



HAL
open science

Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures

Hang Li

► **To cite this version:**

Hang Li. Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30288 . tel-01949792

HAL Id: tel-01949792

<https://theses.hal.science/tel-01949792v1>

Submitted on 10 Dec 2018

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 Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Hang LI

le 29 novembre 2017

Titre :

Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie mécanique, mécanique des matériaux

Unité de recherche :

Institut Clément Ader (ICA), UMR CNRS 5312

Directeur(s) de Thèse :

Vincent GIBIAT

Membres du jury :

Sabine CARE	Directrice de recherche IFSTTAR à Navier	Rapporteur
Robert COLLET	Maître de conférences HDR à l'ENSAM	Rapporteur
Sylvain CHATAIGNER	IDTPE HDR à l'IFSTTAR	Examinateur
Xiaojing GONG	Professeur des universités à l'ICA-IUT de Tarbes	Examinatrice
Vincent GIBIAT	Professeur des universités à l'ICA-Université Paul Sabatier	Directeur
Marianne PERRIN	Maître de conférences à l'ICA-IUT de Tarbes	Co-directrice
Florent EYMA	Maître de conférences HDR à l'ICA-IUT de Tarbes	Co-encadrant, Invité
Xavier JACOB	Maître de conférences à l'Université Paul Sabatier	Co-encadrant, Invité

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'Institut Clément Ader (ICA) sur le site de l'IUT de Tarbes, avec également la collaboration de l'ancien laboratoire PHASE (Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement). Il a été cofinancé par la région Midi-Pyrénées, le Conseil Général des Hautes-Pyrénées, le Grand Tarbes et l'IUT de Tarbes.

Je tiens tout d'abord à remercier Mme Sabine CARE, Directrice de recherche à l'IFSTTAR Champs-sur-Marne, et Mr Robert COLLET, Maître de conférences HDR à l'ENSAM Cluny, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je souhaiterais également remercier Mr Sylvain CHATAIGNER, IDTPE HDR à l'IFSTTAR Nantes, et Mme Xiaojing GONG, Professeur à l'ICA-IUT de Tarbes, pour avoir accepté d'être membres du jury de soutenance.

Mes sincères reconnaissances vont tout particulièrement à mes encadrants : Mr Vincent GIBIAT, professeur à l'ICA-Université Paul Sabatier et directeur de cette thèse, Mme Marianne PERRIN, maître de conférences à l'ICA-IUT de Tarbes, Mr Florent EYMA, maître de conférences HDR à l'ICA-IUT de Tarbes et Mr Xavier JACOB, maître de conférences à l'Université Paul Sabatier. Je remercie vivement cette équipe encadrante pour son aide et son soutien pendant la réalisation de ce travail. Je n'aurais jamais pu réaliser cette thèse sans leurs conseils, leurs compétences dans les différents domaines abordés et leurs disponibilités, même pendant les vacances. J'ai énormément apprécié leurs qualités humaines et scientifiques qui m'ont aidé à mener à bien ce travail.

Je voudrais exprimer aussi ma gratitude pour l'aide apportée par les techniciens des différents établissements : Mr Emmanuel LAUGT au département GEII de l'IUT de Tarbes, pour son aide sur la réalisation du Giga-Ohmmètre ; Mr Frédéric LEROY au département GMP de l'IUT de Tarbes, pour son aide sur la réalisation du montage mécanique pour les mesures ultrasonores ; Mr Pierre DE GUIBERT du laboratoire PHASE, pour son aide sur le câblage des capteurs.

Un grand merci à Tommy VILLELA pour son aide sur l'expérimentation des mesures électriques dans le cadre de son projet de master recherche effectué à l'ICA de l'IUT de Tarbes. Je lui souhaite plein de succès dans sa vie.

Merci également à tous les collègues que j'ai eu l'occasion de rencontrer dans les différents établissements, pour leur aide, leur soutien, leur bonne humeur et les discussions.

Merci enfin à toute ma famille et à mes proches qui m'ont toujours soutenu au cours de ces trois années.

Table des matières

Remerciements.....	1
Table des matières.....	2
Introduction.....	5
Chapitre 1. Etude bibliographique	8
1.1. Le matériau bois : généralités	8
1.1.1. Le bois : matériau naturel.....	8
1.1.2. Anisotropie et hétérogénéité du bois.....	9
1.1.3. Facteurs pathologiques et durabilité	12
1.1.4. Comportement hygroscopique du bois.....	16
1.1.5. Conclusion.....	20
1.2. Utilisation du bois en structures.....	20
1.2.1. Les ouvrages d'art en bois.....	20
1.2.2. Le bois lamellé-collé.....	24
1.2.3. Pathologies des ouvrages d'art en bois	26
1.2.4. Conclusion.....	29
1.3. Mesure de l'humidité du bois	30
1.3.1. Méthodes électriques.....	30
1.3.2. Méthodes ultrasonores.....	39
1.3.3. Conclusion.....	44
1.4. Suivi de la santé structurale des ouvrages par intégration de capteurs	45
1.4.1. Généralités du suivi de la santé structurale des ouvrages	45
1.4.2. Suivi via l'utilisation des méthodes électriques.....	46
1.4.3. Suivi via l'utilisation des méthodes ultrasonores	53
1.4.4. Conclusion.....	57
1.5. Synthèse.....	58
Chapitre 2. Suivi de l'humidité par mesures électriques.....	60
2.1. Etudes préliminaires relatives aux mesures électriques	60
2.1.1. Identifications des configurations de mesures	60
2.1.2. Faisabilité des mesures électriques dans le bois	65
2.1.3. Configuration des appareils de mesure	68
2.1.4. Conclusion.....	69
2.2. Protocoles expérimentaux	70

2.2.1.	Collage des échantillons lamellé-collés	70
2.2.2.	Procédures d'humidification.....	71
2.2.3.	Traitement des données de mesures.....	80
2.2.4.	Conclusion	82
2.3.	Suivi de l'humidité par capteurs intégrés	82
2.3.1.	Suivi de l'humidité dans les échantillons simples	82
2.3.1.1.	Evaluation du potentiel des différentes configurations pour le suivi de l'humidité	82
2.3.1.2.	Incertitudes d'estimation de l'humidité	85
2.3.1.3.	Conclusion.....	88
2.3.2.	Suivi de l'humidité dans les échantillons lamellé-collé.....	89
2.3.2.1.	Evaluation du potentiel des différentes configurations pour le suivi de l'humidité	89
2.3.2.2.	Incertitudes d'estimation de l'humidité	91
2.3.2.3.	Comparaison entre les échantillons simples et les échantillons lamellé-collés	93
2.3.2.4.	Conclusion.....	100
2.3.3.	Influence de l'espacement des électrodes	102
2.3.3.1.	Influence de l'espacement des électrodes dans les échantillons simples	102
2.3.3.2.	Influence de l'espacement des électrodes dans les échantillons lamellé-collés	106
2.3.3.3.	Conclusion.....	110
2.3.4.	Synthèse.....	111
Chapitre 3.	Suivi de l'humidité par mesures ultrasonores.....	113
3.1.	Etudes préliminaires relatives aux mesures ultrasonores	113
3.1.1.	Identification des configurations de mesures	114
3.1.2.	Faisabilité des mesures ultrasonores dans le bois	122
3.1.3.	Configuration des appareils de mesure	126
3.1.4.	Conclusion.....	127
3.2.	Protocoles expérimentaux	128
3.2.1.	Collage des échantillons lamellé-collés	128
3.2.2.	Procédures d'humidification.....	128
3.2.3.	Traitement des données de mesures.....	129
3.2.4.	Conclusion	130
3.3.	Suivi de l'humidité par capteurs intégrés	130

3.3.1.	Influence du changement des conditions de couplage acoustique capteur/bois sur les mesures ultrasonores	130
3.3.1.1.	Influence sur la forme des signaux	131
3.3.1.2.	Influence sur la vitesse ultrasonore.....	133
3.3.1.3.	Conclusion.....	134
3.3.2.	Suivi de l'humidité dans les échantillons LC	134
3.3.2.1.	Résultats pour la configuration 5 : Transmission dans la lamelle	135
3.3.2.2.	Configuration 6 : Transmission à l'interface.....	137
3.3.2.3.	Conclusion.....	138
3.3.3.	Synthèse.....	139
	Conclusions et perspectives	140
	Références.....	144
Annexe 1.	Paramètres de la méthode par acousto-ultrasons	157
Annexe 2.	Calcul du coût de réalisation de chaque configuration pour les mesures électriques.....	158
Annexe 3.	Schéma de développement du Giga-Ohmmètre	159
Annexe 4.	Fiche technique de la colle utilisée pour le collage des échantillons lamellé-collés	161
Annexe 5.	Résultats complémentaires concernant les cinétiques d'humidification... ..	162
Annexe 6.	Incertitudes d'estimation de l'humidité pour les mesures électriques	166
Annexe 7.	Comparaison des résultats des mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC	171
Annexe 8.	Résultats de l'influence de l'espacement des électrodes pour les mesures électriques.....	174
Annexe 9.	Calcul du couple équivalent pour le montage des mesures ultrasonores ..	177

Introduction

Le matériau bois, après avoir été un des premiers matériaux utilisé par l'homme, fut supplanté pendant de nombreuses années par d'autres matériaux dits plus « performants » et « modernes » comme l'acier, le béton, etc. Cependant, depuis le début du XXIème siècle, ce matériau ancestral revient sur le devant de la scène dans la construction car il peut répondre à de nouvelles problématiques. Les principales raisons de ce renouvellement sont bien évidemment liées aux préoccupations environnementales face aux nouveaux challenges imposés par le développement durable (Barbier 2007), mais également à la légèreté et à la facilité de montage de ces ouvrages d'art (SETRA 2006).

En outre, les politiques publiques incitent de plus en plus les maîtres d'ouvrage à concevoir en intégrant les critères de développement durable. Selon l'article 21-5 de la « loi sur l'air » de décembre 1996, « *certaines constructions nouvelles devront comporter une quantité minimale de matériaux en bois avant le 1er janvier 2000* ». Le bois devient donc un matériau de construction privilégié car son bilan carbone reste relativement faible contrairement au béton en particulier. C'est ainsi que ces dix dernières années, de nombreux ouvrages en bois ont vu le jour sur le territoire français. Qui plus est, 80% de ces ouvrages impliquent l'utilisation du bois lamellé-collé (LC) (Barbier et al. 2006). Le fort développement des ouvrages en bois LC peut s'expliquer par leur résistance mécanique élevée (par rapport au bois massif), mais aussi par la possibilité qu'ils permettent de construire des ouvrages de grande portée (Natterer et al. 2004).

Néanmoins, les problèmes de durabilité (ou de durée de vie) de ces structures sont un élément limitant leur développement (D'Ayala et al. 2014). Des pathologies comme la fissuration, la délamination des poutres en LC, ainsi que les attaques fongiques et les attaques d'insectes ont été constatées sur les ouvrages d'art en bois (LCPC 2008). La principale condition d'apparition de ces pathologies est l'humidité excessive du matériau ou la variation de l'humidité (cycles humidification/séchage) (Dietsch et al. 2014a ; Pousette et al. 2016). De ce fait, les gestionnaires d'ouvrages ont exprimé leur besoin en techniques de contrôle en continu de l'humidité du bois (Kasal 2013).

Depuis quelques années, le suivi de l'humidité dans les ouvrages d'art en bois par des capteurs résistifs a été initié dans certains pays européens (Suisse, Suède et Allemagne) (Franke et al. 2013a; Dietsch et al. 2014b; Bjorngrim et al. 2016). Les résultats de ces travaux montrent qu'il est possible de suivre la variation d'humidité dans les structures en bois. En général, les capteurs donnent des données correspondantes aux variations d'humidités d'équilibre (liées à la température et à l'humidité relative de l'air).

En revanche, les solutions existantes ne concernent que des mesures proches de la surface des structures en bois. Cela se révèle insuffisant pour améliorer la durabilité (ou la durée de vie) de ces ouvrages car certaines pathologies constatées sur les structures LC (délamination, fissuration ...) sont souvent assez locales et/ou à l'intérieur de la structure. Il est donc nécessaire de réaliser des mesures locales et internes au niveau des lamelles des poutres LC afin d'avoir une prédiction plus fiable de la durée de vie des ouvrages d'art en bois. De cette manière, il sera possible d'accéder à davantage d'informations, plus précises, et permettant d'établir un lien direct entre l'humidité (ou cycles humidification/séchage) et la durée de vie résiduelle de l'ouvrage.

Depuis 5 ans à l'ICA sur le site de l'IUT de Tarbes, un programme de recherche soutenu par l'ensemble des collectivités territoriales ainsi que l'IUT a été mis en place. Il s'agit d'un

projet de recherche intitulé « Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures ». L'objectif est de transformer les poutres LC en matériaux « intelligents » par intégration de systèmes de suivi de l'humidité dans/entre les lamelles. La démarche expérimentale proposée dans ce projet de recherche se décompose en deux parties.

La première partie concerne l'intégration des systèmes de suivi de l'humidité dans les poutres LC. Elle consiste à mettre en place une instrumentation embarquée pour contrôler l'humidité des bois LC (mesures globales et locales au niveau des lamelles). La principale contrainte inhérente à cette intégration concerne l'adaptabilité au processus de fabrication des poutres LC. Il faudra donc identifier des technologies de capteurs peu coûteuses et permettant une intégration pendant le processus de fabrication des poutres LC. L'objectif est de transformer le matériau bois en « matériau intelligent », ce qui laisse présager une ouverture du marché à de nouveaux défis structurels via la commercialisation de produits plus fiables et plus sécurisants.

La deuxième partie de ce projet de recherche consiste à se servir de l'instrumentation embarquée mise en place pour créer une base de données « durabilité » (ou durée de vie). Il s'agira plus particulièrement d'appréhender l'étude de l'influence de l'humidité sur la tenue mécanique de ces nouveaux matériaux « bois intelligents » du génie civil. L'objectif sera alors de connaître l'influence de l'exposition du matériau à l'humidité (ou cycles humidification/séchage) sur la durabilité et sur la durée de vie résiduelle des structures. L'objectif sous-jacent est de fournir aux gestionnaires d'ouvrages un système fiable permettant d'activer et d'optimiser les actions de maintenance préventive.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de thèse porte sur la réalisation de la première partie de ce projet de recherche concernant l'instrumentation des poutres LC. Il est composé de 3 grands chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. Elle consiste dans un premier temps à recenser quelques généralités sur le matériau bois mais aussi sur son utilisation en structures. Dans un deuxième temps, nous allons aborder les généralités sur les méthodes utilisables pour le suivi de l'humidité du bois. Enfin, une dernière partie est dédiée à la présentation des technologies de capteurs correspondantes permettant une intégration au niveau des lamelles du bois LC.

Le deuxième chapitre et le troisième chapitre concernent les différentes étapes de développement réalisées dans le cadre du suivi de l'humidité avec capteurs intégrés en utilisant les deux méthodes identifiées dans ce travail, à savoir : les méthodes électriques et les méthodes ultrasonores. Le chapitre 2 présentera les résultats des mesures électriques et le chapitre 3 abordera ceux des mesures ultrasonores. Les deux chapitres s'organisent de la manière suivante. Dans un premier temps, nous présentons les études préliminaires réalisées pour la mise en route des essais du suivi de l'humidité avec capteurs intégrés. Ces études préliminaires ont pour but de :

- Vérifier le bon fonctionnement des configurations de mesures identifiées concernant les deux familles de méthodes de suivi évoquées (électriques et ultrasonores);
- Vérifier la faisabilité des mesures (électriques/ultrasonores) par les capteurs utilisés sous une pression de 10 bars, généralement utilisée dans le processus de fabrication du bois LC;
- Fixer les réglages des appareils de mesure pour les essais de suivi de l'humidité avec capteurs intégrés.

Puis, nous allons décrire les protocoles expérimentaux utilisés dans ces travaux concernant la

fabrication des échantillons LC, la mise en humidification des échantillons et le traitement des données de mesures pour les essais du suivi de l'humidité.

Enfin, nous allons aborder les résultats du suivi de l'humidité obtenus via les mesures réalisées avec les capteurs intégrés.

A la fin de ce mémoire, quelques conclusions et perspectives seront également présentées.

Chapitre 1. Etude bibliographique

1.1. Le matériau bois : généralités

Cette première section a pour but de présenter des généralités indispensables sur le matériau bois en s'intéressant plus particulièrement à ses caractéristiques écologiques, son hétérogénéité, ses principales pathologies et son comportement hygroscopique.

1.1.1. Le bois : matériau naturel

Le bois, étant un matériau naturel, écologique et renouvelable, il dispose de nombreux avantages environnementaux. En effet, ce matériau « bio-sourcé » a un bilan carbone négatif grâce à la réaction de photosynthèse qui permet la fixation du CO₂ (contribution majeure à l'effet de serre) et la production d'oxygène (Trouy et al. 2012a). Pour la fabrication d'un mètre cube de bois, un arbre peut fixer environ 1 tonne de CO₂, et produire 500 Kg d'oxygène. Qui plus est, si on compare l'énergie nécessaire à la fabrication d'une tonne de bois (1 MJ) avec l'énergie nécessaire à la fabrication d'autres matériaux, le bois est 4 fois moins énergivore que le béton (4 MJ), 60 fois moins que l'acier (60 MJ) et 130 fois moins que l'aluminium (130 MJ) (Auvergne Promobois 2012).

L'histogramme de la Figure 1, d'après Leicher et al. (2014), compare l'énergie nécessaire à la production (énergie-procédé) de 3 types de poutres (lamellé-collé (LC), béton et acier) assurant la même portance pour un bâtiment de 50 m². On constate que la poutre LC consomme 1,6 fois moins d'énergie que le béton et 5 fois moins que l'acier.

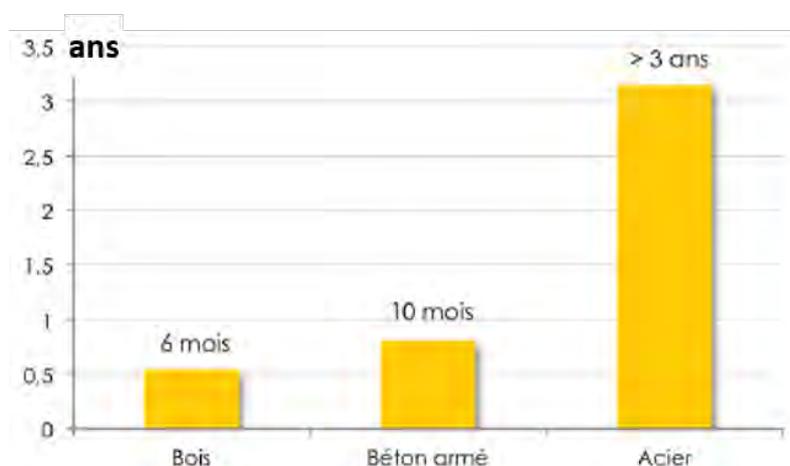


Figure 1: Equivalence de l'énergie-procédé de trois poutres (bois lamellé-collé, béton et acier) en durée de consommation théorique d'un bâtiment de 50 m² (Leicher et al. 2014)

Ces quelques exemples mettent clairement en évidence l'intérêt de développer l'utilisation du bois en construction. De plus, les politiques publiques incitent de plus en plus les maîtres d'ouvrage à concevoir en intégrant les critères de développement durable. Selon l'article 21-5 de la « loi sur l'air » de décembre 1996, certaines constructions nouvelles doivent comporter une quantité minimale de matériaux en bois avant le 1er janvier 2000.

Néanmoins, la mise en œuvre du bois est loin d'être simple car ce matériau présente des caractéristiques variables et des singularités plus ou moins marquées (Plassat 2009). En effet, le bois est à la fois anisotrope, hétérogène et hygroscopique. Nous allons aborder ces points dans les paragraphes suivants.

1.1.2. Anisotropie et hétérogénéité du bois

Le bois est un tissu végétal assurant à la fois le rôle de conduction de la sève brute des racines jusqu'aux feuilles et le rôle de soutien mécanique de la plante (Trouy et al. 2012a). On peut classer les essences de bois en deux grandes familles :

- **Les résineux**, qui sont des végétaux plutôt primitifs et qui présentent une organisation relativement simple d'un point de vue botanique (Figure 2). Ils sont principalement composés de trachéides assurant à la fois le transport de la sève brute et la résistance mécanique, mais également de cellules de parenchymes. Ils sont très utilisés en construction en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques, de leur faible coût, et de leur grande disponibilité (LMC 2011).
- **Les feuillus**, qui présentent une structure plus évoluée et plus complexe que les résineux (Figure 3), sont composés de vaisseaux assurant le rôle de transport de la sève brute, de fibres assurant le soutien mécanique, mais aussi de trachéides, et bien d'autres éléments divers. Ils possèdent de très bonnes caractéristiques (dépendant de l'essence) mais leur coût élevé et leur disponibilité plus faible limitent leur utilisation en construction par rapport aux résineux (LMC 2011).

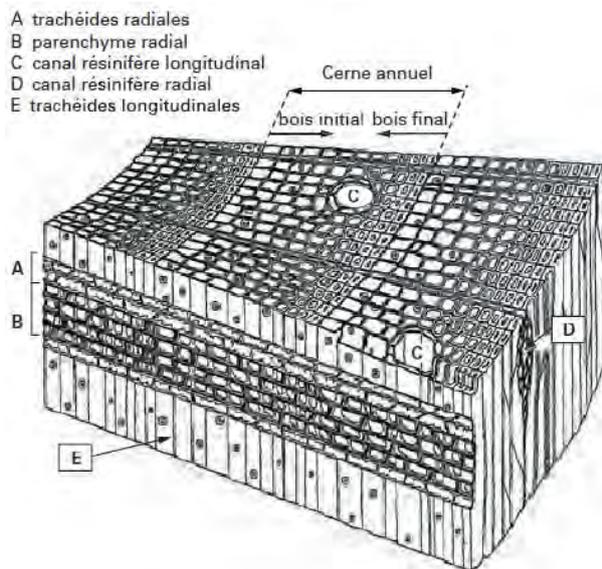


Figure 2: Plan ligneux de résineux (pin sylvestre) (Trouy et al. 2012a)

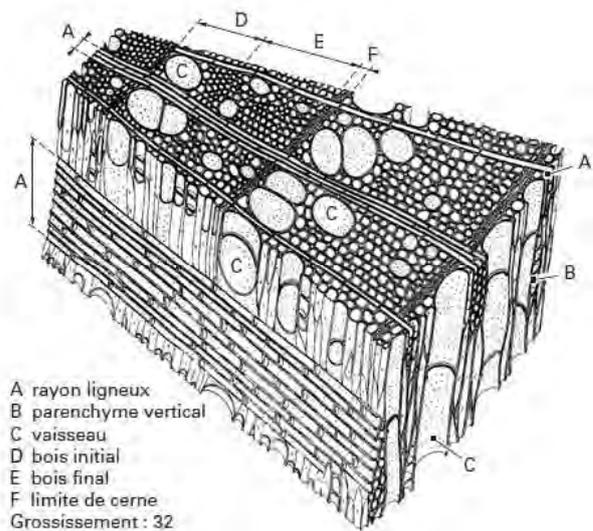


Figure 3: Plan ligneux de feuillus (frêne) (Trouy et al. 2012a)

Du fait de la complexité de son anatomie, le bois est parfois considéré comme un matériau composite naturel multi-couches. En observant une coupe transversale d'une grume, on distingue les différentes couches d'un tronc de l'extérieur vers l'intérieur (Figure 4):

- **L'écorce**, qui assure la protection de la partie vivante de l'arbre des agressions extérieures. On distingue le liège (écorce externe) et le liber (écorce interne).
- **Le cambium** (assise cambiale), qui crée chaque année une couche de bois appelée « cerne annuel »
- **L'aubier**, qui est la partie fonctionnelle du bois où circule la sève brute. Il est très souvent sensible aux attaques d'origine biologique (insectes, champignons...).
- **Le duramen** ou bois parfait, qui ne contient que des cellules mortes et présente une meilleure durabilité aux attaques d'origine biologique que l'aubier. Par contre, il est à noter que le duramen et l'aubier présentent des propriétés mécaniques très proches car il n'y a quasiment pas de changements structurels lors de la duraminisation (ni

d'élimination de cellules, ni de changements dans la forme des cellules). (Jodin 1994; Dirol et al. 2001)

Possédant une structure cellulaire fortement orientée, le bois est donc considéré comme un matériau anisotrope. On dit plus particulièrement que le bois est orthotrope, à savoir qu'il présente trois directions privilégiées (Figure 5):

- la **direction longitudinale**, notée L dans le sens des fibres ;
- la **direction radiale**, notée R et correspondant à la direction de croissance en diamètre ;
- la **direction tangentielle**, notée T et tangente aux cernes annuels.

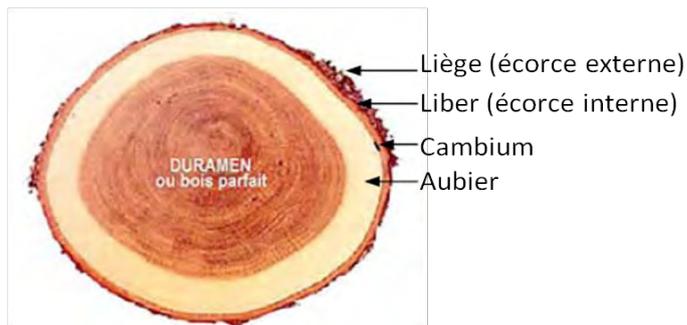


Figure 4: Coupe transversale d'une grume (SETRA 2006)

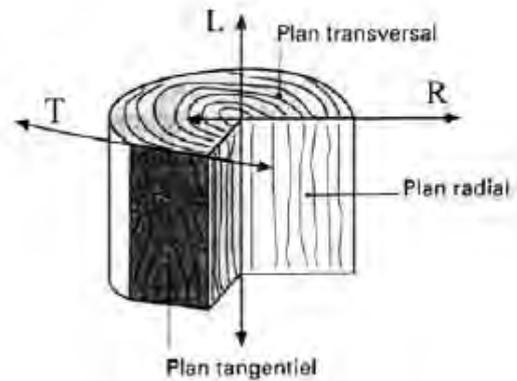


Figure 5: Repères et plans d'orthotropie du bois (Eyma 2002)

Dans la pratique, on parle souvent de caractéristiques dans le sens axial (parallèle au grain) et transversal (perpendiculaire aux fibres). La Table 1 montre les différentes propriétés mécaniques pour plusieurs essences de résineux et de feuillus. On constate que la résistance transversale est faible devant la résistance axiale (20 à 50 fois moins élevée en traction et 5 à 10 fois en compression). Par conséquent, il est nécessaire de prendre garde aux efforts transversaux dans le bois.

Table 1: Exemples de résistances moyennes de quelques essences (SETRA 2006)

Essences	Résistance moyenne à la rupture en MPa				Flexion
	Compression		Traction		
	Axiale	Transversale	Axiale	Transversale	
Épicéa, Sapin	35 à 45	6 à 8	90 à 100	1,2	50 à 70
Pins, Douglas	40 à 50	7 à 8	100 à 120	1,8	80 à 90
Châtaignier, Hêtre, Iroko	40 à 60	12 à 15	100 à 120	3	75 à 130
Chêne, Doussié	50 à 80	18 à 20	120 à 150	4	100 à 170

Le bois est aussi considéré comme un matériau hétérogène en raison de sa densité irrégulièrement répartie, des singularités de croissance, mais également du fait que les cellules qui le composent sont de nature et de forme différentes. On distingue généralement trois types de défauts principaux du bois liés aux singularités (Jodin 1994) :

- **Les nœuds** : ils sont dus à la croissance des branches à partir du tronc. Ces nœuds sont des anomalies qui vont générer une déviation du fil du bois. Leur présence peut produire des concentrations de contraintes aux bords des nœuds, et occasionner dans certains cas la rupture du bois (Figure 6). Les nœuds présentent des caractéristiques mécaniques et des densités différentes du reste du bois.
- **Les fentes** : ce sont des ouvertures étroites sur la surface du bois. Elles peuvent diminuer les caractéristiques mécaniques du bois. Le problème majeur de ces fentes réside dans la création de pièges à eau qui favorisent ensuite le développement fongique (Figure 7 et Figure 8) (LCPC 2008).
- **La pente de fil** : c'est la déviation de l'orientation du fil du bois par rapport à l'axe longitudinal de la pièce. Cette déviation n'est jamais nulle, et on parle de pente de fil anormale lorsque cette déviation est jugée, à l'œil, trop élevée. Cette inclinaison du fil peut provoquer localement des concentrations de contraintes, et occasionner la rupture du bois (Figure 9).

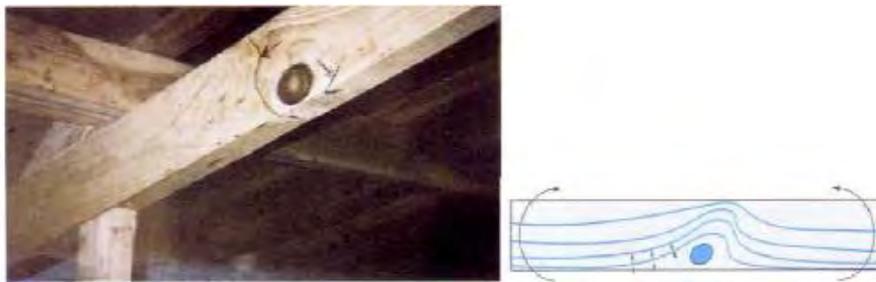


Figure 6: Rupture de panne causée par un nœud (Biger 1997)



Figure 7: Fente très ouverte due au retrait du bois et induisant une humidité localement élevée (LCPC 2008)



Figure 8: Fentes de retrait sur les lisses d'un garde-corps, créant ainsi des pièges à eau (LCPC 2008)

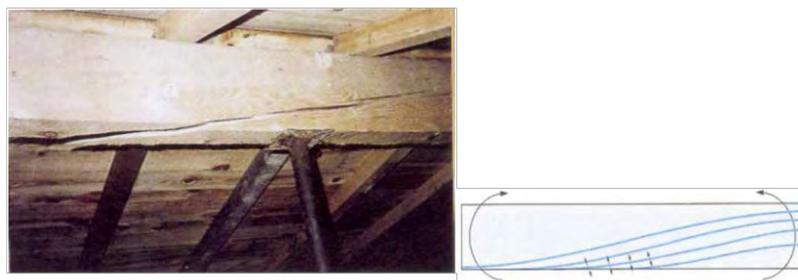


Figure 9: Rupture de panne causée par l'inclinaison du fil (Biger 1997)

Il apparaît donc que le bois est un matériau complexe, orthotrope, et qui plus est, présentant une grande hétérogénéité. De plus, le bois est aussi un matériau organique susceptible de subir des attaques d'origine biologique. C'est la raison pour laquelle, nous évoquerons les différents facteurs pathologiques du bois dans le paragraphe suivant.

1.1.3. Facteurs pathologiques et durabilité

Le bois est un matériau organique (contenant du carbone) et donc une source de nourriture pour les espèces vivantes munies des enzymes nécessaires pour le digérer (Dirol et al. 2001). Il est donc susceptible de subir les agressions d'origine biologique venant des champignons et des insectes qui peuvent affecter sa durabilité. Qui plus est, le bois peut également subir des dégradations liées à des facteurs purement « environnementaux ». Dans ce paragraphe, nous allons tout d'abord évoquer ces différents facteurs pathologiques. Puis, nous aborderons les travaux existants à ce jour concernant la caractérisation de la durabilité du bois.

• *Attaques fongiques*

En France, les dégradations fongiques (Figure 10) représentent un risque majeur pour le bois (Dirol et al. 2001; SETRA 2006; LCPC 2008). Les champignons utilisent le bois comme protection et/ou se nourrissent de ses substances de réserve. Leur développement nécessite la présence d'eau, un apport d'oxygène et une source de nourriture (cellulose, lignine). L'humidité (cf. Equation 3, Page 18) requise pour l'apparition des champignons est comprise entre 20% et 80% (Trouy et al. 2012a). Il est donc nécessaire de suivre la variation d'humidité durant la vie des structures pour anticiper ces risques liés à des dégradations fongiques (Koch et al. 2017).

Parmi les champignons xylophages, on distingue deux grands types :

- **Les champignons lignicoles**, qui se nourrissent uniquement des substances de réserve du bois et n'engendrent que des désordres esthétiques. Ils provoquent une décoloration (bleuissement) et affectent peu les propriétés mécaniques.
- **Les champignons lignivores**, qui se nourrissent de la totalité du bois et affectent fortement les propriétés mécaniques. Selon le composé dégradé, on distingue trois types de pourritures : les pourritures brunes ou cubiques, les pourritures blanches ou fibreuses et les pourritures molles.

L'apparition des attaques fongiques est très souvent due à la présence de pièges à eau (Figure 11) du fait d'un excès local d'humidité.



Figure 10: Exemple de dégradation fongique (pourriture cubique) (SETRA 2006)



Figure 11: Pourriture en fond d'une fissure importante (Passerelle sur le Sichon à Vichy) (Doignon 2009a)

- **Attaques d'insectes**

On distingue en général deux grandes catégories d'insectes xylophages :

- **Les coléoptères à larve xylophage**, dont les larves parasitent le bois et creusent des galeries pour se nourrir (Figure 12). Avant leur mue pour devenir adulte, elles sortent du bois, créant ainsi des trous d'envol, de diamètres compris entre 1 et 3 mm selon les espèces (LCPC 2008).
- **Les termites**, qui se nourrissent de la totalité du bois et endommagent les structures de façon catastrophique (Figure 13). Ils sont discrets et leur détection est souvent tardive.



Figure 12: Exemple de l'attaque d'insectes (Passerelle Avenue Voltaire à Thiers) (Doignon 2009b)



Figure 13: Dégâts dus à des termites (LCPC 2008)

- **Facteurs environnementaux**

On distingue ici trois des principaux facteurs environnementaux susceptibles de générer sur les structures bois les dégradations les plus fréquentes :

- **Le soleil**, qui agresse le bois de deux façons différentes. Les ultraviolets provoquent une décoloration vers une couleur grise (grisaillement, Figure 14). Le grisaillement n'affecte pas les propriétés mécaniques, et n'a que des conséquences esthétiques (LCPC 2008). Les infrarouges échauffent le bois et modifient l'humidité localement, occasionnant des fentes de retrait.
- **La pluie**, qui favorise l'apparition de champignons et induit des variations dimensionnelles (dans le domaine hygroscopique, cf. Page 17).
- **La température**, dont la variation peut provoquer des cycles d'humidification/séchage induisant des fentes dues aux retraits et gonflements.



Figure 14: Grisaillement du bois (LCPC 2008)

- **Durabilité**

Ci-dessus nous venons de présenter les principaux facteurs pathologiques qui peuvent influencer la durabilité du bois. Néanmoins, la durabilité du bois est difficile à quantifier et à prévoir car elle n'est liée à aucune caractéristique simple à mesurer, ni à la couleur, ni à la densité (Trouy et al. 2012b). Pour caractériser la durabilité du bois vis-à-vis des agents biologiques, il est obligatoire d'effectuer des essais biologiques en laboratoire. La norme NF EN 350-2 (AFNOR 1994) donne la durabilité naturelle des essences commerciales les plus courantes (cf. Table 2), avec :

- « D » signifie « Durable » ; « M » = « Moyennement durable » ; « S » = « Sensible » ; « SH = le bois parfait est aussi réputé sensible ».
- « 1 à 5 » signifie respectivement « très durable », « Durable », « Moyennement durable », « Faiblement durable », « Non durable ».

Table 2: Durabilité naturelle de quelques essences (SETRA 2006)

Essence	Champignons	Capricorne	Termites
Azobé	2	D	D
Chêne	2	D	M
Douglas	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

Cependant, ces essais ne fournissent que des informations qualitatives, et non quantitatives. Pour mieux prédire la durabilité du bois de manière quantitative, plusieurs travaux ont été menés sur les bois utilisés en extérieur (Brischke et al. 2010, 2012, 2017 ; Hansson et al. 2012 ; Wang et al. 2013). Ces travaux consistent à établir une relation « dose-réponse » (en anglais : dose-response) comme une information de base pour la prédiction de la durée de vie des structures bois. La « dose » signifie le risque de pourriture et la « réponse » signifie le niveau d'attaque fongique décrit par la norme NF EN 252 (AFNOR 1989) : 0 (sain) ; 1 (attaque faible) ; 2 (attaque modérée) ; 3 (attaque sévère) ; 4 (endommagé). La méthode pour obtenir la relation « dose-réponse » est décrite succinctement ci-dessous.

Afin d'établir cette relation « dose-réponse », les auteurs ont effectué des essais avec des échantillons de bois exposés aux climats extérieurs pendant plusieurs années (7 ans par exemple selon Brischke et al. (2010)) pour créer une base de données. La taille des échantillons (500*50*25 mm³) est définie par la norme NF EN 252 (AFNOR 1989). Tous les jours, la température moyenne et l'humidité du bois ont été suivies, car la « dose » (risque de pourriture) est principalement liée à ces paramètres (Brischke et al. 2006). L'humidité de l'échantillon a été mesurée une fois par jour à l'aide d'une instrumentation de suivi décrite par Brischke et al. (2008a) se basant sur des mesures résistives. De plus, le niveau d'attaque fongique (décrit par la norme NF EN 252 (AFNOR 1989)) des échantillons a été évalué chaque année.

A partir des informations tirées de la littérature (Viitanen et al. 1991 ; Schmidt et al. 2006), les

auteurs ont établi la relation entre l'humidité et la dose (par jour) induite par l'humidité (d_{MC}), ainsi que la relation entre la température moyenne et la dose (par jour) induite par la température (d_T), comme présenté sur la Figure 15. Ensuite, la dose totale par jour peut être calculée à l'aide de l'Equation 1 (cf. Figure 15):

$$d = a * d_T + d_{MC} / (a + 1) \quad [1]$$

où d est la dose totale par jour, d_{MC} est la dose (par jour) induite par l'humidité, d_T est la dose (par jour) induite par la température, a est une constante dépendante de l'essence.

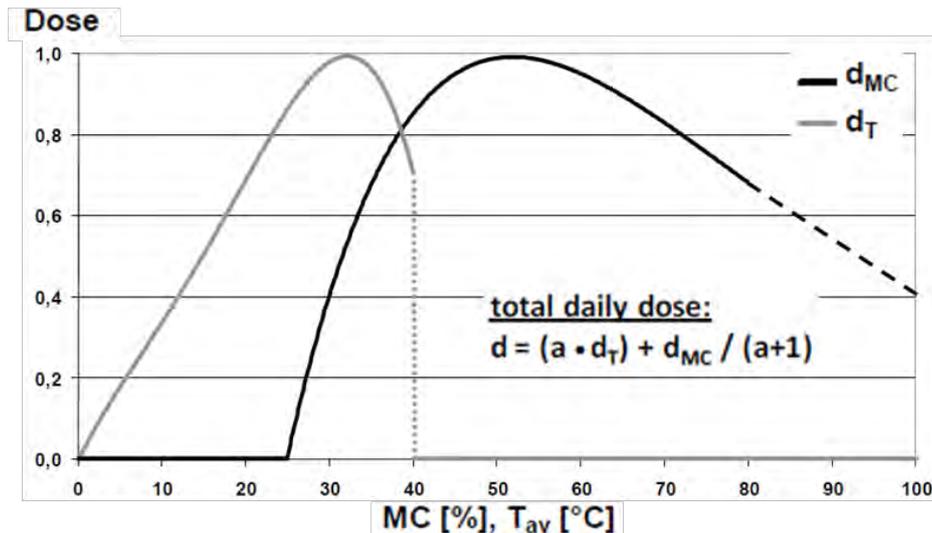


Figure 15: Relation entre l'humidité (MC) et la dose (par jour) induite par l'humidité (d_{MC}), et relation entre la température moyenne (T_{av}) et la dose (par jour) induite par la température (d_T) (Brischke et al. 2010)

Puis, en additionnant la dose totale de chaque jour, on peut avoir la dose cumulée le long de la durée d'essais. Cette dose cumulée a été corrélée ensuite avec le niveau de pourriture selon la base de données obtenue, comme présenté dans la Figure 16.

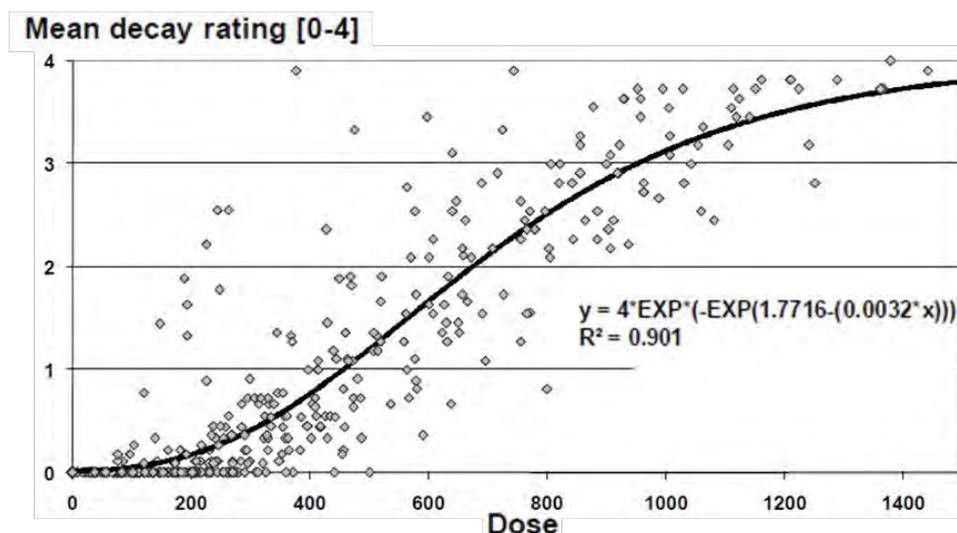


Figure 16: Relation dose-réponse pour le Pin sylvestre et le Douglas (0 à 4 sont les quatre niveaux de pourriture selon la norme NF EN 252 (AFNOR 1989)) (Brischke et al. 2013a)

A partir de ce modèle, et en suivant la température et l'humidité des structures bois tous les jours, il est donc possible d'estimer la durée de vie résiduelle du bois exposé aux climats extérieurs en utilisant la fonction « dose-réponse » (Brischke et al. 2013a, 2013b).

Néanmoins, il est assez difficile d'appliquer ce modèle pour prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages. Premièrement, il nécessite un étalonnage lié à de nombreux facteurs : l'essence, le type de pourriture et les détails de conception des structures (taille, forme, comment les échantillons bois ont été positionnés, etc.) (Brischke et al. 2017). De plus, les essais qui ont pour but de récupérer la base de données pour l'étalonnage sont assez longs (plusieurs années) (Brischke et al. 2014a). Au regard de ces résultats, il serait donc bien de pouvoir identifier les cycles de vieillissement accélérés que l'on peut réaliser au laboratoire pour réduire le temps des essais de durabilité. Toutefois, aucune étude réalisée à ce jour n'a abordé des cycles de vieillissement accélérés que l'on puisse utiliser pour prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages en bois.

Qui plus est, ces travaux ne tiennent compte que du niveau de pourriture, ce qui n'est pas suffisant pour prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages, étant donné que les poutres sont souvent soumises à des sollicitations mécaniques (Brischke et al. 2008b ; Leicester 2001). Il faudrait donc prendre en compte également l'affaiblissement mécanique des structures bois pouvant entraîner la rupture de ces dernières. Selon Frühwald et al. (2007), les principales ruptures des structures en bois sont dues à la flexion, à la tension perpendiculaire au grain, ou au cisaillement. Il serait donc intéressant d'effectuer de futures études pour établir un coefficient d'abattement de ces propriétés mécaniques en fonction de l'exposition du matériau aux cycles d'humidification/séchage afin d'avoir une prédiction plus fiable de la durée de vie résiduelle des structures en bois.

- ***Bilan***

Ce paragraphe a permis de recenser les principaux facteurs pathologiques qui influencent la durabilité du bois. De plus, nous avons aussi présenté les travaux effectués dans l'optique de prédire la durée de vie des structures bois. Selon les informations issues de la littérature, il reste encore de nombreux verrous scientifiques à lever pour obtenir une prédiction plus rapide et fiable de la durée de vie résiduelle des structures en bois :

- Identification des cycles de vieillissement accélérés d'humidification/séchage afin de réduire la durée des essais de durabilité ;
- Etablissement d'un coefficient d'abattement des propriétés mécaniques afin de pouvoir éviter la rupture des structures bois liée à leur exposition aux cycles d'humidification/séchage et afin d'avoir une prédiction plus fiable.

Enfin, il est à souligner que toutes les pathologies pouvant affecter la durabilité du bois sont liées à l'humidité excessive ou à la variation de l'humidité. Cela peut être attribué au fait que le bois est un matériau hygroscopique. Nous allons donc aborder ce point dans le prochain paragraphe.

1.1.4. Comportement hygroscopique du bois

- ***L'eau dans le bois***

L'eau dans le bois existe principalement sous deux formes (Siau 1984) : l'eau libre et l'eau liée. De façon simplifiée, on considère généralement que l'**eau libre** circule dans les cavités intercellulaires (lumens des fibres, trachéides et vaisseaux). Elle est soumise à la pression capillaire. **L'eau liée** n'est présente que dans les parois cellulaires. Elle est fixée sur la matière

ligneuse par des forces intermoléculaires. Par ailleurs, il existe également deux autres types d'eau dans le bois. Ce sont l'**eau de constitution** qui intervient dans la composition chimique de la matière ligneuse et ne disparaît complètement qu'après destruction du matériau et la **vapeur d'eau** qui est présente dans les cavités intercellulaires du bois. (Navi et al. 2005; Nguyen 2014; Passarini 2015)

On dit que le bois est « hygroscopique » car il est susceptible de perdre ou reprendre de l'humidité en fonction de la température, et surtout, de l'humidité relative de l'air ambiant (HR) dans lequel il se trouve. Pour une condition climatique donnée (température et HR), le bois tend à se stabiliser à une humidité d'équilibre, comme présenté par les courbes d'équilibre hygroscopique dans la Figure 17 (Siau 1995). L'humidité d'équilibre peut être calculée par un modèle analytique présenté par l'Equation 2 pour la plupart d'essences (Simpson 1973; Ross 2010) :

$$EMC = \frac{1800}{W} \left[\frac{Kh}{1-Kh} + \frac{K_1Kh+2K_1K_2K^2h^2}{1+K_1Kh+K_1K_2K^2h^2} \right] \quad [2]$$

où EMC est l'humidité d'équilibre (en anglais : Equilibrium Moisture Content), h est l'humidité relative de l'air en décimale et les paramètres W , K , K_1 et K_2 dépendent de la température T (en °C) :

$$W=349+1,29T+0,0135T^2 ;$$

$$K=0,805+0,000736T-0,00000273T^2 ;$$

$$K_1=6,27-0,00938T-0,000303T^2 ;$$

$$K_2=1,91+0,0407T-0,000293T^2$$

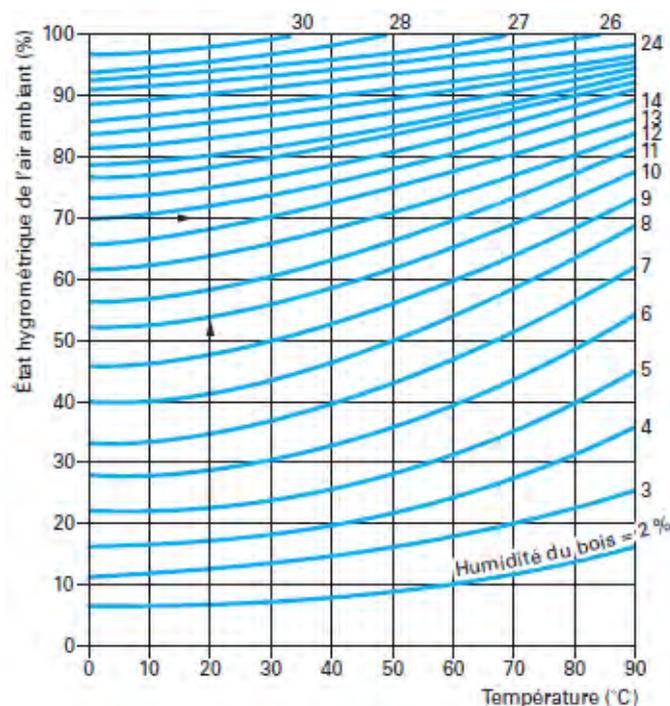


Figure 17: Courbes d'équilibre hygroscopique du bois (Plassat 2009)

Si l'HR est proche de 100%, l'humidité (cf. Equation 3, Page 18) à laquelle le bois tend à se stabiliser est appelée le Point de Saturation des Fibres (PSF). Au PSF, on considère classiquement que les parois cellulaires du bois sont saturées avec de l'eau liée et qu'il n'y a

pas encore d'eau libre dans les cavités du bois (Tiemann 1906; Siau 1984). Le PSF est d'environ 25-30 % pour quasiment toutes les essences comme présenté dans la Table 3 (Gérard et al. 2011).

Toutefois, de nombreuses études (Labbé 2002; Almeida 2006; Hernandez et al. 2010; Passarini 2015) ont montré la coexistence de l'eau liée et l'eau libre dans le bois, même pour les humidités en-dessous du PSF. Les raisons évoquées de l'existence de l'eau libre en-dessous du PSF sont multiples : le bois est en contact direct avec de l'eau liquide ; l'eau liquide est enfermée dans les éléments structurels du bois les moins perméables (les rayons, les trachéides, les lumens des fibres etc.),...

Table 3: Point de Saturation des Fibres (PSF) de différentes essences (Gérard et al. 2011)

Essences	Point de Saturation des Fibres (PSF)
Azobé	28%
Chêne	31%
Douglas	27%
Epicéa	33%
Hêtre	32%
Iroko	23%
Mélèze	26%
Peuplier	30%
Pin sylvestre	30%
Sapin	29%

- **Teneur en humidité du bois**

L'humidité du bois, exprimée en pourcentage, peut être déterminée par le rapport de la masse d'eau présente dans le bois sur la masse anhydre du bois à l'aide de l'Équation 3 en respectant la norme NF EN 13183-1 (AFNOR 2002a) :

$$H(\%) = \frac{M_H - M_0}{M_0} \times 100\% \quad [3]$$

où M_H est la masse à l'humidité H , M_0 la masse anhydre, et $H(\%)$ l'humidité du bois.

- **Influence de l'humidité**

La variation de l'humidité du bois peut mener à une variation dimensionnelle, et générer des phénomènes de « retraits et gonflements ». Ce phénomène n'existe qu'en dessous du PSF (< 30%) (Figure 18). Il est directement proportionnel au changement du taux d'humidité dans le bois. De plus, les valeurs de retrait/gonflement dépendent des directions d'anisotropie (L, T ou R) (Figure 19).

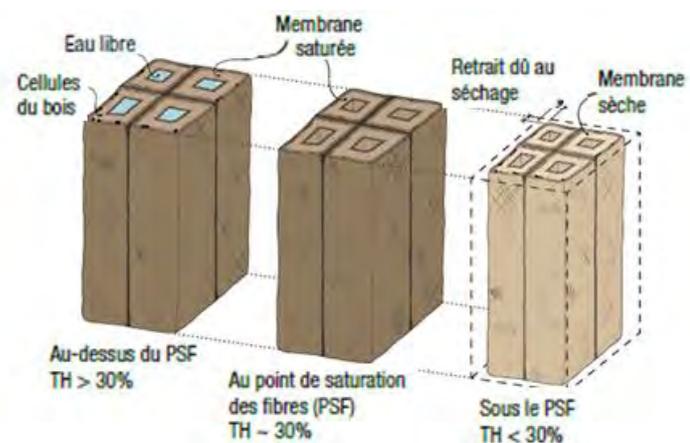


Figure 18: Influence de l'humidité sur la variation dimensionnelle du bois (CECOBois 2012)

Le retrait axial est généralement négligé (sauf qu'en cas de poutres de longues portées) en raison de sa faible valeur (de l'ordre de 0,1% à 0,3%) (Jodin 1994). En revanche, les retraits tangential et radial ne sont pas négligeables. De plus, comme montré dans la Table 4, le retrait tangential est environ 1,5 à 2 fois plus élevé que le retrait radial.

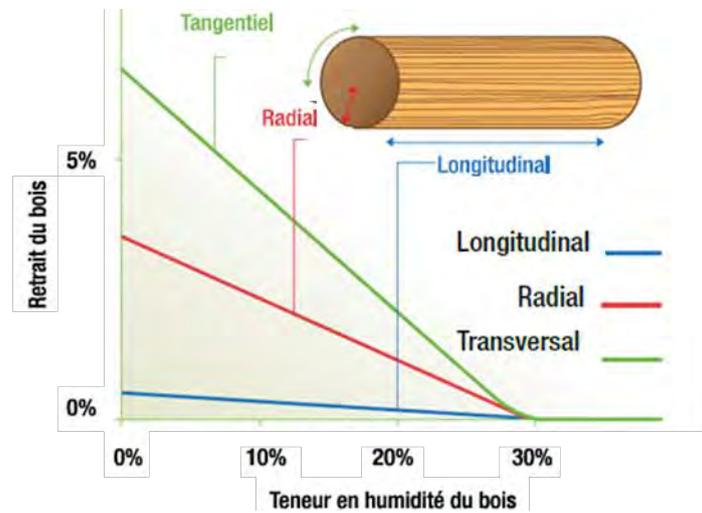


Figure 19: Retrait du bois dans les trois directions d'anisotropie (CECOBois 2012)

Table 4: Valeurs de retraits de quelques essences (Trouy et al. 2012a)

Essences	Retrait tangential total (%)	Retrait radial total (%)	Retrait volumique total (%)
Retrait fort			
Chêne	10	5	15
Hêtre	12	6	18
Azobé	11	8	19
Merisier	10	5	15
Retrait moyen			
Sapin	8	4	12
Épicéa	9	4	13
Mélèze	9	5	14
Peuplier	9	5	14
Retrait faible			
Sipo	6	5	11
Iroko	6	4	10
Noyer	7	5	12
Doussié	5	3	8

Hormis les variations dimensionnelles, la variation d'humidité influence également toutes les propriétés mécaniques du bois. Les coefficients élastiques ont une tendance décroissante en fonction de l'humidité. De ce fait, pour des fluctuations de l'humidité entre 6% et 20%, on peut adopter les correctifs donnés en utilisant les modèles analytiques de la Table 5 (Guitard 1987). Au-delà du PSF, les propriétés physico-mécaniques restent constantes (Figure 20).

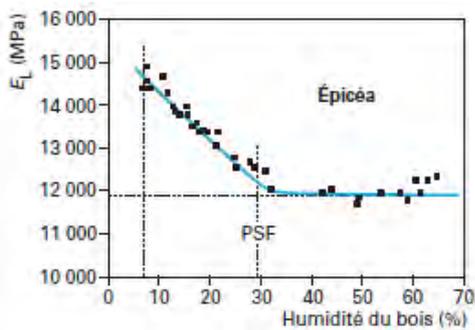


Figure 20: Exemple de relation entre l'humidité et le module d'élasticité longitudinal pour l'épicéa (Trouy et al. 2012a)

Table 5: Modèles analytiques reliant le taux d'humidité avec les coefficients élastiques (Guitard 1987; Trouy et al. 2012a)

Modules d'élasticité	Modules de cisaillement
$E_L^H = E_L^{12} [1 - 0,015 (H - 12)]$	$G_{RT}^H = G_{RT}^{12} [1 - 0,030 (H - 12)]$
$E_R^H = E_R^{12} [1 - 0,030 (H - 12)]$	$G_{TL}^H = G_{TL}^{12} [1 - 0,030 (H - 12)]$
$E_T^H = E_T^{12} [1 - 0,030 (H - 12)]$	$G_{LR}^H = G_{LR}^{12} [1 - 0,030 (H - 12)]$

1.1.5. Conclusion

Cette première section a permis de mieux appréhender le matériau bois, qui est un matériau complexe à la fois écologique, hétérogène, orthotrope et hygroscopique. Dans la prochaine section, nous allons continuer à parler de ce matériau mais cette fois, du point de vue de son utilisation en structures.

1.2. Utilisation du bois en structures

Cette section a pour but de présenter l'utilisation du bois en structures. Dans le génie civil, l'utilisation du bois peut se faire sous forme de platelages, écrans acoustiques, équipements pour la route, murs de soutènement, bardages, etc. Toutefois, nous nous intéressons plus particulièrement dans ce travail aux ouvrages d'art en bois les plus utilisés en génie civil, dont on peut distinguer les deux principaux types : les passerelles piétonnes et les ponts routiers (LCPC 2008). De plus, une attention particulière sera portée sur le bois lamellé-collé car ce dernier est très utilisé actuellement pour la construction des ouvrages en bois. Par la suite, les différentes pathologies constatées sur les ouvrages d'art en bois seront également présentées.

1.2.1. Les ouvrages d'art en bois

On construit de plus en plus en bois pour répondre aux nouveaux challenges apportés par le « développement durable » et à l'exigence des politiques publiques (l'article 21-5 de la « loi sur l'air ») (SETRA 2006; LCPC 2008; Albero et al. 2013). De plus, hormis ses qualités écologiques favorables, le bois est aussi un matériau léger, présentant des propriétés spécifiques très intéressantes (rapport propriété/densité), ce qui en fait également un matériau adapté pour l'utilisation en construction (Triboulot et al. 2011). La Table 6 ci-dessous compare les différents critères de performance du bois avec les autres matériaux (Trouy et al.

2012a). On peut constater que le bois, surtout les résineux, montre de meilleures valeurs au niveau des indices de performance, bien que son module d'élasticité soit plus faible par rapport aux autres matériaux.

Table 6: Critères de performance de divers matériaux (Trouy et al. 2012a)

Matériaux	Module d'élasticité E (MPa)	Densité d	Critère de qualité pour une colonne $\sqrt{E/d}$	Critère de qualité pour un panneau $\sqrt[3]{E/d}$
Acier	210 000	7,8	58	7
Aluminium	75 000	2,6	105	16
Béton	11 500	2,6	41	9
Matériau composite artificiel	75 000	1,5	182	28
Résineux	10 000	0,4	250	54
Feuillus	13 000	0,7	162	33

Un bon exemple des avantages procurés par cette légèreté est la passerelle de Vaires-sur-Marne sur les voies de la Gare de Vaires (SETRA 2006). Avec une portée de 50 m et une largeur de 9 m, elle a été assemblée sur place en un mois à l'aide d'éléments préfabriqués en usine. Qui plus est, le plus impressionnant est que sa mise en place a été réalisée en seulement 24 heures. Les étapes de la réalisation de l'assemblage et de la mise en place de cette passerelle sont montrées sur la Figure 21.

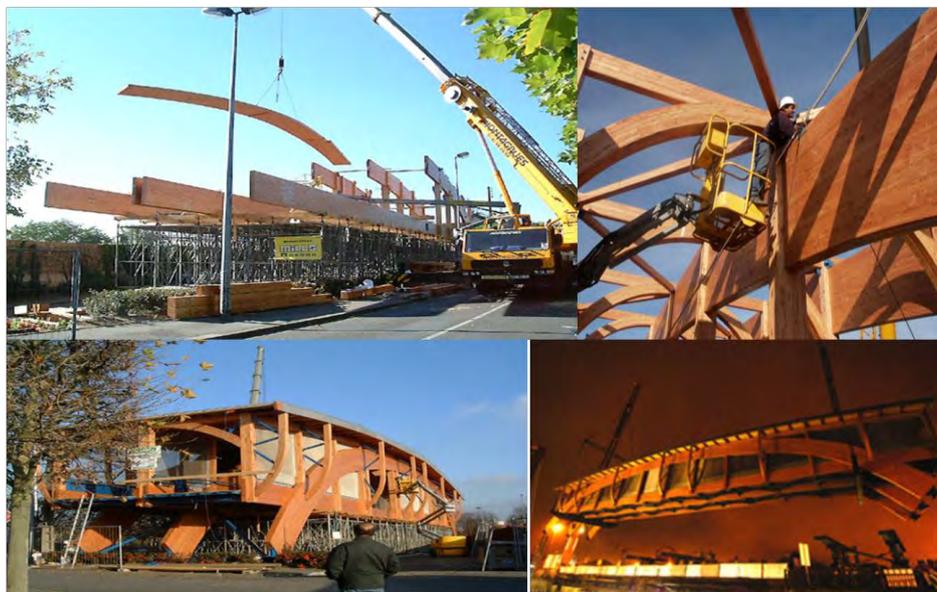


Figure 21: Assemblage et installation de la passerelle de Vaires-sur-Marne (Source : www.cndb.org)

Par ailleurs, si on s'intéresse à la répartition dimensionnelle des ouvrages d'art (Figure 22), on peut constater que dans plusieurs pays européens, plus de 80% des ouvrages ont des longueurs inférieures à 50 m (Le Roy 2013). Il est donc tout à fait envisageable et intéressant de

construire ces ouvrages avec le bois.

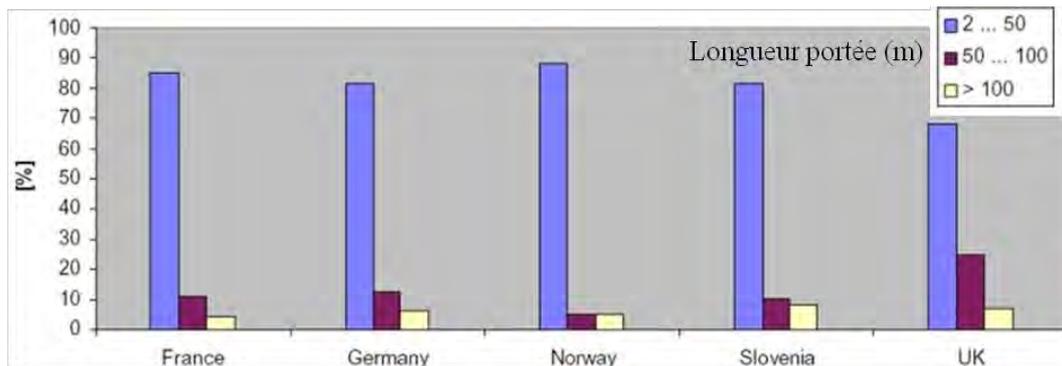


Figure 22: Répartition dimensionnelle des ouvrages d'art dans plusieurs pays européens (Le Roy 2013)

Ainsi, un grand nombre d'ouvrages d'art en bois ont vu le jour sur le territoire français ces dernières années (Barbier 2007; Le Roy 2013), mais aussi dans le monde entier, plus particulièrement dans les pays scandinaves et germanophones (Gustafsson et al. 2010; Koch et al. 2016). On peut citer comme exemples :

- La **Passerelle Pinot** à Blagnac (Figure 23): pont mixte bois-béton conçu pour les piétons et les cycles. Sa portée est de 36 m et cet ouvrage multi-matériaux est composé principalement d'une structure en arc auto-ancré en pin sylvestre LC, et d'une dalle en béton armé sur deux poutres précontraintes. (Barbier et al. 2006; Le Roy 2013)
- Le **Pont de Crest** dans la Drôme (Figure 24): un pont routier à béquilles conçu pour des véhicules légers limités à 3,5 t. Il est actuellement le plus long pont en bois de France (92 m) avec une structure complète en douglas LC purgé d'aubier. (Barbier et al. 2006; SETRA 2006)
- Le **Pont d'Älvsbacka** à Skellefteå en Suède (Figure 25): un pont haubané conçu pour les piétons et les bicyclettes. Sa portée est de 130 m et sa structure principale a été construite en Epicéa LC. (Björngrim 2015)



Figure 23: Passerelle Pinot (Le Roy 2013)



Figure 24: Pont de Crest (Barbier et al. 2006)



Figure 25: Pont d'Älvsbacka (Björngrim 2015)

On peut aussi citer comme exemple les ponts mixtes en bois-béton développés par le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement). La Figure 26 présente le pont de Cognin, qui est un pont routier dont le tablier est coulé en béton. La structure principale comprend 9 poutres LC de 40 m de long en Douglas. (Renaudin et al. 2017)



Figure 26: Pont de Cognin (Renaudin et al. 2017)

Parmi les ouvrages récemment construits, la plupart d'entre eux impliquent l'utilisation du bois LC (Franke et al. 2013a; Le Roy 2013; Björngrim 2015). A titre d'exemple, selon un panorama présenté par Barbier et al. (2006), 80% des ponts en bois récemment construits en France impliquent l'utilisation du bois LC. L'utilisation de ce type de disposition constructive apparait donc aujourd'hui comme un facteur clé dans le développement des ouvrages d'arts en bois, et s'explique en partie par la possibilité d'obtenir des structures bois de grandes portées (20-100 m, Source : www.est.cerema.fr). De ce fait, nous allons présenter quelques généralités sur le bois lamellé-collé dans le paragraphe suivant.

1.2.2. Le bois lamellé-collé

Le bois lamellé-collé (LC) est obtenu à partir de planches en bois massif (appelées lamelles) aboutées, de faible section, et recollées entre elles de façon à obtenir des sections plus importantes (Trinh et al. 2014). Les différentes étapes de la fabrication des poutres LC sont décrites ci-dessous (Ross 2010; Trinh et al. 2014) :

- **Tri du bois** : qui a pour objectif de purger les singularités (nœuds, flaches, etc.) des lamelles utilisées (Figure 27).
- **Aboutage** : qui permet la réalisation de lamelles continues de longueur désirée, par le collage en bout sur des faces inclinées appelées entures (Figure 28).
- **Encollage des lamelles** : qui a pour objectif d'obtenir la section désirée (Figure 29). La colle mélamine-urée-formaldéhyde (MUF) est la plus couramment utilisée dans l'industrie. L'épaisseur du joint de colle est d'environ 0,3 mm (AFNOR 2013).
- **Serrage sur le banc de collage** : qui est réalisé après l'application de la colle. Les poutres LC sont généralement laissées sur le banc de collage avec une pression de 10 bars pendant 24 h (Figure 30).
- **Rabotage de finition** : l'objectif est d'obtenir un bel état de surface et la section désirée.



Figure 27: Tri du bois (Source : Entreprise MATHIS)

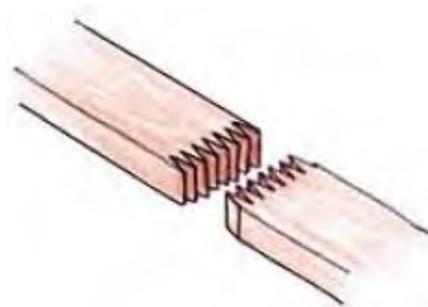


Figure 28: Les entures pour aboutage (SETRA 2006)



Figure 29: Encollage des lamelles (Source : Entreprise MATHIS)



Figure 30: Serrage sur le banc de collage (Source : Entreprise MATHIS)

Les éléments décrits ci-dessus, relatifs au processus de fabrication des poutres LC, permettent de mieux comprendre l'intérêt de la fabrication de telles structures. En effet, grâce à la purge des singularités lors de la fabrication, sa résistance mécanique est plus élevée par rapport à celle du bois massif (Trinh et al. 2014). Par ailleurs, grâce à l'aboutage et l'encollage des lamelles, le bois LC donne la possibilité de construire des ouvrages d'art en bois de grandes dimensions (SETRA 2006; Albero et al. 2013). Qui plus est, on associe de plus en plus souvent les poutres en bois à d'autres matériaux de construction plus classiques comme dans le cas des ouvrages mixtes bois-béton-acier-composite (Pham et al. 2007).

Les essences utilisables pour la fabrication des poutres LC sont décrites dans la Norme NF EN 14080 (AFNOR 2013). Dans la pratique, on voit plus particulièrement l'utilisation fréquente du Douglas en structures LC. Quasiment tous les ponts en LC récemment construits en France impliquent l'utilisation du Douglas (Barbier et al. 2006). La popularité de cette essence en structures bois peut se justifier par sa bonne résistance mécanique (cf. Table 1), sa durabilité naturelle suffisante pour l'utilisation en classe d'emploi 3 (humidité fréquemment supérieure à 20%) et sa disponibilité (AFNOR 1996; SETRA 2006).

La classification mécanique du bois LC est présentée dans la Norme NF EN 14080 (AFNOR 2013). Les classes de résistance vont de GL 20 à GL 32 (GL 20, GL 22, GL 24, GL 26, GL 28, GL 30, et GL 32). Le terme GL vient de l'appellation anglaise « Glulam », et le chiffre donne la valeur de la résistance maximale en flexion en MPa. La distinction du bois lamellé-collé homogène et du bois lamellé-collé panaché est faite par la désignation des produits en ajoutant la lettre h et c (ex GL 32h pour le lamellé collé homogène et GL 32c pour le lamellé collé panaché). Le terme homogène indique que les lamelles ont les mêmes caractéristiques mécaniques, et le terme panaché indique que les lamelles ont des caractéristiques mécaniques différentes. Les propriétés caractéristiques des différentes classes de lamellé-collés homogènes issues de la Norme NF EN 14080 (AFNOR 2013) sont présentées dans la Table 7.

Table 7: Propriétés caractéristiques des bois lamellé-collés homogènes définies par la Norme NF EN 14080 (AFNOR 2013)

Propriétés	Unités	Classes de résistance						
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Résistance de flexion	MPa	20	22	24	26	28	30	32
Résistance en traction axiale	MPa	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
Résistance en traction transversale	MPa	0,5						
Résistance en compression axiale	MPa	20	22	24	26	28	30	32
Résistance en compression transversale	MPa	2,5						
Résistance au cisaillement	MPa	3,5						
Module axiale moyen	MPa	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
Module transversale moyen	MPa	300						
Module de cisaillement moyen	MPa	650						
Masse volumique moyenne	kg/m ³	370	410	420	445	460	480	490

Ce paragraphe permet de mieux comprendre pourquoi le bois LC est de plus en plus utilisé en construction. Toutefois, ce dernier, bien que présentant de nombreux avantages, connaît aussi certaines pathologies, que nous allons présenter dans le paragraphe suivant.

1.2.3. Pathologies des ouvrages d'art en bois

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les principales pathologies communes rencontrées sur les ouvrages d'art en bois massif et en bois LC. Ces pathologies peuvent être classées en trois grandes catégories (Lavischi 2001; SETRA 2006; LCPC 2008) :

- Les pathologies dues au retrait ou au gonflement du bois
- Les pathologies d'origine biologique
- Les pathologies d'origine mécanique

Quelques pathologies particulières du bois LC, liées à sa manière de mise en disposition seront également évoquées dans la suite.

• *Pathologies dues au retrait ou au gonflement du bois*

Le phénomène de « retrait et gonflement » peut induire des dégradations sur les ouvrages de manières diverses. La Figure 31 représente une passerelle ayant deux poutres latérales en LC. Les poutres se sont déversées vers le côté sud à cause d'un gradient d'humidité conduit par l'ensoleillement : la face ensoleillée s'étant rétractée plus que l'autre. Ce désordre ne dépasse généralement pas le cadre de la gêne visuelle. En cas d'incurvation importante, la stabilité structurelle doit toutefois être vérifiée (SETRA 2006).

Dans les faits, le bois se rétracte ou gonfle lors du séchage et de l'humidification, induisant éventuellement des fentes de retrait (Figure 8 et Figure 32). Le problème majeur de ces fentes réside dans la création de pièges à eau qui favorisent ensuite le développement fongique (cf. Figure 8 et Figure 11) (LCPC 2008). Quant au bois LC, les retraits et gonflements réguliers peuvent également causer des fentes sur les plans de collage, que l'on appelle plus généralement « délaminations » (Figure 32).

Pour la réparation de ces fentes et de ces délaminations, il est souvent recommandé de les reboucher avec du mastic élastique de colmatage. En cas de profondeur trop importante (> 20% de la largeur), les réparations structurelles (injection de résine époxy bi-composants,

ajout d'éléments structuraux etc.) devront être effectuées car un affaiblissement mécanique de la structure est à craindre. (LCPC 2008)



Figure 31: Poutres LC latérales incurvées (SETRA 2006)



Figure 32: Délaminations et fentes sur une poutre LC (Doignon 2009c)

- ***Pathologies d'origine biologique***

Les pathologies d'origine biologique concernent les dégradations provoquées par les attaques fongiques ou les attaques d'insectes (Figure 33), qui ont déjà été présentées dans le paragraphe « 1.1.3 Facteurs pathologiques et durabilité ». On rappelle juste ici que ce sont les champignons qui sont responsables de la plupart des dégradations sur les ouvrages en bois en France, et que leur présence est due à une humidité locale trop élevée, comprise entre 20% et 80% (SETRA 2006; Barbier 2007; LCPC 2008). Cette humidité trop importante est généralement due au piégeage de l'eau par les fentes de retrait exposées directement aux intempéries (cf. Figure 11 et Figure 34) ou à des erreurs de conception. En cas extrême, les pourritures peuvent conduire à la fermeture de l'ouvrage (Figure 35 et Figure 36).

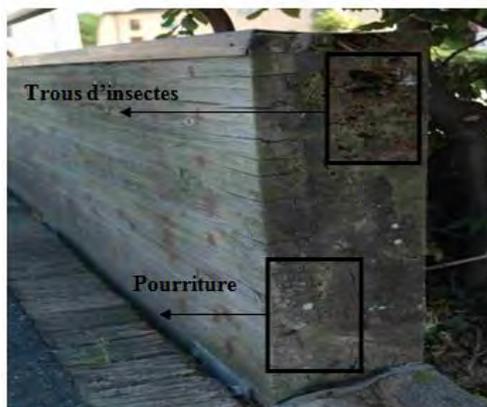


Figure 33: Pourriture et trous d'insectes (Doignon 2009b)



Figure 34: Développement fongique sur une surface de bois avec les fentes de retrait et l'infiltration de l'eau (LCPC 2008)



Figure 35: Dégradation fongique sur une passerelle en LC conduisant à sa fermeture (LCPC 2008)



Figure 36: Détail (de la Figure 35) sur les zones endommagées (LCPC 2008)

- *Pathologies d'origine mécanique*

Les pathologies d'origine mécanique sont en général le reflet d'erreurs initiales au niveau des études (conception ou calcul) (LCPC 2008). A titre d'exemples, sur la Figure 37, une erreur de conception a causé la rupture de l'assemblage entre un arbalétrier et une contrefiche. L'assemblage avait été conçu pour travailler en compression, alors que les sollicitations principales étaient en traction. Sur la Figure 38, un sous-dimensionnement de l'assemblage entre la main courante et le montant a empêché le retrait du bois, ce qui a induit un déboîtement de l'assemblage et des fentes de retrait sur la poutre.



Figure 37: Rupture d'un assemblage (LCPC 2008)



Figure 38: Attache de la main courante sous-dimensionnée (LCPC 2008)

Ce paragraphe a permis de recenser les principales pathologies constatées sur les ouvrages d'art en bois. L'apparition des dégradations associées s'explique le plus souvent par une humidité locale trop élevée (dégradation par les champignons) ou par des cycles d'humidification/séchage (dégradation via des fentes de retrait). Quant aux pathologies d'origine mécanique, elles proviennent d'erreurs de calcul ou de conception, et peuvent donc être évitées lors de la conception.

1.2.4. Conclusion

Cette section permet de mieux comprendre l'intérêt de construire en bois, et ce, plus particulièrement avec du bois lamellé-collé (LC). Il ressort néanmoins que de nombreuses pathologies ont été constatées sur les ouvrages d'art en bois et la plupart d'entre elles sont liées à l'humidité : humidité trop élevée ou cycles d'humidification/séchage. De ce fait, afin de garantir l'intégrité des structures LC et d'améliorer leur durée de vie et leur durabilité, il apparaît assez urgent de développer des outils de diagnostics intégrés aux poutres LC permettant un suivi en continu de leur humidité. Aujourd'hui, la majorité des contrôles sont réalisés visuellement (LCPC 2008), et obligent les gestionnaires d'ouvrages à des inspections régulières sans garantie de l'intégrité structurelle de l'ouvrage. Il serait donc intéressant de pouvoir disposer d'outils permettant une analyse globale, mais aussi locale (dans/entre les lamelles, sur des points spécifiques comme les assemblages...) de l'humidité du bois.

De manière à répondre à cette problématique, nous avons tout d'abord recensé les principales méthodes utilisables pour la mesure de l'humidité dans le bois. En parallèle, nous avons également vérifié si ces méthodes présentent des technologies de capteurs pouvant répondre aux contraintes impliquées dans le processus de fabrication des poutres LC. Ainsi, les technologies de capteurs doivent disposer des caractéristiques suivantes :

- Etre capables de supporter la pression de collage de 10 bars impliquée dans le processus de fabrication;
- Avoir une dimension suffisamment petite pour permettre l'intégration au niveau de l'épaisseur du joint de colle, soit environ 0,3 mm.

De plus, les capteurs ne doivent pas affecter la résistance du joint après l'intégration. Enfin, afin de faciliter l'industrialisation de prototypes instrumentés, les capteurs doivent avoir un coût modéré.

Par conséquent, les deux prochaines sections concerneront l'identification des méthodes à la fois utilisables pour la mesure de l'humidité et possédant des technologies de capteurs intégrables aux structures LC. Nous allons tout d'abord présenter quelques généralités sur les techniques utilisables pour mesurer l'humidité dans le bois, puis nous aborderons les principales technologies de capteurs utilisables.

1.3. Mesure de l'humidité du bois

De nombreuses techniques de contrôle peuvent être employées pour la mesure de l'humidité dans le bois (Skaar 1998 ; Bucur 2003). Toutefois, un grand nombre d'entre elles sont destructives : la méthode par dessiccation (AFNOR 2002a), la méthode hygrométrique (Riggio et al. 2014), les méthodes chimiques (Skaar 1998), etc. De plus, il existe certaines méthodes non destructives difficiles, voire impossibles à mettre en place dans le cadre d'un suivi en continu au niveau des lamelles : la méthode Radar (Rodríguez-Abad et al. 2010), la méthode par micro-ondes (Johansson et al. 2003), la Thermographie Infrarouge (Ludwig et al. 2004), la Radiographie (Tanaka et al. 2009), la Résonance Magnétique Nucléaire (Johansson et al. 2013), etc. Toutes ces méthodes ne seront donc pas abordées dans nos travaux.

Par contre, certaines méthodes peuvent répondre aux contraintes de suivi en continu dans les ouvrages, ce sont notamment les mesures électriques et les mesures ultrasonores. Par conséquent, nous n'évoquerons que ces dernières dans ce mémoire de thèse.

1.3.1. Méthodes électriques

- *Généralités concernant les méthodes électriques*

Les méthodes électriques sont les plus utilisées dans l'industrie du bois. Elles consistent à déterminer l'humidité du bois par l'intermédiaire de mesures résistives ou capacitives.

Les mesures résistives consistent à réaliser une mesure de la résistance électrique qui caractérise la difficulté du passage du courant électrique dans le conducteur (Menguy 1997). La résistance électrique (R) est fonction de la résistivité (ρ) (propriété intrinsèque du matériau) et des dimensions géométriques du conducteur, comme présenté par l'Equation 4 (Figure 39) :

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [4]$$

où R est la résistance électrique (Ω), ρ est la résistivité électrique ($\Omega \cdot m$) qui est une propriété intrinsèque du matériau, l est la longueur du milieu conducteur (m) et A est sa section (m^2).

Les mesures capacitives consistent à mesurer la capacité, i.e. la capacité de stockage des charges électriques dans un condensateur (Beauger et al. 2007). La capacité (C) d'un condensateur est déterminée par ses propriétés diélectriques et sa géométrie. Par exemple, la capacité d'un condensateur à plaques parallèles (Figure 40) est donnée par l'Equation 5:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad [5]$$

où C est la capacité (F), ε_0 est la permittivité du vide ($= (36\pi)^{-1} \cdot 10^{-9} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot m^{-1}$), ε_r est la permittivité relative du matériau, appelée souvent « constante diélectrique (CD) » (sans unité), A est l'aire des plaques (m^2) et d est la distance (m) entre elles.

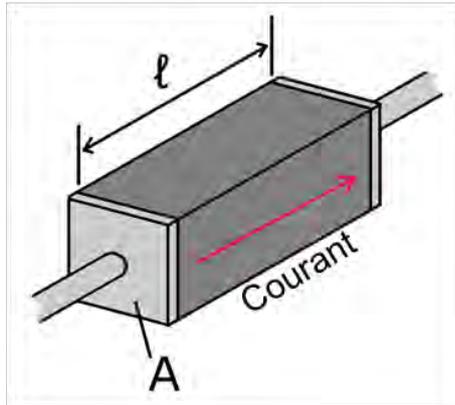


Figure 39: Schématisation du passage de courant dans un conducteur

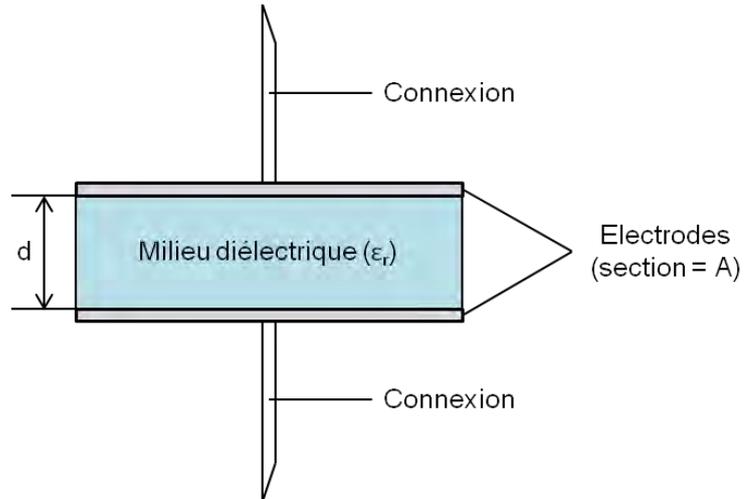


Figure 40: Coupe transversale d'un condensateur à plaques parallèles

- *Mesure de l'humidité par méthode résistive*

Dans l'industrie, la mesure de l'humidité du bois par méthode résistive se fait par l'insertion des deux électrodes de l'humidimètre résistif dans le matériau. La mesure est ensuite réalisée en utilisant un courant continu (Figure 41). Selon la Norme NF EN 13183-2 (AFNOR 2002b), la mesure est considérée comme précise entre 7% et 30% d'humidité avec une précision de $\pm 1\%$. Cette méthode est rapide à mettre en place mais elle est quand même invasive car la mesure nécessite l'insertion des électrodes dans le matériau.



Figure 41: Mesure de l'humidité du bois avec un humidimètre résistif (Source : www.brookhuis.com)

Le principe de cette technique repose sur la variation de la propriété résistive (résistance électrique ou résistivité, cf. Equation 4) du bois en fonction de l'humidité (Figure 42). La résistivité du bois est d'environ 10^{15} - $10^{16} \Omega \cdot m$ à l'état anhydre et 10^3 - $10^4 \Omega \cdot m$ au PSF (Stamm 1929, 1964; Ross 2010). Au-dessus du PSF, la résistivité diminue encore avec l'augmentation de l'humidité, mais de manière moins prononcée (cf. Figure 42). Ces différences de propriétés résistives en fonction du taux d'humidité peuvent être attribuées aux différentes formes d'eau présentes dans le bois. Pour les humidités en-dessous du PSF, l'eau dans le bois existe principalement sous forme d'eau liée dans les parois cellulaires alors qu'au-dessus du PSF, on commence à avoir également de l'eau libre dans les cavités du bois (cf. « 1.1.4 Comportement hygroscopique du bois »). Selon la littérature (Lin 1967), l'influence de l'eau libre et de l'eau liée sur la propriété résistive du bois est différente, et cette différence est liée aux différents types de cohésions entre l'eau et la structure du bois (Skaar 1988). Par conséquent, les tendances d'évolution de la résistivité (ou de la résistance électrique) sont différentes en-dessous et au-dessus du PSF.

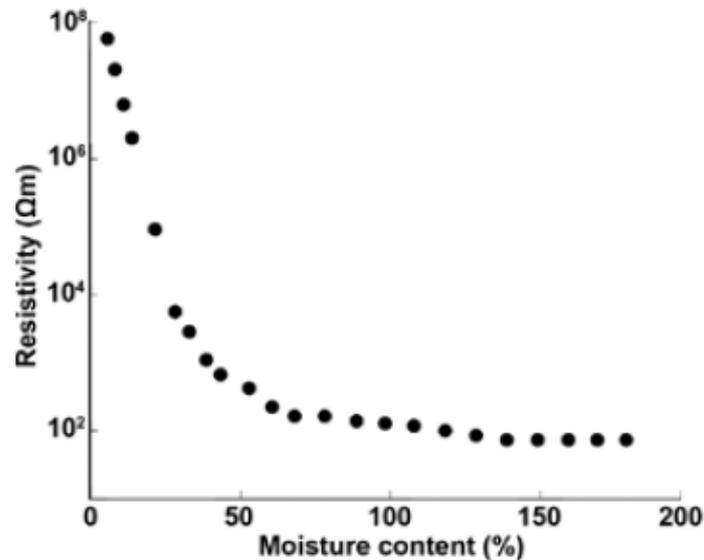


Figure 42: Résistivité du pin d'Elliott en fonction de l'humidité (en direction longitudinale) (Stamm 1929, 1964; Ross 2010)

L'équation reliant la résistance électrique et l'humidité fut originalement proposée par Stamm en 1927, qui a montré que le logarithme de la résistance électrique diminue en fonction du logarithme de l'humidité du bois suivant une relation linéaire (Equation 6) :

$$\text{Log}(R) = a + b * \text{Log}(H) \quad [6]$$

où R (Ω) est la résistance électrique, H (%) est l'humidité, a et b sont des constantes dépendantes de l'essence. D'autres modèles existent également dans la littérature (Forsén et al. 2000 ; Brischke et al. 2014b), mais c'est le modèle de Stamm (1927) qui est le plus utilisé (Norberg 2000; Tamme et al. 2012; Fredriksson 2013).

Mis à part l'humidité, l'hétérogénéité du bois a aussi une influence sur la résistivité du bois. Forsén et al. (2000) ont trouvé que la résistance électrique des échantillons de Pin Nordique est différente entre le duramen et l'aubier pour une faible humidité, et cette différence devient peu significative si l'humidité augmente. Comme présenté par la Table 8, la résistance du duramen est 2 fois plus grande que celle de l'aubier à 8 % d'humidité. A 12% d'humidité, cette différence devient plus petite et à 16% d'humidité, la résistance de l'aubier est égale à celle du duramen.

Table 8: Résistance de l'aubier et du duramen à différentes humidités pour les échantillons de Pin Nordique (Source : (Forsén et al. 2000))

Humidité (%)	Résistance (MΩ)	
	Aubier	Duramen
8	33200	68300
12	1100	1400
16	90	90

En ce qui concerne l'influence des directions d'anisotropie, Stamm (1960) rapporte que la résistivité dans la direction longitudinale (L) est respectivement de 1,9 à 3,2 et de 2,1 à 3,9 fois plus petite que dans la direction radiale (R) et dans la direction tangentielle (T) pour 8 essences américaines.

Deux paramètres expérimentaux s'avèrent pouvoir affecter également les mesures résistives. Ce sont la température et la distance entre les électrodes.

Concernant la température, on peut constater dans la Figure 43 que pour la même humidité, l'augmentation de température va entraîner la diminution de la résistivité (Skaar 1988). En effet, afin de prendre en compte l'influence de la température, un facteur de correction doit être appliqué si la mesure n'est pas effectuée à 20 °C. Ce facteur est d'environ 0,1-0,15 %/°C (Skaar 1988; Forsén et al. 2000), ce qui signifie que l'on doit enlever 0,1-0,15 % par degré sur l'humidité mesurée si la température est supérieure à 20 °C, et vice versa.

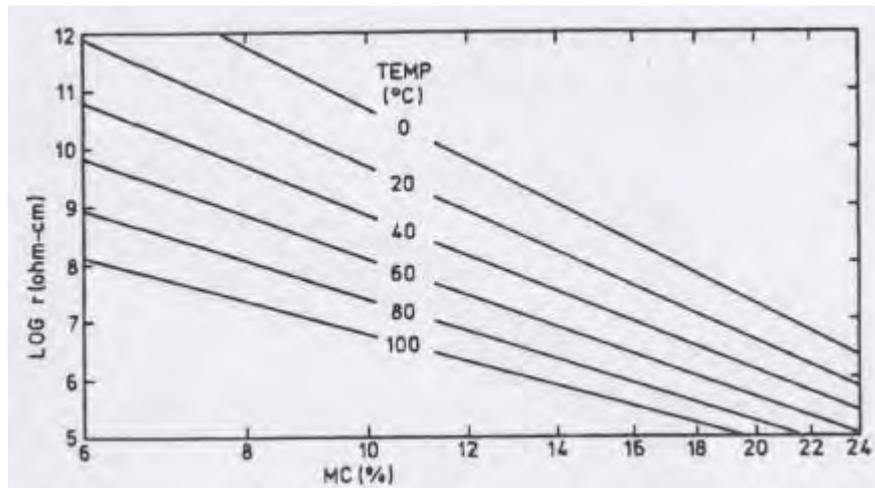


Figure 43: Résistivité du bois en fonction de l'humidité pour différentes températures (Source : (Skaar 1988))

En ce qui concerne l'influence de la distance entre les électrodes, Norberg (1999a) rapporte que l'espacement entre deux électrodes n'influence pas la résistance mesurée car la résistance engendrée par l'interface de contact est beaucoup plus grande que celle engendrée par le matériau. Selon Skaar (1964), ceci est dû au fait que les lignes équipotentielles théoriques sont plus intensément espacées au voisinage des électrodes, ce qui veut dire que la plupart de la résistance se concentre au voisinage de l'électrode. Forsén et al. (2000) ont effectué des mesures avec quatre espacements d'électrodes différents (20 mm, 30 mm, 60 mm et 120 mm) sur des échantillons de Pin Nordique dans la direction longitudinale, et ils ont constaté qu'il y a peu de différences entre les quatre courbes (Figure 45).

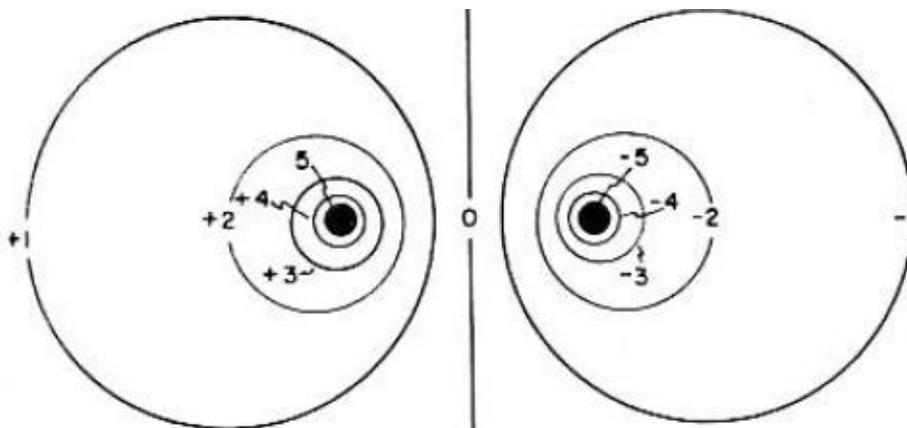


Figure 44: Courbes équipotentielles théoriques avec des électrodes « pointe » (l'électrode à gauche est à +5 volts de potentiel et l'électrode à droite est à -5 volts de potentiel) (Skaar 1964)

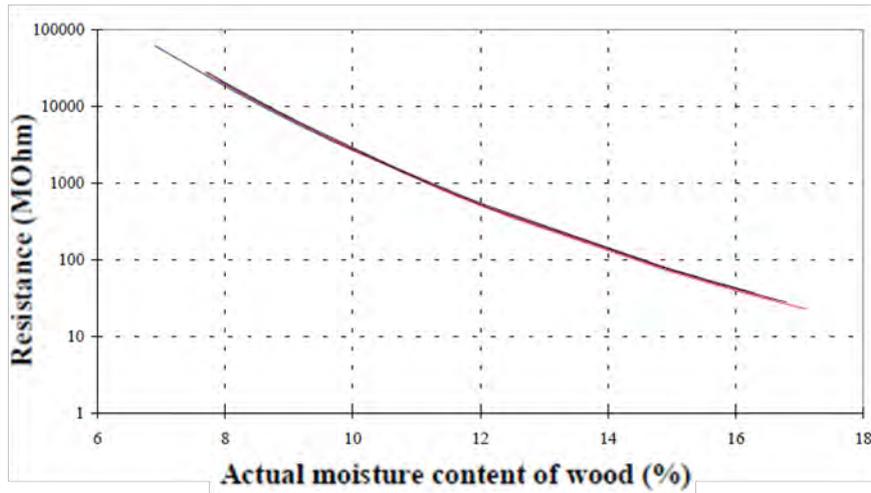


Figure 45: Résistance électrique en fonction de l'humidité pour quatre espacements d'électrodes différents (20 mm, 30 mm, 60 mm et 120 mm) (Nota : les 4 courbes se chevauchent) (Forsén et al. 2000)

Par ailleurs, une autre étude récente (Tamme et al. 2012) a proposé de dissocier la résistance du bois et la résistance d'interface dans le cadre de la désorption d'un échantillon d'aubier de pin sur une plage allant de 141% à 36,4% d'humidité. Pour ce faire, les auteurs ont mis en place deux paires d'électrodes d'espacements différents (30 mm et 15 mm) (Figure 46).

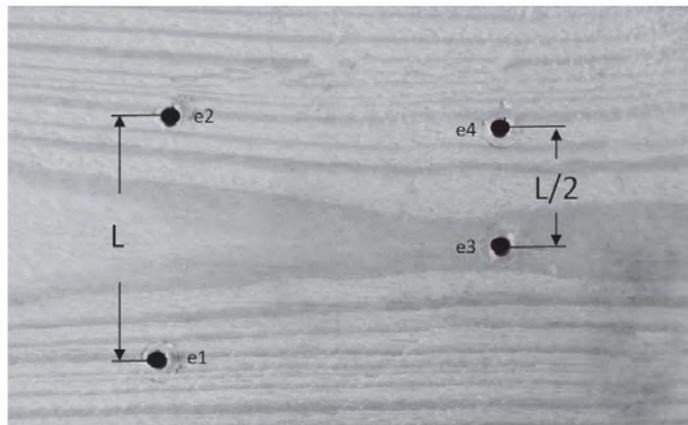


Figure 46: Arrangements des électrodes de l'étude de Tamme et al. (2012)

Deux équations ont ensuite été établies (Equations 7 et 8) :

$$R_1 = 2R_c + R_b \quad [7]$$

$$R_2 = 2R_c + R_b/2 \quad [8]$$

où R_1 est la résistance mesurée entre les trous e1 et e2 (cf. Figure 46), R_2 est celle mesurée entre les trous e3 et e4 (cf. Figure 46), R_c est la résistance d'interface d'un trou (résistance engendrée à l'interface de contact bois/électrode), R_b est la résistance du bois entre e1 et e2 et celle entre e3 et e4 est $R_b/2$ car la distance est la moitié de celle entre e1 et e2.

En résolvant les Equations 7 et 8, on obtient les équations pour calculer la résistance d'interface (Equation 9), et la résistance du bois (Equation 10) :

$$R_c = R_2 - R_1/2 \quad [9]$$

$$R_b = 2(R_1 - R_2) \quad [10]$$

Les résultats de Tamme et al. (2012) montrent que la résistance d'interface contribue à la plupart de la résistance totale (> 90%). Néanmoins, les auteurs ont utilisé la résistance totale pour la corrélation avec l'humidité (Figure 47) car ils ont eu des valeurs négatives pour la résistance du bois (Figure 48). L'auteur pense qu'il se peut qu'une de ses électrodes soit beaucoup plus corrodée. Celle-ci avait donc une résistance beaucoup plus élevée que les autres, et a donc introduit des valeurs négatives lors du calcul.

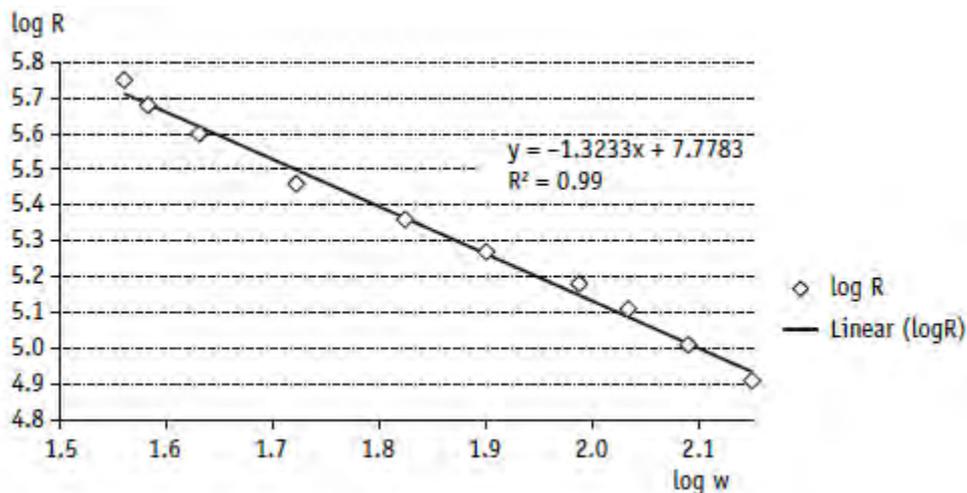


Figure 47: Relation entre la résistance électrique (totale) et l'humidité de l'étude de Tamme et al. (2012)

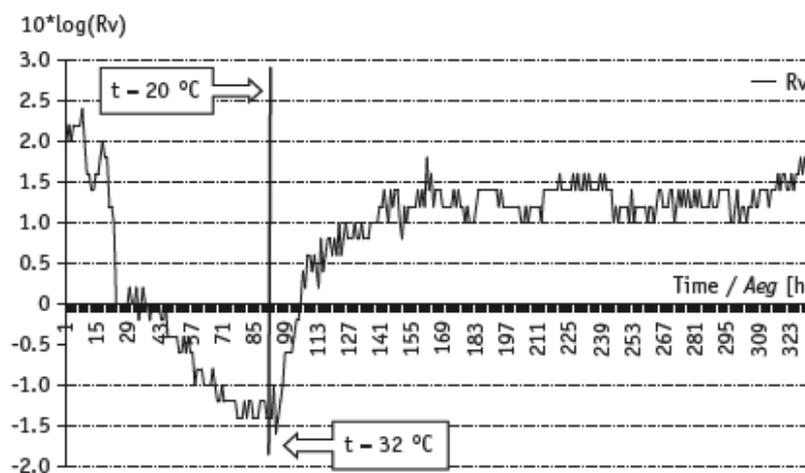


Figure 48: Résistance du bois en fonction du temps (Tamme et al. 2012)

Cette proposition (Tamme et al. 2012) de dissocier la résistance du bois et la résistance d'interface est très intéressante. Néanmoins, il s'agit du seul travail existant dans la littérature. De plus, un seul échantillon a été utilisé dans cette étude, ce qui n'est pas suffisant pour prendre en compte la variabilité du matériau bois. De ce fait, il serait intéressant dans le futur d'effectuer d'autres études avec davantage d'échantillons permettant d'étudier l'influence de l'humidité sur la résistance du bois et la résistance d'interface. De cette manière, il serait possible d'étudier la capacité de ces différents paramètres de résistance (résistance du bois, résistance d'interface, résistance totale mesurée) pour la mesure d'humidité.

- **Mesure de l'humidité par méthode capacitive**

Dans l'industrie, la mesure de l'humidité du bois par méthode capacitive se fait par un contact surfacique entre l'humidimètre capacitif et le matériau en utilisant un courant alternatif (Figure 49). Selon la Norme NF EN 13183-3 (AFNOR 2005), la mesure est considérée comme précise entre 7% et 30% d'humidité avec une précision $\pm 1\%$. La mesure par cette méthode est non destructive et rapide. Néanmoins, la profondeur de mesure est limitée à environ 25 cm, et la mesure est très sensible à l'état de surface (humidité, rugosité...) (Riggio et al. 2014). Dans la pratique, on utilise classiquement les électrodes à plaques parallèles (Figure 50a) pour effectuer des mesures capacitives comme dans le cas d'ouvrages en béton (Dérobert et al. 2006). Toutefois, on peut également utiliser d'autres configurations d'électrodes en ouvrant l'angle entre les deux électrodes à plaques pour s'adapter aux zones avec accessibilité limitée (Jazayeri et al. 2000; Liu et al. 2010) (Figures 50 b et c). Toutefois, si on veut connaître l'humidité moyenne sur la totalité de l'épaisseur de l'échantillon, il vaut mieux utiliser la configuration de la Figure 50a, pour éviter l'influence du gradient de l'humidité proche de la surface (James 1986).



Figure 49: Mesure de l'humidité du bois avec un humidimètre capacitif (Source : www.brookhuis.com)

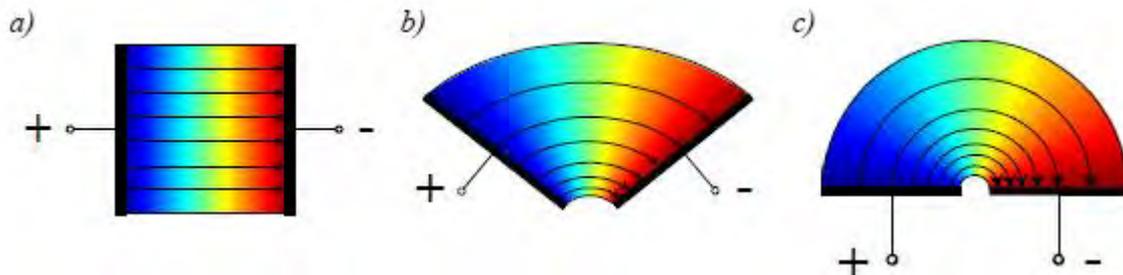


Figure 50: Différentes configurations d'électrodes (a, b, c) pour la mesure capacitive en ouvrant l'angle entre deux électrodes à plaques parallèles (Dérobert et al. 2006)

Le principe de cette technique repose sur la variation de la constante diélectrique (CD) (proportionnelle à la capacité, cf. Equation 5) en fonction de l'humidité (Jazayeri et al. 2000). La Figure 51 donne un exemple de la CD en fonction de l'humidité à différentes fréquences (Kabir et al. 1998). On peut constater que la CD présente une évolution croissante en fonction de l'humidité, et ce, de manière plus manifeste pour les humidités en-dessous du PSF. Cette différence est généralement attribuée aux différentes formes d'eau présentes dans le bois en-dessous et au-dessus du PSF (Lin 1967; Skaar 1988) (cf. « 1.1.4 Comportement hygroscopique du bois »). Par ailleurs, on peut également constater sur la Figure 51 que les valeurs de la CD sont différentes à différentes fréquences. En effet, la variation de la CD en fonction de l'humidité à différentes fréquences allant de 0,01 Hz jusqu'à l'échelle du GHz a été confirmée par plusieurs études (James 1977; Torgovnikov 1993; Kabir et al. 1997, 1998). Selon James (1986), qui a réalisé les mesures de la CD à 4 fréquences différentes (0,2 kHz, 1kHz, 10 kHz, 100 kHz), la sensibilité pour le suivi de la variation d'humidité augmente avec l'augmentation de la fréquence utilisée.

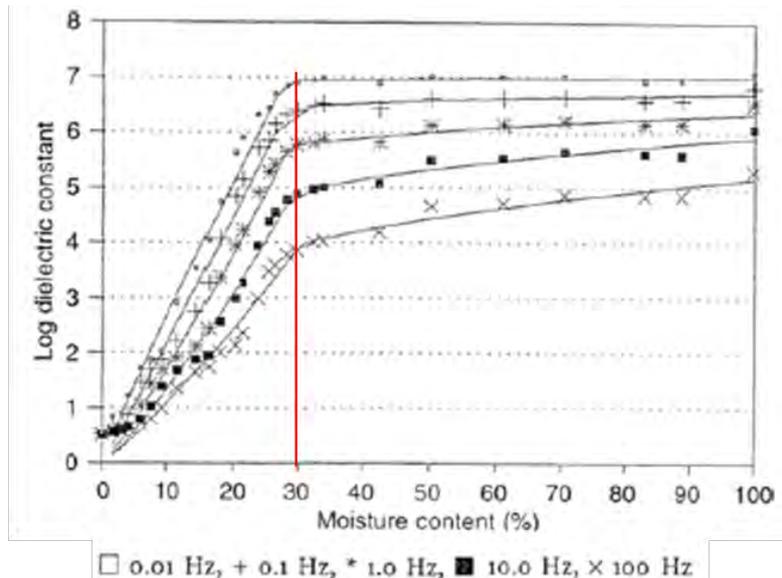


Figure 51: Constante diélectrique de l'Hévéa (direction longitudinale) en fonction de l'humidité à différentes fréquences (Kabir et al. 1998)

Selon Torgovnikov (1993), l'équation reliant la capacité et l'humidité est de la forme (Equation 11) :

$$C = a * H^b \quad [11]$$

où C est la capacité mesurée (F), H est l'humidité (%), a et b sont des constantes dépendantes de l'essence. D'autres modèles ont également été utilisés dans la littérature (Moron et al. 2016), mais c'est l'Equation 11 qui est la plus utilisée (Torgovnikov 1993 ; Jazayeri et al. 2000).

Là encore, il n'y a pas que l'humidité qui modifie la CD, la variabilité du bois a aussi une influence sur la CD du bois. Selon Skaar (1988), la CD augmente avec l'augmentation de l'infradensité (ratio entre la masse anhydre et le volume saturé), comme indiqué par la Figure 52 : la CD a doublé entre 0% et 25% d'humidité pour le bois de 0,1 d'infradensité, alors qu'elle a quadruplé pour le bois de 0,6 d'infradensité.

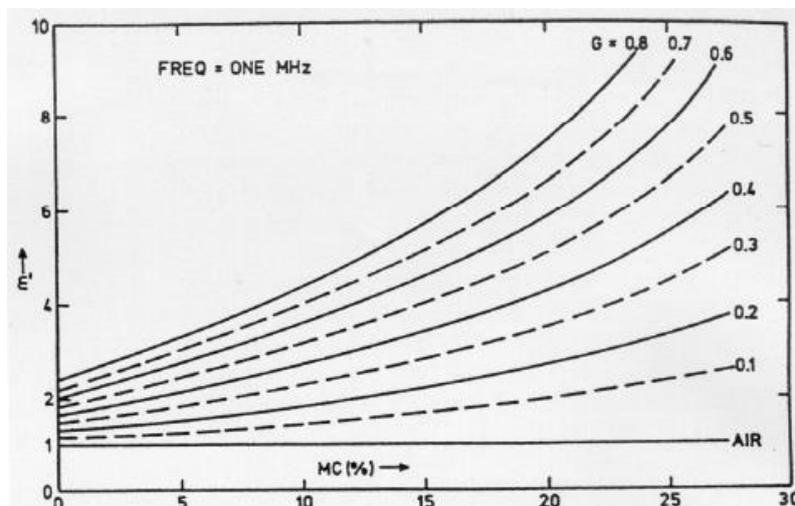


Figure 52: Constante diélectrique du bois en fonction de l'humidité pour différentes infradensités (G) à 1 MHz (perpendiculaire aux fibres) (Source : (Skaar 1988))

En ce qui concerne l'influence des directions d'anisotropie, les CD dans les directions radiale et tangentielle sont très proches, alors que la CD dans la direction longitudinale est plus grande (James 1986; Skaar 1988; Torgovnikov 1993), comme présenté dans la Figure 53.

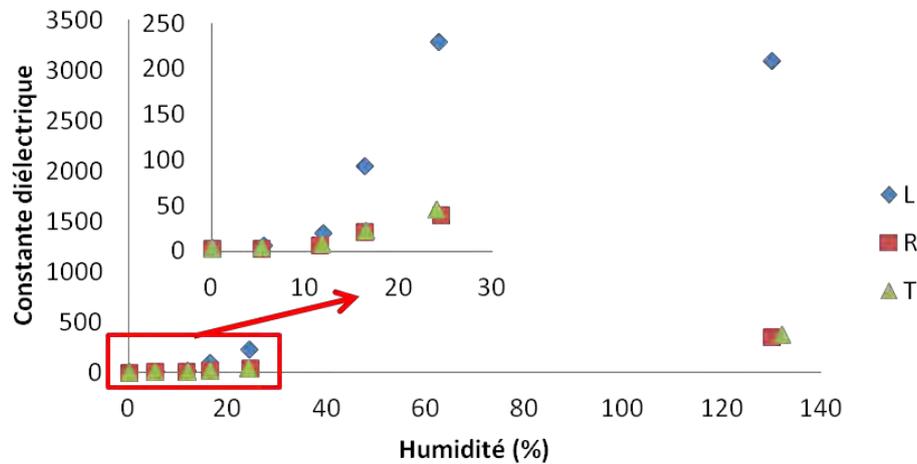


Figure 53: Constante diélectrique du Douglas en fonction de l'humidité dans les trois directions d'anisotropie (tracé à partir des données de James (1986))

Hormis les facteurs cités ci-dessus, la température peut également influencer la mesure de la CD. Pour le bois anhydre, la CD augmente progressivement en fonction de la température à différentes fréquences (de 10^2 Hz à 10^{10} Hz) (Figure 54) (Torgovnikov 1993). Cette relation croissante est quasiment linéaire mais la variation de la CD est faible entre -40 °C et 100 °C (entre $0,7 \times 10^{-3}$ et $5,5 \times 10^{-3}$ par degré). En revanche, pour le bois humide, l'influence de la température devient plus grande, surtout à basses fréquences (Figure 55). La Figure 56 présente la CD en fonction de l'humidité pour trois basses fréquences (20 Hz, 100 Hz, et 1 kHz) en 25 °C et 45 °C (James 1975). On peut constater que l'influence de la température est plus grande quand l'humidité augmente.

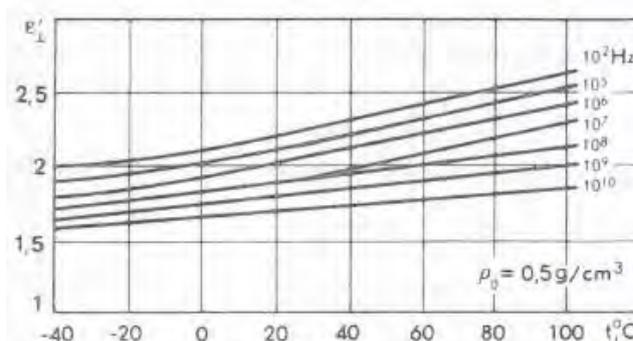


Figure 54: Constante diélectrique (perpendiculaire aux fibres) du bois anhydre en fonction de la température (Courbes tracées par Torgovnikov (1993) selon plusieurs études réalisées sur différentes essences, les courbes sont corrigées à densité = 0,5)

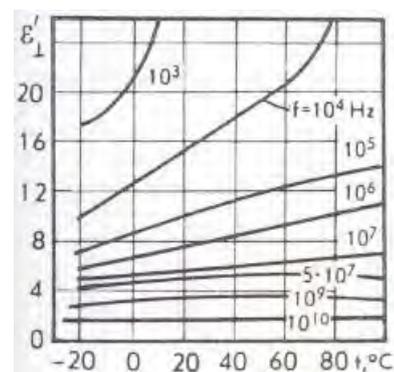


Figure 55: Constante diélectrique (perpendiculaire aux fibres) du bois à 25 % d'humidité en fonction de la température (Courbes tracées par Torgovnikov (1993) selon plusieurs études réalisées sur différentes essences, dont la densité est entre 0,4 et 0,5)

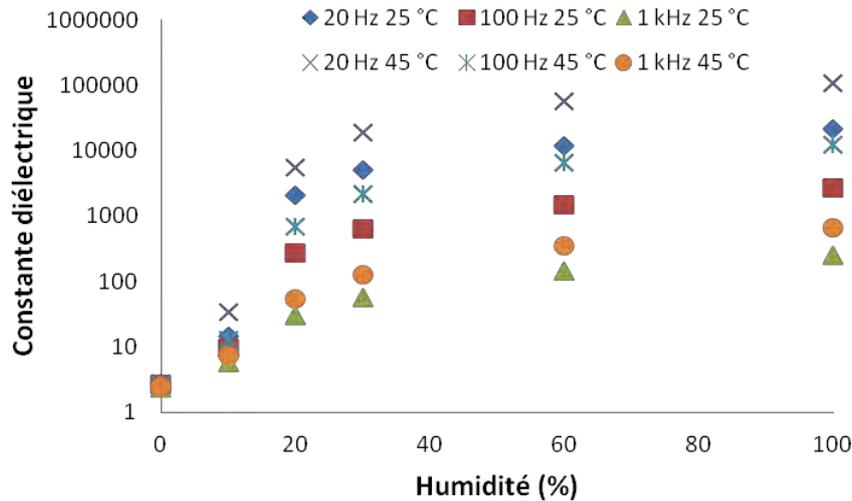


Figure 56: Constante diélectrique du Douglas (dans la direction radiale) en fonction de l'humidité pour différentes fréquences et températures (Source : James (1977))

Il est à préciser que les travaux dans la littérature présentent de grands écarts entre eux sur les valeurs de la CD (cf. la différence entre les Figures 53, 56 et les Figures 52, 54, 55). Cela pourrait être expliqué par le fait que les mesures de CD n'ont pas été réalisées dans les mêmes conditions expérimentales, alors que la CD dépend fortement de nombreux facteurs : fréquence, humidité, température, essence, direction d'orthotropie, etc.

1.3.2. Méthodes ultrasonores

- *Généralités concernant les ondes ultrasonores*

Les ultrasons sont des ondes élastiques dont la fréquence est supérieure à celle des sons audibles par l'oreille humaine (10 Hz à 20 kHz), et inférieure aux vibrations thermiques des atomes (environ 1 GHz) (Figure 57).

Dans cette étude, nous avons envisagé l'usage des méthodes ultrasonores (> 20 kHz) pour leur capacité à évaluer localement l'évolution d'un matériau (Cheeke 2012). Des méthodes basées sur les vibrations, ou des ondes acoustiques de basse fréquence (< 20 kHz) existent, mais elles agissent sur des distances de l'ordre du mètre au minimum (El-Khoury et al. 2013). Pour la surveillance des structures, elles font l'objet de développements car elles permettent de caractériser l'évolution de la structure, mais ne fournissent pas d'information locale sur l'état du matériau (Hagedorn et al. 2014).

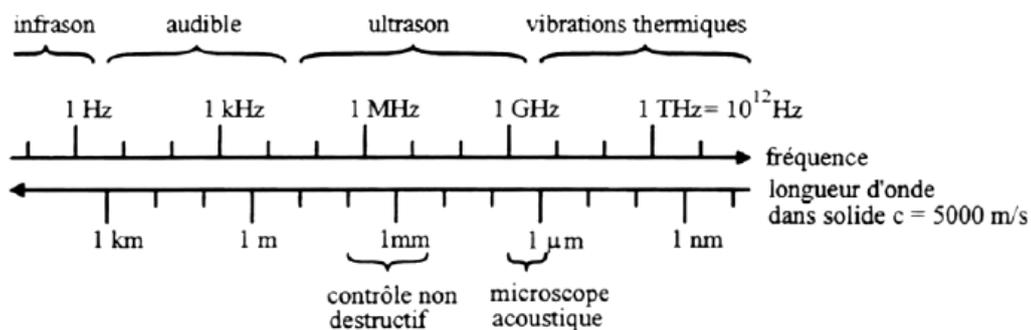


Figure 57: Echelle des ondes élastiques (Brancheriau 2013)

Le principe du contrôle non destructif (CND) par ultrasons réside dans l'analyse de l'influence des défauts localisés (ou inhomogénéités de structure) sur la propagation des ondes dans le matériau (Bucur 2006). On distingue en général deux catégories d'ondes : les ondes de volume et les ondes de surface. Les ondes de volume se propagent à l'intérieur du matériau, et peuvent être classées en deux familles selon le mouvement des particules :

- **Les ondes longitudinales** (Figure 58) qui correspondent à un déplacement des particules parallèlement à la direction de propagation de l'onde ;
- **Les ondes transversales** ou de cisaillement (Figure 59) qui correspondent à un déplacement des particules perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde.

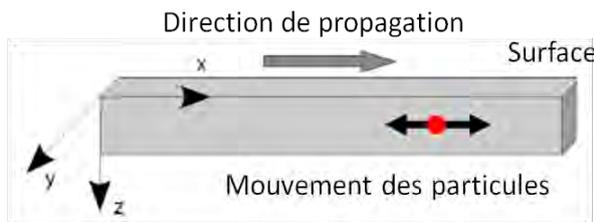


Figure 58: Ondes longitudinales (Brancheriau 2013)

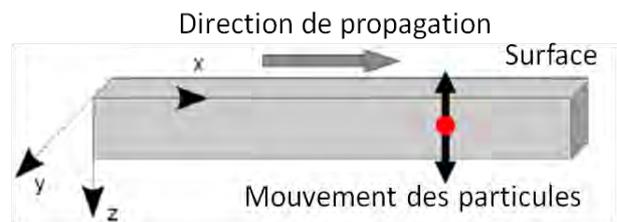


Figure 59: Ondes transversales (Brancheriau 2013)

Les ondes de surface, comme leur nom l'indique, se propagent à la surface du matériau. On distingue notamment deux types d'ondes de surface :

- **Les ondes de Rayleigh** (Figure 60) qui correspondent à une oscillation dans le plan perpendiculaire à la surface, avec un déplacement des particules selon une ellipse ;
- **Les ondes de Love** (Figure 61) qui correspondent à une oscillation polarisée de grande amplitude, dans le plan de la surface et perpendiculairement à la direction de propagation d'onde.

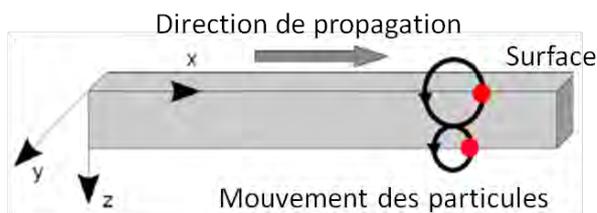


Figure 60: Ondes de Rayleigh (Brancheriau 2013)

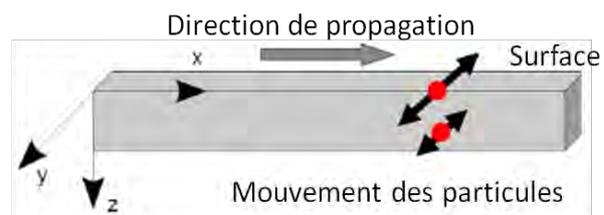


Figure 61: Ondes de Love (Brancheriau 2013)

Les contrôles ultrasonores peuvent se classer principalement en deux grandes catégories (Cherfaoui 2006) :

- **La méthode par réflexion** (Figure 62), où on utilise un seul capteur positionné sur la surface de la pièce contrôlée. Ce capteur est utilisé à la fois pour l'émission des signaux ultrasonores et la réception des signaux réfléchis ;
- **La méthode par transmission** (Figure 63), où on place deux capteurs sur deux faces opposées de la pièce contrôlée. Dans ce cas là, un capteur assure le rôle d'émetteur, l'autre de récepteur.

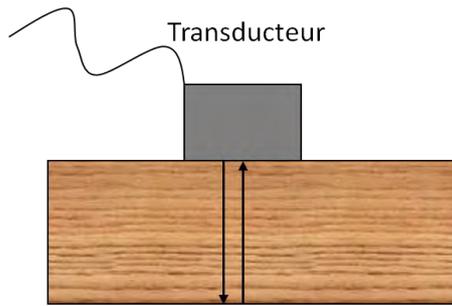


Figure 62: Méthode par réflexion

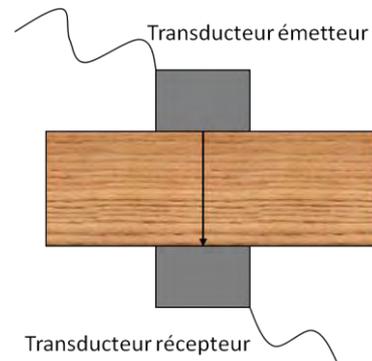


Figure 63: Méthode par transmission

L'émission et la réception des ondes ultrasonores sont opérées généralement grâce à l'effet piézoélectrique d'un transducteur. En appliquant une tension électrique alternative (signal d'émission) sur un transducteur, son cristal piézoélectrique se comprime et se décomprime alternativement en émettant une vibration dont la fréquence dépend de ses caractéristiques. Le même élément est utilisé pour transformer les signaux reçus en tension électrique. L'utilisation d'un agent couplant (liquide ou gel) est requise pour assurer un bon couplage acoustique entre les transducteurs et le matériau (Bucur 2006; Brancheriau 2013).

La mesure de l'humidité du bois par méthodes ultrasonores fait l'objet de nombreuses références dans la littérature, relatives à l'utilisation de la méthode par transmission (Duke 1988; Bucur 2006; Montero et al. 2015). Selon les paramètres étudiés, on peut distinguer deux types de méthodes : la méthode par ultrasons (US) et la méthode par acousto-ultrasons (AU), dont nous allons parler dans les deux sous-paragraphes suivants.

- **Méthode par ultrasons (US)**

La méthode par ultrasons (US) permet de mesurer l'humidité par la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le matériau. De nombreuses études ont investigué le potentiel de cette technique pour la détection du taux d'humidité du bois (Norton et al. 1990; Sakai et al. 1990; De Oliveira et al. 2005; Calegari et al. 2011). Les résultats présentent deux tendances particulières au-dessus et en-dessous du PSF : une forte décroissance de la vitesse au-dessus PSF et une diminution plus faible en-dessous (Figure 64) (Goncalves et al. 2008). Dans ces études, les ondes longitudinales sont généralement utilisées. La vitesse ultrasonore peut donc être déterminée par l'Equation 12 (Laugier et al. 2011) :

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [12]$$

où V est la vitesse de propagation des ondes élastiques dans le matériau (m/s), E est le module élastique (Pa) et ρ la masse volumique du matériau (g/m^3).

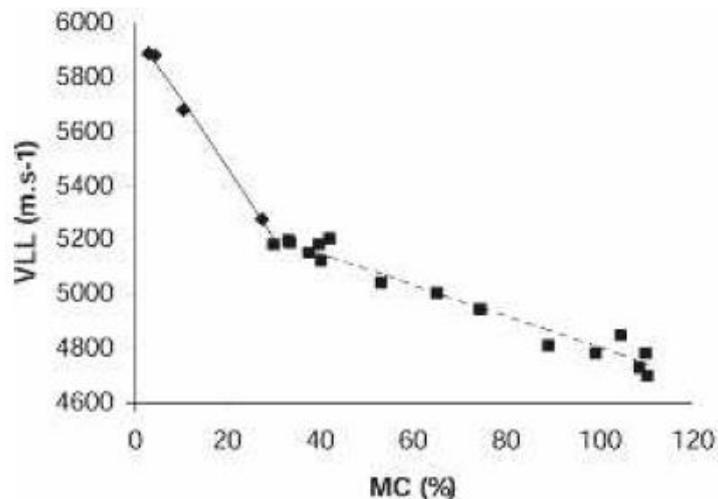


Figure 64: Evolution de la vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité sur du Pin brésilien dans la direction longitudinale (Goncalves et al. 2008)

Le module élastique du bois diminuant en fonction de l'humidité au-dessus du PSF et n'évoluant quasiment plus au-delà du PSF (cf. Figure 20) (Trouy et al. 2012a), ceci explique en partie les deux tendances différentes présentées par la vitesse ultrasonore avant et après le PSF. Parallèlement, la masse volumique ne cesse d'augmenter avec l'augmentation de l'humidité. L'évolution suit donc en toute logique la tendance suivante : une forte diminution de la vitesse jusqu'au PSF du fait d'une diminution du module d'élasticité et d'une augmentation de la masse volumique. Puis, au-delà du PSF, une diminution moins rapide de la vitesse avec l'humidité, car uniquement liée à l'augmentation de la masse volumique. La même évolution a été constatée dans les trois directions d'orthotropie du bois (Figure 65) (Kabir et al. 1998).

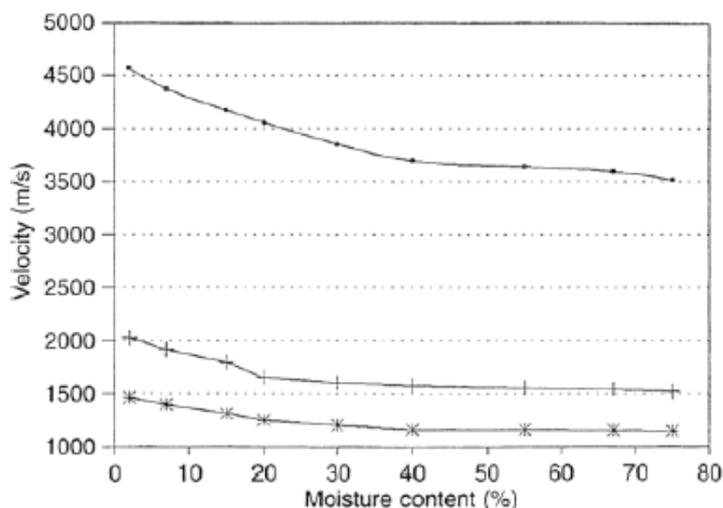


Figure 65: Evolution de la vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité dans les trois directions d'orthotropie du bois (■ Longitudinal ; + Radial ; * Tangentiel) (Kabir et al. 1998)

Toutefois, on voit aujourd'hui très peu d'applications industrielles de cette méthode pour la mesure de l'humidité dans le bois. Ceci peut s'expliquer par le fait que la vitesse ultrasonore n'est pas un paramètre facile à étalonner : elle diffère en fonction de la direction d'orthotropie, de l'essence, et même de la dimension de l'échantillon (Bucur 2006). L'influence de la dimension intervient lorsque la longueur d'onde devient comparable à la taille de l'échantillon

(Bucur 2006). Il est donc préférable que la taille de l'échantillon soit plus grande que la longueur d'onde pour avoir une information plus précise du matériau concernant la vitesse de propagation.

- **Méthode par acousto-ultrasons (AU)**

La méthode par acousto-ultrasons (AU) combine le traitement du signal de l'émission acoustique (EA) avec l'émission et la réception d'une onde ultrasonore. Elle diffère de la méthode EA, où les ondes mécaniques sont générées par des micro-endommagements internes du matériau. Pour la méthode par AU, l'émission des ondes (ultrasonores) est gérée par une source extérieure. Les paramètres classiquement utilisés sont présentés dans la Figure 66 et les définitions de ces paramètres sont données en Annexe 1.

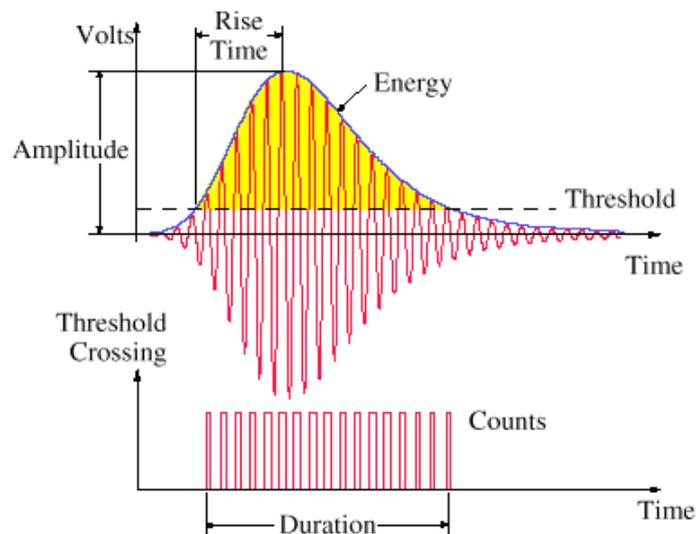


Figure 66: Paramètres généralement utilisés avec la méthode par acousto-ultrasons (Huang et al. 1998)

Les études concernant la mesure de l'humidité par la méthode AU sont peu nombreuses dans la littérature. Philippidis et al. (2003) ont investigué cette méthode pour déterminer le ratio eau/ciment dans le béton. Les résultats ont montré que cette méthode est capable de différencier des échantillons de différents ratios eau/ciment car l'amplitude des signaux diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. En ce qui concerne l'application sur le matériau bois, Quarles et al. (1989) ont fait une étude concernant l'influence de la teneur en humidité sur la propagation de signaux acoustiques dans le bois (Bucur 2006). Aucune influence n'a été observée en amplitude, nombre de coups, et énergie. Ceci est en accord avec les résultats publiés par Patton-Mallory et al. (1987), qui ont souligné que les résultats étaient peu concluants pour la détection de la teneur en humidité dans le bois (Bucur 2006). Ces constats peuvent être liés au fait que l'atténuation des signaux ultrasonores n'est pas aussi sensible, que dans le cas de la vitesse ultrasonore, à la variation d'humidité du bois (Sakai et al. 1990).

En effet, la mesure de l'atténuation des signaux ultrasonores n'est pas facilement reproductible, car cette dernière dépend fortement des conditions du couplage acoustique (pression de fixation des capteurs, type et épaisseur du couplant, état de surface de l'échantillon...) et des propriétés du milieu de propagation (discontinuités, hétérogénéité...) (Duke 1988; Bucur 2006). Selon Böhnke (1993), la variabilité des mesures de l'atténuation (19%) est environ 5 fois plus importante que celle des mesures de la vitesse ultrasonore (4%)

pour les échantillons d'Epicéa. Cela suppose que la mesure de l'atténuation peut fournir une information complémentaire à la mesure de la vitesse ultrasonore, mais qu'elle ne peut pas être utilisée pour obtenir des informations précises sur les propriétés du matériau.

1.3.3. Conclusion

A l'issue de cette recherche bibliographique sur les méthodes utilisables pour mesurer l'humidité du bois, deux familles de méthodes ont montré leur potentiel pour une application en structures LC : les méthodes électriques et les méthodes ultrasonores. Pour les mesures électriques, les paramètres permettant de mesurer l'humidité sont la résistance électrique (mesure résistive) et la capacité électrique (mesure capacitive). Pour les mesures ultrasonores, le paramètre mesuré est la vitesse ultrasonore.

Après avoir présenté quelques généralités sur leurs principes et leurs avantages/inconvénients, nous allons à présent dresser un panorama des principales applications de ces deux méthodes dans le suivi de la santé structurale par instrumentation intégrée, et ce, de manière à pouvoir identifier les technologies utilisables pour un suivi en continu de l'humidité dans les structures LC.

1.4. Suivi de la santé structurale des ouvrages par intégration de capteurs

1.4.1. Généralités du suivi de la santé structurale des ouvrages

Le suivi de la santé structurale (SHM, en anglais : Structural Health Monitoring) est un terme utilisé originalement dans l'industrie de l'aéronautique et de l'espace. Il est à présent également utilisé pour les ouvrages d'art (Staszewski et al. 2004; Björngrim 2015). Le SHM vise à réaliser des diagnostics sur l'état de la santé des structures en continu par des systèmes de suivi intégrés (Balageas et al. 2006). Classiquement, la santé des ouvrages est évaluée dans le cadre des inspections périodiques IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) tous les trois ans et d'une inspection détaillée tous les 6 ans, dont la fréquence peut être adaptée (SETRA 2006 ; LCPC 2008). Ces inspections s'effectuent principalement par des inspections visuelles afin d'identifier les dégâts visibles, et, de déterminer s'il est nécessaire de réaliser des contrôles supplémentaires, en fonction de la pathologie suspectée (Kasal et al. 2004). Néanmoins, les inspections visuelles se révèlent parfois insuffisantes car elles ne permettent pas de détecter tous les endommagements, et ne sont donc pas capables de donner une évaluation complète sur la santé des ouvrages (Bergmeister et al. 2000). De ce fait, de nombreuses techniques de suivi non destructives sont développées ou mises en place pour obtenir davantage d'informations sur la santé structurale des ouvrages (Fu 2005; Breysse 2012).

On peut citer par exemple certaines techniques couramment utilisées :

- Les méthodes acoustiques ou ultrasonores pour la détection des défauts dans les ouvrages en béton (Steiger 1991), et la détection de la pourriture dans les ouvrages d'art en bois (Senalik et al. 2008) ;
- Les méthodes électrochimiques pour détecter la corrosion des ouvrages en béton armé (Fu 2005) ;
- Les méthodes électriques (résistive et capacitive) pour la mesure de l'humidité dans les ouvrages en béton et en bois (Phillipson et al. 2007; Tannert et al. 2011) ;
- La méthode par émission acoustique pour la localisation, le suivi de l'évolution et l'identification des mécanismes d'endommagement dans les ouvrages en béton (Perrin 2009 ; Behnia et al. 2014) ;
- Les techniques comme la thermographie infrarouge, le radar et la radiographie permettant d'avoir une cartographie des structures afin de contrôler l'état de santé interne de ces dernières (défauts, délaminations, zones corrodées/pourries, déformation/défaillance des éléments de connexion etc.) (Riggio et al. 2012, 2014; Lechner 2013)

De plus, pour le suivi de la santé d'ouvrages, on utilise également d'autres systèmes de suivi pour recueillir des informations supplémentaires : les accéléromètres et les capteurs GPS pour suivre les déviations/mouvements du tablier des ponts (Gustafsson et al. 2010); les jauges de déformation pour suivre la contrainte dans les câbles des ponts haubanés (Björngrim 2015); les capteurs à fibres optiques pour la mesure de la température, de la contrainte et des déplacements (Glisic et al. 2008).

Au regard de notre objectif de développer des systèmes de suivi de l'humidité intégrés au niveau des lamelles des poutres LC, dans les deux paragraphes suivants, nous n'allons détailler que les deux familles de méthodes (identifiées dans la section précédente) qui présentent suffisamment de potentiel pour effectuer des mesures dans des poutres LC avec des capteurs intégrés, à savoir : les méthodes électriques et les méthodes ultrasonores.

1.4.2. Suivi via l'utilisation des méthodes électriques

Comme nous avons pu le préciser précédemment, les méthodes électriques peuvent être réalisées par deux types de mesures : les mesures résistives et les mesures capacitives.

- **Méthode résistive**

La méthode résistive peut être employée pour la caractérisation de corrosion et le suivi de l'humidité dans les ouvrages d'art en béton armé (Steiger 1991; Lataste 2002). La mesure se fait en général à l'aide d'un courant continu. Concernant les électrodes de mesure, on distingue généralement deux configurations (Naar 2006) : la configuration à une électrode (Figure 67) et la configuration à 4 électrodes (Figure 68). La Figure 67 montre la configuration à une électrode. Dans cette configuration, la mesure résistive est assurée par le passage du courant électrique entre le disque métallique placé à la surface de la structure en béton et la barre d'armature métallique, qui sert de deuxième électrode (Feliu et al. 1996). La Figure 68 présente la configuration à 4 électrodes. Dans cette configuration, 4 électrodes de type fil/tige sont encastrées dans la structure en béton. L'avantage de l'utilisation de 4 électrodes plutôt que 2 électrodes est : 1) dans ce cas, la résistance électrique des systèmes de mesure (câbles, électrodes etc.) n'est pas comprise dans la résistance mesurée; 2) on a une zone d'investigation plus grande (Wenner 1915; Broomfield et al. 2002).

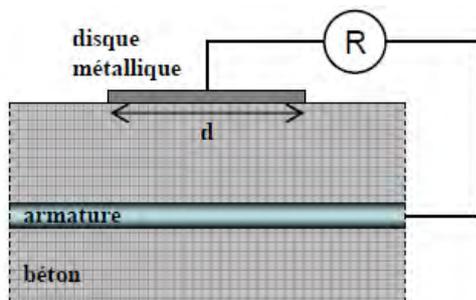


Figure 67: Mesure résistive avec une électrode dans le béton armé (Naar 2006)

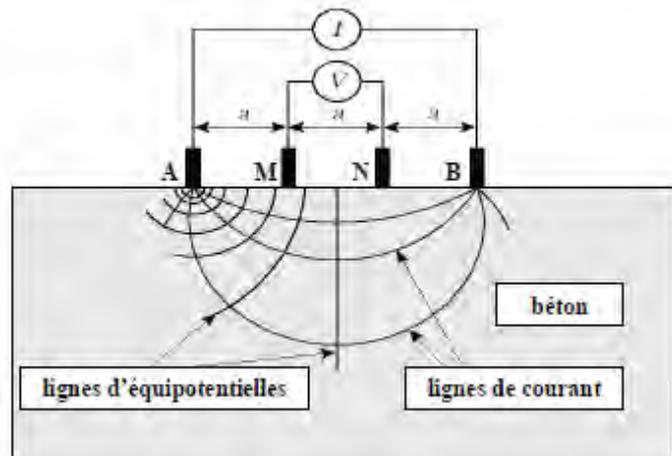


Figure 68: Mesure résistive avec 4 électrodes dans le béton (Broomfield et al. 2002; Naar 2006)

Pour le matériau bois, la méthode résistive est couramment utilisée pour la mesure de l'humidité par l'insertion des deux électrodes de type « pointe » dans le matériau (Figure 69, cf. « 1.3.1 Méthodes électriques ») (James 1963). L'application de cette méthode dans l'industrie se traduit par l'utilisation d'humidimètres portatifs (Figure 41). Néanmoins, ces dispositifs ne permettent pas la réalisation d'un suivi en continu de l'humidité. De ce fait, plusieurs études ont été menées afin de développer des instrumentations permettant de résoudre ce problème.

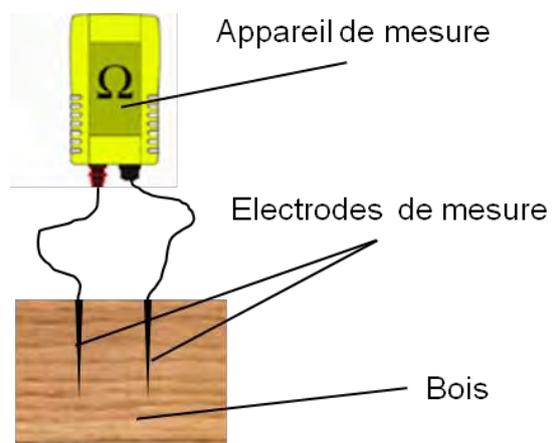


Figure 69: Mesures résistives dans le bois

Les premiers travaux que l'on peut trouver dans la littérature concernent l'utilisation des électrodes de type « aiguille » (Skaar 1964; Vermaas 1982; Fredriksson 2010). Cependant, des problèmes de maintien du contact électrique entre les électrodes et le bois ont été rencontrés du fait des variations dimensionnelles du bois (Skaar 1964; Dai et al. 2001). Suite à ce constat, certaines études proposent d'utiliser des électrodes de type « vis » (Hjort 1996; Norberg 2000) ou d'appliquer de la colle conductrice dans l'espace entre les câbles électriques dénudés et l'échantillon (Brischke et al. 2008a; Fredriksson et al. 2013).

Concernant les modèles d'instrumentation où les vis ont été utilisées comme électrodes, on peut citer les études de Hjort (1996) et de Norberg (1999b, 2000).

La mise en place des électrodes de Hjort (1996) est présentée sur la Figure 70. Cette étude a été effectuée sur des panneaux en Epicéa. Les vis inox ont été visées à l'intérieur des panneaux. Elles sont placées vers le fond du panneau car cette zone est susceptible d'avoir des dégradations liées à l'humidité. Les vis font 2,9 mm de diamètre et 6,5 mm de longueur. L'espacement entre deux vis est de 20 mm. La colle isolante a été injectée dans le vide restant afin de créer l'isolation électrique. Les auteurs ont trouvé qu'il est possible de suivre la variation d'humidité dans les panneaux allant de 16% à 30%.

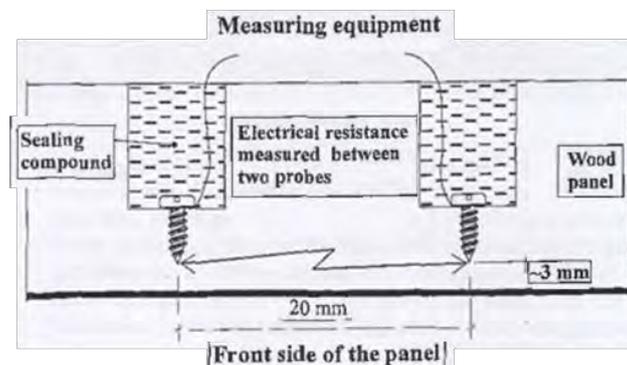


Figure 70: Modèle d'instrumentation du suivi de l'humidité de Hjort (1996)

Norberg (1999b, 2000) a utilisé des vis inox enfoncées dans des trous pré-percés (Figure 71). Les vis font 5,2 mm de diamètre et 50 mm de longueur. L'espacement entre deux vis est de 30 mm, et la profondeur de pénétration est de 23 mm. Une gaine a été utilisée pour isoler la partie supérieure des électrodes. Pour empêcher la pénétration d'eau dans le trou, une colle polyuréthane a été appliquée autour des électrodes et au niveau de la surface. Il a travaillé sur trois essences (pin sylvestre; épicéa; chêne), et obtenu des résultats cohérents ($R^2 > 94\%$) au regard des modèles proposés initialement par Stamm (1927) (Equation 6) pour les humidités allant de 10 % à 24 %.

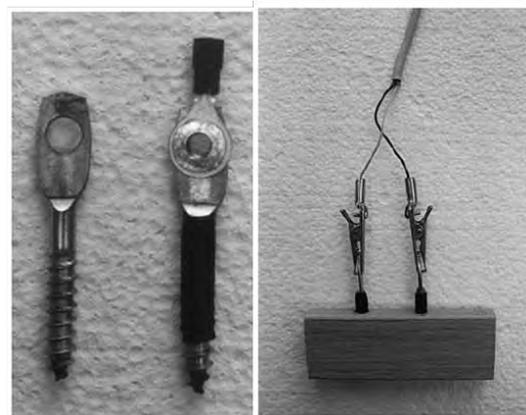


Figure 71: Modèle d'instrumentation du suivi de l'humidité de Norberg (1999b, 2000)

Concernant les modèles d'instrumentation où la colle conductrice a été appliquée dans l'espace entre les électrodes et le bois, on peut citer les études de Brischke et al. (2008a) et de Fredriksson et al. (2013).

La mise en place des électrodes de Brischke et al (2008) est présentée par la Figure 72. Ils ont

utilisé des câbles métalliques pour effectuer les mesures résistives. Les câbles de 1,2 mm de diamètre présentent une âme en inox, ils ont été dénudés sur 5 mm au bout. Les câbles ont été placés dans des trous percés de 4 mm de diamètre. Une colle conductrice (0,1 mL) a été injectée au fond du trou et le vide restant a été comblé par une colle isolante. Pour une paire d'électrodes, deux profondeurs (9,5 cm et 15,5 cm) ont été choisies afin de minimiser les risques d'amorce de fissure. De plus, dans cette étude, deux configurations avec des câbles et de la colle conductrice différentes ont été comparées : la première configuration utilise des câbles de cuivre gainés et une colle conductrice chargée de poudre de cuivre ; la deuxième configuration utilise des câbles inox avec du revêtement polyamide et une colle conductrice chargée de poudre de graphite. Les résultats ont montré que la première configuration n'est pas adaptée pour le suivi de l'humidité car l'oxydation du cuivre a été constatée dans la colle. Par conséquent, la seconde (câble inox + colle graphite) a été utilisée pour la suite de cette étude. Les résultats montrent également que ce système permet de discriminer différentes humidités (15%, 25% et 50%) sur des échantillons d'essences différentes (douglas, épicéa, pin sylvestre).

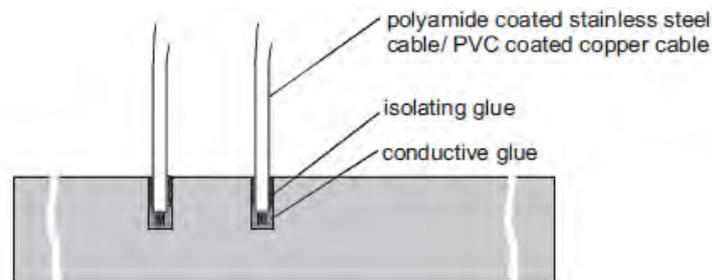


Figure 72: Modèle d'instrumentation du suivi de l'humidité de Brischke et al. (2008a)

Dans l'étude de Fredriksson et al. (2013), des fils de cuivre (de 0,5 mm de diamètre) et des tubes capillaires (de 1 mm de diamètre intérieur, et 1,6 mm de diamètre extérieur) ont été utilisés (Figure 73). Les électrodes espacées de 10 mm, ont été insérées dans le bois à une profondeur de 5 mm. Les trous percés ont le même diamètre que le diamètre extérieur des tubes capillaires (1,6 mm). Une colle conductrice chargée de poudre d'argent a été injectée au fond du tube. Les mesures ont été réalisées sur des échantillons d'Épicéa pour des humidités allant de 12% à 150%. Les résultats montrent qu'entre 12% et 20% d'humidité, l'incertitude d'estimation de l'humidité est de ± 1 à 1,5 % (d'humidité). A 40% d'humidité, l'incertitude d'estimation devient de l'ordre de $\pm 4\%$ (d'humidité). A partir de 50% d'humidité, ce n'est plus possible d'estimer l'humidité par une mesure résistive.

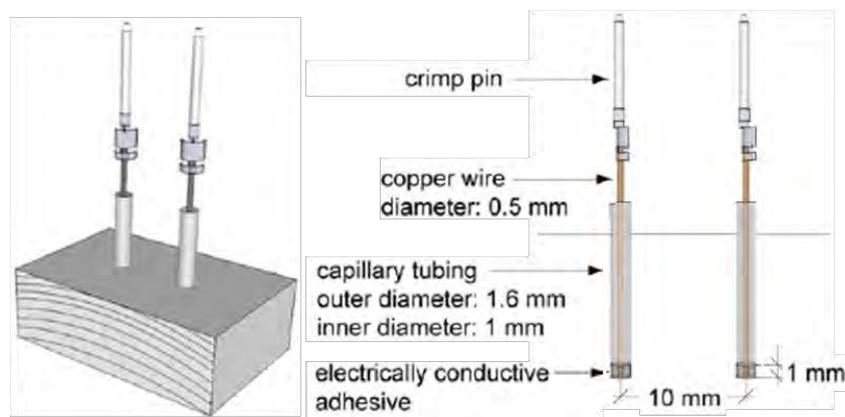


Figure 73: Modèle d'instrumentation du suivi de l'humidité de Fredriksson et al. (2013)

En dehors des études citées ci-dessus qui concernent uniquement des échantillons de bois massif, Björngrim et al. (2017) ont proposé une méthode d'instrumentation dans le cas du bois LC. Il s'agit de la mise en place de deux tiges inox serrées entre deux poutres LC en Epicéa (Figure 74). Ce type de test a été proposé car les poutres LC dans les ponts en Suède sont souvent mises en place de cette manière (Pousette et al. 2016). Les tiges inox sont de 0,75 mm de diamètre et espacées de 25 mm. Les tests ont été réalisés pour 3 humidités (12%, 20%, 25%) et 3 pressions de serrage (3 bars, 7 bars, 10 bars) différentes afin de connaître l'influence de ces dernières sur les mesures résistives. De plus, les tiges de différentes longueurs ont été testées afin d'investiguer l'influence du nombre de lignes de colle. Les résultats montrent que cette méthode d'instrumentation est capable de différencier les 3 humidités. En outre, il n'y a pas d'influence de la pression et du nombre de lignes de colle sur les mesures résistives. Toutefois, il est à noter que cette instrumentation ne permet d'obtenir que l'information de l'humidité sur l'interface de deux poutres, et non dans la lamelle.

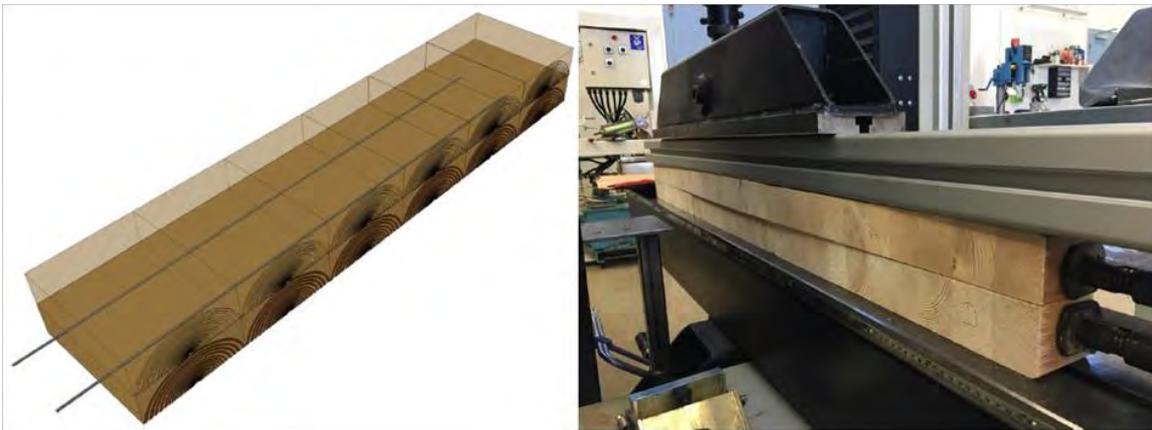


Figure 74: Modèle d'instrumentation du suivi de l'humidité dans les poutres LC (Björngrim et al. 2017)

L'application « grandeur nature » de la méthode résistive pour le suivi de l'humidité des ouvrages d'art en bois a déjà été initiée dans certains pays européens (Dietsch et al. 2014b; Franke et al. 2014; Björngrim 2015; Koch et al. 2016). Dans ces études, l'instrumentation des électrodes de mesure (vis/clous inox gainés) s'est réalisée en surface des ouvrages (Figure 75). Les espacements des électrodes sont généralement de l'ordre de 30 mm et les profondeurs de mesure sont diverses (de 1,5 mm à 200 mm).



Figure 75: Electrodes de mesure utilisées pour le suivi de l'humidité dans des ouvrages d'art en bois (Franke et al. 2013b; Dietsch et al. 2014a)

Les résultats de suivi montrent que dans le cas général, la variation d'humidité dans les ouvrages auscultés est comprise entre 10% et 30%. Toutefois, dans certains cas, des dysfonctionnements relatifs à la transmission des données ont été rencontrés. Un exemple de résultats de suivi est donné sur la Figure 76. La courbe verte est l'humidité d'équilibre calculée à partir de la température et l'HR. Les autres courbes présentent les résultats des capteurs installés à une profondeur de 200 m.

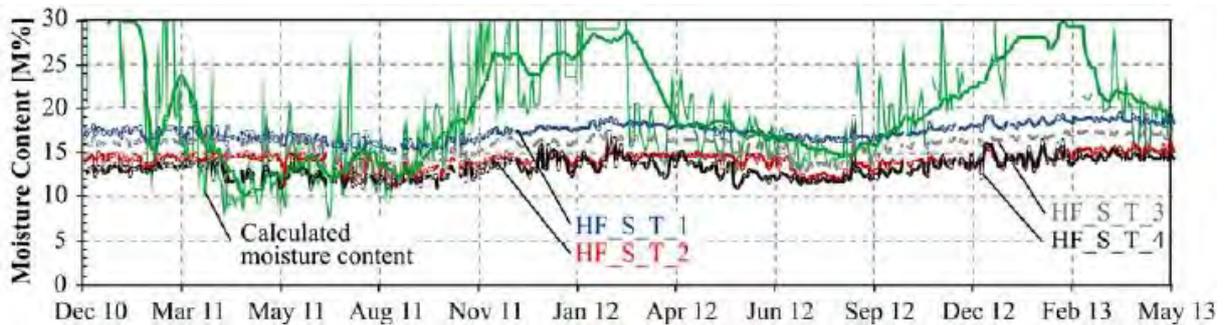


Figure 76: Exemple des résultats du suivi de l'humidité (Franke et al 2014)

Au travers des informations présentées ci-dessus relatives au suivi de l'humidité dans le bois via la méthode résistive, on voit que les électrodes de type « pointes » sont capables de suivre la variation de l'humidité dans les ouvrages. Néanmoins, aucun modèle de suivi n'a été proposé pour le suivi dans des lamelles de bois LC. De plus, le système de suivi actuellement utilisé pour les ouvrages est généralement calibré pour la plage d'humidité 10%-30%, ce qui n'est pas forcément toujours suffisant car selon les résultats de suivi de quelques études (Brischke et al. 2008c ; Pousette et al. 2016) autres que celles-ci, l'humidité dans les ouvrages en bois peut atteindre jusqu'à 70% d'humidité, à cause des mauvaises conceptions qui induisent la rétention d'eau notamment dans des zones d'assemblage. Au vu de ces constats, il est nécessaire de développer des systèmes de suivi intégrés dans les lamelles de LC pour le suivi d'humidité, et ce, dans une plage plus large (> PSF).

Dans le sous-paragraphe suivant, nous allons parler de l'utilisation de la méthode capacitive pour le suivi de l'humidité.

- **Méthode capacitive**

La méthode capacitive a été principalement développée sur les ouvrages en béton pour les applications telles que la détection de la corrosion, des défauts internes mais aussi la mesure de l'humidité des structures en béton (Dérobert et al. 2006; Sharma et al. 2011; Perveen et al. 2014). La mesure est réalisée par l'utilisation d'un courant alternatif. Concernant les électrodes de mesure, on utilise classiquement deux électrodes à plaques parallèles sur deux faces opposées de la structure comme montré par la Figure 50a (cf. « 1.3.1 Méthodes électriques »). En revanche, afin de s'adapter à l'accessibilité des zones investiguées, il est également possible de changer la configuration des électrodes en ouvrant l'angle entre les deux électrodes, comme présenté par les Figures 50 b et c (Dérobert et al. 2006). Toutefois, cette technique est moins utilisée dans le béton que certaines techniques comme le Radar et la méthode résistive pour des raisons diverses : elle est très sensible à l'état de surface ; certains facteurs comme la présence d'armatures métalliques ou des cavités d'air peuvent perturber la mesure (Breysse 2012).

Pour le matériau bois, la méthode capacitive est souvent utilisée pour la caractérisation diélectrique du bois mais aussi pour la mesure de l'humidité. Pour la caractérisation diélectrique, dans la plupart des cas, la réalisation se fait par l'utilisation des électrodes à plaques parallèles comme montré par la Figure 77. Concernant son application pour la mesure de l'humidité, cela se traduit dans l'industrie par l'utilisation d'humidimètres capacitifs (Figure 49). Dans ce cas, les deux électrodes de mesure sont placées dans le même boîtier de mesure afin de faciliter l'utilisation (cf. Figure 50c).

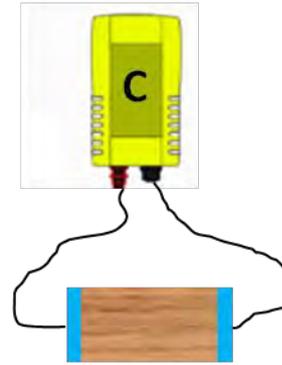


Figure 77: Mesure capacitive sur du bois

Les études dans la littérature visant à développer des systèmes de suivi intégrés pour le suivi de l'humidité du bois sont peu nombreuses. La raison peut être liée au fait que l'appareil de mesure capacitive est plus difficile à étalonner (par rapport à l'humidimètre résistif) car les résultats peuvent être influencés par plusieurs variables : l'état de surface (humidité, rugosité...), l'infradensité, la température etc. (Forsén et al. 2000; Kasal et al. 2011)

Néanmoins, deux études montrent le potentiel de l'application de cette technique dans le cadre du développement du système de suivi intégré (Jazayeri et al. 2000; Moron et al. 2016).

Concernant l'étude de Jazayeri et al. (2000), les auteurs ont utilisé des électrodes en PVC avec des circuits imprimés (20*5 mm² de surface) pour effectuer des mesures à 4 humidités différentes (7,5%, 13,6%, 18,4%, 25,1%) sur des panneaux de Peuplier recouverts de vernis (Figure 78). Une pression constante est assurée par des pinces de serrage. Les résultats montrent qu'il est possible de différencier les 4 humidités (Figure 79).



Figure 78: Mise en place d'électrodes dans l'étude de Jazayeri et al. (2000)

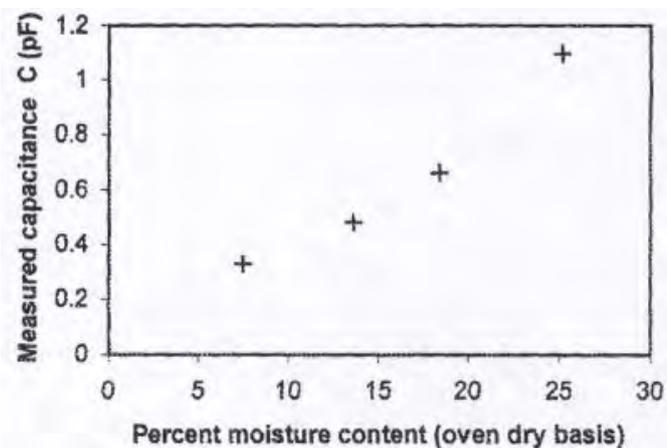


Figure 79: Capacité en fonction de l'humidité de l'étude de Jazayeri et al. (2000)

En ce qui concerne l'étude de Moron et al. (2016), les électrodes en cuivre ont été utilisées (Figure 80). Leur surface est de 160*160 mm², ce qui est identique aux dimensions de l'échantillon. Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible de suivre la variation de l'humidité dans l'échantillon en Pin sylvestre lors de la désorption de 60% à 0% d'humidité (Figure 81).

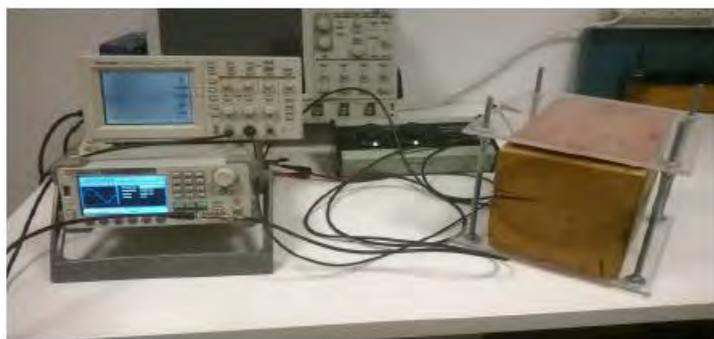


Figure 80: Mise en place du dispositif de mesure capacitive dans l'étude de Moron et al. (2016)

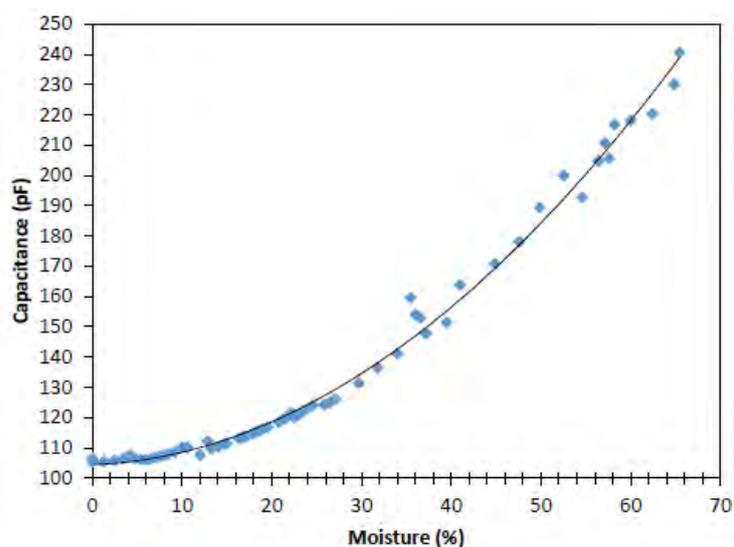


Figure 81: Capacité en fonction de l'humidité de l'étude de Moron et al. (2016)

En revanche, il n'y a aucune information disponible dans la littérature sur l'application de la méthode capacitive à l'échelle de l'« ouvrage ».

- **Bilan**

Dans ce paragraphe, on vient de synthétiser les informations disponibles dans la littérature concernant la mesure de l'humidité du bois et le suivi par instrumentation de capteurs via deux techniques : la méthode résistive et la méthode capacitive. Concernant la méthode résistive, la faisabilité du suivi de l'humidité des ouvrages d'art en bois dans la plage d'environ 10%-30% par les électrodes de type « pointe » a déjà été démontrée. Néanmoins, il faut encore développer des systèmes de suivi au niveau des lamelles du bois LC. De plus, il faut calibrer le système de suivi pour une plage d'humidité plus large compte tenu des problèmes de rétention d'eau notamment au niveau des assemblages. En ce qui concerne la méthode capacitive, la faisabilité sur les échantillons de bois massif a été validée. Toutefois, il n'y a pas d'application à l'échelle « ouvrage », et la faisabilité du suivi dans des lamelles de bois LC reste encore à investiguer.

Au regard de ces informations, mais aussi dans l'optique du développement d'un système de suivi de l'humidité au niveau des lamelles du bois LC, il paraît intéressant d'utiliser ces technologies de capteurs de la manière suivante :

- Concernant la méthode résistive, il s'agit d'étudier des capteurs de type « pointe » (cf. Figure 69). Qui plus est, il ressort qu'il serait particulièrement intéressant d'utiliser deux types d'instrumentation (utilisation des vis et utilisation de colle conductrice avec câbles électriques) afin de garantir un bon contact électrique bois/électrodes face aux variations dimensionnelles occasionnées par les cycles d'humidification/séchage.
- En ce qui concerne la méthode capacitive, il s'agit d'étudier des capteurs de type « surfacique » (Figure 77), qui sont couramment utilisés pour la caractérisation des propriétés diélectriques et la mesure de l'humidité du bois à l'échelle du laboratoire.

Dans le paragraphe suivant, un bilan sur le suivi par les méthodes ultrasonores est présenté.

1.4.3. Suivi via l'utilisation des méthodes ultrasonores

Les méthodes ultrasonores sont utilisées pour la caractérisation du matériau et la détection des défauts/endommagements/dégradations dans les structures composites ainsi que dans les structures du génie civil en béton et en bois (Fu 2005; Balageas et al. 2006; Breysse 2012).

Certaines études ont mis en évidence le potentiel de la méthode par ultrasons pour la mesure de l'humidité du bois (Goncalves et al. 2008; Montero et al. 2015; Yang et al. 2015). En revanche, les capteurs piézoélectriques conventionnels utilisés pour générer/recevoir des ondes ultrasonores dans le bois ne sont pas adaptés pour une intégration au niveau des lamelles des poutres LC car leurs dimensions sont trop importantes. L'épaisseur des capteurs (ex 22,4 mm pour les capteurs du Group Mistras) est quasiment du même ordre de grandeur que l'épaisseur d'une lamelle (33-45 mm), et ce, pour une fréquence de fonctionnement de l'ordre du mégahertz. Compte-tenu de l'atténuation importante du bois (qui augmente avec la fréquence comme pour tous les matériaux), seules des ondes de fréquence inférieure au mégahertz se propagent sur des distances suffisantes pour assurer l'exploitation des signaux (Bucur 2006). Cependant, la conception classique des capteurs piézoélectriques monolithiques utilisés en CND est basée sur un disque de céramique piézoélectrique, ou piézocomposite, dont la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à l'épaisseur (Cheeke 2012). De ce fait, ce type de capteur n'est pas adapté à la configuration du bois LC car l'épaisseur est trop importante, jusqu'à 50 mm pour des capteurs fonctionnant autour d'une fréquence centrale de 100 kHz (Raichel 2006).

Malgré cela, l'application de cette technique dans les structures LC est tout à fait possible car il existe certains capteurs piézoélectriques qui pourraient être intégrés au niveau des lamelles du LC. Ce sont notamment les technologies de capteurs utilisés dans le SHM des matériaux composites.

On peut distinguer notamment trois grandes familles de capteurs : les PVDF (Polyvinylidène fluorure) qui sont des films piézoélectriques de nature polymère (Figure 82) ; les AFC (en anglais : Active Fiber Composite, cf. Figure 83) et les MFC (en anglais : Macro-fiber Composite, cf. Figure 84) qui sont des capteurs sous forme de « composites » avec des fibres piézoélectriques intégrées dans une matrice d'époxy (Safari et al. 2008; Cai et al. 2012).



Figure 82: Capteur PVDF (Source: www.te.com)



Figure 83: Capteur AFC (Priya et al. 2008)



Figure 84: Capteur MFC (Source: www.smart-material.com)

Nous allons donc présenter quelques généralités, et quelques exemples d'applications de ces trois types de capteurs dans les trois sous-paragraphe ci-dessous.

- **PVDF**

Les propriétés piézoélectriques du PVDF (Polyvinylidène fluoride) ont été mises en évidence par Kawai en 1969, et ont donné lieu à de nombreuses applications. Les capteurs PVDF sont basés sur un film très mince de nature polymère. Chaque face du film est recouverte d'électrodes sérigraphiées à l'encre d'argent, qui sont isolées par un revêtement mince d'uréthane sur la zone active.

Le PVDF peut être intégré dans les structures composites dans le cadre du SHM grâce à sa faible épaisseur (<0,2 mm) et sa flexibilité (De Rosa et al. 2010; Guzman et al. 2013). Selon la littérature, le rendement piézoélectrique du PVDF est plus faible que les capteurs piézoélectriques conventionnels (Di Scalea et al. 2007). Le PVDF est donc plutôt utilisé comme capteur passif pour mesurer les réponses dynamiques des structures (Gu et al. 2005 ; Rao et al. 2006). A titre d'exemple, le PVDF peut être utilisé comme jauge de déformation dans les câbles des ponts haubanés (Liao et al. 2001), et comme capteur d'EA pour la détection et la localisation des endommagements ainsi que l'identification des mécanismes de ces derniers (De Rosa et al. 2010 ; Caneva et al. 2006, 2008). Les PVDF n'ont généralement pas de caractéristiques de résonance (Or et al. 2000) et ils fonctionnent mieux dans la gamme des hautes fréquences (500 kHz – 4 MHz) (Di Scalea et al. 2007).

Bien que le capteur PVDF présente des avantages comme sa faible épaisseur, sa flexibilité et son faible coût, son principal inconvénient est qu'il n'est pas adapté pour générer des ondes acoustiques. Toutefois, il existe des capteurs à fibres piézoélectriques tels que l'AFC et le MFC (Raghavan et al. 2007) qui n'ont pas ce problème, et qui pourraient donc être particulièrement intéressants dans nos travaux.

- **AFC**

Le capteur AFC (Active Fiber Composite, composite à fibres actives, Figure 83) a été développé par Bent et al. (1997). Sa structure peut se décomposer en trois couches principales comme illustré sur la Figure 85:

- La couche supérieure et la couche inférieure : elles sont composées de motifs d'électrodes interdigitées sur le film de polyimide qui permet la génération des ondes directionnelles (Mañka et al. 2013) ;
- Deux couches structurales en époxy qui rendent les capteurs plus flexibles, moins fragiles que les céramiques piézoélectriques traditionnelles ;

- La couche centrale : elle contient des fibres piézoélectriques de section circulaire intégrées dans une matrice de résine époxy.

La tension électrique est appliquée le long des fibres piézoélectriques par les électrodes interdigitées (Figure 86). De ce fait, l'AFC est plus sensible aux vibrations dans la direction des fibres (Barbezat et al. 2004, 2007).

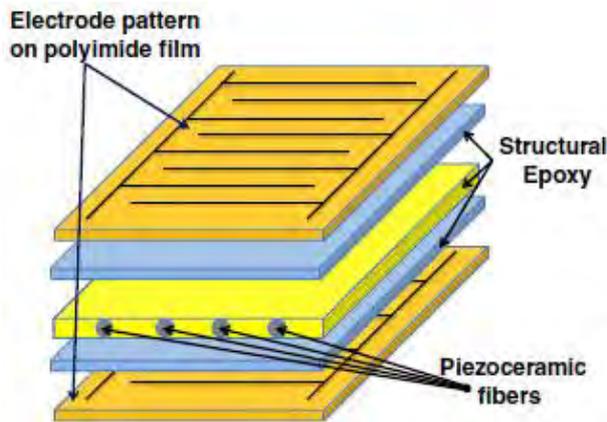


Figure 85: Structure du capteur AFC (Mańka et al. 2013)

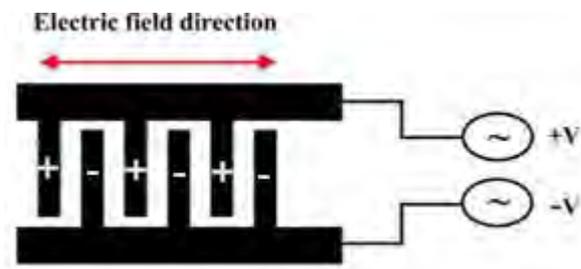


Figure 86: Champs électriques appliqués par les électrodes interdigitées (Ahadian et al. 2012)

Au regard de sa faible épaisseur (environ 0,3 mm) et de sa flexibilité, l'AFC est intégrable dans les structures composites (Melnikowycz et al. 2006) pour le suivi de la santé de ces dernières (Bent et al. 1997). Le capteur AFC peut être utilisé comme récepteur comme dans le cas de la méthode EA (Sundaresan et al. 2001; Barbezat et al. 2004), mais il peut aussi fonctionner comme émetteur comme dans le cas de la méthode AU (Acousto-ultrasons, cf. « 1.3.2 Méthodes ultrasonores ») (Barbezat et al. 2007; Brunner et al. 2004, 2005) et la méthode par ondes guidées (Dürager et al. 2013). Selon Barbezat et al. (2007), la fréquence de résonance des capteurs AFC dépend de la longueur des fibres : pour des longueurs de fibres allant de 6 mm à 31 mm, les fréquences de résonance vont de 280 kHz à 50 kHz. Par ailleurs, l'AFC peut aussi être utilisé pour la récupération de l'énergie des vibrations ambiantes (Priya 2007), ce qui est intéressant dans le cadre du développement des systèmes auto-alimentés pour le suivi d'ouvrages.

Le capteur AFC présente des avantages comme sa faible épaisseur, sa flexibilité et sa polyvalence (émetteur-récepteur). Néanmoins, il n'est pas facilement disponible commercialement. En effet, les capteurs AFC utilisés dans les études citées ci-dessus ont été fabriqués en laboratoire. Dans la pratique, on voit plutôt l'utilisation de capteurs de type MFC, qui sont relativement plus faciles à fabriquer et donc davantage commercialisés (Williams et al. 2002).

- **MFC**

Le capteur MFC (Macro-fiber Composite, composite à macro-fibres, Figure 84) a été développé par la NASA en 2002 (Wilkie et al. 2002). Sa structure ressemble à celle de l'AFC mis à part que les fibres piézoélectriques sont de section rectangulaire (Figure 87). Contrairement au capteur AFC, le capteur MFC est disponible commercialement, et est plus économique. Ceci peut s'expliquer par le processus de fabrication des fibres piézoélectriques : les fibres du capteur MFC sont usinées à partir de films piézoélectriques en céramique à bas coût, alors que les fibres des AFC sont obtenues à partir d'un moulage par injection (Sodano 2003).

On peut distinguer deux types de MFC qui fonctionnent suivant deux modes de vibration différents: le type d33 (Figure 88 a) et le type d31 (Figure 88 b). Le type d33 est plus sensible pour le mouvement dans le plan, alors que le type d31 est plus sensible pour le mouvement hors du plan (Figure 88) (Cho et al. 2007). On les appelle d33 et d31 car ils utilisent respectivement les coefficients piézoélectriques longitudinal (d33) et transversal (d31), ce qui signifie que la direction de déformation est respectivement parallèle (d33) ou perpendiculaire (d31) à la direction du champ électrique (Kholkin et al. 2008). Les flèches dans la Figure 89 présentent la direction des champs électriques appliqués.

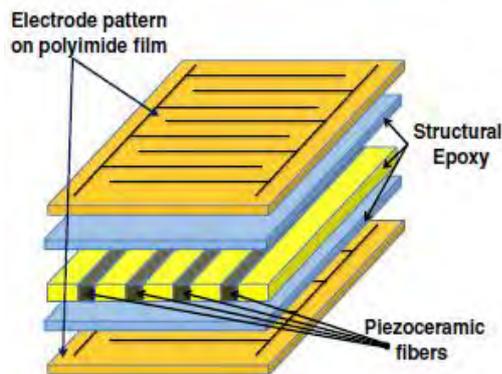


Figure 87: Structure du capteur MFC (Mańka et al. 2013)

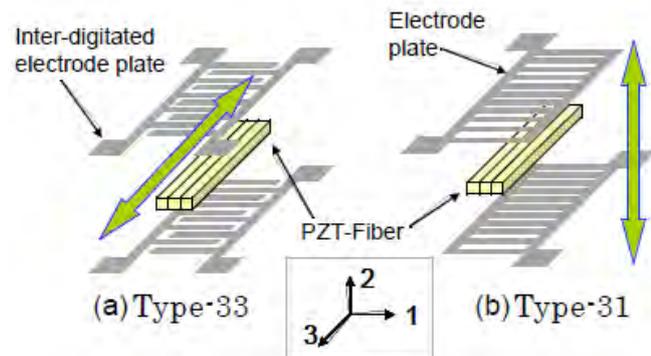


Figure 88: Schématisation de structures et modes de fonctionnement pour les MFC de a) Type d33 et b) Type d31 (Cho et al. 2007)

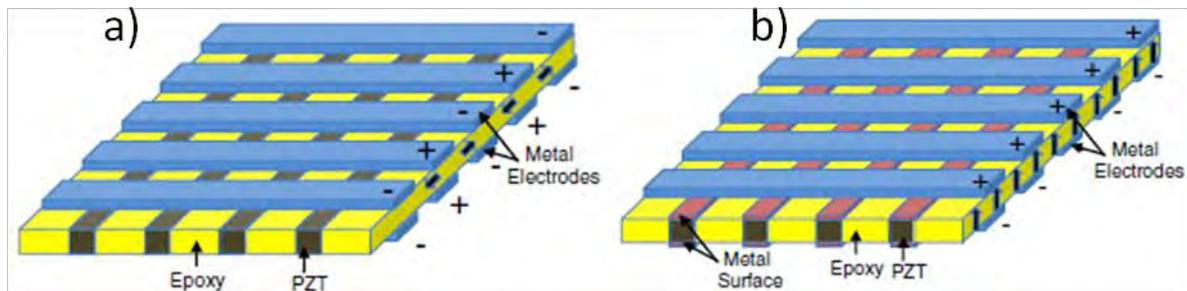


Figure 89: Exemples de deux types de MFC différents: a) effet d33 ; b) effet d31 (Mańka et al. 2013)

Du fait de sa faible épaisseur (environ 0,3 mm) et de sa flexibilité, le capteur MFC présente une bonne intégrabilité dans les structures composites (Tarazaga et al. 2007). Ainsi, plusieurs études ont montré la faisabilité d'utiliser ces capteurs dans le cadre du SHM de différentes structures, on peut citer par exemple :

- La détection/localisation d'endommagements dans le composite (Okabe et al. 2009 ; Matt et al. 2007) ;
- La détection/localisation d'endommagements et de corrosion pour les pipelines (Thien et al. 2007; Cho et al. 2007) ;
- Le contrôle de la qualité de collage dans la voilure de drone (Di Scalea et al. 2007).

Qui plus est, ils peuvent être utilisés à la fois pour l'émission et la réception des ondes acoustiques telles que les ondes guidées (Di Scalea et al. 2007; Cho et al. 2007; Salas et al. 2009), ou les ondes de Lamb (Mańka et al. 2013). De plus, les MFC ne montrent pas de fréquence de résonance typique. Ils peuvent fonctionner comme capteur jusqu'à 3 MHz (source : www.smart-material.com). Par ailleurs, les MFC peuvent également être utilisés

pour la récupération de l'énergie provenant des vibrations ambiantes (Priya 2007; Priya et al. 2008), ce qui est intéressant dans le cadre du développement des systèmes auto-alimentés pour le suivi d'ouvrages.

Le capteur MFC présente des avantages comme sa faible épaisseur, sa flexibilité et sa polyvalence (émetteur-récepteur). Qui plus est, il est disponible commercialement. Néanmoins, ses caractéristiques techniques ne sont pas forcément bien connues. Par conséquent, si on veut l'utiliser pour effectuer des mesures ultrasonores dans le bois, il reste encore des travaux à réaliser pour connaître son comportement.

- ***Bilan***

Cette rapide présentation des différents types de capteurs ultrasonores intégrables en structures souligne la difficulté d'utilisation de ces derniers pour des applications de type bois LC. En effet, les seuls travaux menés dans la littérature aujourd'hui concernent uniquement des applications liées aux matériaux composites. De plus, les courbes de sensibilité de ces capteurs ne sont pas disponibles à ce jour. De ce fait, pour pouvoir utiliser ces capteurs pour le suivi de l'humidité dans le bois LC, il faudra commencer par effectuer des essais préliminaires pour connaître leur comportement dans le matériau bois.

1.4.4. Conclusion

Cette section a permis d'avoir un aperçu sur les techniques utilisées pour le suivi de la santé structurale des ouvrages d'art. Le suivi avec des méthodes électriques et ultrasonores a été présenté de manière plus détaillée, car plus spécifiquement adapté à notre problématique sur des ouvrages d'art en bois LC. Au regard des informations disponibles dans la littérature, certaines technologies de capteurs semblent plus pertinentes que d'autres pour réaliser une mesure en continu de l'humidité dans des structures en bois LC. Il s'agit notamment pour les mesures électriques, des capteurs de type « pointe » pour les mesures résistives et des capteurs de type « surfacique » pour les mesures capacitives. En ce qui concerne les mesures ultrasonores, trois familles de capteurs piézoélectriques semblent pouvoir être utilisées dans le bois LC : les PVDF, les AFC et les MFC. Néanmoins, aucune étude n'a encore été réalisée sur ces derniers et de ce fait, de nombreux verrous scientifiques restent à lever pour juger de leur potentiel pour une application dans du bois LC.

1.5. Synthèse

Ce premier chapitre bibliographique a permis de rappeler quelques généralités indispensables sur le matériau bois et son utilisation en construction. On voit plus particulièrement aujourd'hui l'expansion des ouvrages d'art en bois LC en raison de sa bonne résistance mécanique, de son prix, de sa facilité de mise en œuvre et de la possibilité offerte par ce matériau de construire des ouvrages en bois de grandes dimensions. Néanmoins, on constate également de nombreuses pathologies sur ces ouvrages et la majorité d'entre elles sont liées à l'humidité (l'humidité excessive ou les cycles d'humidification/séchage). De ce fait, afin d'améliorer la durabilité (ou la durée de vie) des ouvrages d'art en bois LC, il est donc urgent de développer des outils de diagnostics non destructifs intégrés dans/entre les lamelles des poutres LC pour le suivi en continu de l'humidité. Ceci doit permettre à terme d'établir un lien entre les cycles d'humidité et la durabilité (ou la durée de vie) des structures, ainsi que d'avertir les gestionnaires d'ouvrages des risques d'endommagement au plus tôt afin qu'ils puissent envisager des opérations de maintenance préventive.

Pour ce faire, il faut identifier des méthodes présentant à la fois la capacité de mesurer précisément l'humidité du bois, mais aussi offrant la possibilité d'intégrer des capteurs de mesure au niveau des lamelles du bois LC. Au regard du processus de fabrication des poutres LC, ces capteurs doivent pouvoir supporter une pression de collage de 10 bars et avoir une dimension suffisamment petite pour s'intégrer au niveau de l'épaisseur du joint de colle (environ 0,3 mm). De plus, l'intégration de ces capteurs ne doit pas affecter la résistance du joint collé, et afin de faciliter l'industrialisation, il est préférable qu'ils aient un coût modéré.

Dans cet optique, nous avons effectué des recherches bibliographiques afin d'identifier les méthodes pouvant répondre à ces contraintes. Ainsi, deux types de méthodes se révèlent intéressantes : les méthodes électriques et les méthodes ultrasonores.

Concernant les méthodes électriques, la faisabilité du suivi de l'humidité sur la plage d'environ 10%-30% dans les ouvrages d'art en bois par l'insertion d'électrodes résistives (type « pointe ») a déjà été démontrée. Néanmoins, le système de suivi au niveau des lamelles du bois LC n'est pas encore développé à ce jour. De plus, si on veut effectuer dans le futur des essais permettant d'établir un lien entre la durabilité (ou la durée de vie) des structures LC et les cycles d'humidification/séchage, la gamme de mesure (environ 10%-30%) des dispositifs actuels semble insuffisante, étant donné que l'humidité dans les ouvrages en bois peut atteindre jusqu'à 70% d'humidité, à cause de problèmes de conception (Brischke et al. 2008c ; Pousette et al. 2016).

Pour la méthode capacitive, la faisabilité du suivi de l'humidité avec les électrodes « surfaciques » sur les échantillons de bois massif a été validée. Mais ce sont encore des essais à l'échelle « laboratoire », et aucune étude ne porte sur des mesures d'humidité plus locales, à l'échelle de la lamelle.

Des travaux restent donc encore à réaliser pour investiguer le potentiel de ces techniques (résistives et capacitives) dans le cadre du suivi de l'humidité dans les lamelles des structures LC.

En ce qui concerne les méthodes ultrasonores, il a été montré que la mesure de l'humidité dans le bois est faisable via une mesure de la vitesse de propagation. Néanmoins, ce sont des études réalisées sur des échantillons de bois massif. De plus, les capteurs utilisés conventionnellement sont assez coûteux et ils ne sont pas adaptés pour une intégration au niveau des lamelles du bois LC à cause de leurs grandes dimensions. Il faut donc identifier des capteurs qui permettent de remédier à ce problème.

Selon les informations disponibles dans la littérature, concernant les méthodes électriques, nous pouvons utiliser des capteurs de type « pointe » et « surfacique » pour réaliser respectivement les mesures résistives et capacitives. Pour les capteurs de type « pointe », il est plus particulièrement préférable d'utiliser deux types d'instrumentation (utilisation des vis et utilisation de colle conductrice avec câbles électriques) car ces derniers permettent de garantir un meilleur contact électrique bois/électrodes face aux variations dimensionnelles induites par les cycles d'humidification/séchage. En ce qui concerne les méthodes ultrasonores, trois types de capteurs piézoélectriques semblent intéressants pour une application dans du bois LC : les PVDF, les AFC et les MFC. Néanmoins, la sensibilité de ces capteurs à différentes fréquences n'est pas forcément bien connue. Qui plus est, aucune étude n'a été réalisée sur le bois. De fait, de nombreux verrous scientifiques restent encore à lever pour vérifier la faisabilité des mesures ultrasonores dans du bois LC.

Ainsi, de manière à lever ces différents verrous et répondre à notre problématique, nous avons organisé ces travaux de recherche de la manière suivante :

- 1) Vérification de la faisabilité des mesures (électriques/ultrasonores) dans le bois avec ces capteurs ;
- 2) Vérification de l'adaptabilité de ces capteurs au processus de fabrication du bois LC ;
- 3) Etude de la faisabilité du suivi de l'humidité avec les capteurs intégrés dans des poutres LC.

Dans la suite de ce mémoire, nous allons donc présenter les différentes étapes de développement dans le cadre du suivi de l'humidité avec capteurs intégrés en utilisant les deux méthodes évoquées. Le chapitre 2 présentera les résultats des mesures électriques et le chapitre 3 abordera les résultats des mesures ultrasonores. Dans ces deux chapitres, nous allons tout d'abord présenter des études préliminaires réalisées pour la mise en route des essais du suivi de l'humidité avec capteurs intégrés. Puis, nous allons présenter les protocoles expérimentaux utilisés dans ces travaux. Enfin, les résultats du suivi de l'humidité obtenus via les mesures réalisées avec les capteurs intégrés seront présentés.

A la fin de ce mémoire, des conclusions et des perspectives seront également présentées.

Chapitre 2. Suivi de l'humidité par mesures électriques

Ce chapitre présente les différentes étapes de développement réalisées dans le cadre du suivi de l'humidité via des capteurs intégrés par mesures électriques. Dans un premier temps, nous allons présenter les études préliminaires réalisées, qui ont pour but : 1) d'identifier les configurations de mesure ; 2) de vérifier la faisabilité des mesures électriques dans le bois avec les configurations choisies ; 3) de fixer les réglages des appareils de mesure pour les essais de suivi de l'humidité avec capteurs intégrés.

Suite à la présentation de ces études préliminaires, nous allons présenter les protocoles expérimentaux mis en place pour le suivi de l'humidité dans les échantillons LC. Ces protocoles concernent la fabrication des échantillons LC, la mise en humidification des échantillons et le traitement des données de mesures pour les essais du suivi de l'humidité.

Enfin, nous allons aborder les résultats du suivi de l'humidité obtenus via les mesures réalisées avec les capteurs intégrés.

2.1. Etudes préliminaires relatives aux mesures électriques

Cette section présente des études préliminaires réalisées pour les mesures électriques. En premier lieu, nous allons présenter les configurations de mesure identifiées suite aux informations issues de la littérature. Ensuite, nous parlerons des essais réalisés pour vérifier le bon fonctionnement des configurations identifiées. Enfin, les tests effectués pour calibrer les appareils de mesure seront présentés.

2.1.1. Identifications des configurations de mesures

Grâce à la recherche bibliographique du chapitre 1, nous avons pu identifier les technologies de capteurs utilisables dans le cadre du suivi de l'humidité dans les poutres LC par mesures électriques. Il s'agit des électrodes de type « pointe » et des électrodes de type « surfacique ». A partir de ces deux types d'électrodes, nous avons ensuite proposé 4 configurations de mesure comme présenté sur la Figure 90. Dans un premier temps, nous avons proposé 3 configurations (1, 2 et 3) de mesure pour effectuer les mesures résistives. Les configurations 1 (Figure 90 a) et 3 (Figure 90 c) ont été proposées car selon la littérature (Brischke et al. 2008a; Fredriksson et al. 2013), l'utilisation de vis et de colle conductrice garantit un meilleur contact électrique entre l'échantillon et les électrodes face aux variations dimensionnelles du bois. La configuration 2 (Figure 90 b) a quant à elle été proposée pour être une configuration intermédiaire entre les configurations 1 et 3 : elle a des trous percés par rapport à la configuration 1 et un type d'électrode différent par rapport à la configuration 3. Nous avons également choisi de travailler avec une quatrième configuration (Figure 90 d et e) car elle est relativement simple à réaliser sur la chaîne de fabrication du bois LC, vu qu'elle ne nécessite pas d'usinage supplémentaire. Qui plus est, elle permet de réaliser à la fois les mesures capacitives et résistives (Stamm 1927).

Par la suite, pour continuer à préparer les échantillons, nous avons déterminé l'essence et la géométrie utilisées. Nous avons décidé de préparer nos échantillons avec le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), pour les raisons évoqués précédemment dans le chapitre bibliographique (cf. « 1.2.2 Le bois lamellé-collé ») : cette essence est largement utilisée en construction grâce à sa bonne résistance mécanique, sa durabilité naturelle suffisante pour l'utilisation en classe d'emploi 3 (humidité fréquemment supérieure à 20%) et sa disponibilité (AFNOR 1996; Barbier et al. 2006 ; SETRA 2006).

L'épaisseur de lamelle a été fixée à 33 mm car cette dernière est recommandée pour les structures en bois LC de longues portées grâce à sa bonne maîtrise des retraits et des gonflements des structures en bois (SETRA 2006). Concernant la largeur de lamelle, nous avons choisi la dimension la plus petite (90 mm) dans l'industrie du bois LC, afin de faciliter la prise d'humidité pour les essais au laboratoire. De plus, c'est également sur cette largeur que l'intégration des capteurs aura le plus d'influence sur la résistance mécanique du joint collé.

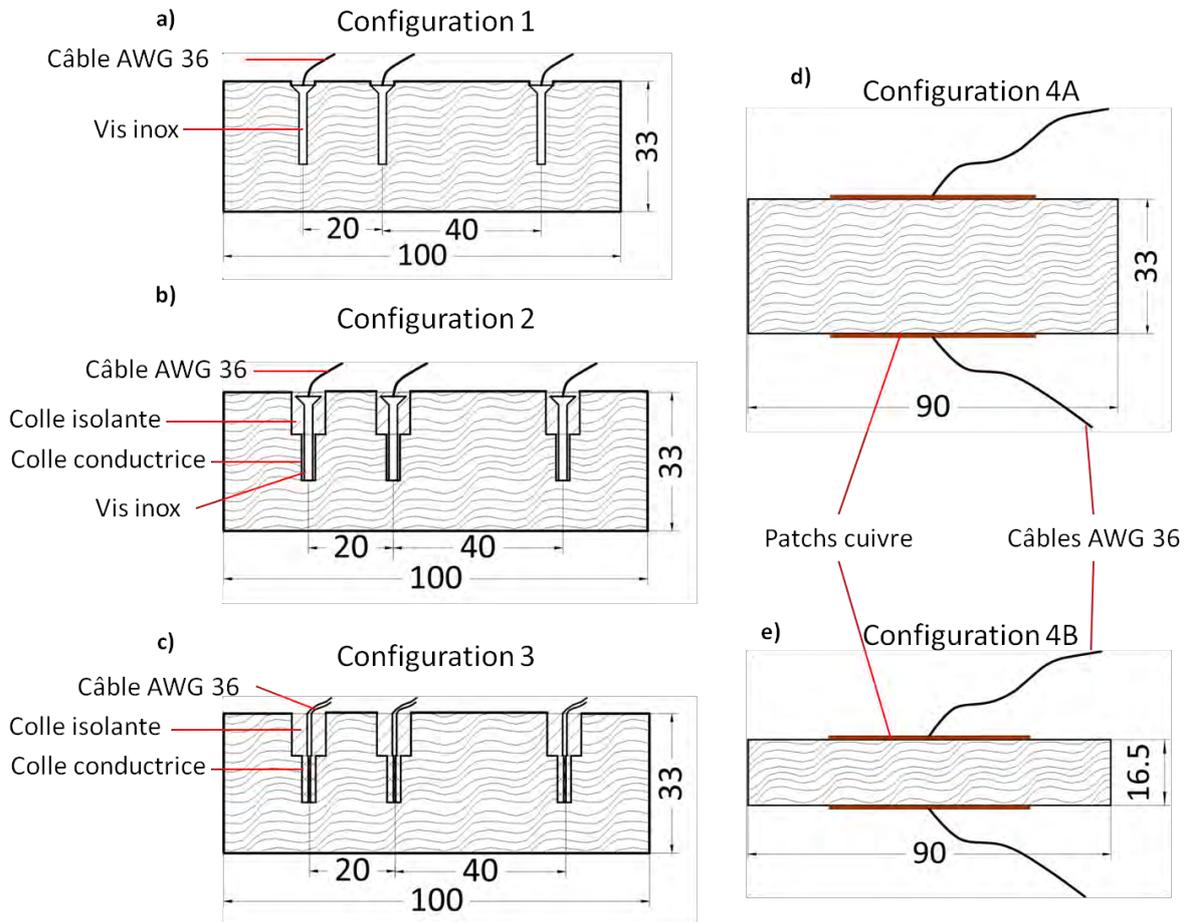


Figure 90: Configurations des mesures électriques : a) Configuration 1 ; b) Configuration 2 ; c) Configuration 3 ; d) Configuration 4A ; e) Configuration 4B

Afin d'investiguer l'influence de la pression de collage sur la performance des électrodes, nous avons proposé de fabriquer à la fois les échantillons simples (avec du bois massif) et des échantillons LC. Qui plus est, afin de vérifier l'influence de la distance entre les électrodes sur la mesure d'humidité, les échantillons ont été préparés de manière à avoir deux espacements d'électrodes différents. Concernant les configurations 1, 2 et 3, deux espacements (20 mm et 40 mm) ont été réalisés sur les mêmes échantillons (Figure 90 a, b et c). En ce qui concerne la configuration 4, les deux espacements ont été réalisés par la préparation d'échantillons de différentes épaisseurs (33 mm (Figure 90d) et 16,5 mm (Figure 90e)). Afin de distinguer les deux types d'échantillons, nous avons nommé les échantillons avec l'espacement de 33 mm configuration 4A (Figure 90 d) et ceux avec l'espacement de 16,5 mm configuration 4B (Figure 90 e).

Les détails concernant la préparation de ces configurations sont décrits ci-dessous.

La configuration 1 utilise des vis inox ($\text{Ø}3*20$ mm) comme électrodes de mesure. Les vis ont été vissées dans l'échantillon à l'aide d'une visseuse sur des trous pré-perçés à l'aide d'une machine à commande numérique. Ces trous ont un diamètre de 1,7 mm et ils ont été percés afin d'avoir un bon guidage de la vis et une parfaite perpendicularité avec la surface de l'échantillon. Les câbles (Jauge AWG : 36) avec la gaine polyuréthane ont été collés sur les têtes des vis à l'aide d'une colle conductrice (colle d'époxy chargée de poudre d'argent, référence : EPO-TEK E4110). Le type de vis utilisé a été choisi parmi les éléments standards disponibles sur le marché de manière à avoir une longueur proche de la moitié de l'épaisseur de lamelle (soit 16,5 mm). Ce diamètre permet d'obtenir un bon compromis pour le processus de vissage car si le diamètre est très petit, le contact entre le bois et la vis peut ne pas être de bonne qualité ; et si le diamètre est trop grand, il y aura plus de risque d'avoir des amorces de fissures. Concernant les câbles utilisés, nous avons pris un modèle dont le diamètre (0,19 mm) est inférieur à l'épaisseur du joint de colle (0,3 mm). Comme cela, nous n'avons pas besoin d'usiner un emplacement pour faire sortir les câbles des échantillons LC.

La configuration 2 utilise aussi des vis inox comme électrodes mais ces vis ont été placées dans des trous à étages pré-perçés sur machine à commande numérique de manière à obtenir quelque chose d'homogène et de reproductible sur les différents échantillons. Par la suite, les câbles gainés (Jauge AWG : 36) ont été collés sur les têtes des vis à l'aide de la colle conductrice. Enfin, l'espace restant dans les trous inférieurs ($\text{Ø}3,2*11$ mm) a été rempli avec de la colle conductrice (0,1 mL) (EPO-TEK E4110) afin d'assurer la conduction électrique. La dose de colle a été assurée par l'utilisation de seringues afin d'avoir des montages reproductibles. Par ailleurs, l'espace dans les trous supérieurs ($\text{Ø}8*10$ mm) a été rempli par une colle polyuréthane utilisée pour le collage du bois LC (KLEIBERIT PUR 510 FiberBond) afin de créer une isolation électrique.

La configuration 3 utilise directement les câbles AWG 36 comme électrodes de mesure. Les câbles ont été dénudés de 11 mm au bout. Ils ont été ensuite pliés et placés dans les trous ayant la même dimension que la configuration 2. L'espace restant dans les trous inférieurs a été rempli avec la colle conductrice (0,2 mL), et l'espace dans les trous supérieurs a été rempli par la colle polyuréthane isolante.

La configuration 4 utilise des patches de cuivre comme électrodes (3M 1181 Tape, $\text{Ø}50$ mm, épaisseur totale: 0,065 mm). Les patches ont été collés sur le centre de l'échantillon à l'aide de leurs propres couches adhésives (qui sont également conductrices). Ensuite, les câbles gainés ont été collés sur le centre du patch à l'aide de la colle conductrice. La position centrale a été choisie afin d'avoir une distribution de courant électrique plus uniforme dans l'échantillon (Ashby 2012).

De plus, il est à préciser que nous avons effectué des essais préliminaires pour déterminer la taille des patches. Pour ce faire, nous avons fabriqué des échantillons simples de 33 mm d'épaisseur (C4AS) avec des diamètres de patch différents (20 mm, 30 mm, 40 mm et 50 mm). Les résultats (Figure 91) montrent que les patches les plus grands ($\text{Ø}40$ mm et $\text{Ø}50$ mm) permettent de mieux différencier les humidités. Nous avons donc décidé de prendre le diamètre de 50 mm pour que toutes les grandeurs physiques soient mesurables par les dispositifs de mesure. En effet, pour les humidités faibles, la capacité (quelques pF) et la résistance électrique (>10 G Ω) sont difficiles à mesurer car dans les limites de nos appareils de mesure. Par conséquent, le fait de prendre un diamètre plus grand, permet d'avoir une résistance plus petite (cf. Equation 4) et une capacité plus grande (cf. Equation 5).

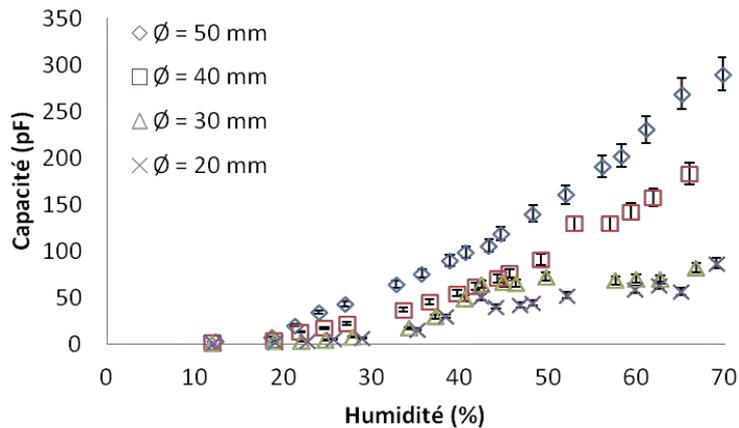


Figure 91: Influence de la taille des patches sur les mesures de capacité en fonction de l'humidité

Par la suite, afin de finaliser la préparation des échantillons, la colle polyuréthane a été appliquée sur et autour de la tête de vis (configurations 1 et 2) pour assurer l'isolation électrique. Pour la même raison, une fine couche de colle polyuréthane a été appliquée sur les patches de la configuration 4. Ceci a aussi pour objectif d'éviter le décollage des patches au moment de la prise d'humidité. Le protocole de préparation des échantillons LC est décrit plus en détails dans le paragraphe « 2.2.1 Collage des échantillons lamellé-collés » de ce chapitre.

Le coût de réalisation de chaque configuration (prix d'achat de matériel, hors coût du dispositif de mesure) est présenté dans la Table 9 et les détails de calcul sont présentés en « Annexe 2 ».

Les caractéristiques et les détails de mesure des échantillons sont résumés dans la Table 10.

Table 9: Coût de chaque configuration de mesure (prix d'achat de matériel, hors coût du dispositif de mesure)

Configuration	C1	C2	C3	C4
Coût (€)	1,14	5,52	8,82	0,86

Table 10: Caractéristiques et détails de mesure des différents échantillons pour les mesures électriques

Configurations	Désignation ^a	Dimensions (mm)			Types d'électrodes	Espacement des électrodes	Directions de mesure ^b	Grandeurs physiques mesurées
		L	R	T				
1	C1S	100	33	90	Vis inox	20 mm; 40 mm	L	Résistance électrique
	C1GL	100	66	90	Vis inox	20 mm; 40 mm	L	Résistance électrique
2	C2S	100	33	90	Vis inox	20 mm; 40 mm	L	Résistance électrique
	C2GL	100	66	90	Vis inox	20 mm; 40 mm	L	Résistance électrique
3	C3S	100	33	90	Câbles AWG 36	20 mm; 40 mm	L	Résistance électrique
	C3GL	100	66	90	Câbles AWG 36	20 mm; 40 mm	L	Résistance électrique
4A	C4AS	90	33	90	Patchs de cuivre	33 mm	T	Résistance électrique et capacité
	C4AGL	90	66	90	Patchs de cuivre	33 mm	T	Résistance électrique et capacité
4B	C4BS	90	16,5	90	Patchs de cuivre	16,5 mm	T	Résistance électrique et capacité
	C4BGL	90	49,5	90	Patchs de cuivre	16,5 mm	T	Résistance électrique et capacité

^a Les échantillons simples et LC sont respectivement désignés par les lettres « S » et « GL » à la fin de la désignation. « S » signifie « Echantillon Simple » et il vient de l'appellation anglaise du bois massif (solid wood). « GL » signifie « Echantillon LC » et il vient de l'appellation anglaise du bois LC (glulam).

^b Les lettres L, R et T indiquent les trois directions d'orthotropie du bois (Longitudinal, Radial et Tangentiel).

2.1.2. Faisabilité des mesures électriques dans le bois

Suite à l'identification des configurations de mesure, la mise en place de ces dernières a été réalisée tout d'abord sur 5 échantillons simples pour vérifier la faisabilité des mesures électriques dans le bois. Pour les mesures résistives, nous avons utilisé un Giga-Ohmmètre développé au laboratoire, dont le schéma de développement est présenté en « Annexe 3 ». Concernant les mesures capacitives, un RLC mètre a été utilisé (GW INSTRON LCR-816). La fréquence utilisée dans notre étude est de 2 kHz. Les résultats du test permettant le choix de fréquence seront présentés dans le paragraphe « 2.1.3 Configuration des appareils de mesure » de cette section.

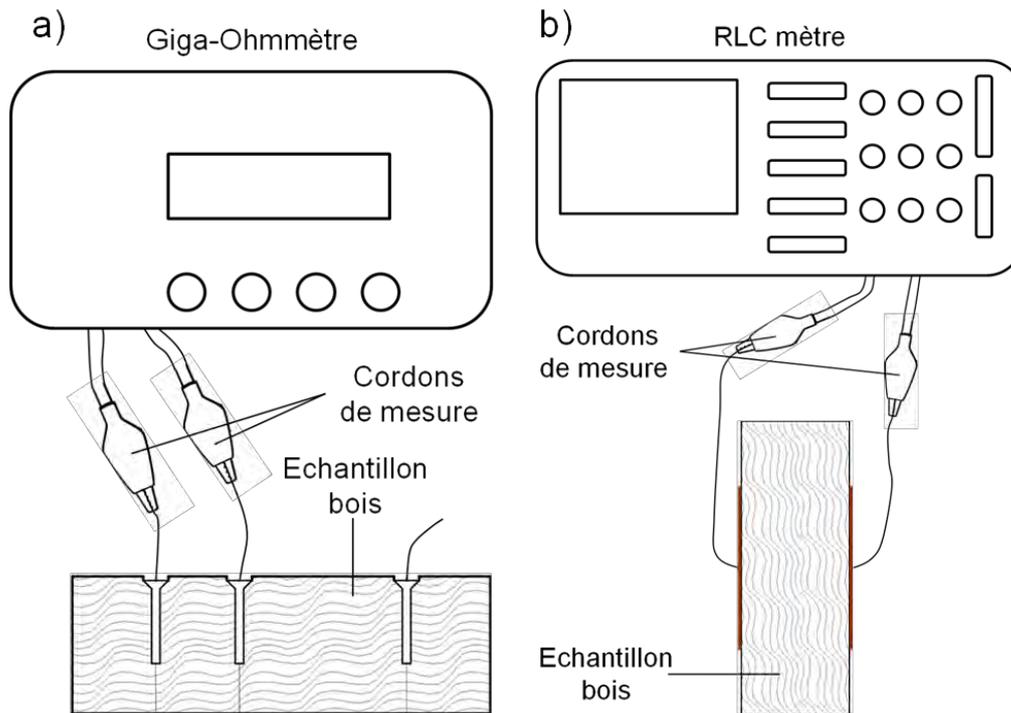


Figure 92: Appareils de mesure pour a) mesures résistives (Giga-Ohmmètre) et b) mesures capacitives (RLC mètre)

Les résultats à l'état initial (environ 10% d'humidité) sur ces échantillons montrent que l'on est capable d'effectuer les mesures électriques dans le bois (Figure 93). Concernant les mesures résistives, on a trouvé des valeurs de résistance électrique de l'ordre de $10^9 \Omega$ pour les configurations 1, 2 et 3 ($1,04-1,72 \times 10^9$), et des valeurs de l'ordre de $10^{10} \Omega$ pour la configuration 4 ($1,07 \times 10^{10}$). Ces valeurs sont dans les mêmes ordres de grandeur que les informations disponibles dans la littérature (James 1963). Les différences peuvent être attribuées aux différentes configurations d'électrodes (forme, longueur, espacement etc.) (Skaar 1988). Concernant les mesures capacitives, les valeurs de capacité trouvées sont aussi dans le même ordre de grandeur que les informations disponibles dans la littérature (James 1977). Dans notre étude, la moyenne de capacité obtenue sur les échantillons de 33 mm d'épaisseur est de 2,3 pF alors que l'on a obtenu 5,0 pF par extrapolation (à la même humidité et épaisseur) des résultats de James (1977) obtenus à 1kHz. Cette différence peut être expliquée par les différentes fréquences utilisées vu que l'on a réalisé les mesures à 2 kHz.

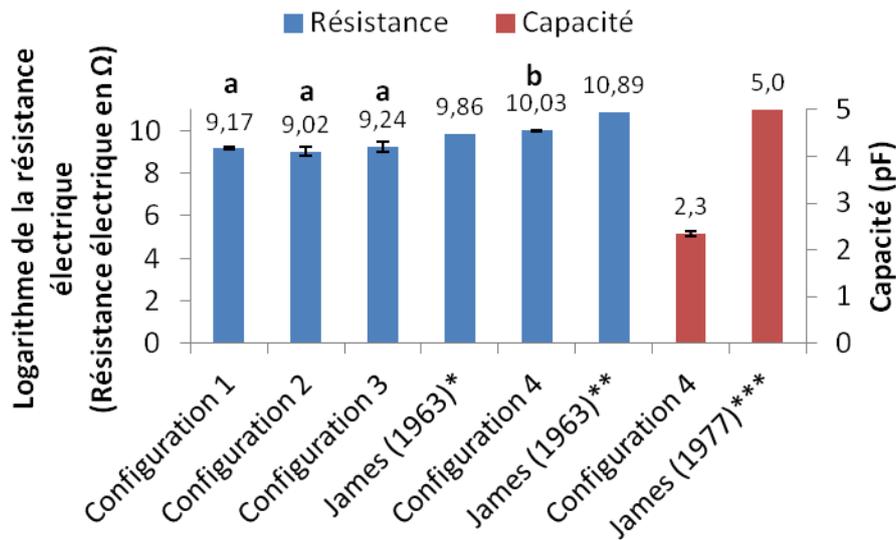


Figure 93: Résistance électrique et capacité des échantillons simples à l'état initial (10% d'humidité) (Configurations 1, 2 et 3 : espacement d'électrodes = 40 mm ; Configuration 4 : espacement d'électrodes = 33 mm) (*Résistance pour électrode de type « pointe » (espacement d'électrodes = 32 mm); **Résistance pour les électrodes de type « surfacique »;*Capacité à 1 kHz)**

De plus, nous avons également réalisé une comparaison entre les différentes configurations sur les résultats des mesures résistives. Il ressort que la résistance mesurée sur la configuration 4 est significativement plus grande que celle des autres configurations. Afin de mettre en évidence cela, nous avons effectué le test de LSD (Least Significant Difference) de Fisher au niveau de confiance à 95% (Muth 2014) à l'aide du logiciel Minitab 17. Ce test a pour but de déterminer s'il existe des différences significatives entre deux ou plusieurs groupes de données. D'après les résultats de ce test, il n'y a pas de différence significative parmi les configurations 1, 2 et 3 car elles sont toutes classées dans le même groupe « a » alors que pour la configuration 4, elle présente une différence significative par rapport aux autres configurations car elle est classée dans un autre groupe « b » (Figure 93).

Cette différence peut s'expliquer par trois phénomènes. Premièrement, l'espacement des électrodes n'est pas identique pour les trois premières configurations (1, 2 et 3) et la configuration 4 (cf. Figure 90). Deuxièmement, les mesures résistives des configurations 1, 2 et 3 ont été réalisées dans la direction longitudinale du bois alors que celles de la configuration 4 ont été faites dans la direction tangentielle (Figure 94). Selon la littérature, la direction longitudinale présente une résistivité plus faible que les deux autres directions (Skaar 1988). Notre observation est donc tout à fait cohérente avec la théorie.

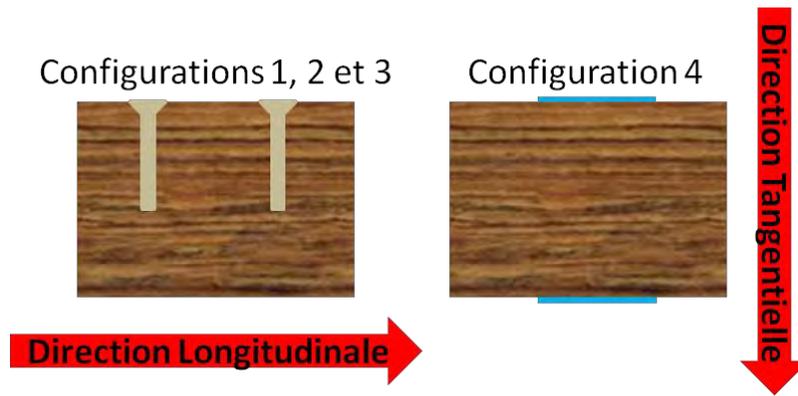


Figure 94: Schématisation des directions de mesure des mesures électriques

Troisièmement, étant donnée que la surface de contact dans la configuration 4 est plus grande que dans les autres configurations, la résistance mesurée peut éventuellement être affectée par la rugosité de surface (Figure 95a) (Holm 1967). En effet, la surface de contact effective (qui conduit réellement le courant électrique) est plus petite que le cas idéal où l'électrode et l'échantillon sont 100% en contact (Figure 95b) (Zhai et al. 2016). Par conséquent, on mesure une résistance plus grande que la valeur réelle (cf. Equation 4), ce qui peut expliquer notre observation.

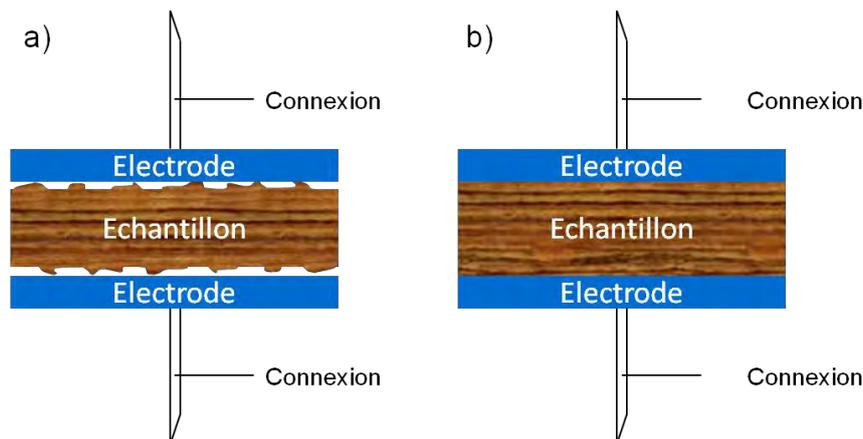


Figure 95: Contact électrique sur : a) une surface rugueuse ; b) une surface idéale

Par la suite, 5 échantillons LC ont également été réalisés et leurs résultats ont été comparés avec ceux obtenus avec les 5 échantillons simples (Figure 96). Nous pouvons remarquer que pour la configuration 4, la résistance et la capacité sur les échantillons LC sont respectivement plus petites et plus grandes par rapport aux échantillons simples. Cette observation est probablement due à l'application de la pression de collage, qui a pour conséquence d'améliorer le contact électrique entre les électrodes et le bois. Effectivement, grâce à l'application de la pression, la surface de contact effective augmente, et selon les équations théoriques, il est assez logique de voir diminuer la résistance (Equation 4), et augmenter la capacité (Equation 5).

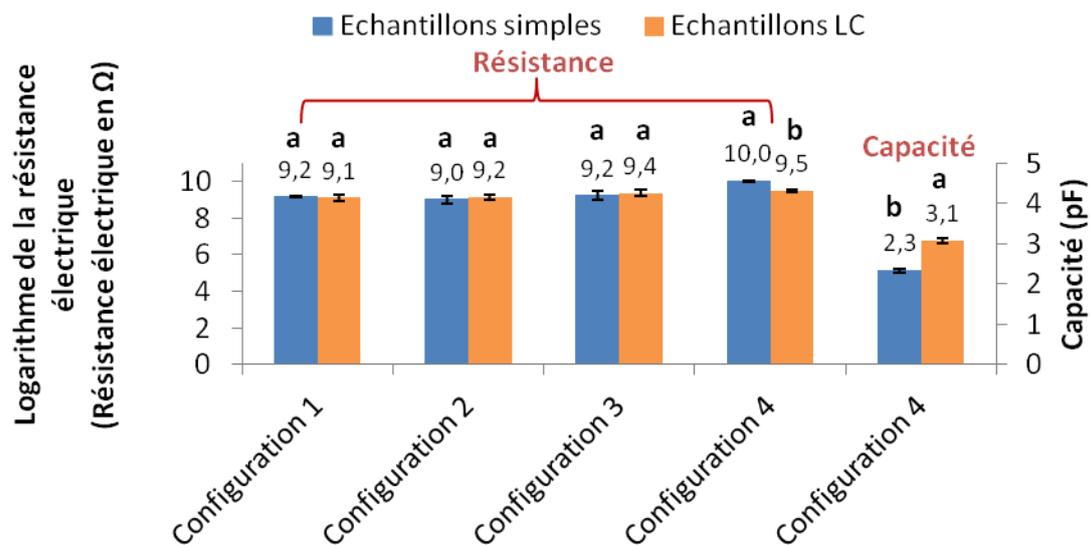


Figure 96: Comparaison de la résistance électrique et de la capacité entre les échantillons simples et les échantillons LC à l'état initial (10% d'humidité) (Configurations 1, 2 et 3 : espacement d'électrodes = 40 mm ; Configuration 4 : espacement d'électrodes = 33 mm)

De plus, concernant les configurations 1, 2 et 3, les électrodes sont logées au fond des trous et leurs têtes ne dépassent pas. En conséquence, la pression de collage n'a pas été appliquée directement sur les électrodes de mesure, la condition de contact électrique n'a donc pas été modifiée par la pression. De ce fait, les résultats des deux types d'échantillons (simples et LC) sont du même ordre de grandeur contrairement à la configuration 4 (Figure 96).

2.1.3. Configuration des appareils de mesure

Rappelons que, nous avons utilisé un Giga-Ohmmètre pour les mesures résistives et un RLC mètre pour les mesures capacitives.

Pour le Giga-Ohmmètre, le calibrage est automatique, i.e. que le dispositif utilise des ponts de mesure différents pour les différentes plages de résistances (cf. Annexe 3). Il n'y a donc pas de tests de calibration à faire.

Concernant le RLC mètre, il faut fixer une fréquence de mesure car sa gamme de fréquences s'étend de 0,1 kHz à 2 kHz. Plusieurs études ont déjà confirmé la variation de la constante diélectrique (CD) (qui est proportionnelle à la capacité, cf. Equation 5) en fonction de l'humidité à différentes fréquences allant de 0,1 kHz jusqu'à l'échelle de GHz (James 1977; Torgovnikov 1993; Kabir et al. 1997, 1998). James (1986) a réalisé les mesures de la CD à 4 fréquences différentes (0,2 kHz, 1kHz, 10 kHz, 100 kHz) et il en a conclu que la sensibilité pour le suivi de la variation d'humidité augmente avec l'augmentation de la fréquence utilisée. Par conséquent, nous avons réalisé des essais préliminaires (sur 3 échantillons de type C4AS dont l'épaisseur est celle recommandée pour les ouvrages en LC) à 0,1 kHz et 2 kHz qui sont les deux valeurs extrêmes de notre dispositif de mesure afin de mettre en évidence la meilleure fréquence dans notre cas. Selon nos résultats (Figure 97), 2 kHz permet de mieux différencier les humidités, ce qui est en accord avec la conclusion de James (1986). En conséquence, la fréquence utilisée dans notre étude a été fixée à 2 kHz.

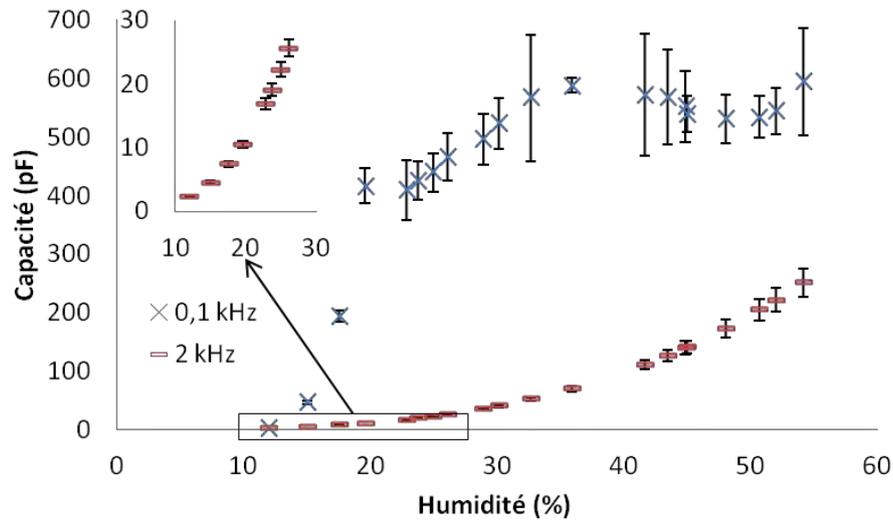


Figure 97: Capacité en fonction de l'humidité à 0,1 kHz et à 2 kHz pour 3 échantillons de type C4AS

2.1.4. Conclusion

Grâce à ces études préliminaires relatives aux mesures électriques, la bonne fonctionnalité des 4 configurations de mesure a été confirmée. De plus, le diamètre des patches en cuivre et la fréquence des mesures capacitives à utiliser pour la configuration 4 ont pu être déterminés.

Dans la section suivante, nous parlerons des protocoles expérimentaux utilisés dans ce travail pour le suivi de l'humidité par capteurs intégrés.

2.2. Protocoles expérimentaux

Dans cette section, nous allons présenter les protocoles expérimentaux utilisés pour la fabrication des échantillons LC, la mise en humidification des échantillons et le traitement des données de mesures pour les essais de suivi de l'humidité.

2.2.1. Collage des échantillons lamellé-collés

Tous les échantillons LC ont été préparés à l'aide d'une presse hydraulique (MACLIFT 30t) (Figure 98) en appliquant un effort permettant d'exercer une pression de 10 bars sur la surface de l'éprouvette pendant 24h.

La colle utilisée est une colle polyuréthane (KLEIBERIT PUR 510 FiberBond) généralement utilisée pour la fabrication de poutres LC. Une quantité équivalente à 200g/m² (comme décrit dans la fiche technique, cf. Annexe 4) a été appliquée pour tous les échantillons en fonction de leurs dimensions. La mise en place de la colle a été réalisée à l'aide d'une seringue de manière à avoir 9 lignes de colle réparties de façon homogène comme présenté par la Figure 99.



Figure 98: Presse hydraulique pour le collage des échantillons LC (MACLIFT 30t)

L'objectif est d'être le plus proche possible des conditions industrielles.



Figure 99: Application de la colle polyuréthane pour le collage des échantillons LC

Pour les échantillons LC utilisés (cf. Figure 90 et Table 10), une lamelle de 33 mm d'épaisseur a été collée pour les configurations 1, 2 et 3 sur la face où on a effectué le vissage/perçage (cf. Figure 100). Concernant la configuration 4, deux lamelles extérieures de 16,5 mm d'épaisseur ont été collées sur les deux faces où on a collé les patches en cuivre (cf. Figure 101). Il est à préciser que nous avons préparé 5 échantillons identiques pour tous les types d'échantillons afin de prendre en compte la variabilité du matériau bois.

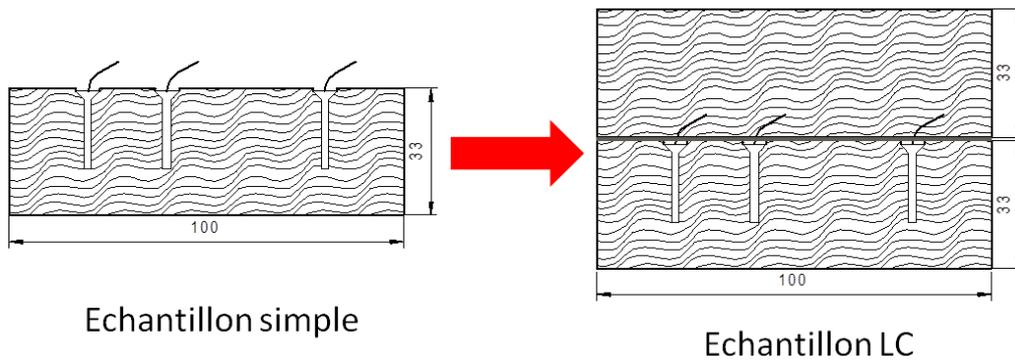


Figure 100: Schématisation du collage de l'échantillon LC pour la configuration 1

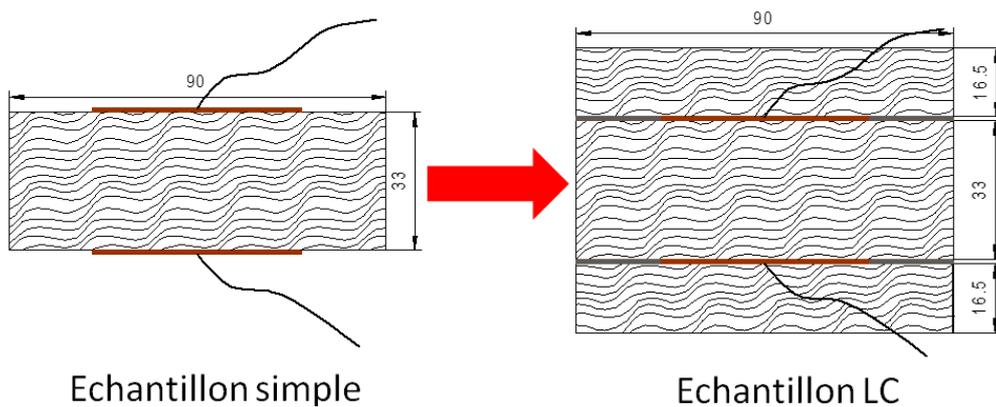


Figure 101: Schématisation du collage de l'échantillon LC pour la configuration 4A

2.2.2. Procédures d'humidification

Suite à la préparation de tous les échantillons, nous les avons humidifiés pour investiguer la réponse des capteurs face aux changements d'humidité. Pour ce faire, nous avons utilisé deux protocoles différents pour atteindre les humidités d'objectif. Concernant les humidités faibles (<20%), nous avons conditionné les échantillons dans une enceinte climatique jusqu'à obtenir une masse constante (Figure 102a). Les consignes utilisées sont fixées selon le modèle hygroscopique de Simpson (1973) (cf. Equation 2) et sont présentées dans la Table 11. Afin d'atteindre les humidités plus élevées, une immersion en bassin a été utilisée (Figure 102b). Le conditionnement dans l'enceinte a tout d'abord été utilisé afin d'éviter une humidification trop rapide des échantillons en dessous du PSF, ce qui pourrait arriver lors d'une immersion en bassin (Khazaei 2008). Comme cela, nous pouvons obtenir plus de points de mesures pour des humidités faibles. Ensuite, pour pouvoir atteindre des humidités plus élevées, nous avons immergé les échantillons dans l'eau car le conditionnement dans l'enceinte ne permet pas d'atteindre des humidités au-delà du PSF.

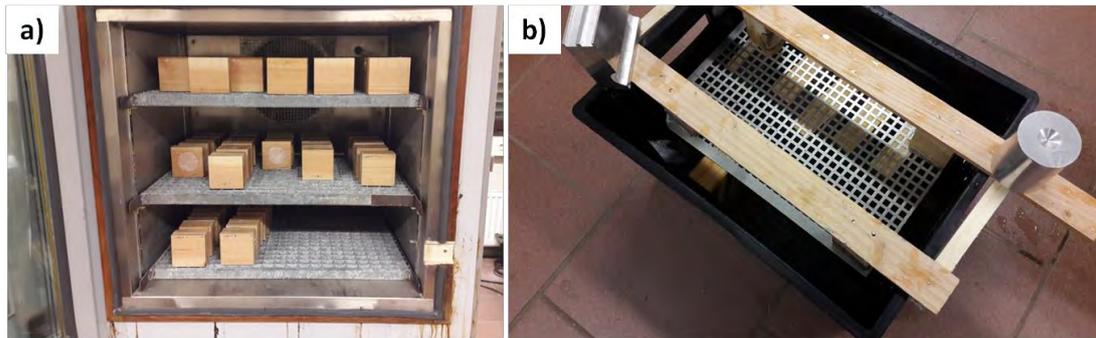


Figure 102: Protocoles d'humidification utilisés: a) Conditionnement dans l'enceinte climatique ; b) Immersion en bassin

Table 11: Consignes utilisées pour le conditionnement des échantillons dans l'enceinte climatique

Humidité d'objectif (%)	12	16	20
Température (°C)	20	20	20
Humidité relative de l'air (%)	65	80	90

La masse des échantillons a été mesurée à l'aide d'une balance de précision avec une résolution de 0,01 g. L'humidité est calculée à l'aide de l'Equation 3 (cf. « 1.1.4 Comportement hygroscopique du bois ») en respectant la norme NF EN 13183-1 (AFNOR 2002a). Afin d'avoir des informations de masse uniquement liées au matériau bois, nous avons enlevé la masse des montages par des pesages avant et après l'instrumentation des différents éléments (câbles, électrodes, colle polyuréthane). Qui plus est, les essais préalables en immergeant ces éléments dans l'eau ont permis de confirmer que la masse de ces derniers ne change pas lors d'une immersion en bassin.

Avant de commencer la campagne d'essais complète, nous avons réalisé une étude des cinétiques d'humidification afin de caler le planning pour les mesures électriques, vu[^]@ le grand nombre d'échantillons (10 types d'échantillons (cf. Table 10), 50 échantillons au total).

- **Etude des cinétiques d'humidification**

En ce qui concerne la réalisation de cette étude sur les cinétiques d'humidification, nous avons retenu 6 types d'échantillons (Table 12) car les échantillons des mesures électriques présentent 6 dimensions différentes (cf. Table 10). Pour chaque dimension, 5 échantillons identiques ont été préparés afin de tenir compte de la variabilité du matériau bois.

Table 12: Dimensions des échantillons utilisés pour l'étude sur les cinétiques d'humidification (la lettre « c » indique qu'il s'agit des échantillons utilisés pour l'étude sur les cinétiques d'humidification)

Configurations	Désignations	Dimensions (mm)		
		L	R	T
1, 2, 3	C123Sc	100	33	90
	C123GLc	100	66	90
4A	C4ASc	90	33	90
	C4AGLc	90	66	90
4B	C4BSc	90	16,5	90
	C4BGLc	90	49,5	90

Ces échantillons ont été humidifiés selon les procédures évoquées précédemment : ils ont été tout d’abord conditionnés dans l’enceinte climatique selon les consignes présentées dans la Table 11 et ont été ensuite immergés dans l’eau.

Les résultats pour le conditionnement dans l’enceinte climatique sont présentés sur les Figures 103-105. Le gain de masse a été tracé en fonction du temps écoulé afin de mettre en évidence le moment de la stabilisation apparente de masse, i.e. le moment où nous pouvions changer de consigne pour le conditionnement vers une autre humidité plus importante. Sur ces figures, on peut constater que le gain de masse des échantillons tend à se stabiliser au bout d’environ 8 jours de conditionnement après chaque changement de consigne de l’enceinte.

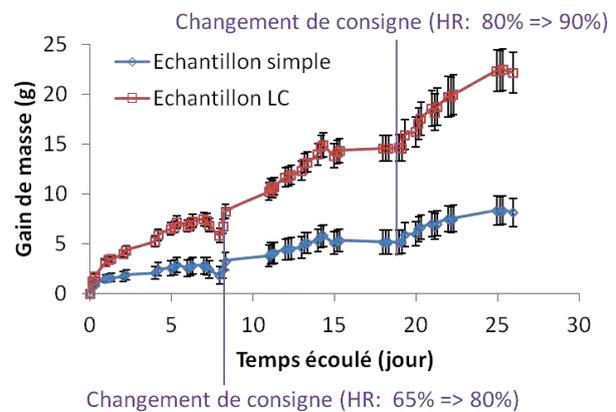


Figure 103: Gain de masse en fonction du temps pour le conditionnement dans l’enceinte climatique (Echantillons C123Sc et C123GLc)

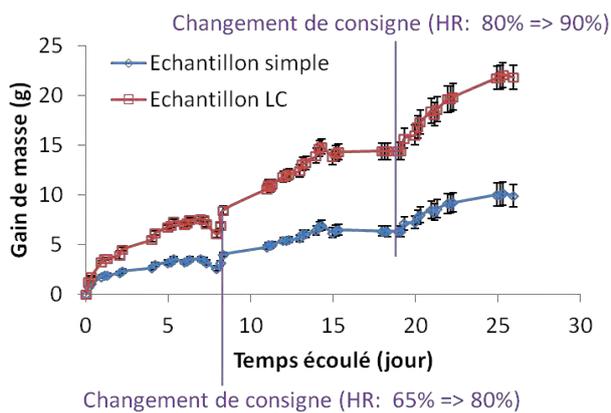


Figure 104: Gain de masse en fonction du temps pour le conditionnement dans l’enceinte climatique (Echantillons C4ASc et C4AGLe)

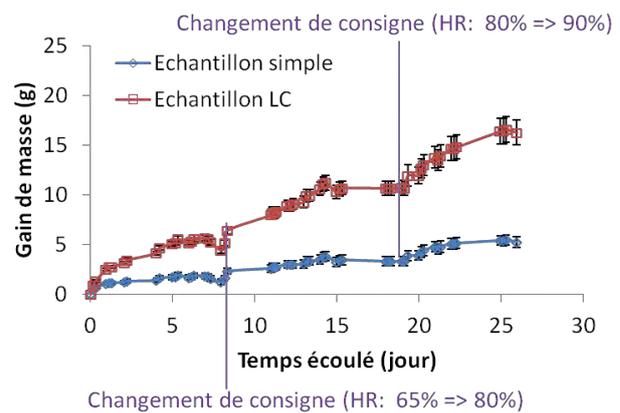


Figure 105: Gain de masse en fonction du temps pour le conditionnement dans l’enceinte climatique (Echantillons C4BSc et C4BGLc)

Le temps de stabilisation apparente est quasiment identique pour les échantillons de tailles différentes (Figures 103-105). Ceci peut s’expliquer par le fait que la perméabilité du bois dans la direction longitudinale est beaucoup plus grande que dans les deux autres directions (Burr et al. 1947). La perméabilité quantifie l’aptitude d’un milieu poreux au passage d’un fluide (à l’état liquide ou gazeux) en réponse à un gradient de pression. Selon la littérature (Siau 1984 ; Ai 2016), la perméabilité du gaz dans la direction longitudinale peut être 10^5 fois plus grande que celle des deux autres directions. Vu que l’absorption d’eau des échantillons dans l’enceinte est sous forme d’eau vapeur (à l’état gazeux) et que nos échantillons ont des longueurs proches (90 mm ou de 100 mm), ils ont donc quasiment le même comportement lors du conditionnement dans l’enceinte.

Concernant le comportement des échantillons dans l’eau (Figures 106-108), on peut observer que l’humidité présente une évolution croissante et linéaire en fonction de la racine du temps, ce qui est en accord avec les observations tirées de la littérature (Candanedo et al. 2005; Sandberg et al. 2012).

Les équations de régression obtenues à partir de la moyenne des 5 échantillons sont également disponibles sur les Figures 106-108. Avec ces équations, nous pouvons calculer le temps d'immersion pour une humidité donnée afin de fixer le planning de nos essais de suivi de l'humidité avec les échantillons instrumentés.

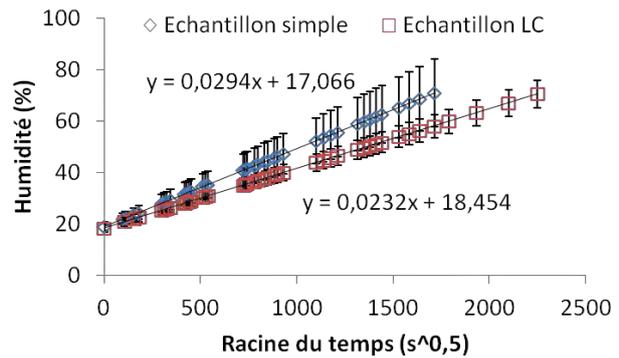


Figure 106: Cinétiques d'humidification dans l'eau pour les échantillons C123Sc et C123GLc

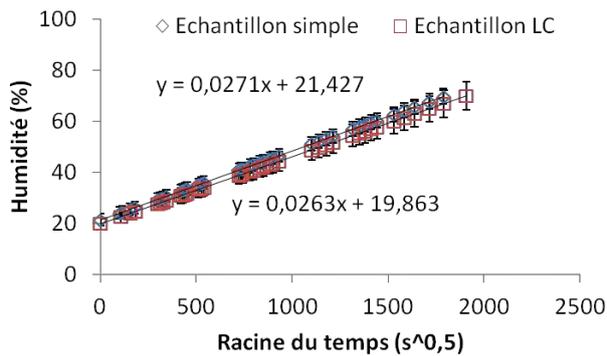


Figure 107: Cinétiques d'humidification dans l'eau pour les échantillons C4ASc et C4AGLc

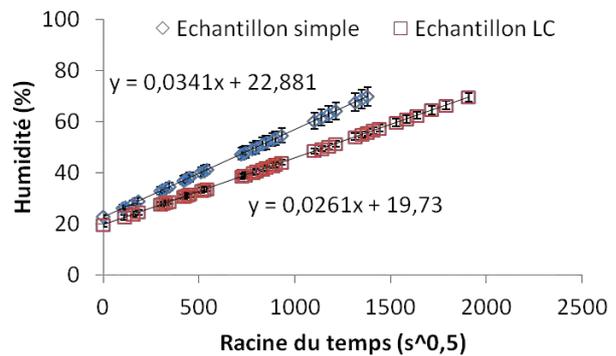


Figure 108: Cinétiques d'humidification dans l'eau pour les échantillons C4BSc et C4BGLc

A travers les résultats des cinétiques d'humidification, nous avons aussi remarqué qu'il y a une série de mesures (C123Sc, cf. Figure 106) avec des dispersions plus grandes que pour les autres. Effectivement, cette dispersion peut être liée à la variabilité du matériau bois. Comme présenté par la Figure 109, les 3 échantillons avec les densités les plus faibles (densité moyenne = $0,46 \pm 0,001$) s'humidifient plus vite que les deux échantillons avec les densités plus élevées (densité moyenne = $0,52 \pm 0,006$). En effet, une densité plus faible à volume égale se traduit par moins de composants cellulaires et donc plus de volume de vides, ce qui a pour conséquence de faciliter l'absorption d'eau dans le matériau (Burr et al. 1947; Wadsö 1993). Etant donné ce constat, nous avons lancé une 2^{ème} étude avec davantage d'échantillons afin de bien étudier l'influence de la variabilité du matériau bois sur la cinétique d'humidification.

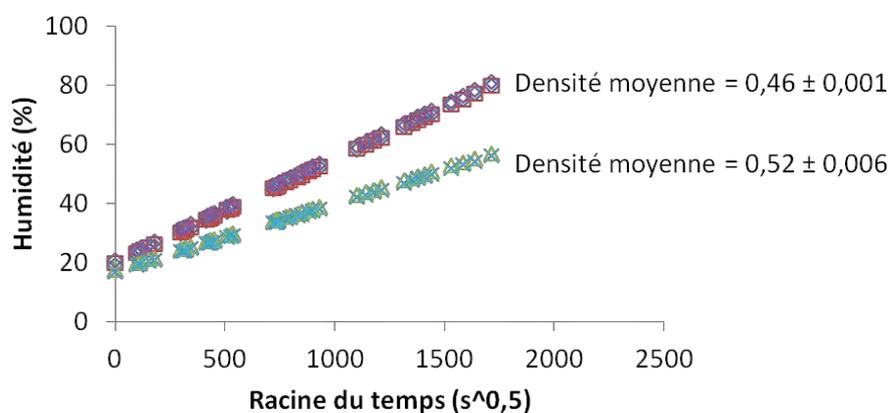


Figure 109: Résultats de la cinétique d'humidification pour les 5 échantillons de C123Sc

- **Compléments sur l'étude des cinétiques d'humidification**

Pour cette 2ème étude, nous avons utilisé 9 échantillons pour les 6 types de configurations dont les dimensions sont présentées dans la Table 12. Pour les humidifier, nous avons utilisé une immersion directe dans l'eau.

Les résultats nous ont montré que de manière générale, les échantillons de densités plus faibles s'humidifient plus vite que ceux de densités plus élevées (Figure 110). Cependant, on remarque quand même quelques cas particuliers. Ici on peut prendre par exemple les résultats des échantillons de type C123Sc dont la dispersion en densité est la plus grande parmi les 6 groupes d'échantillons étudiés. Afin de bien visualiser la différence entre les 9 échantillons, nous avons tracé l'humidité finale (après 50 jours d'immersion) pour les échantillons de densités différentes sur la Figure 110. On peut donc constater que les trois échantillons ayant les densités les plus faibles (deux à 0,46 et un à 0,47) s'humidifient plus vite que les autres. Néanmoins, on voit par exemple avec l'échantillon de densité 0,52, que cette logique n'est pas toujours respectée. Les résultats des autres échantillons sont disponibles en « Annexe 5 »

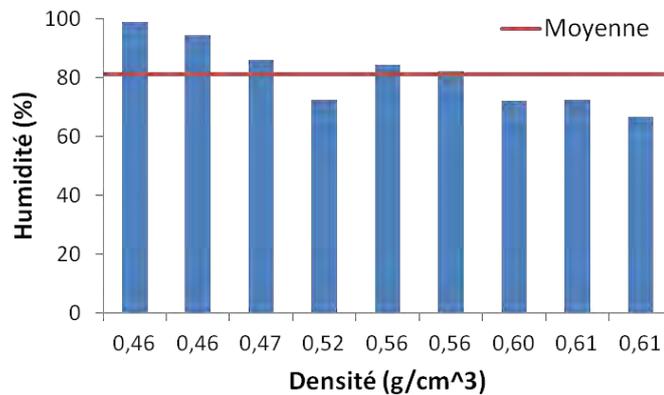


Figure 110: Humidité finale pour les 9 échantillons de densités différentes (C123Sc, 2^{ème} série)

Cette observation peut être expliquée par le fait que l'absorption de l'eau dans le bois est liée également à d'autres paramètres que la densité. Premièrement, la diffusion d'eau dans la direction longitudinale du bois est plus rapide que dans les deux autres directions (Siau 1984). De ce fait, les directions d'anatomie des échantillons utilisés influencent aussi l'absorption d'eau, même s'ils ont la même géométrie (Stamm 1960; Sivertsen 2010). De plus, l'absorption d'eau liquide est souvent empêchée par des bulles d'air enfermées dans les cavités de la structure du bois (Stamm 1948). La distribution de ces bulles est aléatoire et cela peut conduire à une dispersion sur les résultats obtenus.

Par ailleurs, au travers de cette nouvelle étude, nous avons observé que l'humidité ne montre pas toujours la même tendance linéaire en fonction de la racine du temps comme pour les échantillons de la 1^{ère} série (cf. Figures 106-108). En effet, comme montré par la Figure 111, nous pouvons constater trois phases d'humidification avec diminution des cinétiques en fonction de la plage d'humidité. Les résultats des autres échantillons utilisés sont présentés en « Annexe 5 »

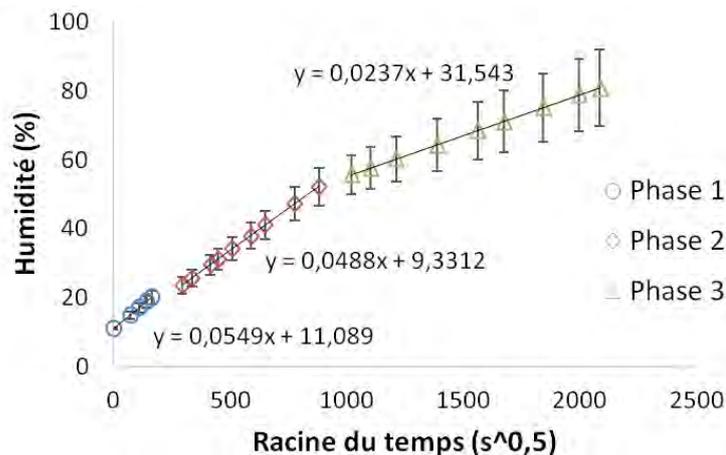


Figure 111: Résultats de la cinétique d’humidification pour les échantillons C123Sc de la 2^{ème} série

Sivertsen et al. (2010) ont fait une observation similaire sur des échantillons en Epicéa (Figure 112). Les auteurs ont considéré que l’absorption d’eau est uniquement réalisée par la diffusion de l’eau liée pour les humidités faibles (10%-25%), et uniquement réalisée par pression capillaire sous forme d’eau libre à partir de 40% d’humidité.

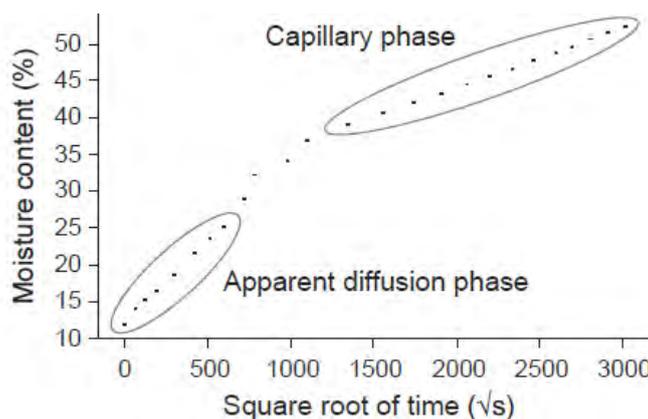


Figure 112: Humidité en fonction de la racine du temps pour un échantillon d’epicéa (Sivertsen et al. 2010)

En outre, selon certaines études effectuées en désorption sur différentes essences de feuillus (Almeida 2006; Hernandez et al. 2010; Passarini 2015), trois phases de désorption ont été confirmées à l’aide de la technique RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) :

- Dans un premier temps, l’eau qui sort des échantillons est uniquement sous forme d’eau libre qui est présente dans les cavités du bois.
- Ensuite, à partir de certaines humidités (dépendantes de l’essence, mais toujours au-dessus du PSF), les échantillons commencent à perdre de l’eau liée présente dans les parois cellulaires, et ce, avec encore la présence d’eau libre dans les échantillons.
- Enfin, à partir d’un niveau d’humidité encore plus bas (dépendant de l’essence, et en dessous du PSF), les échantillons sont complètement dépourvus d’eau libre, et à partir de ce-point-là, l’eau est uniquement sous forme d’eau liée.

Au regard de ces éléments disponibles dans la littérature, une description possible concernant l’absorption d’eau de chaque phase dans notre étude (Figure 111) est proposée ci-dessous :

- Pour la plage d’humidité 10%-25% (phase 1), les échantillons de Douglas sont en

dessous du PSF (environ 27% pour le Douglas (Gérard et al. 2011)). L'absorption d'eau est donc principalement sous forme d'eau liée par la diffusion d'eau dans les parois cellulaires. Néanmoins, comme les échantillons sont en contact avec de l'eau liquide, l'eau sous forme libre se positionne également dans les cavités du bois par pression capillaire (Siau 1984).

- Pour la plage d'humidité 25%-55% (phase 2), les cellules du bois sont saturées en eau liée. De ce fait, il y a augmentation de la quantité d'eau libre dans les échantillons. Par ailleurs, comme les cellules du bois ne sont pas complètement saturées, la diffusion de l'eau liée dans les parois cellulaires existe encore. Il y a donc une absorption plus « équilibrée » de l'eau libre et de l'eau liée dans cette phase d'humidification par rapport à la phase 1.
- Pour la plage d'humidité 55%-80% (phase 3), les cellules du bois sont complètement saturées en eau liée. Il y a donc uniquement l'absorption de l'eau libre par pression capillaire dans les cavités de la structure du bois.

• **Influence de la géométrie sur la cinétique d'humidification**

Nous avons également comparé la cinétique d'humidification des échantillons de différentes géométries pour étudier l'influence de ces dernières.

Dans un premier temps, nous avons comparé les échantillons ayant la même section mais des longueurs différentes. Comme le montre la Figure 113, les échantillons avec une longueur plus faible (90 mm, C4ASc, cf. Figure 114) s'humidifient plus vite que les échantillons plus longs (100 mm, C123Sc, cf. Figure 114) car les résultats présentent toujours des différences significatives selon le test LSD de Fisher. Cette observation semble tout à fait logique car l'absorption d'eau dans le bois se fait principalement via la direction longitudinale (Stamm 1960 ; Siau 1984).

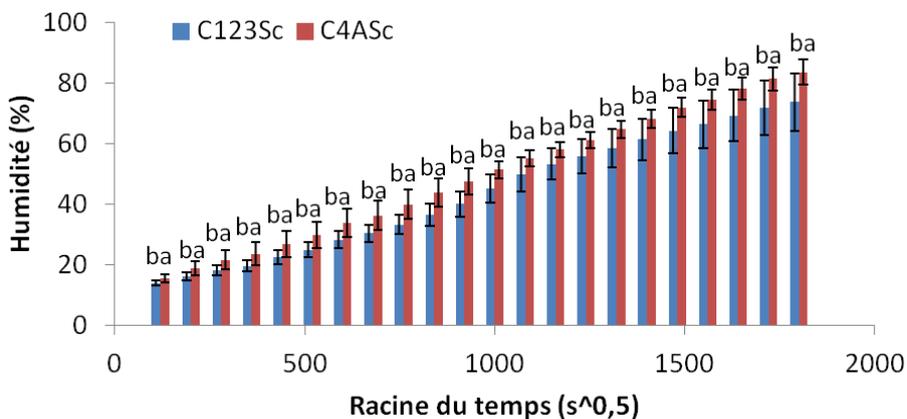


Figure 113: Comparaison de la cinétique d'humidification entre les échantillons C123Sc et C4ASc

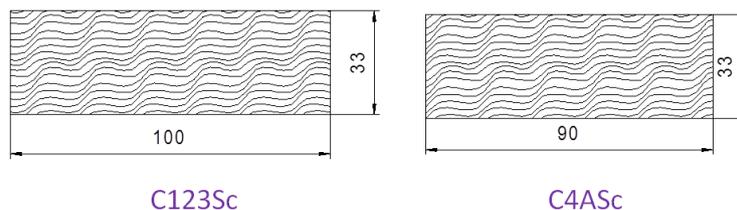


Figure 114: Comparaison des échantillons de longueurs différentes (C123Sc et C4ASc)

Néanmoins, si l'on compare les échantillons LC (Figure 115), on ne voit pas de différences significatives jusqu'à 29 jours d'immersion (environ 67% d'humidité), en sachant que les échantillons LC sont aussi de même section (Figure 116). Cette observation peut s'expliquer par le fait que les échantillons C4AGLc ont une couche de colle de plus que les échantillons C123GLc (Figure 116). Comme la colle utilisée pour le collage du LC est résistante à l'eau, il se peut donc que la colle ait empêché la diffusion d'eau à proximité du joint de colle.

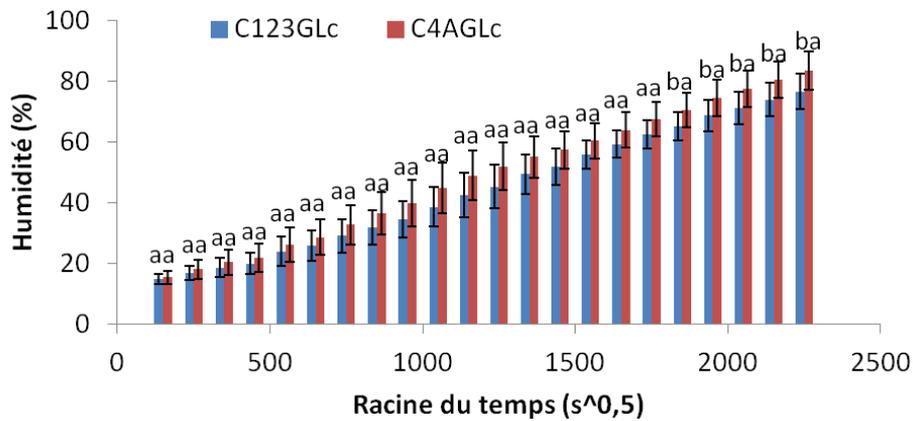


Figure 115: Comparaison de la cinétique d'humidification entre les échantillons C123GLc et C4AGLc

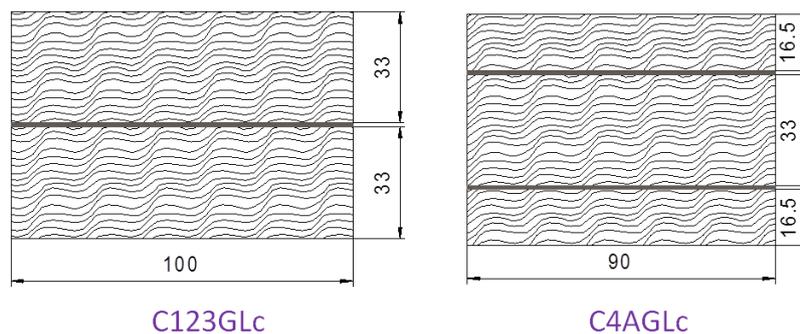


Figure 116: Comparaison des échantillons de longueurs différentes (C123GLc et C4AGLc)

Ensuite, nous avons comparé les résultats des échantillons ayant la même longueur mais avec des épaisseurs différentes. Comme le montre la Figure 117, les différences significatives en humidité (entre C4ASc et C4BSc, cf. Figure 118) n'apparaissent qu'après 22 jours d'immersion (environ 70% d'humidité). En effet, les échantillons C4ASc sont 2 fois plus épais que les échantillons C4BSc (Figure 118). Ce fait montre que l'influence de l'épaisseur de l'échantillon sur la cinétique d'humidification est moins importante par rapport à l'influence de la longueur (cf. Figure 114). Ceci est en accord avec la littérature car l'absorption d'eau se fait principalement dans la direction longitudinale du bois (Siau 1984).

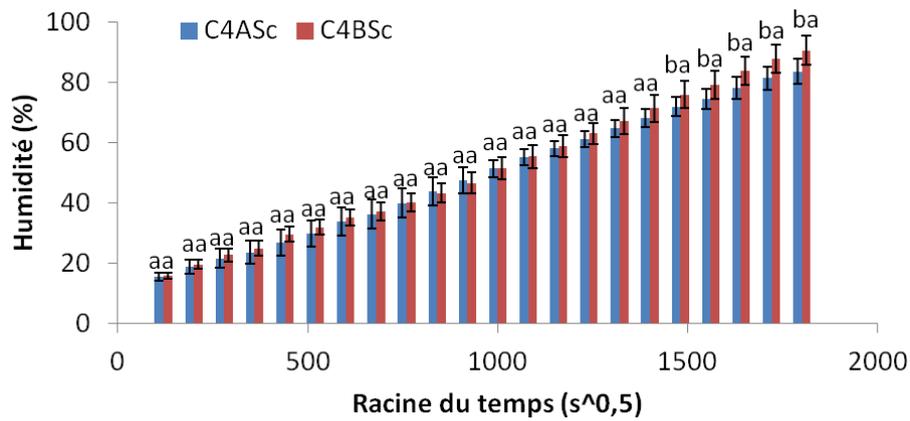


Figure 117: Comparaison de la cinétique d'humidification entre les échantillons C4ASc et C4BSc

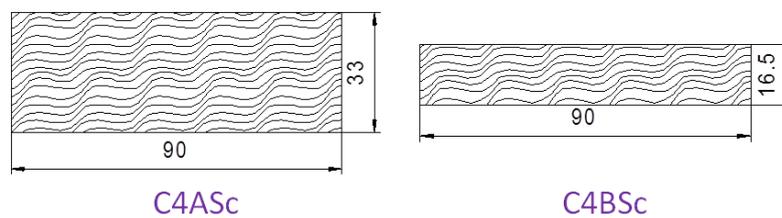


Figure 118: Comparaison des échantillons d'épaisseurs différentes (C4ASc et C4BSc)

De plus, si on regarde la comparaison entre les échantillons LC (Figure 119), on ne voit pas de différences significatives entre les échantillons de différentes épaisseurs (C4AGLc et C4BGLc, cf. Figure 120) dans la gamme d'humidité étudiée (10%-80%). Ceci peut être expliqué par le fait que la différence en épaisseur des échantillons LC devient plus petite par rapport aux échantillons simples. Pour les échantillons simples, l'épaisseur des échantillons C4ASc est 2 fois plus grande que celle des échantillons C4BSc (cf. Figure 118). Cependant, en ce qui concerne les échantillons LC, avec le collage des 2 autres lamelles de taille identique, l'épaisseur des C4AGLc n'est que 1,3 fois plus grande que celle des échantillons C4BGLc (cf. Figure 120).

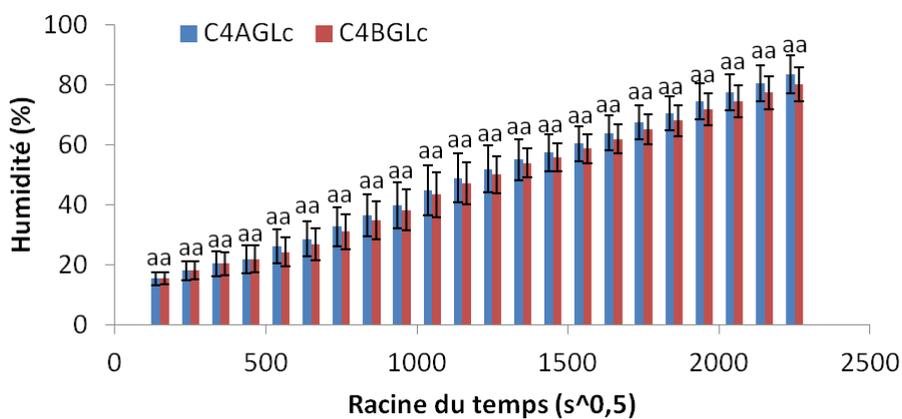


Figure 119: Comparaison de la cinétique d'humidification entre les échantillons C4AGLc et C4BGLc

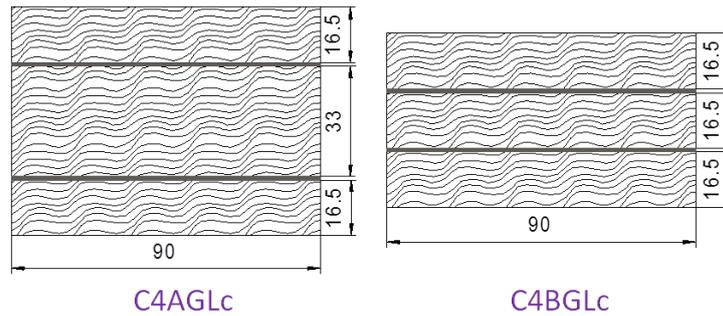


Figure 120: Comparaison des échantillons d'épaisseurs différentes (C4AGLc et C4BGLc)

- **Stratégies d'humidification utilisées**

Suite à l'obtention des résultats de l'étude sur les cinétiques d'humidification, nous avons préparé un planning de mesures pour la campagne d'essais complète des mesures électriques selon les résultats de l'étude de la 1^{ère} série. Pour l'humidification dans l'enceinte, nous avons effectué des mesures et changé de consigne au bout de 8 jours de conditionnement. Puis, afin de planifier les mesures après l'immersion dans l'eau, nous avons réalisé un planning de mesures grâce aux équations de régression présentées sur les Figures 106-108 qui permettent d'obtenir le temps d'immersion pour une humidité donnée. Afin d'avoir des points de mesure bien répartis, nous avons choisi les humidités d'objectif suivantes : 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%.

2.2.3. Traitement des données de mesures

Les données relevées directement lors de chaque mesure sont la résistance électrique (mesurée avec le Giga-Ohmmètre) et/ou la capacité (mesurée avec le RLC mètre) (cf. Table 10). Par la suite, nous avons calculé la résistance/capacité du bois et la résistance/capacité d'interface de la manière suivante pour étudier l'influence de ces dernières sur les mesures électriques.

Pour les configurations 1, 2 et 3, afin de distinguer les résistances électriques mesurées entre les deux paires d'électrodes, nous nommerons R_{20} la résistance mesurée avec les électrodes espacées de 20 mm et R_{40} la résistance mesurée avec les électrodes espacées de 40 mm.

Selon la littérature (James 1994; Norberg 1999a), quand on fait une mesure résistive dans le bois, le circuit équivalent peut être considéré comme une connexion en série de la résistance du bois et de la résistance d'interface (résistance engendrée à l'interface de contact bois/électrode) (Figure 121). De ce fait, on peut écrire R_{20} et R_{40} sous les formes suivantes :

$$R_{20} = R_{w1} + 2R_{c1} \quad [13]$$

$$R_{40} = 2R_{w1} + 2R_{c1} \quad [14]$$

où R_{w1} est la résistance du bois entre les électrodes espacées de 20 mm, R_{c1} est la résistance d'une interface. R_{40} est considérée contenir deux fois R_{w1} car la longueur du chemin de conduction électrique est double. Selon l'Equation 4, si la longueur de conduction double, la résistance double aussi (Tamme et al. 2012).

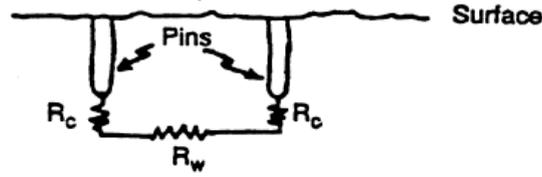


Figure 121: Circuit équivalent d'une mesure de résistance électrique dans le bois (R_w = résistance du bois (en anglais : wood resistance) ; R_c = résistance d'interface (en anglais : contact resistance)) (Norberg 1999a)

Si on résout les Equations 13 et 14, on obtient les équations 15 et 16 permettant de calculer la résistance du bois (R_{w1}) et la résistance d'interface (R_{c1}) :

$$R_{w1} = R_{40} - R_{20} \quad [15]$$

$$R_{c1} = \frac{2R_{20} - R_{40}}{2} \quad [16]$$

De la même manière, concernant la configuration 4, si on nomme R_{33} la résistance mesurée sur les échantillons 4A (33 mm d'épaisseur) et $R_{16,5}$ la résistance mesurée sur les échantillons 4B (16,5 mm d'épaisseur), on peut obtenir la résistance du bois (R_{w2}) et la résistance d'interface (R_{c2}) en utilisant les équations 17 et 18:

$$R_{w2} = R_{33} - R_{16,5} \quad [17]$$

$$R_{c2} = \frac{2R_{16,5} - R_{33}}{2} \quad [18]$$

En ce qui concerne les mesures capacitives de la configuration 4, on nomme C_{33} la capacité mesurée sur les échantillons 4A (33 mm d'épaisseur) et $C_{16,5}$ la capacité mesurée sur les échantillons 4B (16,5 mm d'épaisseur). Si on considère que la capacité totale est une connexion en série de la capacité du bois et de la capacité d'interface (Dérobert et al. 2006; Terzic et al. 2012), on peut écrire C_{33} et $C_{16,5}$ sous les formes suivantes :

$$\frac{1}{C_{33}} = \frac{1}{C_w} + \frac{2}{C_c} \quad [19]$$

$$\frac{1}{C_{16,5}} = \frac{1}{2C_w} + \frac{2}{C_c} \quad [20]$$

où C_w est la capacité du bois de l'échantillon 4A et C_c est la capacité d'une interface. $C_{16,5}$ est considérée contenir deux fois C_w car la longueur du chemin de conduction électrique est la moitié de celui de C_{33} . Selon l'Equation 5, quand la longueur de conduction est réduite de moitié, la capacité du matériau est doublée.

En résolvant les équations 19 et 20, on obtient les formules 21 et 22 permettant de calculer la capacité du bois (C_w) et la capacité d'interface (C_c) :

$$C_w = \frac{1}{2*(1/C_{33} - 1/C_{16,5})} \quad [21]$$

$$C_c = \frac{2}{2/C_{16,5} - 1/C_{33}} \quad [22]$$

2.2.4. Conclusion

Cette section a permis de présenter les protocoles expérimentaux utilisés pour la fabrication des échantillons LC mais aussi pour le traitement des données de mesures pour les essais du suivi de l'humidité. Qui plus est, grâce à l'étude des cinétiques d'humidification, nous avons obtenu une planification fiable pour les différentes mesures à réaliser.

Par la suite, nous avons mis en humidification des échantillons selon les deux procédures évoquées afin de vérifier les réponses des capteurs face aux changements d'humidité dans le bois. Ces résultats concernant le suivi de l'humidité par capteurs intégrés sont présentés dans la section suivante.

2.3. Suivi de l'humidité par capteurs intégrés

La faisabilité des mesures électriques dans le bois (cf. Figure 93) a été validée grâce à nos études préliminaires présentées précédemment (cf. « 2.1.2 Faisabilité des mesures électriques dans le bois »). Dans cette section, nous allons présenter les résultats du suivi de l'humidité par capteurs intégrés. Dans un premier temps, les résultats obtenus sur les échantillons simples (fabriqués avec du bois massif) sont décrits. Suite à cela, les résultats obtenus sur les échantillons LC seront présentés, avec une comparaison avec les échantillons simples. Enfin, nous allons présenter les résultats sur l'influence de l'espacement des électrodes.

2.3.1. Suivi de l'humidité dans les échantillons simples

Dans ce paragraphe, nous allons discuter de la faisabilité du suivi de l'humidité dans les échantillons simples. Dans un premier temps, nous allons montrer les résultats mesurés aux différentes humidités pour discuter du potentiel de l'ensemble des configurations de mesures pour le suivi de l'humidité. Ensuite, les incertitudes de mesures vis-à-vis d'une mesure d'humidité sont présentées.

2.3.1.1. Evaluation du potentiel des différentes configurations pour le suivi de l'humidité

Dans ce sous-paragraphe, nous présentons tout d'abord les résultats du suivi de l'humidité par mesures résistives. Puis, nous évoquerons les résultats obtenus par mesures capacitives.

- ***Mesures résistives***

Les résultats sur les mesures résistives sont présentés sur les Figures 122-123. Nous pouvons observer qu'il est possible de suivre la variation d'humidité avec l'ensemble des 4 configurations de mesures sur les échantillons simples dans la gamme d'humidité étudiée (10%-70%). En effet, on voit une évolution décroissante de la résistance électrique en fonction de l'humidité, et ce, avec deux tendances différentes en-dessous et au-dessus de 20% d'humidité. Cette différence peut être expliquée par les deux protocoles d'humidification utilisés dans cette étude, ce qui a pour conséquence d'entraîner différents processus physiques d'absorption de l'eau dans les échantillons. En effet, en-dessous de 20% d'humidité, les échantillons sont conditionnés dans l'enceinte climatique. De ce fait, l'absorption d'eau se fait principalement sous forme d'eau vapeur et l'eau présente dans l'échantillon est donc principalement sous forme d'eau liée. Cependant, à partir de 20% d'humidité, les échantillons ont été immergés directement dans l'eau. Quand le bois est en contact direct avec de l'eau liquide, de l'eau dite « libre » commence à entrer dans les espaces libres de l'échantillon (Siau 1984). Selon la littérature, l'influence de l'eau liée et de l'eau libre sur les propriétés résistives/capacitives du bois est différente (Lin 1967 ; Skaar 1988) (cf. « 1.1.4

Comportement hygroscopique du bois »), ce qui peut expliquer les deux tendances différentes observées (Figures 122-123).

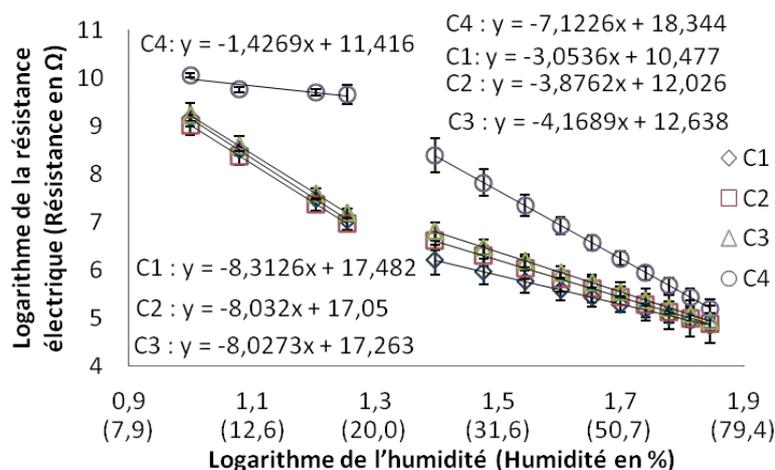


Figure 122: Logarithme de la résistance électrique en fonction du logarithme de l'humidité pour les échantillons simples (C1, C2, C3 : espacement d'électrodes = 40 mm ; C4 : espacement d'électrodes = 33 mm)

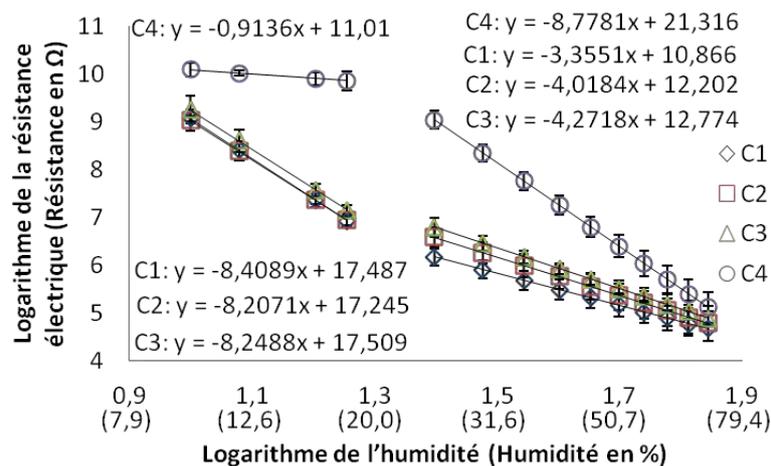


Figure 123: Logarithme de la résistance électrique en fonction du logarithme de l'humidité pour les échantillons simples (C1, C2, C3 : espacement d'électrodes = 20 mm ; C4 : espacement d'électrodes = 16,5 mm)

De plus, afin de modéliser l'évolution des mesures résistives en fonction de l'humidité pour les différentes configurations de mesures, nous avons réalisé une étude de régression avec nos résultats en utilisant le modèle de corrélation proposé originalement par Stamm (1927) (Equation 6, Page 32, cf. « 1.3.1 Méthodes électriques »). Ce modèle a été choisi car il est très utilisé dans la littérature (Norberg 2000; Tamme et al. 2012; Fredriksson 2013). Les équations de régression pour l'ensemble des configurations sont disponibles sur les Figures 122-123. Elles ont été obtenues à partir des valeurs moyennes des 5 échantillons identiques utilisés pour chaque configuration. Les coefficients de régression (a et b de l'Equation 6) pour l'ensemble des configurations sont résumés dans la Table 13. A l'aide de ces informations (Figures 122-123, Table 13), nous pouvons observer que les évolutions de la résistance électrique en fonction de l'humidité pour les configurations 1, 2 et 3 sont comparables. Cela suppose que quand on utilise les électrodes de type « pointe », nous pouvons utiliser des modèles d'étalonnage similaires pour le suivi de l'humidité dans les échantillons du bois massif, quel que soit le type d'électrodes utilisé.

Table 13: Récapitulatif des coefficients de régression (*a* et *b* de l'Equation 6) pour les mesures résistives des échantillons simples

Equation 6 : $\text{Log}(R) = a + b * \text{Log}(H)$					
Configurations	Espacements d'électrodes (mm)	Plages d'humidité			
		10%-20%		20%-70%	
		<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>
C1	40	-8,3126	17,482	-3,0536	10,477
	20	-8,4089	17,487	-3,3551	10,866
C2	40	-8,032	17,05	-3,8762	12,026
	20	-8,2071	17,245	-4,0184	12,202
C3	40	-8,0273	17,263	-4,1689	12,638
	20	-8,2488	17,509	-4,2718	12,774
C4	33	-1,4269	11,416	-7,1226	18,344
	16,5	-0,9136	11,01	-8,7781	21,316

En revanche, le comportement de la configuration 4 se révèle différent par rapport aux 3 autres configurations. Cette différence peut être expliquée de la manière suivante : premièrement, comme ce qui a été expliqué précédemment, les mesures résistives de la configuration 4 tendent à être affectées par la rugosité de la surface de l'échantillon, ce qui a pour conséquence d'avoir une résistance électrique mesurée plus élevée par rapport au cas où les électrodes et l'échantillon sont 100% en contact. Deuxièmement, quand l'humidité du bois est inférieure à 20%, il n'y a quasiment que de l'eau liée présente dans les parois cellulaires des échantillons. Par conséquent, les caractéristiques de l'interface de contact ne sont pas changées significativement, ce qui a pour conséquence une faible diminution de la résistance entre 10% et 20% d'humidité pour la configuration 4 (Figures 122-123). Néanmoins, à partir de 20% d'humidité, de l'eau libre commence à se positionner dans les espaces libres du bois, y compris l'espace entre les électrodes et l'échantillon. Cela peut conduire à une amélioration du contact électrique influencée par la conductivité de l'eau liquide (de l'ordre de 10^{12} - 10^{13} fois plus grande que le bois anhydre) (Skaar 1988). Par conséquent, la diminution de la résistance électrique devient de plus en plus importante de 20% à 70% d'humidité. En fin d'essais, la résistance mesurée sur la configuration 4 tombe aux valeurs comparables aux 3 autres configurations (Figures 122-123). Toutefois, la valeur de résistance (en Ohm) de la configuration 4 à 70% d'humidité est 2,1 fois plus grande en moyenne que celle des 3 autres configurations, mais cela est cohérent avec la littérature (Stamm 1960 ; Skaar 1988) car les mesures ont été réalisées dans des différentes directions d'anisotropie du bois (cf. Figure 94), comme expliqué précédemment (cf. « 2.1.2 Faisabilité des mesures électriques dans le bois »).

- **Mesures capacitives**

Les résultats sur les mesures capacitives sont présentés sur les Figures 124-125. Il ne s'agit que de la configuration 4 ici car les électrodes « pointe » ne permettent pas de faire les mesures de capacité (Stamm 1927). Nous pouvons observer sur les Figures 124-125 qu'il est possible de suivre la variation d'humidité avec les mesures capacitives dans la gamme d'humidité étudiée (10%-70%). En effet, on voit une évolution croissante de la capacité en fonction de l'humidité, et ce, là encore, avec deux tendances différentes en-dessous et au-dessus de 20% d'humidité. Cette différence peut être liée aux différentes formes d'eau présentes dans les échantillons. Comme expliqué précédemment, avant 20% d'humidité, il y a

principalement de l'eau liée dans le bois alors qu'après 20% d'humidité, il y a la présence à la fois d'eau liée et d'eau libre. Selon la littérature (Torgovnikov 1993), l'influence de l'eau liée et de l'eau libre sur les propriétés capacitives du bois est différente, ce qui peut expliquer les tendances différentes observées (Figures 124-125).

Par ailleurs, en ce qui concerne la corrélation entre la capacité et l'humidité du bois, nous avons utilisé l'Equation 11 (Page 37, cf. « 1.3.1 Méthodes électriques ») car c'est le modèle le plus utilisé pour la corrélation entre la CD (proportionnelle à la capacité, cf. Equation 5, Page 30) et l'humidité selon Torgovnikov (1993).

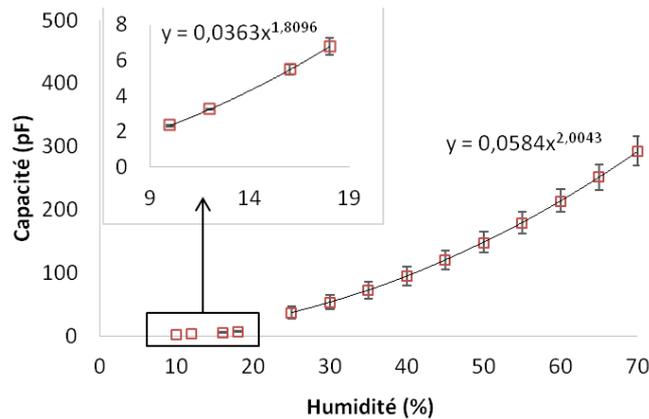


Figure 124: Capacité en fonction de l'humidité pour les échantillons simples de C4A (espacement d'électrodes = 33 mm)

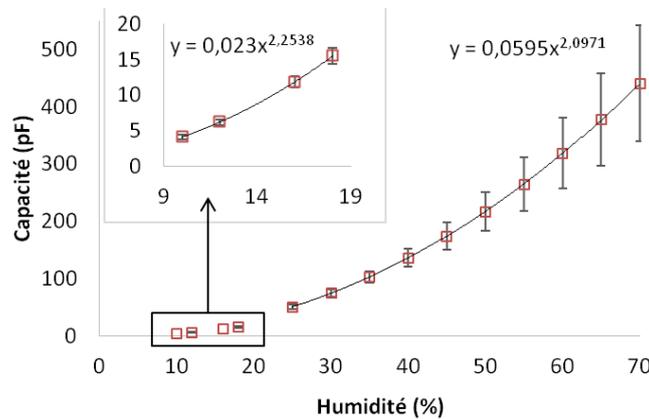


Figure 125: Capacité en fonction de l'humidité pour les échantillons simples de C4B (espacement d'électrodes = 16,5 mm)

2.3.1.2. Incertitudes d'estimation de l'humidité

- Démarche du calcul de l'incertitude d'estimation de l'humidité

Dans cette étude, nous avons également calculé les incertitudes de mesures afin de connaître leur impact sur l'estimation du taux d'humidité. Les différentes étapes du calcul des incertitudes d'estimation de l'humidité sont définies sur la Figure 126. Pour chaque série de mesures, on peut obtenir 5 valeurs (Y_i) de résistance électrique ou de capacité puisque l'on a 5 échantillons identiques. A partir de ces 5 valeurs (Y_i), nous pouvons donc calculer la valeur moyenne (Y_{moy}) et l'écart-type (σ) de cette série de mesures. Par la suite, à l'aide des valeurs moyennes (Y_{moy}), nous pouvons rentrer les valeurs extrêmes de cette série de mesures ($Y_{moy}-\sigma$ et $Y_{moy}+\sigma$) dans l'équation de régression obtenue précédemment (cf. Figures 122-125, $Y=f(H)$) afin de déterminer les humidités extrêmes (H_{min} et H_{max}) correspondantes à ces valeurs

extrêmes ($Y_{moy}-\sigma$ et $Y_{moy}+\sigma$). Comme cela, à l'aide de l'humidité vraie (H_{vraie}), qui est obtenue à partir de la masse anhydre en respectant la norme NF EN 13183-1 (AFNOR 2002a), nous pouvons obtenir une image des incertitudes d'estimation de l'humidité ($[H_{min}-H_{vraie}, H_{max}-H_{vraie}]$).

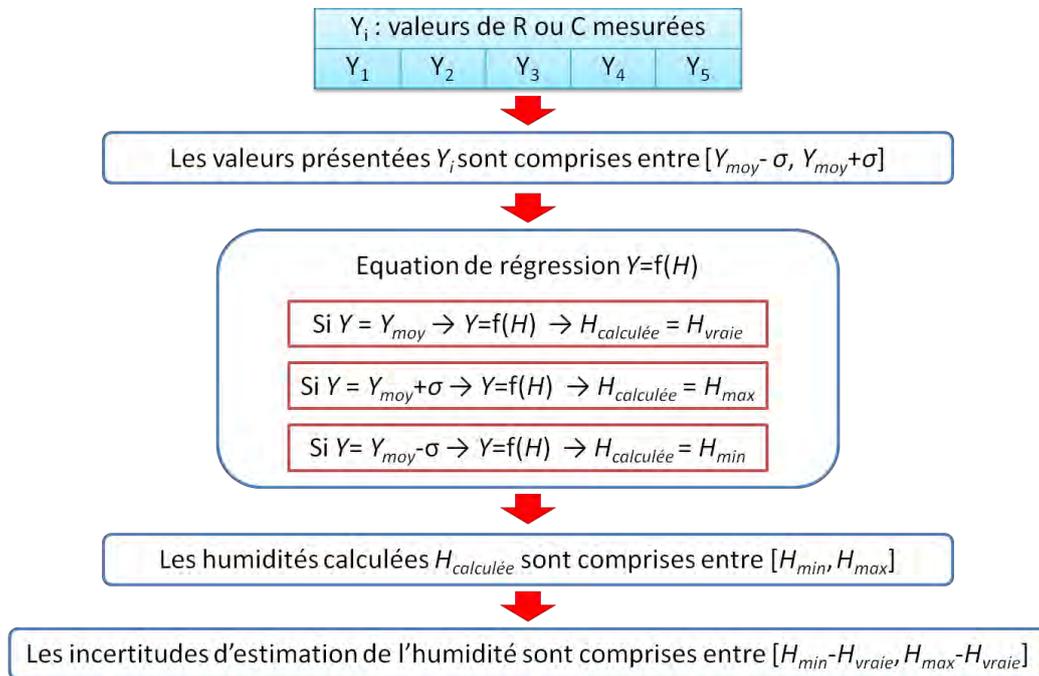


Figure 126: Calcul des incertitudes d'estimation de l'humidité

- **Comparaison entre les mesures résistives pour les différentes configurations**

Avec les résultats obtenus, nous avons tout d'abord comparé les incertitudes d'estimation de l'humidité obtenues sur les mesures résistives pour l'ensemble des 4 configurations de mesure. Selon nos résultats, la configuration 3 montre les incertitudes d'estimation de l'humidité les plus faibles dans toute la gamme d'humidité de notre étude (Figure 127).

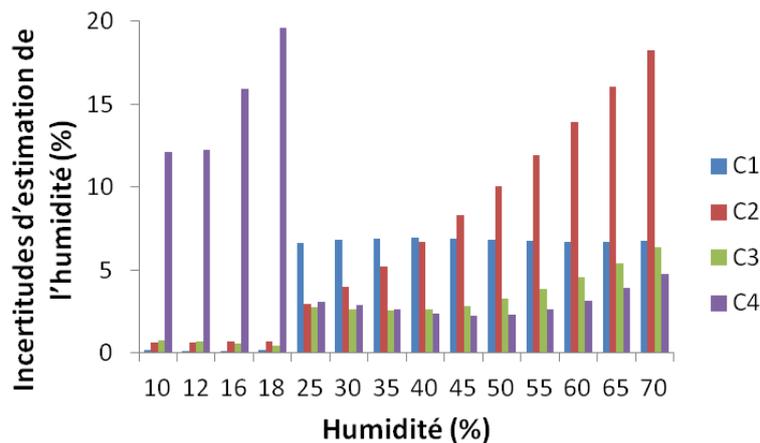


Figure 127: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives pour les 4 configurations de mesure (Echantillons simples) (Configurations 1, 2 et 3 : espacement d'électrodes = 40 mm ; Configuration 4 : espacement d'électrodes = 33 mm)

Pour la configuration 1, les incertitudes d'estimation de l'humidité sont plus élevées que celles de la configuration 3. Cela est probablement lié à l'influence du gradient d'humidité. En effet, s'il y a la présence d'un gradient d'humidité dans l'échantillon, la conduction

électrique se déroule plutôt sur la zone où la résistivité est la plus faible, i.e. la zone la plus humide dans la longueur des électrodes de mesure (James 1994 ; Norberg 1999a). De ce fait, si on regarde les chemins de conduction électrique possibles pour les 3 configurations utilisant des électrodes « pointe » (Figure 128), on peut observer que les électrodes de la configuration 1 peuvent conduire du courant électrique sur toute leur longueur (puisqu'elles ne sont pas isolées) (Figure 128a) alors que le passage du courant électrique se passe uniquement au fond des trous pour les configurations 2 et 3 dû à l'utilisation de la colle isolante dans la partie supérieure des trous (Figure 128 b et c). Par conséquent, les mesures de la configuration 1 sont plus susceptibles d'être affectées par la présence d'un gradient d'humidité. Ceci a pour conséquence d'avoir des incertitudes d'estimation de l'humidité plus élevées.

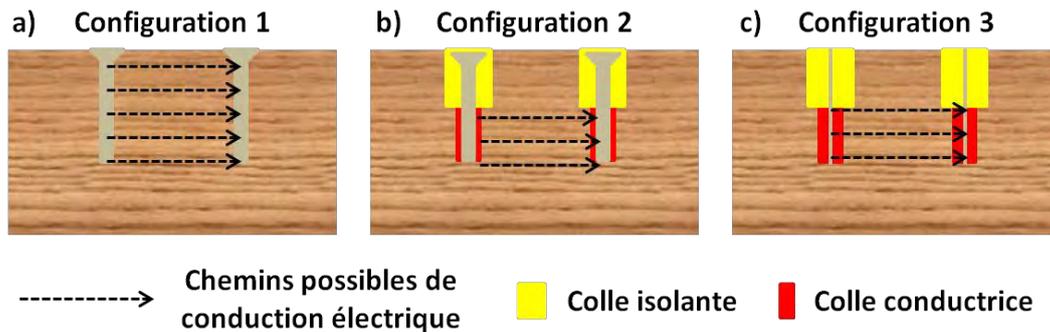


Figure 128: Chemins de conduction électrique possibles pour les électrodes « pointe » : a) Configuration 1 ; b) Configuration 2 ; c) Configuration 3

Concernant la configuration 2, sa mise en place est identique à la configuration 3 mis à part le type d'électrodes utilisé (cf. Figure 128). Néanmoins, les incertitudes d'estimation de l'humidité de la configuration 2 sont plus grandes que celles de la configuration 3, et plus particulièrement aux humidités élevées (Figure 127). Plusieurs explications peuvent potentiellement expliquer ce phénomène. Une des premières explications repose sur les différents types d'électrodes utilisées. Pour la configuration 2, les vis inox, qui sont effectivement filetées, ont été utilisées. De ce fait, le contact électrode/colle conductrice est moins propre par rapport au cas de la configuration 3, où le type d'électrodes utilisé (fils électriques) ne présente pas de formes irrégulières. De ce fait, les mesures par la configuration 2 sont plus susceptibles d'être affectées par la dilatation entre les électrodes et de la colle conductrice. De plus, il y a plus de liaison entre les différents éléments de mesure pour la configuration 2 par rapport à la configuration 3. Pour la configuration 2, des câbles ont été collés sur les têtes de vis, alors que pour la configuration 3, il n'y a pas cette liaison câble/électrode. Ceci pourrait aussi expliquer en partie pourquoi les incertitudes d'estimation de l'humidité sont plus élevées pour la configuration 2. Qui plus est, vu que les incertitudes de la configuration 2 montrent une tendance croissante en fonction de l'humidité à partir de 20% d'humidité (i.e. après immersion dans l'eau) (Figure 127), nous pensons qu'il se peut que les électrodes se soient corrodées au fond des trous de la configuration 2, ce qui entraîne des incertitudes de plus en plus grandes.

En ce qui concerne la configuration 4, les incertitudes d'estimation de l'humidité sont très élevées (>10%) aux humidités faibles (<20%) par rapport aux autres cas (Figure 127). Cela peut être lié au fait que le protocole utilisé n'est pas assez reproductible (ex. pression constante et contrôlée) lors du collage des électrodes surfaciques sur les échantillons bois. De ce fait, les conditions du contact électrique bois/électrode ne sont pas identiques pour tous les échantillons. Comme expliqué précédemment (cf. « 2.1.2 Faisabilité des mesures électriques dans le bois »), la résistance électrique tend à être affectée par la rugosité de la surface de

l'échantillon. Pour cette raison, les incertitudes obtenues pour la plage d'humidité 10% et 20% sont très importantes (cf. Figures 122-123). Toutefois, les incertitudes pour les humidités comprises entre 20% et 70% des mesures résistives pour cette configuration sont aussi bonnes que celles de la configuration 3 (Figure 127). Cela peut s'expliquer par l'amélioration du contact électrique influencée par la conductivité de l'eau liquide, qui a commencé à se positionner dans l'espace entre les électrodes et l'échantillon après immersion des échantillons en bassin. Cette observation (Figure 127) signifie que l'on peut utiliser la configuration 4 pour la mesure des humidités plus élevées (>20%) par mesures résistives sur les échantillons simples.

- **Comparaison entre les mesures résistives et capacitives**

Par la suite, nous avons comparé les incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives et les mesures capacitives sur la configuration 4. Les résultats (Figure 129) nous montrent que pour la plage d'humidité 10%-20%, il vaut mieux utiliser les mesures capacitives pour la mesure d'humidité sur les échantillons simples vu les incertitudes importantes des mesures résistives dans cette plage d'humidité. Toutefois, pour les humidités supérieures à 20%, les incertitudes des deux types de mesures (résistives/capacitives) sont très proches l'une de l'autre (Figure 129). Cela signifie que pour cette plage d'humidité (>20%), les deux types de mesures (résistives/capacitives) présentent les mêmes performances pour estimer l'humidité du bois massif.

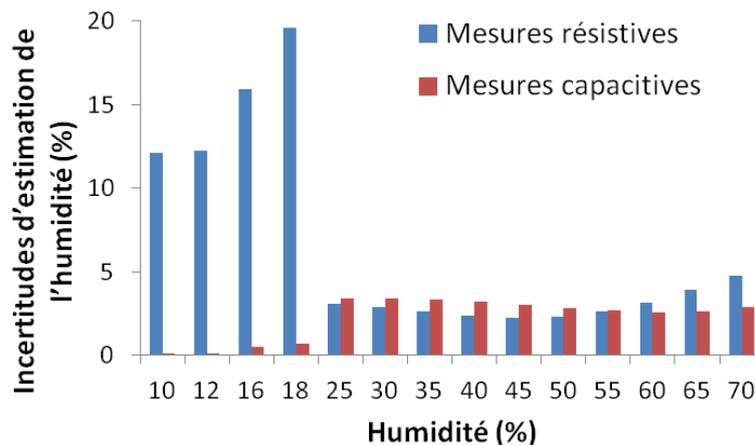


Figure 129: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives et les mesures capacitives pour les échantillons simples (Configuration 4 ; espacement d'électrodes = 33 mm)

Les résultats détaillés des incertitudes d'estimation de l'humidité obtenues avec les autres espacements d'électrodes sont disponibles en « Annexe 6 »

2.3.1.3. Conclusion

Selon les discussions apportées dans ce paragraphe concernant le suivi de l'humidité par mesures électriques dans les échantillons simples, il est important de retenir les conclusions suivantes :

- 1) Les trois configurations avec des électrodes « pointe » (1, 2 et 3) présentent des lois de comportement similaires pour l'estimation de la résistance électrique en fonction de l'humidité, alors que le comportement de la configuration 4 est différent à cause de l'influence de la rugosité de la surface de l'échantillon.
- 2) Selon le calcul des incertitudes de mesure, il ressort que la configuration 3 est la plus performante pour une estimation de l'humidité par mesures résistives dans les

échantillons simples.

- 3) Concernant la configuration 4, pour la plage d'humidité 10%-20%, il vaut mieux utiliser la méthode capacitive pour la mesure de l'humidité vu les incertitudes importantes des mesures résistives dans cette plage d'humidité. Ces incertitudes importantes peuvent être attribuées au fait que le protocole du collage des électrodes surfaciques ne permet pas d'avoir une condition de contact électrique assez répétable. Néanmoins, pour les humidités supérieures à 20%, les deux types de mesures présentent les mêmes performances pour estimer l'humidité dans les échantillons simples.

Dans le paragraphe suivant, nous allons discuter des résultats obtenus sur les échantillons LC.

2.3.2. Suivi de l'humidité dans les échantillons lamellé-collé

Suite à la présentation des résultats du suivi de l'humidité sur les échantillons simples, nous allons aborder des résultats obtenus sur les échantillons LC dans ce paragraphe. Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats obtenus aux différentes humidités pour discuter du potentiel de l'ensemble des configurations de mesures pour le suivi de l'humidité. Ensuite, les incertitudes d'estimation de l'humidité seront données. A la fin de ce paragraphe, nous allons présenter une comparaison des résultats obtenus pour les échantillons simples et pour les échantillons LC afin d'étudier l'influence de la pression de collage sur les mesures.

2.3.2.1. Evaluation du potentiel des différentes configurations pour le suivi de l'humidité

Dans ce sous-paragraphe, nous présenterons tout d'abord les résultats du suivi de l'humidité par mesures résistives. Puis, nous évoquerons les résultats obtenus par mesures capacitives.

- *Mesures résistives*

Les résultats obtenus avec les mesures résistives sont présentés sur les Figures 130-131. Nous pouvons observer qu'il est possible de suivre la variation d'humidité avec l'ensemble des 4 configurations de mesures sur les échantillons LC dans la gamme d'humidité étudiée (10%-70%). A l'identique du cas des échantillons simples, l'évolution de la résistance électrique en fonction de l'humidité montre deux tendances différentes en-dessous et au-dessus de 20% d'humidité. Cela peut être expliqué par les deux protocoles d'humidification utilisés dans cette étude, comme expliqué précédemment.

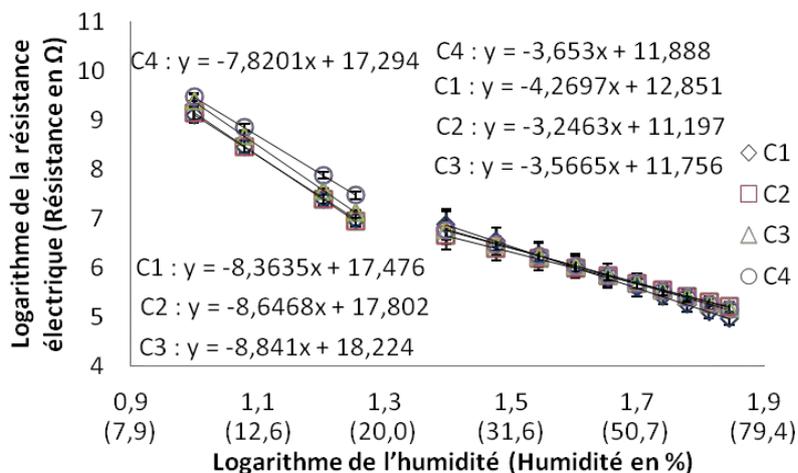


Figure 130: Logarithme de la résistance électrique en fonction du logarithme de l'humidité pour les échantillons LC (C1, C2, C3 : espacement d'électrodes = 40 mm ; C4 : espacement d'électrodes = 33 mm)

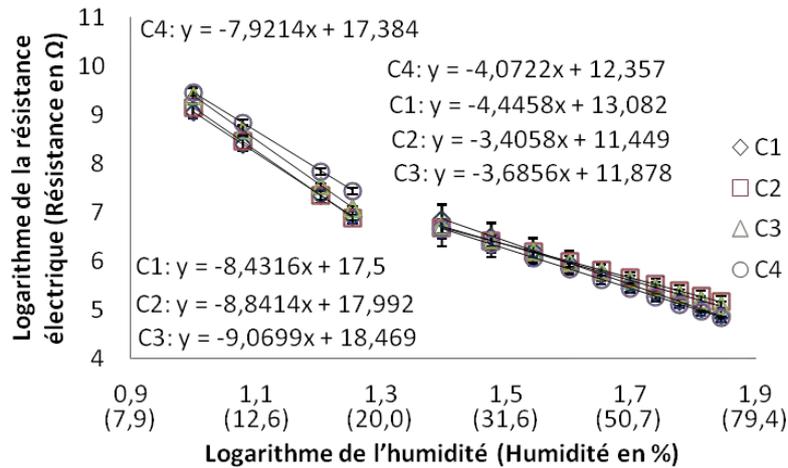


Figure 131: Logarithme de la résistance électrique en fonction du logarithme de l'humidité pour les échantillons simples (C1, C2, C3 : espacement d'électrodes = 20 mm ; C4 : espacement d'électrodes = 16,5 mm)

De la même manière que pour les échantillons simples, nous avons réalisé une étude de régression avec les résultats obtenus en utilisant le modèle de corrélation proposé originalement par Stamm (1927) (Equation 6, cf. « 1.3.1 Méthodes électriques »). Les équations de régression reliant la résistance électrique à l'humidité pour l'ensemble des configurations sont disponibles sur les Figures 130-131 et les coefficients de régression (a et b de l'Equation 6) sont résumés dans la Table 14.

Table 14: Récapitulatif des coefficients de régression (a et b de l'Equation 6) pour les mesures résistives des échantillons LC

Equation 6 : $\text{Log}(R) = a + b * \text{Log}(H)$					
Configurations	Espacements d'électrodes (mm)	Plages d'humidité			
		10%-20%		20%-70%	
		b	a	b	a
C1	40	-8,3636	17,476	-4,2697	12,851
	20	-8,4316	17,5	-4,4458	13,082
C2	40	-8,6468	17,802	-3,2463	11,197
	20	-8,8414	17,992	-3,4058	11,449
C3	40	-8,841	18,224	-3,5665	11,756
	20	-9,0699	18,469	-3,6856	11,878
C4	33	-7,8201	17,294	-3,653	11,888
	16,5	-7,9214	17,384	-4,0722	12,357

Nous pouvons observer que l'ensemble des 4 configurations montre des évolutions comparables (Figures 130-131 et Table 14). Cette observation suppose que les lois de comportement de la résistance électrique en fonction de l'humidité ne diffèrent pas significativement en fonction du type d'électrodes utilisé pour les échantillons LC. Cela suppose que pour le suivi de l'humidité des structures LC, nous pouvons utiliser des modèles d'étalonnage similaires, quel que soit le type d'électrodes utilisé.

- **Mesures capacitives**

Les résultats sur les mesures capacitives sont présentés sur les Figures 132-133. Nous

pouvons observer sur ces figures qu'il est possible de suivre la variation d'humidité avec les mesures capacitives sur les échantillons LC dans la gamme d'humidité étudiée (10%-70%). Comme pour les mesures résistives, l'évolution de la capacité en fonction de l'humidité montre deux tendances différentes avant et après 20% d'humidité.

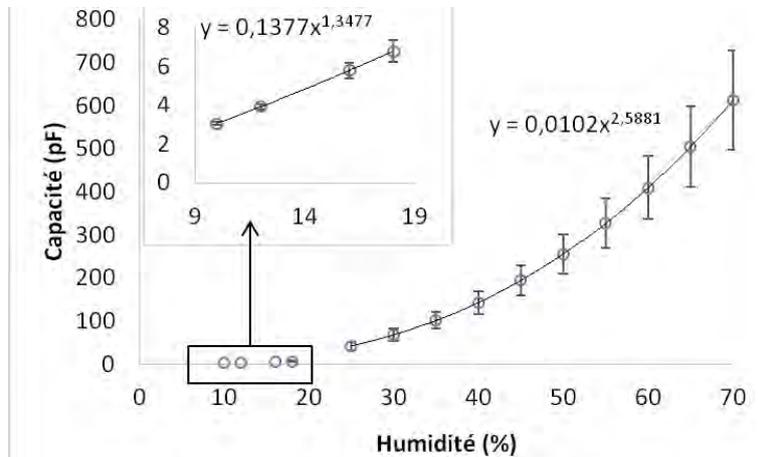


Figure 132: Capacité en fonction de l'humidité pour les échantillons LC de C4A (espacement d'électrodes = 33 mm)

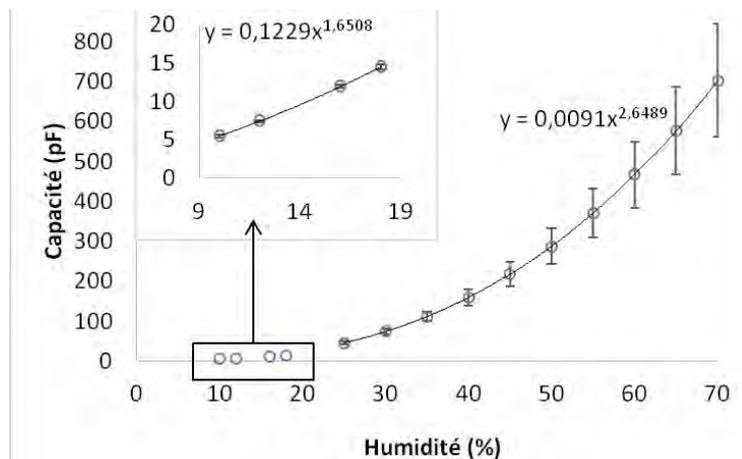


Figure 133: Capacité en fonction de l'humidité pour les échantillons LC de C4B (espacement d'électrodes = 16,5 mm)

2.3.2.2. Incertitudes d'estimation de l'humidité

Les incertitudes d'estimation de l'humidité ont également été calculées pour les échantillons LC en suivant les procédures décrites précédemment pour les échantillons simples (cf. Figure 126).

- **Comparaison entre les mesures résistives pour les différentes configurations**

De manière identique aux échantillons simples, nous avons tout d'abord comparé les incertitudes d'estimation de l'humidité obtenues pour les mesures résistives sur l'ensemble des 4 configurations de mesures. Nos résultats (Figure 134) montrent que les incertitudes de mesures de l'ensemble des 4 configurations ont des valeurs proches les unes des autres dans la gamme d'humidité de notre étude.

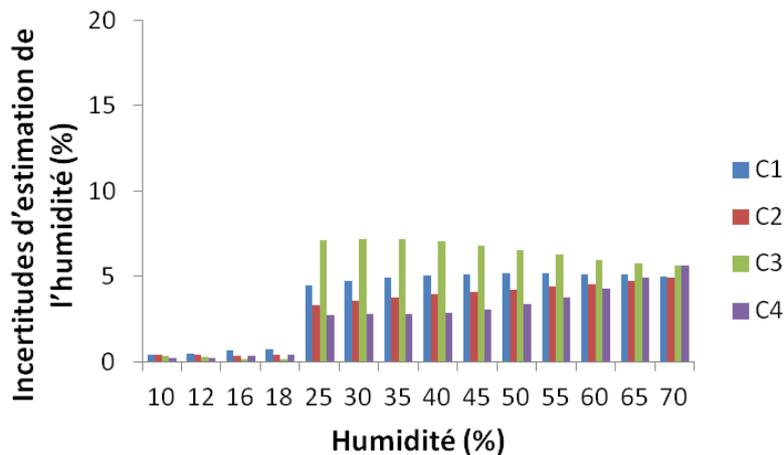


Figure 134: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives pour les 4 configurations de mesures (Echantillons LC) (Configurations 1, 2 et 3 : espacement d'électrodes = 40 mm ; Configuration 4 : espacement d'électrodes = 33 mm)

En effet, pour la plupart des mesures sur les échantillons LC, l'incertitude d'estimation de l'humidité est inférieure à $\pm 1\%$ (d'humidité) pour les humidités inférieures à 20% et inférieure à $\pm 5\%$ (d'humidité) pour les humidités supérieures à 20%. Fredriksson et al. (2013) ont aussi observé cela dans leur étude. Ils ont trouvé qu'entre 12% et 20% d'humidité, l'incertitude est proche de $\pm 1-1,5\%$ (d'humidité) ; à 40% d'humidité, l'incertitude est d'environ $\pm 4\%$ (d'humidité); à partir de 50% d'humidité, il n'est plus possible de distinguer les humidités par une mesure résistive car les incertitudes d'estimation de l'humidité sont trop importantes. Cette observation est probablement due à l'augmentation de la quantité d'eau libre dans l'échantillon (Lin 1967). Comme montré dans la Figure 135a, quand il n'y a pas d'eau libre dans le bois, le courant électrique circule principalement via les cellules du bois. La diminution de la résistance électrique en fonction de l'humidité est donc directement liée à la quantité d'eau (liée) dans l'échantillon. Cependant, lorsque de l'eau libre commence à se positionner dans les cavités du bois, les chemins de conduction électrique se décalent graduellement vers les cavités qui peuvent être assimilées à des colonnes d'eau continues (Lin 1967) (Figure 135b). Par conséquent, la résistance électrique mesurée est plutôt liée à une humidité locale dans l'échantillon (i.e. eau libre présente dans les cavités du bois) qu'à une humidité globale de l'échantillon (i.e. eau « liée et libre » de la totalité de la structure). Cela peut expliquer pourquoi les incertitudes d'estimation de l'humidité aux humidités élevées ($>20\%$) sont plus grandes par rapport aux humidités faibles ($<20\%$).

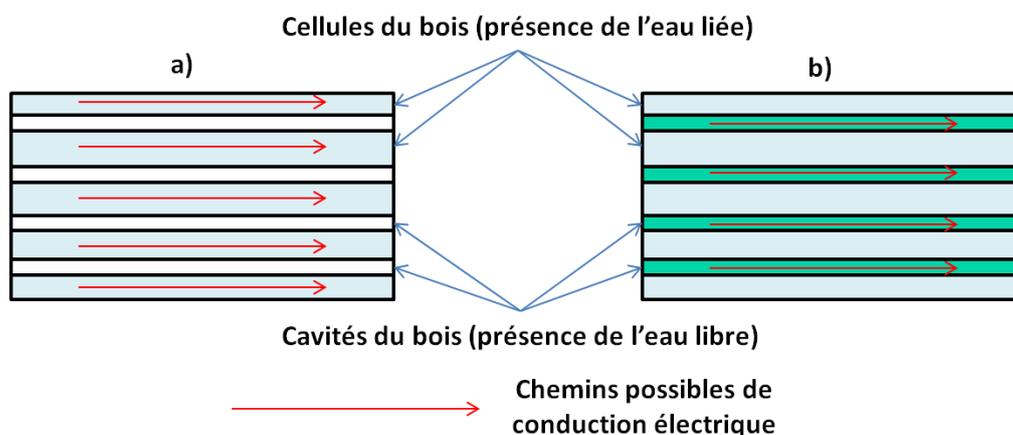


Figure 135: Schématisation de la conduction électrique dans un échantillon de bois : a) avec uniquement de l'eau liée ; b) avec à la fois de l'eau liée et de l'eau libre

- **Comparaison entre les mesures résistives et capacitives**

Nous avons comparé les incertitudes de mesures entre les mesures résistives et les mesures capacitives sur la configuration 4. Les résultats (Figure 136) montrent que les incertitudes d'estimation de l'humidité des deux types de mesures (résistives et capacitives) ont des valeurs proches pour la gamme d'humidité de notre étude, ce qui signifie qu'en terme de précision de mesure, les deux types de mesures sont aussi fiables.

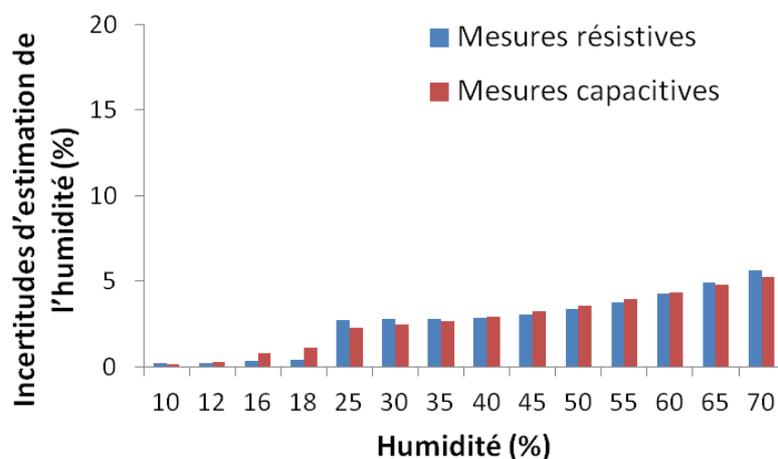


Figure 136: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives et les mesures capacitives pour les échantillons LC (Configuration 4 ; espacement d'électrodes = 33 mm)

Les résultats détaillés des incertitudes d'estimation de l'humidité obtenues avec les autres espacements d'électrodes sont disponibles en « Annexe 6 »

2.3.2.3. Comparaison entre les échantillons simples et les échantillons lamellé-collés

Dans ce sous-paragraphe, nous allons effectuer des comparaisons entre les résultats obtenus sur les échantillons simples et ceux obtenus sur les échantillons LC vis-à-vis des mesures résistives, des mesures capacitives et des incertitudes d'estimation de l'humidité.

- **Mesures résistives**

Concernant les mesures résistives, nous avons précédemment remarqué que pour les échantillons simples, le comportement de la configuration 4 est différent de celui des 3 autres configurations (cf. Figures 122-123). Néanmoins, ce n'est pas le cas pour les échantillons LC, pour lesquels l'ensemble des 4 configurations a des comportements similaires (cf. Figures 130-131). La Figure 137 permet d'apprécier les différentes évolutions des mesures résistives de la configuration 4 obtenues sur les échantillons simples et les échantillons LC.

On peut observer que pour les humidités faibles (<20%), la résistance mesurée sur les échantillons simples est plus élevée que celle mesurée sur les échantillons LC (Figure 137). De plus, la résistance mesurée sur les échantillons LC est plus sensible à la variation d'humidité entre 10% et 20% que sur les échantillons simples. Ces différences peuvent s'expliquer par l'application de la pression de collage, qui a pour conséquence d'améliorer le contact électrique entre les électrodes et le bois (Vermaas 1975).

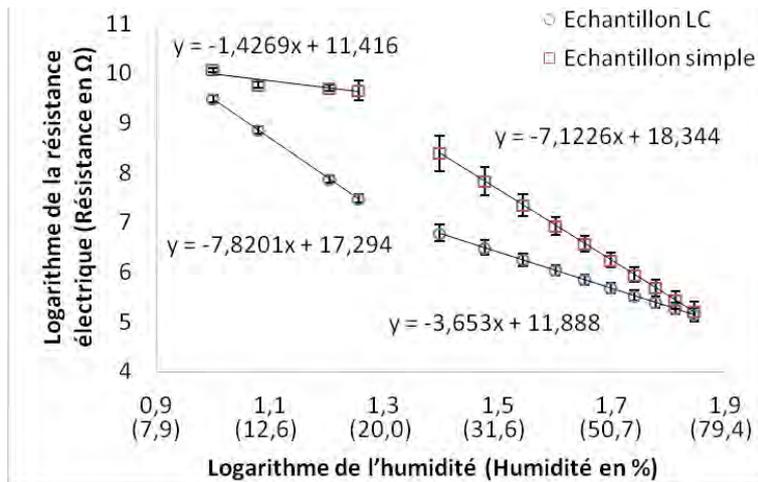


Figure 137: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 4 (Espaceur d'électrodes = 33 mm)

Par ailleurs, pour les humidités supérieures à 20%, de l'eau libre commence à se positionner dans les espaces libres du bois, y compris l'espace entre les électrodes et l'échantillon. Cela peut conduire à une amélioration du contact électrique influencée par la conductivité de l'eau liquide. Par conséquent, la diminution de la résistance électrique sur les échantillons simples devient de plus en plus importante en fonction de l'humidité. Ainsi, en fin d'essais, la résistance mesurée sur les échantillons simples tombe à des valeurs comparables de celles obtenues pour les échantillons LC (Figure 137).

Concernant les configurations 1, 2 et 3 qui utilisent les électrodes « pointe » (Figures 138-140), les différences observées sur les échantillons simples et LC sont beaucoup moins importantes que sur la configuration 4 (Figure 137). Cette observation peut s'expliquer par le fait que dans ces configurations, la pression de collage n'a pas été appliquée directement sur les électrodes de mesure. Par conséquent, la condition de contact électrique n'a pas été modifiée par la pression.

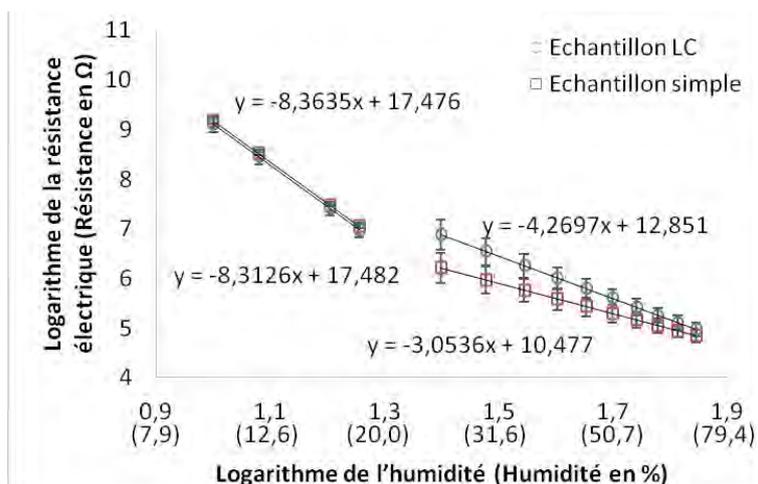


Figure 138: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 1 (Espaceur d'électrodes = 40 mm)

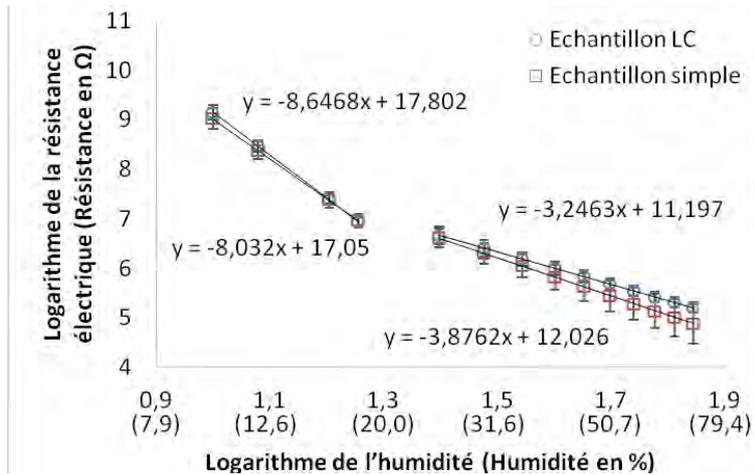


Figure 139: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 2 (Espaceur d'électrodes = 40 mm)

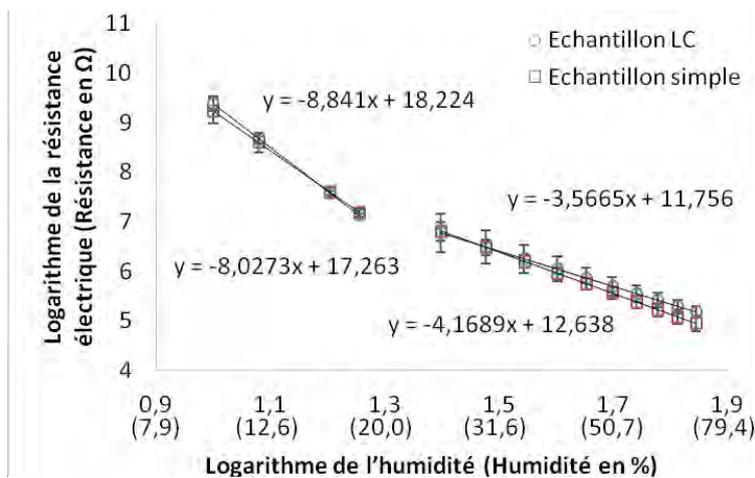


Figure 140: Comparaison des mesures résistives entre les échantillons simples et LC de la configuration 3 (Espaceur d'électrodes = 40 mm)

A première vue, les résultats obtenus et présentés sur les Figures 138-140 sont très proches entre les échantillons simples et LC. Afin de vérifier s'il existe des différences significatives d'un point de vue statistique, nous avons effectué le test LSD de Fisher et les résultats sont présentés sur les Figures 141-143.

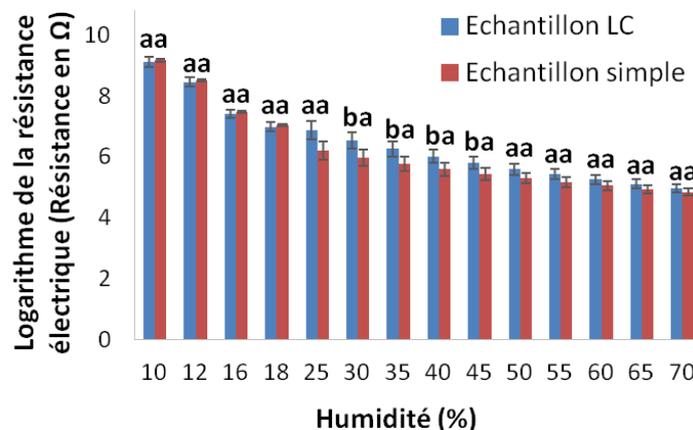


Figure 141: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 1 (Résultats du test LSD de Fisher) (Espaceur d'électrodes = 40 mm)

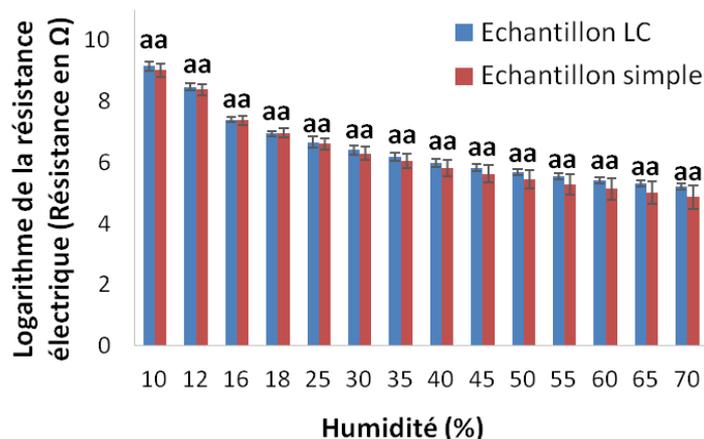


Figure 142: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 2 (Résultats du test LSD de fisher) (Espaceur d'électrodes = 40 mm)

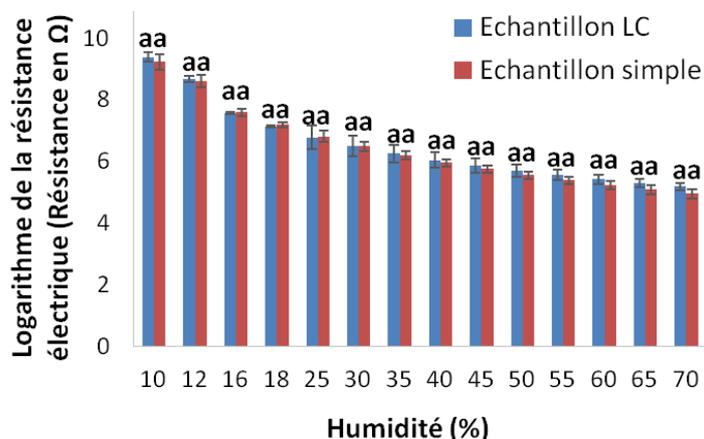


Figure 143: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 3 (Résultats du test LSD de fisher) (Espaceur d'électrodes = 40 mm)

On peut observer sur les Figures 141-143 qu'il n'y a pas de différences significatives entre les échantillons simples et échantillons LC dans la plupart des cas. Le seul cas où on voit des différences significatives concerne la configuration 1 (Figure 141), pour la gamme d'humidité 25%-50% approximativement.

Cette observation pourrait être expliquée par le gradient d'humidité dans l'échantillon lors de la mise en humidification en bassin. Pour expliciter cela, tout d'abord, rappelons que, les électrodes de la configuration 1 ne sont pas isolées sur toute la longueur alors que l'isolation électrique a été assurée dans les trous supérieurs pour les deux autres configurations (cf. Figure 128). Comme mentionné précédemment, le courant électrique va passer sur la zone où la résistance est la plus faible, i.e. la zone la plus humide du bois (James 1994 ; Norberg 1999a). La configuration 1 est donc la configuration la plus sensible à la présence de gradient d'humidité dans l'échantillon parmi ces 3 configurations (1, 2 et 3).

Lors du conditionnement dans l'enceinte climatique, le gradient d'humidité dans l'échantillon est presque homogène et il n'y a donc pas de différence en humidité entre les échantillons simples et les échantillons LC. De ce fait, on ne voit pas de différences significatives sur la résistance électrique entre les deux types d'échantillons (Figure 141). Cependant, lors de la mise en humidification en bassin, le gradient d'humidité dans l'échantillon n'est plus homogène. La zone la plus humide (sur la longueur des électrodes) dans les deux types

d'échantillons de la configuration 1 devient donc différente. Pour les échantillons simples, il s'agit de la zone proche de la surface de l'échantillon, les électrodes mesurent donc plutôt l'humidité proche de la surface de l'éprouvette (Figure 144). Alors que pour les échantillons LC, la zone la plus humide (sur la longueur des électrodes) n'est pas la surface mais est à l'intérieur de l'échantillon, du fait du collage d'une autre lamelle (Figure 144). Par conséquent, on observe des différences significatives sur la résistance électrique pour la gamme d'humidité 25%-50% (Figure 141). Puis, au cours de l'humidification, l'eau libre envahit la totalité de l'échantillon, le chemin de conduction électrique se décale principalement vers les cavités du bois (lumens) et les mesures résistives deviennent moins sensibles au gradient d'humidité dans l'échantillon (cf. Figure 135). Par conséquent, on ne voit donc pas de différences significatives entre les échantillons simples et les échantillons LC à partir de 50% d'humidité (Figure 141).

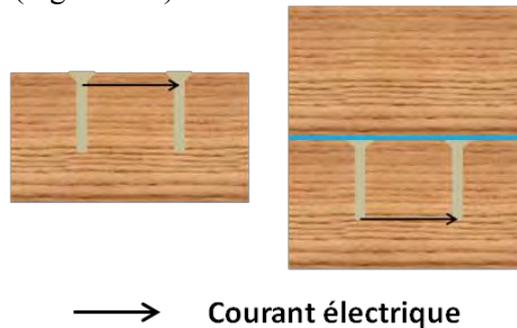


Figure 144: Schématisation du passage du courant pour la configuration 1

Les résultats des mesures résistives obtenus avec les autres espacements d'électrodes sont disponibles en « Annexe 7 »

- **Mesures capacitives**

Concernant les mesures capacitives, selon les résultats obtenus, et qui sont présentés sur les Figures 145-146, on peut tout d'abord constater que la capacité des échantillons LC est en général plus importante que celle des échantillons simples. Ce fait peut être lié à l'application de la pression de collage. En effet, la surface de contact effective entre les électrodes et l'échantillon augmente (cf. Figure 95, « 2.1.2 Faisabilité des mesures électriques dans le bois »), ce qui a pour conséquence d'avoir une capacité mesurée plus élevée par rapport aux échantillons simples (Dervos et al. 1998; Marjanović et al. 2014).

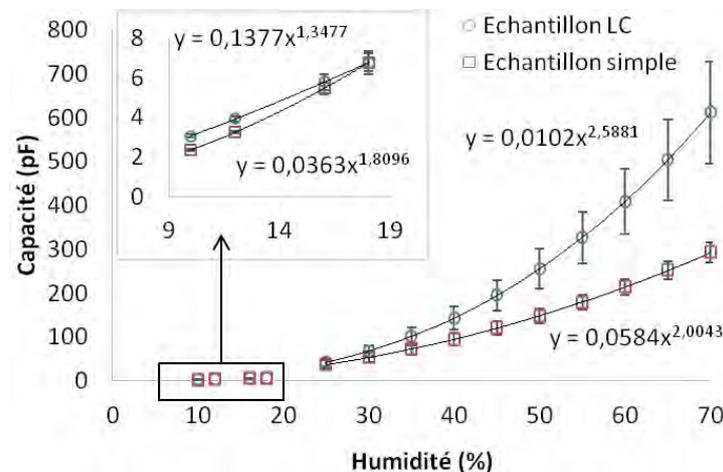


Figure 145: Capacité en fonction de l'humidité pour les échantillons simples et LC de C4A (espacement d'électrodes = 33 mm)

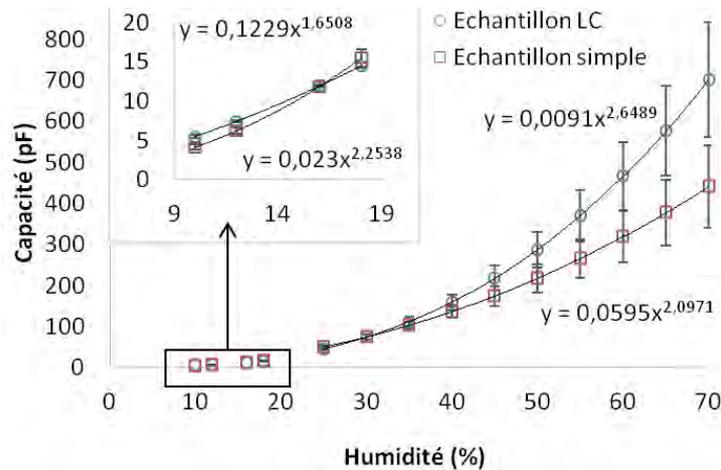


Figure 146: Capacité en fonction de l'humidité pour les échantillons simples et LC de C4B (espacement d'électrodes = 16,5 mm)

On peut également voir que la différence de capacité de ces deux types d'échantillons augmente avec l'augmentation de l'humidité (Figures 145-146). En effet, la capacité mesurée est la contribution de tous les composants dipôles dans le matériau (groupes hydroxyles, molécules de l'eau libre/liée etc.) (Skaar 1988). Comme les échantillons LC ont deux lamelles de plus que les échantillons simples, même si le dos des électrodes est isolé par la présence de la colle polyuréthane, la présence d'eau dans les deux lamelles extérieures peut affecter le champ de déplacement électrique autour des électrodes. En conséquence, il se peut que les composants dipôles dans les deux lamelles extérieures contribuent aussi à la capacité mesurée. Cela peut expliquer pourquoi la différence de capacité entre les échantillons simples et les échantillons LC augmente en fonction de l'humidité.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons tout d'abord effectué des mesures capacitatives sur les échantillons simples humidifiés sans essuyer l'eau sur les surfaces extérieures. Par la suite, nous avons essuyé complètement l'eau sur les surfaces extérieures et effectué les mêmes mesures. Les résultats (Figure 147) montrent que la capacité mesurée avant essuyage de l'eau sur les surfaces est en moyenne 10% plus grande que celle sur échantillons après essuyage, ce qui peut supporter notre hypothèse.

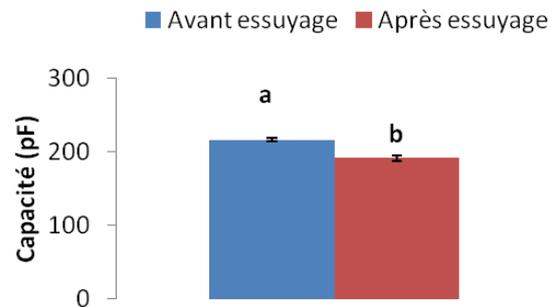


Figure 147: Mesure de capacité sur les échantillons simples avant et après essuyage de l'eau sur les surfaces extérieures

- ***Incertitudes d'estimation de l'humidité***

Pour ce qui est des incertitudes d'estimation de l'humidité, nous avons constaté que celles obtenues sur les échantillons simples sont de manière générale plus élevées que celles sur échantillons LC, comme présenté sur la Figure 148, qui montre un exemple sur la configuration 1. En effet, pour les configurations utilisant les électrodes « pointe » (1, 2 et 3), cette observation pourrait s'expliquer par le collage d'une autre lamelle, car cette dernière peut empêcher l'infiltration d'eau à partir des fissures potentiellement générées par le perçage. Pour expliciter cela, on peut s'appuyer sur l'exemple de la configuration 2, où on avait constaté que les incertitudes d'estimation de l'humidité obtenues sur les échantillons simples

montrent une évolution croissante en fonction de l'humidité après immersion en bassins (>20% d'humidité) (Figure 149). Une des explications évoquées précédemment (« 2.3.1 Suivi de l'humidité dans les échantillons simples ») concerne une probable corrosion au fond des trous. Sur la Figure 149, si on regarde les incertitudes obtenues sur les échantillons LC, elles restent constantes (environ 4% d'humidité) pour cette plage d'humidité (>20%). Cette observation pourrait supposer qu'il n'y a pas de corrosion pour les échantillons LC, probablement du fait du collage d'une autre lamelle.

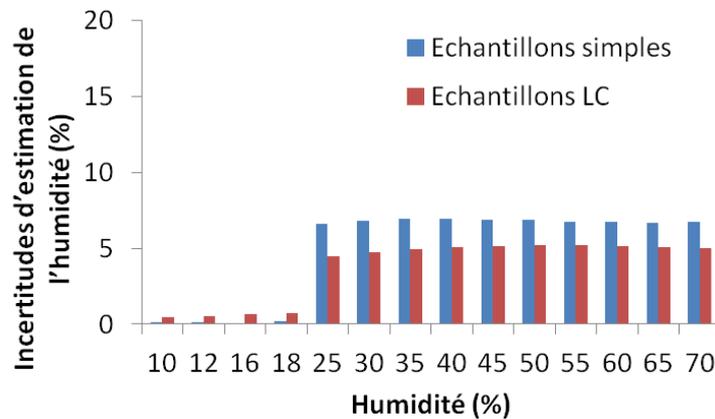


Figure 148: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 1, espacement d'électrodes = 40 mm)

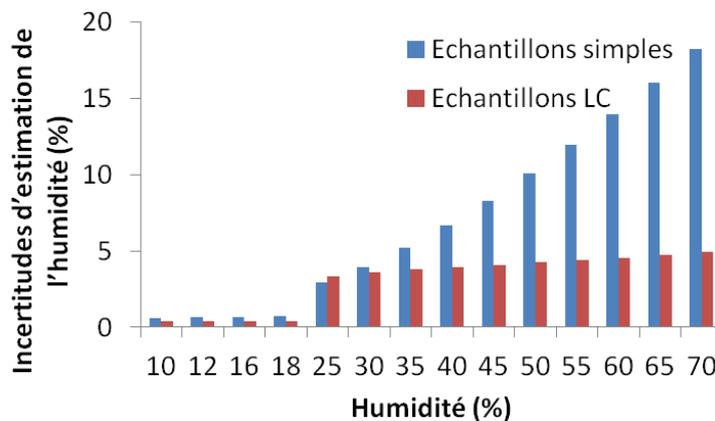


Figure 149: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 2, espacement d'électrodes = 40 mm)

En ce qui concerne la configuration 4, on avait constaté que des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives aux humidités faibles (<20%) étaient très élevées (>10%, cf. Figure 129, « 2.3.1 Suivi de l'humidité dans les échantillons simples »), signifiant qu'il n'est pas possible de mesurer précisément l'humidité via la méthode résistive avec la configuration 4 dans la plage d'humidité 10%-20%. Néanmoins, sur les échantillons LC, les incertitudes aux humidités faibles sont inférieures de 1% d'humidité (Figure 150). Cette observation est sûrement liée au fait que l'application de la pression de collage peut améliorer le contact électrique entre le bois et les électrodes. Un meilleur contact électrique électrode/bois implique une résistance électrique mesurée plus faible (cf. la Figure 137 dans ce sous-paragraphe) et une meilleure estimation de la valeur de résistance en fonction de l'humidité.

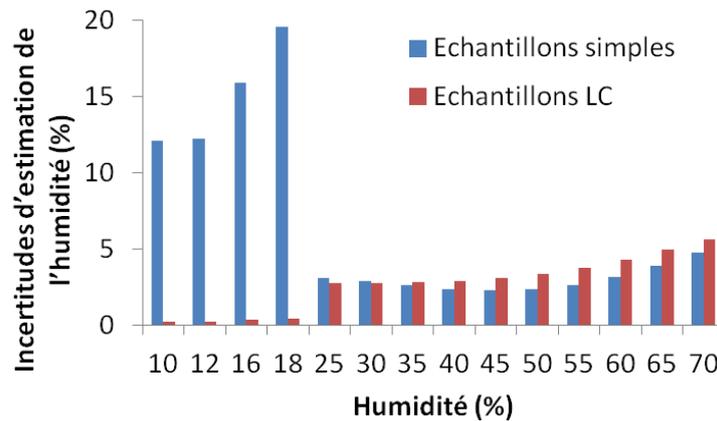


Figure 150: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 4, espacement d'électrodes = 33 mm)

Concernant les mesures capacitives, les incertitudes d'estimation de l'humidité des échantillons simples et des échantillons LC sont très proches (Figure 151). Cela suppose qu'en termes d'incertitudes d'estimation de l'humidité, les performances de la mesure de l'humidité par mesures capacitives (avec la configuration 4) sont moins affectées par le processus de fabrication utilisé, et notamment la pression de collage.

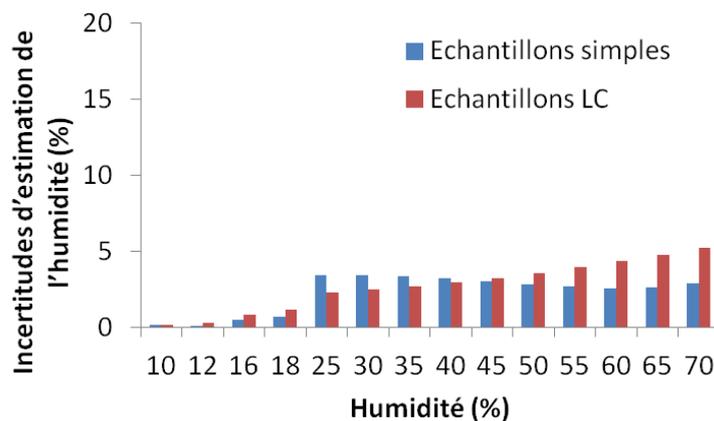


Figure 151: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures capacitives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 4, espacement d'électrodes = 33 mm)

Les résultats des incertitudes d'estimation de l'humidité obtenus avec les autres espacements d'électrodes sont disponibles en « Annexe 6 »

2.3.2.4. Conclusion

Au regard des discussions élaborées dans ce paragraphe, nous pouvons confirmer le potentiel du suivi de l'humidité par l'ensemble des 4 configurations de mesure dans les échantillons LC. Qui plus est, grâce à une étude de régression de l'évolution de la résistance électrique en fonction de l'humidité, il se révèle que les 4 configurations de mesures présentent des lois de comportement comparables pour les échantillons LC. Cela suppose que l'on peut utiliser des modèles d'étalonnage similaires dans le cadre du suivi de l'humidité des structures LC par mesures résistives, quel que soit le type d'électrodes utilisé.

De plus, les incertitudes d'estimation de l'humidité ont aussi été évaluées dans cette étude. Il

ressort que pour la plupart des mesures, l'incertitude d'estimation de l'humidité est inférieure à $\pm 1\%$ (d'humidité) pour les humidités inférieures à 20%, et inférieure à $\pm 5\%$ (d'humidité) pour les humidités supérieures à 20%. En effet, lorsqu'il y a la présence de l'eau libre dans les cavités du bois (humidité $> 20\%$), la mesure est plutôt liée à une humidité locale qu'à une humidité globale de l'échantillon, car le courant électrique circule préférentiellement sur les zones les plus humides, i.e. les cavités du bois qui peuvent être assimilées à des colonnes d'eau continues.

Enfin, nous avons effectué une comparaison entre les résultats obtenus sur les échantillons simples et ceux obtenus sur les échantillons LC vis-à-vis des mesures résistives, des mesures capacitives et des incertitudes d'estimation de l'humidité, afin d'étudier l'influence de la pression de collage sur ces dernières.

Pour les mesures résistives, la pression de collage a une influence uniquement sur la configuration 4. En effet, pour la configuration 4, la résistance électrique obtenue sur les échantillons LC est en général moins importante que celle obtenue sur les échantillons simples. Qui plus est, grâce à l'application de la pression de collage, l'évolution de la résistance électrique en fonction de l'humidité de la configuration 4 devient comparable à celle des autres configurations. Tous ces constats sont liés à l'application de la pression de collage, qui a pour effet d'améliorer le contact électrique électrode/bois. Quant aux configurations 1, 2 et 3, aucune influence n'a été observée car la pression de collage n'a pas été appliquée directement sur les électrodes de mesures.

Concernant les mesures capacitives, il a été observé que la capacité des échantillons LC est en général plus importante que celle des échantillons simples. Ceci est aussi lié à l'application de la pression de collage, qui a l'effet d'améliorer le contact électrique. De plus, nous avons observé que la différence de capacité de ces deux types d'échantillons augmente avec l'augmentation de l'humidité. Cette observation a été expliquée par la contribution à la capacité mesurée des composants dipôles présents dans les deux lamelles extérieures des échantillons LC.

En ce qui concerne les incertitudes d'estimation de l'humidité, il ressort que les incertitudes obtenues sur les échantillons LC sont plus faibles de manière générale que celles obtenues sur les échantillons simples. Les explications de ce phénomène reposent sur le collage des lamelles supplémentaires dans le cas des échantillons LC. Pour les configurations 1, 2 et 3, ces lamelles peuvent protéger plus efficacement les électrodes « pointe » du risque de corrosion lié à l'infiltration d'eau par rapport aux échantillons simples. Concernant la configuration 4, elles peuvent créer une meilleure condition de contact électrique pour les électrodes « surfaciques » grâce à l'application de la pression de collage. Cela engendre, pour les mesures résistives, une résistance électrique mesurée plus faible et une meilleure estimation de la valeur de résistance en fonction de l'humidité. Quant aux incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures capacitives, elles sont moins affectées par la pression de collage.

Cette comparaison entre les résultats obtenus sur les échantillons simples et ceux obtenus sur les échantillons LC a mis en évidence l'avantage de l'application de la pression de collage. En effet, cette dernière permet d'avoir un meilleur contact électrique électrode/bois. Qui plus est, elle permet d'avoir une estimation plus précise de l'humidité.

Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter les analyses réalisées sur l'influence de l'espacement des électrodes.

2.3.3. Influence de l'espacement des électrodes

Dans cette section, nous allons aborder les résultats concernant l'influence de l'espacement des électrodes. Nous avons décidé d'étudier cela au regard des informations issues de la littérature (cf. « 1.3.1 Méthodes électriques »). Par ailleurs, suite aux constats dans le travail de Tamme et al. (2012), concernant la dissociation entre la résistance du bois et la résistance d'interface afin de connaître l'influence de l'humidité sur ces différentes résistances, il nous a paru intéressant d'étudier cela avec davantage d'échantillons. Cela nous a également permis d'étudier l'influence de l'espacement entre les électrodes sur les mesures capacitatives, dont aucune étude à notre connaissance n'existe actuellement dans la littérature.

Dans un premier temps, les analyses sur les échantillons simples seront présentées. Ensuite, nous parlerons des résultats obtenus sur les échantillons LC, que l'on comparera avec les résultats obtenus sur les échantillons simples.

2.3.3.1. Influence de l'espacement des électrodes dans les échantillons simples

Afin d'étudier l'influence de l'espacement des électrodes sur les échantillons simples, nous avons comparé les résultats des mesures (résistives/capacitives) obtenus avec les différents espacements d'électrodes. Le test LSD de Fisher au niveau de confiance de 95% a été effectué afin de mettre en évidence s'il existe des différences significatives entre les résultats. Les résultats pour les mesures résistives et les mesures capacitatives seront présentés dans deux sous-paragraphes séparés.

- *Mesures résistives*

Concernant les configurations (1, 2 et 3) qui utilisent les électrodes « pointe », nous n'avons pas observé de différences significatives entre les résultats obtenus avec les différents espacements d'électrodes. Comme le montre la Figure 154 (configuration 1), selon les résultats du test LSD de Fisher, les résistances obtenues avec les électrodes espacées de 40 mm (R_{40}) ne montrent pas de différences significatives avec celles obtenues avec les électrodes espacées de 20 mm (R_{20}) sur la plage d'humidité considérée, à savoir 10%-70%.

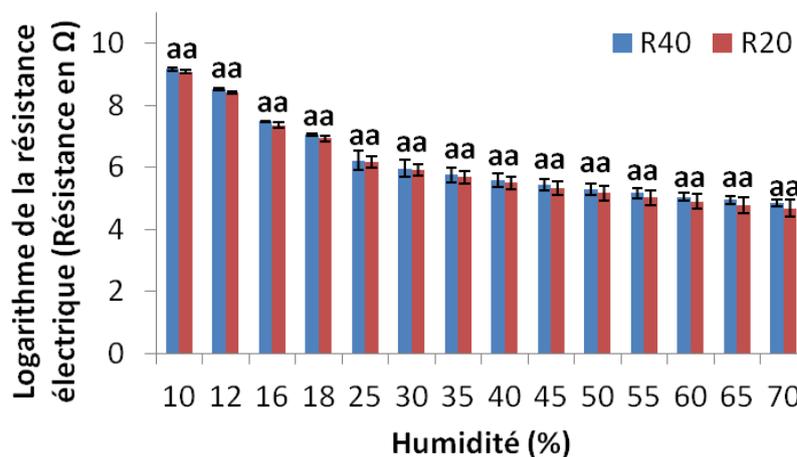


Figure 152: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 1, échantillon simple)

Cette observation va à l'encontre de l'Equation 4 (Page 30, « 1.3.1 Méthodes électriques ») qui montre que la résistance électrique du conducteur est proportionnelle à sa longueur. Toutefois, des observations similaires ont été rapportées dans la littérature en utilisant des électrodes « pointe ». Forsén et al. (2000) ont rapporté qu'ils n'ont pas observé de différences

dans leur étude avec quatre espacements d'électrodes différents (20 mm, 30 mm, 60 mm et 120 mm) sur des échantillons de Pin Nordique pour des mesures dans la direction longitudinale (cf. Figure 45, Page 34, « 1.3.1 Méthodes électriques »). Ceci peut s'expliquer par le fait que la résistance engendrée par l'interface de contact est beaucoup plus grande que celle engendrée par le matériau (Norberg 1999a). Skaar (1964) a montré par modélisation que la part la plus importante de la résistance se concentre au voisinage de l'électrode (cf. Figure 44, Page 33, « 1.3.1 Méthodes électriques »).

Dans notre étude, afin de mieux comprendre ce phénomène, nous avons utilisé les équations données précédemment dans le paragraphe « 2.2.3 Traitement des données de mesures » pour dissocier la résistance du bois (Equation 15, Page 81) et la résistance d'interface (Equation 16, Page 81) aux différentes humidités. Par la suite, nous avons calculé la contribution (en pourcentage) des résistances d'interface et du bois par rapport à la résistance totale mesurée. Les résultats pour la configuration 1 sont donnés sur la Figure 153. Il est à préciser que la contribution de la résistance d'interface comprend la somme des résistances des deux interfaces. Comme le montre la Figure 153, la résistance d'interface contribue à une part importante de la résistance totale mesurée, ce qui peut étayer l'observation sur la Figure 152.

L'observation sur les configurations 2 et 3 est identique à celle de la configuration 1. Leurs résultats sont présentés en « Annexe 8 »

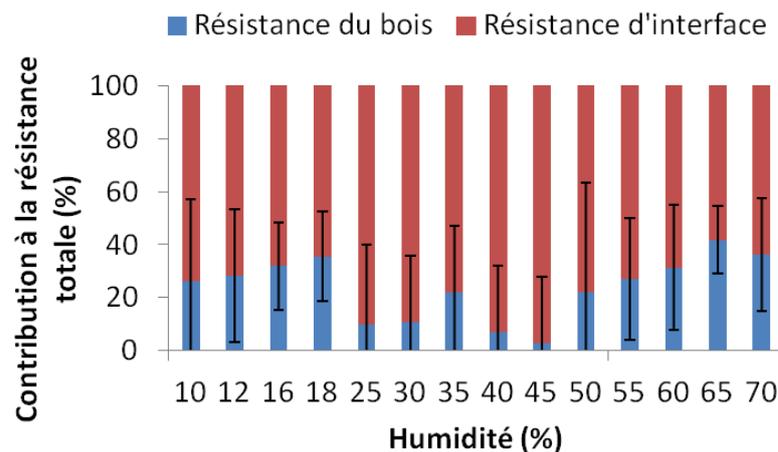


Figure 153: Contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale mesurée (Configuration 1, échantillon simple, espacement d'électrodes = 40 mm)

En ce qui concerne les résultats obtenus avec les électrodes « surfaciques » (configuration 4), les résistances électriques obtenues sur les échantillons de 33 mm d'épaisseur (R_{33}) et celles obtenues sur les échantillons de 16,5 mm d'épaisseur ($R_{16,5}$) sont présentées sur la Figure 154. On peut remarquer qu'il n'y a pas de différences significatives entre R_{33} et $R_{16,5}$ pour la plupart des humidités. Comme pour les configurations 1, 2 et 3, nous avons essayé là encore de dissocier la résistance du bois (Equation 17, Page 81) de la résistance d'interface (Equation 18, Page 81) à l'aide des équations présentées précédemment dans le paragraphe « 2.2.3 Traitement des données de mesures ». Cependant, nous n'avons pas pu obtenir de conclusions nettes car nos valeurs ne sont pas facilement exploitables pour le calcul de la résistance du bois. En effet, les valeurs moyennes des résistances mesurées sur les échantillons les moins épais (C4BS, 16,5 mm) sont souvent plus grandes que celles mesurées sur les échantillons les plus épais (C4AS, 33 mm). Rappelons que, selon l'Equation 17, R_{33} devrait être plus grande que $R_{16,5}$ pour que la résistance du bois soit positive.

Cette observation n'est pas cohérente avec l'équation théorique (Equation 4, Page 30, « 1.3.1 Méthodes électriques ») qui montre que la résistance électrique du conducteur doit être proportionnelle à sa longueur. Tamme et al. (2012) ont fait les mêmes remarques dans leur étude en utilisant les électrodes de type « pointe ». Les auteurs ont attribué cela à une probable corrosion d'une ou plusieurs électrodes. Nous pensons que les faits suivants pourraient aussi expliquer notre observation. Une des premières causes qui pourraient expliquer ces difficultés d'analyse concerne l'hétérogénéité du matériau bois. En effet, pour la configuration 4, les deux espacements d'électrodes différents ont été réalisés à l'aide des deux types d'échantillons d'épaisseurs différentes (cf. Figure 90 d et e, Page 61). Cela n'est pas comme le cas des configurations 1, 2 et 3, où les deux espacements différents des électrodes ont été réalisés sur le même échantillon (cf. Figure 90 a-c, Page 61). De ce fait, l'hétérogénéité du bois pose plus de difficultés d'analyse sur l'exploitation des résultats pour la configuration 4 que pour les configurations 1, 2 et 3.

De plus, lorsque l'on applique l'Equation 17 (résistance du bois) et l'Equation 18 (résistance d'interface), on suppose que les conditions d'interface sont identiques pour toutes les interfaces. Néanmoins, nous n'avons pas mis en place un protocole assez reproductible (ex. pression constante et contrôlée) pour le collage des électrodes surfaciques sur les échantillons simples. De ce fait, les conditions de contact électrique ne sont pas identiques pour toutes les interfaces des échantillons de la configuration 4. Cela peut également expliquer en partie pourquoi les résultats de la configuration 4 sur le calcul de la résistance du bois et la résistance d'interface ne sont pas totalement exploitables.

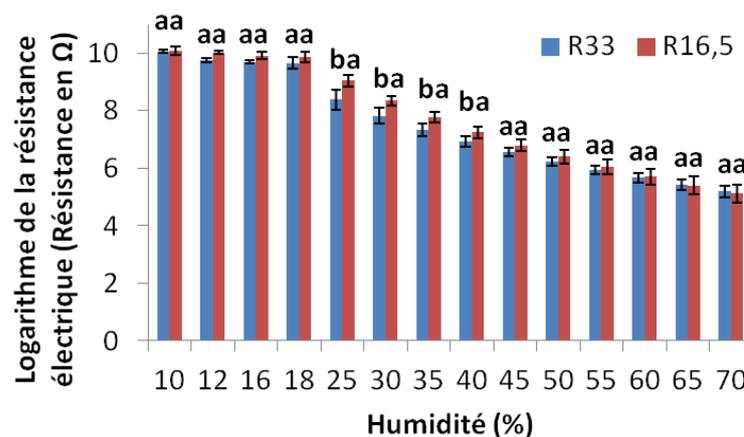


Figure 154: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 4, échantillon simple)

Par ailleurs, sur la Figure 154, on voit que R_{33} et $R_{16,5}$ montrent des différences significatives pour la plage d'humidité 25%-40%. Nous pensons que ce phénomène est lié au gradient d'humidité dans l'échantillon lors de la mise en humidification des échantillons en bassin, comme ce qui a été observé et expliqué pour la Figure 141 (Page 95) dans le paragraphe « 2.3.2.3 Comparaison entre les échantillons simples et les échantillons lamellé-collés ». En effet, selon les résultats des cinétiques d'humidification (Figure 117, Page 79), le temps nécessaire pour atteindre à un taux d'humidité égal compris entre 25% et 40% ne montre pas de différence significative entre les échantillons C4AS et les échantillons C4BS. Or, les échantillons C4AS (33 mm d'épaisseur) sont plus grands que les échantillons C4BS (16,5 mm d'épaisseur). De ce fait, l'humidité pour les échantillons C4AS est moins bien répartie par rapport aux échantillons C4BS. L'humidité proche de la surface des échantillons C4AS peut donc être plus importante que celle des échantillons C4BS (à taux d'humidité égal). Selon la

littérature (Stamm 1930 ; Vermaas 1982), les mesures résistives par électrodes surfaciques sont susceptibles d'être affectées par le gradient d'humidité proche de la surface, ce qui peut expliquer pourquoi lors de la mise en humidification des échantillons en bassin, on voit des différences significatives entre R_{33} et $R_{16,5}$.

- **Mesures capacitives**

Les résultats obtenus avec les mesures capacitives sur les échantillons simples de différentes épaisseurs (33 mm et 16,5 mm) sont présentés sur la Figure 155. On peut observer que la capacité mesurée sur les échantillons les moins épais ($C_{16,5}$) est plus grande que celle obtenue sur les échantillons les plus épais (C_{33}). Cette observation peut être expliquée en partie par l'équation théorique (Equation 5, Page 30, « 1.3.1 Méthodes électriques ») qui montre que quand l'épaisseur du matériau est réduite de moitié, la capacité est doublée. Effectivement, le ratio $C_{16,5}/C_{33}$ (calculé à partir des valeurs moyennes) dans notre étude est d'environ 1,8. La légère différence par rapport à la théorie est probablement liée à la contribution de la capacité d'interface (Tereshchenko et al. 2011).

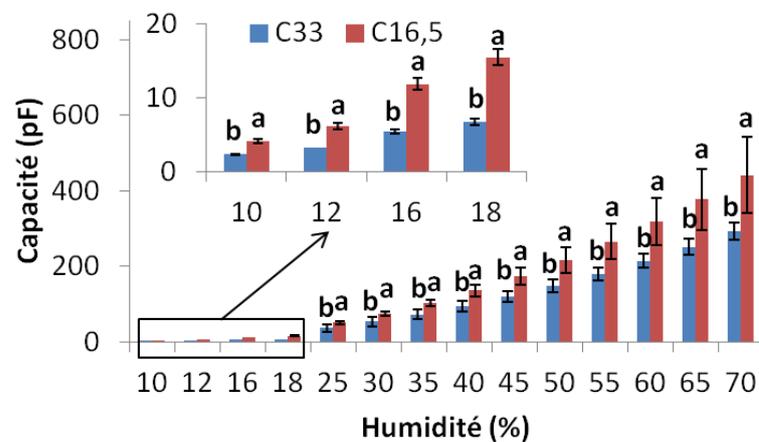


Figure 155: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures capacitives (Configuration 4, échantillon simple)

Pour notre étude, nous avons utilisé les équations données précédemment dans le paragraphe « 2.3.3 Traitement des données de mesures » pour dissocier la capacité du bois (Equation 21, Page 81) et la capacité d'interface (Equation 22, Page 81). Nous avons ainsi calculé la contribution en pourcentage de ces dernières par rapport à la capacité totale mesurée. Les résultats sont donnés sur la Figure 156. Il est à préciser que la contribution de la capacité d'interface comprend la somme des deux interfaces. Sur la Figure 156, on peut observer que la contribution de la capacité d'interface par rapport à la capacité totale reste quasiment constante (environ 8,8%) pour la gamme d'humidité étudiée (10%-70%), ce qui peut justifier notre observation.

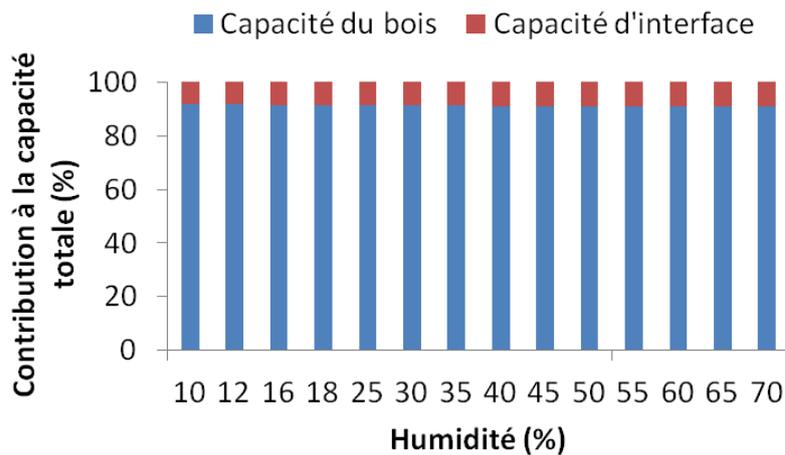


Figure 156: Contribution de la capacité du bois et de la capacité d'interface par rapport à la capacité totale mesurée (Configuration 4, échantillon simple, espacement d'électrodes = 33 mm)

Par ailleurs, afin de prendre en compte les problèmes d'hétérogénéité du matériau sur l'analyse des résultats de la configuration 4, les calculs des différentes contributions ont été réalisés à partir des valeurs moyennes de chaque série d'échantillons d'épaisseurs différentes. Par conséquent, nous n'avons pas mis de barres d'erreurs pour les résultats de la configuration 4 (cf. Figure 156).

Dans le sous-paragraphe suivant, nous allons présenter les résultats obtenus sur les échantillons LC.

2.3.3.2. Influence de l'espacement des électrodes dans les échantillons lamellé-collés

De la même manière que ce qui a été fait pour les échantillons simples, nous avons comparé les résultats obtenus avec les différents espacements d'électrodes sur les échantillons LC, et ce, à l'aide du test LSD de Fisher au niveau de confiance de 95%. Les résultats pour les mesures résistives et les mesures capacitives sont présentés dans deux sous-paragraphe séparés.

- **Mesures résistives**

Concernant les configurations (1, 2 et 3) utilisant les électrodes « pointe », nous n'avons pas observé de différences significatives entre les résultats obtenus avec les différents espacements d'électrodes. Comme le montre la Figure 157 (configuration 1), selon les résultats du test LSD de Fisher, les résistances obtenues avec les électrodes espacées de 40 mm (R_{40}) ne montrent pas de différences significatives avec celles obtenues avec les électrodes espacées de 20 mm (R_{20}) pour les humidités comprises entre 10% et 70%. Cette observation est identique à celle que l'on a faite pour les échantillons simples (cf. Figure 152).

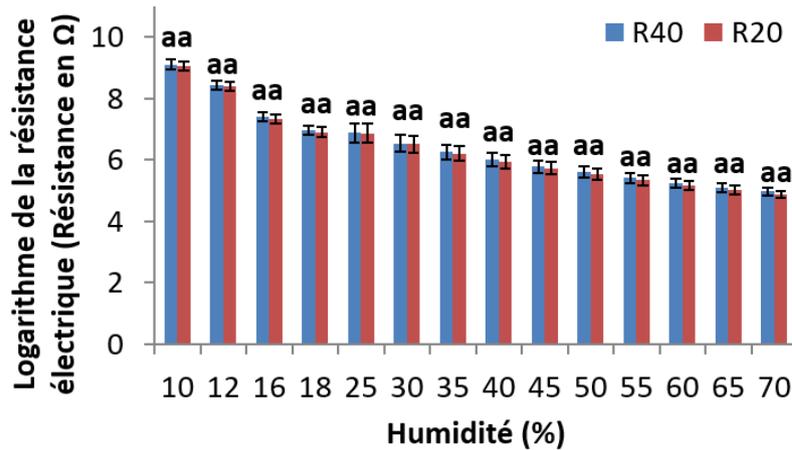


Figure 157: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 1, échantillon LC)

Nous avons également tracé la contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale pour les différentes humidités (Figure 158). Comme le montre la Figure 158, la résistance d'interface contribue à une part importante de la résistance totale mesurée, ce qui peut étayer l'observation faite sur la Figure 157. Cette observation est identique à celle faite sur la Figure 153. On constate que les écart-types (présentés par les barres d'erreur) des échantillons LC (cf. Figure 158) sont plus petits que ceux obtenus sur les échantillons simples (cf. Figure 153). Cette observation est liée au fait que les incertitudes de mesures sur les échantillons LC sont moins élevées, ce qui a été déjà mis en évidence dans le paragraphe « 2.3.2.3 Comparaison entre les échantillons simples et les échantillons lamellé-collés ».

L'observation sur les configurations 2 et 3 est identique à celle de la configuration 1. Leurs résultats sont présentés en « Annexe 7 »

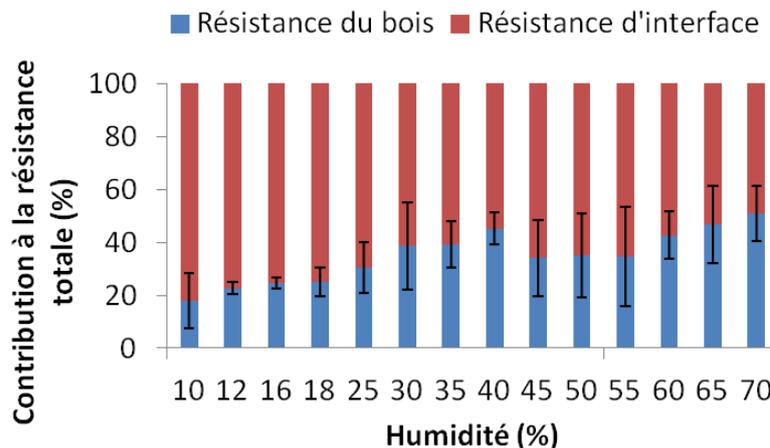


Figure 158: Contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale mesurée (Configuration 1, échantillon LC, espacement d'électrodes = 40 mm)

En ce qui concerne les résultats obtenus avec les électrodes « surfaciques » (configuration 4), les résistances électriques obtenues sur les échantillons LC de 33 mm d'épaisseur (R_{33}) et celles obtenues sur les échantillons de 16,5 mm d'épaisseur ($R_{16,5}$) sont présentées sur la Figure 159. On peut observer qu'il n'y a pas de différences significatives entre les résistances

obtenues sur les échantillons de différentes épaisseurs pour les humidités de 10% à 35%. Cependant, à partir de 40% d'humidité, on commence à observer une différence significative.

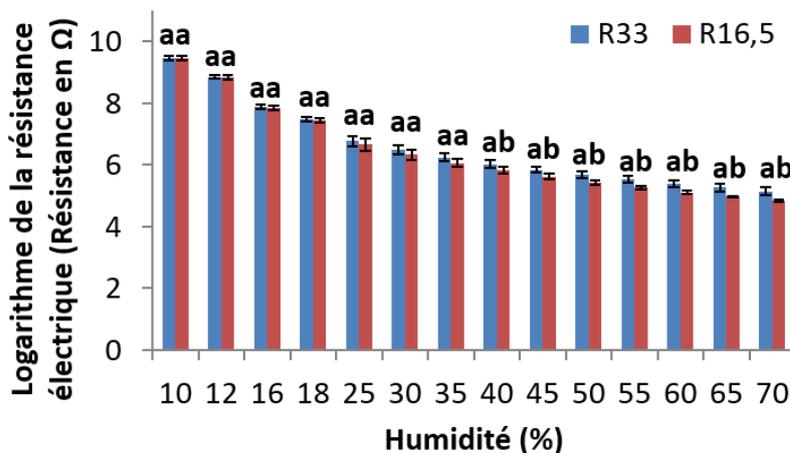


Figure 159: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 4, échantillon LC)

Afin d'expliquer ce phénomène, nous avons calculé la contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface (calculée avec l'Equation 18) par rapport à la résistance totale mesurée. Les résultats sont présentés sur la Figure 160. On peut observer que la contribution de la résistance d'interface présente une évolution décroissante en fonction de l'humidité, ce qui peut étayer notre observation faite sur la Figure 159 à partir de 40% d'humidité.

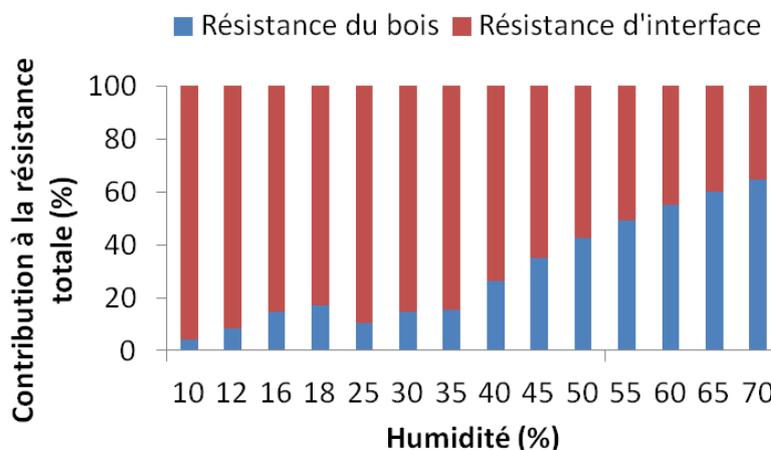


Figure 160: Contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale mesurée (Configuration 4, échantillon LC, espacement d'électrodes = 33 mm)

En effet, quand l'humidité est faible (surtout en-dessous de 20%), la résistance d'interface (>80% de la contribution à la résistance totale) est trop importante devant la résistance du bois du fait de la rugosité de surface, ce qui a pour effet de diminuer la surface de contact effective. On ne peut donc pas différencier les résultats obtenus avec les échantillons de différentes épaisseurs sur cette plage d'humidité. Néanmoins, lorsque de l'eau liquide commence à occuper les espaces libres dans le bois, elle entre graduellement dans l'espace entre les électrodes et l'échantillon. Par conséquent, le contact électrique à l'interface est favorisé grâce à la conductivité de l'eau. Ceci peut expliquer pourquoi on voit que la contribution de la résistance d'interface diminue avec l'augmentation de l'humidité, et plus particulièrement au-

delà du PSF (27% pour le Douglas (Gérard et al. 2011)).

On observe donc un comportement différent entre les échantillons simples et les échantillons LC pour la Configuration 4. Ces 2 séries de résultats mettent donc encore une fois en évidence l'impact important de la pression de collage (qui est répétable et contrôlée) sur la qualité et la reproductibilité du contact électrique électrode/bois.

- **Mesures capacitives**

Les résultats obtenus avec les mesures capacitives sur les échantillons LC de différentes épaisseurs sont présentés sur la Figure 161. On peut tout d'abord constater que pour les humidités faibles (<20%), la capacité mesurée sur les échantillons les moins épais ($C_{16,5}$) est plus grande que celle obtenue sur les échantillons les plus épais (C_{33}). Effectivement, le ratio $C_{16,5}/C_{33}$ est d'environ 1,8, ce qui est identique à l'observation faite sur les échantillons simples. Cela est en accord avec l'équation théorique (Equation 5, Page 30, « 1.3.1 Méthodes électriques ») qui montre que quand l'épaisseur du matériau est réduite de moitié, la capacité est doublée. La légère différence par rapport à la théorie peut être attribuée à la contribution de la capacité d'interface (Tereshchenko et al. 2011), comme expliqué précédemment pour les échantillons simples (cf. Figure 161).

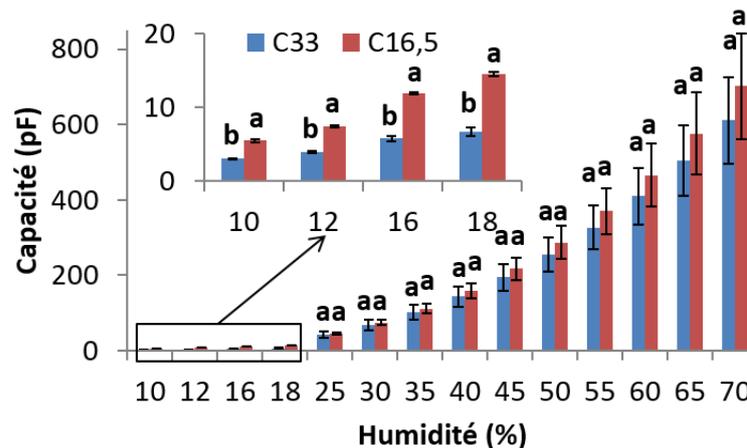


Figure 161: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures capacitives (Configuration 4, échantillon LC)

Cependant, pour les humidités plus élevées (>20%), on observe que la différence entre $C_{16,5}$ et C_{33} devient non significative (Figure 161). Ceci peut être expliqué par l'évolution de la contribution de la capacité d'interface (calculée à l'aide de l'Equation 22, Page 81) en fonction de l'humidité. Comme le montre la Figure 162, la contribution de la capacité d'interface augmente en fonction de l'humidité pour les échantillons LC. Cette observation n'est pas identique à celle faite sur les échantillons simples, où on avait observé que la contribution de la capacité reste constante en fonction de l'humidité (cf. Figure 162). Ces observations différentes sont probablement liées au fait que les échantillons LC ont deux lamelles de plus à l'extérieur par rapport aux échantillons simples. De ce fait, les composants dipôles des deux lamelles extérieures peuvent influencer le champ de déplacement électrique autour des électrodes, ce qui déjà a été mis en évidence dans le paragraphe « 2.3.2.3 Comparaison entre les échantillons simples et les échantillons lamellé-collés ». En effet, avec l'augmentation de l'humidité, de l'eau se positionne petit à petit dans les espaces libres ou dans les parois cellulaires des échantillons LC, y compris dans les zones proches de l'interface. Selon Torgovnikov (1993), la CD (Constante Diélectrique, proportionnelle à la

capacité, cf. Equation 4) de l'eau liquide ($CD \approx 80$) est beaucoup plus importante que celle de l'air (qui était présent dans les cavités du bois, $CD \approx 1$) ou celle du bois anhydre ($CD \approx 4-5$). Qui plus est, la capacité d'interface des échantillons LC calculée à l'aide de l'Equation 22 (Page 81) comprend non seulement la contribution des composants dipôles à l'interface entre les lamelles, mais aussi la contribution des composants dipôles dans les deux lamelles extérieures. En d'autres termes, la capacité d'interface calculée pour les échantillons LC n'est pas liée uniquement aux propriétés de l'interface, mais aussi aux propriétés des lamelles extérieures. Par conséquent, l'équation utilisée (Equation 22) peut être faussée à cause de la présence des deux lamelles extérieures. On voit donc que la contribution de la capacité d'interface calculée avec l'Equation 22 augmente en fonction de l'humidité pour les échantillons LC (Figure 162).

Pourtant, la présence des lamelles extérieures n'influence pas la faisabilité du suivi de l'humidité par mesures capacitatives dans les bois LC, tant que le modèle de mesure est étalonné selon les dimensions standardisées des poutres LC.

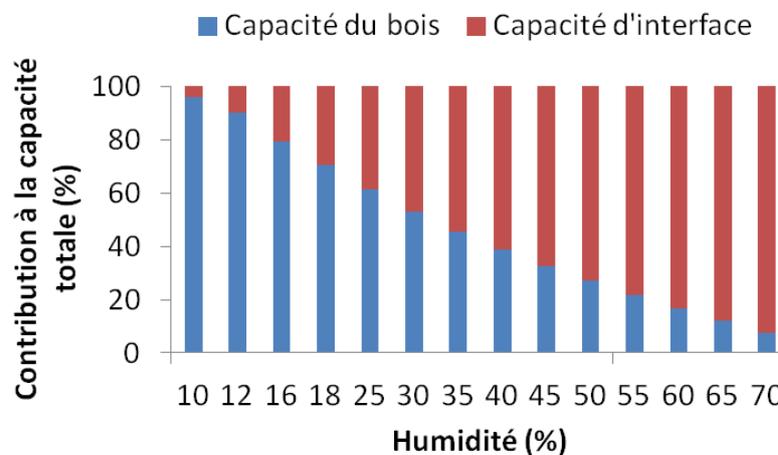


Figure 162: Contribution de la capacité du bois et de la capacité d'interface par rapport à la capacité totale mesurée (Configuration 4, échantillon LC, espacement d'électrodes = 33 mm)

2.3.3.3. Conclusion

Au regard des résultats obtenus dans ce paragraphe sur l'influence de l'espacement des électrodes, il est important de retenir les conclusions suivantes.

En premier lieu, concernant les configurations 1, 2 et 3, nous n'avons pas observé de différences significatives sur les résistances électriques obtenues avec les espacements d'électrodes différents. Ceci a été expliqué par la contribution importante de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale, et ce, à la fois pour les échantillons simples et les échantillons LC.

Concernant les mesures résistives avec la configuration 4, des différences significatives ont été observées entre les échantillons LC de différentes épaisseurs pour les humidités supérieures à 40%. Cela peut être expliqué par l'évolution de la contribution de la résistance d'interface à la résistance totale en fonction de l'humidité. Par ailleurs, il est à préciser que l'on a réussi à dissocier la résistance du bois de la résistance d'interface uniquement sur les échantillons LC. Cela peut s'expliquer par le fait que nous avons appliqué une pression de collage répétable et bien contrôlée pour les échantillons LC. De ce fait, le contact électrique électrode/bois pour les échantillons LC a une meilleure qualité et reproductibilité par rapport

aux échantillons simples.

En ce qui concerne les mesures capacitives avec la configuration 4, des observations différentes ont été faites sur les échantillons simples et les échantillons LC. L'influence de l'espacement existe dans toute la gamme d'humidité étudiée pour les échantillons simples alors qu'il n'existe qu'aux humidités faibles (10%-20%) pour les échantillons LC. Ces différentes observations sont probablement liées au fait que les échantillons LC ont deux lamelles de plus que les échantillons simples à l'extérieur. En effet, ces lamelles extérieures contribuent aussi à la capacité mesurée pour les échantillons LC. Ces observations signifient que les mesures capacitives pour la configuration 4 sont sensibles à la présence d'eau proche de l'interface.

2.3.4. Synthèse

Dans cette section, les résultats du suivi de l'humidité avec 4 configurations de mesures électriques ont été présentés. Les résultats montrent que toutes ces configurations permettent un suivi de l'humidité entre 10% et 70% dans les échantillons simples et les échantillons LC. Toutefois, il est à préciser que la configuration 4 ne permet pas de différencier les humidités comprises entre 10% et 20% par mesures résistives sur les échantillons simples, à cause des incertitudes d'estimation de l'humidité trop importantes. Cette observation peut être liée au fait que l'on n'a pas utilisé de protocole assez reproductible (ex. pression constante et contrôlée) lors du collage des électrodes surfaciques sur les échantillons en bois massif.

Grâce à une étude de régression de l'évolution de la résistance électrique en fonction de l'humidité, il se révèle que les 4 configurations de mesures présentent des lois de comportement comparables concernant les relations entre résistance électrique et humidité dans les échantillons LC. Cela suppose que l'on peut utiliser des modèles d'étalonnage similaires dans le cadre du suivi de l'humidité des structures LC par mesures résistives, quel que soit le type d'électrodes utilisé. Quant aux échantillons simples, seules les configurations 1, 2 et 3 présentent des évolutions comparables. L'évolution de la configuration 4 est différente de celle des 3 autres configurations. Ceci peut être lié au fait que le protocole de collage des électrodes ne permet pas d'avoir un contact électrique bois/électrodes assez favorable et répétable.

De plus, les incertitudes d'estimation de l'humidité ont aussi été évaluées dans cette étude. Il ressort que les incertitudes obtenues sur les échantillons LC sont plus faibles de manière générale que celles obtenues sur les échantillons simples. Les explications de ce phénomène reposent sur le collage des lamelles supplémentaires dans le cas des échantillons LC. Pour les configurations 1, 2 et 3, ces lamelles peuvent plus efficacement protéger les électrodes « pointe » du risque de corrosion lié à l'infiltration d'eau par rapport aux échantillons simples. Concernant la configuration 4, le processus de collage peut créer une condition de contact électrique plus favorable et reproductible, par rapport aux échantillons simples. Cela engendre, pour les mesures résistives, une résistance électrique mesurée plus faible et une meilleure estimation de la valeur de résistance en fonction de l'humidité. Quant aux mesures capacitives, elles sont moins affectées par la pression de collage.

Pour la plupart des mesures sur les échantillons LC, l'incertitude d'estimation de l'humidité est inférieure à $\pm 1\%$ (d'humidité) pour les humidités inférieures à 20%, et inférieure à $\pm 5\%$ (d'humidité) pour les humidités supérieures à 20%. En effet, lorsqu'il y a la présence de l'eau libre dans les cavités du bois (humidité $> 20\%$), la mesure est plutôt liée à une humidité locale qu'à une humidité globale de l'échantillon, car le courant électrique circule préférentiellement

sur les zones les plus humides, i.e. les cavités du bois qui peuvent être assimilées à des colonnes d'eau continues.

Enfin, nous avons étudié l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures électriques. Concernant les configurations 1, 2 et 3, aucune influence n'a été observée, et ce, à la fois pour les échantillons simples et les échantillons LC. Ceci a été expliqué par la contribution importante de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale. En ce qui concerne la configuration 4, des influences respectives sur les mesures résistives/capacitives ont été observées. Ces observations ont été expliquées par l'évolution de la contribution de la résistance/capacité d'interface par rapport à la résistance/capacité totale en fonction de l'humidité. Toutefois, ces influences observées n'affectent pas la faisabilité de la mesure de l'humidité comme le présentent nos résultats obtenus sur les échantillons de différentes épaisseurs.

Ce chapitre a permis de présenter les différentes étapes de développement dans le cadre du suivi de l'humidité avec capteurs intégrés en utilisant les mesures électriques. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter celles concernant les mesures ultrasonores.

Chapitre 3. Suivi de l'humidité par mesures ultrasonores

De la même manière que pour les mesures électriques, nous allons présenter dans ce chapitre les différentes étapes de développement réalisées dans le cadre du suivi de l'humidité via des mesures ultrasonores. Dans un premier temps, nous allons présenter les études préliminaires réalisées, qui ont pour but : 1) d'identifier les configurations de mesure ; 2) de vérifier la faisabilité des mesures ultrasonores dans le bois avec les configurations choisies ; 3) de fixer les réglages des appareils de mesure pour les essais de suivi de l'humidité avec capteurs intégrés.

Suite à la présentation de ces études préliminaires, nous allons présenter les protocoles expérimentaux mis en place pour le suivi de l'humidité dans les échantillons LC, comme ce qui a été fait pour les mesures électriques précédemment dans la section « 2.2 Protocoles expérimentaux »

Enfin, nous allons aborder les résultats du suivi de l'humidité obtenus via les mesures réalisées avec capteurs intégrés.

3.1. Etudes préliminaires relatives aux mesures ultrasonores

Cette section aborde les études préliminaires effectuées pour les mesures ultrasonores. Comme présenté par l'organigramme sur la Figure 163, nous présenterons dans un premier temps les essais réalisés pour identifier les configurations de mesure. Dans cette partie, comme la réponse des capteurs testés n'est pas bien connue, nous avons commencé notre étude par la caractérisation des capteurs afin d'obtenir les courbes de sensibilité en fréquence de ces derniers de manière à pouvoir sélectionner ceux qui présentent la meilleure performance. Dans la suite de l'étude préliminaire, les essais ont été réalisés avec le capteur sélectionné afin d'identifier la meilleure fréquence pour effectuer les mesures ultrasonores dans le bois LC.

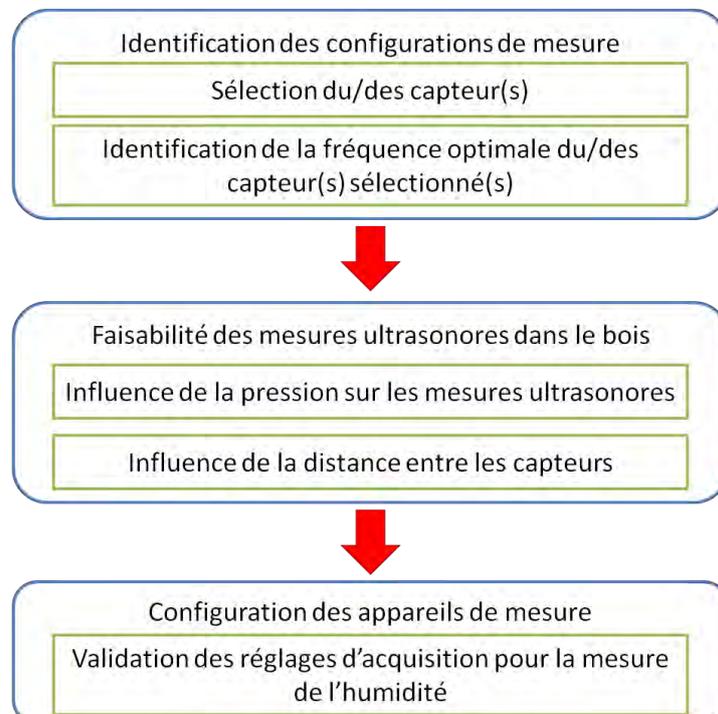


Figure 163: Organigramme des études préliminaires pour les mesures ultrasonores

Dans un second temps, nous parlerons des tests réalisés pour vérifier la faisabilité des mesures ultrasonores dans le bois avec les configurations de mesure évoquées. Pour ce faire, nous avons effectué tout d'abord une étude pour connaître le comportement des capteurs vis-à-vis de la pression. Par la suite, nous avons réalisé une autre étude pour investiguer l'influence de la distance entre les capteurs. Cette étude a pour but d'optimiser la taille d'échantillon pour les essais au laboratoire, et aussi d'obtenir des informations sur la stratégie que l'on peut mettre en place concernant le positionnement des capteurs à l'échelle de l'« ouvrage »

Enfin, nous aborderons des essais effectués sur un échantillon humide, qui ont pour objectif de valider les réglages d'acquisition pour une mesure ultrasonore aux humidités élevées.

3.1.1. Identification des configurations de mesures

Grâce à la revue de littérature, nous avons identifié 3 familles de capteurs piézoélectriques qui présentent le potentiel d'effectuer des mesures ultrasonores en s'intégrant au niveau des lamelles du bois LC. Ce sont les PVDF, AFC et MFC (cf. « 1.4.3 Suivi via l'utilisation des méthodes ultrasonores »). Néanmoins, il n'y a aucune étude à notre connaissance présentant l'utilisation de ces capteurs sur le matériau bois. Au vu de ces constats, nous avons commencé notre étude par des essais de caractérisation des capteurs afin de connaître leurs comportements sur le matériau bois. Ces essais nous ont également permis de sélectionner le capteur le plus performant. Par la suite, nous avons effectué des tests sur ce capteur afin de trouver la fréquence optimale pour effectuer les mesures ultrasonores dans le bois LC.

- **Présentation des capteurs testés**

En tenant compte de leur disponibilité commerciale, nous avons choisi 3 modèles de PVDF (TE Connectivity Corp.), 1 modèle d'AFC (Advanced Cerametrics Inc.) et 2 modèles de MFC (Smart Material Corp.). Les noms, les dimensions et les prix de ces capteurs sont résumés dans la Table 15.

Table 15: Caractéristiques des capteurs piézoélectriques testés

Types	Modèles	Surface de zone active (mm ²)	Epaisseur (mm)	Prix unitaire(€)
PVDF	FLDT1	41 X 12	0,21	7,56
	DT1-052K	41 X 12		5,4
	DT2-052K	73 X 12		7,56
AFC	PFC-W14	130 X 10	0,3	35
MFC	M4010	40 X 10	0,3	41
	M2814	28 X 14		48

Concernant les PVDF, nous avons choisi le FLDT1 car ce modèle possède une connectique flexible (Figure 164) alors que les deux autres modèles (série DT) ont une connectique de type « rivet » qui perce le film du capteur (Figure 165). De plus, on a sélectionné deux modèles de série DT avec des tailles différentes (cf. Table 15) afin d'identifier l'influence de la taille du capteur sur leur sensibilité.

Connectique flexible



Figure 164: PVDF avec la connectique flexible (FLDT1) (TE Connectivity Corp.)

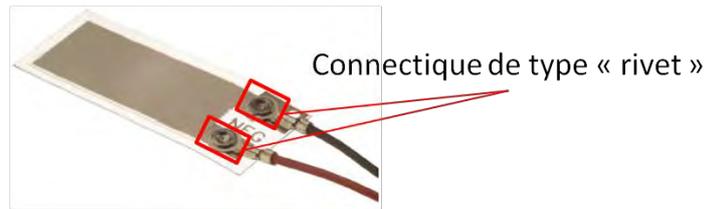


Figure 165: PVDF avec la connectique de type « rivet » (DT1-052K) (TE Connectivity Corp.)

Pour l'AFC, vu sa faible disponibilité commerciale, nous avons choisi un modèle qui a la taille la plus proche des autres capteurs : le PFC-W14 (Figure 166). En effet, l'AFC n'est pas encore un produit complètement finalisé, et il n'est plus disponible commercialement à ce jour car le fournisseur (Advanced Cerametrics Inc.) qui nous l'a procuré est à présent fermé. De plus, la connectique de l'AFC est très fragile par rapport aux autres capteurs et le câblage doit se faire via un collage par colle conductrice sur les deux pastilles de connectique (cf. Figure 166).



Figure 166: PFC-W14 (AFC) (Advanced Cerametrics Inc.)

En ce qui concerne les MFC, deux modèles qui fonctionnent en mode de vibrations différentes ont été choisis : le M4010 (Figure 167a) qui utilise l'effet piézoélectrique d33 (Figure 89a) et le M2814 (Figure 167b) qui utilise l'effet piézoélectrique d31 (Figure 89b) (cf. « 1.4.3 Suivi via l'utilisation des méthodes ultrasonores »). La connexion des câbles sur le capteur MFC s'effectue via les deux pastilles de connectique (cf. Figure 167) par un soudage à l'étain.

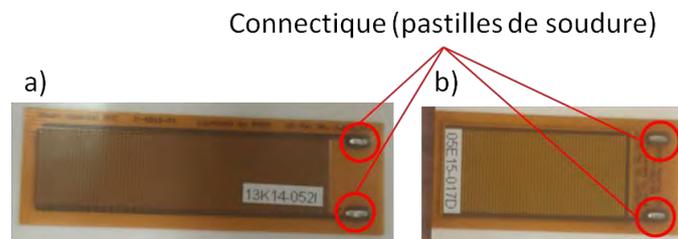


Figure 167: Capteurs MFC: a) M4010 ; b) M2814 (Smart Material Corp.)

- **Préparation des capteurs**

Afin de diminuer les signaux parasites, nous avons préparé nos capteurs avec un « blindage », comme présenté sur la Figure 168. En effet, pour un capteur, on a classiquement deux fils de connexion : le fil de fonctionnement, qui a pour but d'assurer l'alimentation électrique ; le fil de masse, qui est relié à la terre pour minimiser l'influence des rayonnements électromagnétiques dans l'environnement ambiant (Figure 168). Comme la connectique du fil de fonctionnement de nos capteurs est exposée à l'extérieur, elle peut capter des signaux parasites à cause de la présence des rayonnements électromagnétiques dans l'environnement. Nous avons donc couvert cette partie avec du scotch de Kapton, afin de créer une bonne isolation électrique (Figure 168). Puis, nous avons couvert la totalité du capteur avec du scotch de cuivre (Figure 168). Comme cela, le scotch de cuivre peut conduire les signaux parasites générés par des rayonnements électromagnétiques directement à la terre à travers le

fil de masse.

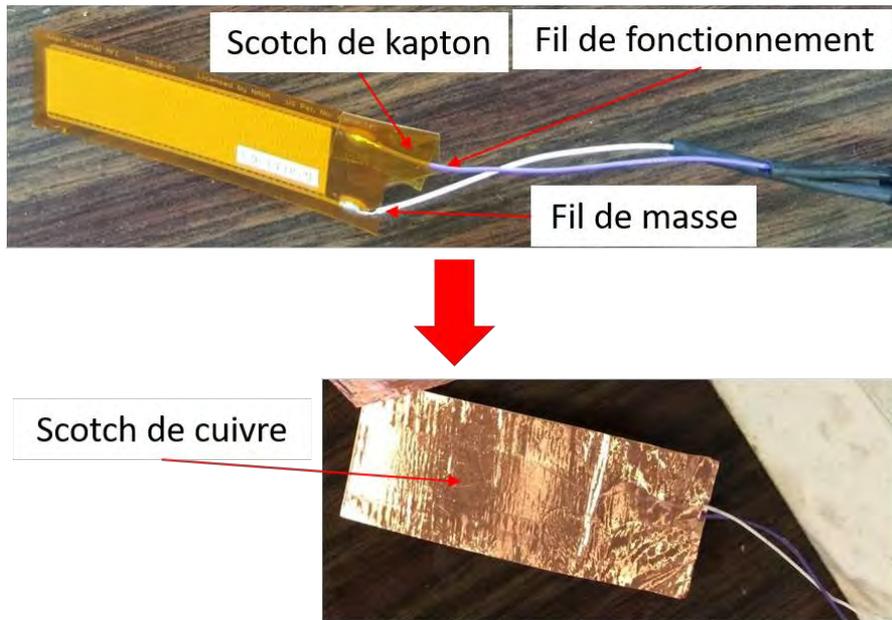


Figure 168: Blindage du capteur MFC M4010

Ensuite, afin d'adapter les capteurs au dispositif de mesure, les deux fils de connexion (fonctionnement et masse) sont reliés à un câble coaxial ayant une connectique BNC (Figure 169). Le câble coaxial a été utilisé car il permet de minimiser l'influence des rayonnements électromagnétiques dans l'environnement ambiant.



Figure 169: Câblage du capteur MFC M4010

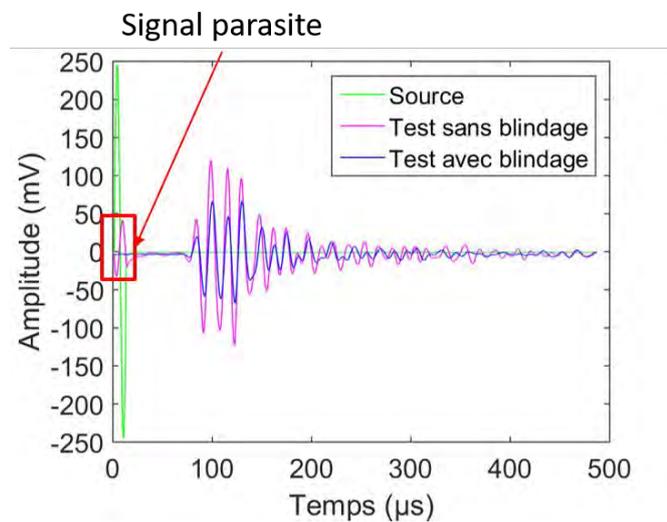


Figure 170: Comparaison des signaux obtenus avant et après blindage du capteur (MFC M4010, 80kHz)

Un exemple de comparaison des signaux obtenus avant et après blindage du capteur est présenté sur la Figure 170. Nous pouvons constater que les signaux parasites (dans le carré rouge) n'existent quasiment plus après le blindage du capteur. Cet exemple de test a été

réalisé avec 2 capteurs MFC M4010 en configuration 6 (Transmission à l'interface, cf. Figure 172). Les détails de la mise en place des tests ultrasonores avec cette configuration seront précisés dans la suite de ce paragraphe. Ce test préalable a été réalisé à 80 kHz. Cette fréquence a été choisie car il nous semblait que les signaux étaient assez énergétiques autour de cette fréquence. Une étude plus judicieuse afin de définir la fréquence optimale a été également réalisée après la préparation des capteurs. Les résultats seront présentés à la fin de ce paragraphe.

- **Systeme d'acquisition**

La mise en place du système d'acquisition est présentée sur la Figure 171. Les signaux d'émission sont générés à l'aide d'un générateur de fonction (Agilent 33120A) et sont ensuite amplifiés par un amplificateur de puissance (Amplifier Research Model 75A250A) avant leur arrivée au capteur émetteur. Les ondes ultrasonores passent donc du capteur émetteur au capteur récepteur via l'échantillon et puis les signaux reçus sont amplifiés par un préamplificateur à 40 dB (Sofranel 5660B) avant l'affichage sur l'oscilloscope (Agilent DSO-X 2002A). On peut par la suite récupérer un fichier de l'oscilloscope sous forme « .csv » pour pouvoir faire le post-traitement des signaux à l'aide du logiciel Matlab.

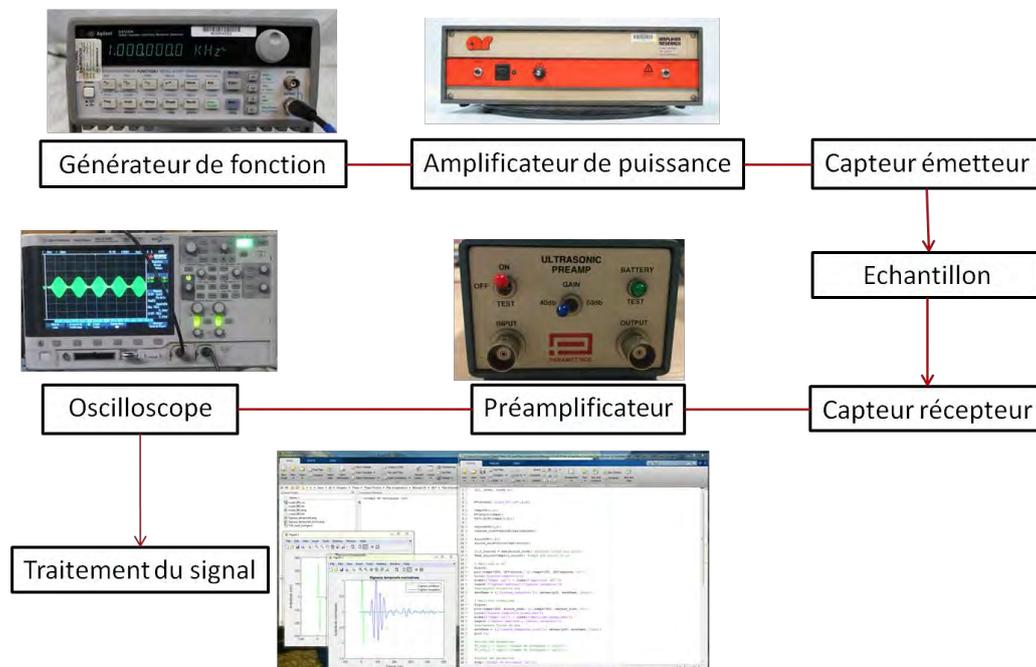


Figure 171: Mise en place du système d'acquisition des mesures ultrasonores

- **Caractérisation des capteurs**

L'objectif de ces tests de caractérisation est d'obtenir des courbes de sensibilité afin de sélectionner le meilleur capteur pour une utilisation dans le bois LC.

Nous avons mis en place deux configurations de mesures en utilisant la méthode de transmission de la technique ultrasonore (cf. Figure 63, cf. « 1.3.2 Méthodes ultrasonores »). On appellera cette configuration « Transmission dans la lamelle » (configuration 5) quand les ondes ultrasonores se propagent en traversant l'épaisseur d'une lamelle (Figure 172a). On appellera la seconde configuration « Transmission à l'interface » (configuration 6) quand les ondes se propagent au niveau de l'interface des deux lamelles (Figure 172b).

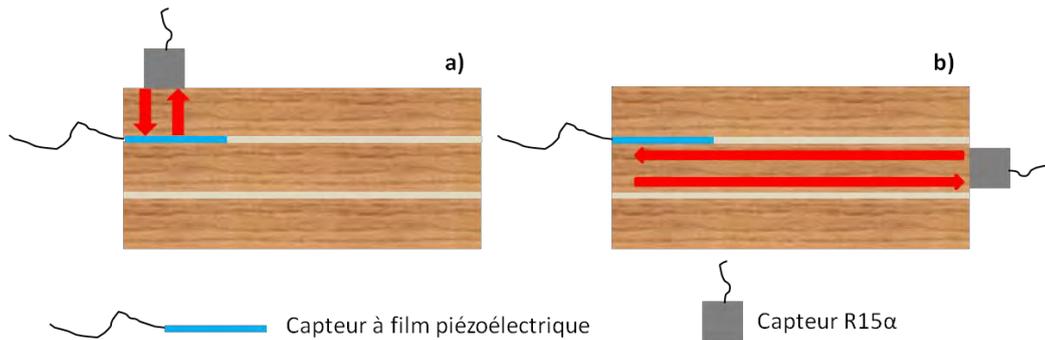


Figure 172: Mise en place des essais de caractérisation des capteurs pour les deux configurations de mesure: a) Configuration 5 : Transmission dans la lamelle ; b) Configuration 6 : Transmission à l'interface

Pour cette étape, trois planches de Douglas de $500 \times 90 \times 33 \text{ mm}^3$ (L*T*R) ont été utilisées. La pression de 10 bars est assurée par un montage fabriqué à partir de deux profilés en acier (Figure 173), se basant sur le principe de l'assemblage vissé. Un couple équivalent à la pression de 10 bars a été appliqué sur les 4 écrous par l'utilisation d'une clé dynamométrique. Le calcul du couple de serrage est présenté en « Annexe 9 ». Par ailleurs, le couplage acoustique entre les capteurs et l'échantillon est assuré par une graisse de silicone utilisée classiquement en CND.



Figure 173: Montage de serrage utilisé pour les mesures ultrasonores

Afin de caractériser les capteurs à film piézoélectrique sélectionnés, un capteur conventionnel a été utilisé comme référence alternativement pour l'émission et la réception (R15α, MISTRAS Group). Il a été sélectionné car il présente une bonne sensibilité dans la gamme de fréquences allant de 50 kHz à 400 kHz avec une fréquence de résonance à 150 kHz (cf. Figure 174). Cette gamme de fréquence est assez large pour la caractérisation des capteurs dans notre étude. Si la fréquence est très faible, la longueur d'onde sera plus grande que l'épaisseur de la lamelle (à 50 kHz, la longueur d'onde pour la configuration 5 est déjà d'environ 30 mm) ; si la fréquence est très élevée, les signaux seront peu exploitables car le bois est un matériau qui présente une atténuation croissante en fonction de la fréquence (Bucur 2006; Raichel 2006).

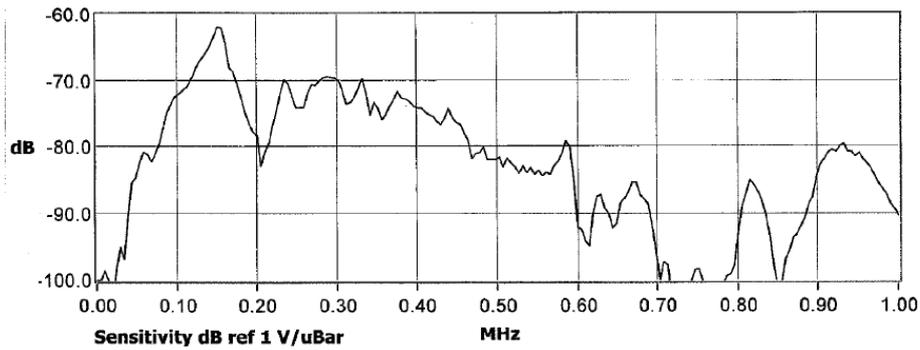


Figure 174: Courbe de sensibilité du capteur R15a (MISTRAS Group)

Avant de commencer les tests de caractérisation, il est à préciser que l'on avait effectué un test pour mettre en évidence la bonne position du capteur R15a pour la configuration 6 (Figure 172b). Effectivement, il y a deux possibilités pour positionner le R15a comme présentées sur la Figure 175. On peut positionner le R15a soit sur le centre de la lamelle centrale comme présenté par la Figure 175a (position 1), soit de manière à se centrer sur le joint de colle comme présenté par la Figure 175b (position 2). Pour ce test, des signaux en régime harmonique ont été utilisés pour l'excitation car ce type de signaux permet d'envoyer des cycles en continu au capteur émetteur. De ce fait, le capteur va générer des ondes ultrasonores au plus près de la fréquence des signaux électriques d'excitation. L'information sur la réponse du capteur récepteur à une fréquence spécifique sera donc plus précise.

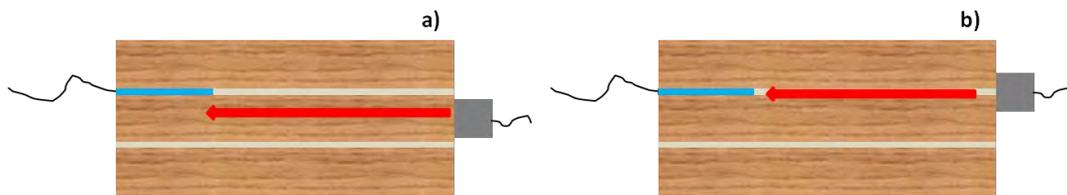


Figure 175: Positionnement du capteur R15a pour la transmission à l'interface (Configuration 6) : a) Position 1 ; b) Position 2

Nous avons configuré des signaux sinusoïdaux de 500 mV en amplitude crête-crête (différence entre la valeur maximale et la valeur minimale) sur le générateur de fonctions et avons utilisé le gain minimum ($\times 1$) de l'amplificateur de puissance car ces réglages sont assez énergétiques pour avoir des signaux exploitables. Afin de comparer la performance des capteurs, l'amplitude efficace a été utilisée. Cette grandeur désigne une amplitude continue équivalente donnant lieu à une même dissipation de puissance que les signaux périodiques dont l'amplitude varie en fonction du temps (Leconte 1995). Pour un signal sinusoïdal, l'amplitude efficace est égale à l'amplitude maximale divisée par la racine de 2, comme présenté sur la Figure 176.

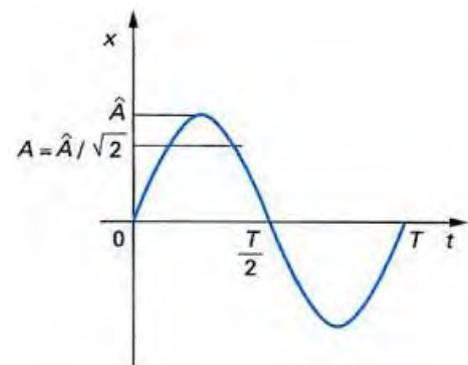


Figure 176: Schématisation de l'amplitude efficace (A = amplitude efficace ; \hat{A} = amplitude maximale) (Leconte 1995)

Selon les résultats de ce test (Figure 177), il a été décidé d'effectuer les essais à la position 1 car ce positionnement donne des signaux plus énergétiques. La Figure 177 présente les résultats d'un test effectué avec le R15a comme émetteur et le MFC M4010 comme récepteur. On peut constater que les signaux à la position 1 présentent une amplitude efficace plus

grande. Cette observation peut être liée au fait qu'à la position 1, les ondes sont générées dans une seule lamelle et se propagent préférentiellement dans le matériau, alors qu'à la position 2, les ondes se propagent dans deux lamelles, et également à l'interface entre celles-ci. Afin de limiter l'influence de l'interface sur la caractérisation des capteurs, et compte-tenu du fait que la position 1 est plus favorable en termes de niveau de signal, c'est cette première position qui a été retenue.

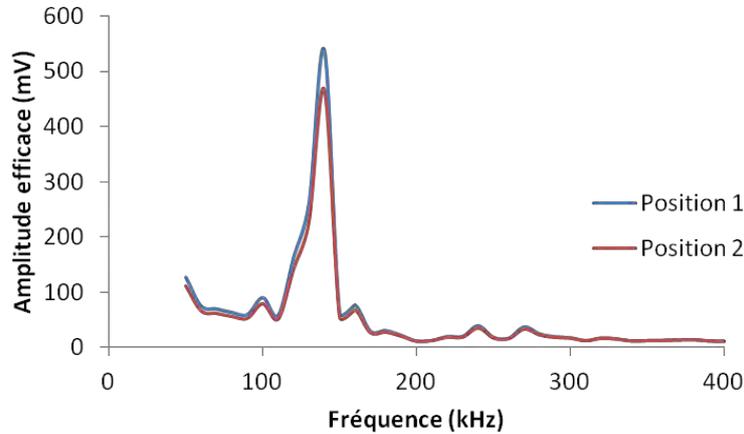


Figure 177: Résultats des différentes positions (cf. Figure 175) de la transmission à l'interface (Configuration 6)

Dans un premier temps, les essais de caractérisation des capteurs, ont été effectués à l'aide d'un balayage en fréquences de 50 kHz à 400 kHz en utilisant le R15 α comme capteur émetteur et un capteur à film piézoélectrique comme capteur récepteur. De cette manière, la comparaison des résultats obtenus avec les différents capteurs permet de mettre en évidence le capteur le plus performant pour une utilisation en réception des ondes ultrasonores. Dans un deuxième temps, nous avons effectué le même test mais en utilisant un capteur à film piézoélectrique en émission et le R15 α en réception. Ainsi, nous pouvons également identifier le capteur qui présente la meilleure performance en émission. Les réglages et le paramètre investigué sont identiques à ce qui est décrit précédemment pour le test de la position du capteur R15 α .

Les résultats de caractérisation des 3 modèles (MFC M4010, AFC PFC-W14, PVDF FLDT1) sont présentés dans la Figure 178 et la Figure 179. Les autres capteurs ne donnent qu'une réponse très faible. Leurs résultats ne sont donc pas présentés.

Capteurs à film piézoélectrique en réception

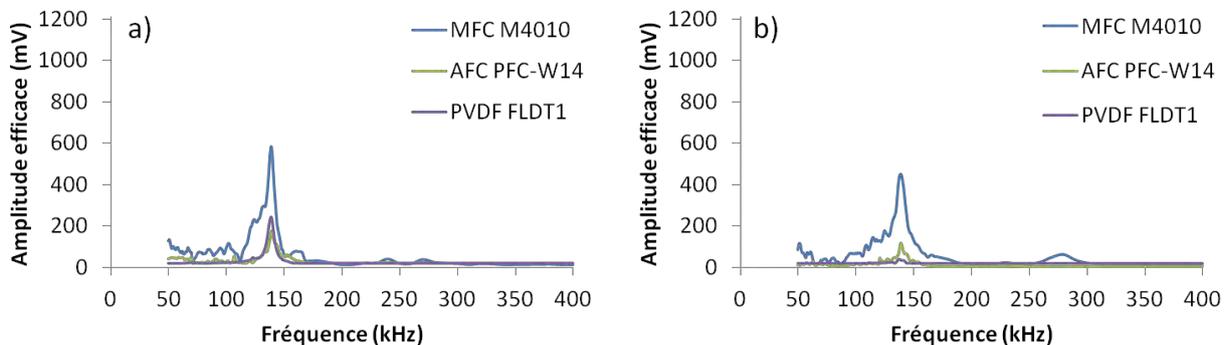


Figure 178: Résultats de la caractérisation des capteurs avec les capteurs à film piézoélectrique comme récepteur dans les deux configurations de mesure: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

Capteurs à film piézoélectrique en émission

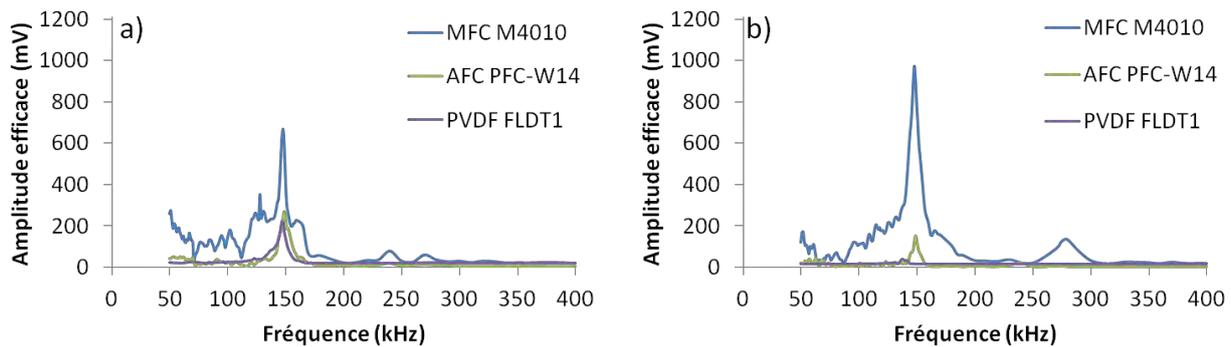


Figure 179: Résultats de la caractérisation des capteurs avec les capteurs à film piézoélectrique comme émetteur dans les deux configurations de mesure: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

Pour le MFC M2814, sa faible réponse par rapport au MFC M4010 peut être expliquée par les différents modes de vibrations utilisés par les deux capteurs : l'effet piézoélectrique d31 utilisé par le MFC M2814 est plus faible que l'effet d33 utilisé par le MFC M4010. Concernant la différence de réponse des différents modèles de PVDF, elle peut être liée aux différentes technologies de connectiques utilisées. Le modèle FLDT1 a des connectiques de circuit flexible (cf. Figure 164) alors que la série DT (DT1-052K et DT2-052K) a des connectiques qui percent le film de protection (cf. Figure 165). De ce fait, la réponse de la série DT peut être affectée soit par les signaux électromagnétiques parasites captés par les connectiques métalliques qui sont exposées à l'extérieur du film, soit par une différence d'impédance électrique due à la connectique.

Plus généralement, tous les capteurs utilisés dans cette étude ont été testés avec la même électronique de mesure, alors qu'ils présentent des différences en impédance électrique. En effet, une bonne adaptation de l'impédance entre les capteurs et l'électronique peut améliorer la réponse des capteurs (Vasic et al. 2011 ; Rossing 2014). Toutefois, le développement d'une électronique spécifique pour chaque type de capteur n'était pas envisageable dans ce travail, et les résultats obtenus permettent donc de statuer sur l'usage possible des différentes technologies de capteurs avec une électronique standard.

La Figure 178 et la Figure 179 montrent respectivement les résultats quand les 3 modèles de capteurs à film piézoélectrique évoqués (MFC M4010, AFC PFC-W14, PVDF FLDT1) sont en réception et en émission. On peut observer tout d'abord que le PVDF FLDT1 est le moins performant parmi ces trois modèles de capteurs. Cette observation peut être expliquée par le fait que les deux capteurs à fibres piézoélectriques (MFC M4010 et AFC PFC-W14) ont un rendement piézoélectrique plus élevé que les capteurs PVDF (nature polymère) (Raghavan et al. 2007; Cai et al. 2012). On peut également constater que parmi les deux modèles de capteurs à fibres piézoélectriques, le MFC M4010 présente le meilleur rendement.

Par ailleurs, il est à préciser que dans toutes les courbes, le pic maximum est toujours autour de 150 kHz. Ceci est lié au fait que la fréquence de résonance du capteur R15 α est à 150 kHz (cf. Figure 174). Toutefois, ce fait n'affecte pas notre conclusion concernant le choix du meilleur capteur car les réponses des différents capteurs étudiés sont toutes pondérées par la réponse du même capteur de référence (R15 α). De cette manière, nous obtenons une comparaison relative des capteurs, dans la bande de fréquences d'intérêt (50 kHz à 400 kHz) pour la caractérisation des échantillons LC.

Selon les résultats de caractérisation, le MFC M4010 (que l'on notera MFC dans la suite pour simplifier) se révèle donc le plus performant parmi tous les capteurs. Par conséquent, nous l'utiliserons dans la suite de cette étude pour investiguer la faisabilité des mesures ultrasonores dans le bois. Afin d'obtenir un échantillon unique permettant à la fois de travailler avec la configuration 5 et la configuration 6, nous avons proposé la mise en place des capteurs MFC comme présenté sur la Figure 180 pour les essais ci-après.

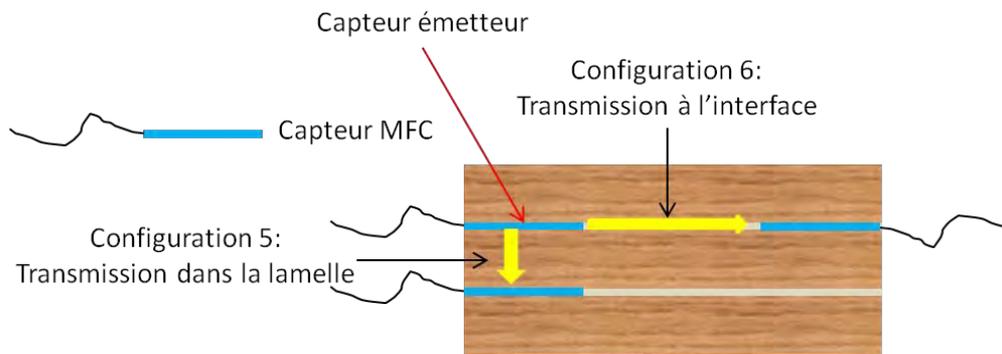


Figure 180: Mise en place des essais avec les capteurs MFC

- **Identification de la fréquence optimale**

Suite à la dernière étape, le même test de balayage en fréquences a été effectué avec les capteurs MFC pour les deux configurations de mesure (cf. Figure 180) afin de trouver la bande de fréquences optimale pour une utilisation en régime impulsionnel. La pression de 10 bars a été assurée par le montage utilisé précédemment (Figure 173). Par ailleurs, le couplage acoustique entre les capteurs et l'échantillon est assuré par une graisse silicone.

Les résultats sont présentés sur la Figure 181. On peut constater que, pour les deux configurations de mesures, l'amplitude efficace la plus élevée est obtenue autour de 60 kHz. Par conséquent, dans la suite de cette étude des impulsions d'une fréquence centrale de 60 kHz ont été utilisées.

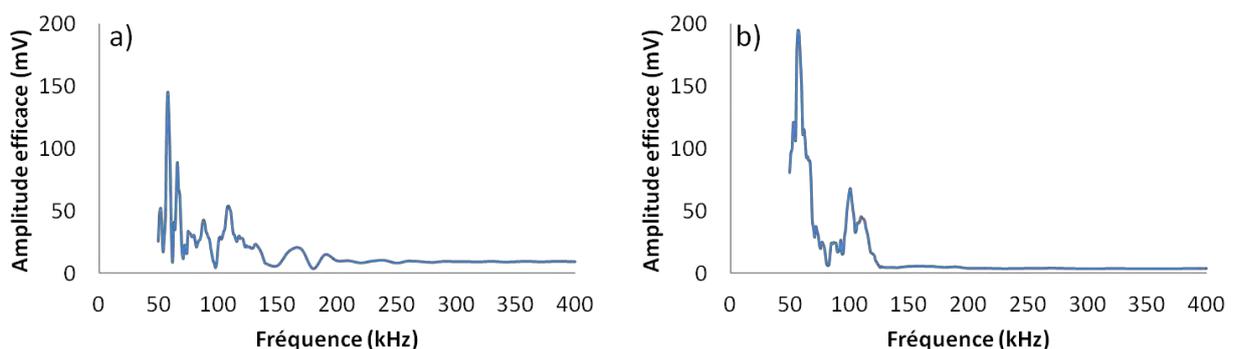


Figure 181: Résultats de l'identification de la fréquence optimale avec deux capteurs MFC pour les deux configurations de mesure: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

3.1.2. Faisabilité des mesures ultrasonores dans le bois

- **Influence de la pression sur les mesures ultrasonores**

Pour vérifier la faisabilité des mesures ultrasonores dans le bois, nous avons assemblé un

échantillon comme présenté sur la Figure 180 à l'aide du montage utilisé précédemment (Figure 173). Le couplage acoustique entre les capteurs et l'échantillon est assuré par une graisse de silicone. Nous avons augmenté la pression sur les capteurs graduellement de 1 jusqu'à 10 bars afin de vérifier l'influence de la pression sur les mesures ultrasonores. Le calcul des couples de serrage équivalents à différentes pressions est présenté en « Annexe 9 » (Table 23). Bien que la résistance de ces capteurs face à la pression de 10 bars ait été validée par les tests précédents, il était intéressant d'effectuer ce test pour comprendre comment les capteurs fonctionnent vis-à-vis de la pression.

Les résultats concernant l'amplitude efficace des signaux ultrasonores pour différentes pressions sont présentés sur la Figure 182. Concernant la configuration 5, on peut observer qu'à partir de 2 bars, l'amplitude ne change quasiment plus (Figure 182a), ce qui signifie que la condition de couplage acoustique n'est pas affectée par la pression si cette dernière est entre 2 et 10 bars. Quant à la configuration 6, l'amplitude augmente avec l'augmentation de la pression de 1 à 5 bars, et n'évolue quasiment plus à partir de 5 bars (Figure 182b). Ces observations montrent que la condition de couplage acoustique de la configuration 6 est plus sensible à la variation de pression que celle de la configuration 5. Ceci peut être expliqué par les différents parcours de propagation dans les deux configurations. Pour la configuration 5, les ondes propagent au travers de l'épaisseur d'une lamelle, alors que dans la configuration 6 les ondes propagent à proximité de l'interface entre les deux lamelles. De ce fait, la configuration 6 est plus sensible à la condition de couplage à l'interface.

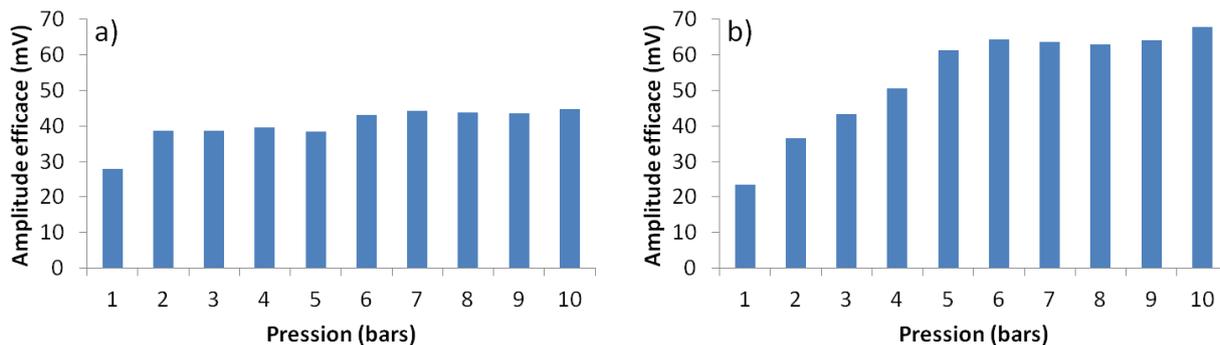


Figure 182: Amplitude efficace en fonction de la pression pour les deux configurations de mesures à 60kHz : a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

Sur la Figure 182, le test LSD de Fisher n'a pas été réalisé pour l'amplitude efficace, car nous avons observé que cette dernière n'est pas un paramètre reproductible. Cela est en accord avec les constatations dans la littérature, que nous avons évoquées dans le paragraphe « 1.3.2 Méthodes ultrasonores »

De plus, afin d'établir l'influence de la variation de pression sur la mesure de l'humidité, on a calculé la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, qui est l'indice le plus fiable pour la mesure de l'humidité (De Oliveira et al. 2005; Goncalves et al. 2008 ; Calegari et al. 2011). La méthode de calcul de vitesse sera présentée prochainement dans le paragraphe « 3.2.3 Traitement des données de mesures » dans ce chapitre.

Les résultats montrent que la pression n'affecte pas la mesure de la vitesse puisque les valeurs à différentes pressions ne montrent pas de différences significatives entre elles selon les résultats du test LSD de Fisher (Figure 183). De cette manière, la mesure de l'humidité ne sera pas affectée par la variation de pression pendant et après le collage des poutres LC. On peut aussi noter qu'il n'en serait pas de même si l'amplitude des impulsions devait être

exploitée pour une mesure d'atténuation.

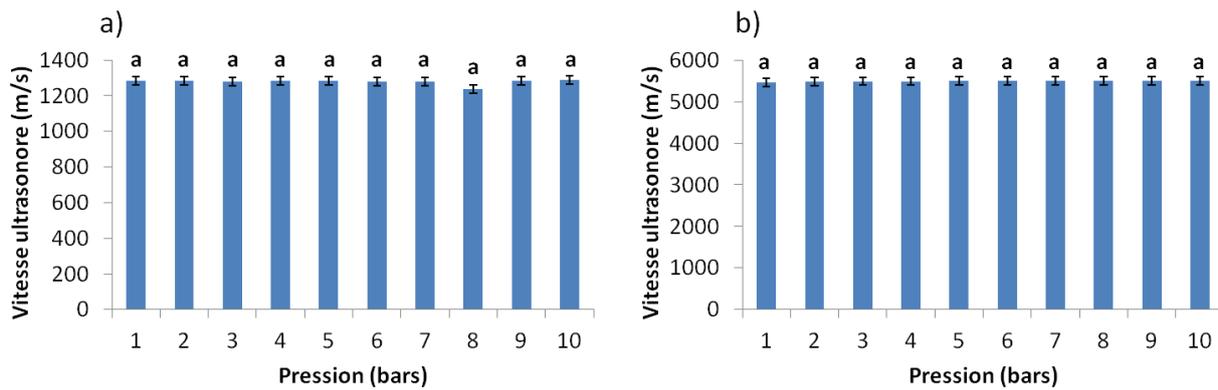


Figure 183: Vitesse ultrasonore en fonction de la pression pour les deux configurations de mesures à 60kHz : a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

- **Influence de la distance entre les capteurs**

Nous avons commencé les études préliminaires avec 3 lamelles de bois de 500 mm de longueur. Ceci a pour objectif d'avoir une distance assez longue pour la configuration 6 afin de bien séparer temporellement le signal émis et le signal reçu, lorsque l'on calcule la vitesse de propagation à l'aide des signaux impulsionnels (cf. prochainement « 3.2.3 Traitement des données de mesures »). La Figure 184 donne un exemple des signaux obtenus sur un échantillon de 300 mm et de 500 mm de longueur. On observe que les signaux sur l'échantillon de 500 mm montrent une meilleure séparation entre le signal émis et le signal reçu. De plus, une distance de propagation plus importante permet également de réduire l'incertitude de mesure dans un matériau hétérogène (Bungey et al. 2006). Ceci est lié au fait que la propagation d'ondes est susceptible d'être perturbée par les discontinuités dans le matériau. De ce fait, la distance parcourue réellement par les ondes est incertaine car elle n'est pas forcément égale à la distance (en ligne droite) entre les capteurs. Une distance plus importante permet donc de minimiser cette incertitude sur le parcours de propagation d'ondes.

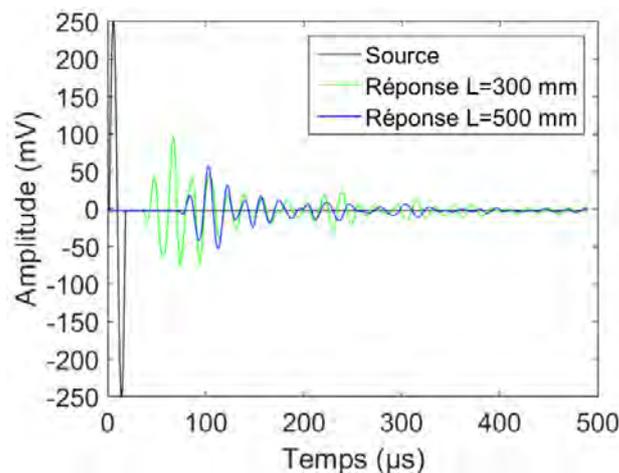


Figure 184: Exemple des signaux de la configuration 6 pour un échantillon de 300 mm et un échantillon de 500 mm de longueur

Néanmoins, afin d'optimiser la taille d'échantillon pour les essais au laboratoire, nous avons réalisé une étude sur l'influence de la distance entre les capteurs. Cette étude a permis d'obtenir des informations sur la stratégie à mettre en place concernant le positionnement des

capteurs à l'échelle de l'« ouvrage ». Pour réaliser cette étude, nous avons effectué des mesures ultrasonores en découpant progressivement les planches de bois (500 mm de longueur initiale) jusqu'à une longueur d'échantillon de 150 mm, où la partie de bois restante entre les capteurs (40 mm) est comparable à la taille de ces derniers (longueur de zone active = 40 mm). La longueur de l'échantillon, la distance entre les capteurs et la longueur du bois restante entre les capteurs sont schématisées sur la Figure 185.

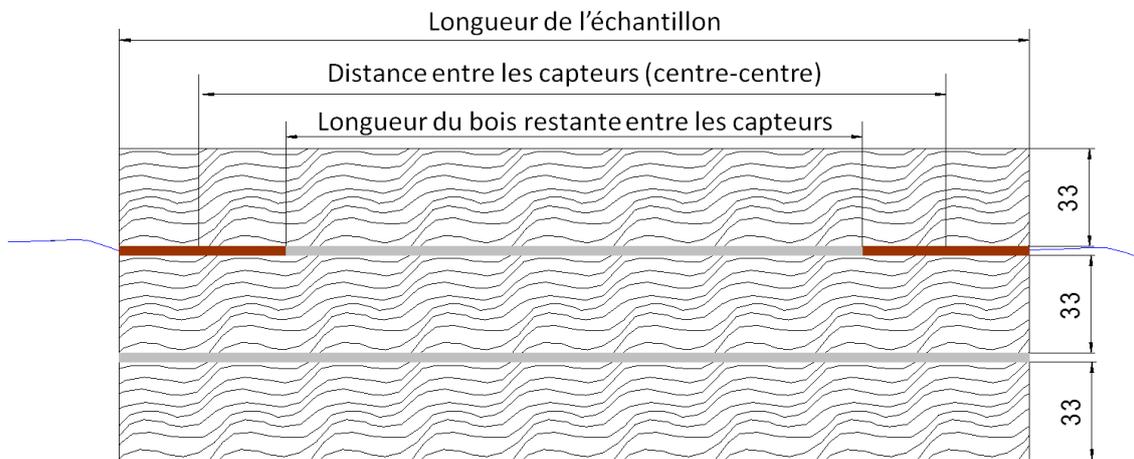


Figure 185: Schématisation des différentes grandeurs dimensionnelles pour l'étude de l'influence de la distance entre les capteurs des mesures ultrasonores

La pression de 10 bars a été assurée par le montage utilisé précédemment (Figure 173) et le calcul des couples de serrage équivalents à différentes longueurs d'échantillon est présenté en « Annexe 9 » (Table 24). Le couplage acoustique entre les capteurs et l'échantillon est assuré par la graisse silicone.

Selon nos résultats, la longueur minimum de l'échantillon que l'on peut utiliser est de 300 mm, et ceci peut être justifié par deux observations. Premièrement, à partir de la longueur de l'échantillon de 250 mm, les signaux ne sont pas facilement exploitables pour le calcul de la vitesse de propagation. Un exemple de comparaison des signaux pour les longueurs d'échantillon respectives de 250 mm et 300 mm est donné sur la Figure 186. On peut constater qu'il y a une variation importante d'amplitude des signaux quand la longueur d'échantillon passe de 300 mm à 250 mm.

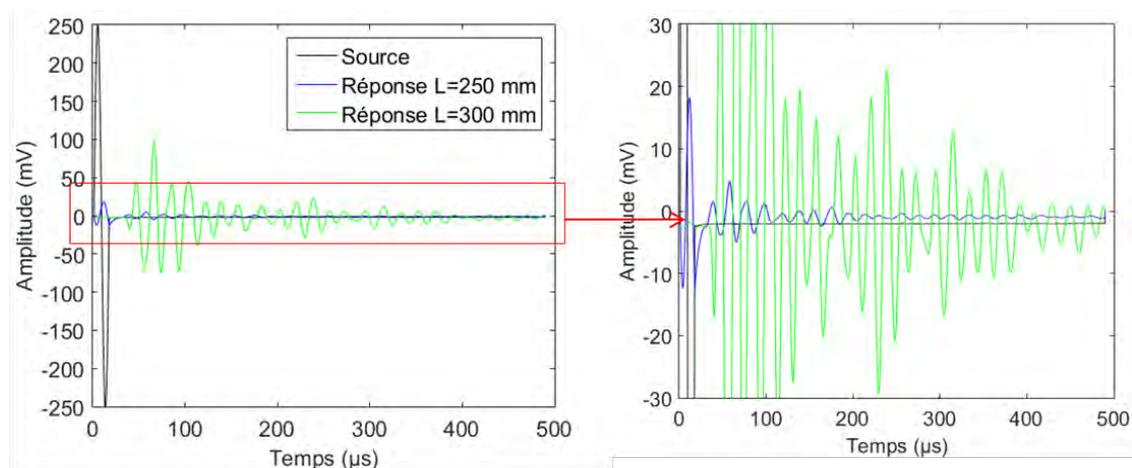


Figure 186: Comparaison des signaux pour les longueurs d'échantillon respectivement de 250 mm et de 300 mm

De plus, selon les résultats du test LSD de Fisher, on commence à avoir une différence significative pour la vitesse ultrasonore à partir de 250 mm de longueur de l'échantillon, comme présenté sur la Figure 187. Il y a deux explications possibles pour ces observations. Premièrement, quand la distance entre les capteurs devient proche, la séparation des signaux entre le capteur émetteur et le capteur récepteur devient moins nette (cf. Figure 184). Qui plus est, quand les deux capteurs se rapprochent, il y a de plus en plus de signaux parasites (cf. Figure 186). Tout cela peut influencer la forme des signaux obtenue, ce qui a pour conséquence d'avoir des valeurs de vitesse différentes pour les longueurs d'échantillon plus faibles par rapport à celles obtenues pour les longueurs d'échantillon plus grandes.

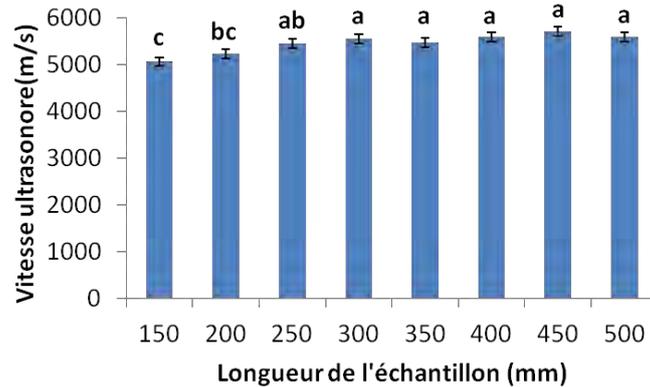


Figure 187: Vitesses ultrasonores pour différentes longueurs d'échantillon

De ce fait, nous avons utilisé des échantillons de longueur 300 mm pour le suivi de l'humidité, comme présenté par la Figure 188.

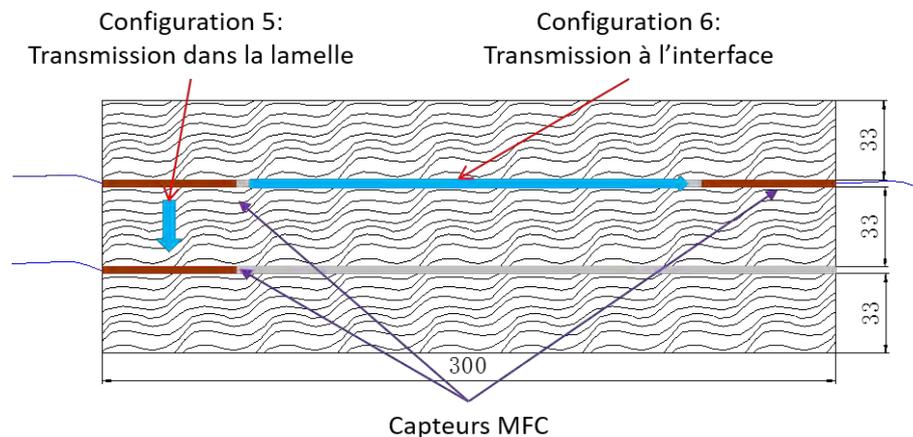


Figure 188: Echantillon pour le suivi de l'humidité avec les capteurs de mesures ultrasonores

3.1.3. Configuration des appareils de mesure

Afin de vérifier si les réglages utilisés nous permettent également d'avoir des signaux exploitables pour la mesure de vitesse aux humidités élevées, nous avons réalisé des mesures en assemblant un échantillon humide composé de 3 lamelles de $300 \times 90 \times 33 \text{ mm}^3$ (L*T*R) (70% d'humidité en moyenne).

La pression de 10 bars a été assurée par le montage utilisé précédemment (Figure 173) et le couplage acoustique entre les capteurs et l'échantillon est assuré par une graisse silicone.

L'amplitude des signaux obtenue sur cet échantillon humide est assez faible (cf. Figure 189), surtout pour la configuration 5 (cf. Figure 189a). Suite à ce constat, nous avons augmenté le

gain de l'amplificateur de puissance (coefficient multiplicateur, sans unité) afin d'avoir des signaux facilement exploitables. Nous avons observé que si on augmente le gain jusqu'à $\times 6$, les signaux sont plus exploitables, comme présenté sur la Figure 189. Nous n'avons pas augmenté le gain au-delà de $\times 6$ pour éviter le risque d'endommagement des capteurs, mais aussi pour éviter la déformation des signaux apportée par une tension très élevée (> 150 V).

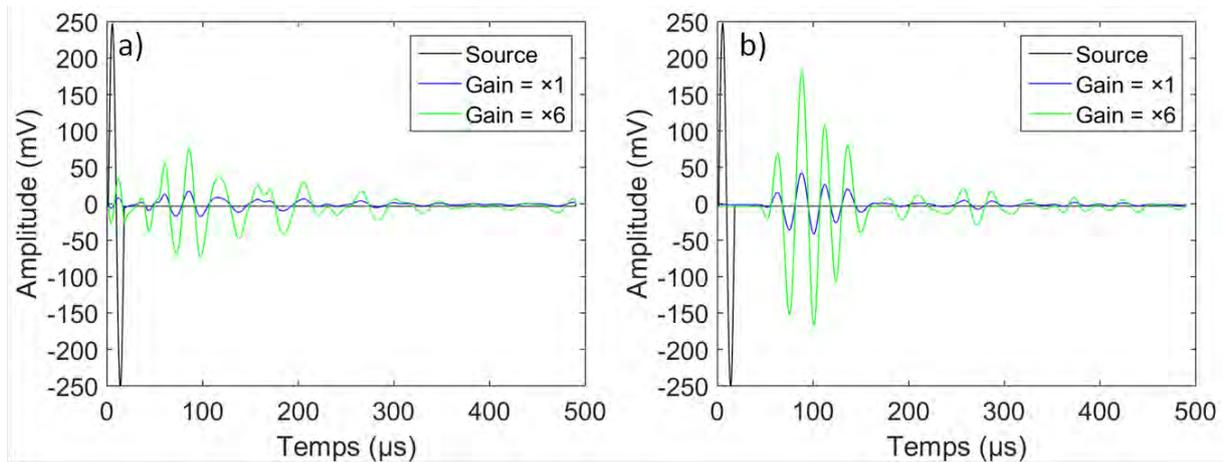


Figure 189: Comparaison des signaux à des gains différents sur l'échantillon humide: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

Les résultats concernant la vitesse ultrasonore sont présentés sur la Figure 190. On peut observer que les valeurs de vitesses ultrasonores obtenues dans les deux configurations permettent de distinguer les échantillons à l'état sec (11% d'humidité) et à l'état humide (70% d'humidité).

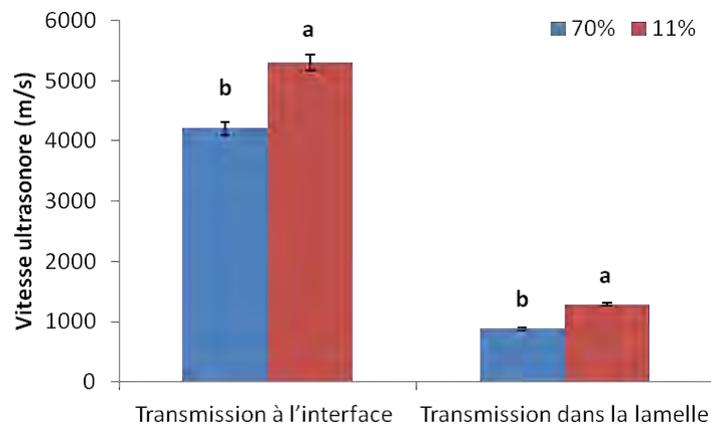


Figure 190: Comparaison de la vitesse ultrasonore pour les deux configurations à deux humidités différentes

3.1.4. Conclusion

Grâce à ces études préliminaires, nous avons pu sélectionner le capteur à film piézoélectrique le plus performant pour effectuer des mesures ultrasonores dans le bois. Il s'agit du capteur MFC (M4010). Dans les configurations testées, la bande de fréquences optimales pour la réalisation des mesures ultrasonores dans le bois de Douglas avec ce capteur est centrée autour de 60 kHz pour les deux configurations de mesure évoquées. Ces essais ont également permis de confirmer la faisabilité des mesures ultrasonores avec ce capteur à différentes pressions, et de déterminer la longueur minimale des échantillons (300 mm). Enfin, grâce aux

essais réalisés sur un échantillon humide, nous avons établi qu'un gain plus élevé (6) de l'amplificateur de puissance était nécessaire pour garantir des signaux exploitables aux humidités élevées.

Dans la section suivante, nous parlerons des protocoles expérimentaux utilisés dans ce travail pour le suivi de l'humidité par capteurs intégrés.

3.2. Protocoles expérimentaux

Dans cette section, nous allons présenter les protocoles expérimentaux utilisés pour la fabrication des échantillons LC, la mise en humidification des échantillons et le traitement des données de mesures pour les essais du suivi de l'humidité.

3.2.1. Collage des échantillons lamellé-collés

Pour les échantillons LC utilisés pour les mesures ultrasonores, les deux configurations de mesures ont été réalisées sur le même échantillon (Figure 188, Page 126). Les 3 capteurs MFC ont été collés tout d'abord sur une planche de $300 \times 90 \times 33 \text{ mm}^3$ (L*T*R) avec une colle cyanoacrylate (WURTH colle cyano express gel) afin d'assurer un bon couplage acoustique. Par la suite, deux lamelles extérieures de taille identique ont été collées sur les deux côtés selon le même protocole de collage que les mesures électriques, qui a été décrit dans le paragraphe « 2.2.1 Collage des échantillons lamellé-collés » du chapitre précédent.

Il est à préciser que nous avons préparé 5 échantillons identiques afin de prendre en compte la variabilité du matériau bois.

3.2.2. Procédures d'humidification

Les procédures d'humidification pour les mesures ultrasonores sont identiques à celles utilisées pour les mesures électriques, i.e. un conditionnement dans l'enceinte climatique pour les humidités faibles (<20%), puis une immersion en bassin pour atteindre les humidités plus élevées (cf. « 2.2.2 Procédures d'humidification »).

Néanmoins, nous n'avons pas réalisé l'étude préalable des cinétiques pour les mesures ultrasonores vu la contrainte de temps. En effet, les dimensions des échantillons pour les mesures ultrasonores (Figure 188, Page 126) étant plus grandes que celles utilisées pour les mesures électriques (Table 10, Page 64), il nous aurait fallu beaucoup plus de temps (> 5 mois) pour réaliser une étude des cinétiques d'humidification. Par contre, selon le retour d'expérience de l'étude des cinétiques des mesures électriques, la prise d'humidité des échantillons ralentit petit à petit lors de l'immersion. De ce fait, nous nous sommes appuyés sur nos résultats précédents (cf. « 2.2.2 Procédures d'humidification »). Ainsi, nous avons réalisé des mesures ultrasonores régulièrement en prolongeant au fur et à mesure l'intervalle de temps entre deux points de mesures.

De plus, afin d'avoir une estimation fiable de l'humidité des échantillons en cours d'humidification, nous avons préparé 3 échantillons témoin de taille identique à ceux utilisés pour le suivi de l'humidité. De manière à avoir une estimation précise, les échantillons témoin ont toujours été conservés dans le même environnement climatique que les échantillons utilisés pour le suivi de l'humidité. Après la première mesure ultrasonore, nous avons séché les échantillons témoin pour obtenir la masse anhydre afin de calculer leurs humidités vraies selon la Norme NF EN 13183-1 (AFNOR 2002a). Puis, nous avons calculé la moyenne de ces valeurs d'humidité et nous avons supposé que tous les échantillons avec capteurs intégrés sont aussi à cette humidité lors de la première mesure. Comme cela, nous avons estimé les masses anhydres des différents échantillons utilisés pour le suivi de l'humidité. Nous avons alors pu

planifier nos mesures selon les humidités estimées.

3.2.3. Traitement des données de mesures

Pour les mesures ultrasonores, les données que l'on obtient directement lors de chaque mesure sont sous forme d'un fichier « .csv », à partir duquel on peut restaurer la forme des signaux en fonction du temps, comme montré par la Figure 191.

Nous pouvons alors calculer le temps de vol entre le premier pic positif du signal du capteur émetteur et celui du capteur récepteur (cf. Figure 191) à l'aide d'un programme Matlab. De cette manière, il est possible de calculer la vitesse de propagation par l'Equation 23 :

$$V = D/t \quad [23]$$

où V est la vitesse ultrasonore (m/s), D est la distance parcourue par les ondes ultrasonores (m) et t est le temps de vol (s). Pour la configuration 5, D est l'épaisseur de lamelle ; pour la configuration 6, D est la distance entre les centres des capteurs (Figure 192).

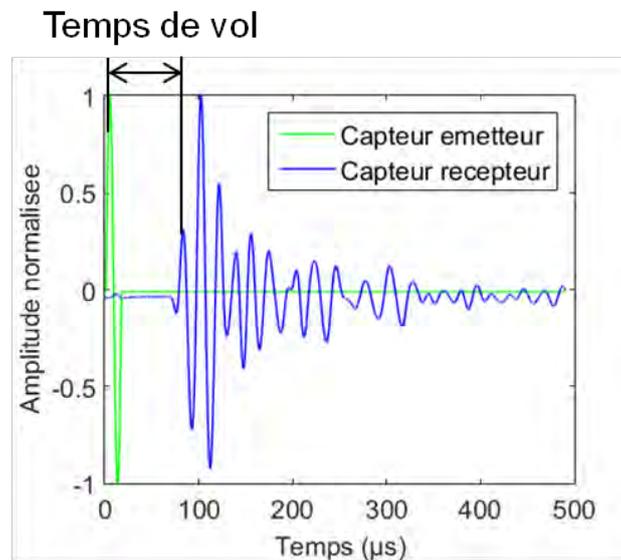


Figure 191: Exemple des signaux obtenus lors d'une mesure ultrasonore

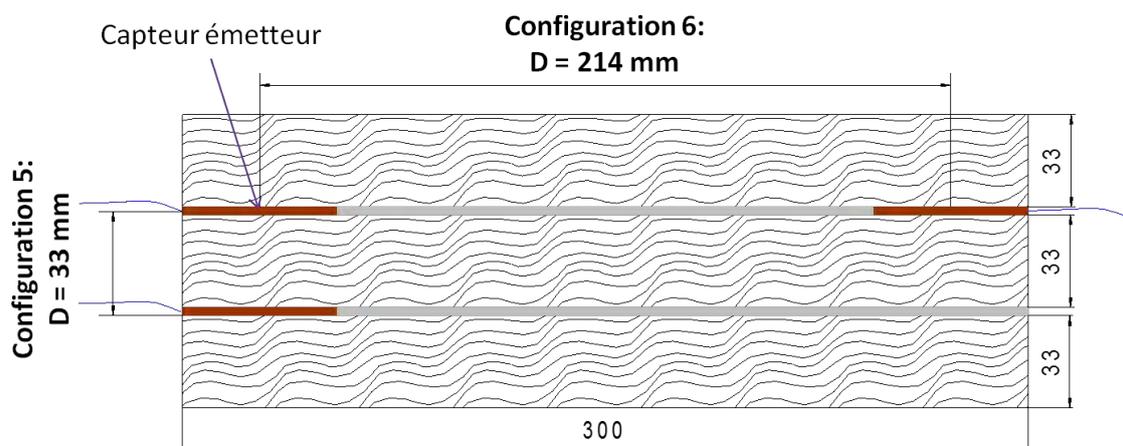


Figure 192: Distance parcourue par les ondes ultrasonores dans les deux configurations de mesures

3.2.4. Conclusion

Cette section a permis de préciser les protocoles utilisés pour la fabrication des échantillons LC et la mise en humidification des échantillons pour les essais du suivi de l'humidité par capteurs intégrés. De plus, la méthode utilisée pour le calcul de la vitesse ultrasonore a été également présentée.

Par la suite, nous avons fabriqué les échantillons LC avec capteurs MFC intégrés selon le protocole évoqué. Puis, ces échantillons ont été mis en humidification selon les procédures d'humidification présentées. Ces résultats concernant le suivi de l'humidité par capteurs intégrés dans le bois LC sont présentés dans la section suivante.

3.3. Suivi de l'humidité par capteurs intégrés

Dans cette section, les résultats du suivi de l'humidité par mesures ultrasonores sont présentés. Dans un premier temps, nous parlerons de l'influence du changement des conditions du couplage acoustique capteur/bois sur les mesures ultrasonores, à savoir que les conditions de couplage acoustique entre les capteurs et le bois pour les études préliminaires sont différentes de celles dans le cas des échantillons LC fabriqués pour le suivi de l'humidité. Pour ce faire, nous avons comparé les résultats obtenus avant et après le collage des échantillons LC. Ensuite, nous présenterons les résultats de la campagne d'essais sur le suivi de l'humidité par capteurs intégrés via les mesures ultrasonores.

3.3.1. Influence du changement des conditions de couplage acoustique capteur/bois sur les mesures ultrasonores

Les conditions de couplage acoustique entre les capteurs et le bois pour les études préliminaires sont différentes de celles dans le cas des échantillons LC fabriqués pour le suivi de l'humidité. Premièrement, pour les études préliminaires, la pression est toujours maintenue à 10 bars à l'aide de notre montage (Figure 173) alors que pour les échantillons LC, la pression de 10 bars n'est plus assurée après la fabrication des échantillons. Selon les résultats de nos études préliminaires, l'amplitude des signaux à faibles pressions est plus petite que celle à 10 bars (voir Figure 182, Page 123, cf. « 3.1.2 Faisabilité des mesures ultrasonores dans le bois »). Par conséquent, la relaxation de la pression de collage après fabrication des échantillons LC pourrait entraîner une condition de couplage acoustique moins favorable pour les mesures ultrasonores. Deuxièmement, nous avons utilisé deux couplants différents pour les études préliminaires et les échantillons utilisés pour le suivi de l'humidité. Lors des études préliminaires, une graisse silicone a été utilisée de manière à pouvoir récupérer les capteurs après chaque test, alors que pour les échantillons LC utilisés pour le suivi de l'humidité, nous avons utilisé un collage plus rigide et « irréversible » (colle cyanoacrylate) pour limiter le déplacement des capteurs lors du passage sous presse. En outre, la colle polyuréthane utilisée pour l'assemblage des lamelles des échantillons LC n'était pas présente dans le cas des essais préliminaires et pourrait modifier le couplage.

Compte-tenu de ces éléments, il est nécessaire de confirmer que les signaux sont encore exploitables dans les échantillons LC utilisés pour le suivi de l'humidité après leur fabrication.

Afin d'étudier l'influence de ce changement au niveau des conditions du couplage acoustique capteur/bois, nous avons comparé les résultats obtenus avant et après le collage des échantillons LC. Les mesures « avant » collage ont été réalisées dans les mêmes conditions

que les études préliminaires. Les mesures « après » collage ont été réalisées directement sur les échantillons LC fabriqués pour la campagne d'essais du suivi de l'humidité.

Nous allons aborder dans un premier temps la comparaison de la forme des signaux ultrasonores obtenus avant et après le collage des échantillons LC. Ensuite, la comparaison sur la vitesse ultrasonore calculée à partir de ces signaux sera présentée.

3.3.1.1. Influence sur la forme des signaux

Les résultats respectifs de la comparaison des signaux avant et après collage pour les 5 échantillons utilisés sont présentés dans les Figures 193-197. Les Figures 193a-197a et les Figures 193b-197b présentent respectivement les signaux obtenus pour la configuration 5 (Transmission dans la lamelle, cf. Figure 188, Page 126), et ceux obtenus pour la configuration 6 (Transmission à l'interface, cf. Figure 188, Page 126).

Sur les Figures 193a-197a, on peut observer que pour la configuration 5, les différences sont faibles entre les signaux obtenus avant collage et ceux obtenus après collage pour la plupart des échantillons (1 à 4, Figures 193a-196a). Le processus de collage n'influence donc pas la forme des signaux. Cependant, d'un échantillon à l'autre, des variations au niveau de l'amplitude du signal montrent que le couplage capteur/bois peut varier. Ceci est en accord avec ce que l'on a évoqué dans le chapitre bibliographique (« 1.3.2 Méthodes ultrasonores »), l'amplitude du signal n'étant pas facilement reproductible. Pour l'échantillon 5, on n'a pas pu effectuer des mesures après le collage (Figure 197a) car les câbles de connexion du capteur récepteur pour cette configuration ont été endommagés.

Sur les Figures 193-197b, on peut également constater que pour la configuration 6, il y a très peu de différences entre les signaux obtenus avant collage et après collage pour la plupart des échantillons (2 à 5, Figures 194b-197b). Le processus de collage influence donc peu la forme des signaux pour la configuration 6. Cependant, pour certains échantillons, comme l'échantillon 1, on constate que l'amplitude du signal est plus faible après collage (Figure 193b). Cela signifie que le couplage acoustique dans cet échantillon est probablement moins favorable que celui des autres échantillons (2 à 5).

Pour cet échantillon (1), il est possible que le capteur récepteur pour la configuration 6 ait été mal couplé sur le bois, car pour cet échantillon, on ne voit pas de différence sur les signaux avant et après collage pour la configuration 5 (Figure 193a). De plus, il semble logique que le collage influence de manière plus importante la configuration 6 (Transmission à l'interface) que la configuration 5 (Transmission dans la lamelle). En effet, lors de la transmission de l'onde à l'interface des deux lamelles (configuration 6), les ondes interagissent avec les joints de colle sur toute leur longueur, alors qu'en transmission dans la lamelle (configuration 5), seule l'épaisseur du joint de colle et d'une lamelle est impliquée.

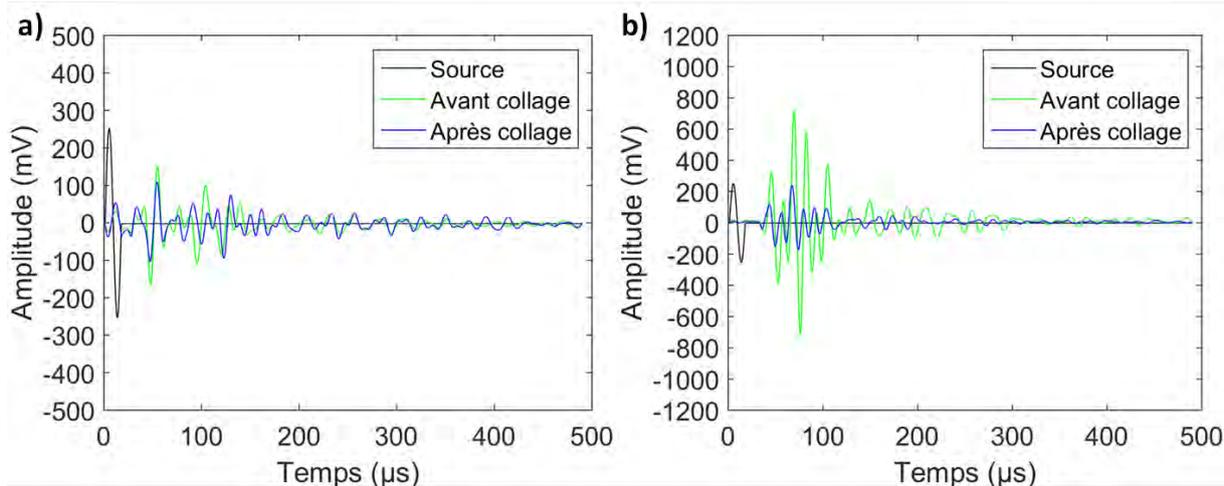


Figure 193: Comparaison des signaux avant et après le collage des échantillons LC pour l'échantillon 1: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

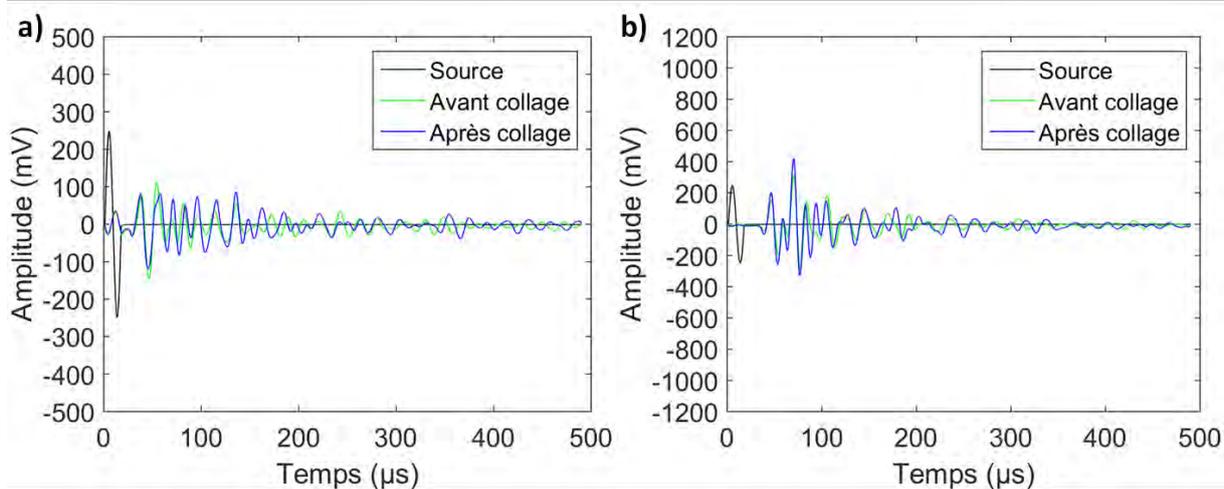


Figure 194: Comparaison des signaux avant et après le collage des échantillons LC pour l'échantillon 2: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

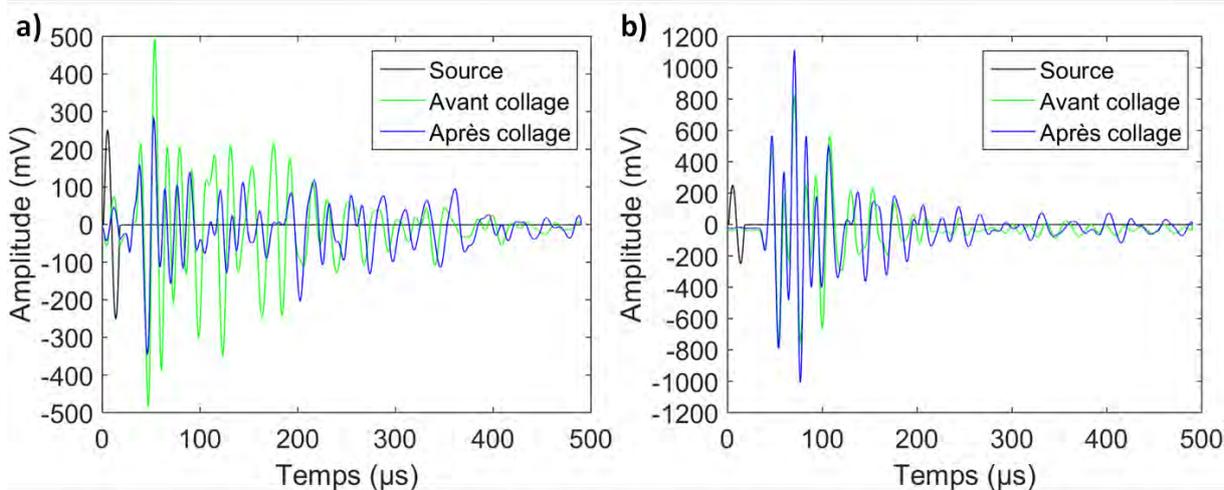


Figure 195: Comparaison des signaux avant et après le collage des échantillons LC pour l'échantillon 3: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

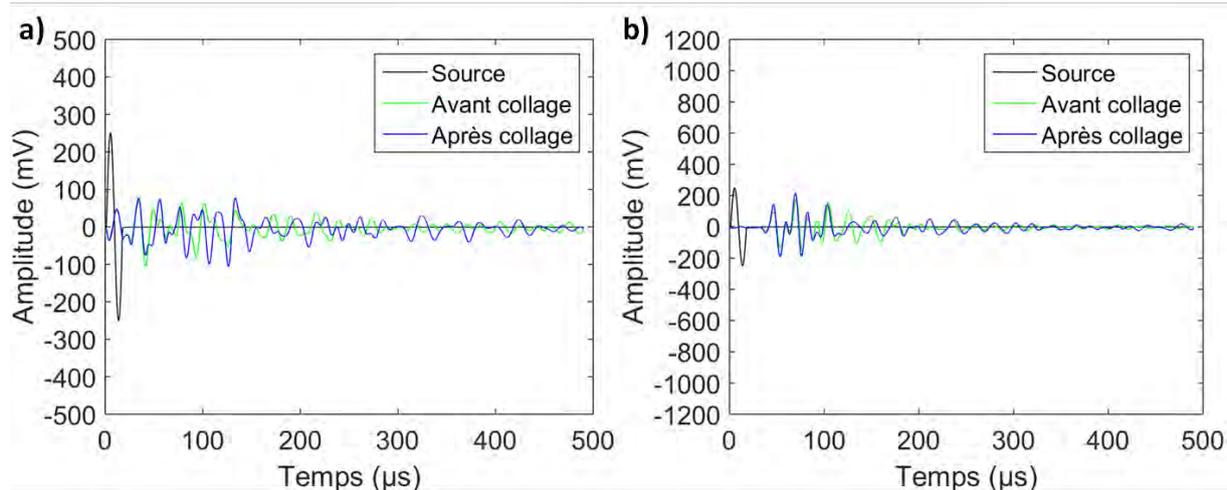


Figure 196: Comparaison des signaux avant et après le collage des échantillons LC pour l'échantillon 4: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

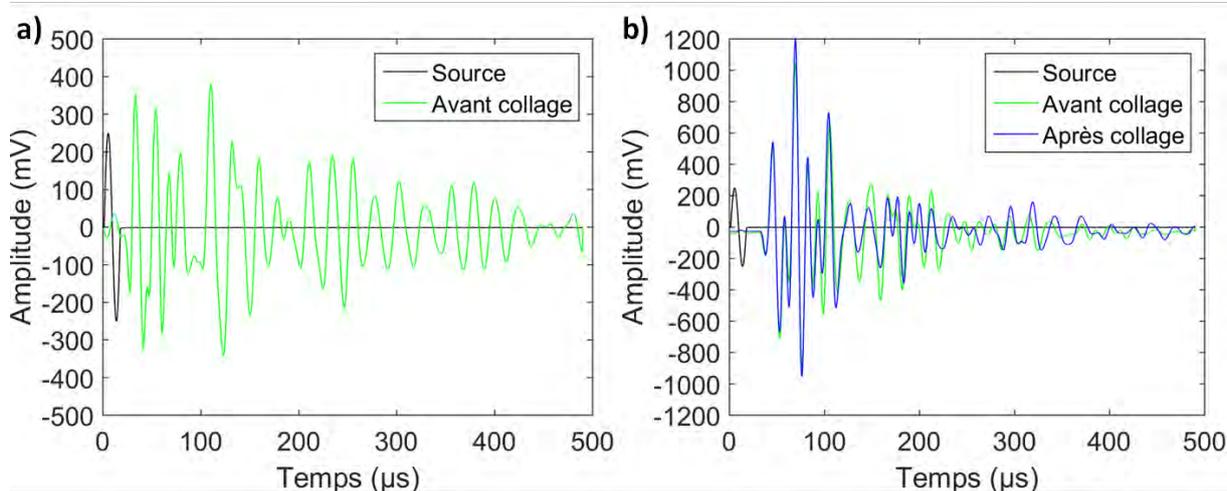


Figure 197: Comparaison des signaux avant et après le collage des échantillons LC pour l'échantillon 5: a) Configuration 5 ; b) Configuration 6

3.3.1.2. Influence sur la vitesse ultrasonore

Nous avons également comparé les résultats de la vitesse ultrasonore (permettant d'en déduire les variations d'humidité par la suite) calculés à partir des signaux obtenus avant et après le collage des échantillons LC. Ces résultats sont présentés sur la Figure 198. On voit qu'il n'y a pas de différences significatives avant et après le collage des échantillons LC selon les résultats du test LSD de Fisher, et ce, pour les deux configurations de mesures utilisées. Cette observation confirme que le processus de collage n'affecte pas l'exploitation des signaux. En effet, cette observation est en accord avec la littérature car en théorie, la vitesse mesurée ne devait pas varier significativement en fonction de l'amplitude du signal (Laugier et al. 2011).

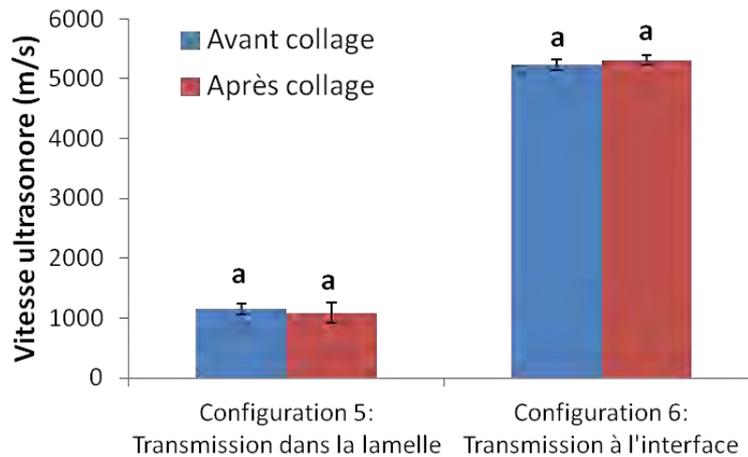


Figure 198: Comparaison de la vitesse ultrasonore avant et après le collage des échantillons LC

3.3.1.3. Conclusion

Selon les résultats présentés dans ce paragraphe, on voit que la pression exercée sur les capteurs n'influence pas la forme des signaux. De plus, les valeurs de vitesse ultrasonore obtenues avant et après le collage des échantillons LC ne montrent pas de différences significatives, ce qui est également en accord avec la littérature. Ces observations nous ont permis de confirmer la bonne exploitation des signaux des mesures ultrasonores après le passage sous pression des capteurs pour les échantillons LC.

Dans le paragraphe suivant, nous aborderons donc les résultats obtenus aux différentes humidités.

3.3.2. Suivi de l'humidité dans les échantillons LC

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats du suivi de l'humidité par mesures ultrasonores avec les capteurs intégrés. Nous allons parler dans un premier temps des résultats de la configuration 5 (Transmission dans la lamelle, cf. Figure 188, Page 126). Puis, les résultats de la configuration 6 (Transmission à l'interface, cf. Figure 188, Page 126) seront présentés.

Les résultats que nous allons présenter ci-dessous ne sont pas disponibles pour les 5 échantillons que l'on a fabriqués. Effectivement, nous avons eu des ruptures des câbles de connexion des capteurs dans certains échantillons au cours de nos essais. Ces ruptures ont eu lieu sur la partie qui relie le capteur au câble coaxial (cf. Figure 169, Page 116), car cette partie s'est révélée assez fragile. Des essais supplémentaires doivent donc être envisagés afin de définir une utilisation optimale des capteurs dans le cadre d'une intégration dans les poutres LC.

3.3.2.1. Résultats pour la configuration 5 : Transmission dans la lamelle

Les résultats du suivi de l'humidité par la configuration 5 pour les échantillons 1 et 4 sont présentés sur la Figure 199.

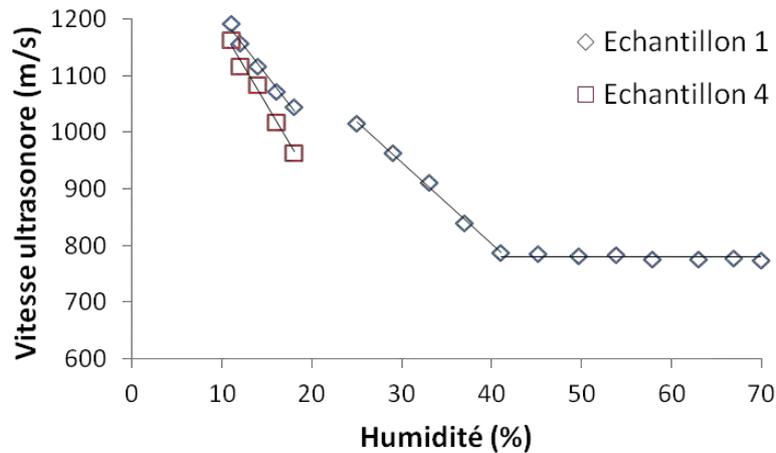


Figure 199: Vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité pour la configuration 5 (Transmission dans la lamelle)

Nous pouvons observer qu'il est possible de suivre la variation d'humidité dans les échantillons LC pour la configuration 5 pour la plage d'humidité 10%-40%. En effet, la vitesse ultrasonore montre une évolution décroissante linéaire en fonction de l'humidité, ce qui est en accord avec les observations disponibles faites dans la littérature (De Oliveira et al. 2005; Calegari et al. 2011). Les équations de régression de la vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité sont présentées dans la Table 16.

En outre, nous pouvons constater que pour l'échantillon 1, la tendance décroissante pour la plage d'humidité 10%-20% et 20%-40% est différente (Figure 199 et Table 16). Comme expliqué dans le chapitre précédent, cela peut être attribué aux deux protocoles d'humidification utilisés dans cette étude. Avant 20% d'humidité, l'eau présente dans l'échantillon est principalement sous forme d'eau liée alors qu'après 20% d'humidité, il y a la présence à la fois de l'eau liée et de l'eau libre. Selon la littérature (Goncalves et al. 2008), l'influence de l'eau liée et de l'eau libre sur les propriétés mécaniques du bois est différente, ce qui peut expliquer les deux tendances différentes observées (Figure 199) car la vitesse des ondes longitudinales est directement liée au module élastique, comme ce qui a été évoqué dans le chapitre bibliographique (cf. Equation 12, Figure 64, « 1.3.2 Méthodes ultrasonores »).

Table 16: Equations de régression de la vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité pour la configuration 5 (Transmission dans la lamelle) (y = Vitesse ultrasonore en m/s, x = Humidité en %, R^2 = Coefficient de détermination de la régression linéaire)

Echantillons	Plage d'humidité			
	10%-20%		20%-40%	
	Equations de régression	R^2	Equations de régression	R^2
1	$y=-20,286x+1405,5$	0,9971	$y=-12,959x+1328,7$	0,9816
4	$y=-26,299x+1462$	0,9959	Non applicable	

Néanmoins, sur l'échantillon 1, on voit que la vitesse ultrasonore n'évolue plus en fonction de l'humidité à partir de 40%. Deux phénomènes peuvent expliquer cette observation.

Premièrement, une délamination a pu être observée sur cet échantillon après immersion dans l'eau (à partir d'environ 25% d'humidité) (Figure 200). La délamination observée est probablement liée à un problème de dilatation du joint de colle avec la présence des capteurs. En effet, l'épaisseur du capteur MFC est identique à l'épaisseur du joint collé, à savoir 0,3 mm. De ce fait, nous avons eu une perte d'adhésion entre les lamelles à cause de la concentration de contraintes sur les zones fissurées au cours de nos essais. Aussi, il se peut que nous ayons eu une perte d'adhésion capteur/bois si la fissuration est sur la zone du capteur. Qui plus est, à partir de 40% d'humidité, nous avons constaté la présence de pourriture à proximité de l'emplacement des capteurs (Figure 200). Par conséquent, l'exploitation des signaux à partir de 40% d'humidité s'est trouvée fortement perturbée par l'augmentation des signaux parasites apportés par la pourriture et l'entrée de l'eau à proximité des capteurs. La détection de la variation d'humidité n'est donc plus possible par une mesure ultrasonore dans la configuration 5.

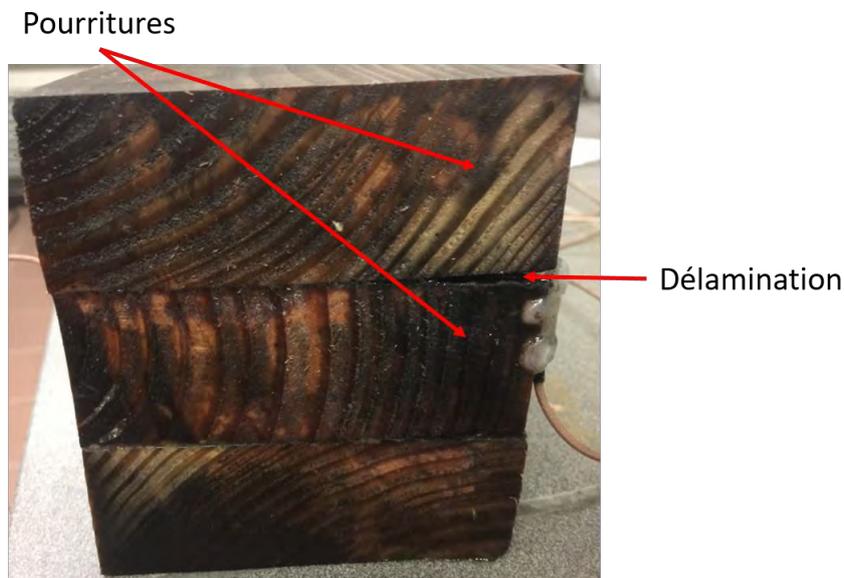


Figure 200: Présence de pourritures et de délamination sur un échantillon utilisé pour le suivi de l'humidité par mesures ultrasonores

En ce qui concerne l'échantillon 4, les valeurs de vitesse ne sont pas présentées pour les humidités au-delà de 20% car les signaux ne sont plus exploitables au delà. En effet, nous avons aussi constaté une forte délamination (fente de 5 mm d'ouverture) sur cet échantillon après immersion dans l'eau. Par conséquent, l'entrée de l'eau par ces fissures a probablement détérioré le couplage capteur/bois, ce qui a eu pour conséquence de rendre l'exploitation des signaux impossible.

Dans le sous-paragraphe suivant, nous allons présenter les résultats obtenus pour la configuration 6.

3.3.2.2. Configuration 6 : Transmission à l'interface

Les résultats du suivi de l'humidité par la configuration 6 pour les échantillons 1, 4 et 5 sont présentés sur la Figure 201.

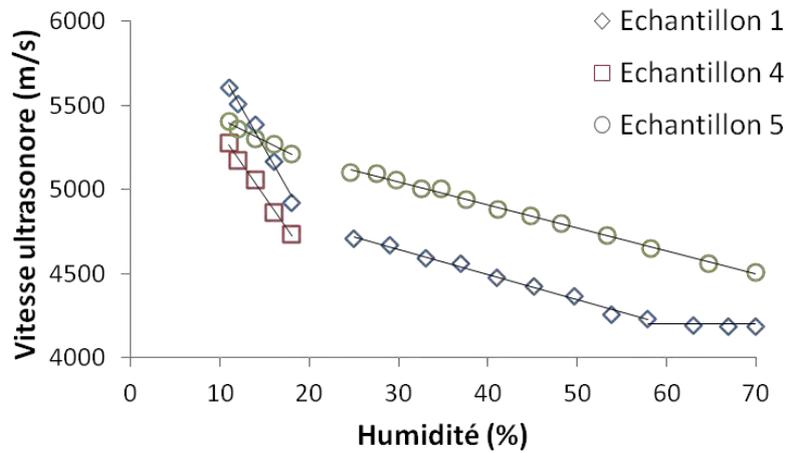


Figure 201: Vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité pour la configuration 6 (Transmission à l'interface)

Nous pouvons observer qu'il est possible de suivre la variation de l'humidité dans les échantillons LC par la configuration 6 pour les humidités comprises entre 10% et 60%. Sur l'échantillon 1, on voit que la vitesse ultrasonore n'évolue plus en fonction de l'humidité à partir de 55%. Cette observation peut être aussi due à la délamination observée, comme ce que l'on a évoqué sur la configuration 5 de cet échantillon (Figure 199). Effectivement, les délaminations ont commencé à partir des emplacements proches des capteurs (Figure 200). Puis, elles ont agrandi au cours de nos essais et ont enfin propagé sur la totalité de l'interface à partir d'environ 50% d'humidité, comme présenté sur la Figure 202.



Figure 202: Délamination sur la totalité de l'interface d'un échantillon LC utilisé pour le suivi de l'humidité par mesures ultrasonores

En effet, la vitesse ultrasonore montre une évolution décroissante linéaire en fonction de l'humidité et les équations de régression sont présentées dans la Table 17. De plus, on observe que l'évolution de la vitesse en fonction de l'humidité est différente avant et après 20% d'humidité (Figure 201 et Table 17). Cela peut être attribué aux deux protocoles d'humidification utilisés dans cette étude, et est identique à l'observation faite dans la littérature (cf. Figure 64, « 1.3.2 Méthodes ultrasonores »), comme expliqué précédemment.

Table 17: Equations de régression de la vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité pour la configuration 6 (Transmission à l'interface) (y = Vitesse ultrasonore en m/s, x = Humidité en %, R² = Coefficient de détermination de la régression linéaire) (*20%-55% pour l'échantillon 1)

Echantillons	Plage d'humidité			
	10%-20%		20%-70%*	
	Equations de régression	R ²	Equations de régression	R ²
1	$y=-97,599x+6728,9$	0,9742	$y=-14,556x+5079,7$	0,9328
4	$y=-77,586x+6111,8$	0,9918	Non applicable	
5	$y=-20,36x+5585,8$	0,9234	$y=-13,507x+5444,4$	0,9629

Néanmoins, l'évolution de la vitesse ultrasonore en fonction de l'humidité n'est pas identique pour tous les échantillons (Figure 201 et Table 17). Pour la plage d'humidité 10%-20%, on voit que la diminution de vitesse en fonction de l'humidité est plus importante pour les échantillons 1 et 4 par rapport à l'échantillon 5. Comme nous avons observé des délaminations sur les échantillons 1 et 4, il se peut donc que la pénétration de l'eau au niveau de l'interface entre deux lamelles dans ces échantillons soit plus facile que dans l'échantillon 5 lors du conditionnement dans l'enceinte climatique. De façon à valider ces interprétations, il faudra toutefois réanalyser les résultats avec les humidités vraies lorsque la campagne d'essais sera terminée afin d'identifier les éléments qui peuvent potentiellement expliquer ce phénomène. Une analyse post mortem devra également être réalisée afin d'affirmer notre analyse.

Pour l'échantillon 4, les valeurs de vitesse ne sont pas présentées pour les humidités au-delà de 20% car les signaux ne sont plus exploitables à cause d'une probable détérioration du couplage capteur/bois due à l'entrée de l'eau à l'interface, comme c'était le cas pour la configuration 5 de cet échantillon.

3.3.2.3. Conclusion

Selon les résultats présentés dans ce paragraphe, on voit qu'il est possible de suivre la variation de l'humidité dans les échantillons LC par intégration de capteurs via les deux configurations de mesures évoquées. Néanmoins, deux principaux problèmes ont été constatés lors de nos essais : la rupture des câbles de connexion des capteurs et la délamination des échantillons. Ces observations signifient que des essais futurs doivent être réalisés pour définir une utilisation optimale des capteurs : mettre en place un câblage plus rigide ou éventuellement usiner des emplacements pour les capteurs afin d'améliorer la qualité et la durabilité du collage, etc.

3.3.3. Synthèse

Dans cette section, les résultats du suivi de l'humidité avec les capteurs intégrés via des mesures ultrasonores ont été évoqués. Dans un premier temps, nous avons montré que l'exploitation des signaux n'est pas affectée par le changement du couplage capteur/bois après le passage sous pression des capteurs lors de la fabrication des échantillons LC. Les résultats obtenus à différentes humidités montrent la sensibilité des variations de vitesse ultrasonore à la variation d'humidité dans les échantillons LC avec capteurs intégrés, et ce, pour les deux configurations de mesures évoquées.

La mesure à partir de la configuration 5 permet une mesure plutôt « locale » au niveau de l'épaisseur de la lamelle (33 mm), alors que pour la configuration 6, la mesure est plus « globale » vu la distance de propagation (300 mm). Ceci pourrait permettre d'avoir des informations complémentaires (locales et globales) pour le suivi d'humidité dans les ouvrages en réalisant les deux configurations simultanément.

Par ailleurs, il est à noter que la configuration 5 permet une mesure directe de la vitesse de propagation des ondes longitudinales permettant une estimation de l'humidité du matériau dans l'épaisseur de la lamelle traversée. Pour la configuration 6, la mesure de vitesse est moins directe, car les capteurs sont instrumentés à l'interface entre deux lamelles. De ce fait, les signaux sont influencés à la fois par les propriétés du matériau (les deux lamelles du bois), la propriété du joint de colle et les ondes guidées à l'interface. Par conséquent, une future modélisation de la propagation d'ondes dans l'assemblage LC permettrait d'affiner l'interprétation de ces différentes composantes des signaux. Cela pourrait aussi être intéressant pour la surveillance de la qualité du collage à l'aide des signatures acoustiques, que ce soit à l'échelle laboratoire ou industrielle.

Néanmoins, les résultats obtenus à partir de ces essais ne sont pas suffisants à cause des différents problèmes rencontrés (la rupture des câbles et la délamination). De ce fait, des essais supplémentaires doivent être envisagés à l'avenir afin de définir une utilisation optimale des capteurs ultrasonores pour une intégration dans le bois LC.

Conclusions et perspectives

Ce travail de thèse s'inscrit dans l'optique d'améliorer la gestion durable des ouvrages d'art en bois, et plus particulièrement ceux construits avec du bois LC. Afin de répondre à cette problématique, il s'avère nécessaire de développer des outils de diagnostics non destructifs pour le suivi de l'humidité car cette dernière se révèle être responsable de la plupart des pathologies constatées sur les structures en bois. Néanmoins, les solutions qui existent à ce jour ne concernent que des mesures surfaciques, bien souvent insuffisantes pour obtenir une prédiction fiable de la durée de vie des ouvrages.

Suite à ces constats, nous avons proposé de transformer le bois LC en « structure intelligente » par intégration d'un système de suivi de l'humidité au niveau des lamelles. L'objectif est de pouvoir effectuer des mesures locales, ce qui permettra de récupérer des informations plus précises et aussi d'établir un lien entre l'humidité (ou cycles d'humidification/séchage) et la durée de vie résiduelle des ouvrages.

Pour ce faire, il a d'abord fallu identifier les méthodes de suivi permettant à la fois de faire la mesure de l'humidité du matériau bois, mais permettant également une intégration des capteurs pour des mesures au niveau des lamelles du bois LC. Selon le processus de fabrication de ce dernier, les technologies de capteurs doivent pouvoir résister à une pression de collage de 10 bars et avoir une dimension suffisamment faible pour pouvoir s'intégrer au niveau de l'épaisseur du joint collé (environ 0,3 mm). En plus, ces capteurs ne doivent pas affecter la résistance du joint collé après intégration. Enfin, il est préférable que ces capteurs aient un coût modéré pour faciliter leur industrialisation.

Afin de lever ces verrous scientifiques, nous avons commencé par effectuer une recherche bibliographique afin de sélectionner les méthodes de suivi pouvant répondre à ces contraintes. D'après cette recherche, deux catégories de méthodes ont montré leur potentiel dans le cadre de cette étude. Ce sont les mesures électriques (résistives/capacitives) et les mesures ultrasonores. Qui plus est, à partir des informations ressorties de cette recherche, nous avons aussi identifié les types de capteurs intégrables pour ces deux techniques. Il s'agit des électrodes de type « pointe » ou de type « surfacique » pour les mesures électriques, et 3 familles de capteurs à film piézoélectrique (PVDF, AFC et MFC) pour les mesures ultrasonores. Il a ensuite été décidé de tester 4 configurations pour les mesures électriques, et 2 configurations pour les mesures ultrasonores à partir des informations ressorties de la littérature.

Par la suite, nous avons donc mis en place un plan d'expérience commun pour ces deux types de méthodes. Premièrement, nous avons réalisé des études préliminaires qui ont eu pour but de :

- 1) Vérifier la faisabilité des mesures électriques/ultrasonores dans le bois avec les configurations identifiées ;
- 2) Vérifier le comportement de ces capteurs sous une pression de 10 bars, imposée par le processus de fabrication du bois LC.

Nous avons ensuite utilisé deux procédures d'humidification (conditionnement dans une enceinte climatique, suivi par une immersion en bassin) pour faire varier l'humidité dans les échantillons afin d'investiguer la réponse des capteurs aux changements d'humidité sur la plage 10%-70%. Qui plus est, afin d'avoir une planification fiable des différentes mesures à

réaliser, une étude des cinétiques d'humidification a été effectuée.

Concernant les mesures électriques, les études préliminaires ont montré le bon fonctionnement des 4 configurations de mesures identifiées. En outre, à travers l'étude des cinétiques d'humidification, une observation importante a aussi été faite. Nous avons pu constater trois phases différentes d'absorption de l'eau dans les échantillons :

- La phase 1 (10%-25% d'humidité, cf. Figure 111, Page 76) avec principalement l'absorption de l'eau liée;
- La phase 2 (25%-55% d'humidité, cf. Figure 111, Page 76) avec à la fois l'absorption de l'eau liée et l'absorption de l'eau libre ;
- La phase 3 (55%-80% d'humidité, cf. Figure 111, Page 76) avec uniquement l'absorption de l'eau libre.

Ainsi, de la phase 1 à la phase 3, on a observé un changement des cinétiques d'humidification en fonction de la plage d'humidité. Toutefois, il serait bien de confirmer ces observations par des essais futurs à l'aide des techniques complémentaires permettant d'identifier l'eau libre et l'eau liée dans le bois, telles que la Résonance Magnétique Nucléaire, la Tomographie, l'analyse post mortem, etc.

Concernant les résultats du suivi de l'humidité, les 4 configurations de mesures ont montré leur potentiel pour suivre la variation d'humidité dans les échantillons simples pour la plage d'humidité étudiée (10% à 70%). Les trois configurations avec des électrodes « pointe » (1, 2 et 3) présentent des lois de comportement similaires pour l'estimation de la résistance électrique en fonction de l'humidité alors que le comportement de la configuration 4 est différent à cause de l'influence de la rugosité de la surface de l'échantillon.

Selon le calcul des incertitudes d'estimation de l'humidité, il ressort que la configuration 3 est la plus performante pour une estimation de l'humidité par mesures résistives dans les échantillons simples. Concernant la configuration 4, elle ne permet pas de différencier les humidités comprises entre 10% et 20% par mesures résistives, à cause des incertitudes d'estimation de l'humidité trop importantes. Cette observation peut être liée au fait que l'on n'a pas utilisé un protocole assez reproductible (ex. pression constante et contrôlée) lors du collage des électrodes surfaciques sur les échantillons de bois. Pour autant, la configuration 4 permet bien de mesurer l'humidité par mesures capacitives pour la plage d'humidité étudiée (10% à 70%).

Concernant les échantillons LC, les 4 configurations de mesures ont montré leur potentiel pour suivre la variation d'humidité pour la plage d'humidité étudiée (10% à 70%). De plus, les 4 configurations de mesures présentent des lois de comportement comparables pour les échantillons LC, quel que soit le type d'électrodes utilisé. Ceci donne des informations très importantes pour la modélisation de la résistance électrique en fonction de l'humidité du bois. Cette observation est différente de celle faite sur les échantillons simples, où on l'a observé que seules les configurations 1, 2 et 3 présentent des évolutions comparables. L'évolution de la configuration 4 est différente de celles des 3 autres configurations dans le cas des échantillons simples. Ceci peut aussi être lié au fait que le protocole de collage des électrodes n'est pas assez reproductible.

Les incertitudes d'estimation de l'humidité ont également été évaluées pour les échantillons LC. En effet, la plupart des incertitudes d'estimation de l'humidité sont inférieures à $\pm 1\%$ (d'humidité) pour les humidités comprises entre 10% et 20%; et inférieures à $\pm 5\%$

(d'humidité) pour les humidités comprises entre 20% et 70%. Cette différence sur les incertitudes en fonction de la plage d'humidité est liée au fait que, lorsqu'il y a la présence de l'eau libre dans les cavités du bois (humidité > 20%), la mesure est plutôt liée à une humidité locale qu'à une humidité globale de l'échantillon car le courant électrique circule préférentiellement sur les zones les plus humides, i.e. les cavités du bois qui peuvent être assimilées à des colonnes d'eau continues. Par ailleurs, les incertitudes obtenues sur les échantillons LC sont plus faibles de manière générale que celles obtenues sur les échantillons simples. Les explications de ce phénomène reposent sur le collage des lamelles supplémentaires dans le cas des échantillons LC.

Nous avons également étudié l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures électriques dans ce travail. Une influence n'a été constatée que sur la configuration 4. Cette influence a été expliquée par l'évolution de la contribution de la résistance/capacité d'interface par rapport à la résistance/capacité totale en fonction de l'humidité. Toutefois, cette influence observée n'affecte pas la faisabilité de la mesure de l'humidité comme le présente nos résultats obtenus sur les échantillons de différentes épaisseurs.

Enfin, parmi l'ensemble des configurations de mesure, au regard des résultats obtenus, la configuration 4 semble être celle qui présente le meilleur potentiel pour une industrialisation pour les raisons suivantes :

- 1) La réalisation de cette configuration est relativement simple par rapport aux autres configurations sur la chaîne de fabrication du bois LC car elle ne nécessite pas d'usinage supplémentaire ;
- 2) Cette configuration est plus polyvalente car elle permet de récupérer des informations complémentaires grâce à la possibilité de réaliser à la fois des mesures résistives et des mesures capacitives ;
- 3) Le coût de cette configuration est relativement faible par rapport aux autres configurations (cf. Table 9).

En ce qui concerne les mesures ultrasonores, les études préliminaires réalisées avec les deux configurations de mesures identifiées nous ont permis d'obtenir les courbes caractéristiques en fréquences à l'aide d'un capteur conventionnel (R15 α) dans le bois pour les trois familles de capteurs à film piézoélectrique sélectionnées: les PVDF, les AFC et les MFC. De plus, ces essais nous ont également permis de mettre en évidence que le capteur le plus performant parmi les 6 modèles de capteurs testés était le capteur MFC M4010 (que l'on appellera MFC dans la suite pour simplifier).

Les tests de mesures de vitesse de propagation des ondes ultrasonores avec ce type de capteur ont montré la faisabilité des mesures dans le bois sous pression de 10 bars, et ce, aux 2 différentes valeurs d'humidité (11% et 70%).

Puis, après avoir fabriqué les échantillons LC avec les capteurs MFC intégrés, les mesures réalisées sur ces échantillons ont montré que le changement des conditions du couplage acoustique capteur/bois par rapport au cas des études préliminaires (pression de 10 bars maintenue en permanence, couplant différent, etc.) n'influence pas l'exploitation des signaux.

Enfin, les résultats du suivi de l'humidité montrent qu'il est possible de suivre la variation d'humidité dans le bois LC avec les capteurs MFC intégrés au niveau des lamelles pour les deux configurations de mesures identifiées (jusqu'à environ 40% pour la configuration 5 et 70% pour la configuration 6).

En revanche, vu que peu de résultats ont été obtenus à cause des différents problèmes

rencontrés (la rupture des câbles et la délamination), il faudrait envisager des essais supplémentaires afin de définir une utilisation optimale des capteurs pour une intégration dans le bois LC.

Au regard des résultats obtenus dans ce travail, nous avons donc bien commencé à répondre à la problématique concernant l'intégration des capteurs pour un suivi de l'humidité dans les poutres LC. Dans la continuité de ce projet de recherche, les études futures consisteront donc à :

- Vérifier que la résistance mécanique du joint de colle n'est pas affectée par la présence des capteurs ;
- Industrialiser ces configurations de mesure pour effectuer le suivi in situ et en continu de l'humidité dans les ouvrages d'art en bois LC ;
- Utiliser ces configurations pour établir un lien entre la durabilité des structures LC et les cycles humidification/séchage afin de prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages d'art en bois.

En ce qui concerne les essais de durabilité qui s'inscrivent dans le cadre d'une suite de ce travail de thèse, selon les informations ressorties de la littérature, il reste encore de nombreux verrous scientifiques à lever tels que :

- L'identification des cycles de vieillissement accélérés d'humidification/séchage permettant de réduire le temps nécessaire pour les essais de durabilité ;
- La mise en place de coefficients d'abattement des propriétés mécaniques liés à l'exposition du matériau aux cycles d'humidification/séchage afin d'avoir une prédiction plus fiable de la durée de vie des structures LC.

De façon à mener à bien ces futures études, et au regard des résultats obtenus dans ces travaux, nous recommandons d'utiliser les configurations de mesures électriques car ces dernières présentent plusieurs avantages par rapport aux mesures ultrasonores :

- des coûts plus faibles à la fois concernant les capteurs et les dispositifs de mesure (cf. Table 9 et Table 15) ;
- une simplicité de mise en place des appareils de mesure et des protocoles de préparation de l'instrumentation.

Concernant les futurs développements des mesures ultrasonores pour le suivi de l'humidité dans les structures LC avec intégration de capteurs, au vu des résultats présentés dans ce manuscrit, il est nécessaire de poursuivre les investigations pour définir une utilisation optimale des capteurs. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir faire des mesures à la fois locales et globales. De plus, les capteurs utilisés (de nature piézoélectrique) pourraient également permettre de récupérer des informations pour le contrôle de la santé des structures en utilisant d'autres méthodes acoustiques (émission acoustique, vibration etc.) (Fu 2005, Breyse 2012).

A l'échelle industrielle, le coût plus élevé de l'instrumentation pour les mesures ultrasonores n'est pas favorable au développement de cette méthode, mais elles constituent une alternative aux méthodes électriques, car elles peuvent également fournir des informations liées aux propriétés mécaniques. Une future modélisation de la propagation des ondes dans l'assemblage LC permettrait également d'affiner l'interprétation des signaux obtenus, et pourrait notamment être intéressante pour la surveillance de la qualité du collage à l'aide des signatures acoustiques.

Références

- AFNOR (1994) NF EN 350-2, Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif - Partie 2 : Guide de la durabilité naturelle du bois et de l'imprégnabilité d'essences de bois choisies pour leur importance en Europe.
- AFNOR (1996) NF EN 599-1 Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Performances des produits préventifs de préservation du bois établies par des essais biologiques - Partie 1 : Spécifications par classe d'emploi.
- AFNOR (2002a) NF EN 13183-1, Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1 : détermination par la méthode par dessiccation.
- AFNOR (2002b) NF EN 13183-2, Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2 : estimation par méthode électrique par résistance.
- AFNOR (2005) NF EN 13183-3, Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 3 : estimation par méthode capacitive.
- AFNOR (2013) NF EN 14080, Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences.
- Ahadian S, Ramón-Azcón J, Ostrovidov S, et al (2012) Interdigitated array of Pt electrodes for electrical stimulation and engineering of aligned muscle tissue. *Lab Chip* 12:3491–3503.
- Ai W (2016) Glissement moléculaire dans les matériaux lignocellulosiques : mesures de perméabilité apparente et identification de paramètres morphologiques. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 144 p
- Albero R, Aléon D, Armand Decker S, et al (2013) Manuel de l'ingénierie bois: pense précis bois. Eyrolles, Paris, France.
- Almeida G (2006) Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 232 p.
- Ashby D (2012) *Electrical Engineering 101 - Everything You Should Have Learned in School... but Probably Didn't*. Third Edition, Elsevier, Oxford, UK.
- Auvergne Promobois (2012) Guide pour construire avec le bois. Guide de l'Auvergne Promobois.
- Balageas D, Fritzen C-P, Güemes A (2006) *Structural Health Monitoring*. ISTE, London, UK.
- Barbezat M, Brunner AJ, Flüeler P, et al (2004) Acoustic emission sensor properties of active fibre composite elements compared with commercial acoustic emission sensors. *Sens Actuators Phys* 114:13–20.
- Barbezat M, Brunner AJ, Huber C, Flüeler P (2007) Integrated active fiber composite elements: characterization for acoustic emission and acousto-ultrasonics. *J Intell Mater Syst Struct* 515–525.
- Barbier V, Joineau J-Y (2006) Panorama de 15 ouvrages d'art en bois français. Guide du CETE de l'Est - LRPC de Nancy, France.
- Barbier V (2007) Développement durable et utilisation du bois dans les ponts. In: GC'2007. Paris, France.

- Beauger A, Haussonne J-M, Niépce J-C (2007) Condensateurs. Techniques de l'ingénieur, E1925.
- Behnia A, Chai HK, Shiotani T (2014) Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Constr Build Mater* 65:282–302.
- Bent AA, Hagood NW (1997) Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes. *J Intell Mater Syst Struct* 8:903–919.
- Bergmeister K, Santa U (2000) Structural Health Monitoring of Concrete Bridges. In: Jacquot PDP, Fournier DJ-M *Interferometry in Speckle Light*. Springer Berlin Heidelberg, pp 633–640.
- Biger J-P (1997) Pathologie des structures en bois. Techniques de l'ingénieur, C2450v2.
- Björngrim N (2015) Monitoring of a Timber Footbridge. Thèse de Doctorat, Lulea University of Technology, 75 p.
- Björngrim N, Hagman O, Wang X (2016) Moisture Content Monitoring of a Timber Footbridge. *Bioresources* 11:3904–3913.
- Björngrim N, Fjellström P-A, Hagman O (2017) Resistance Measurements to Find High Moisture Content Inclusions Adapted for Large Timber Bridge Cross-Sections. *BioResources* 12:3570–3582.
- Böhnke I (1993) Etude expérimentale et théorique des traitements thermiques du bois. Caractérisation physico-mécanique des bois traités. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 312 p.
- Brancheriau L (2013) Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites. Thèse HDR, Université Montpellier II, 122 p.
- Breyse D (2012) Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques. Springer Netherlands.
- Brischke C, Bayerbach R, Rapp AO (2006) Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Mater Sci Eng* 1:91–107.
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R (2008a) Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. *Build Environ* 43:1566–1574.
- Brischke C, Rapp AO (2008b) Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different micro-climates. *Wood Sci Technol* 42:663–677.
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R, et al (2008c) Monitoring the “material climate” of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on buildings. *Build Environ* 43:1575–1582.
- Brischke C, Rapp AO (2010) Service life prediction of wooden components - Part 1: Determination of dose-response functions for above ground decay. In: The International Research Group on Wood Protection, IRG/WP/10-20439, Stockholm.
- Brischke C, Behnen CJ, Lenz M-T, et al (2012) Durability of oak timber bridges - Impact of inherent wood resistance and environmental conditions. *Int Biodeterior Biodegrad* 75:115–123.

- Brischke C, Meyer L, Bornemann T, et al (2013a) Service life of timber components: prognosis based on 3 years high-frequency monitoring. *Eur J Wood Wood Prod* 71:79–90.
- Brischke C, Meyer L, Bornemann T (2013b) The potential of moisture content measurements for testing the durability of timber products. *Wood Sci Technol* 47:869–886.
- Brischke C, Thelandersson S (2014a) Modelling the outdoor performance of wood products - A review on existing approaches. *Constr Build Mater* 66:384–397.
- Brischke C, Lampen SC (2014b) Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood. *Eur J Wood Wood Prod* 72:289–292.
- Brischke C, Meyer-Veltrup L, Bornemann T (2017) Moisture performance and durability of wooden façades and decking during six years of outdoor exposure. *J Build Eng* 13:207–215.
- Broomfield J, Millard S (2002) Measuring concrete resistivity to assess corrosion rates. *Concrete* 36:37–39.
- Brunner AJ, Barbezat M, Flüeler P, Huber C (2004) Composites from piezoelectric fibers as sensors and emitters for acoustic applications. *J Acoust Emiss* 22:127–137.
- Brunner AJ, Barbezat M, Huber C, Flüeler PH (2005) The potential of active fiber composites made from piezoelectric fibers for actuating and sensing applications in structural health monitoring. *Mater Struct* 38:561–567.
- Bucur V (2003) *Nondestructive characterization and imaging of wood*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bucur V (2006) *Acoustics of wood*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bungey JH, Grantham MG, Millard S (2006) *Testing of Concrete in Structures*. Fourth Edition, CRC Press, USA.
- Burr HK, Stamm AJ (1947) Diffusion in Wood. *J Phys Colloid Chem* 51:240–261.
- Cai J, Qiu L, Yuan S, et al (2012) Structural Health Monitoring for Composite Materials. In: *Composites and Their Applications*. InTech, Croatia.
- Calegari L, Gatto DA, Stangerlin DM (2011) Influence of moisture content, specific gravity and specimen geometry on the ultrasonic pulse velocity in *Eucalyptus grandis* hill ex Maiden wood. *Rev Ciênc Madeira Braz J Wood Sci* 2:64–74.
- Candanedo L, Derome D (2005) Numerical simulation of water absorption in softwood. In: *Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada*, pp 15–18.
- Caneva C, De Rosa IM, Sarasini F (2006) Damage mechanisms in loaded aramid composites by means of embedded PVDF acoustic emission sensors. *Adv Mater Res* 13:337–342.
- Caneva C, De Rosa IM, Sarasini F (2008) Monitoring of Impacted Aramid-Reinforced Composites by Embedded PVDF Acoustic Emission Sensors. *Strain* 44:308–316.
- CECOBois (2012) *Guide de bonnes pratiques pour la construction commerciale en gros bois d'œuvre ou d'ingénierie*. Guide du CECOBois (Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois), 2ème édition, Québec, Canada.
- Cheeke JDN (2012) *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA.

- Cherfaoui M (2006) Essais non destructifs. Techniques de l'ingénieur, BM 6450.
- Cho H, Takemoto M (2007) Film-type PZT sensors as AE sensors and active guided wave transducers. Lake Tahoe, Nevada, USA, pp 22–27.
- Dai G, Ahmet K (2001) Long-term monitoring of timber moisture content below the fiber saturation point using wood resistance sensors. For Prod J 51:52–58.
- D'Ayala D, Branco JM, Riggio M, et al (2014) Assessment, reinforcement and monitoring of timber structures: FPS Cost Action FP1101. Mexico City, Mexico, pp 1–12.
- De Oliveira FGR, Candian M, Lucchette FF, et al (2005) A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*). Build Environ 40:297–300.
- De Rosa IM, Sarasini F (2010) Use of PVDF as acoustic emission sensor for in situ monitoring of mechanical behaviour of glass/epoxy laminates. Polym Test 29:749–758.
- Dérobot X, Iaquina J (2006) Capacitive Methods for Structural Health Monitoring in Civil Engineering. In: Structural Health Monitoring. ISTE, London, pp 463–490.
- Dervos CT, Michaelides JM (1998) The effect of contact capacitance on current-voltage characteristics of stationary metal contacts. IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol Part A 21:530–540.
- Di Scalea FL, Matt H, Bartoli I, et al (2007) Health Monitoring of UAV Wing Skin-to-spar Joints using Guided Waves and Macro Fiber Composite Transducers. J Intell Mater Syst Struct 18:373–388.
- Dietsch P, Franke S, Franke B, et al (2014a) Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. J Civ Struct Health Monit 5:115–127.
- Dietsch P, Gamper A, Merk M, Winter S (2014b) Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures. J Civ Struct Health Monit 5:153–165.
- Dirol D, Deglise X (2001) Durabilité des bois et problèmes associés. Hermes science publications, Paris, France.
- Doignon G (2009a) Passerelle sur le Sichon à Vichy - Compte rendu d'inspection détaillée du 6 Mai 2009. In: Opération de recherche LCPC 11N065 sujet 3: Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages en bois, Clermont-Ferrand, France.
- Doignon G (2009b) Passerelle Avenue Voltaire à Thiers - Compte rendu d'inspection détaillée du 5 Mai 2009. In: Opération de recherche LCPC 11N065 sujet 3: Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages en bois, Clermont-Ferrand, France.
- Doignon G (2009c) Passerelle du Pont du Navire à Thiers - Compte rendu d'inspection détaillée du 5 Mai 2009. In: Opération de recherche LCPC 11N065 sujet 3: Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages en bois, Clermont-Ferrand, France.
- Duke J (1988) Acousto-Ultrasonics - Theory and Application. Springer New York.
- Dürager C, Heinzelmann A, Riederer D (2013) A wireless sensor system for structural health monitoring with guided ultrasonic waves and piezoelectric transducers. Struct Infrastruct Eng 9:1177–1186.

- Eaton M, Pullin R, Holford K, et al (2009) Use of macro fibre composite transducers as acoustic emission sensors. *Remote Sens* 1:68–79.
- El-Khoury O, Adeli H (2013) Recent Advances on Vibration Control of Structures Under Dynamic Loading. *Arch Comput Methods Eng* 20:353–360.
- Eyma F (2002) Caractérisation des efforts de coupe de différentes essences de bois à l'aide de leurs paramètres mécaniques. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, 182 p.
- Fanchon J-L (1994) Guide des sciences et technologies industrielles: dessin industriel et graphes, matériaux, éléments de construction, économie et organisation d'entreprise, automatisme. AFNOR : Nathan, Paris, France.
- Feliu S, Andrade C, González JA, Alonso C (1996) A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete. *Mater Struct* 29:362–365.
- Forsén H, Tarvainen V (2000) Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. VTT Publications 420, Otamedia Oy, Espoo, Finland.
- Franke B, Franke S, Mueller A, et al (2013a) Long term monitoring of timber bridges - Assessment and results. *Adv Mater Res* 778:749–756.
- Franke B, Widmann R, Müller A, Tannert T (2013b) Assessment and monitoring of the moisture content of timber bridges. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Timber Bridges*, Las Vegas, USA.
- Franke B, Franke S, Müller A (2014) Case studies: long-term monitoring of timber bridges. *J Civ Struct Health Monit* 5:195–202.
- Fredriksson M (2010) Methods for determination of moisture conditions in wood exposed to high moisture levels. Thèse de doctorat, Lund Institute of Technology, 60 p.
- Fredriksson M, Wadso L, Johansson P (2013) Small resistive wood moisture sensors: a method for moisture content determination in wood structures. *Eur J Wood Wood Prod* 71:515–524.
- Fu G (2005) *Inspection and Monitoring Techniques for Bridges and Civil Structures*. Woodhead Publishing, Cambridge, England.
- Gérard J, Guibal D, Paradis S, et al (2011) Tropix 7. CIRAD. doi: 10.18167/74726F706978
- Glisic B, Inaudi D (2008) *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, England.
- Goncalves R, Leme da Costa OA (2008) Influence of Moisture Content on Longitudinal, Radial, and Tangential Ultrasonic Velocity for Two Brazilian Wood Species. *Wood Fiber Sci* 40:580–586.
- Gu H, Zhao Y, Wang ML (2005) A wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring. *Struct Control Health Monit* 12:329–343.
- Guillot J (2007) Modélisation et calcul des assemblages vissés. Généralités. *Technique de l'ingénieur*, BM5560.
- Guitard D (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*. Cépaduès éditions, Toulouse, France.

- Gustafsson A, Pousette A, Björngrim N (2010) Health monitoring of timber bridges. In: Proceedings of 1st International Conference on Timber Bridges, Lillehammer, Norway.
- Guzman E, Cugnoni J, Gmür T, et al (2013) Survivability of integrated PVDF film sensors to accelerated ageing conditions in aeronautical/aerospace structures. *Smart Mater Struct* 22:065020 (12pp).
- Hagedorn P, Spelsberg-Korspeter G (2014) *Active and Passive Vibration Control of Structures*. Springer-Verlag Wien.
- Hansson EF, Brischke C, Meyer L, et al (2012) Durability of timber outdoor structures - modelling performance and climate impacts. In: Proceedings of 12th World Conference on Timber Engineering, Auckland.
- Hernandez RE, Caceres CB (2010) Magnetic Resonance Microimaging of Liquid Water Distribution in Sugar Maple Wood Below Fiber Saturation Point. *Wood Fiber Sci* 42:259–272.
- Hjort S (1996) Full-scale method for testing moisture conditions in painted wood paneling. *J Coat Technol* 68:31–39.
- Holm R (1967) *Electric Contacts - Theory and Application*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Huang M, Jiang L, Liaw PK, et al (1998) Using acoustic emission in fatigue and fracture materials research. *JOM-E* 50:1–14.
- James WL (1963) Electric moisture meters for wood. General Technical Report FPL-GTR-6, Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.
- James WL (1975) Dielectric Properties of Wood and Hardboard: Variation with Temperature, Frequency, Moisture Content, and Grain Orientation. DTIC Document, Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.
- James WL (1977) Dielectric Behavior of Douglas-Fir at Various Combinations of Temperature, Frequency, and Moisture-Content. *For Prod J* 27:44–48.
- James W (1986) The Interaction of Electrode Design and Moisture Gradients in Dielectric Measurements on Wood. *Wood Fiber Sci* 18:264–275.
- James WL (1994) Fundamentals of hand held moisture meters: An outline. In: Proceedings of ASTM Hand-Held Moisture Meter Workshop, 5 May. Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA, pp 13–16.
- Jazayeri S, Ahmet K (2000) Detection of transverse moisture gradients in timber by measurements of capacitance using a multiple-electrode arrangement. *For Prod J* 50:27–32.
- Jodin P (1994) *Le bois matériau d'ingénierie*. ARBOLOR, Nancy, France.
- Johansson J, Hagman O, Fjellner BA (2003) Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber. *J Wood Sci* 49:312–316.
- Johansson J, Blom A, Dvinskikh S (2013) NMR-measurements for determination of local moisture content of coated wood. *J Coat Technol Res* 10:601–607.

- Kabir MF, Khalid KB, Daud WM, Aziz SHA (1997) Dielectric properties of rubber wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line. *Wood Fiber Sci* 29:319–324.
- Kabir MF, Daud WM, Khalid K, Sidek H a. A (1998) Dielectric and ultrasonic properties of rubber wood. Effect of moisture content grain direction and frequency. *Holz Als Roh-Werkst* 56:223–227.
- Kasal B, Anthony RW (2004) Advances in in situ evaluation of timber structures. *Prog Struct Eng Mater* 6:94–103.
- Kasal B, Lear G (2011) Moisture Measurement. In: *In Situ Assessment of Structural Timber*. Springer, pp 99–104.
- Kasal B (2013) Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures–COST FP1101. *Adv Mater Res* 778:1037–1040.
- Kawai H (1969) The Piezoelectricity of Poly (vinylidene Fluoride). *Jpn J Appl Phys* 8:975–976.
- Khazaei J (2008) Water absorption Characteristic of three wood varieties. *Cercet Agron În Mold* 134:1–12.
- Kholkin AL, Pertsev NA, Goltsev AV (2008) Piezoelectricity and crystal symmetry. In: *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Springer US, pp 17–38.
- Koch J, Simon A, Arndt RW (2016) Monitoring of moisture content of protected timber bridges. In: *Proceedings of WCTE 2016 (World Conference on Timber Engineering)*, Vienna, Austria.
- Koch J, Arndt RW, Simon A, Jahreis AG (2017) Moisture monitoring of nine protected timber bridges in Germany. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Timber Bridges*. 27-29 Juin, Skellefteå, Sweden, pp 70–79
- Labbé N (2002) Mise au point d'une nouvelle méthode de dosage de l'eau dans le bois et caractérisation des composés organiques du pin maritime par résonance magnétique nucléaire domaine temps. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 225 p.
- Lataste J-F (2002) Évaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivité électrique. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 295 p.
- Laugier P, Haïat G (2011) Introduction to the Physics of Ultrasound. In: *Bone Quantitative Ultrasound*. Springer Netherlands, pp 29–45
- Lavisci P (2001) Pathologies des structures en bois: analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages structuraux pour la restauration des charpentes. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, 164 p.
- LCPC (2008) Recommandations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois. Guide technique du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussée), Paris, France.
- Le Roy R (2013) Ouvrages d'art en bois - Perspectives de développement en France. Présentation aux 2èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du bois, Paris, France.
- Lechner T (2013) In-situ assessment of timber structures-Assessment methods and case studies. Thèse de doctorat, Chalmers University of Technology, 48 p.

- Leconte A (1995) Caractérisation des mesures et grandeurs à mesurer. Technique de l'ingénieur, D1500.
- Leicester RH (2001) Engineered durability for timber construction. *Prog Struct Eng Mater* 3:216–227.
- Leicher D, Laz T (2014) Usages durables du bois en milieu urbain. Guide du ALEC Plaine Commune (Agence Locale de l'Énergie et du Climat de Plaine Commune), Saint-Denis, France.
- Liao WH, Wang DH, Huang SL (2001) Wireless Monitoring of Cable Tension of Cable-Stayed Bridges Using PVDF Piezoelectric Films. *J Intell Mater Syst Struct* 12:331–339.
- Lin RT (1967) Review of the electrical properties of wood and cellulose. *For Prod J* 17:54–60.
- Liu Z, Liu S, Luo Y, et al (2010) Permittivity measurement of wood based on an uniplanar capacitance sensor. In: 2010 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), pp 912–916.
- LMC (2011) Bois - Travaux pratiques de matériaux de construction. Guide du LMC (Laboratoire de Matériaux de Construction), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Ludwig N, Redaelli V, Rosina E, Augelli F (2004) Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. *Infrared Phys Technol* 46:161–166.
- Mańka M, Rosiek M, Martowicz A, et al (2013) Lamb wave transducers made of piezoelectric macro-fiber composite. *Struct Control Health Monit* 20:1138–1158.
- Marjanović M, Paunović V, Prijić Z, et al (2014) On the measurement methods for dielectric constant determination in Nb/BaTiO₃ ceramics. In: X International Symposium on Industrial Electronics - INDEL, 06-08, November. Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, pp 38–41.
- Matt HM, Di Scalea FL (2007) Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures. *Smart Mater Struct* 16:1489–1499.
- Melnykowycz M, Kornmann X, Huber C, et al (2006) Performance of integrated active fiber composites in fiber reinforced epoxy laminates. *Smart Mater Struct* 15:204–212.
- Menguy R (1997) Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides. Techniques de l'ingénieur, D 2310.
- Montero MJ, de la Mata J, Esteban M, Hermoso E (2015) Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of Scots pine from Spain. *Maderas Cienc Tecnol* 17:407–420.
- Moron C, Garcia-Fuentevilla L, Garcia A, Moron A (2016) Measurement of Moisture in Wood for Application in the Restoration of Old Buildings. *Sensors* 16:697–705.
- Muth J (2014) Basic Statistics and Pharmaceutical Statistical Applications, Third Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Naar S (2006) Evaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 290 p.

- Natterer J, Sandoz JL, Rey M (2004) Construction en bois: matériau, technologie et dimensionnement. PPUR (Presses polytechniques et universitaires romandes), Lausanne, Suisse.
- Navi P, Heger F (2005) Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse.
- Nguyen TA (2014) Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 180 p.
- Norberg P (1999a) Electrical Measurement of Moisture Content in Porous Building Materials. In: Eighth International Conference on Durability of Building Materials and Components (8DBMC), 30 may - 3 June. Vancouver, Canada, pp 1030–1039.
- Norberg P (1999b) Monitoring wood moisture content using the WETCORR method Part 1: Background and theoretical considerations. Holz Als Roh- Werkst 57:448–453.
- Norberg P (2000) Monitoring wood moisture content using the WETCORR method Part 2: Calibration and validation. Holz Als Roh- Werkst 58:129–134.
- Norton MP, Greenhalgh R (1990) Estimation of moisture content in timber using ultrasonics. Appl Energy 35:267–297.
- Okabe Y, Nakayama F (2009) Damage detection in CFRP laminates by ultrasonic wave propagation using MFC actuator and FBG sensor. Trans Jpn Soc Aeronaut Space Sci Space Technol Jpn 7:Pc_7–Pc_12.
- Or SW, Chan HLW, Choy CL (2000) P(VDF-TrFE) copolymer acoustic emission sensors. Sens Actuators Phys 80:237–241.
- Passarini L (2015) Étude du comportement physique des bois au-dessus et au-dessous du point de saturation des fibres. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 167 p.
- Patton-Mallory M, Anderson KD, DeGroot RC (1987) An acousto-ultrasonic method for evaluating decayed wood. In: Proc. of Sixth Nondestructive Testing of Wood Symposium, Washington State Univ, Pullman, WA. pp 167–189.
- Perrin M (2009) Etude et caractérisation par émission acoustique et mesures électrochimiques de la fragilisation par l'hydrogène des câbles de précontrainte. Application aux ouvrages d'art. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 138 p.
- Perveen K, Bridges GE, Bhadra S, Thomson DJ (2014) Corrosion Potential Sensor for Remote Monitoring of Civil Structure Based on Printed Circuit Board Sensor. Ieee Trans Instrum Meas 63:2422–2431.
- Pham HS, Le Roy R, Caron J-F, Foret G (2007) Nouveaux tabliers bois-BHP-carbone pour les ouvrages d'art. In : GC'2007, Paris, France.
- Philippidis TP, Aggelis DG (2003) An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. Cem Concr Res 33:525–538.
- Phillipson MC, Baker PH, Davies M, et al (2007) Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches. Build Serv Eng Res Technol 28:303–316.
- Plassat F (2009) Travail mécanique du bois - Mise en œuvre du bois. Techniques de l'ingénieur, BM 7 404v2.

- Pousette A, Fjellström P-A (2016) Experiences from timber bridge inspections in Sweden – examples of influence of moisture. Rapport technique, SP Technical Research Institute of Sweden, Sweden.
- Priya S (2007) Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. *J Electroceramics* 19:167–184.
- Priya S, Taneja R, Myers R, Islam R (2008) Piezoelectric energy harvesting using bulk transducers. In: *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Springer, pp 373–388.
- Quarles SL, Lemaster R (1989) Current AE/AU research in solid wood and wood-based composites at the University of California Forest Products Laboratory. In: *Nondestructive testing and evaluation for manufacturing and construction*. Hemisphere, New York, pp 177–188.
- Raghavan A, Cesnik CE (2007) Review of guided-wave structural health monitoring. *Shock Vib Dig* 39:91–116.
- Raichel DR (2006) *The science and applications of acoustics*. Springer Science & Business Media, New York, USA.
- Rao MB, Bhat MR, Murthy CRL, et al (2006) Structural health monitoring (SHM) using strain gauges, PVDF film and fiber bragg grating (FBG) sensors: A comparative study. In: *Proceeding of National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, Indian Society for Non-Destructive Testing, Hyderabad. Citeseer, pp 333–337.
- Renaudin F, Jandin P (2017) Design of wood-concrete composite beams under deck bridge – Theoretical developments and construction examples. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Timber Bridges*, Skellefteå, Sweden, pp 204–249.
- Riggio M, Sandak A, Sandak J (2012) In-Situ Assessment of Structural Timber Using Selected Wave-Based Ndt Methods. In: *8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2012*, Wroclaw, Poland, pp 2504–2512.
- Riggio M, Anthony RW, Augelli F, et al (2014) In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Mater Struct* 47:749–766.
- Rodríguez-Abad I, Martínez-Sala R, García-García F, Capuz-Lladro R (2010) Non-destructive methodologies for the evaluation of moisture content in sawn timber structures: ground-penetrating radar and ultrasound techniques. *Surf Geophys* 8:475–482.
- Ross RJ (2010) *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin.
- Rossing TR (2014) *Springer Handbook of Acoustics*. Springer New York.
- Safari A, Akdogan EK (2008) *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications*. Springer US.
- Sakai H, Minamisawa A, Takagi K (1990) Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics* 28:382–385.
- Salas KI, Cesnik CE (2009) Guided wave excitation by a CLoVER transducer for structural health monitoring: theory and experiments. *Smart Mater Struct* 18:075005 (27pp).

- Schmidt O (2006) *Wood and Tree Fungi - Biology, Damage, Protection, and Use*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Senalik A, Beall FC, O'Dell K, Reis H (2008) Detection and assessment of wood decay in glulam beams using a through-transmission ultrasonic approach. In: Proc. SPIE 6932, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. p 69321W.
- SETRA (2006) *Les ponts en bois: Comment assurer leur durabilité. Guide technique du SETRA (Service d'études technique des routes et autoroutes)*, France.
- Sharma D, Goyal S, Khanna R, Mukherjee A (2011) Non-destructive testing of materials using capacitive sensing technique. *MIT Int J Electron Commun Eng* 1:73–77.
- Siau JF (1984) *Transport processes in wood*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Siau JF (1995) *Wood: influence of moisture on physical properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University-Department of Wood Science and Forest Products, Blacksburg, VA, USA.
- Simpson WT (1973) Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood Fiber Sci* 5:41–49.
- Sivertsen MS (2010) *Liquid water absorption in wood cladding boards and log sections with and without surface treatment*. Thèse de doctorat, Norwegian University of Life Sciences, 122 p.
- Sivertsen MS, Vestøl GI (2010) Liquid water absorption in uncoated Norway spruce (*Picea abies*) claddings as affected by origin and wood properties. *Wood Mater Sci Eng* 5:181–193.
- Sivertsen MS, Flaete PO (2012) Water absorption in coated Norway spruce (*Picea abies*) cladding boards. *Eur J Wood Wood Prod* 70:307–317.
- Skaar C (1964) Some factors involved in the electrical determination of moisture gradients in wood. *For Prod J* 14:239–243.
- Skaar C (1988) *Wood-water relations*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Sodano HA (2003) *Macro-fiber composites for sensing, actuation and power generation*. Thèse de Doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, 138 p.
- Stamm AJ (1927) The Electrical Resistance of Wood as a Measure of Its Moisture Content. *Ind Eng Chem* 19:1021–1025.
- Stamm AJ (1929) The fiber-saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurements. *Ind Eng Chem Anal Ed* 1:94–97.
- Stamm AJ (1930) An Electrical Conductivity Method for Determining the Moisture Content of Wood. *Ind Eng Chem Anal Ed* 2:240–244.
- Stamm AJ (1948) The passage of water through the capillary structure of wood. *Discuss Faraday Soc* 3:264–273.
- Stamm AJ (1960) Bound-water diffusion into wood in across-the-fibre directions. *For Prod J* 10:524–8.
- Stamm AJ (1964) *Wood and cellulose science*. Ronald Press Co., New York.

- Staszewski W, Boller C, Tomlinson GR (2004) *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*. John Wiley & Sons, Munich, Germany.
- Steiger A (1991) *Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil*. Guide de l'Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, Suisse.
- Sundaresan MJ, Ghoshal A, Martin WN, Schulz MJ (2001) A continuous sensor to measure acoustic waves in plates. *J Intell Mater Syst Struct* 12:41–56.
- Tamme V, Muiste P, Kask R, et al (2012) Experimental study of electrode effects of resistance type electrodes for monitoring wood drying process above fibre saturation point. *For Stud* 56:42–55.
- Tanaka T, Avramidis S, Shida S (2009) Evaluation of moisture content distribution in wood by soft X-ray imaging. *J Wood Sci* 55:69–73.
- Tannert T, Berger R, Vogel M, Liebhold P (2011) Remote moisture monitoring of timber bridges: a case study. In: *Proceedings of the 5th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure (SHMII-5)*, 11-15 December. pp 11–15.
- Tarazaga PA, Inman DJ, Wilkie WK (2007) Control of a Space Rigidizable Inflatable Boom Using Macro-fiber Composite Actuators. *J Vib Control* 13:935–950.
- Terzic E, Terzic J, Nagarajah R, Alamgir M (2012) *Capacitive Sensing Technology*. In: *A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments*. Springer, London, pp 11–37.
- Thien AB, Park G, Farrar CR (2007) Health monitoring of pipeline systems using macro-fiber composite active-sensors. *Steel Struct* 7:33–48.
- Tiemann HD (1906) Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood, Bulletin 70, Washington, D.C. : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, USA.
- Torgovnikov GI (1993) *Dielectric properties of wood and wood-based materials*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Triboulot P, Calvi D (2011) Les ponts en bois, mythe ou possibilité ? In : 18ème Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art. Québec, Canada.
- Trinh JL, Ligot YM (2014) *Structures en bois*. Techniques de l'ingénieur, C 2440v2
- Trouy M-C, Triboulot P (2012a) *Matériau bois - Structure et caractéristiques*. Techniques de l'ingénieur, C 925v2.
- Trouy M-C, Triboulot P (2012b) *Matériau bois - Durabilité*. Techniques de l'ingénieur, C 926v2.
- Vasic D, Costa F (2011) Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance. Techniques de l'ingénieur, D 3 235.
- Vermaas HF (1975) Experimental Variables Affecting the Measurement of the DC Resistance of Wood. *Holzforsch - Int J Biol Chem Phys Technol Wood* 29:140–144.
- Vermaas HF (1982) D.C. Resistance Moisture Meters for Wood. *South Afr For J* 121:88–92.
- Viitanen H, Ritschkoff A-C (1991) *Brown rot decay in wooden constructions : effect of temperature, humidity and moisture*. Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden.

- Wadsö L (1993) Studies of water vapor transport and sorption in wood, Thèse de doctorat, Lund University, 102 p.
- Wang C-H, Leicester RH, Foliente GC, Nguyen MN (2013) Timber service life design - Design guide for durability. Technical Design Guide issued by Forest and Wood Products Australia.
- Wenner F (1915) A method for measuring earth resistivity. Bull Bur Stand 12:469–478.
- Wilkie WK, High J, Bockman J (2002) Reliability testing of NASA piezocomposite actuators. In: Proceedings of the 8th International Conference on New Actuators. Citeseer, Bremen, Germany, pp 10–12.
- Williams RB, Park G, Inman DJ, Wilkie WK (2002) An overview of composite actuators with piezoceramic fibers. In: 20th International Modal Analysis Conference. Los Angeles, pp 421–427.
- Yang H, Yu L, Wang L (2015) Effect of moisture content on the ultrasonic acoustic properties of wood. J For Res 26:753–757.
- Zhai C, Hanaor D, Proust G, et al (2016) Interfacial electro-mechanical behaviour at rough surfaces. Extreme Mech Lett 9:422–429.

Annexe 1. Paramètres de la méthode par acousto-ultrasons

Time of test: temps d'arrivée en jour/heure/minute/seconde, par rapport au début du test

Amplitude: amplitude maximale en dB

Energy: énergie (enveloppe) en volts par seconde

Counts : nombre d'alternances qui dépassent le seuil de détection

Duration : durée en micro-secondes

Rise time : temps de montée (entre le début et le maximum d'amplitude) en microsecondes

Absolute energy : énergie absolue, intégrale du signal au carré sur la durée de la salve

Threshold : seuil de détection en dB

Annexe 2. Calcul du coût de réalisation de chaque configuration pour les mesures électriques

Selon le prix d'achat du matériel, le prix par unité des différents matériels utilisés pour instrumenter les échantillons des mesures électriques a été calculé et présenté dans la Table 18.

Table 18: Prix par unité des différents matériels utilisés pour instrumenter les échantillons des mesures électriques

Vis inox (par unité)	Patch de cuivre (par unité)	Câble (par m)	Colle conductrice (par g)	Colle isolante polyuréthane (par g)
0,07	2,45	0,16	5,63	0,03

Pour la configuration 1, 3 vis inox et 0,45 m de câble (3 câbles de 0,15 m de longueur) ont été utilisés. Aussi, 0,15 g de colle conductrice a été utilisé pour le collage câble/vis ($3 \times 0,05 = 0,15$ g).

Pour la configuration 2, 3 vis inox et 0,45 m de câble (3 câbles de 0,15 m de longueur) ont été utilisés. Aussi, 0,921 g de colle conductrice a été utilisé : 0,15 g pour le collage câble/vis ($3 \times 0,05$ g = 0,15 g) ; 0,771 g ($3 \times 0,1$ mL \times 2,57 g/mL = 0,771 g) pour remplir les 3 trous inférieurs. De plus, 1,13 g de colle isolante a été utilisé pour remplir les vides dans les 3 trous supérieurs ($3 \times 0,337$ mL \times 1,12 g/mL = 1,13 g).

Pour la configuration 3, 3 vis inox et 0,51 m de câble (3 câbles de 0,17 m de longueur) ont été utilisés. Aussi, 1,542 g de colle conductrice a été utilisé pour remplir les 3 trous inférieurs ($3 \times 0,2$ mL \times 2,57 g/mL = 0,771 g). De plus, 1,69 g de colle isolante a été utilisé pour remplir les vides dans les 3 trous supérieurs ($3 \times 0,502$ mL \times 1,12 g/mL = 1,69 g).

Pour la configuration 4, 3 patchs de cuivre et 0,3 m de câble (2 câbles de 0,15 m de longueur) ont été utilisés. Aussi, 0,1 g de colle conductrice a été utilisé pour le collage câble/vis ($2 \times 0,05 = 0,1$ g).

Selon les éléments évoqués ci-dessus, le coût total de réalisation de chaque configuration a été calculé et présenté dans la Table 19.

Table 19: Coût total de réalisation de chaque configuration de mesures électriques

Configurations	Prix pour chaque type de matériel (€)					Prix total (€)
	Vis inox	Patch de cuivre	Câble	Colle conductrice	Colle isolante polyuréthane	
C1	0,22	0,00	0,07	0,85	0,00	1,14
C2	0,22	0,00	0,07	5,19	0,04	5,52
C3	0,00	0,00	0,08	8,69	0,05	8,82
C4	0,00	0,25	0,05	0,56	0,00	0,86

Annexe 3. Schéma de développement du Giga-Ohmmètre

Une photo du Giga-Ohmmètre est donnée sur la Figure 203. Il est composé de plusieurs ponts de mesure pour pouvoir mesurer la résistance électrique sur des gammes différentes :

- $0 \Omega - 999,9 \Omega$
- $1 \text{ k} \Omega - 999,9 \text{ k} \Omega$
- $1 \text{ M} \Omega - 99,9 \text{ M} \Omega$
- $> 100 \text{ M} \Omega$

Le schéma de développement est présenté sur la Figure 204.



Figure 203: Giga-Ohmmètre

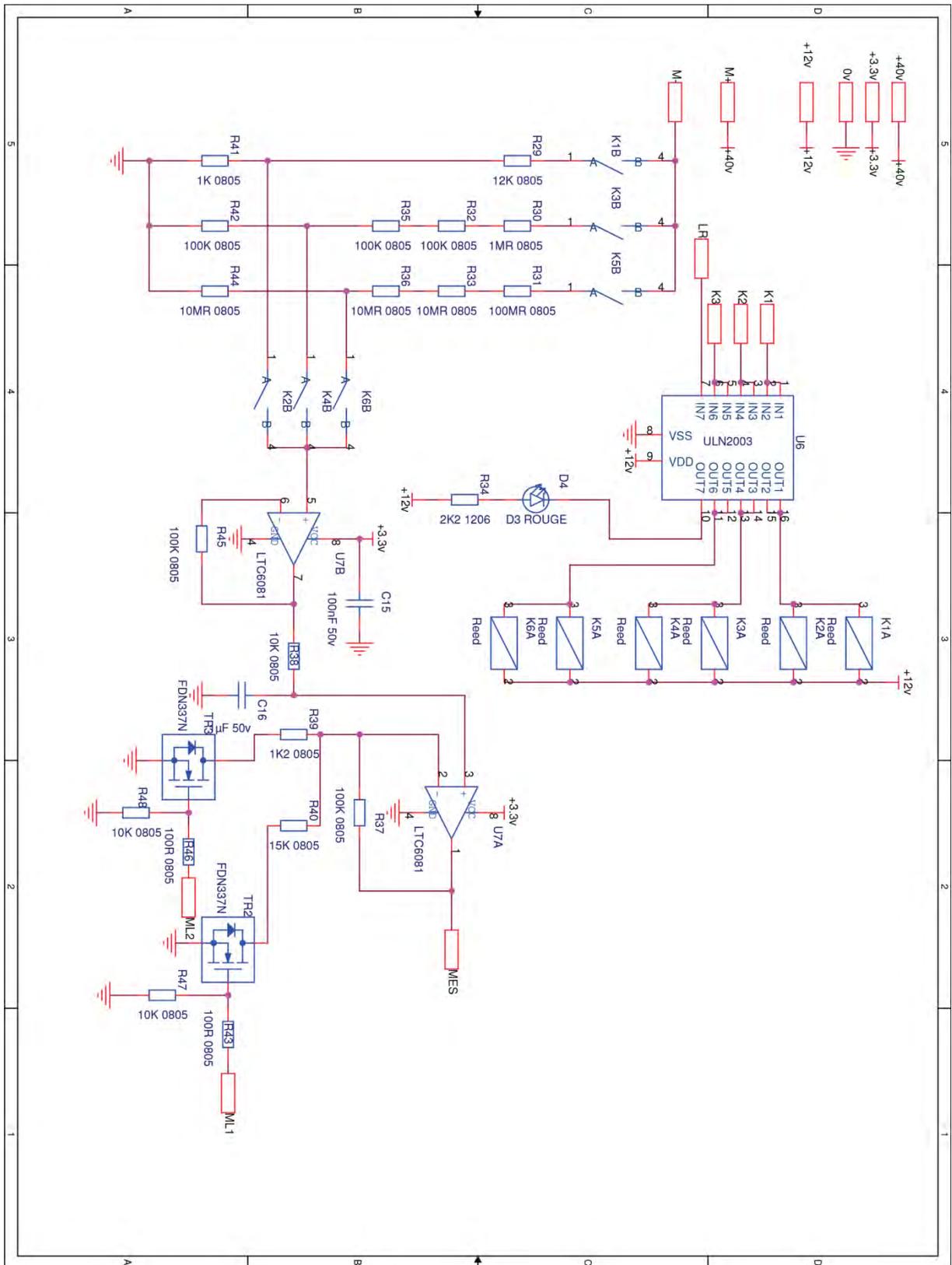


Figure 204: Schéma de développement du Giga-Ohmmètre

Annexe 4. Fiche technique de la colle utilisée pour le collage des échantillons lamellé-collés

Colle utilisée dans cette étude.

COMPETENCE **PUR** (e)

COLLE MONOCOMPOSANTE

KLEIBERIT Produit	Viscosité	Temps ouvert	D4 selon DIN EN 204	Domaine d'application	Utilisation pour éléments portants
510 FiberBond	7.000 mPas	60 min	oui	Eléments portants	oui
501.0	8.000 mPas	25 min	oui	Bois massif, fenêtre/portes	non
502.8	6.000 mPas	7 min	non	Bois massif, Temps de presse court	non
506.0	1.600 mPas	25 min	oui	Bois massif, fenêtre/portes panneaux sandwich	non

KLEIBERIT®

KLEBSTOFFE • ADHESIVES

Verarbeitung

Collage de surfaces

KLEIBERIT PUR 510 FiberBond est appliquée en simple enduction sur des systèmes d'application étanches. Grâce à ses grandes capacités de pompage, des vitesses d'avances élevées sont également réalisables. L'application en cordon est la méthode la plus usuelle, mais les encolleuses à rouleaux sont aussi présentes sur le marché.

Aboutage

L'aboutage est réalisé avec des machines automatiques équipées de systèmes à peigne spécifiques. **KLEIBERIT PUR 510** est utilisé directement depuis son emballage dans un système hermétique. Pour obtenir la norme DIN 1052, l'application est en double enduction.

PRODUITS DE SERVICES	KLEIBERIT Produit	Domaine d'application
	885.0 885.7	séparateur pâteux pour filetage et protection de surfaces
	822	nettoyant PUR pour rouleaux applicateurs
	820	nettoyant pour PUR frais



FMPA Stuttgart
rapport
N°14-990304000

Avantages de KLEIBERIT PUR 510 monocomposant par rapport aux résines de polycondensation

Temps de presse court	Pressage par séquence	<ul style="list-style-type: none"> • Collage de bois possible jusqu' à 15% d'humidité (confirmé par le compte rendu de l' institut FMPA de Stuttgart) • En aboutage, une meilleure tenue de collage de l' ordre de 30% est obtenue par rapport aux colles mélangées et aux colle à résine phénolique (confirmé par le compte rendu de l' institut FMPA de Stuttgart) • Recyclable • Nettoyage facile • Pas de surcoûts pour traitement des eaux • La PUR durcit ne présente pas de danger toxique • Lors de la fusion de produits collés avec le PUR, il ne se dégage pas plus de polluant qu' avec de bois non collés
Joint de colle clair	Pour des applications visibles	
Moussage	Effet de remplissage sur surfaces rabotées	
0% d' eau	Pas de tensions dues aux retraits	
0% de formaldéhyde	Pas de pollution	
100% d' extrait sec	Pas de retrait, d' ou un faible grammage	
Grammage réduit	env. 200g/m ² a lieu de 400g/m ²	
Monocomposant	Pas d' erreur de mélange possible	
Bonne mouillabilité	Pas de vie en pot	

Annexe 5. Résultats complémentaires concernant les cinétiques d'humidification

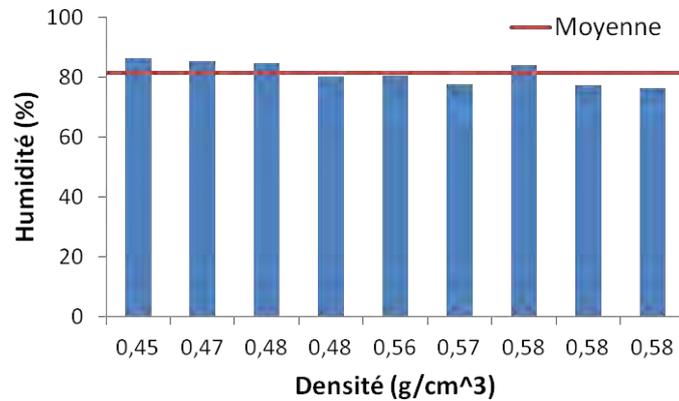


Figure 205: Humidité finale pour les 9 échantillons de densités différentes (C4ASc, 2^{ème} série)

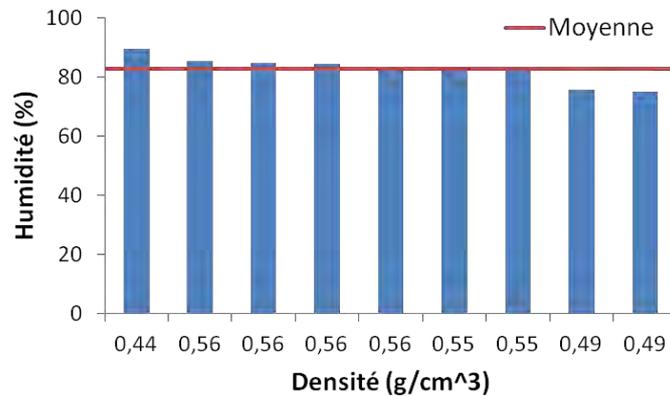


Figure 206: Humidité finale pour les 9 échantillons de densités différentes (C4BSc, 2^{ème} série)

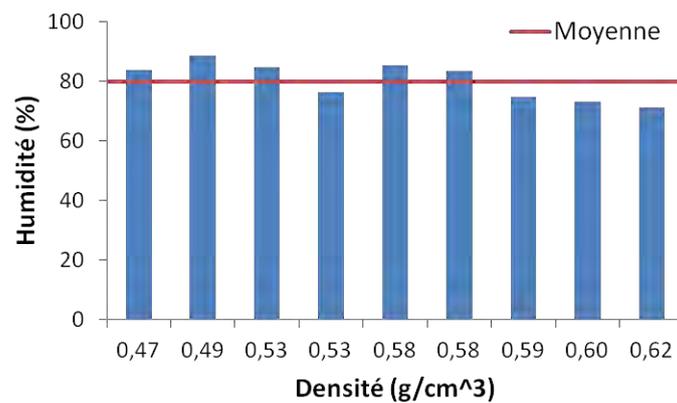


Figure 207: Humidité finale pour les 9 échantillons de densités différentes (C123GLc, 2^{ème} série)

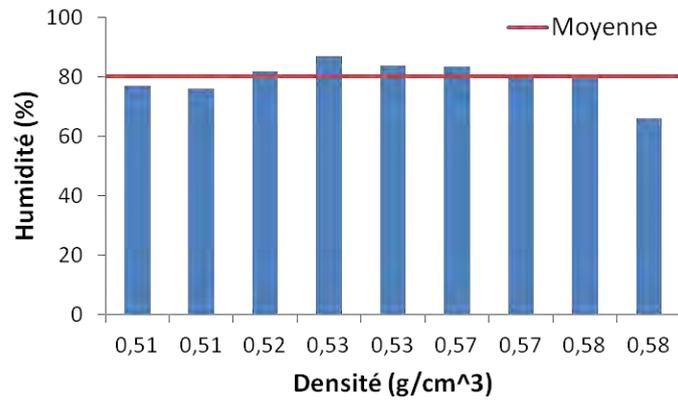


Figure 208: Humidité finale pour les 9 échantillons de densités différentes (C4AGLc, 2^{ème} série)

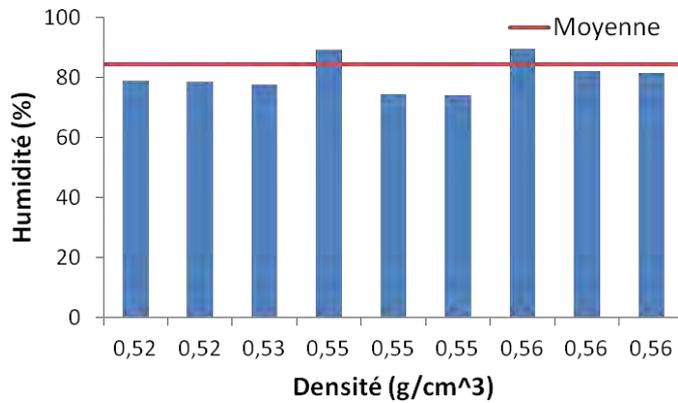


Figure 209: Humidité finale pour les 9 échantillons de densités différentes (C4BGLc, 2^{ème} série)

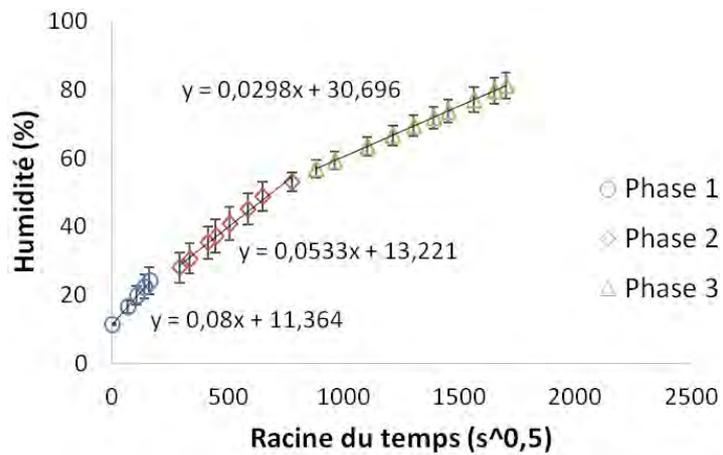


Figure 210: Résultats de la cinétique d'humidification pour les échantillons C4ASc de la 2^{ème} série

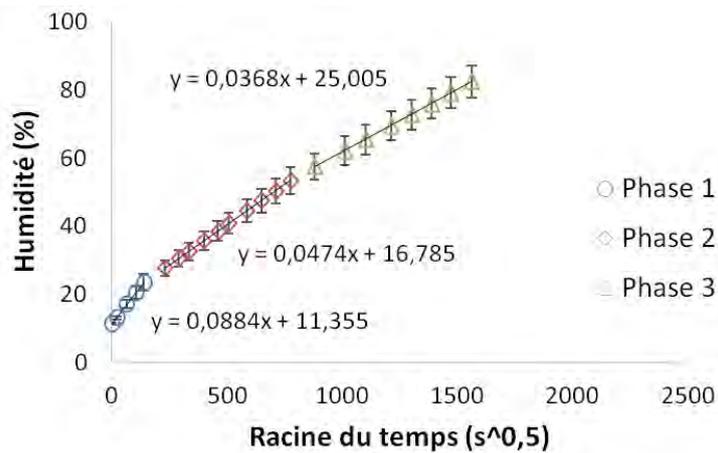


Figure 211: Résultats de la cinétique d'humidification pour les échantillons C4BSc de la 2^{ème} série

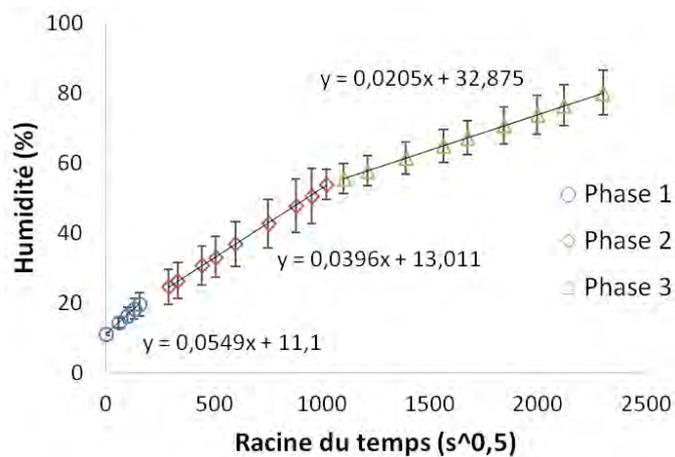


Figure 212: Résultats de la cinétique d'humidification pour les échantillons C123GLc de la 2^{ème} série

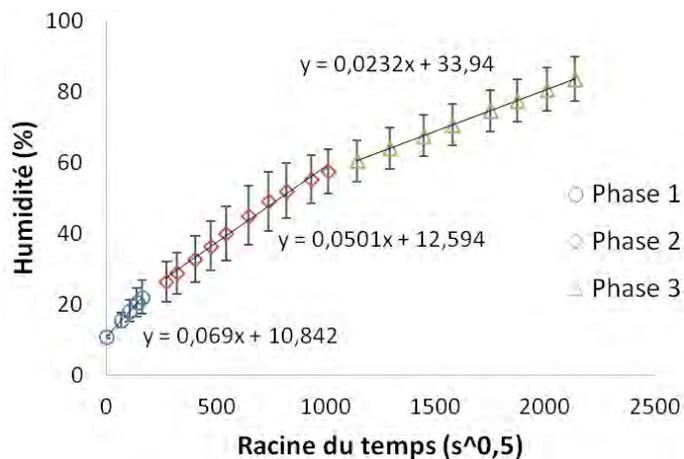


Figure 213: Résultats de la cinétique d'humidification pour les échantillons C4AGLc de la 2^{ème} série

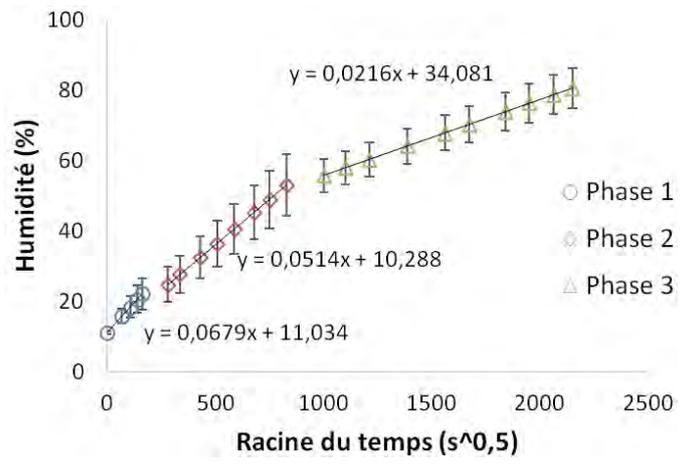


Figure 214: Résultats de la cinétique d'humidification pour les échantillons C4BGLc de la 2^{ème} série

Annexe 6. Incertitudes d'estimation de l'humidité pour les mesures électriques

- *Incertitude de mesure des échantillons simples*

Table 20: Incertitudes d'estimation de l'humidité pour les échantillons simples

Humidités (%)	Incertitudes d'estimation de l'humidité (%)									
	C1		C2		C3		C4			
	R40	R20	R40	R20	R40	R20	R33	R16,5	C33	C16,5
10	0,2	0,1	0,6	0,7	0,7	0,8	12,1	4,6	0,1	0,4
12	0,1	0,2	0,7	0,7	0,7	0,8	12,2	2,1	0,1	0,4
16	0,1	0,3	0,7	0,7	0,5	0,6	15,9	6,2	0,5	0,5
18	0,2	0,4	0,7	0,7	0,4	0,5	19,6	11,2	0,7	0,6
25	6,6	3,2	3,0	3,0	2,7	2,8	3,1	1,3	3,4	1,0
30	6,8	4,1	4,0	4,0	2,6	2,7	2,9	1,4	3,4	1,2
35	6,9	5,2	5,2	5,2	2,6	2,6	2,6	1,7	3,4	1,6
40	6,9	6,3	6,7	6,5	2,6	2,6	2,4	2,1	3,2	2,3
45	6,9	7,4	8,3	7,9	2,8	2,7	2,3	2,6	3,0	3,0
50	6,8	8,6	10,0	9,5	3,2	3,0	2,3	3,2	2,8	3,9
55	6,8	9,9	11,9	11,1	3,8	3,5	2,6	3,9	2,7	4,9
60	6,7	11,2	13,9	12,8	4,6	4,1	3,2	4,6	2,6	5,9
65	6,7	12,6	16,0	14,6	5,4	4,9	3,9	5,4	2,6	7,0
70	6,8	13,9	18,2	16,4	6,4	5,8	4,7	6,2	2,9	8,1

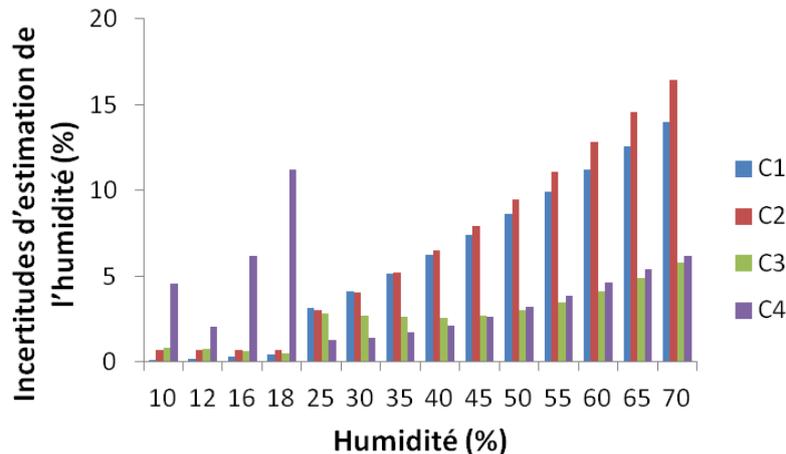


Figure 215: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives pour les 4 configurations de mesure (Echantillon simple) (Configurations 1, 2 et 3 : espacement d'électrodes = 20 mm ; Configuration 4 : espacement d'électrodes = 16,5 mm)

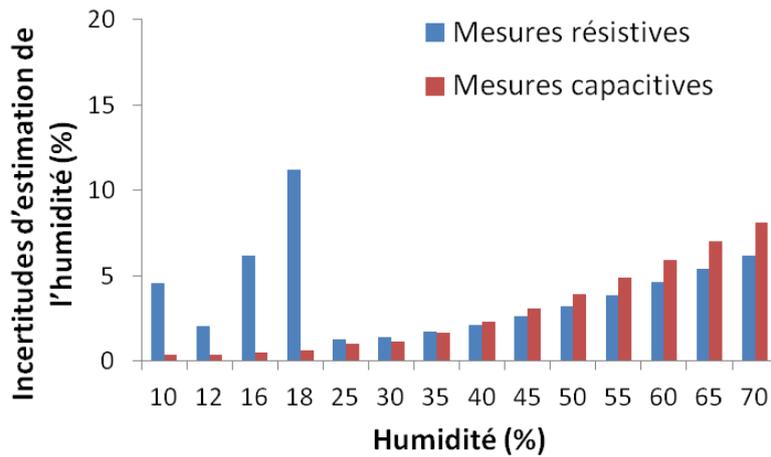


Figure 216: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives et les mesures capacitives pour les échantillons simples (Configuration 4 ; espacement d'électrodes = 16,5 mm)

- *Incertitude de mesure des échantillons LC*

Table 21: Incertitudes d'estimation de l'humidité pour les échantillons LC

Humidités (%)	Incertitudes d'estimation de l'humidité (%)									
	C1		C2		C3		C4			
	R40	R20	R40	R20	R40	R20	R33	R16,5	C33	C16,5
10	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
12	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3	0,1
16	0,6	0,6	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,8	0,1
18	0,7	0,7	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	1,2	0,3
25	4,5	4,4	3,3	1,9	7,1	7,5	2,8	3,0	2,3	0,7
30	4,8	4,6	3,6	2,3	7,2	7,3	2,8	2,9	2,5	1,1
35	5,0	4,8	3,8	2,7	7,2	6,8	2,8	2,8	2,7	1,5
40	5,1	4,9	3,9	3,2	7,0	6,2	2,9	2,6	3,0	2,0
45	5,2	4,9	4,1	3,6	6,8	5,6	3,1	2,3	3,2	2,5
50	5,2	4,9	4,2	4,1	6,6	4,9	3,4	2,0	3,6	3,1
55	5,2	4,9	4,4	4,6	6,3	4,3	3,8	1,7	3,9	3,7
60	5,2	4,8	4,6	5,1	6,0	3,8	4,3	1,4	4,3	4,3
65	5,1	4,7	4,7	5,6	5,8	3,7	4,9	1,1	4,8	5,0
70	5,0	4,5	4,9	6,2	5,6	4,1	5,7	1,1	5,3	5,7

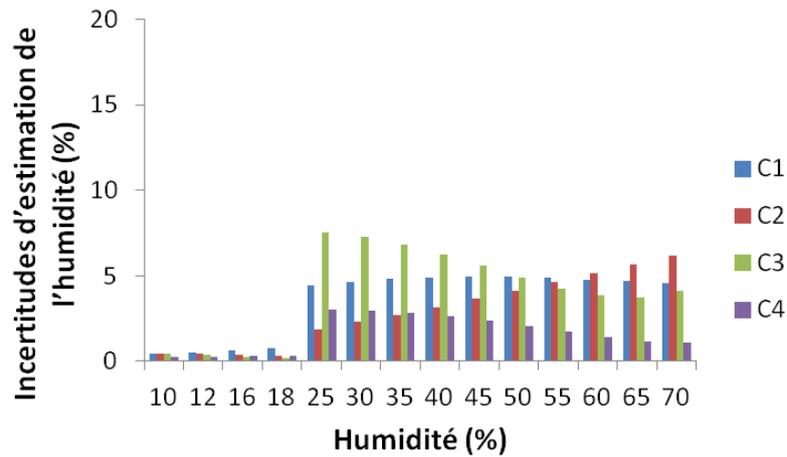


Figure 217: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives pour les 4 configurations de mesure (Echantillons LC) (Configurations 1, 2 et 3 : espacement d'électrodes = 20 mm ; Configuration 4 : espacement d'électrodes = 16,5 mm)

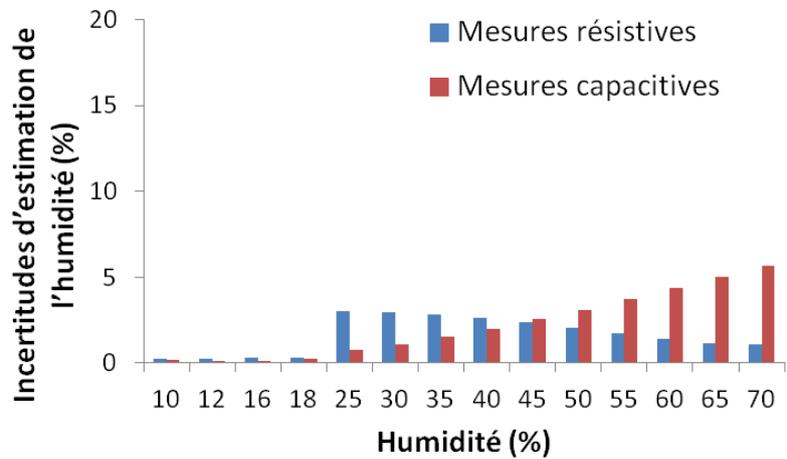


Figure 218: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité entre les mesures résistives et les mesures capacitives pour les échantillons LC (Configuration 4 ; espacement d'électrodes = 16,5 mm)

- *Comparaisons des incertitudes de mesures entre les échantillons simples et les échantillons LC*

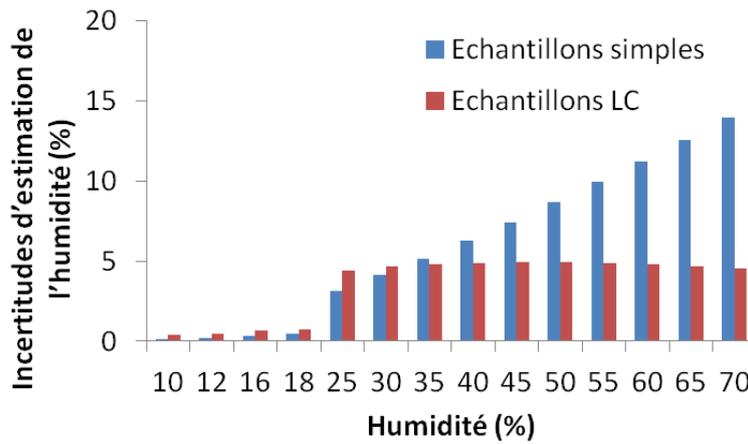


Figure 219: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 1, espacement d'électrodes = 20 mm)

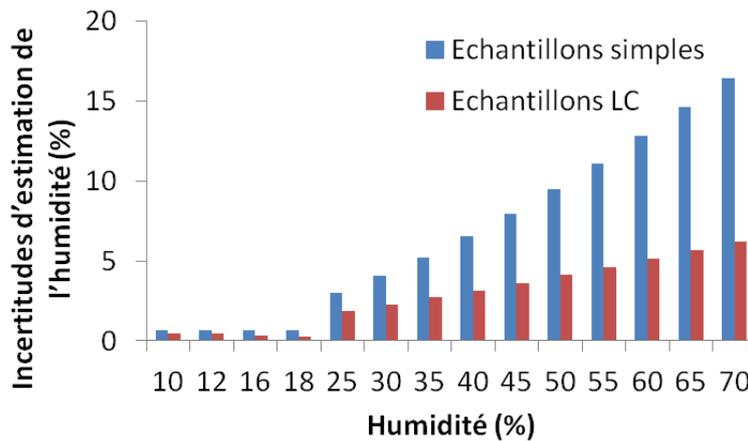


Figure 220: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 2, espacement d'électrodes = 20 mm)

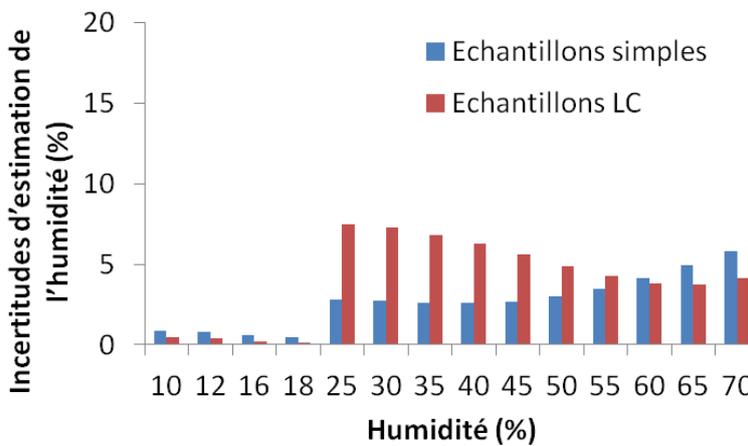


Figure 221: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 3, espacement d'électrodes = 40 mm)

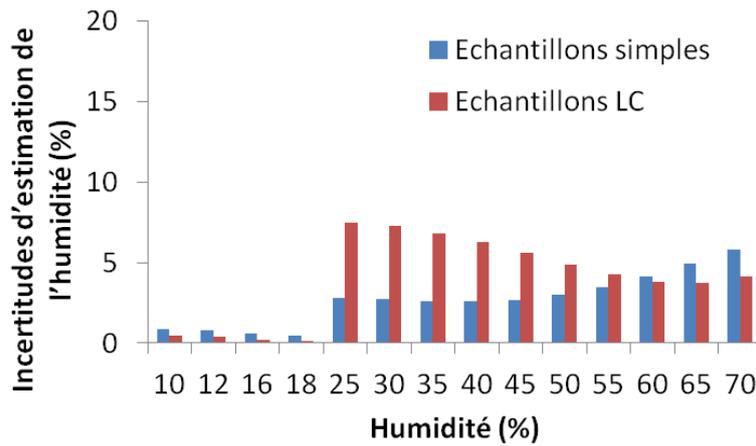


Figure 222: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 3, espacement d'électrodes = 20 mm)

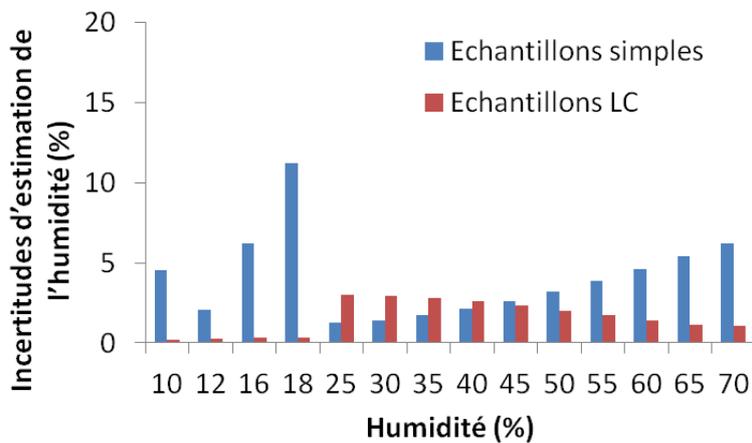


Figure 223: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 4, espacement d'électrodes = 16,5 mm)

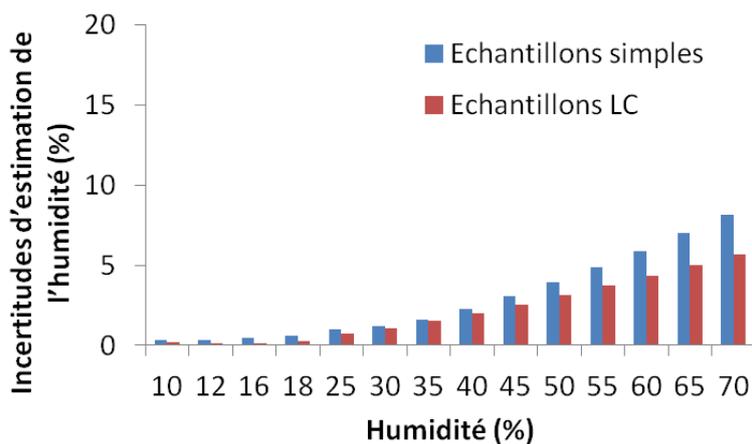


Figure 224: Comparaison des incertitudes d'estimation de l'humidité par mesures capacitives entre les échantillons simples et les échantillons LC (Configuration 4, espacement d'électrodes = 16,5 mm)

Annexe 7. Comparaison des résultats des mesures résistives entre les échantillons simples et les échantillons LC

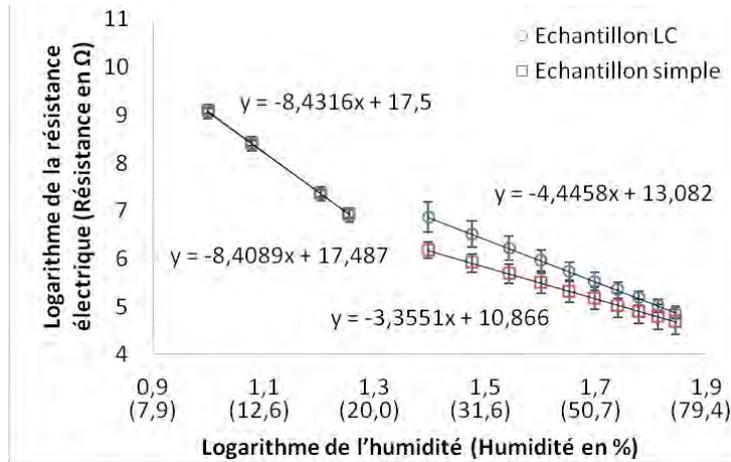


Figure 225: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 1 (Espaceur d'électrodes = 20 mm)

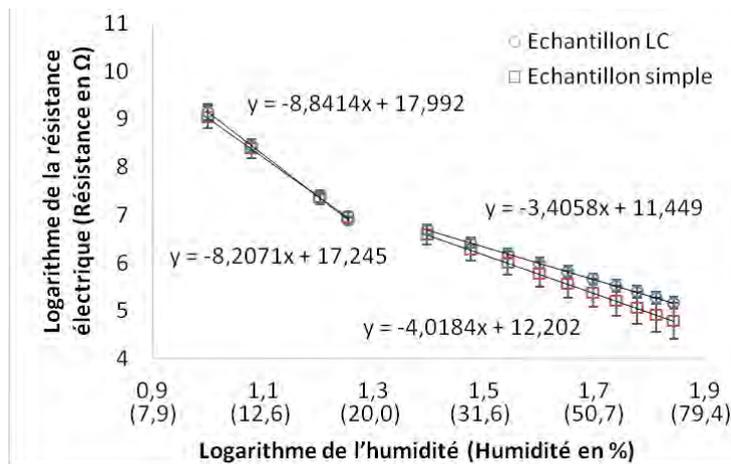


Figure 226: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 2 (Espaceur d'électrodes = 20 mm)

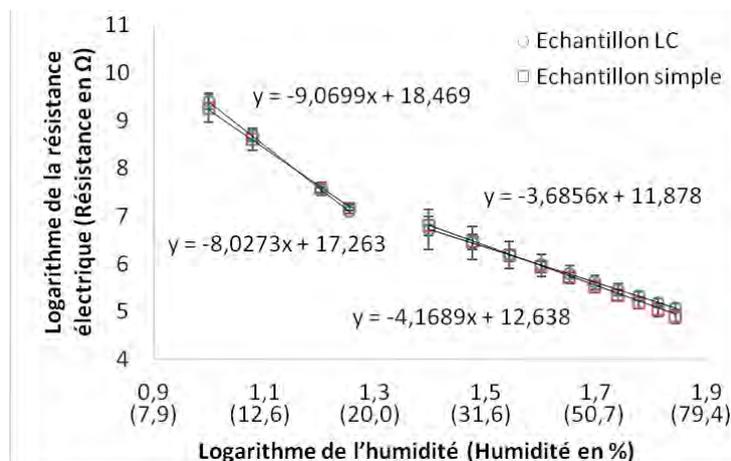


Figure 227: Comparaison des mesures résistives entre les échantillons simples et LC de la configuration 3 (Espaceur d'électrodes = 20 mm)

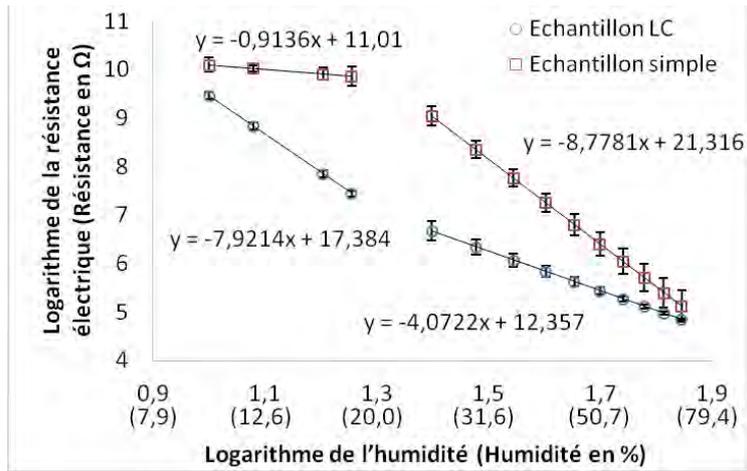


Figure 228: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 4 (Espacement d'électrodes = 16,5 mm)

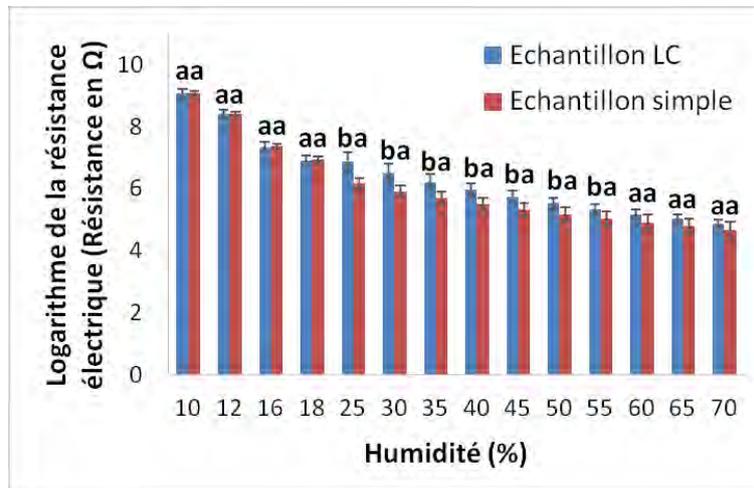


Figure 229: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 1 (Résultats du test de LSD de fisher) (Espacement d'électrodes = 20 mm)

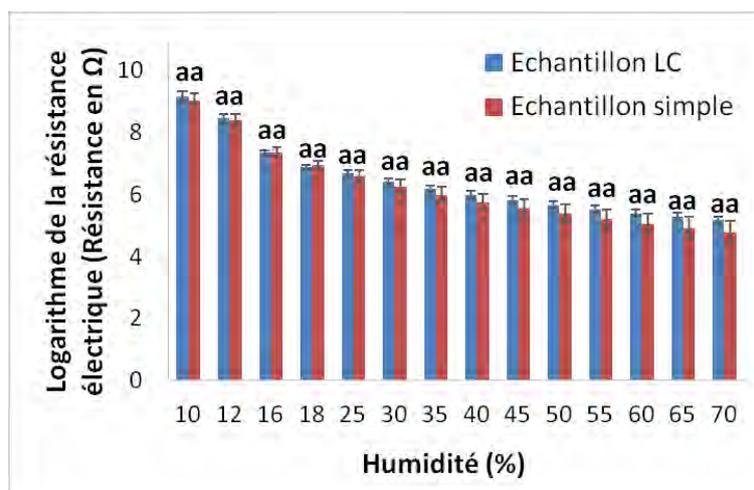


Figure 230: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 2 (Résultats du test de LSD de fisher) (Espacement d'électrodes = 20 mm)

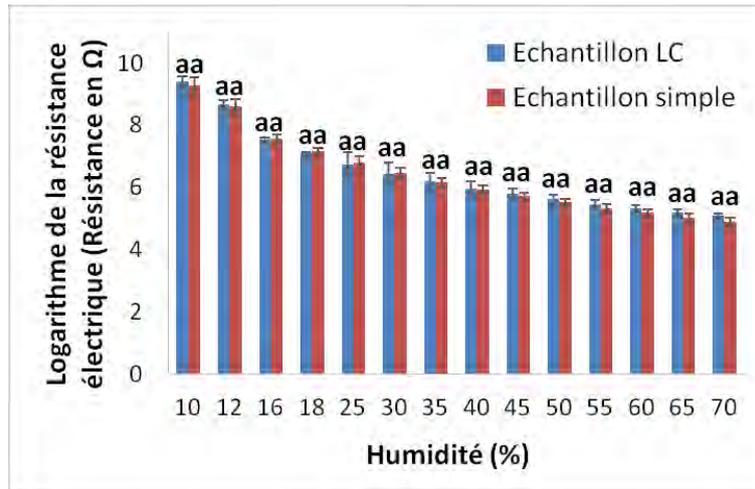


Figure 231: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 3 (Résultats du test de LSD de fisher) (Espaceur d'électrodes = 20 mm)

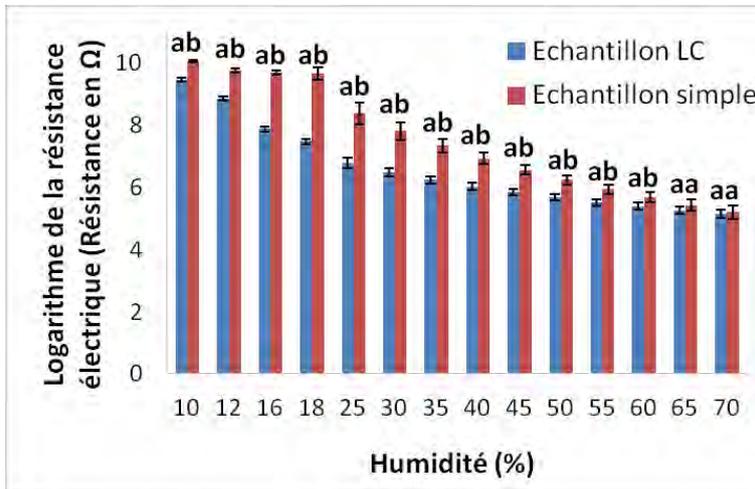


Figure 232: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 4 (Résultats du test de LSD de fisher) (Espaceur d'électrodes = 33 mm)

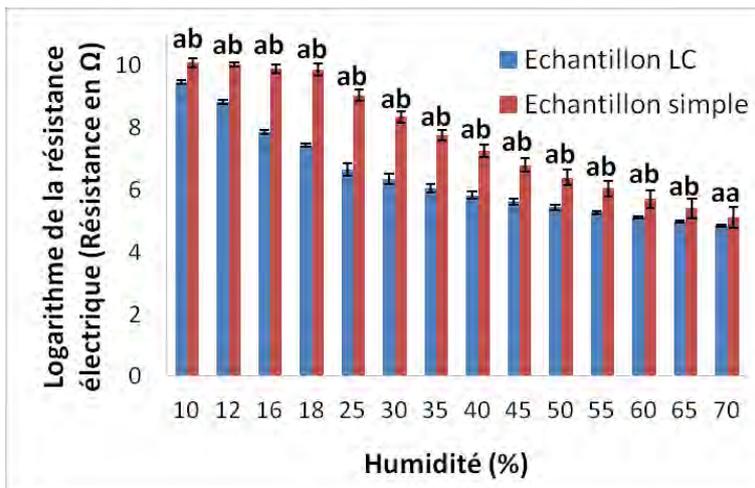


Figure 233: Comparaison des mesures résistives obtenues pour les échantillons simples et LC de la configuration 4 (Résultats du test de LSD de fisher) (Espaceur d'électrodes = 16,5 mm)

Annexe 8. Résultats de l'influence de l'espacement des électrodes pour les mesures électriques

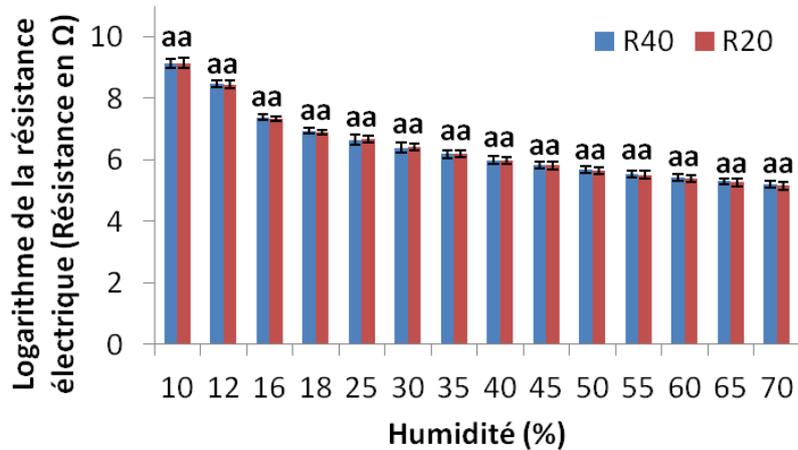


Figure 234: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 2, échantillon LC)

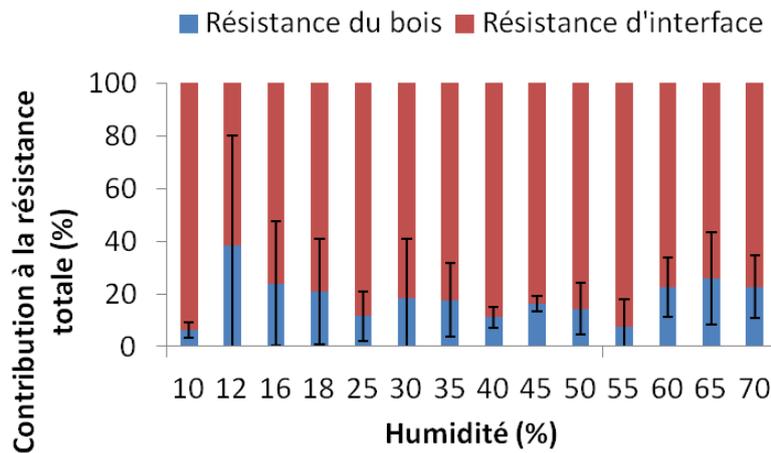


Figure 235: Contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale mesurée (Configuration 2, échantillon LC, espacement d'électrodes = 40 mm)

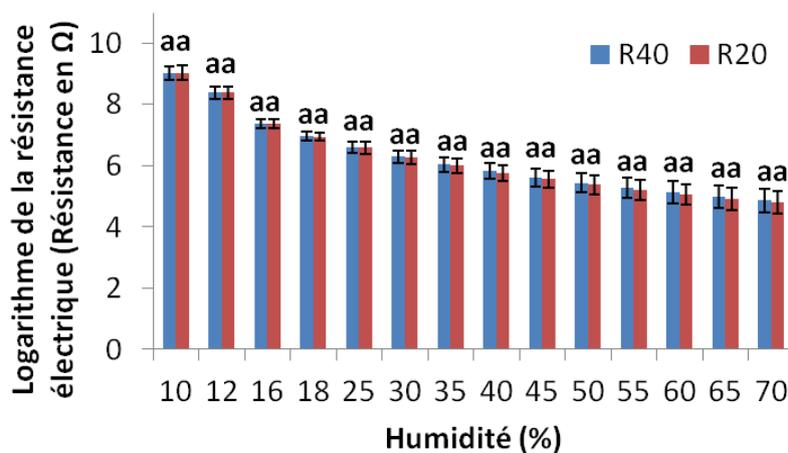


Figure 236: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 2, échantillon simple)

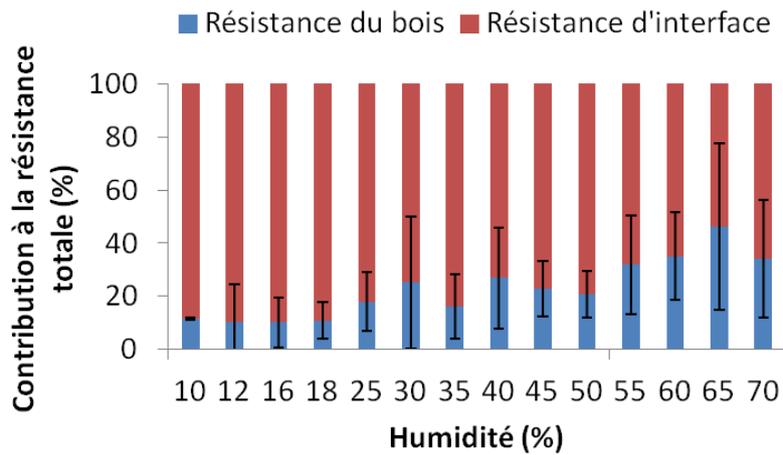


Figure 237: Contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale mesurée (Configuration 2, échantillon simple, espacement d'électrodes = 40 mm)

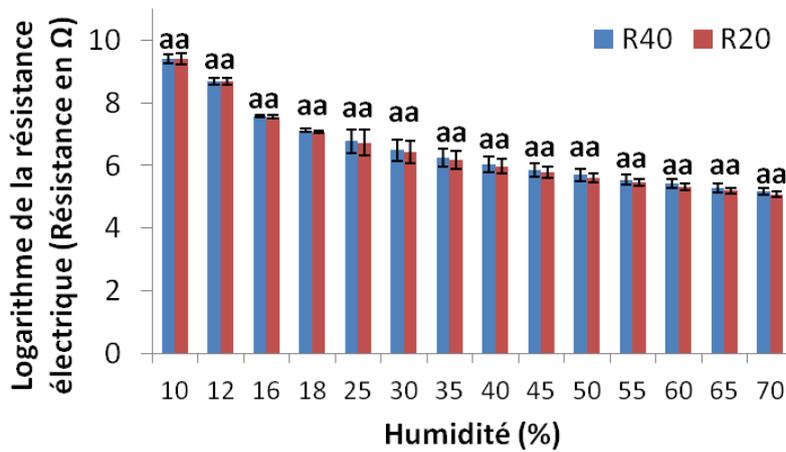


Figure 238: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 3, échantillon LC)

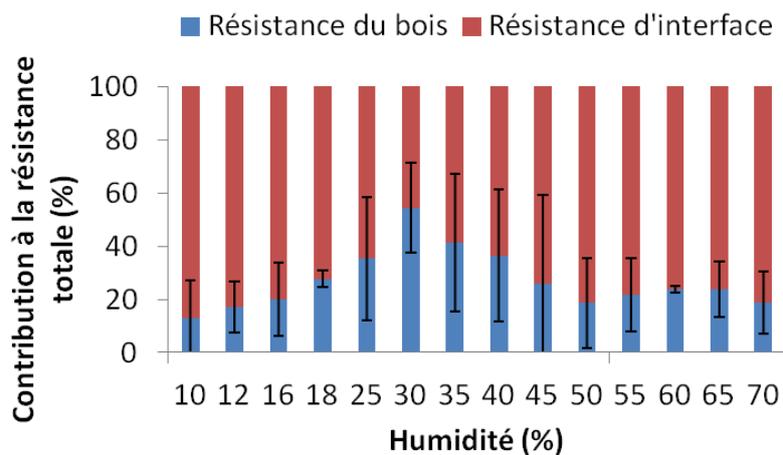


Figure 239: Contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale mesurée (Configuration 3, échantillon LC, espacement d'électrodes = 40 mm)

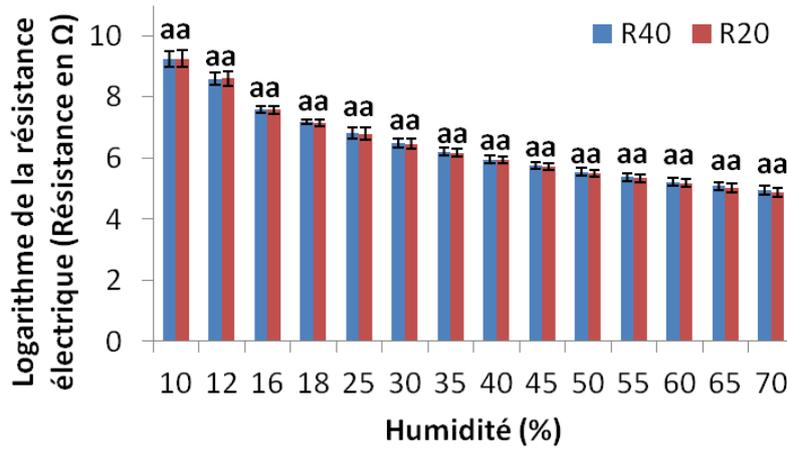


Figure 240: Analyse de l'influence de l'espacement des électrodes sur les mesures résistives (Configuration 3, échantillon simple)

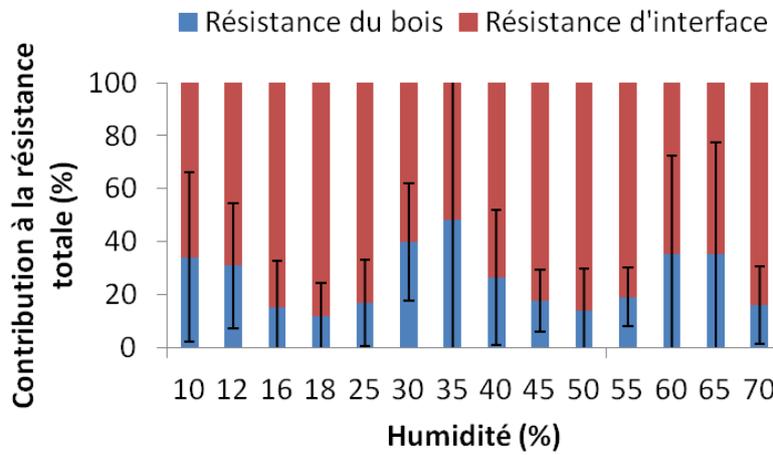


Figure 241: Contribution de la résistance du bois et de la résistance d'interface par rapport à la résistance totale mesurée (Configuration 3, échantillon simple, espacement d'électrodes = 40 mm)

Annexe 9. Calcul du couple équivalent pour le montage des mesures ultrasonores

Le couple de serrage que l'on doit exercer en fonction de la force que l'on veut appliquer est déterminé par l'Equation 24 (Guillot 2007) :

$$C = \frac{(0,16 \times p + 0,583 \times F_f \times D_f + 0,5 \times F_t \times D_m) \times F}{1000} \quad [24]$$

où C est la couple de serrage à exercer (N·m), p est le pas de la vis (mm), F_f est le coefficient de frottement au niveau du filetage, F_t est le coefficient de frottement au niveau de la tête de vis, D_f est le diamètre sur flanc de la vis (mm), D_m est le diamètre moyen au niveau de la tête (mm) et F est la force (N) qui peut s'exprimer par l'Equation 25 :

$$F = P * A \quad [25]$$

où F est la force (N), P est la pression exercée sur l'objet (Pa) et A est la surface de l'objet (m²).

Comme on a un montage avec 4 tiges filetées (cf. Figure 173), le couple que l'on doit exercer sur chaque tige (C') doit être divisé par 4 (Equation 26) :

$$C' = C/4 \quad [26]$$

Afin de bien résister à la force apportée par la pression de 10 bars, nous avons utilisé des tiges filetées assez grosses (M16). De ce fait, les paramètres de calcul sont comme le présente la Table 22 (Fanchon 1994).

Table 22: Paramètres de calcul de la tige filetée M16

P (mm)	Ff	Ft	Df (mm)	Dm (mm)
2	0,25	0,25	14,701	20,65

Pour faire varier la pression de 1 bar à 10 bars sur un échantillon de surface de 500*90 mm², le couple par tige à appliquer (C') est présenté dans la Table 23.

Table 23: Couple de serrage par tige (C') pour les différentes pressions

Pression (bar)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C' (N·m)	5,3	10,6	15,9	21,2	26,5	31,8	37,1	42,3	47,6	52,9

Pour appliquer une pression de 10 bars sur un échantillon de 90 mm de largeur, le couple par tige à appliquer (C') pour les différentes longueurs de l'échantillon est présenté dans la Table 24.

Table 24: Couple de serrage par tige (C') pour les différentes longueurs d'échantillon

Longueur d'échantillon (mm)	500	450	400	350	300	250	200	150
C' (N·m)	52,9	48,0	45,4	39,7	34,1	28,4	22,7	17,0

Titre : Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures

Résumé : Depuis quinze ans, on recommence à construire en bois, et notamment en bois lamellé-collé (LC), pour répondre aux nouveaux challenges imposés par les problématiques de développement durable. Néanmoins, des problèmes de dégradations liés à l'humidité ou aux cycles d'humidification/séchage limitent le développement des ouvrages en bois. De ce fait, le suivi de l'humidité des ouvrages d'art en bois devient un enjeu crucial. Aujourd'hui, certaines solutions existent mais ne permettent pas un suivi local au niveau des lamelles du bois LC. Une telle solution permettrait d'améliorer la prédiction de la durée de vie des ouvrages. Suite à ce constat, nous avons proposé de transformer le bois LC en « structure intelligente » par intégration d'un système du suivi de l'humidité au niveau des lamelles, et ce, en tenant compte des principales contraintes de fabrication de ce matériau (faible épaisseur du joint collé, pression de collage importante, etc.).

Pour ce faire, nous avons effectué une recherche bibliographique afin de sélectionner les méthodes de suivi pouvant répondre à ces contraintes. A l'issue de cette recherche, deux technologies se sont révélées intéressantes : les mesures électriques et les mesures ultrasonores. Plusieurs configurations de mesures ont été proposées et testées pendant ce travail de thèse. Par la suite, nous avons effectué des essais préliminaires pour s'assurer du bon fonctionnement de ces configurations de mesures, et ainsi vérifier le comportement des capteurs lors de la fabrication du bois LC. Puis, nous avons humidifié les échantillons en utilisant deux protocoles d'humidification différents afin de vérifier la faisabilité du suivi de l'humidité avec les capteurs intégrés.

Les résultats montrent que l'ensemble des configurations de mesures sont opérationnelles pour suivre la variation de l'humidité dans les échantillons LC. De plus, pour les mesures électriques, nos résultats montrent que l'on peut adopter quasiment les mêmes modèles d'étalonnage pour le suivi de l'humidité par mesures résistives, quel que soit le type de capteurs utilisé. Qui plus est, il est possible de récupérer des informations complémentaires par la réalisation simultanée des mesures résistives et des mesures capacitives en utilisant les électrodes surfaciques. Concernant les mesures ultrasonores, nous avons obtenu les courbes de sensibilité en fréquence pour plusieurs familles de capteurs à film piézoélectrique. L'influence de la pression de collage et de la distance entre les capteurs sur les mesures électriques/ultrasonores a aussi été investiguée dans ces travaux. De futures études consisteront à utiliser ces configurations de mesures pour le suivi in situ dans les ouvrages, ainsi qu'à établir un lien entre la durabilité des structures LC et les cycles d'humidification/séchage afin de prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages d'art en bois.

Mots clefs : Bois lamellé-collé, ouvrages d'art en bois, suivi de l'humidité, intégration de capteurs, mesures électriques, mesures ultrasonores.

Title: Use of smart wood materials for the sustainable management of infrastructures

Abstract: For fifteen years, we restart to construct with wood, and particularly with glulam to respond to the new challenges imposed by the issues of sustainable development. However, degradation issues related to moisture content (MC) or wetting/drying cycles limit the development of timber structures. As a result, the MC monitoring in timber structures becomes a critical issue. Today, several solutions exist but they do not allow a local monitoring in the lamellas of glulam. Such a solution would improve the prediction of the service life of timber structures. In the light of this observation, we proposed to transform glulam into "smart material" by embedding a MC monitoring system in the lamellas, and this, considering the major constraints of fabrication of this material (small glue line thickness, important bonding pressure, etc.).

To achieve this, we have conducted a bibliographic research, in order to select the monitoring methods which can satisfy these constraints. According to this research, two technologies turn out to be interesting: the electrical measurements and the ultrasonic measurements. Several measurement configurations were proposed and tested in this PhD work. Thereafter, we conducted preliminary tests to make sure of the good functionality of these measurement configurations, and also to verify the behavior of sensors throughout the glulam fabrication process. Afterwards, we moistened the specimens with two different moistening protocols in order to verify the feasibility of MC monitoring with embedded sensors.

Results showed that all the measurement configurations are operational for the MC monitoring in glulam specimens. Moreover, for electrical measurements, our results show that we can adopt almost the same calibration models for the MC monitoring by resistive measurements, no matter the type of sensors used. Furthermore, it is possible to obtain complementary information by the realization of the resistive and capacitive measurements at the same time, using surface electrodes. Regarding the ultrasonic measurements, we have obtained the sensibility curves in frequency of several families of piezoelectric film sensors. On the other hand, the influence of bonding pressure and of sensor distance on the electrical/ultrasonic measurements was also investigated in this study. Future studies will consist in using these measurement configurations to perform in situ monitoring in timber structures, and also to establish a link between the durability of glulam structures and the wetting/drying cycles in order to predict the service life of timber structures.

Keywords: Glulam, timber structures, moisture monitoring, sensor embedment, electrical measurements, ultrasonic measurements.