, pour une teneur en eau donnée. Ce modèle a été choisi car il est très utilisé dans la littérature (Skaar 1988; Carll et TenWolde 1996).

Les coefficients de régression notés k_T , C_2 et le coefficient de corrélation R^2 sont résumés dans le Tableau IV-6.

Tableau IV-6 : Les coefficients de régression de la relation linéaire résistivité-température pour différentes teneur en eau

Modèle : $\ln(\rho) = k_T T + C_2$			
w (%)	R ²	k_T	C_2
w ₁ = 11.6	0.98	-3.01E-02	14.04
w ₂ = 14.1	0.97	-3.75E-02	13.23
w ₃ = 16.8	0.99	-3.91E-02	12.11
w ₄ = 25	0.99	-3.35E-02	9.56

Comme attendu, les résultats montrent une valeur négative du paramètre k_T avec une valeur moyenne de $-3.51E-02 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. A une teneur en eau donnée, la constante de calibration C_2 peut être attribué par extrapolation, au logarithme de la résistivité à une température de référence égale à $0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Ce coefficient symbolise la variation de la résistivité par degré de température qui est principalement liée à la mobilité des ions dans le matériau (Kolavali 2013). Davidson (1958) a mentionné que k_T est pratiquement constant et ne dépend pas des essences. Pour la même gamme des températures (de 5 à $45 \text{ } ^\circ\text{C}$), Luo et al. (2020) trouvent pour un aubier, une valeur de $k_T = -3.41E-02 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et une valeur qui varie entre $-2.9E-02$ et $-4.1E-02 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour un duramen.

IV.3.5. Relation entre la résistivité et la teneur en eau

La Figure IV-10 présente les mesures de résistivité en fonction de la teneur en eau et de l'ensemble de niveaux de température testés. La dispersion de mesures due à la variabilité entre les échantillons et les configurations des électrodes est présentée par les barres d'erreur verticales. L'erreur d'estimation de la teneur en eau entre les échantillons (par pesée) est présentée par les barres d'erreur horizontales.

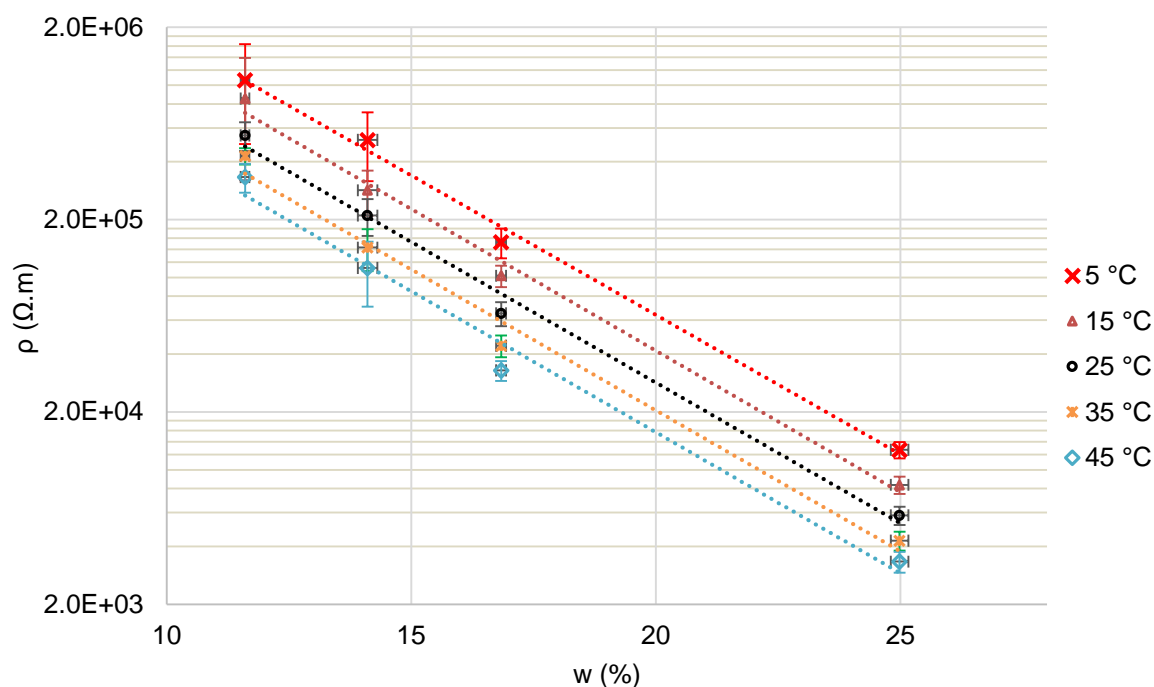


Figure IV-10 : Résistivités en fonction de la teneur en eau à différentes températures

Afin de présenter un modèle empirique sur la base de ces mesures, une loi de passage est établie en utilisant l'Eq.(II-3), définie pour une gamme de teneurs en eau entre 7 et 30 % et une température donnée (Stamm 1927).

Le Tableau IV-7 résume les coefficients de corrélation et de régression de la relation linéaire exprimant le logarithme de la résistivité électrique au logarithme de la teneur en eau.

Tableau IV-7 : Les coefficients de régression de la relation résistivité-teneur en eau à différentes températures

Modèle : $\ln(\rho) = k_w \ln(w) + C_1$			
T (°C)	R ²	k_M	C_1
5	0.99	-5.92	1.32
15		-6.05	6.83E-01
25		-6.01	3.72E-01
35		-6.04	-2.22E-02
45		-6.05	-2.96E-01

Les résultats montrent que le modèle utilisé satisfait la variation générale de la résistivité en fonction de la teneur en eau. Les valeurs négatives et relativement constantes de k_M prouvent

une évolution décroissante de la résistivité et ce, pour toute température comprise entre 5 et 45 °C. Cette tendance globale confirme qu'en dessous du PSF, l'eau est présente dans le matériau principalement sous forme d'eau liée, avec une distribution homogène. Cette tendance n'est pas la même si nous sommes dans le cas de l'eau libre présente dans les des cavités cellulaires (Hiroyuki Yamamoto et al. 2013; Li 2017).

Le Tableau IV-8 permet de faire une comparaison entre la valeur moyenne obtenue pour le coefficient $k_M = -6.01$ et des valeurs référencées dans la littérature.

Tableau IV-8 : Quelques exemples du coefficient k_M trouvés dans la littérature

Référence	Essence	Gamme de w (%)	k_M
A. J. Stamm (1929)	Pin d'Elliott	5 - 32	-5.99
Aoki, Tanaka, et Yamamoto (1998)	Araucaria hunsteinii	6 - 25	-6.16

Nous pouvons observer que nos résultats sont en cohérence avec les travaux de A. J. Stamm (1929) et de Aoki, Tanaka, et Yamamoto (1998). De plus, la valeur de k_M proposée par Nguyen (2014)

Cette cohérence est moins prononcée avec l'étude proposée par Nguyen (2014) présentant une valeur $k_M = -7.87$, malgré le fait que ce travail a été réalisé sur la même essence de bois. Plusieurs explications peuvent être à l'origine de cette différence :

- Les limites de l'outil de mesure : sachant que le résistivimètre utilisé dans cette étude est le Syscal Junior, nous avons bien montré dans §IV.3.1 les limites de cet appareil pour $w < 14$ % ;
- L'effet de l'échelle : cette étude a été réalisée dans le cadre d'une étude de diffusion hydrique unidirectionnelle sur un échantillon de dimensions 320x95x95 mm³. Par la suite, la loi de passage a été évaluée en tenant compte des profils spatio-temporels de la distribution de la teneur en eau ;
- Une mauvaise estimation de la teneur en eau : les mesures ont été effectuées dans le régime transitoire et la teneur en eau de départ a été estimée via le séchage d'un échantillon extrait de la même planche. Ce point sera traité plus en détails dans la Partie V.

IV.4. Identification globale de la loi de passage

Dans cette partie, la loi de passage reliant la teneur en eau à la résistivité électrique sera calibrée en fonction de la température. Afin de déterminer les paramètres de cette loi de passage, une identification globale reposant sur l'ensemble des données expérimentales sera utilisée. Cette identification regroupe donc les 4 niveaux de teneurs en eau, les 3 configurations des électrodes et les 5 niveaux de températures. L'effet de l'orthotropie du matériau sur la mesure de la résistivité a été négligé comme nous l'avons évoqué dans IV.3.3.

Afin de modéliser la dépendance de la teneur en eau à la résistivité électrique et à la température, nous avons choisi un modèle de calibration, largement utilisé dans la littérature

proposé par Carll et TenWolde (1996) et Norberg (1999). Ce modèle est basé sur le principe d'équivalence de l'influence de la teneur en eau et de la température sur la résistivité électrique. Le couplage des 2 modèles proposés dans les deux paragraphes précédents définit le logarithme de la résistivité selon l'Eq. (IV-4) où C_3 est un paramètre de calage.

$$\ln(\rho) = k_M \ln(w) + k_T T + C_3 \quad (\text{IV-4})$$

En utilisant les valeurs moyennes des coefficients k_M et k_T , le modèle peut être écrit comme suit :

$$\ln(\rho) = -6.01 \ln(w) - 3.41 \cdot 10^{-2} T + C_3 \quad (\text{IV-5})$$

La fonction objective de la méthode de moindres carrées est établie en prenant en compte les erreurs entre les données mesurées et modélisées et ce, à différentes teneurs en eau et températures. En optimisant cette fonction par le solveur d'Excel, la valeur du paramètre de calage est calculé avec $C_3 = 1.29$.

L'arrangement de l'Eq. (IV-5) permet d'exprimer le logarithme de la teneur en eau comme suit:

$$\ln(w) = \frac{1}{k_w} \ln(\rho) - \frac{k_T}{k_w} T - \frac{C_3}{k_w} \quad (\text{IV-6})$$

L'application numérique donne :

$$\ln(w) = -1.66 \cdot 10^{-1} \ln(\rho) - 5.83 \cdot 10^{-3} T + 2.14 \cdot 10^{-1} \quad (\text{IV-7})$$

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué une approche mixte basée sur le couplage de la mesure de la résistance électrique et la modélisation numérique par éléments finis, afin d'évaluer la résistivité électrique pour des échantillons homogènes en termes de teneur en eau.

Dans un premier temps, nous avons mis en place une étude préliminaire pour identifier l'effet de certains paramètres expérimentaux liés à l'outil de mesure, à savoir le mode (résistif ou capacitif) et la durée d'injection. Cette étude favorise le choix du mode capacitif (mode RhoIP) en fixant la durée d'injection à 2 s ce qui diminue légèrement l'effet de la chargeabilité. Cette étude a porté aussi sur l'effet de la configuration d'électrodes sur la mesure de la résistance électrique et a montré les limites d'injection de courant du résistivimètre Syscal Junior vis-à-vis la configuration α et ce, à une teneur en eau de 14 %. Une deuxième étude a été réalisée afin d'étudier l'effet de l'application de différents chargements thermiques sur la mesure de la résistivité électrique du bois. Il s'avère nécessaire de prendre en compte le temps nécessaire pour atteindre la stabilité des mesures résistives lors de la modification brusque du niveau de température.

Suite à ces constats, nous avons proposé une étude paramétrique dans le but d'établir une loi de passage résistivité-teueur en eau qui prend en compte l'effet de la température. Pour ce faire, il a d'abord fallu identifier les limites de l'outil de mesure en comparant les 2

résistivimètres Syscal Junior et Syscal Pro. Cette étude a montré la difficulté d'atteindre des mesures fiables à faibles teneurs en eau et températures dans le cas du Syscal Junior. Le verrou induit par la faible résolution de courant de ce système dans un matériau sec peu conducteur, a été levé en ayant recours à un système de mesure plus performant (Syscal Pro).

Nous avons montré ainsi la capacité de la mesure électrique multiplexée à dissocier les mesures résistives entre les différents chargements thermo-hydriques. Cela a été réalisé tout en étudiant l'influence de la température (de 5 à 45 °C) et la teneur en eau (de 11.6 à 25 %) sur les mesures de résistivité et d'évaluer donc les paramètres de la loi de passage.

Au regard des résultats obtenus dans ce chapitre, nous proposons d'élargir le champ d'application de notre approche afin de vérifier son applicabilité à différentes échelles dimensionnelles. Dans la partie suivante, nous présentons dans un premier temps, une application réalisée sur un échantillon de dimensions décimétriques tout en restant sur des conditions hydriques contrôlées en laboratoire. Dans un deuxième temps, une application in-situ sera présentée.

Partie V. Applications à différentes échelles

V.1. Introduction

L'évaluation de l'humidité interne dans un élément massif de type poutre devrait permettre de faire une nette avancée dans la connaissance du comportement à long terme et de la durabilité des structures bois. Il est donc important de promouvoir un outil de mesure qui offre une gamme de réponses permettant de traiter des applications sur des échelles dimensionnelles autres que l'échelle laboratoire. En se basant sur la démarche expérimentale et numérique proposée dans cette thèse, nous proposons dans cette partie de présenter deux applications basées sur les mesures résistives multiplexées et ce, à des échelles dimensionnelles plus grandes que l'échelle centimétrique. Etablir le lien entre les applications laboratoire et in-situ devrait permettre à cette approche de devenir plus pertinente. Cela est indispensable pour aboutir, à terme, à des cartographies robustes d'hygrométrie dans des éléments massifs.

Toujours en étudiant l'essence Douglas-fir, la première application a pour objectif d'explorer la capacité de l'imagerie électrique à caractériser la distribution de la teneur en eau dans un échantillon de dimensions décimétriques. Ce travail fait la suite de l'étude réalisée dans le cadre de la thèse de Nguyen (2014).

La deuxième application propose la surveillance in-situ d'un poteau assurant la stabilité d'une charpente afin d'évaluer son état hydrique. Cette solution repose sur l'utilisation des éléments d'assemblage comme électrodes d'injection et de mesure de tension.

V.2. Echelle laboratoire intermédiaire

Cette section présente une étude de caractérisation de la diffusion hydrique appliquée sur un échantillon (noté D21) de dimensions décimétriques.

Dans le cadre de cette étude, nous présentons d'abord le protocole expérimental, ensuite le modèle éléments finis et l'inversion numérique utilisée pour minimiser l'erreur entre les données expérimentales et numériques. En déterminant la répartition spatiale du taux d'humidité, les mesures de résistivité serviront pour identifier une loi de passage résistivité-teneur en eau.

V.2.1. Protocole expérimentale

L'échantillon de Douglas-fir (D21) de dimensions 320x95x95 mm³ est utilisé dans cette étude. Il a été usiné selon les directions d'orthotropie (L, R et T), comme le montre la Figure V-1. Afin de provoquer une diffusion hydrique longitudinale pendant la phase d'adsorption, 5 faces sur 6 sont étanchéifiées en utilisant 2 couches de parafilm. On peut ainsi faire l'hypothèse d'une répartition hydrique homogène (et donc d'une résistivité constante) dans la direction transverse.

L'échantillon a été instrumenté d'une ligne de 21 électrodes en aiguilles non isolées de rayon 1 mm, espacées de 15 mm et enfoncées de 10 mm dans la facette supérieure (LT) et parallèlement à l'orientation des fibres.

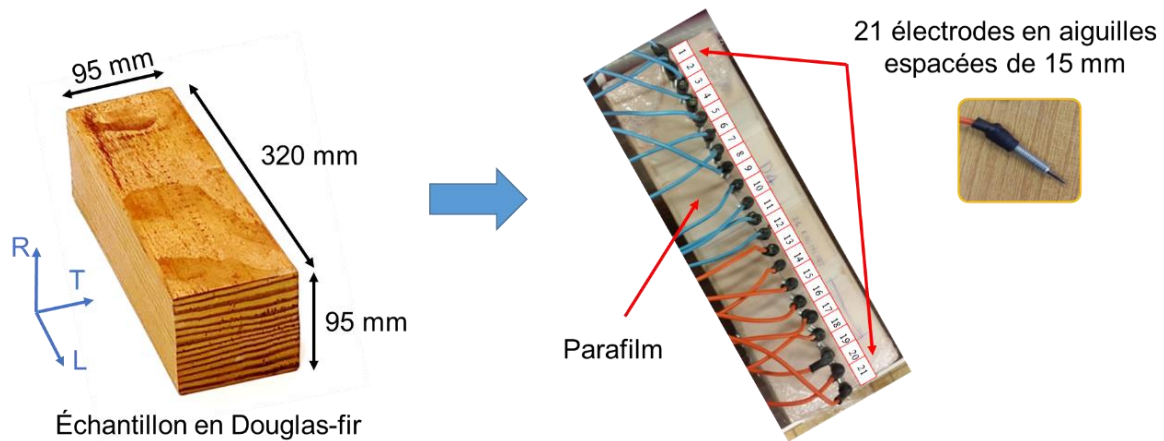


Figure V-1 : Instrumentation de l'échantillon D21

L'échantillon a été conditionné dans un dessiccateur régulé à une HR de 86% via une solution saline de Chlorure de Potassium (KCl). La température ambiante de la salle dans laquelle le dessiccateur a été installé n'est pas contrôlée. Cependant, des faibles variations de $\pm 2^\circ\text{C}$ ont été notées pendant toute la durée de l'étude. Les mesures ont été effectuées en conservant l'échantillon dans le dessiccateur. En effet, ce dernier a été modifié afin de pouvoir passer le câble du résistivimètre Syscal Junior, ce qui permet d'éviter de sortir l'échantillon durant les injections électriques (Figure V-2).

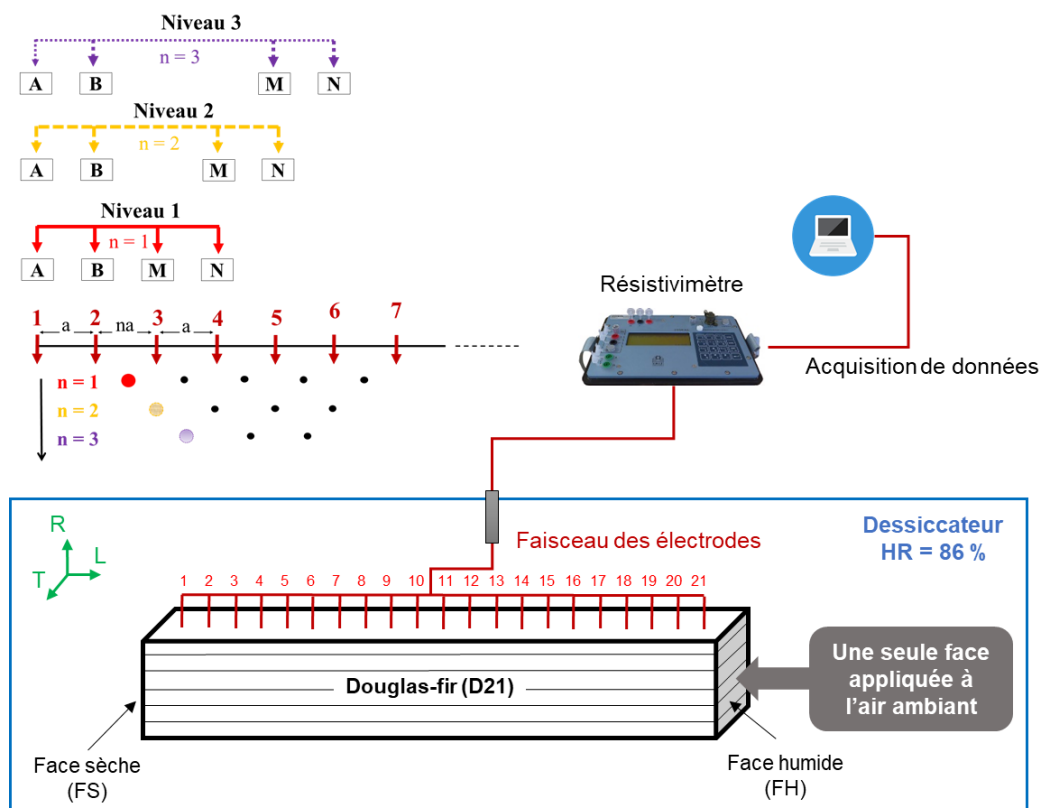


Figure V-2 : Protocole expérimental pour l'échantillon D21

Ce protocole expérimental a été proposé pour l'évaluation d'un gradient d'humidité unidirectionnel. Afin de construire une cartographie de résistances, le mode multi-électrodes multiplexé permet d'obtenir une répartition spatiale des mesures de la résistance $R = |\Delta V_{MN}/I_{AB}|$. La configuration Dipôle-Dipôle a été choisie de par son faible couplage électromagnétique entre les lignes de courant et de potentiel et sa forte densité de points de mesures. Le choix de cette configuration est également en cohérence avec les résultats des études précédentes (§IV.2.2). Une durée d'injection de 2 s a été fixée.

Le multiplexage a été effectué en deux étapes : un balayage horizontal en maintenant constante la distance a entre les électrodes A, B, M et N, l'ensemble se déplaçant le long d'un profil de l'échantillon, et un balayage vertical avec trois niveaux de profondeurs d'investigation $n = \{1, 2, 3\}$.

Dans le cadre de la thèse de Nguyen (2014), des mesures électriques ont été prises d'une façon ponctuelle à partir de 217 jours puis à 245, 287, 313, 352 et 398 jours depuis le début de l'expérience. A l'issue de ce travail, les mesures ont continué pendant une période prolongée. La base de données a donc été complétée avec des mesures prises après 457, 537 et 1092 jours. L'échantillon est finalement passé à l'étuve et pesé pour évaluer sa teneur en eau moyenne aux différents instants d'injection électrique. Son évolution en fonction de la durée de conditionnement est présentée dans la Figure V-3.

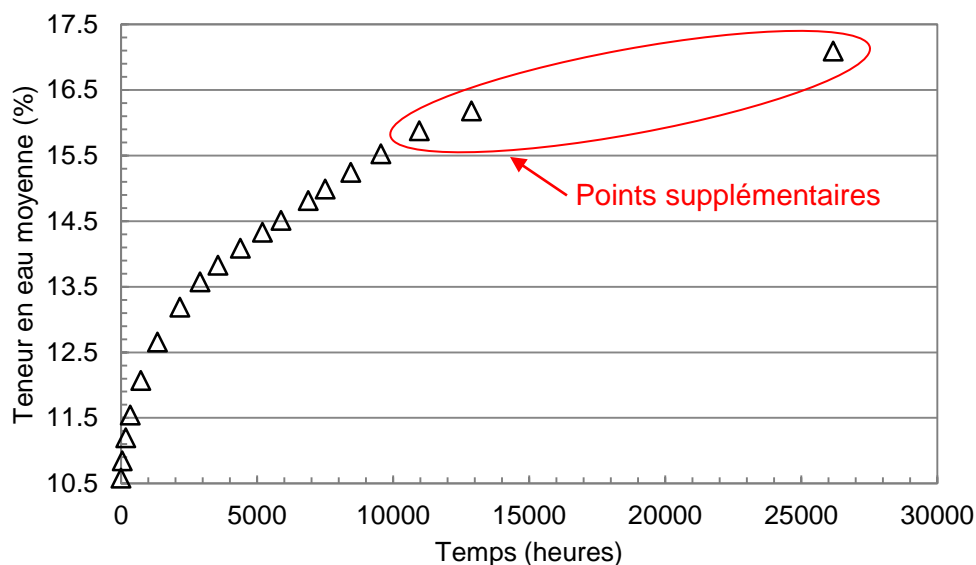


Figure V-3 : Evolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon D21

V.2.2. Modèle éléments fini et inversion numérique

Une approche par inversion numérique, basée sur la minimisation de l'erreur entre les résistances mesurées expérimentalement et celles calculées numériquement, est utilisée pour déterminer la distribution de la résistivité dans le profil longitudinal de l'échantillon (Minh Dung et al. 2018). Le modèle direct intègre la géométrie réelle de l'échantillon avec une densité de maillage qui diminue progressivement jusqu'au bords et ce, pour réduire le temps de résolution. Les électrodes en aiguille non isolées y sont modélisées comme des demi-cylindres de rayon 1 mm et de longueur 10 mm. Ces électrodes sont implantées avec un espacement

de 15 mm afin de simuler la procédure de multiplexage d'injection de courant et de calcul de potentiels du protocole expérimental.

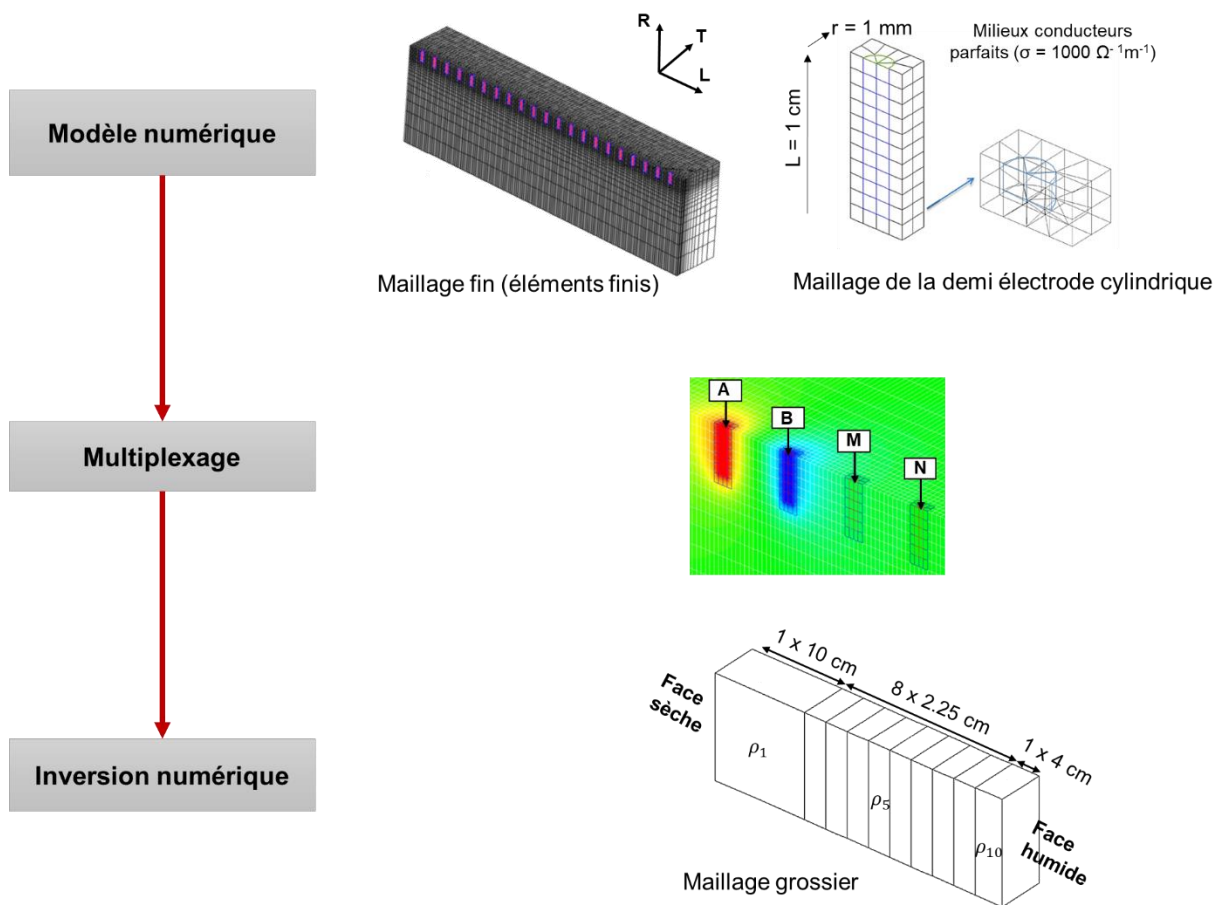


Figure V-4 : Modèle numérique, multiplexage et grille de discrétisation

Par ailleurs, l'échantillon est divisé en 10 tranches (ρ_1, \dots, ρ_{10}) de largeurs variables (plus épaisses aux bords et en particulier à celui correspondant à la face sèche ρ_1) qui présenteront une valeur de résistivité homogène. Lors de la procédure d'inversion, ce maillage « grossier » sera projeté sur un maillage plus fin incluant les électrodes. De manière générale et pratique, nous cherchons à identifier les M conductivités électriques (Eq. (IV-1)) correspondant à chaque tranche, dont nous déduisons le vecteur de résistivité :

$$m_{\text{résistivité}} = \left(\frac{1}{m_1}, \frac{1}{m_2}, \dots, \frac{1}{m_M} \right) \quad (\text{V-1})$$

A cette fin, les résistances mesurées sont considérées sous la forme d'un vecteur de N données (avec N dépendant du multiplexage). Le problème direct est alors défini comme la fonction $f(m)$, dont le résultat est un vecteur composé des résistances calculées par le modèle direct. La résolution d'un problème inverse nécessite d'optimiser les paramètres du modèle pour réduire l'écart entre données mesurées et calculées, par le biais de la fonction objective suivante :

$$F = (\Delta d - J\Delta m)^T \cdot (\Delta d - J\Delta m) \quad (V-2)$$

où $\Delta d = d - f(m_0)$ est la différence entre les données mesurées et calculées.

La convergence de l'inversion s'obtient par l'application d'une perturbation Δm au modèle initial m_0 . Les NxM coefficients de la matrice Jacobienne représentent la sensibilité de la mesure en un point à une variation des paramètres du modèle et sont calculés sous la forme suivante :

$$J_{i,j} = \frac{f_i(m_j + \Delta m_j) - f_i(m_j)}{\Delta m_j} \quad (V-3)$$

Le modèle d'inversion s'appuie ici sur l'algorithme de Levenberg-Marquadt (Marquardt 1963) suivant l'expression :

$$\Delta m = (J^T J + \lambda W_m)^{-1} J^T \Delta d \quad (V-4)$$

avec W_m une matrice identité MxM.

Ce modèle inclut donc un facteur d'amortissement λ variable, permettant de converger vers une solution réaliste. Lors de la première itération, il est fixé à une valeur suffisamment élevée (10^6) au regard des termes de la matrice Jacobienne. Aux itérations suivantes et selon le sens de l'évolution de la fonction objective, la perturbation Δm est calculée soit avec une diminution d'un facteur 0.2 soit une augmentation d'un facteur 10 du facteur d'atténuation. Un critère d'arrêt f_m fixé à 10^{-3} , est basé sur la variation des paramètres entre deux itérations successives :

$$\left| \frac{m_{i+1} - m_i}{m_i} \right| \leq f_m \quad (V-5)$$

Indépendamment de l'algorithme d'inversion, les résultats dépendent directement de la qualité des mesures du résistivimètre avec de longues lignes de courant dans ce milieu très résistif.

V.2.3. Champ hydrique homogène

Dans ce paragraphe, nous nous focalisons sur la dernière mesure prise après 1092 jours afin de vérifier l'homogénéité de la distribution de la teneur en eau tout au long de l'échantillon. Les mesures ont été effectuées selon 2 directions de multiplexage N (pour Normal) et R pour « Reverse » définies comme suit :

- la direction N est définie de la face sèche (FS) vers la face humide (FH) (Figure V-2) ;
- la direction R est définie de la FS vers la FH en inversant le faisceau des électrodes manuellement.

Le multiplexage permet d'obtenir 51 points de mesures possibles dans chaque sens.

Afin de déterminer les valeurs de résistivité associées aux mesures de résistances obtenues, nous avons eu recours à la méthode inverse de minimisation des écarts entre ces mesures et les résistances calculées par la méthode numérique.

V.2.3.1. Mesures dans la direction N

A cause d'un défaut de manipulation, les mesures incluant l'électrode 21 n'ont pas été effectuées dans la direction N, ce qui réduit le nombre de données de 51 à 48. Un premier diagnostic basé sur la vérification du critère de déviation standard ($Q < 5\%$) révèle un problème au niveau de l'électrode 15 quand elle est impliquée dans l'injection au moment de la prise de mesures (Tableau V-1). Cela est dû peut-être à un mauvais contact ou une mauvaise mise en place des électrodes (défaut d'enfoncement) au moment de la mesure.

Dans un premier temps, l'ensemble des 48 données expérimentales (les quadripôles avec l'électrode 15 sont inclus) sont introduites dans l'algorithme d'inversion. Ensuite, les mesures de résistances présentant une déviation standard élevée sont éliminées, ce qui réduit le nombre de quadripôles de 48 à 42. Ces mesures sont utilisées pour effectuer une seconde inversion numérique. Les résultats d'inversion sont présentés dans la Figure V-5.

Tableau V-1 : Les quadripôles présentant une déviation standard élevée dans la direction N

A	B	M	N
14	15	16	17
14	15	17	18
15	15	18	19
15	16	17	18
15	16	18	19
15	16	19	20

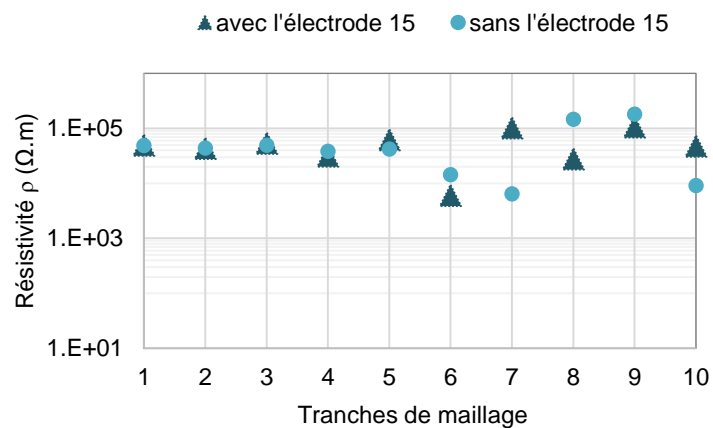


Figure V-5 : Résultats d'inversion pour la direction N

Les résultats de l'inversion numérique montrent une différence significative au niveau de certaines valeurs de résistivités obtenues après le tri sur l'ensemble des quadripôles obtenus dans la direction N. Cette différence touche particulièrement les 5 dernières tranches du maillage dans lesquelles l'électrode 15 est impliquée. En effet, la zone d'influence dépend de la position des quadripôles éliminés. Par conséquent, la nécessité d'un tri de données expérimentales apparaît fondamentale afin de corriger les données et améliorer donc, la qualité de l'inversion numérique.

V.2.3.2. Algorithme de tri de données

Les mesures obtenues dans la direction R présentent des valeurs de déviation standard très faibles pour les différents quadripôles ($Q < 5\%$). Cela est dû probablement à un meilleur contact au moment de la prise de mesures. Nous proposons par la suite un algorithme de tri pré-inversion prenant en compte les données expérimentales obtenues par les deux directions de multiplexage. L'idée est d'utiliser les données de la direction R, présentant une déviation minimale, pour valider notre algorithme tout en maximisant le nombre de données fiables qui seront introduites dans l'algorithme d'inversion.

L'algorithme, présenté dans la Figure V-6, est basé sur 3 critères fondamentaux :

- Le seuil de déviation standard maximal de 5% ;
- La symétrie entre les mesures de résistances dans les deux directions N et R validée à l'échelle laboratoire dans le §IV.2.2 ;
- La prise en compte du seuil d'injection de courant du résistivmètre Syscal Junior expliqué dans le §III.2.3.

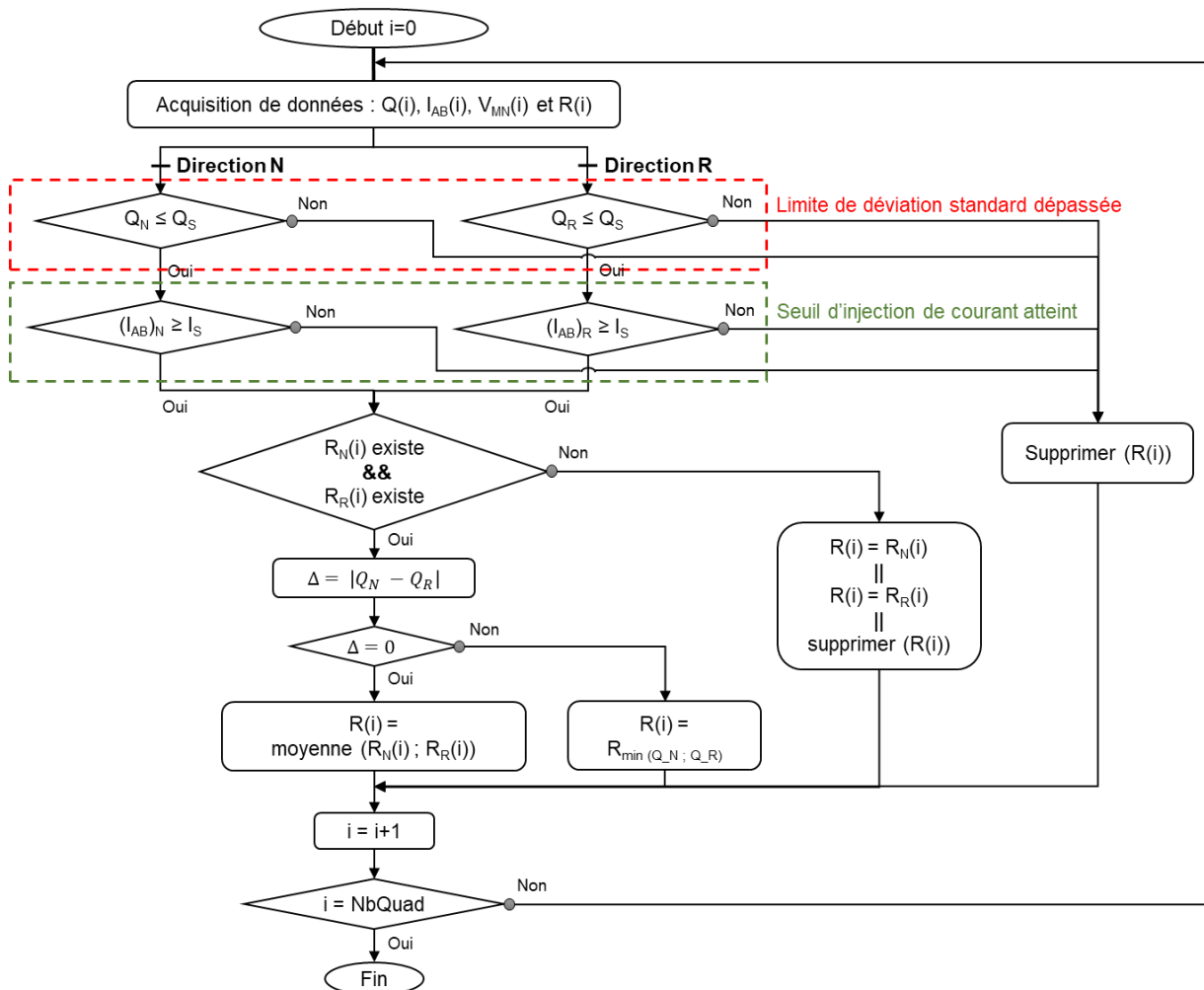


Figure V-6 : Principe de l'algorithme de tri de données pré-inversion

avec :

- $R(i)$: les mesures de résistances pour le quadripôle i , avec $R = |\Delta V_{MN}/I_{AB}|$;
- N, R : les directions de multiplexage « Normal » et « Reverse », respectivement.
- $Q_{N,R}$: la déviation standard du quadripôle i dans la direction N ou R ;
- Q_s : le seuil de la déviation standard fixé par l'opérateur ($Q_s = 5\%$) ;
- I_{AB} : le courant injecté entre les dipôles A et B ;
- I_s : le seuil d'injection du courant (limite matériel), $I_s = 2 \mu A$.

Afin d'évaluer l'efficacité du tri de données, la Figure V-7 montre les résultats de résistivités après inversion et ce, en utilisant les données de N, R et les données après l'application du tri de données.

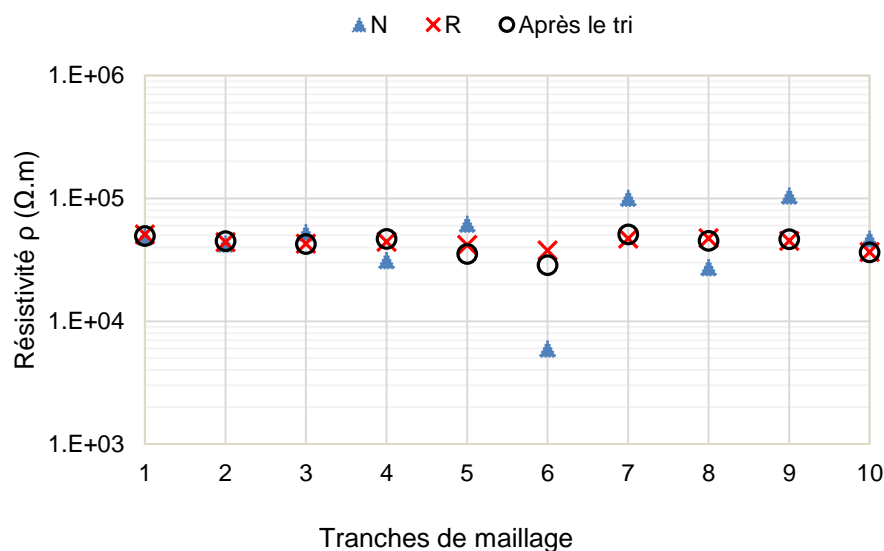


Figure V-7 : Résultats d'inversion des mesures dans la direction N, R et après tri

Ce tri nous a permis de récupérer les données manquantes de l'électrode 21 grâce aux mesures de la direction R, par la suite, 51 points de mesures ont alimenté l'inversion numérique.

Nous observons dans la direction N des niveaux de résistivités très variables, ce qui n'est pas en cohérence avec l'homogénéité attendue dans l'échantillon. Comme attendu, ces niveaux sont relativement constants dans la direction R, quelle que soit la position sur l'échantillon. Les résultats obtenus après tri sont similaires à ceux de la direction R et corrigent dans le bon sens ceux de la direction N. Le résultat du tri montre bien une distribution de résistivités en cohérence avec l'homogénéité de la teneur en eau attendu avec une résistivité moyenne de $4.38E+04 \Omega.m$ et un écart type de $4.36E+03 \Omega.m$.

Ces résultats montrent que le tri de données expérimentales avant d'appliquer l'inversion numérique est une étape primordiale permettant de favoriser la réduction de l'écart entre les données expérimentales et celles du modèle numérique.

V.2.4. Champ hydrique hétérogène : diffusion hydrique

Dans ce paragraphe, nous nous focalisons sur l'ensemble des données de résistivités mesurées et de teneurs en eau moyennes déterminées tout au long de l'expérience. Dans un premier temps, grâce aux points supplémentaires, le modèle de diffusion est mis à jour en utilisant la méthode des différences finies. Dans un deuxième temps, ces paramètres de diffusion sont utilisés pour reproduire des profils spatiaux numériques de teneurs en eau correspondant aux temps de mesures. Le couplage de ces profils avec les mesures spatiotemporelles de résistivité permettra par la suite d'identifier une loi de passage résistivité-teneur en eau.

V.2.4.1. Mise à jour des paramètres de diffusion par méthode inverse

L'objectif de l'étude exposée dans ce paragraphe est d'utiliser une méthode d'estimation des paramètres de diffusion (Eq. (I-4) à savoir :

- Le coefficient de diffusion anhydre D_0 (m^2/s) ;
- Le coefficient de non linéarité k ;
- Le coefficient d'échange surfacique S (m/s) ;
- Les teneurs en eau initiale w_{ini} (%) et d'équilibre w_{eq} (%) dans l'échantillon.

Pour cela, nous utilisons une approche basée sur la loi de Fick non linéaire (Eq. (I-3) permettant de représenter la diffusion hydrique en régime transitoire. Cette approche a été développée dans le cadre de la thèse de Nguyen (2014) en utilisant la méthode des différences finies (DF).

Afin d'identifier les paramètres de diffusion mentionnés ci-dessus, un algorithme d'inversion basé sur la méthode du simplexe, a été utilisé pour minimiser en premier temps l'écart entre les données expérimentales de la teneur en eau moyenne obtenue par pesée et les données obtenues par la méthode DF. En deuxième temps, l'identification est complétée par le développement de profils spatiaux de teneur en eau dans l'épaisseur de l'échantillon.

Cette approche a été validée par plusieurs tests de comparaison avec des profils spatiaux de teneur en eau disponibles dans la bibliographie, et aussi avec des mesures spatiales de teneurs en eau prises par la méthode gammadensimétrique (Nguyen et al. 2017).

En tenant compte des données supplémentaires, nous avons donc utilisé la même approche pour modéliser l'évolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon. Les teneurs en eau moyenne prises par pesée et l'évolution de la teneur en eau modélisée sont présentées dans la Figure V-8.

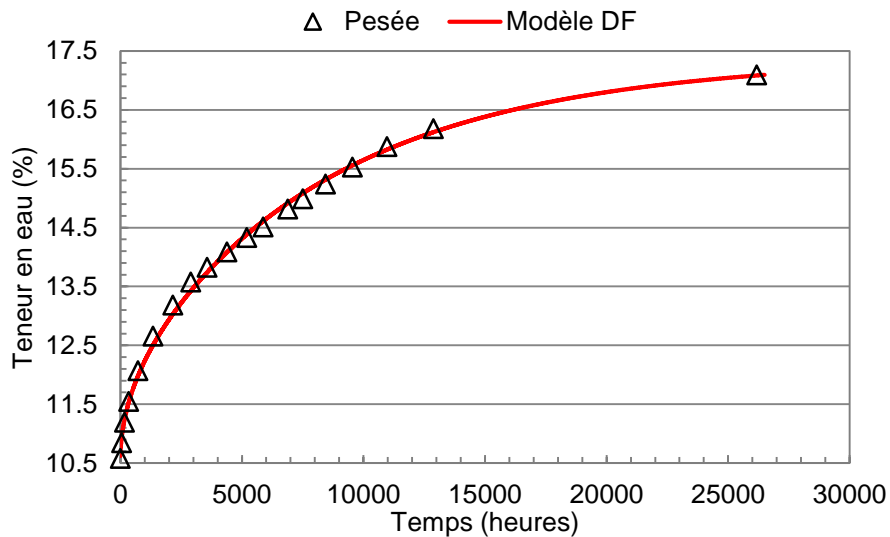


Figure V-8 : Comparaison de la teneur en eau moyenne par pesée et celle du modèle par différences finies (DF)

Nous pouvons observer une bonne superposition du modèle avec l'évolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon. Les paramètres de diffusion identifiés sont résumés dans le Tableau V-2.

Tableau V-2 : Identification des paramètres de diffusion pour l'échantillon D21

Paramètres de diffusion	Résultats
D_0 (m ² /s)	3.02E-09
k	-5.23
S (m/s)	5.63E-07
w_{ini} (kg/kg)	0.106
w_{eq} (kg/kg)	0.174

Les résultats obtenus avec un coefficient de non linéarité $k \neq 0$ et un faible coefficient d'échange surfacique S confirment la non-linéarité du processus de diffusion (échange par convection hydrique). La détermination de la teneur en eau initiale par la pesée et l'ajout des points supplémentaires, ont permis également de calibrer les teneurs en eau initiales et d'équilibre, en effet, cette dernière passe d'environ 15 % (Nguyen 2014) à 17.4 %.

Nous proposons par la suite d'utiliser ces paramètres de diffusion pour reproduire les profils spatiaux temporels de teneur en eau tout le long de l'échantillon D21 comme présenté dans la Figure V-9.

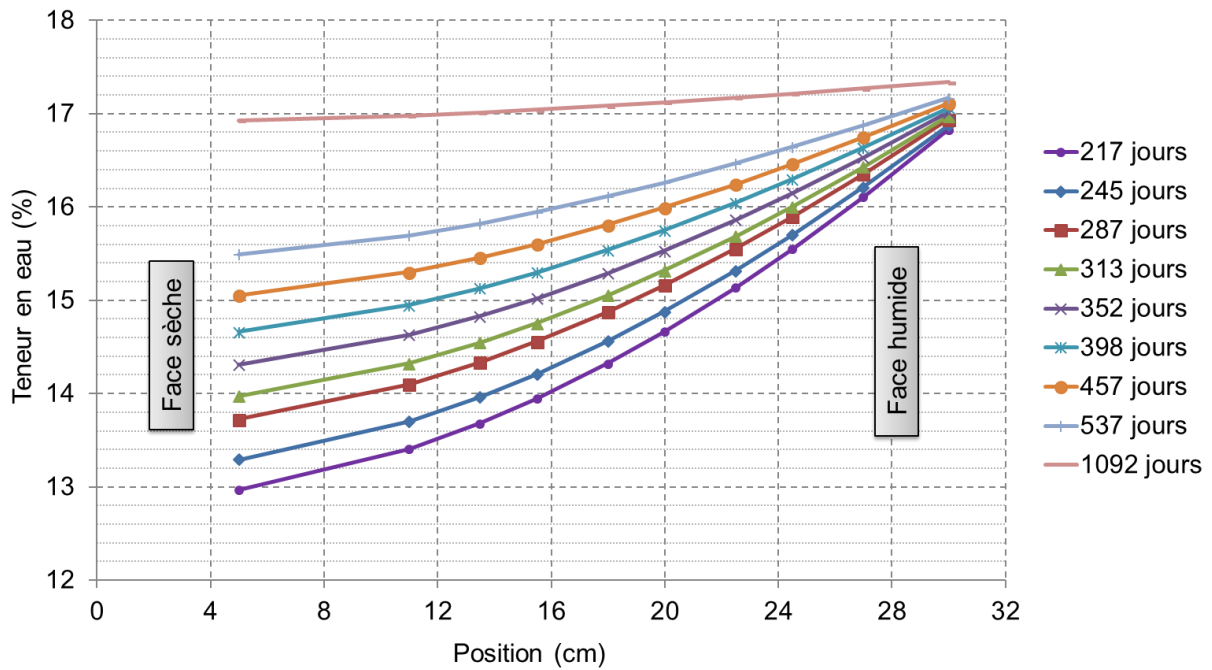


Figure V-9 : Résultats numériques des profils spatiaux temporels de la teneur en eau pour l'échantillon D21

Les résultats montrent une gamme de teneur en eau qui varie de 12.97 à 17.34 %. Ces profils seront donc comparés aux mesures électriques dans le paragraphe suivant afin d'identifier les paramètres de la loi de passage résistivité-teneur en eau.

V.2.4.2. Identification des paramètres de la loi passage.

La démarche repose sur la comparaison des profils de résistivité électrique obtenus tout au long de l'expérience, avec les profils spatiaux de teneur en eau identifiées numériquement.

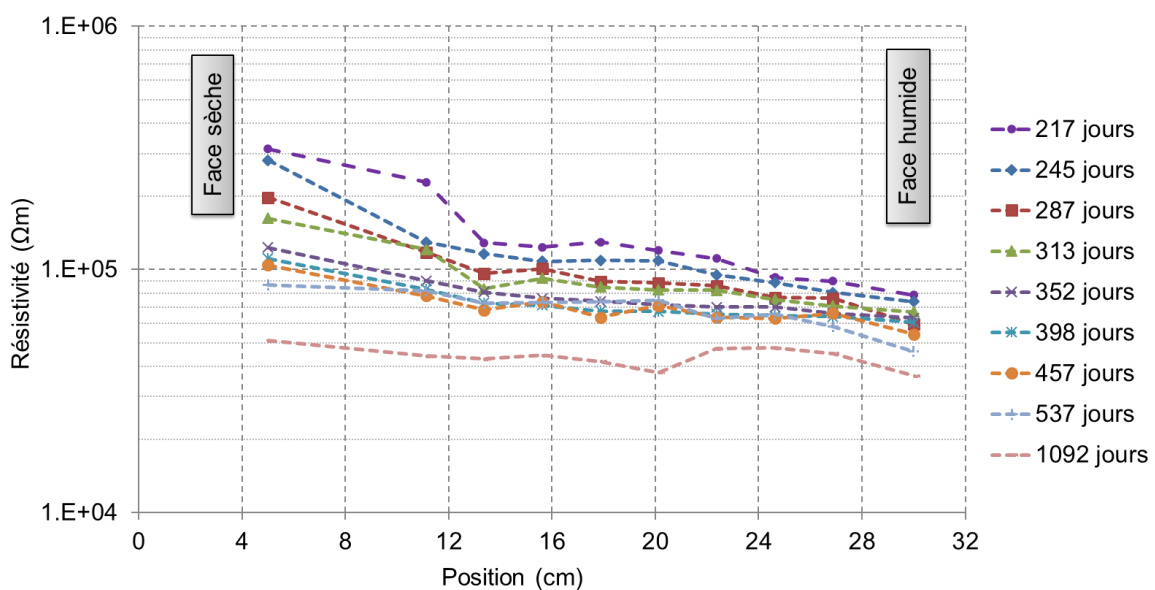


Figure V-10 : Profils spatiaux de résistivités électriques

Les résultats montrent bien que le gradient de résistivité évolue de la face sèche vers la face humide de l'échantillon selon la direction longitudinale. Les mesures varient de $3.66E+04$ à $3.13E+05 \Omega.m$.

A température constante, la loi de passage, qui relie les profils de résistivité au profil de teneur en eau correspondant, est déterminée par régression linéaire afin d'évaluer les paramètres k_w et C_1 de l'Eq. (II-3). Cette identification est faite selon deux méthodes comme le montre la Figure V-11 :

- Identification globale : cette approche repose sur l'exploitation de l'ensemble de cartes de données spatio-temporelles de résistivités et de teneurs en eau. La régression linéaire permet de réévaluer le paramètre k_w qui passe de -7.87 (Nguyen 2014) à -4.94.
- Identification pondérée : afin d'équilibrer le poids des mesures de résistivité, les données sont pondérées en fonction de la teneur en eau avec un pas de 0.5 %. Cette approche permet d'obtenir $k_w = -6.25$. Nous observons que le résultat de cette identification est en cohérence avec le résultat de l'étude paramétrique présentée dans §IV.3.5 où $k_w = -6.01$.

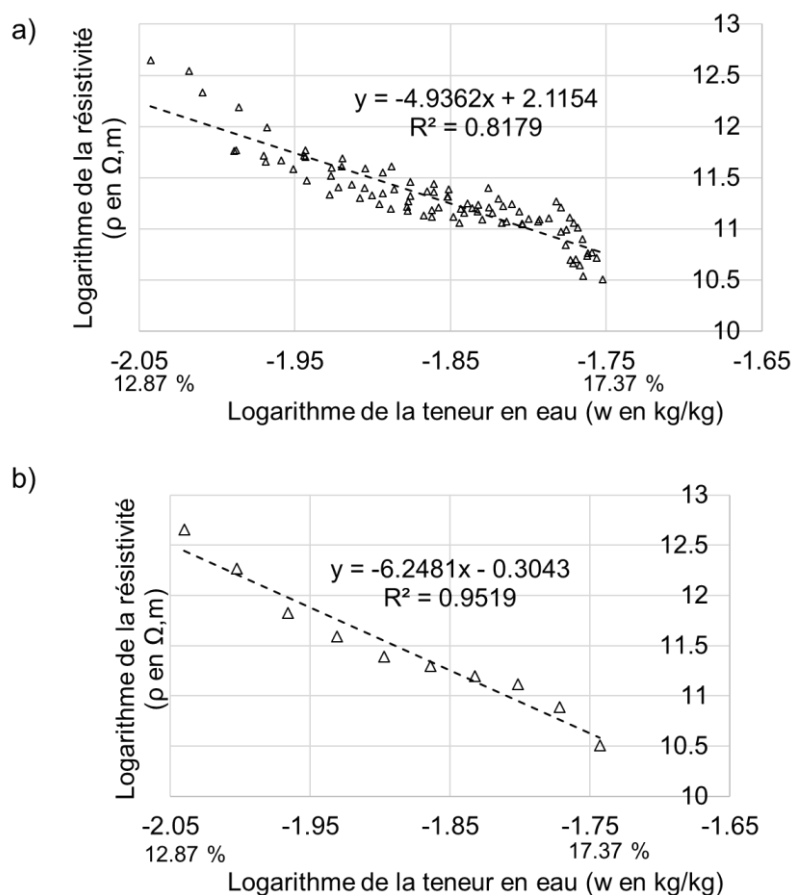


Figure V-11 : Identification globale et pondérée des paramètres de la loi de passage

Au regard de l'application de ces deux approches, nous remarquons que l'enrichissement de la base de données apporté par les données supplémentaires a permis d'une part, d'élargir

la gamme de la teneur en eau étudiée et d'autre part, de corriger dans le bon sens les paramètres de la loi de passage résistivité-teneur en eau à température constante (§IV.3.5).

V.2.5. Synthèse bibliographique

La Figure V-12 regroupe les données de résistivité électrique obtenues à l'échelle laboratoire (à différentes températures) (§IV.3.5) et les données spatio-temporelles obtenues à l'échelle laboratoire intermédiaire.

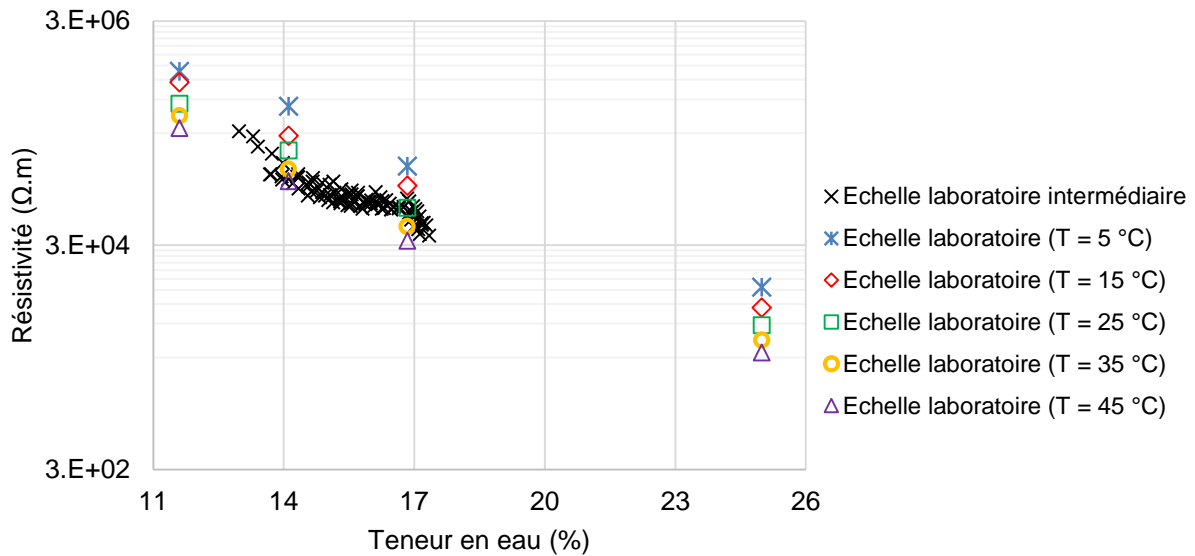


Figure V-12 : Données de résistivité (échelles laboratoire et laboratoire intermédiaire)

Nous observons une évolution relativement homogène de l'ensemble de données en fonction de la teneur en eau. Les résultats montrent également la dispersion des données correspondantes à l'échelle laboratoire intermédiaire, ce qui peut être expliqué par les limites du résistivimètre Syscal Junior et les variations de la température ambiante durant les injections électriques.

Nous proposons de comparer l'ensemble de ces données collectées via l'utilisation des mesures résistives par rapport à la bibliographie existante. Pour cela, les résultats de nos études sont superposés avec les données que nous avons trouvés dans la bibliographie (Figure V-13).

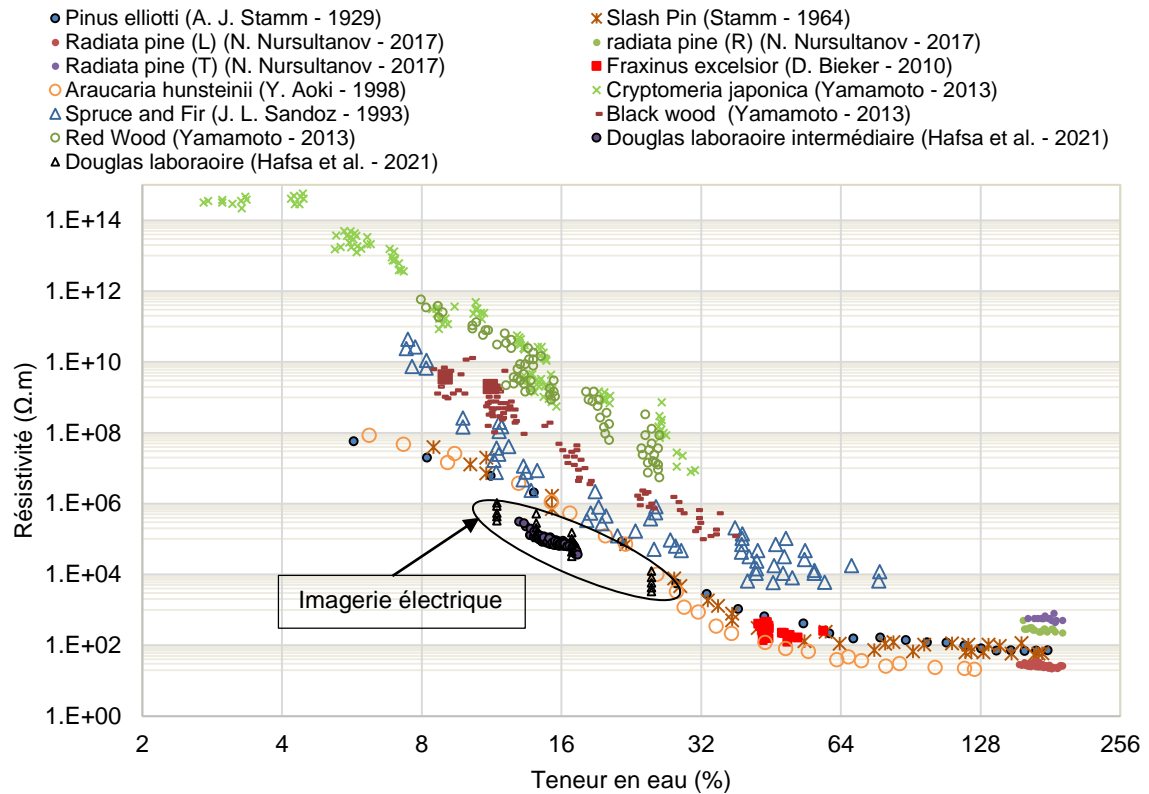


Figure V-13 : Comparaison des mesures résistives en fonction de la teneur en eau avec les données bibliographiques

Nous observons que peu d'études s'intéressent à la mesure de la résistivité électrique, propriété intrinsèque du matériau bois. La bibliographie montre que la plupart des études s'intéressent à des mesures directes de résistances en utilisant les hygromètres classiques comme nous l'avons montré dans la Figure II-2. De plus, nous ne trouvons aucune étude qui a abordé la résistivité électrique pour le Douglas-fir que l'on puisse utiliser pour comparer les données de nos études. Néanmoins, le résultat de cette comparaison montre que notre approche présente des valeurs de résistivité plus faibles que les données disponibles dans la bibliographie. Cela peut être expliqué par le fait que la mesure fournie par l'imagerie électrique représente une résistivité apparente.

V.3. Echelle structurale

Dans cette section, nous présentons les résultats d'une étude in-situ utilisant la méthode résistive pour évaluer l'état hydrique d'un poteau en Douglas-fir.

V.3.1. Les assemblages dans les structures bois

Dans les structures en bois, nous rencontrons assez souvent des assemblages mixtes bois-métal. Il existe plusieurs types d'assemblages mixtes à savoir : les assemblages cloués en utilisant un grand nombre d'organes de faibles diamètres, les assemblages boulonnés et les assemblages brochés avec des tiges lisses.

Ces assemblages représentent des points critiques qui peuvent générer des désordres (LCPC 2008). La présence d'un taux d'humidité élevé au niveau de la zone de l'assemblage représente un facteur aggravant qui peut affecter la performance des assemblages (Legras 2009). Le phénomène de retrait gonflement peut entraîner également des fissurations conséquentes (Figure V-14) dans la zone d'assemblage. Par conséquent, la connaissance du taux d'humidité au niveau de ces assemblages représente un intérêt pour éviter ce type de désordres.



Figure V-14 : Fissuration d'un poteau au niveau d'un assemblage

V.3.2. Protocole expérimental in-situ

L'étude expérimentale a été réalisée sur un poteau intermédiaire « face avant » en Douglas-fir de section 230x310 mm², soutenant une charpente en bois, comme le montre la Figure V-15. La structure peut être référencée en classe de service 2 avec une teneur en eau qui varie entre 12 et 20 %. Un suivi de conditions climatiques (humidité relative et température) a été assuré pendant un mois via une station météo installée au voisinage proche de la zone étudiée.



Figure V-15 : Zone d'étude in-situ et station météo

La Figure V-16 présente les variations de l'humidité relative (HR) et de la température (T) collectées pendant le mois d'étude.

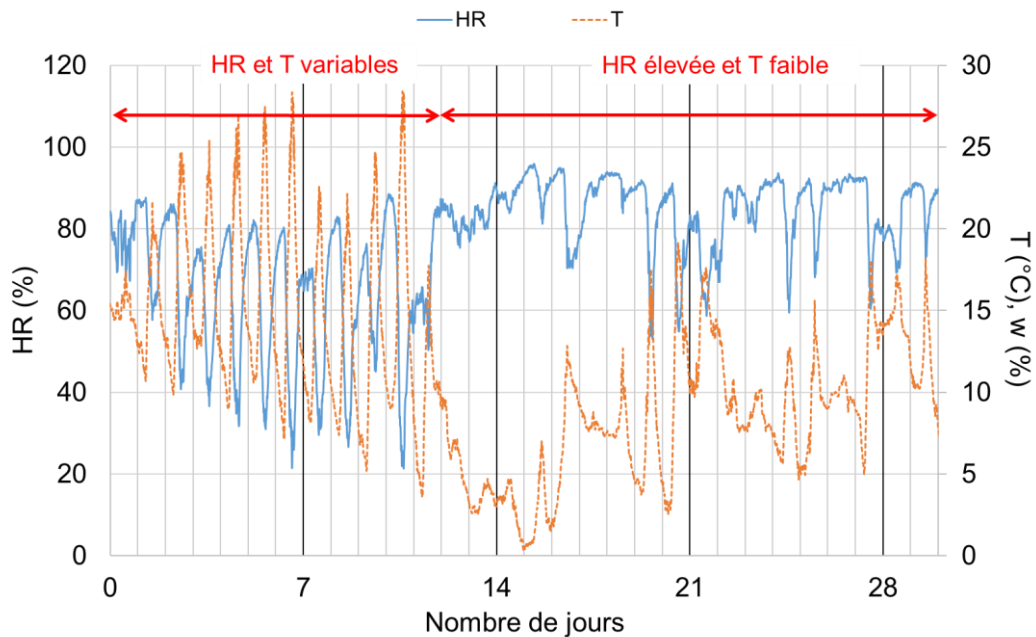


Figure V-16 : Suivi des conditions thermohydrques

Une première analyse de ces données permet de distinguer deux périodes climatiques :

- Une période avec HR et T variables ;
- Une période avec HR élevée et T faible.

Durant ce mois, nous observons une variation importante de la température entre 0.4 et 28.4 °C avec une température moyenne $T_{moy} = 11^{\circ}C$. Nous remarquons aussi que HR varie entre 21.4 et 96 % avec une moyenne de $HR_{moy} = 77\%$. La Figure V-17 présente la répartition des mesures de HR tout au long de la période d'étude et montre que 67 % des valeurs sont supérieures à 80 %.

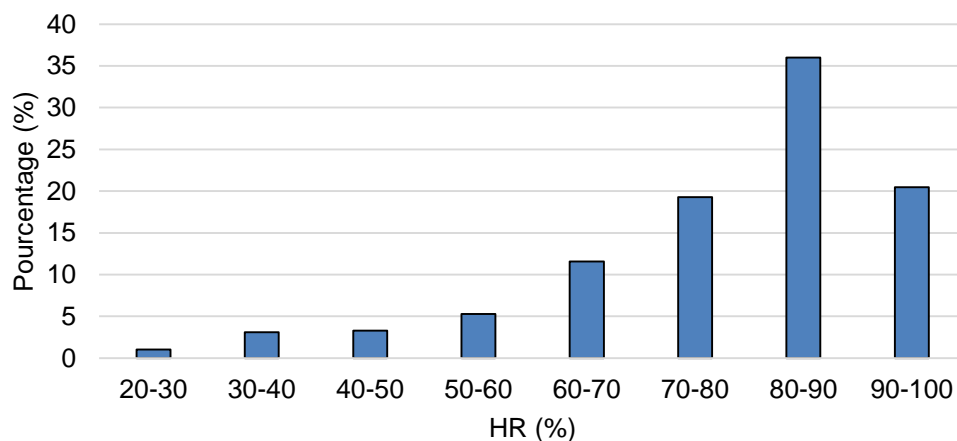


Figure V-17 : Répartition des données HR

En utilisant le résistivimètre Syscal Junior, 4 mesures ont été réalisées à 1, 7, 14 et 28 jours. La solution que nous avons proposée suppose d'utiliser les 4 organes d'assemblage (diamètre 18 mm) comme électrodes de mesures et ce, en installant des pinces crocodiles pour assurer l'injection du courant et la mesure de la tension. Les électrodes sont espacées d'une distance $a = 10$ cm horizontalement et $b = 20$ cm verticalement comme le montre la Figure V-18.

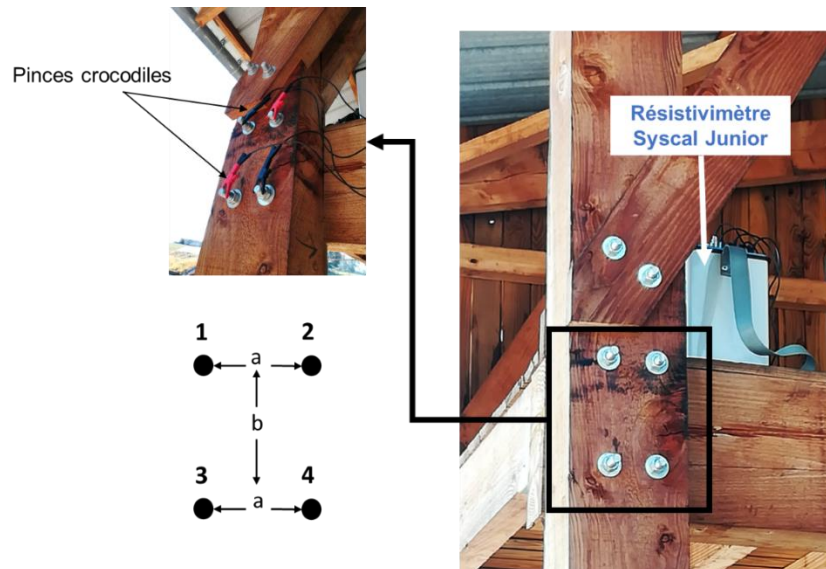


Figure V-18 : Protocole expérimental et exemple d'injection électrique via la configuration équatoriale

Grâce au multiplexage, 16 combinaisons d'électrodes basées sur le dispositif dipôle-dipôle (DD) équatorial présenté dans la Figure II-12, ont été testées. Ces combinaisons peuvent être classées en deux catégories en fonction de la distance qui sépare les électrodes d'injection (d) :

- 8/16 combinaisons avec $d = a = 10$ cm ;
- idem avec $d = b = 20$ cm.

Un exemple est présenté dans le Tableau V-3 (un tableau complet présentant toutes les combinaisons testées est disponible dans l'Annexe 5).

Tableau V-3 : Exemple de 2 configurations d'électrodes DD équatorial

d (cm)	A	B	M	N
10	1	2	3	4
20	1	3	2	4

V.3.3. Modèle par éléments fini de la poutre

Un modèle numérique reproduisant la configuration expérimentale a été développé en tenant compte de la géométrie des électrodes et du volume du poteau (Figure V-19). La même

démarche numérique appliquée dans les études précédentes a été utilisée pour développer deux maillages distincts : un premier maillage qui définit la discrétisation des électrodes et un deuxième qui caractérise le volume du poteau modélisé par un parallélépipède rectangle de dimensions 930x230x310 mm³. L'injection électrique a été également simulée en prenant en compte le multiplexage des électrodes définissant les différentes configurations.

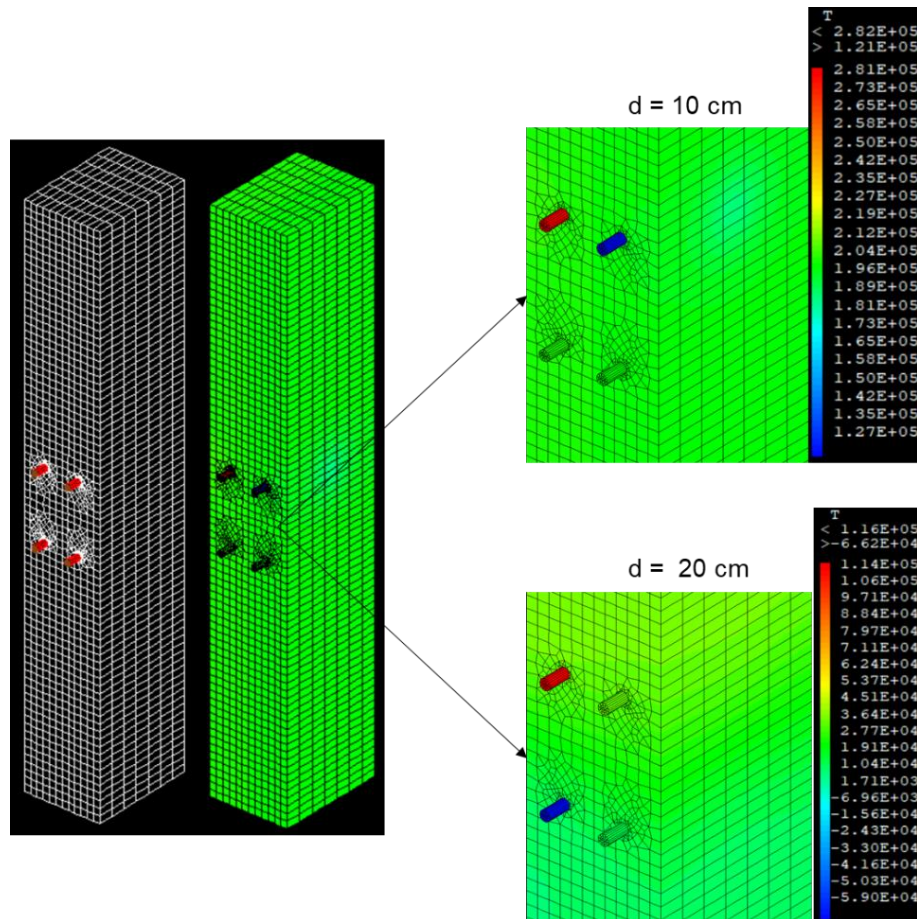


Figure V-19 : Modèle numérique et multiplexage pour le poteau ($\rho=10^4 \Omega.m$)

En considérant une résistivité homogène dans tout le volume étudié (Figure V-20), deux facteurs géométriques sont déterminés suite à plusieurs simulations :

- $k_{10} = 8.07$ m correspondant à toutes les configurations où $d = 10$ cm ;
- $k_{20} = 0.45$ m correspondant à toutes les configurations où $d = 20$ cm ;

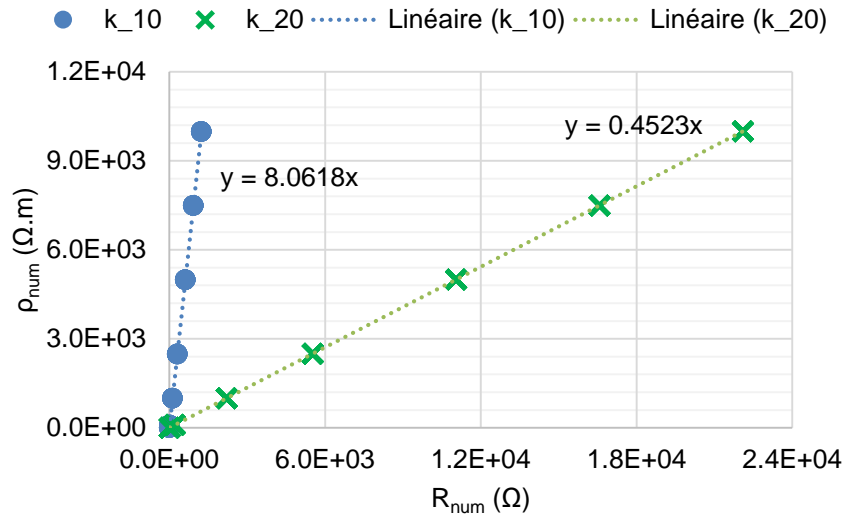


Figure V-20 : Facteurs géométriques numériques des configurations testées sur le poteau

Pour la suite de ce travail, nous considérerons comme hypothèse l'homogénéité de la distribution de la teneur en eau dans la zone investiguée. Cela représente une première approche pour étudier la faisabilité de l'approche résistive dans le cas d'une mesure in-situ.

V.3.4. Evaluation de l'état hydrique in-situ

Après minimisation des écarts entre les résistances expérimentales et numériques, la Figure V-21 présente l'exemple des résultats obtenus pour la mesure prise à 1 jour.

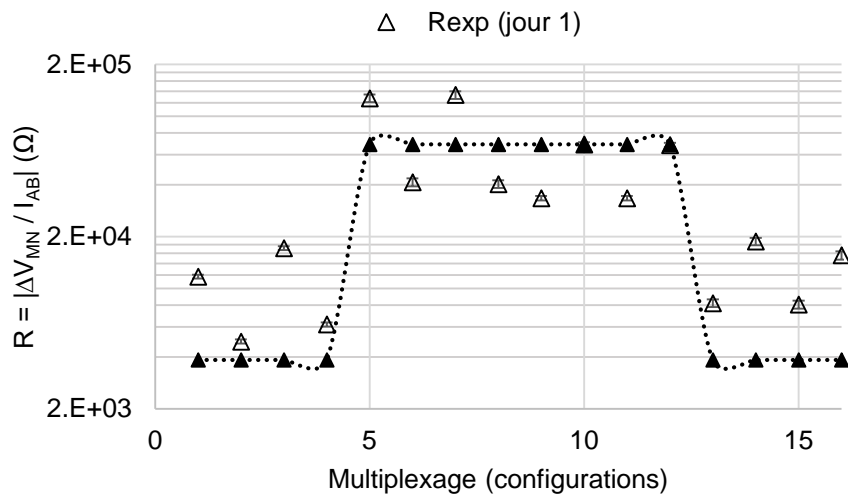


Figure V-21 : Résistances expérimentales et numériques pour la mesure à 1 jour

Les résultats montrent 2 niveaux de mesures de résistances cohérents avec les différentes configurations d'électrodes. Cela est également confirmé par la capacité du modèle à dissocier

les niveaux de résistances liés aux facteurs géométriques évalués numériquement. Les résultats des mesures après 1, 7 et 14 jours sont donnés dans l'Annexe 5.

Cependant, une dispersion importante des données expérimentales est observée. Cela peut être expliqué par l'hétérogénéité du matériau vues les grandes distances entre les électrodes. Pour cela, nous décidons de nous focaliser sur la configuration présentant la distance entre les électrodes d'injection la plus faible ($d = 10$ cm) afin d'éviter de plus grandes lignes de courant.

Le Tableau V-4 résume les résultats de résistivités calculées en utilisant l'approche mixte, leur écart types correspondant aux différentes configurations testées, la moyenne de la température obtenue durant 1h avant la prise de la mesure, et la teneur en eau calculée avec l'Eq (IV-7). Afin de calibrer les mesures par rapport à la température, nous avons eu recours au résultats de l'étude à l'échelle laboratoire.

Tableau V-4 : Evaluation des résistivité, température et teneur en eau

Jour	ρ ($\Omega.m$)	σ_p (%)	T ($^{\circ}C$)	w (%)
1	9.15E+04	46.6	23.75	16.1
7	3.20E+04	62.2	18.75	19.8
14	4.17E+05	26.7	4.44	14.04
28	6.13E+04	21	15.39	19.4

La Figure V-22 regroupe les mesures des conditions climatiques et les mesures chronologiques des valeurs moyennes de teneurs en eau issues de mesures de résistivités électriques.

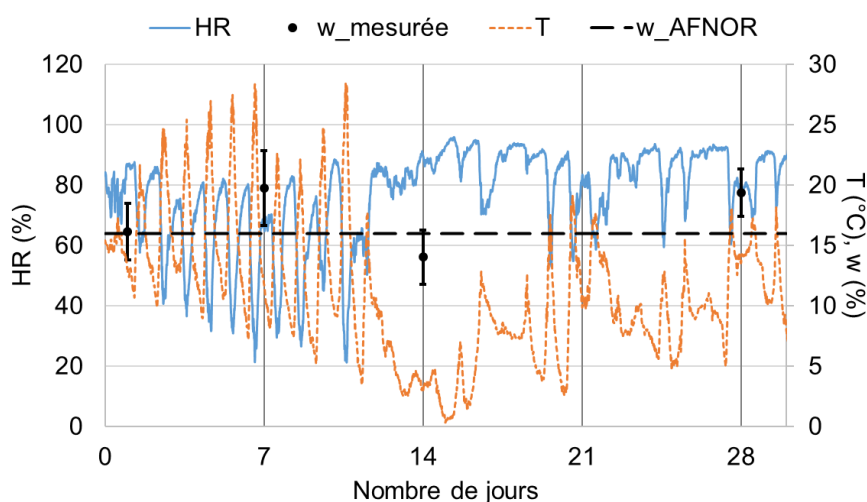


Figure V-22 : Résultats de teneurs en eau mesurées par la méthode résistive

Les données climatiques moyennes sont utilisées pour déterminer la teneur en eau à l'équilibre selon les courbes d'équilibre hygroscopique du bois utilisées dans l'Eurocode 5 (EN 1995-1-1/NA 2010). Ces conditions correspondent à une teneur en eau moyenne $w_{AFNOR} = 16\%$. Néanmoins, les résultats montrent un niveau supérieur à w_{AFNOR} (sauf dans le cas de la mesure à 14 jours). Les niveaux élevés de teneurs en eau peuvent être également expliqués par la répartition des données HR présentant 65 % de mesures > 80%. Nous observons également une dispersion élevée des écarts type des mesures de teneurs en eau due à la résistivité hétérogène dans le poteau, ce qui montre en effet, la limite de l'hypothèse de l'homogénéité de la résistivité dans le cas où les électrodes sont éloignées. Cependant, les résultats sont encourageants montrant l'applicabilité, en termes d'évaluation globale de l'état hydrique.

V.4. Conclusion

Cette dernière partie a été l'occasion d'appliquer l'approche mixte basée sur l'imagerie électrique à deux échelles différentes. Nous avons montré que cette méthode offre une gamme de réponses qui permet de traiter la plupart des cas en termes de mesures ponctuelles ou de surveillance à long terme.

A l'échelle laboratoire intermédiaire, nous avons pu mettre en évidence l'importance du tri pré-inversion de données expérimentales et son impact sur l'estimation de la résistivité. Grâce à la continuité des travaux, nous avons pu montrer la capacité de l'outil de mesure à identifier un champ hydrique longitudinal en utilisant une approche d'imagerie électrique spatio-temporelle malgré la problématique d'injection en dessous de 14 %. Les résultats de l'étude de la diffusion hydrique unidirectionnelle ont été également améliorés. Par ailleurs, nous avons pu réussir à caractériser la relation entre la résistivité et la teneur en eau en prenant en compte les mesures spatio-temporelles obtenues.

A l'instar du dernier exemple appliqué à l'échelle structurale, nous avons réussi étudier la faisabilité d'une stratégie expérimentale qui repose sur l'utilisation des éléments d'assemblage comme électrodes. Les résultats ont confirmé la capacité de la mesure électrique multiplexée à dissocier les niveaux de résistances entre les différents dispositifs d'électrodes. Nous avons aussi montré l'apport du développement de l'approche à l'échelle laboratoire (Partie IV) en prenant en compte l'influence de la température. Cette approche mérite d'être améliorée en étudiant l'hétérogénéité de la teneur en eau dans l'élément et en assurant un monitoring sur une longue période.

Conclusion et perspectives

Conclusions

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une problématique plus générale qui porte sur la durabilité des structures bois. Ce matériau en équilibre permanent avec les conditions hygrothermiques de son environnement, est souvent sujet à des pathologies liées à la variation de son état hydrique qui se manifestent sous forme de déformations, de fissures ou par l'apparition de champignons. Ces aspects, traités dans la première partie du mémoire ont mis en exergue la nécessité d'une surveillance continue de la distribution de l'humidité dans les éléments en bois afin de maîtriser leur durabilité, ainsi que de préserver leurs propriétés mécaniques et physiques.

Afin de répondre à cette problématique, nous avons proposé dans ce travail d'adapter l'imagerie électrique, un outil souvent utilisé dans la géophysique, à la mesure du champ hydrique dans le matériau bois. Dans ce cadre, nous avons proposé une stratégie expérimentale pour assurer un meilleur contact entre les électrodes de mesure utilisées dans l'imagerie électrique et le matériau, par la mise en place des électrodes isolées de type vis. Afin de prendre en compte le caractère résistif du matériau bois, nous avons également envisagé d'augmenter la gamme de résistivités mesurées. L'objectif est de pouvoir effectuer des mesures de résistivité électrique spatio-temporelles qui vont nous permettre de prévenir l'apparition des pathologies liées aux conditions hygrothermiques.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons identifié les paramètres explicatifs qui influencent la mesure de la résistivité électrique, une propriété électrique intrinsèque du matériau. L'étude statistique réalisée a permis de traiter et d'analyser les données bibliographiques, afin de distinguer des variables expérimentales telles que la configuration des électrodes, la température et des variables inhérentes liées aux propriétés du matériau telle que l'anisotropie et la teneur en eau.

La mesure de la résistivité que nous avons traitée dans les chapitres qui suivent, a été expérimentée sur des échantillons en Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), une essence prédominante dans notre région et très utilisée dans la construction bois.

Les études menées sont basées sur le développement d'une approche mixte par le couplage des mesures de résistivité électrique avec un processus d'inversion numérique. L'inversion numérique implémentée dans un code aux éléments finis, a permis de minimiser l'erreur entre les expériences et les résultats obtenus par un modèle numérique qui reproduit à l'identique la configuration expérimentale et les conditions aux limites. Grâce à cette inversion numérique, nous avons réussi à remonter aux champs de résistivité électrique.

La caractérisation des champs de résistivité a été réalisée pour 3 échelles dimensionnelles avec deux résistivimètres Syscal Junior et Syscal Pro. Ces résultats seront résumés ci-dessous :

A l'échelle laboratoire :

Nous avons mis en place un plan d'expériences afin de réaliser une étude paramétrique sur des échantillons homogènes en termes de teneur en eau.

En premier lieu, une étude préliminaire a été réalisée pour caractériser la mesure de la résistivité en fonction des paramètres expérimentaux tels que le mode / la durée de l'injection électrique et l'effet de la configuration des électrodes. Cette étude a permis d'améliorer la qualité de la mesure en augmentant la durée de l'injection à 2 s et en choisissant le mode capacitif « RhoIP ». Les résultats de cette étude ont permis également d'identifier les niveaux de résistances liés aux configurations des électrodes et ont montré les limites de l'outil de mesure Syscal Junior pour une teneur en eau inférieure à 14 %. Ces limites sont liées à la résolution de l'injection de courant.

Sur la base des résultats de cette première expérimentation, nous avons mis en place une deuxième étude paramétrique en utilisant un outil de mesure plus performant, le Syscal Pro, afin d'atteindre des teneurs en eau plus faibles (< à 14 %) et ce, pour différents niveaux de températures. Au regard de ces résultats, une relation a été établie pour évaluer la résistivité électrique en prenant en compte la configuration des électrodes, la variation de la température pour une gamme allant de 5 à 45 °C, et pour des teneurs en eau de 11.6 à 25 %.

A l'échelle laboratoire intermédiaire :

Une étude qui a porté sur la caractérisation de la distribution de la teneur en eau dans un élément en bois de dimensions décimétriques, a été réalisée.

Dans le cas d'une distribution homogène de la teneur en eau, cette étude a montré l'importance du tri de données et son impact sur l'évaluation de la résistivité électrique. Les conditions expérimentales (contact électrode-bois), la chargeabilité liée à l'interface électrode-bois et la résolution du courant injectée peuvent affecter la qualité des mesures. Pour remédier à ces problématiques, une stratégie de tri de données a été proposée en prenant en compte une déviation standard des mesures inférieure à 5 % et un balayage dans les deux directions de multiplexage (N et R).

Dans le cas d'un champ hétérogène d'humidité interne, une étude portant sur la caractérisation de la diffusion hydrique dans la direction longitudinale a été réalisée. Cette étude s'inscrit dans la suite des travaux de thèse de Nguyen (2014) par l'ajout des mesures supplémentaires de résistivité électrique et de teneur en eau. Sur la base de ces résultats nous avons mis à jour les paramètres de la diffusion hydrique pour le Douglas-fir. La loi de passage résistivité-teneur en eau a été optimisée en exploitant les mesures supplémentaires spatiotemporelles des résistivités associées à une gamme de teneur en eau allant de 12.97 à 17.34 %.

A l'échelle in-situ :

Un protocole expérimental pour la mesure de la résistivité / teneur en eau a été mis en place sur un poteau assurant la stabilité d'une charpente. L'injection est réalisée cette fois-ci par l'intermédiaire des organes d'assemblage qui jouent le rôle des électrodes. Les résultats obtenus ont montré la capacité des mesures résistives multiplexées à différencier les niveaux de résistances en fonction de l'écartement entre les éléments d'assemblage (les électrodes). Les mesures ont aussi relevé l'impact de la température ambiante sur la résistance électrique. Afin de corriger cette perturbation induite par la température, nous avons utilisé les résultats de l'étude paramétrique réalisée à l'échelle laboratoire. Malgré une courte période d'essai (1 mois), ces résultats ont montré le potentiel de cette stratégie expérimentale pour la surveillance de l'état hydrique des ouvrages en service. Bien entendu, cette stratégie mérite d'être approfondie afin d'aller vers le monitoring pour différentes classes de service. Ce type d'analyse fait partie des priorités pour aller plus loin dans ce travail de recherche.

Perspectives

La conclusion de ce travail montre bien le potentiel de la méthode résistive pour la surveillance de l'état hydrique. Par conséquent, cette thèse ouvre à beaucoup de perspectives dont les plus importantes, à notre sens, sont le développement d'une approche par tomographie résistive via l'utilisation d'un ceinturage d'électrodes (W Hafsa et al. 2018; Minh Dung et al. 2018). Cette stratégie devrait permettre de construire un relevé tridimensionnel du champ de résistivité dans des sections massives afin de compléter l'information sur le champ hydrique et d'obtenir une cartographie 3D des champs d'humidité.

La mise en place d'une campagne expérimentale sur une structure sous charge placée en extérieur, représente une autre perspective à court terme de ce travail. Ce plan d'expérience permettra de coupler la répartition spatiale du taux d'humidité à l'état mécanique et d'assurer la surveillance de la distribution de la teneur en eau pour différentes classes de service et sollicitations thermohydriques.

Coupler les mesures résistives avec d'autres outils de contrôle non destructif tels que l'émission acoustique, les ultrasons et le scanner 3D est une autre perspective de ce travail qui devrait permettre d'assurer une analyse multi-physique des éléments de structure en bois.

Références bibliographiques

- AFCOBOIS. 2019. « Enquête nationale de la construction bois (activité 2018) ». http://afcobois.fr/wp-content/uploads/2019/07/ENQUETE_CONSTRUCTIONBOIS_JUIN_2019.pdf.
- Agoua, Eusèbe, Sylvain Zohoun, et Patrick Perré. 2001. « A Double Climatic Chamber Used to Measure the Diffusion Coefficient of Water in Wood in Unsteady-State Conditions: Determination of the Best Fitting Method by Numerical Simulation ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (19): 3731-44. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00022-9).
- AGRESTE. 2021. « Service de la statistique et de la prospective du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt ». 2021. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/accueil/>.
- Ahmed, Sheikh Ali, et Su Kyoung Chun. 2011. « Permeability of *Tectona Grandis* L. as Affected by Wood Structure ». *Wood Science and Technology* 45 (3): 487-500. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0335-5>.
- Ahsanullah, Mohammad, B. M. Golam Kibria, et Mohammad Shakil. 2014. « Normal Distribution ». In *Normal and Student's t Distributions and Their Applications*, édité par Mohammad Ahsanullah, B.M. Golam Kibria, et Mohammad Shakil, 7-50. Atlantis Studies in Probability and Statistics. Paris: Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6239-061-4_2.
- Allen, J. Bard, et R. Faulkner Larry. 2002. « Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, New York: Wiley, 2001, 2nd Ed. » *Russian Journal of Electrochemistry* 38 (12): 1364-65. <https://doi.org/10.1023/A:1021637209564>.
- AlSayegh, George. 2014. « Hygrothermal Properties of Cross Laminated Timber and Moisture Response of Wood at High Relative Humidity (Master's Thesis) ».
- Aoki, Yuichi, Hirokazu Tanaka, et Shigeharu Yamamoto. 1998. « Reliability of Wood Materials in Environmental Testing ». Espec Technology Report 5.
- Attia al Hagrey, Said. 2007. « Geophysical Imaging of Root-Zone, Trunk, and Moisture Heterogeneity ». *Journal of Experimental Botany* 58 (4): 839-54. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl237>.
- Badel, Eric. 1999. « Détermination des propriétés élastiques et du retrait d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse : description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation ». Phdthesis, ENGREF (AgroParisTech). <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00005709>.
- Baltassat, J. M., B. Maurice, et P. A. Reninger. 2017. « Tomographies de résistivité électrique appliquées à l'implantation de forages AEP sur dix sites de Mayotte ». Rapport final. BRGM/RP-67169-FR. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67169-FR.pdf>.
- Bieker, Dirk, Rolf Kehr, Gesine Weber, et Steffen Rust. 2010. « Non-Destructive Monitoring of Early Stages of White Rot by *Trametes Versicolor* in *Fraxinus Excelsior* ». *Annals of Forest Science* 67 (2): 210-210. <https://doi.org/10.1051/forest/2009103>.
- Björngrim, Niclas, Per-Anders Fjellström, et Olle Hagman. 2017. « Resistance Measurements to Find High Moisture Content Inclusions Adapted for Large Timber Bridge Cross-Sections ». *BioResources* 12 (2): 3570-82. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3570-3582>.
- Björngrim, Niclas, Olle Hagman, et Xiaodong (Alice) Wang. 2016a. « Moisture Content Monitoring of a Timber Footbridge ». *BioResources* 11 (2): 3904-13. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3904-3913>.

- . 2016b. « Moisture Content Monitoring of a Timber Footbridge ». *BioResources* 11 (2): 3904-13.
- Blondel, Amélie. 2014. « Développement des méthodes géophysiques électriques pour la caractérisation des sites et sols pollués aux hydrocarbures ». Thèse de doctorat, Bordeaux 3. <http://www.theses.fr/2014BOR30001>.
- Blondel, Amélie, Myriam Schmutz, Michel Franceschi, Frédéric Tichané, et Margaux Carles. 2014. « Temporal Evolution of the Geoelectrical Response on a Hydrocarbon Contaminated Site ». *Journal of Applied Geophysics* 103 (avril): 161-71. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.013>.
- Bowyer, Jim, STEVE Bratkovich, JEFF Howe, KATHRYN Fernholz, MATT Frank, SAMIRA Hanessian, HARRY Groot, et E. D. Pepke. 2016. « Modern tall wood buildings: Opportunities for innovation ». *Dovetail Partners Inc.: Minneapolis, MN, USA*.
- Brischke, Christian, et Stefan Clemens Lampen. 2014. « Resistance Based Moisture Content Measurements on Native, Modified and Preservative Treated Wood ». *European Journal of Wood and Wood Products* 72 (2): 289-92. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0775-3>.
- Brischke, Christian, et Andreas Otto Rapp. 2008. « Dose–Response Relationships between Wood Moisture Content, Wood Temperature and Fungal Decay Determined for 23 European Field Test Sites ». *Wood Science and Technology* 42 (6): 507-18. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>.
- Brischke, Christian, Andreas Otto Rapp, et Rolf Bayerbach. 2008. « Measurement System for Long-Term Recording of Wood Moisture Content with Internal Conductively Glued Electrodes ». *Building and Environment* 43 (10): 1566-74. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.002>.
- Carll, C., et A. TenWolde. 1996. « Accuracy of Wood Resistance Sensors for Measurement of Humidity ». *Journal of Testing and Evaluation* 24 (3): 154-60. <https://doi.org/10.1520/JTE11296J>.
- Casans Berga, Silvia, Rafael Garcia-Gil, A. Edith Navarro Anton, et Alfredo Rosado-Muñoz. 2019. « Novel Wood Resistance Measurement Method Reducing the Initial Transient Instabilities Arising in DC Methods Due to Polarization Effects ». *Electronics* 8 (11): 1253. <https://doi.org/10.3390/electronics8111253>.
- Cast3M. 2017. *CAST3M finite element software (www-cast3m.cea.fr)*. <http://www-cast3m.cea.fr/>.
- Chintalapudi, K., T. Fu, J. Paek, N. Kothari, S. Rangwala, J. Caffrey, R. Govindan, E. Johnson, et S. Masri. 2006. « Monitoring civil structures with a wireless sensor network ». *IEEE Internet Computing* 10 (2): 26-34. <https://doi.org/10.1109/MIC.2006.38>.
- Chouteau, M., et B. Giroux. 2006. « Géophysique appliquée II - GLQ 3202 - Méthodes électriques : Notes de cours ». *École Polytechnique*, 2006. http://cbrosson.free.fr/Public/Divers/Master2pro/Cours_Doc/Univ_Laval/Cours_GeophyApp/Electrique.pdf.
- Clark, J. D., et John Warren Williams. 1933. « The Electrical Conductivity of Commercial Dielectrics and Its Variation with Temperature. » *The Journal of Physical Chemistry* 37 (1): 119-31. <https://doi.org/10.1021/j150343a015>.
- COFREND. 2017. « Confédération Française pour les Essais Non Destructifs ». 2017. <https://www.cofrend.com/>.
- Cousins, W. J. 1976. « Elastic Modulus of Lignin as Related to Moisture Content ». *Wood Science and Technology* 10 (1): 9-17. <https://doi.org/10.1007/BF00376380>.

- Cremona, Christian, et Joao Santos. 2018. « Structural Health Monitoring as a Big-Data Problem ». *Structural Engineering International* 28 (3): 243-54. <https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1461536>.
- Davidson, RW. 1958. « The effect of temperature on the electrical resistance of wood ». *Forest Prod J* 8 (5): 160-64.
- Derome, Dominique, Ahmad Rafsanjani, Alessandra Patera, Robert Guyer, et Jan Carmeliet. 2012. « Hygromorphic Behaviour of Cellular Material: Hysteretic Swelling and Shrinkage of Wood Probed by Phase Contrast X-Ray Tomography ». *Philosophical Magazine* 92 (28-30): 3680-98. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.715248>.
- Dietsch, Philipp, Steffen Franke, Bettina Franke, Andreas Gamper, et Stefan Winter. 2015. « Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts ». *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 5 (2): 115–127.
- Dietsch, Philipp, Andreas Gamper, Michael Merk, et Stefan Winter. 2015. « Monitoring Building Climate and Timber Moisture Gradient in Large-Span Timber Structures ». *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 5 (2): 153-65. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0083-6>.
- Du, Q. P., A. Geissen, et D. Noack. 1991. « Widerstandskennlinien einiger Handelshölzer und ihre Meßsbarkeit bei der elektrischen Holzfeuchtemessung ». *Holz als Roh- und Werkstoff* 49 (7-8): 305–311.
- Dubois, Frédéric, Jean-Marie Husson, Nicolas Sauvat, et Nicaise Manfoumbi. 2012. « Modeling of the Viscoelastic Mechano-Sorptive Behavior in Wood ». *Mechanics of Time-Dependent Materials* 16 (4): 439-60. <https://doi.org/10.1007/s11043-012-9171-3>.
- Edwards, L. S. 1977. « A modified pseudosection for resistivity and ip ». *GEOPHYSICS* 42 (5): 1020-36. <https://doi.org/10.1190/1.1440762>.
- Elaieb, Mohamed Tahar. 2014. « Amélioration de l'imprégnabilité aux solutions aqueuses des duramens des résineux: le cas du Douglas (Pseudotsuga Menziesii Franco) ». PhD Thesis, Université de Lorraine.
- EN 335. 2013. « Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois. »
- EN 350. 2016. « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Méthodes d'essai et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois ».
- EN 460. 1994. « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif - Guide d'exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes de risque. »
- EN 1995-1-1/NA. 2010. « Eurocode 5 : conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments - Annexe nationale à la NF EN 1995-1-1:2008 - Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments ».
- EN 13183-1. 2002. « Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1 : détermination par la méthode par dessiccation ».
- EN 13183-2. 2002. « Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2 : estimation par méthode électrique par résistance ».
- EN 13306-X-60-319. 2001. « Terminologie de la maintenance, Standard, Association Française de Normalisation ».
- Ferraz, E. S. B., et O. Aguiar. 1985. « Gamma-ray attenuation technique for determining density and water content of wood samples ». *IPEF* 30: 9–12.

- Fisher, R. A. 1922. « On the mathematical foundations of theoretical statistics ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 222 (janvier): 309-68. <https://doi.org/10.1098/rsta.1922.0009>.
- Florsch, Nicolas, Abdulsamad Feras, Jeremy Bonnenfant, et Christian Camerlynck. 2017. « La polarisation provoquée, outil géophysique de spatialisation des amas de scories pour l'estimation des productions sidérurgiques ». *ArchéoSciences*, n° 41-2 (décembre): 23-33. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.4958>.
- Forsen, Holger, et Veikko Tarvainen. 2000. « Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters ».
- Franke, Bettina, Steffen Franke, Andreas Müller, et Marcus Schiere. 2016. « Long-term behaviour of moisture content in timber constructions—Relation to service classes ». *INTER-Proceedings, Graz*.
- Franke, Bettina, Andreas Müller, Steffen Franke, et Noëlie Magnière. 2016. *Langzeituntersuchung zu den Auswirkungen wechselnder Feuchtegradienten in blockverleimten Brett-schichtholzträgern: Forschungsbericht*. Édité par Berner Fachhochschule. Biel: Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur.
- Franke, Bettina, Steffen Franke, Andreas Müller, et Marcus Schiere. 2016. « Long-term behaviour of moisture content in timber constructions – Relation to service classes ». In , 5:19-23. Graz.
- Franke, Bettina, Steffen Franke, Marcus Schiere, et Andreas Müller. 2016. « Moisture Diffusion in Wood – Experimental and Numerical Investigations », 8.
- Fredriksson, Maria. 2010. *Methods for determination of moisture conditions in wood exposed to high moisture levels*. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials.
- Fredriksson, Maria, Lars Wadsö, et Peter Johansson. 2013. « Small Resistive Wood Moisture Sensors: A Method for Moisture Content Determination in Wood Structures ». *European Journal of Wood and Wood Products* 71 (4): 515-24. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0709-0>.
- Gamper, Andreas, P. Dietsch, M. Merk, et S. Winter. 2014. « Building Climate—Long-term measurements to determine the effect on the moisture gradient in timber structures ». *Final report, TU München, Germany*.
- Ganthalder, Andrea, Julia Sailer, Andreas Bär, Adriano Lasso, et Stefan Mayr. 2019. « Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation ». *Frontiers in Plant Science* 10 (novembre): 1455. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>.
- Gáper, Ján, Svetlana Gaperova, T. Gaparcová, Simona Kvasnova, P. Prista, et Katerina Náplavová. 2018. « Indoor fungal destroyers of wooden materials Their identification in present review ».
- Geotomosoftware. 2010. *Geotomo Softwares Res2Dinv et Res3Dinv* (version 3.71.116). <https://www.geotomosoftware.com/downloads.php>.
- Gerbaud, Charlotte, Rémi Tautou, Ion Octavian Pop, Sylvie Yotte, et Sébastien Nicolas. 2020. « Diagnostic d'un Poteau En Bois Fissuré Par Scan3D et Photogrammétrie ». *Academic Journal of Civil Engineering* 38 (1): 1-4. <https://doi.org/10.26168/ajce.38.1.1>.
- Girard, J-F., J-M Miehé, N. Coppo, et B. Aunay. 2008. « Méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à la réunion. Rapport final ». BRGM/RP-56612-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56612-FR.pdf>.

- Girometta, Carolina Elena, Annarosa Bernicchia, Rebecca Michela Baiguera, Francesco Bracco, Simone Buratti, Marco Cartabia, Anna Maria Picco, et Elena Savino. 2020. « An Italian Research Culture Collection of Wood Decay Fungi ». *Diversity* 12 (2): 58. <https://doi.org/10.3390/d12020058>.
- Goulet, Marcel, et Émile Ouellet. 1968. *Effet de la teneur en humidité du bois sur sa résistance à la traction transversale*. Dép. d'Exploitation et Utilisation des Bois, Université Laval.
- Grapher™. 2017. *Grapher™ | 2D & 3D graphing, plotting, and analysis software*. <https://www.goldensoftware.com/products/grapher>.
- Gray, B. 1968. « Forest tree and timber insect pests in the Territory of Papua and New Guinea ». *Pacific Insects* 10 (2): 301–323.
- Green, Michael C., et J. Eric Karsh. 2012. « The case for tall wood buildings: how mass timber offers a safe, economical, and environmentally friendly alternative for tall building structures ». The Canadian Wood Council on behalf of the Wood Enterprise Coalition by Forestry Innovation Investment. <https://www.trae.dk/wp-content/uploads/2012/05/tall-wood-buildings-final-report.pdf>.
- Green, Michael, et Jim Taggart. 2020. *Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Second and Expanded Edition*. Birkhäuser.
- Guitard, Daniel. 1987. *Mécanique du matériau bois et composites*. Collection Nabla. Toulouse: Cépaduès-Éditions.
- Hafsa, W, M D Pham, N Angellier, M Takarli, L Ulmet, I O Pop, T A Nguyen, et F Dubois. 2018. « Evaluation de Champs de Résistivité Electrique de Matériaux Hygroscopiques : vers le Monitoring et le Diagnostic Hydrique des Structures » 36 (1): 4.
- Hafsa, Wael, Nicolas Angellier, Mokhfi Takarli, et Octavian Pop. 2019. « Monitoring of timber structures : moisture content evaluation by using electrical resistivity method ». In *5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, proceedings:658-70. Guimaraes (Portugal).
- . 2021. « A Mixed Experimental–Numerical Electrical Resistivity-Based Method for Moisture Content Assessment in Wood Tested Using the Example of Douglas Fir ». *Wood Science and Technology*, 20 mars 2021, 55 édition, sect. 3.
- Harrington, Jonathan J. 2002. « Hierarchical modelling of softwood hygro-elastic properties ».
- Hartley, Jamie, et John Marchant. 1995. *Methods of Determining the Moisture Content of Wood*. Rev. ed. Technical Paper / Research Division, State Forests of New South Wales 41. Beecroft: State Forests.
- Hebbache, K. 2017. « Contribution à la reconnaissance du sol par tomographie électrique ». Université Mohamed Khider-Biskra. http://thesis.univ-biskra.dz/2884/1/Th%C3%A8se_lmd_35_2017.pdf.
- ISO 12571. 2013. « Performance Hygrothermique Des Matériaux et Produits Pour Le Bâtiment - Détermination Des Propriétés de Sorption Hygroscopique ». ISO. 2013.
- Jacobs, K., K. Plaschkies, W. Scheiding, B. Weiß, E. Melcher, E. Conti, A. Fojutowski, et I. Le Bayon. 2019. « Natural Durability of Important European Wood Species against Wood Decay Fungi. Part 2: Field Tests and Fungal Community ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 137 (février): 118-26. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.12.002>.
- Jamaaoui, Amine. 2017. « Durabilité et comportement hygroscopique du Douglas en relation avec son patrimoine génétique ». Université de Limoges. <http://www.theses.fr/2017LIMO0068>.

- James, William L. 1963. « Electric Moisture Meters for Wood ». *US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory* 8.
- James, William Lanpheer. 1963. *Electric Moisture Meters for Wood*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Karhunen, K., A. Seppanen, A. Lehtikoinen, J. Blunt, J. P. Kaipio, et P. J. M. Monteiro. 2010. « Electrical Resistance Tomography for Assessment of Cracks in Concrete ». *Materials Journal* 107 (5): 523-31. <https://doi.org/10.14359/51663973>.
- Kelsey, KE. 1963. « Critical review of the relationship between the shrinkage and structure of wood ». *CSIRO Div For Prod Tech* 28: 3-35.
- Keylwerth, R. 1964. « Bundesforschungsanstalt für Forst und Hozwirtschaft, Reinbek Institut für Holzphysik und mechanische Holztechnologie ».
- Koch, Johannes, Antje Simon, et Ralf W. Arndt. 2016. « Monitoring of moisture content of protected timber bridges ». In *World Conference on Timber Engineering*, 8.
- Kolavali, Reddysuresh. 2013. « Diffusion of ions in wood ». Thesis for the degree of licentiate of engineering, Sweden: Chalmers University of Technology.
- Kollmann, Franz Friedrich Paul, et Wilfred A Côte. 1968. *Principles of Wood Science and Technology*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag.
- Konopka, Aleksandra, Jacek Barański, Kazimierz Orłowski, et Karol Szymanowski. 2018. « The Effect of Full-Cell Impregnation of Pine Wood (*Pinus Sylvestris* L.) on Changes in Electrical Resistance and on the Accuracy of Moisture Content Measurement Using Resistance Meters ». *BioResources* 13 (1): 1360-71.
- Kouchade, Adeyemi Clément. 2004. « Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire ». These de doctorat, Paris, ENGREF. <http://www.theses.fr/2004ENGR0011>.
- Kučerová, Viera, Rastislav Lagaňa, Eva Výbohová, et Tatiana Hýrošová. 2016. « The Effect of Chemical Changes during Heat Treatment on the Color and Mechanical Properties of Fir Wood ». *BioResources* 11 (4): 9079-94.
- Kumar, Satish. 1994. « Chemical Modification of Wood ». *Wood and Fiber Science* 26 (2): 270-80.
- Lamy, Frédéric, Mokhfi Takarli, Nicolas Angellier, Frédéric Dubois, et Octavian Pop. 2015. « Acoustic Emission Technique for Fracture Analysis in Wood Materials ». *International Journal of Fracture* 192 (1): 57-70. <https://doi.org/10.1007/s10704-014-9985-x>.
- Laufenberg, Theodore L. 1986. « Using gamma radiation to measure density gradients in reconstituted wood products ». *Forest Prod. J* 36 (2): 59–62.
- LCPC. 2008. « Recommandations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois ». Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Legras, Baptiste. 2009. « Effet de la teneur en humidité du bois sur la performance des assemblages bois boulonnés de pin gris ». Programme de maîtrise en Sciences du Bois. Québec: Université Laval.
- Li, Hang. 2017. « Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures ». These de doctorat, Toulouse 3. <http://www.theses.fr/2017TOU30288>.
- Lin, Chen-Jung, Chih-Hsin Chung, Te-Hsin Yang, et Far-Ching Lin. 2012. « Detection of Electric Resistivity Tomography and Evaluation of the Sapwood-Heartwood Demarcation in Three Asia Gymnosperm Species ». *Silva Fennica* 46 (3). <https://doi.org/10.14214/sf.440>.
- Loke, M. H. 2004. *Tutorial : 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*.

- Loke, M. H., et R. D. Barker. 1996. « Practical Techniques for 3D Resistivity Surveys and Data Inversion ». *Geophysical Prospecting* 44 (3): 499-523. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00162.x>.
- Loke, M. H., et T. Dahlin. 2002. « A Comparison of the Gauss–Newton and Quasi-Newton Methods in Resistivity Imaging Inversion ». *Journal of Applied Geophysics* 49 (3): 149-62. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00106-9).
- Longo, R., T. Delaunay, D. Laux, M. El Mouridi, O. Arnould, et E. Le Clézio. 2012. « Wood Elastic Characterization from a Single Sample by Resonant Ultrasound Spectroscopy ». *Ultrasonics* 52 (8): 971-74. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.08.006>.
- Loupe, Dominique, et Alba Zaremski. 2016. « Les termites ». In *Mardis muséum, les rendez-vous de la science*. Muséum d'histoire naturelle de Nantes.
- Luo, Zidong, Zijuan Deng, Kamini Singha, Xinping Zhang, Na Liu, Yifei Zhou, Xinguang He, et Huade Guan. 2020. « Temporal and Spatial Variation in Water Content within Living Tree Stems Determined by Electrical Resistivity Tomography ». *Agricultural and Forest Meteorology* 291 (septembre): 108058. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108058>.
- Mahammed, D. M. 2012. « Utilisation des dispositifs de géophysique électrique non classiques pour l'étude des couches géologiques profondes: cas des Chotts El Gharbi et Chergui ». Oran: Université d'Oran.
- Mai, Tien Chinh, Stephen Razafindratsima, Zoubir Mehdi Sbartaï, François Demontoux, et Frédéric Bos. 2015. « Non-Destructive Evaluation of Moisture Content of Wood Material at GPR Frequency ». *Construction and Building Materials* 77 (février): 213-17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.030>.
- Manfoumbi Boussougou, Nicaise. 2012. « Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement ». Thèse de doctorat, Limoges. <https://www.theses.fr/2012LIMO4005>.
- Marescot, Laurent. 2004. « Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur les structures 3D complexes par la méthode des éléments finis ». Theses, Universités de Nantes et de Lausanne. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01373888>.
- Marquardt, Donald W. 1963. « An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters ». *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 11 (2): 431-41.
- MATLAB. 2018. *MathWorks – Editeur de MATLAB et Simulink*. <https://fr.mathworks.com/>.
- McMillen, John M. 1955. « Drying stresses in red oak: effect of temperature ». *Forest Products Journal* 5 (4): 230–241.
- Medeiros, Ricardo de. 2016. « Development of a Criterion for Predicting Residual Strength of Composite Structures Damaged by Impact Loading ». Text, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2016.tde-26072016-221608>.
- Merakeb, Seddik. 2006. « Modélisation des structures en bois en environnement variable ». Thèse de doctorat, Limoges. <http://www.theses.fr/2006LIMO0031>.
- Minh Dung, Pham, Tuan Anh Nguyen, Wael Hafsa, Nicola Angellier, Laurent Ulmet, Mokhfi Takarli, Octavian Ion Pop, et Frédéric Dubois. 2018. « Experimental-numerical resistivity measurements approach for characterization in structural timber ». In *6th International Conference on Collaboration in Research and Education for Sustainable Transport Development (COREST VI 2018)*, 27:168-73. Ho Chi Minh, Vietnam. <https://hal-unilim.archives-ouvertes.fr/hal-01823098>.

- Moutee, Mohssine. 2006. « Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage ». <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/18711>.
- Mufti, Aftab A. 2002. « Structural Health Monitoring of Innovative Canadian Civil Engineering Structures ». *Structural Health Monitoring* 1 (1): 89-103. <https://doi.org/10.1177/147592170200100106>.
- Néo Terra. 2019. « Néo Terra - Transition énergétique et écologique en Nouvelle-Aquitaine ». Néo Terra. 2019. <https://www.neo-terra.fr/>.
- Nguyen, Tuan Anh. 2014. « Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois ». Phdthesis, Université de Limoges. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01130828/document>.
- Nguyen, Tuan Anh, Nicolas Angellier, Sabine Caré, Laurent Ulmet, et Frédéric Dubois. 2013. « Approaches to the Moisture Content Monitoring Intimber Elements: Development of a Resistive Method ». *Advanced Materials Research* 778 (septembre): 335-41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.335>.
- . 2017. « Numerical and Experimental Approaches to Characterize the Mass Transfer Process in Wood Elements ». *Wood Science and Technology* 51 (4): 811-30. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0898-5>.
- Niemz, Peter. 2012. « Non-Destructive Testing of Wood and Wood-Based Materials ». *Journal of Cultural Heritage*, 10.
- Niklewski, J., T. Isaksson, E. Frühwald Hansson, et S. Thelandersson. 2017. « Moisture Conditions of Rain-Exposed Glue-Laminated Timber Members: The Effect of Different Detailing ». *Wood Material Science & Engineering* 13 (3): 129-40. <https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1384758>.
- Norberg, P. 1999. « Monitoring Wood Moisture Content Using the WETCORR Method Part 1: Background and Theoretical Considerations. » *Holz Als Roh-Und Werkstoff* 57 (6): 448-53.
- . 2000. « Monitoring Wood Moisture Content Using the WETCORR Method - Part 2: Calibration and Validation ». *Holz Als Roh-Und Werkstoff* 58 (3): 129-34.
- Nursultanov, N., C. Altaner, et W. J. B. Heffernan. 2017. « Effect of Temperature on Electrical Conductivity of Green Sapwood of Pinus Radiata (Radiata Pine) ». *Wood Science and Technology* 51 (4): 795-809. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0917-6>.
- OQLF. 2020. « Le grand dictionnaire terminologique (GDT) rédigées par l'Office québécois de la langue française ». 2020. <http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>.
- Otten, Kathrin A., Christian Brischke, et Christopher Meyer. 2017. « Material Moisture Content of Wood and Cement Mortars – Electrical Resistance-Based Measurements in the High Ohmic Range ». *Construction and Building Materials* 153 (octobre): 640-46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090>.
- Palma, Pedro, et René Steiger. 2020. « Structural Health Monitoring of Timber Structures – Review of Available Methods and Case Studies ». *Construction and Building Materials* 248 (juillet): 118528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118528>.
- Paradis, Sébastien, Daniel Guibal, Jean Gérard, Jacques Beauchêne, Loïc Brancheriau, Brigitte Cabantous, Isabelle Châlon, et al. 2015. « TROPIX 7.5.1 : caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées ». Application. CIRAD-PERSYST. Amériques. 2015. <https://agritrop.cirad.fr/562041/>.
- Plooy, R. du, S. Palma Lopes, G. Villain, et X. Dérobert. 2013. « Development of a Multi-Ring Resistivity Cell and Multi-Electrode Resistivity Probe for Investigation of Cover Concrete Condition ». *NDT & E International* 54 (mars): 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.007>.

- Pop, Octavian, Frédéric Dubois, et Joseph Absi. 2013. « J-Integral Evaluation in Cracked Wood Specimen Using the Mark Tracking Method ». *Wood Science and Technology* 47 (2): 257-67. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0488-5>.
- Priou, Johann, Yann Lecieux, Mathilde Chevreuil, Virginie Gaillard, Cyril Lupi, Dominique Leduc, Emmanuel Rozière, Romain Guyard, et Franck Schoefs. 2019. « In Situ DC Electrical Resistivity Mapping Performed in a Reinforced Concrete Wharf Using Embedded Sensors ». *Construction and Building Materials* 211 (juin): 244-60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.152>.
- RE. 2020. « RE2020 : Une nouvelle étape vers une future réglementation environnementale des bâtiments neufs plus ambitieuse contre le changement climatique | Ministère de la Transition écologique ». 2020. <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>.
- Reinprecht, Ladislav. 2016. *Wood Deterioration, Protection and Maintenance*. John Wiley & Sons.
- Reinprecht, Ladislav, Helena Novotná, et Vilém Štefka. 2007. « Density profiles of spruce wood changed by brown-rot and white-rot fungi ». *Wood Research* 52 (4): 17–28.
- Riggio, Mariapaola, Ronald W. Anthony, Francesco Augelli, Bohumil Kasal, Thomas Lechner, Wayne Muller, et Thomas Tannert. 2014. « In Situ Assessment of Structural Timber Using Non-Destructive Techniques ». *Materials and Structures* 47 (5): 749-66. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0093-6>.
- Riggio, Mariapaola, et Morvarid Dilmaghani. 2019. « Structural health monitoring of timber buildings: a literature survey ». *Building Research & Information* 0 (0): 1-21. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1681253>.
- Rosen, Howard N. 1976. « Exponential dependency of moisture diffusion coefficient ». *Wood science* 8 (3): 174-79.
- Rowell, Roger M. 2007. « Chemical Modification of Wood ». *Handbook of Engineering Biopolymers, Homopolymers, Blends, and Composites*. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications, Inc., 2007: Pages 673-691. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/30669>.
- Samouëlian, A., G. Richard, I. Cousin, R. Guérin, A. Bruand, et A. Tabbagh. 2004. « Three-Dimensional Crack Monitoring by Electrical Resistivity Measurement: Monitoring Cracks by Electrical Resistivity ». *European Journal of Soil Science* 55 (4): 751-62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00632.x>.
- Samuelsson, Anders. 1990. « Resistanskurvor för elektriska fuktkvotsmätare ». *TräteknikCentrum rapport ; L 9006029*, 1990.
- Sandoz, J. L. 1993. « Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading ». *Wood Science and Technology* 27 (5): 373–380.
- Santos, João P., Christian Crémona, Luís Calado, Paulo Silveira, et André D. Orcesi. 2016. « On-Line Unsupervised Detection of Early Damage ». *Structural Control and Health Monitoring* 23 (7): 1047-69. <https://doi.org/10.1002/stc.1825>.
- Schajer, Gary S., et F. Bahar Orhan. 2006. « Measurement of Wood Grain Angle, Moisture Content and Density Using Microwaves ». *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 64 (6): 483-90. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0109-9>.
- Schweingruber, Fritz Hans. 1990. *Anatomie europäischer Hölzer*. Paul Haupt. Bern und Stuttgart.
- SETRA. 2006. « Les ponts en bois : Comment assurer leur durabilité. Guide technique du SETRA (Service d'études technique des routes et autoroutes) ». France.

- Sjostrom, Eero. 1993. *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*. Gulf Professional Publishing.
- Skaar, Christen. 1988. « Electrical Properties of Wood ». In *Wood-Water Relations*, édité par Christen Skaar, 207-62. Springer Series in Wood Science. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73683-4_6.
- Slávik, Richard, Miroslav Čekon, et Jan Štefaňák. 2019. « A Nondestructive Indirect Approach to Long-Term Wood Moisture Monitoring Based on Electrical Methods ». *Materials* 12 (15): 2373. <https://doi.org/10.3390/ma12152373>.
- Sophocleous, Marios. 2017. « Electrical Resistivity Sensing Methods and Implications ». In *Electrical Resistivity and Conductivity*, édité par Adel El Shahat. InTech. <https://doi.org/10.5772/67748>.
- Stamm, A. J. 1927. « The Electrical Resistance of Wood as a Measure of Its Moisture Content ». *Industrial & Engineering Chemistry* 19 (9): 1021–1025.
- . 1929. « The fiber-saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurements ». *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition* 1 (2): 94-97. <https://doi.org/10.1021/ac50066a021>.
- . 1964. « Wood and Cellulose Science. » *Wood and Cellulose Science*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19640604227>.
- Stamm, A. J., et M. Nelson. 1961. « Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients southern pine. » *For Prod J* 11: 536-43.
- Stamm, A. J., et W. E. Smith. 1969. « Lamina sorption and swelling theory for wood and cellulose ». *Wood science and technology* 3 (4): 301–323.
- Stedman, Phillip, Wayne Muller, Dale Cleary, Vasu Pardeshi, et John Spathonis. 2006. « Hornibrook Highway Condition Assessment ». *Bridge Branch, Main Roads Department, Queensland*.
- Taboga, Marco. 2017. « Normal distribution - Maximum Likelihood Estimation ». *Lectures on probability theory and mathematical statistics, 3rd edition. Online appendix.*, 2017. <https://www.statlect.com/fundamentals-of-statistics/normal-distribution-maximum-likelihood>.
- Thybring, Emil Engelund, Lisbeth Garbrecht Thygesen, et Ingo Burgert. 2017. « Hydroxyl Accessibility in Wood Cell Walls as Affected by Drying and Re-Wetting Procedures ». *Cellulose* 24 (6): 2375-84. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1278-x>.
- Torgovnikov, Grigoriy I. 1993. « Dielectric Properties of Wood-Based Materials ». In *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials*, édité par Grigoriy I. Torgovnikov, 135-59. Springer Series in Wood Science. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77453-9_8.
- Varnier, Maximin. 2019. « Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie ». Université de Limoges. <http://www.theses.fr/2019LIMO0035>.
- Venkateswaran, A. 1974. « The Interdependence of the Lignin Content and Electrical Properties of Wood ». *Wood and Fiber*, 1974, 6 édition, sect. 1.
- Vermaas, H. F. 1975. « Experimental Variables Affecting the Measurement of the DC Resistance of Wood ». *Holzforschung* 29 (4): 140-44. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1975.29.4.140>.
- Wang, Xinzhou, Xuanzong Chen, Xuqin Xie, Yan Wu, Linguo Zhao, Yanjun Li, et Siqun Wang. 2018. « Effects of Thermal Modification on the Physical, Chemical and

- Micromechanical Properties of Masson Pine Wood (*Pinus Massoniana* Lamb.) ». *Holzforschung* 72 (12): 1063-70. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0205>.
- Wenner, Frank. 1915. « A method for measuring Earth resistivity ». *Journal of the Washington Academy of Sciences* 5 (16): 561-63.
- X, Ma, Zhang B, et Liu B. 2020. « Analysis of Fungal Diversity of the Rotten Wooden Pillars of a Historic Building », février. <https://doi.org/10.21203/rs.2.23473/v1>.
- Xu, Shan, Colette Sirieix, Catherine Ferrier, Delphine Lacanette-Puyo, Joelle Riss, et Philippe Malaurent. 2015. « A Geophysical Tool for the Conservation of a Decorated Cave – a Case Study for the Lascaux Cave ». *Archaeological Prospection* 22 (4): 283-92. <https://doi.org/10.1002/arp.1513>.
- Yamamoto, H. 1999. « A model of the anisotropic swelling and shrinking process of wood. Part 1. Generalization of Barber's wood fiber model ». *Wood Science and Technology* 33 (4): 311–325.
- Yamamoto, Hiroyuki, Hiroki Sakagami, Yoshio Kijidani, et Junji Matsumura. 2013. « Dependence of Microcrack Behavior in Wood on Moisture Content during Drying ». Research Article. *Advances in Materials Science and Engineering*. 12 septembre 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/802639>.
- Yildiz, Sibel, Engin D. Gezer, et Umit C. Yildiz. 2006. « Mechanical and Chemical Behavior of Spruce Wood Modified by Heat ». *Building and Environment* 41 (12): 1762-66. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017>.
- Zelinka, Samuel L, Donald S Stone, et Douglas R Rammer. 2007. « EQUIVALENT CIRCUIT MODELING OF WOOD AT 12% MOISTURE CONTENT ». *WOOD AND FIBER SCIENCE* 39: 10.
- Zhang, Xi. 2021. « Surveillance et Auscultation des Ouvrages en bois par Identification des Champs Hydrique et Mécanique: Couplage des Méthodes Acoustiques et Électromagnétiques ». Université de Limoges.
- Zhang, Xi, Frédéric Lamy, Mokhfi Takarli, Nicolas Angellier, Nicolas Sauvat, Zoubir Mehdi Sbartai, Fabien Courreges, et Frédéric Dubois. 2018. « Propagation d'ondes Ultrasonores Dans Les Matériaux Orthotropes et Hygrosensibles: Vers Une Fiabilisation Du CND-Bois ». *Academic Journal of Civil Engineering* 36 (1): 263-66. <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.63>.

Normes

NF-EN-13306-X-60-319 : Terminologie de la maintenance.

EN 335 : Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois.

EN 350 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Méthodes d'essai et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois.

EN 350-1 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif - Partie 1 : guide des principes d'essai et de classification de la durabilité naturelle du bois.

EN 460 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif - Guide d'exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes de risque.

EN 1995-1-1/NA : Eurocode 5 : conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments - Annexe nationale à la NF EN 1995-1-1:2008 - Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments.

EN 13183-1 : Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1 : détermination par la méthode par dessiccation.

EN 13183-2 : Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2 : estimation par méthode électrique par résistance.

EN 13183-3 : Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 3 : estimation par méthode capacitive.

ISO 12571 : Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique

Annexes

Annexe 1. Modélisation statistique de la résistance électrique.....	167
Annexe 1.1. Fonctions de densité et de log-vraisemblance des lois de Weibull et Gamma	167
Annexe 1.2. Teneurs en eau comprises entre 45 et 54%	168
Annexe 1.3. Teneurs en eau comprises entre 157 et 192% (bois vert).....	169
Annexe 2. Combinaisons de configurations d'électrode testées.....	170
Annexe 3. Résultats complémentaires de résistances électriques en utilisant les modes Rho et RhoIP	171
Annexe 4. Résistances et résistivités à différentes configurations.....	172
Annexe 5. Configurations et mesures in-situ	174

Annexe 1. Modélisation statistique de la résistance électrique

Annexe 1.1. Fonctions de densité et de log-vraisemblance des lois de Weibull et Gamma

Tableau 0-1 : Les fonctions de densité et de log-vraisemblance des lois de Weibull et Gamma

Loi Statistique	Fonction de densité	Fonction de log-vraisemblance
Weibull	$f(x; k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$ <p>où $k > 0$ est le paramètre de forme et $\lambda > 0$ est le paramètre d'échelle de la distribution</p>	$\begin{aligned} \text{Log } L(x; k, \lambda) = & n \ln\left(\frac{k}{\lambda}\right) - \lambda^{-k} \\ & + (\alpha - 1) \log x \\ & - \beta x \sum_{i=1}^n x_i^k + (k \\ & - 1) \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{x_i}{\lambda}\right) \end{aligned}$
Gamma	$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$ <p>où Γ est la fonction Gamma, $\alpha > 0$ est le paramètre de forme et $\beta > 0$ est le paramètre d'échelle de la distribution</p>	$\begin{aligned} \text{Log } L(x; \alpha, \beta) = & a \log \beta - \log \Gamma(\alpha) \\ & + (\alpha - 1) \log x - \beta x \end{aligned}$

Annexe 1.2. Teneurs en eau comprises entre 45 et 54%

Le modèle statistique basé sur la loi Normale a été appliqué sur une gamme de teneurs en eau élevées (au-delà du domaine hygroscopique). Ces simulations se basent essentiellement sur des essais effectués sur du bois vert.

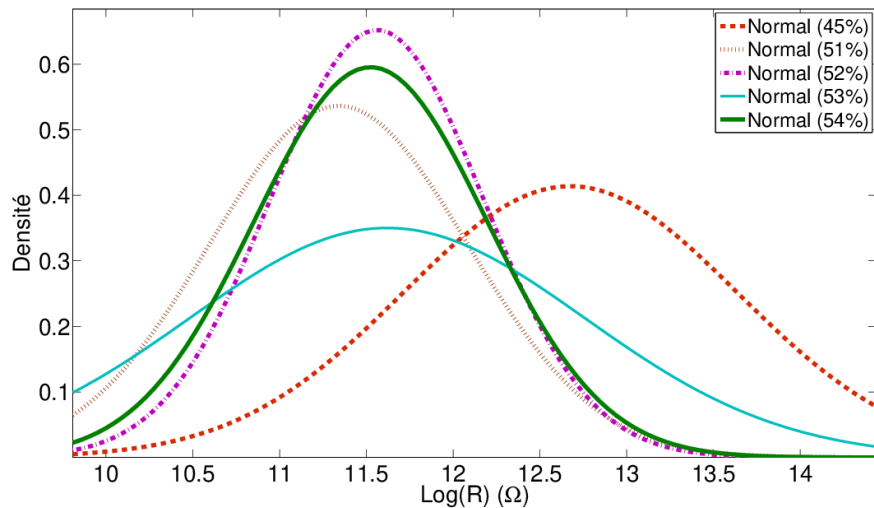


Figure 0-1 : Fonctions de densité de probabilités pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 45 % et 54 %

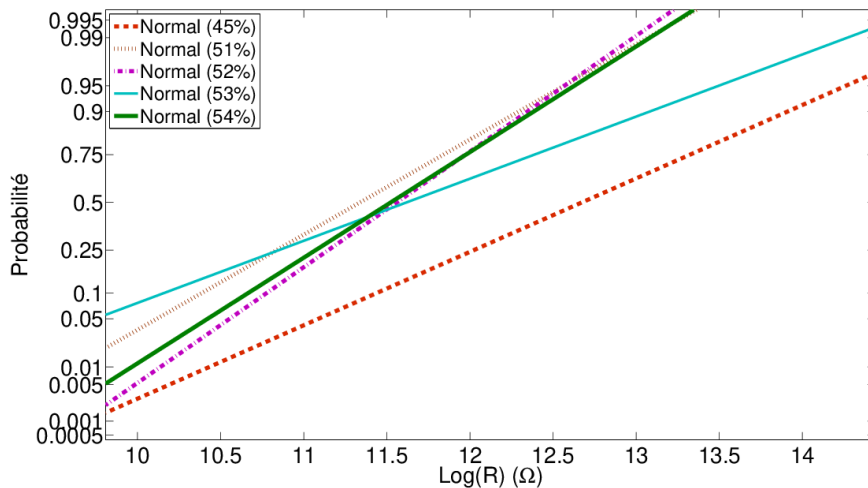


Figure 0-2 : Fonctions de répartition de probabilités pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 45 % et 54 %

Annexe 1.3. Teneurs en eau comprises entre 157 et 192% (bois vert)

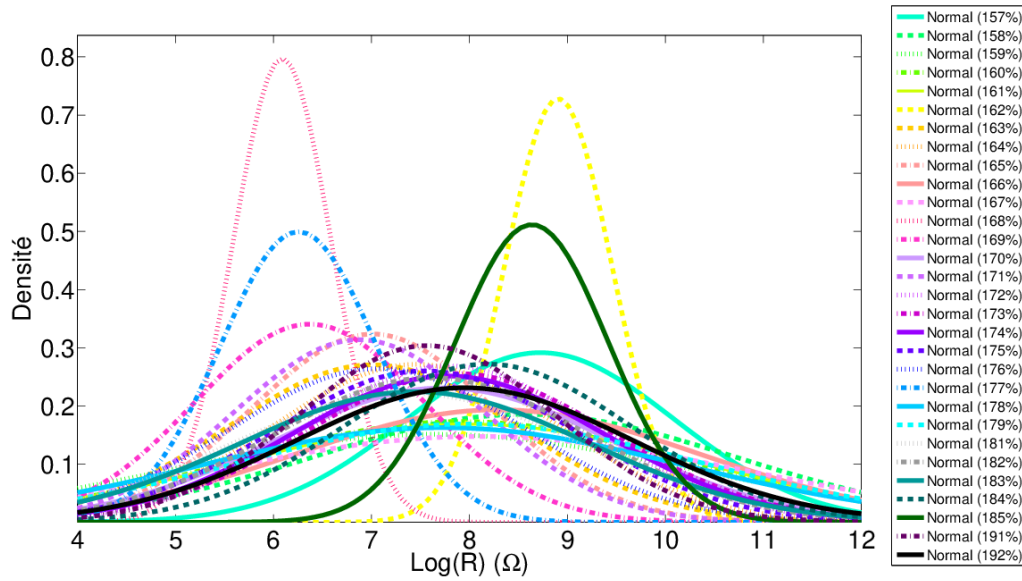


Figure 0-3 : Fonctions de densité de probabilité pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 157 % et 192 %

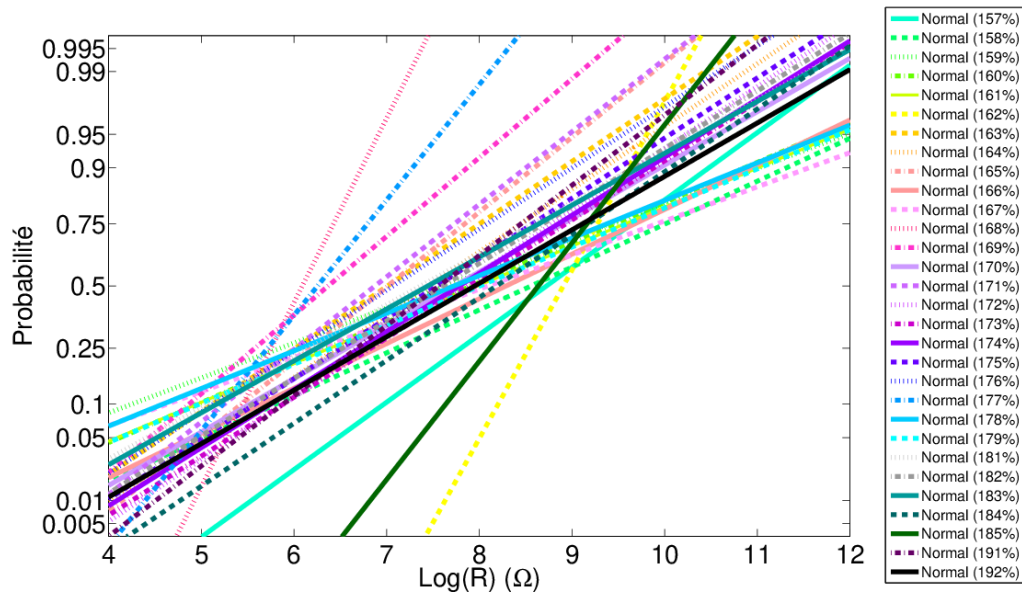


Figure 0-4 : Fonctions de densité de probabilité pour des mesures de résistances électriques à des teneurs en eau entre 157 % et 192 %

Annexe 2. Combinaisons de configurations d'électrode testées

Tableau 0-2 : Combinaisons testées pour les configurations γ et α (A et B pour l'injection ; M et N pour la mesure de tension)

Configuration	A	B	M	N
γ	1	3	2	4
	1	3	4	2
	3	1	2	4
	3	1	4	2
	2	4	1	3
	2	4	3	1
	4	2	1	3
	4	2	3	1
α	1	4	2	3
	1	4	3	2
	4	1	2	3
	4	1	3	2

Annexe 3. Résultats complémentaires de résistances électriques en utilisant les modes Rho et RhoIP

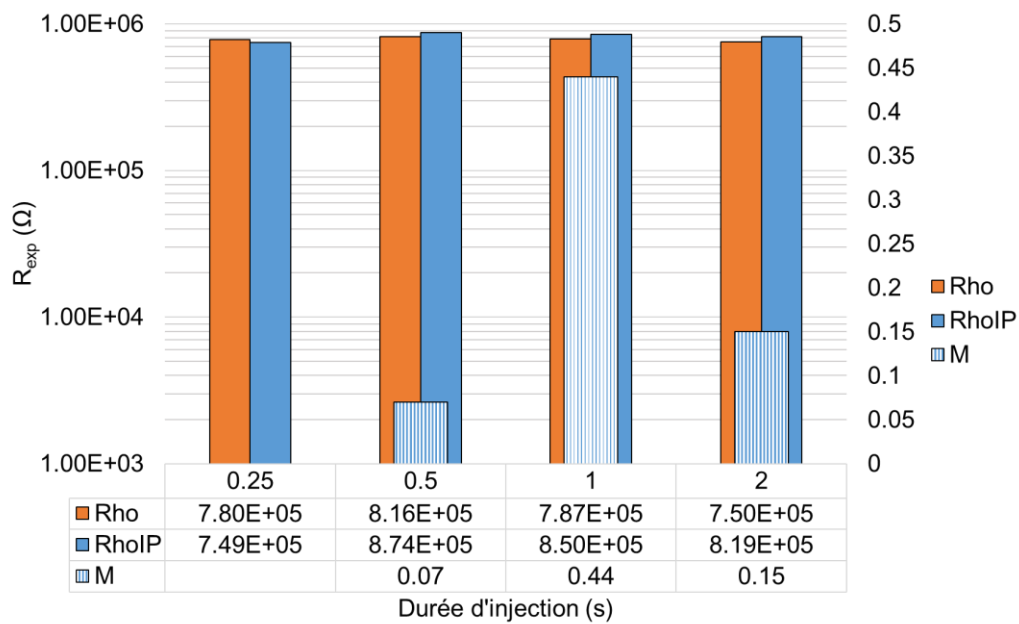


Figure 0-5 : Mesures de résistances en mode Rho et Rho/IP et de chargeabilité totale à différentes durées d'injection (configuration γ)

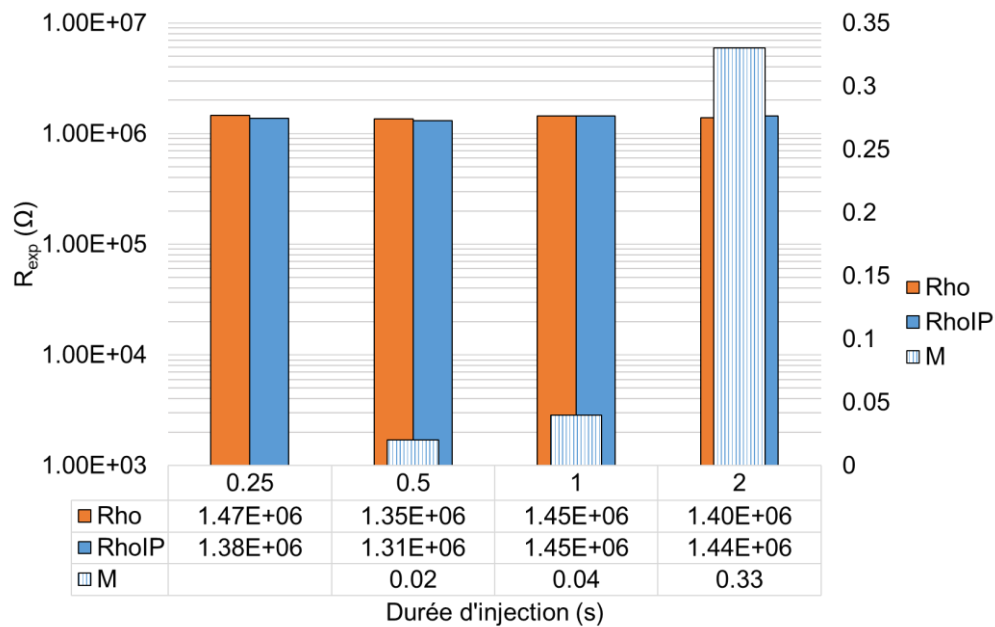


Figure 0-6 : Mesures de résistances en mode Rho et Rho/IP et de chargeabilité totale à différentes durées d'injection (configuration α)

Pour les configurations γ et α , les résultats montrent des valeurs de résistances relativement constantes en utilisant les 2 modes Rho et Rho/IP, et des faibles valeurs de chargeabilité totale M par rapport à la configuration β .

Annexe 4. Résistances et résistivités à différentes configurations

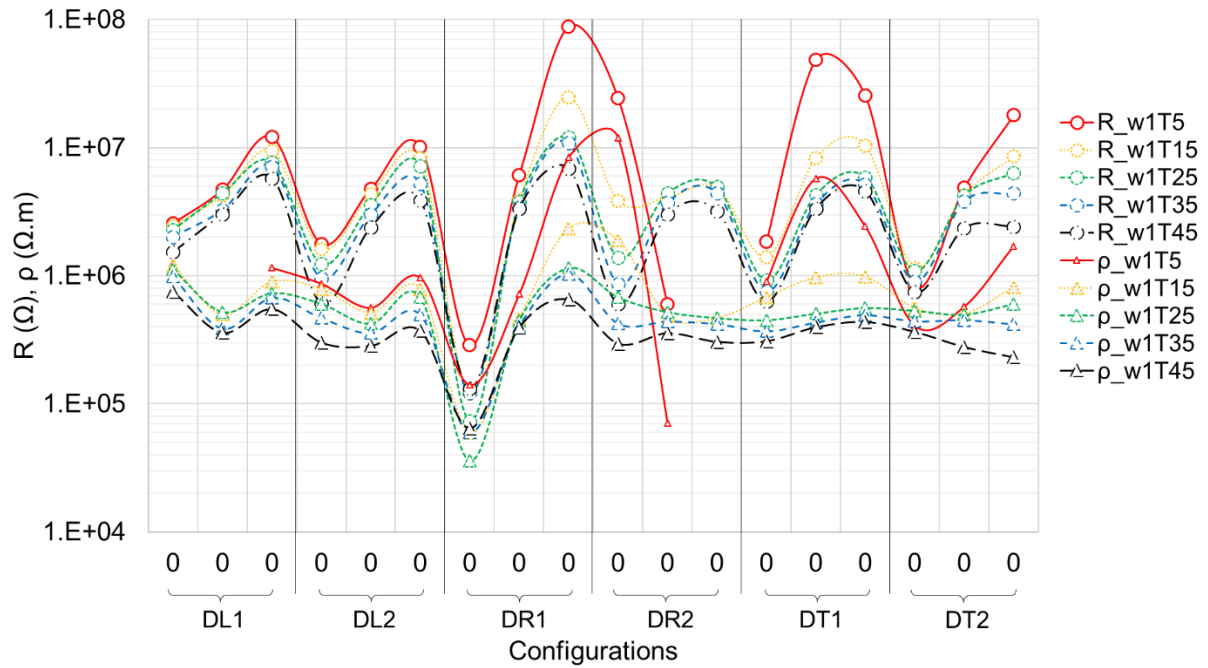


Figure 0-7 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_1 = 11.6\%$)

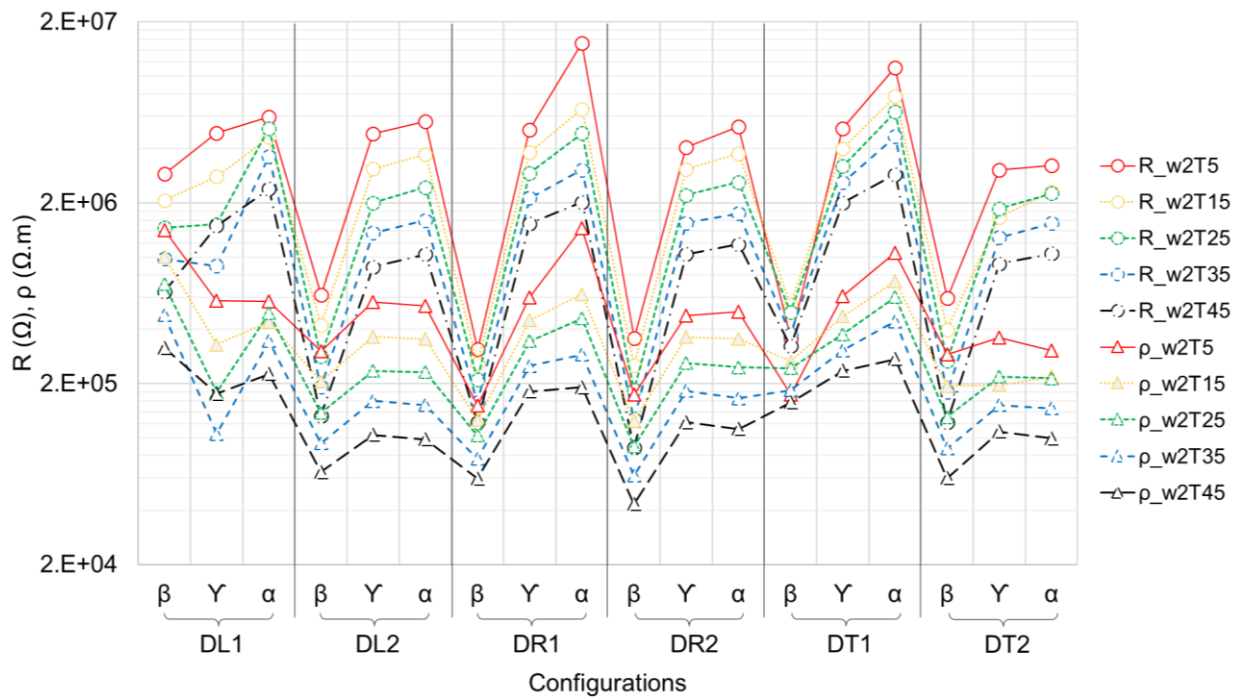


Figure 0-8 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_2 = 14.1\%$)

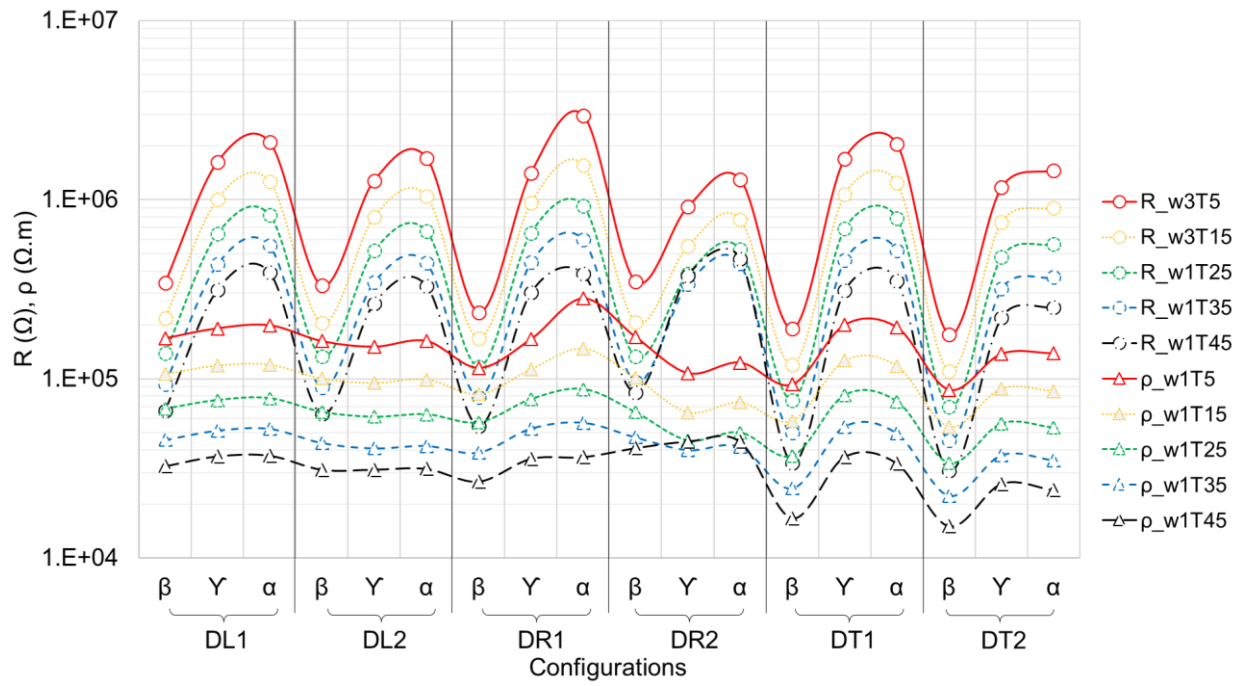


Figure 0-9 : Résistances et résistivités à différentes configurations et températures ($w_2 = 16.8 \%$)

Annexe 5. Configurations et mesures in-situ

Tableau 0-3 : Configurations DD équatorial testées sur le poteau

d (cm)	A	B	M	N
10	1	2	3	4
10	1	2	4	3
10	2	1	3	4
10	2	1	4	3
20	1	3	2	4
20	1	3	4	2
20	3	1	2	4
20	3	1	4	2
20	2	4	1	3
20	2	4	3	1
20	4	2	1	3
20	4	2	3	1
10	3	4	1	2
10	3	4	2	1
10	4	3	1	2
10	4	3	2	1

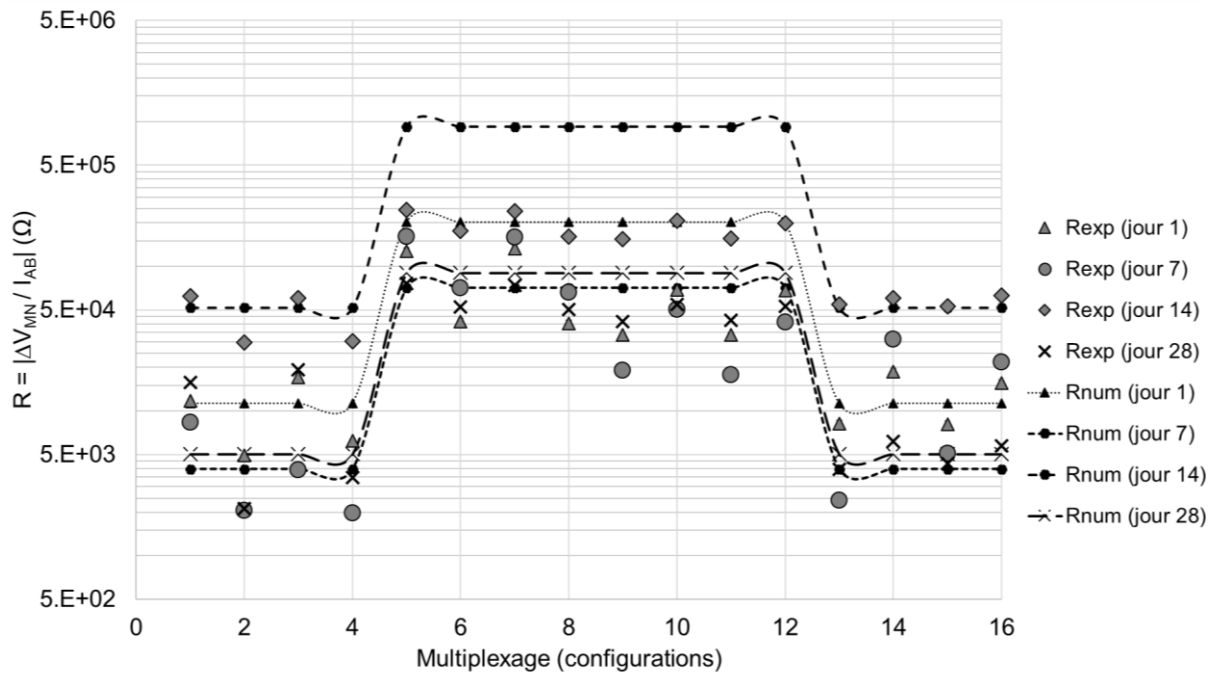


Figure 0-10 : Résistances expérimentales et numériques (poteau)

Approche expérimentale-numérique basée sur la résistivité électrique pour l'évaluation de l'état hydrique du Douglas-fir

La gestion de la durabilité du matériau bois représente un enjeu socio-économique dans un premier temps, mais aussi des intérêts environnementaux et culturels importants. Dans ce contexte, ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une problématique générale qui porte sur la durabilité des structures en bois. Le travail de recherche réalisé a eu pour objectif d'étudier le comportement hydrique de ce matériau en utilisant une approche de Contrôle Non Destructif (CND) basée sur la mesure de la résistivité électrique.

Ce travail de recherche repose principalement sur l'utilisation d'une méthode électrique habituellement employée pour des mesures multiplexées de prospection hydrogéologique en géophysique. La démarche suivie est basée sur le développement d'une approche mixte par le couplage des mesures électriques et inversion numérique afin de déterminer le taux d'humidité à l'échelle du matériau bois, la répartition spatiale de l'humidité à l'échelle intermédiaire d'un élément et in-situ à l'échelle d'une structure. Des études paramétriques sont menées en parallèle pour caractériser l'influence des différentes conditions environnementales (humidité et température) sur les mesures expérimentales in-situ.

Mots-clés : Bois, durabilité, CND, teneur en eau, résistivité électrique.

An experimental–numerical electrical resistivity-based method for moisture content assessment in Douglas-fir wood

Moisture is a major factor that influence the service life durability of wood-based structures. In order to establish an optimal and reliable diagnostic of the hydric state of these structures, this work proposes on the use of a Non Destructive Testing (NDT) approach based on the electrical resistivity measurements. The aim of this work is to develop a mixed experimental-numerical approach to evaluate the wood moisture content (MC) in Douglas-fir wood. Therefore, a parametric study was set up to analyze the effect of some operational and material variables on resistance measurements. An experimental protocol was implemented to evaluate spatial distribution of MC in wood element. Electrical resistivity measurements on a timber construction are also presented to highlight the experimental strategy concerning in-situ monitoring.

Keywords : Wood, durability, Nondestructive testing, moisture content, electrical resistivity

