

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

DÉTECTION DES CONTAMINANTS MÉTALLIQUES AVANT L'ÉTAPE DE  
PRESSAGE DES PANNEAUX À LAMELLES ORIENTÉES PAR VOIE  
ÉLECTROMAGNÉTIQUE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR  
FEKER MNIF

JANVIER 2020

## REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon directeur de recherche monsieur **Ahmed Koubaa** pour sa confiance, ses conseils judicieux et pour tout l'encadrement qui m'a permis de relever les défis de cette recherche.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon co-directeur de recherche, monsieur **Hatem Mrad** pour toute l'aide qu'il m'a apporté, pour son partage et pour ses suggestions très pertinentes.*

*Je tiens à remercier particulièrement monsieur **Abdelaziz Alija** pour la collaboration potentielle avec **les usines Norbord**.*

*Mes remerciements vont également à monsieur **Jean-Jacques Beaudoin** pour sa disponibilité et son aide technique.*

*Je tiens à remercier **l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue** pour l'exemption des frais de scolarités majorées et **Mitacs** pour la bourse accordée pendant mon séjour.*

*Au terme de ce rapport, je tiens à remercier le **Fonds de Recherche Nature et Technologies du Québec** qui m'a accordé une bourse pour réaliser un stage au sein du **Centre de Production Automatisée**. Ma profonde gratitude à mes maîtres de stage, monsieur **Sébastien Morin** et monsieur **Robert Poirier** pour l'intégration d'une équipe dynamique. Je dois aussi énormément à monsieur **Rémy Larouche**, enseignant de chimie au Cégep de Jonquière, qui m'a prêté main-forte durant mon stage.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions durant mes recherches.*

*Sans oublier mes parents pour leurs soutiens constants et leurs encouragements.*

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
RÉSUMÉ.....	x
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1.....	4
REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE .....	4
1.1. Les panneaux à lamelles orientées .....	4
1.1.1. Espèce de bois utilisés pour la fabrication des panneaux à lamelles orientées .....	5
1.1.2. Fabrication des panneaux à lamelles orientées .....	5
1.1.3. Usages et propriétés des panneaux à lamelles orientées .....	6
1.1.4. Avantage et limites de production des panneaux à lamelles orientées .....	7
1.2. Contaminant métallique dans le matelas en bois .....	7
1.3. Contrôle des paramètres de production des panneaux de bois en temps réel.....	8
1.3.1. Propriétés des particules et distribution de la résine .....	8
1.3.2. Teneur en humidité.....	9
1.3.3. Mesure de l'épaisseur .....	9
1.3.4. Profil de densité et poids par unité de surface .....	10
1.3.5. Détection des défauts dans la chaîne et des défauts de surface .....	10
1.3.6. Emplacement des équipements de contrôle dans la chaîne de production	11

1.4. Techniques proposées pour l'évaluation non destructive du matelas en bois contaminé .....	12
1.4.1. Tomographie X .....	12
1.4.2. Méthode de résonance magnétique .....	14
1.4.3. Thermographie infrarouge .....	16
1.4.4. Imagerie térahertz.....	17
1.4.5. Proche infrarouge .....	19
1.4.6. Micro-ondes .....	20
1.4.7. Détecteurs de métaux .....	21
1.5. Évaluation du potentiel de détection des techniques étudiées .....	25
CHAPITRE 2.....	31
MATÉRIEL ET MÉTHODE .....	31
2.1. Objectifs et hypothèses.....	31
2.2. Caractérisation visuelle, thermique et caractérisation physico-chimique des contaminants et des zones de brûlures .....	32
2.2.1. Préparation des échantillons .....	32
2.2.2. Caractérisation visuelle des panneaux contaminés .....	35
2.2.3. Caractérisation des panneaux contaminés avec la thermographie infrarouge .....	35
2.2.4. Caractérisation physico-chimique.....	37
2.3. Cahier de charge d'un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées .....	38
2.3.1. Bobine émettrice .....	40
2.3.2. Bobines réceptrices .....	41
2.3.3. Inductance d'une bobine.....	41

2.3.4.	Interaction entre les bobines en l'absence de contaminants .....	42
2.3.5.	Contaminant dans un détecteur à trois bobines équilibrées.....	42
2.4.	Réalisation d'un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées .....	43
2.4.1.	Description du système.....	43
2.4.2.	Conception du dispositif expérimental.....	44
2.4.3.	Matériels utilisés pour la réalisation du détecteur de métaux à trois bobines équilibrées.....	45
2.4.4.	Alimentation du détecteur .....	47
2.5.	Détection des contaminants métalliques avec un détecteur de métaux.....	48
2.5.1.	Analyse de l'amplitude à la sortie de l'amplificateur différentiel .....	50
2.5.2.	Déphasage entre le signal d'entrée-sortie de l'amplificateur différentiel .....	53
2.5.3.	Analyse de l'incorporation du bois sur les résultats électromagnétiques .....	53
	CHAPITRE 3.....	54
	RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	54
3.1.	Caractérisation visuelle des panneaux contaminés .....	54
3.2.	Caractérisation des panneaux avec une caméra thermique .....	56
3.3.	Caractérisation physico-chimique.....	58
3.3.1.	Caractérisation de la chimie de surface des zones brûlées .....	58
3.3.2.	Caractérisation de chimie de surface du peuplier faux-tremble et du produit commercial.....	60
3.3.3.	Caractérisation de la chimie de surface des contaminants métalliques.....	61
3.4.	Validation et résultats du détecteur de métaux à trois bobines équilibrées .....	65
3.4.1.	Résultats de l'amplitude à la sortie de l'amplificateur différentiel .....	65

3.4.2. Résultats du déphasage entre le signal à la sortie de l'amplificateur différentiel et le signal de la source — cas de la variation du déphasage avec le changement du matériau du contaminant .....	74
3.4.3. Étude de l'influence des propriétés magnétiques des lamelles en bois .....	75
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	78
RÉFÉRENCES .....	81
ANNEXE (A) .....	90
ANNEXE (B) .....	91
ANNEXE (C) .....	93

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> : Étape de mise en forme des panneaux à lamelles orientées (Stark et al., 2010).....	6
<b>Figure 1.2</b> : Matelas en lamelles de bois .....	8
<b>Figure 1.3</b> : Emplacement des équipements de surveillance en temps réel dans une usine sophistiquée de transformation des panneaux à base de bois.....	11
<b>Figure 1.4</b> : Principe de la thermographie infrarouge active (Meinlschmidt, 2005) .	16
<b>Figure 1.5</b> : Application du proche infrarouge pour le tri des matériaux (Tatzer et al., 2005).....	19
<b>Figure 1.6</b> : Détecteur de métaux à trois bobines équilibrées (Hansen et al., 2008) .	22
<b>Figure 1.7</b> : Évaluation du potentiel de détection des techniques étudiées (Niemz et al., 2012, Kim et al., 2012, Aderhold et al., 2010) .....	26
<b>Figure 2.1</b> : Moule utilisé pour la mise en forme .....	33
<b>Figure 2.2</b> : Incorporation des contaminants dans le matelas (a. Vis, b. Écrous) .....	34
<b>Figure 2.3</b> : Pressage des matelas contaminés.....	35
<b>Figure 2.4</b> : Caméra thermique de type FLIR-i7 .....	36

<b>Figure 2.5 :</b> Panneaux contaminés analysés avec thermographie infrarouge (1 : panneau avec 2 colonnes contaminées avec des écrous, 2 : panneau avec 3 colonnes contaminées avec des vis, 3 : panneau avec 4 colonnes contaminées avec des écrous).....	36
<b>Figure 2.6 :</b> IR-tracer (a. disponible au laboratoire de biomatériaux de l'UQAT, b. disponible au laboratoire de chimie du cégep de Jonquière).....	37
<b>Figure 2.7 :</b> Échantillons analysés par la technique de mi-infrarouge.....	38
<b>Figure 2.8 :</b> Conception SolidWorks pièces d'un détecteur à trois bobines équilibrées .....	44
<b>Figure 2.9 :</b> Réalisation du détecteur à trois bobines équilibrées .....	46
<b>Figure 2.10 :</b> Enroulement manuel des fils 24 AWG manuellement autour des supports-bobine imprimés en 3D.....	46
<b>Figure 2.11 :</b> Détecteur de métaux conçu avec une imprimante 3D et contient une bobine émettrice (au centre) et deux bobines réceptrices.....	47
<b>Figure 2.12 :</b> Alimentation de la bobine émettrice avec un générateur de courant alternatif et visualisation de la soustraction des signaux des deux bobines réceptrices avec un amplificateur différentiel.....	48
<b>Figure 2.13 :</b> Contaminants utilisés pour la variation de fréquence .....	50
<b>Figure 2.14 :</b> Contaminants utilisés pour la variation de la taille .....	52
<b>Figure 2.15 :</b> Analyse des réponses du détecteur de métaux en présence du bois ....	53
<b>Figure 3.1 :</b> Défauts de surface créés par les contaminants métalliques.....	55
<b>Figure 3.2 :</b> Endommagement des plateaux protecteurs .....	56

<b>Figure 3.3</b> : Caractérisation de la chimie de surface des zones brûlées .....	58
<b>Figure 3.4</b> : Spectre infrarouge du peuplier faux-tremble et des panneaux à lamelles orientées.....	61
<b>Figure 3.5</b> : Spectre infrarouge des contaminants à base de l'aluminium .....	62
<b>Figure 3.6</b> : Spectre infrarouge des contaminants à base de l'acier .....	63
<b>Figure 3.7</b> : Spectre infrarouge du contaminant à base du laiton .....	64
<b>Figure 3.8</b> : Résultats de la variation de la fréquence sur la réponse du voltage induit dans le détecteur de métaux conçu.....	67
<b>Figure 3.9</b> : Épaisseur de peau dans les contaminants .....	68
<b>Figure 3.10</b> : Résultats de la variation de la taille du contaminant en acier sur les réponses électromagnétiques de l'amplitude .....	71
<b>Figure 3.11</b> :Variation de la réponse de l'amplitude au centre de la bobine réceptrice en fonction de la taille (a. sphère en acier de diamètre 12,6 mm, b. sphère en acier de diamètre 23,5 mm, c. forme complexe en laiton - base d'un hexagone de côté 17 mm).....	71
<b>Figure 3.12</b> : Étude de la variation de la réponse d'amplitude en fonction de la forme des contaminants .....	73
<b>Figure 3.13</b> : Étude de la variation du déphasage de l'acier et du laiton .....	75
<b>Figure 3.14</b> : Étude des réponses d'un contaminant (écrou) en l'absence et en la présence des lamelles en bois .....	76

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1</b> : Avantages et limites de l'utilisation et de la production des panneaux à lamelles orientées (Pedieu, 2008) .....	7
<b>Tableau 1.2</b> : Avantages et limites de la tomographie X.....	14
<b>Tableau 1.3</b> : Avantages et limites de la méthode de résonance magnétique .....	15
<b>Tableau 1.4</b> : Avantages et limites de la thermographie infrarouge.....	17
<b>Tableau 1.5</b> : Avantages et limites des ondes térahertz.....	18
<b>Tableau 1.6</b> : Avantages et limites de l'inspection infrarouge.....	20
<b>Tableau 1.7</b> : Avantages et limites de la technique des micro-ondes.....	21
<b>Tableau 1.8</b> : Avantages et limites d'un détecteur de métaux .....	22
<b>Tableau 1.9</b> : Domaines d'application des techniques étudiées (Bucur 2003) .....	27
<b>Tableau 1.10</b> : Critères de choix des techniques .....	29
<b>Tableau 1.11</b> : Faisabilité des solutions .....	30
<b>Tableau 2.1</b> : Contaminants analysés avec le capteur infrarouge (a. Contaminants de type aluminium, b. Contaminants de type acier, c. Contaminant de type laiton) .....	39
<b>Tableau 2.2</b> : Nomenclature du détecteur de métaux .....	45

<b>Tableau 2.3</b> : Protocole expérimental suivi.....	49
<b>Tableau 2.4</b> : Propriétés magnétiques des contaminants étudiés .....	51
<b>Tableau 3.1</b> : Imagerie infrarouge des panneaux contaminés .....	57
<b>Tableau 3.2</b> : Analyse de la courbe FTIR du bois (Müller 2008 ; Soucy et al. 2016 ; El Marouani et al., 2017) .....	59
<b>Tableau 3.3</b> : Pics caractéristiques des oxydes de métaux sous excitation infrarouge .....	65

## RÉSUMÉ

Lors de la fabrication des panneaux à lamelles orientées, plusieurs contaminants peuvent être présents, tels que le verre, le plastique et le papier, etc. Parmi ces corps étrangers intrus, les métaux sont les plus susceptibles d'endommager le matériel de mise en forme de ces produits. Les contaminants peuvent épousser les coteaux du gaufrier et engendrer des brûlures à la surface du produit final. Les industries de transformation veulent sécuriser leurs équipements et détecter les corps étrangers métalliques qui peuvent être introduits. La presse hydraulique est un équipement primordial pour la mise en forme. En effet, le pressage des produits contaminés est à l'origine de dégâts sur les plateaux de la presse et des temps d'arrêt néfastes, d'où l'importance du contrôle lors de l'apparition des intrus dans le matelas (panneaux à lamelles orientées non pressées). Les contaminants métalliques détectés proviennent des troncs d'arbres et des opérations de fabrication de panneaux dont les déchets de soudure, les outils de travail, les lames de gaufriers, etc. La détection des contaminants métalliques dans le matelas en bois par voie non destructive et électromagnétique fait l'objet de cette étude. La reconnaissance des contaminants à partir de leurs chimies de surface (capteur FTIR) constitue la première approche expérimentale suivie dans cette recherche. Les spectres FTIR des contaminants étudiés (aluminium, acier, laiton) montrent un pic important à l'ordre de  $667\text{-}673\text{ cm}^{-1}$  observé pour tous les intrus. Ce pic représente le lien oxygène existant dans la couche d'oxyde développé à la surface des corps étrangers. C'est un résultat important basé sur une propriété physique intrinsèque des contaminants souvent rencontrés. En effet, il peut servir à l'implantation des lecteurs infrarouges, semblables à ceux utilisés pour la mesure de la teneur en humidité, pour objectifs de détection des contaminants métalliques durant la transformation du bois. Des imageries thermiques avec une caméra FLIR-i7 ont été prises pour édifier la seconde approche expérimentale. Les imageries thermiques FLIR permettent d'élaborer une carte de distribution de la densité, une reconnaissance de la forme et de la position exacte des contaminants. Cependant, la solution se limite à l'analyse des corps étrangers non profonds par rapport à la surface. D'autre part, le détecteur de métaux à trois bobines équilibrées présente une solution économique, facile à implanter et non destructive pour le contrôle des contaminants en temps réel de production. La dernière approche est présentée sous forme d'une tentative de conception, d'optimisation et de réalisation de ce dispositif de détection à trois bobines équilibrées avec une imprimante tridimensionnelle de type Dremel au laboratoire de biomatériaux de l'UQAT.

Très peu d'études ont évalué le contrôle de l'apparition des contaminants métalliques dans les matelas en bois c'est pourquoi nous proposons d'adapter ce dispositif à l'industrie de transformation de bois ce qui constitue l'originalité de ce projet. Cette recherche met la lumière sur l'étude de la dépendance des propriétés des contaminants telles que leurs tailles, leurs formes, leurs conductivités et perméabilités et les réponses du dispositif de détection.

**Mots clés :** Étude comparative, matelas en lamelles, évaluation non destructive, détection, corps étrangers, chimie de surface, FTIR, caméra thermique, FLIR-i7, détecteur à trois bobines équilibrées.

## INTRODUCTION

La Chine, les États-Unis, la Russie, le Canada et l'Allemagne sont les importants producteurs mondiaux des produits dérivés du bois avec un total en volume de production estimé à 416 millions m<sup>3</sup> en 2016. Selon les statistiques de la même année, le Canada est classé quatrième important producteur avec une contribution de 48 millions m<sup>3</sup> au volume de production mondiale (FAO, 2016). Cette production se traduit par le nombre des usines installées dans le pays qui produisent principalement les panneaux structuraux tels que les panneaux à lamelles orientées et les panneaux de particules. À titre d'exemple, le Québec fut une production de panneaux structuraux d'environ 2.9 millions m<sup>3</sup> avec 10 usines installées dans la province en 2017 (MFFP, 2017).

Pour des objectifs de concurrence sur le marché mondial et afin d'assurer la qualité du produit, les usines de transformation de bois cherchent à contrôler le produit (panneau structural) durant sa mise en forme. Les lignes de production sophistiquées visent à protéger les équipements de mise en forme, à réduire le nombre des essais de laboratoire et à examiner tout type de défauts ou problèmes au cours de la transformation. Les paramètres de production dont il est important de tenir compte en temps réel sont la teneur en humidité, le pourcentage de résine, l'épaisseur du panneau, la qualité de surface, le poids du matelas et la densité des panneaux, la détection des contaminants métalliques à la formation du matelas (lamelles orientées non pressées) (Alfredo et al., 2014).

Lors de la fabrication des panneaux à lamelles orientées, plusieurs contaminants (corps étrangers) peuvent être détectés et les métaux sont les plus susceptibles d'endommager le matériel de mise en forme. Spécifiquement, ils peuvent ép pointer les coteaux du gaufrier et engendrer des brûlures à la surface des panneaux (Suhr et al., 2015). Les industries de transformation cherchent à sécuriser leurs équipements et vise à détecter les corps étrangers métalliques qui peuvent apparaitre durant le processus. Les contaminants les plus répandus dans cette industrie sont les vis, les écrous, les billes de roulement et les métaux provenant du gaufrier après le déchiquetage du bois rond. Ces derniers proviennent des troncs d'arbres et des opérations de l'entreprise. La détérioration des équipements de mise en forme avec les contaminants métalliques entraîne des temps d'arrêt des opérations des usines et par conséquent des pertes financières considérables en attendant les réparations nécessaires (Suhr et al., 2015).

La presse hydraulique est un équipement primordial pour la mise en forme des panneaux à lamelles orientées. Toutefois, le pressage des produits contaminés engendre des dégâts matériels tels que des usures sur ses plateaux. Certaines tailles de contaminants ne posent pas de problèmes pour la presse. Néanmoins, ils peuvent endommager les petits équipements des clients, à titre d'exemple, les scies de découpage.

Pour cette étude, il est proposé de contrôler le point le plus proche de la presse en effectuant une détection des contaminants métalliques. De plus, cette étude cherche à identifier les intrus dans les produits qui sont prêts à être pressés. Particulièrement, la cible de cette recherche est une évaluation non-destructive, qui ne nécessite aucun contact avec le matelas en lamelles et qui permet d'identifier les origines de décontamination. Notamment, très peu d'étude sont évalués cet axe de recherche. Certaines propriétés des contaminants peuvent servir à déterminer les causes de décontamination, telles que le matériau du contaminant, sa forme et sa taille. L'objectif général de cette étude porte sur la détection des corps étrangers métalliques lors de l'étape de formation du matelas en lamelles.

Dans le premier chapitre, des solutions dédiées à l'amélioration de la qualité du panneau et au contrôle des paramètres de production en temps réel sont proposées. En effet, certaines parmi ces solutions peuvent être une alternative pour la détection des corps étrangers métalliques. Celles-ci se basent sur l'excitation du matelas avec des ondes électromagnétiques, pour la détection des corps contaminants. Une grille de sélection est établie à la fin de cette étude comparative pour sélectionner les solutions les plus pertinentes de détection des contaminants métalliques dans un matelas en bois prêt à être pressé.

Le premier chapitre est présenté sous forme d'une revue de littérature critique pour analyser les solutions dédiées à l'évaluation non-destructive du matelas en bois contaminé par les métaux et se clôture par une sélection des solutions pertinentes. Le deuxième chapitre est présenté sous forme de trois approches représentatives des approches sectionnées au premier chapitre. La première approche concerne l'étude, la conception et la réalisation d'un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées. Spécifiquement, la réalisation d'une étude des réponses du détecteur de métaux (amplitude et phase) vis-à-vis de l'influence des paramètres liés au contaminant (taille, forme, matériaux, positions, etc.) et l'influence des propriétés magnétiques du matelas en bois ont été effectuées. La deuxième approche est une forme d'analyses physico-chimiques pour la détection des contaminants à partir de leurs chimies de surface. Finalement, la dernière approche est une analyse basée sur des imageries thermiques des panneaux contaminés. Le dernier chapitre présente l'analyse et les discussions des résultats de l'inspection visuelles, thermiques, physico-chimiques et électromagnétiques (détecteur de métaux) des approches proposées.

## CHAPITRE 1

### REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre résume les étapes de mise en forme des panneaux à lamelles orientées, leurs propriétés, leurs usages ainsi que les contaminants métalliques souvent rencontrés durant la transformation. Plusieurs techniques sont proposées et leur pertinence est évaluée pour réaliser la détection des intrus métalliques en temps réel de production.

#### 1.1. Les panneaux à lamelles orientées

L'industrie canadienne de fabrication des produits dérivés du bois a subi une augmentation de 24 % entre 2012 et 2014 (FAO, 2016). Le Canada atteint un revenu d'exportation des panneaux structuraux (principalement les panneaux à lamelles orientées et panneaux de particules) d'environ 180 millions de dollars canadiens en 2018 dont les États-Unis sont le principal pays importateur (MFFP, 2018). L'industrie de fabrication des panneaux structuraux et des produits dérivés du bois a permis au Canada de se classer quatrième important producteur au monde en dépassant l'Allemagne depuis 2016 (FAO, 2016). Les panneaux à lamelles orientées sont des panneaux structuraux fabriqués et très consommés à la construction en Amérique du Nord. Ils sont obtenus à partir des petits morceaux de bois déchiquetés, comportent plusieurs couches de lamelles et possèdent des propriétés mécaniques intéressantes (Pedieu, 2008).

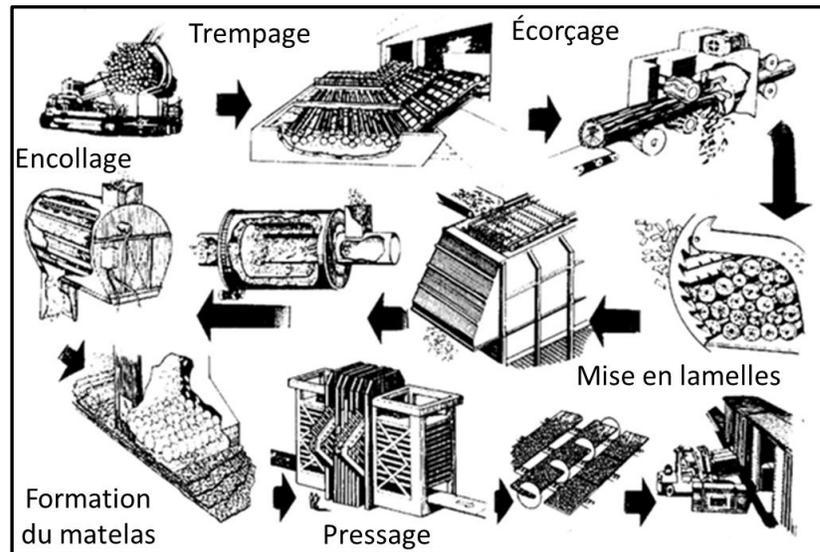
### 1.1.1. Espèce de bois utilisés pour la fabrication des panneaux à lamelles orientées

L'espèce du bois utilisée pour la fabrication des panneaux à lamelles orientées se diffère d'un pays à l'autre. En effet, le peuplier (*Populus tremuloides*, *Populus deltoides*) est l'espèce du bois la plus utilisée pour la fabrication de ce type de panneau en Amérique du Nord. Certaines usines ajoutent le peuplier deltoïde (*Populus deltoides*), le tulipier de Virginie (*Liriodendron tulipifera*), le chêne blanc (*Quercus alba*) et rouge (*Quercus rubra*) et le pin à bois lourds (*Pinus ponderosa*) lors de la mise en forme de leurs produits. D'autre part, les usines européennes utilisent principalement le bois de pin (*Pinus sylvestris*, *Pinus contorta*, *Pinus maritima*) et des petites quantités du sapin (*Pseudotsuga menziesii*) et de mélèze (*Larix decidua*) pour la fabrication du même type de panneau (Pedieu, 2008).

### 1.1.2. Fabrication des panneaux à lamelles orientées

La Figure 1.1 illustre le processus de fabrication qui commence par l'écorçage des troncs d'arbres (Liu, 2008). Dès lors, ces troncs sont immergés dans des bains d'eau pour la mise en place du déchiquetage avec un gaufrier. Subséquemment, les lamelles humides sont étuvées dans un séchoir rotatif jusqu'à atteindre une teneur en eau entre 2 et 5 % suite à une élévation de température allant jusqu'à 800 °C.

Puis, les lamelles passent à l'encollage où une résine et de la cire sont appliquées. La colle la plus utilisée est la phénolique et l'isocyanate. La cire est souvent ajoutée pour améliorer la stabilité dimensionnelle du produit. La superposition des couches est établie de telle sorte que chacune possède une orientation différente de celle qui la précède, le but étant d'avoir un produit plus résistant en termes de propriétés mécaniques. Cette opération est suivie par le pressage à chaud pour favoriser la prise de la résine. Les produits semi-finis sont découpés en carreaux dans les dimensions désirées et entreposés pour assurer le temps nécessaire de prise finale de la résine (Liu, 2008).



**Figure 1.1** : Étape de mise en forme des panneaux à lamelles orientées (Stark et al., 2010)

### 1.1.3. Usages et propriétés des panneaux à lamelles orientées

Les panneaux à lamelles orientées sont caractérisés par des propriétés mécaniques importantes, particulièrement, en termes de résistance à la flexion et de rigidité. Ils sont appliqués dans la construction comme des dalles qu'en planchers et sous forme de poutre parce qu'il supporte les contraintes élevées en flexion et en traction. Les mêmes panneaux servent aussi au renforcement et au soutènement des foires, des plateformes, des magasins ou pour des objectifs de décorations. De plus, ils se caractérisent par une importante stabilité dimensionnelle et une bonne résistance à l'humidité ce qui prouve leurs utilisations dans les produits d'emballage. En outre, l'industrie de transport utilise le même type de panneaux pour les constructions automobiles et des wagons (Pedieu, 2008).

#### 1.1.4. Avantage et limites de production des panneaux à lamelles orientées

Le Tableau 1.1 illustre les avantages et les limites de l'utilisation et de la production des panneaux à lamelles orientées (Pedieu, 2008).

**Tableau 1.1** : Avantages et limites de l'utilisation et de la production des panneaux à lamelles orientées (Pedieu, 2008)

Avantages	Limites
i) Grande résistance à la flexion	i) Irrégularité de profil de densité
ii) Aucun problème de dégradation biologique	ii) Les troncs utilisés doivent être parfaitement ronds
iii) Peu couteux	iii) Problèmes de façonnage
iv) Apparence attractive	
v) Utilisation des petits troncs et des amortissements de bois pour la production	

#### 1.2. Contaminant métallique dans le matelas en bois

Un matelas est un panneau à lamelles orientées non pressées (Figure 1.2). Selon les statistiques de la société Industries Norbord à La Sarre, la contamination des matelas avec les métaux représente 10 % du total des pertes de l'usine. Notre partenaire affirme que 50 % de ces contaminants métalliques proviennent des troncs d'arbres tels que les vis, les clous et les cartouches de chasse, etc., et l'autre moitié découle de l'entreprise sous forme de déchets de soudures et d'outils de travail, etc.

Certaines usines de recyclage utilisent des techniques de séparation directe telles que les presses à vis, les tamis à disques, les tambours magnétiques et les séparateurs à courants de Foucault, etc. (Gundupalli et al., 2017). Néanmoins, pour réaliser une séparation indirecte, une étape de détection postérieure est nécessaire.



**Figure 1.2 :** Matelas en lamelles de bois

L'étape d'identification des contaminants avant la séparation est importante. La reconnaissance de la nature et de la taille des contaminants permet de connaître les origines de décontamination et de prendre les mesures de prévention nécessaires pour protéger le matériel pour avoir un produit final de haute qualité.

### 1.3. Contrôle des paramètres de production des panneaux de bois en temps réel

Les équipements de contrôle des paramètres de production en temps réel sont étudiés pour une industrie de transformation sophistiquée. En effet, une solution existante qui répond à nos objectifs est recherchée. À côté de cela, l'aptitude de ces techniques à détecter les contaminants métalliques est critiquée.

#### 1.3.1. Propriétés des particules et distribution de la résine

La propagation de la résine dans le panneau est affectée par les dimensions des lamelles (longueur, largeur, épaisseur) (Barbu et al., 2014). La quantification des propriétés des particules se fait avec un analyseur des fibres (Werchefani et al., 2017). L'opération se traduit par le passage des fibres entre une source lumineuse et une caméra, après une séparation par l'eau ou par l'air. Le contrôle de la résine inclut l'analyse de viscosité, du pH et de la teneur en matière solide parce qu'ils influencent la capacité de son durcissement (Wieland, 2007).

Pour les techniques de surveillance dans la chaîne de production, une implantation des nouveaux détecteurs proches infrarouge est recommandée. En effet, l'implantation se base sur la capacité d'absorption, de réflexion pour les longueurs d'onde des résines les plus utilisées telles que la phénolique et l'isocyanates pour évaluer la distribution de la résine dans le panneau (B Plinke et al., 2009).

### 1.3.2. Teneur en humidité

Les techniques les plus utilisées pour inspecter la teneur en humidité des panneaux à base de bois en temps réel sont les micro-ondes et l'infrarouge. La quantité d'eau dans le produit est considérée importante pour la mise en forme. Deux modes de mesures sont distingués : directe comme la méthode électrique et des micro-ondes et indirecte comme la thermogravimétrie et la méthode du four. Le jaugeage de la teneur en humidité est réalisé d'une manière simple, indépendante de la densité, précise et permet d'extraire des informations sur la structure de la surface et de la couleur du matériau (Barbu et al., 2014).

Les mesures infrarouges et micro-ondes sont réalisées de manière rapide et sans contact. Néanmoins, les sources de lumière accidentelle, les températures élevées (à partir de 90 degrés) et le bois gelé créent des erreurs de mesure. Ces fausses mesures déclenchent plusieurs problèmes dans le processus tels qu'un excès des températures de séchage et par la suite des défauts dans les produits finaux (Barbu et al., 2014).

### 1.3.3. Mesure de l'épaisseur

Deux modes de fonctionnement pour la mesure de l'épaisseur sont distingués : avec et sans contact. La méthode de laser, une mesure à distance précise, consiste à projeter un faisceau laser à la surface du produit et la partie qui reflète ce faisceau donne des informations sur tout changement d'épaisseur. Les têtes de mesure sont montées d'une manière paire et opposée afin d'éliminer les erreurs produites par le mouvement

vertical des panneaux. La méthode est sensible, ne nécessite aucun contact et est plus précise que la technique de rouleau (Barbu et al., 2014).

#### 1.3.4. Profil de densité et poids par unité de surface

La densité représente un indicateur important de la qualité des panneaux en bois. Dans la plupart des cas, cette mesure se fait juste avant le pressage dans le but d'ajuster les différents paramètres qui précèdent cette étape. La méthode la plus utilisée en ligne est celle de « X-ray gauge », elle est basée sur un détecteur en mouvement dans la chaîne munie d'un autre fixe pour prévoir le poids par unité de surface. Toutefois, cette technique ne permet pas de capter les changements dans toutes les directions vues que la mesure se fait dans une seule ligne longitudinale. Cela peut provoquer des problèmes de pressage et être à l'origine de produits finaux différents. De plus, l'emplacement de la source X doit être sécuritaire à cause des émissions radioactives. L'avantage de cette technique se traduit par une indépendance de l'environnement extérieur et elle est peu encombrante par rapport à d'autres modes de mesure. De plus, de nouvelles dispositions des sources radioactives peuvent couvrir tout le matelas en lamelles (Barbu et al., 2014).

#### 1.3.5. Détection des défauts dans la chaîne et des défauts de surface

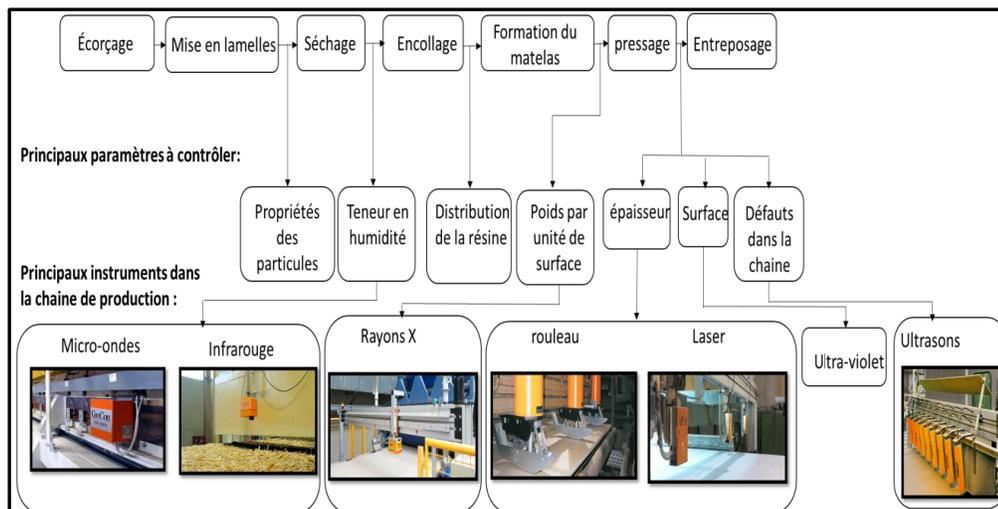
L'apparition des défauts de surface s'explique par le manque de durcissement de la résine, le temps très rapide de pressage, les changements au niveau de la teneur en humidité, la vitesse de pressage et le poids par unité de surface. La technique d'évaluation non destructive utilisée pour la détection de ces défauts est basée sur les ondes ultrasonores et plus particulièrement sur l'étude du son et ses atténuations dans le bois. La vitesse de l'onde dans le matériau est fortement catéchisée par l'apparition des défauts. Cependant, la propagation est influencée par les couches les plus denses, et ce relativement aux principales propriétés mécaniques. La diffusion des ondes dans le sens perpendiculaire au panneau est proportionnelle aux fissures et aux ports internes (Hilbers et al., 2012b). Les équipements installés ne mesurent que l'atténuation sonore

et aucun équipement n'est implanté pour le calcul de la vitesse du son dans le panneau (Hilbers et al., 2012a).

La plupart des techniques de production utilisées en temps réel sont couplées à l'air afin d'éviter les effets des impuretés qui se trouvent à la surface et qui conduisent à des mesures erronées (Sanabria et al., 2014). L'instrument est souvent installé après la presse et avant le découpage des panneaux. Pour un même emplacement, les industries de transformation modernes implantent des caméras sophistiquées pour l'inspection de la surface du panneau incluant la détection des papiers, les traces, les fissures apparentes, les trous et la surveillance des grains (Aguilera et al., 2006).

### 1.3.6. Emplacement des équipements de contrôle dans la chaîne de production

La Figure 1.3 résume les emplacements des plus importantes techniques permettant le contrôle des paramètres de production en temps réel. Ces techniques ont permis aux industries d'avoir des articles fiables. De plus, elles ont contribué à la réduction du nombre de tests de laboratoire.



**Figure 1.3 :** Emplacement des équipements de surveillance en temps réel dans une usine sophistiquée de transformation des panneaux à base de bois

Néanmoins, parmi les techniques citées, aucune n'est dédiée à l'inspection des contaminants métalliques dans les matelas en bois et ceci augmente le risque de destruction de la presse et des plateaux. La section suivante traite des solutions utilisées dans d'autres usines pour les mêmes objectifs de détection.

#### 1.4. Techniques proposées pour l'évaluation non destructive du matelas en bois contaminé

À l'aide des imageries tridimensionnelles, les chercheurs et les industriels ont pour objectif d'estimer la durée de vie du matériau, d'examiner son profil de densité et sa teneur en humidité, de déterminer ses pourritures et ses défauts internes. L'analyse de la structure du bois permet la localisation des fissures et des nœuds (Bucur, 2003). Les imageries tridimensionnelles aident également à la détermination de l'angle de microfibrille, les composants chimiques, la localisation des nœuds, la reconnaissance du bois de réaction et la proportion du bois initial et final (Bucur, 2003).

Les techniques basées sur l'excitation du bois par des ondes électromagnétiques sont : la tomographie X, la méthode de résonance magnétique, la thermographie infrarouge, l'imagerie térahertz et les micro-ondes. Ces mêmes méthodes peuvent être considérées comme des solutions pour l'identification des contaminants métalliques qui se trouvent dans les matelas en bois (Aderhold et al., 2010 ; Bucur, 2003 ; Edwards, 2004 ; Gowen et al., 2012).

##### 1.4.1. Tomographie X

Les rayons X sont situés entre l'ultra-violet et les ondes gamma dans le spectre électromagnétique avec une échelle de fréquence entre  $3 \cdot 10^{16}$  et  $3 \cdot 10^{19}$  Hz. L'analyse par ces rayons est basée sur leur atténuation dans la matière. La propagation des photons X dans la matière dépend des propriétés du bois, dont les couches les plus denses présentent plus d'atténuation (exprimée par la loi de Beer-Lambert) (Prince et al., 2006).

Les résultats sont enregistrés sur un semi-conducteur ou un film dans le but d'avoir des images digitales (Novelline et al., 2004). Les rayons réfléchis ne peuvent pas être analysés directement à la sortie de l'échantillon et leur transformation en longueurs d'onde visibles est nécessaire (Edwards, 2004).

Cette technique est appelée tomographie vu qu'elle est basée sur des additions algorithmiques. De plus, la qualité de l'image et le temps de la numérisation dépendent du nombre des émetteurs et des récepteurs utilisés (Fernández et al., 2014). La forme externe du bois et l'apparition des nœuds ou d'autres défauts sont contrôlés par l'observation des zones sombres pour la même fréquence et intensité d'excitation (Bucur, 2013). Au surplus, l'utilisation d'une intensité élevée permet d'avoir des images plus nettes et de mieux distinguer les défauts (Funt et al., 1987). En plus, l'étude de Rojas (2004) affirme que les projections sont proportionnelles à la teneur en humidité du matériau et par la suite l'identification sera plus difficile s'il y a une différence au niveau de la teneur en humidité pour les mêmes échantillons.

La tomographie X favorise l'analyse qualitative et présente la technique d'inspection la plus utilisée dans l'industrie des produits forestiers (Andreu et al., 2003). Néanmoins, elle ne présente pas jusqu'à nos jours, un équipement standard pour l'industrie de transformation de bois.

Le Tableau 1.2 résume les avantages et les inconvénients de l'utilisation de la tomographie X pour l'application d'inspection du matelas en bois (Andreu et al., 2003 ; Schad et al., 1996). Cette technique permet d'avoir des informations relatives à la qualité du bois. Par exemple, elle favorise la modélisation des nœuds et des fissures ainsi qu'une localisation exacte des défauts internes (Andreu et al., 2003). L'hétérogénéité du bois, la teneur en humidité et la densité mettent en évidence les limites de l'inspection. La même technique présente aussi des inconvénients dans la mesure où il y a des émissions radioactives dans le milieu du travail ce qui met en danger la sécurité des individus (Kaestner et al., 2005).

En 2012, un institut de recherche sidéen en collaboration avec « Microtec » a pu développer un équipement de tomographie rapide nommé « CT-Log » qui a augmenté la rentabilité des usines de transformation de 10 %. Le nouvel équipement peut prendre jusqu'à 5 ans pour qu'il soit généralisé pour toute industrie de bois (Alfredo et al., 2014).

**Tableau 1.2 : Avantages et limites de la tomographie X**

Avantages	Limites
i) Informations relatives à la qualité du bois ii) Modélisation des nœuds et des fissures iii) Localisation exacte des défauts et une imagerie tridimensionnelle	i) Grande surface du matelas ii) Hétérogénéité du matelas iii) Rayonnement radioactif

#### 1.4.2. Méthode de résonance magnétique

La méthode de résonance magnétique se traduit par l'excitation des échantillons de bois par un champ magnétique intense. L'analyse du matériau lino-cellulosique par cette technique peut être résumée en 4 étapes : polarisation, excitation, analyse et reconstruction. Elle est largement utilisée pour l'inspection des défauts internes et des structures en bois (Hall et al., 1986). Les principaux buts de son application sont la détermination de la position des nœuds, des fissures ou des caries (Bhandarkar et al., 1999). La même technique sert aussi à mesurer l'humidité et la porosité. L'échantillon à étudier est polarisé entre le bore et un aimant super conducteur. Le moment magnétique le plus utilisé pour l'inspection est celui des éléments  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{31}\text{P}$ . Ces atomes se relaxent dans le champ intense, ils permettent la formation des images dans le domaine visible du spectre électromagnétique. En outre, chaque moment magnétique

a sa propre fréquence de résonance qui est exprimée en ppm (partie par million) (Bucur, 2013).

Le Tableau 1.3 résume les avantages et les inconvénients de cette technique. Les résultats obtenus par ces méthodes dépendent de l'essence du bois (bouleau, pin, sapin, etc.). De plus, la qualité de l'analyse est fortement liée à l'intensité du champ magnétique utilisé. La méthode fournit des modèles unidimensionnels, bidimensionnels ou tridimensionnels. Elle permet aussi d'avoir des informations sur la chimie et la structure du bois. En revanche, son coût et la complexité des équipements restent ses principales limites comparées à d'autres moyens d'évaluation non destructifs (Bucur, 2003).

**Tableau 1.3 :** Avantages et limites de la méthode de résonance magnétique

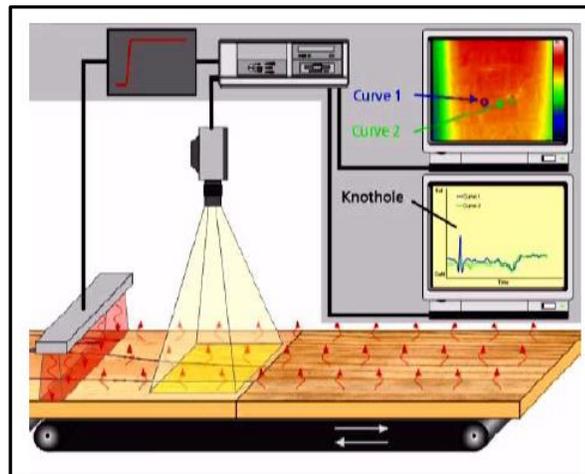
<b>Avantages</b>	<b>Limites</b>
i) Permet des modèles unidimensionnels, bidimensionnels ou tridimensionnels	i) La qualité de l'analyse est fortement liée à l'intensité du champ magnétique utilisée
ii) Informations sur la chimie et la structure du bois	ii) Cout élevé et équipements complexes

L'examen du bois par résonance magnétique ne représente pas un équipement standard pour l'industrie du bois. En effet, l'examen du matériau est fortement lié à sa teneur en humidité (basé sur la relaxation de l'atome H). À côté de cela, une numérisation au voisinage du point de saturation des fibres donne une image plus nette. La tomographie X et la résonance magnétique sont compatibles en termes de préparation d'échantillons. La tomographie X dépend de l'atténuation de l'onde dans la masse et de la densité du produit. Cependant, la résonance magnétique dépend de la densité de l'hydrogène et par la suite de la concentration de l'eau dans le produit.

L'échantillon peut être scanné par les deux techniques pour donner des informations complémentaires. La performance de ces deux techniques est liée à l'utilisation des équipements de transformation sophistiqués (Alfredo et al., 2014).

#### 1.4.3. Thermographie infrarouge

Les caméras thermiques sont parmi les solutions proposées pour contrôler les défauts invisibles dans les planchés et le bois d'ingénierie. Ces caméras favorisent une évaluation non destructive permettant la quantification des défauts internes du bois et des produits à base du bois (Figure 1.4).



**Figure 1.4** : Principe de la thermographie infrarouge active (Meinlschmidt, 2005)

Deux modes de fonctionnement sont distingués pour la thermographie infrarouge, respectivement active et passive. En effet, la thermographie active se traduit par l'excitation du produit à une température de l'ordre de 100 °C pour les panneaux de bois (Meinlschmidt, 2005). Lors du refroidissement à l'air, les défauts apparaissent comme des zones dont les températures sont dissemblables à celles du produit de base. Ceci est dû à la différence du coefficient de transfert thermique qui dépend de plusieurs paramètres comme la densité, la conductivité thermique et l'épaisseur du panneau (López et al., 2013).

Pour la thermographie passive, l'unique changement réside au niveau de l'élimination de l'étape de chauffage. En outre, la réponse de cette technique est proportionnelle au coefficient d'émissivité des différents matériaux (Aderhold et al., 2010). L'étude de Meinlschmidt (2005) a utilisé la thermographie infrarouge pour quantifier la répartition de la résine dans le bois, la détection du bois compressé, l'évaluation du profil de densité et la détection des nœuds. Le Tableau 1.4 résume les avantages et les limites de la thermographie infrarouge. L'étude de Wyckhuyse et al. (2001) mentionne que le repérage des défauts interne est possible uniquement pour les défauts proches de la surface. Le temps de réponse dépend aussi de la profondeur du défaut. En effet, les défauts situés à un maximum de 2 cm de la surface sont les plus faciles à détecter. La reconnaissance du défaut profond est possible seulement en appliquant une grande quantité d'énergie de chauffage, mais ceci peut endommager le bois. La thermographie infrarouge peut être une solution pour l'évaluation non destructive du matelas en bois. En revanche, le matelas possède une épaisseur qui varie de 2 jusqu'à 22 cm, ce qui rend la détection des défauts profonds plus ou moins difficile.

**Tableau 1.4 :** Avantages et limites de la thermographie infrarouge

Avantages	Limites
i) Efficace pour les défauts non profonds.	i) Le temps de réponse dépend de la profondeur du défaut ii) Risque d'endommagement du bois par chauffage

#### 1.4.4. Imagerie térahertz

Les ondes TéraHertz sont une nouvelle technique utilisée pour la décontamination électromagnétique dans l'industrie agroalimentaire (Gowen et al., 2012), considérée comme exigeante en termes de reconnaissance des corps étrangers dans les aliments. Elle est capable de détecter tout type de contaminants (métallique ou non). Les ondes

téraherz sont situées entre les micro-ondes et l'infrarouge. La gamme de fréquences la plus utilisée est située entre 0,2 et 3 THZ. De plus, la technique est caractérisée par une forte transparence et une meilleure résolution, en outre, elle ne possède pas une haute énergie de photons. L'inspection de l'orientation des fibres et l'analyse des valeurs ajoutées peuvent s'effectuer avec cette technique (Schneider, 2012). La même étude de Schneider (2012) mentionne qu'une excitation du bois avec ces ondes permet d'obtenir une carte de la distribution de la densité. En conséquence, le panneau réagit en développant un indice de réflexion qui représente la vitesse de la lumière dans lui-même.

Le Tableau 1.5 présente les avantages et les limites de la solution proposée. La technique possède plusieurs avantages tels qu'une claire distinction entre le bois initial et final et une carte de distribution de la densité (Ok et al., 2014). La même étude montre que l'inspection avec les images obtenues par les ondes téraherz est meilleure que celle de rayons X en termes d'obtention des résultats des plus petits contaminants et des moins denses.

**Tableau 1.5 : Avantages et limites des ondes téraherz**

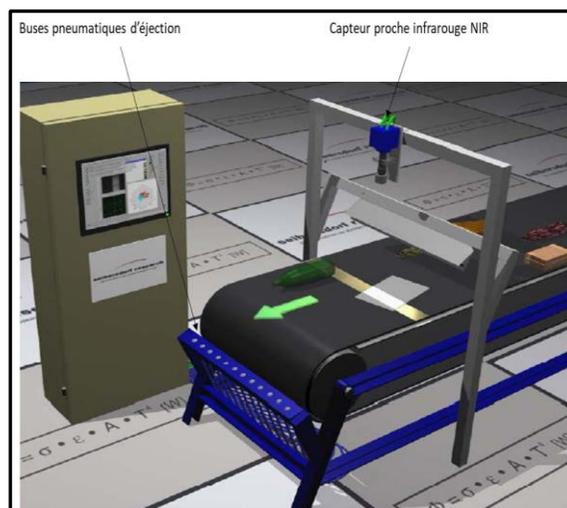
Avantages	Limites
i) Claire distinction entre le bois initial et final ii) Permet une carte de distribution de densité	i) Bruits des images

De plus, l'étude de Kim et al. (2012) mentionne que la technique peut fournir des images avec une haute résolution (du millimètre près). En effet, elle se base sur l'état physique de la matière et non pas sur la densité. Cependant, la génération des images téraherz est difficile vu que les ondes présentent un écart dans le spectre. L'inspection complète des troncs d'arbres présente un défi pour la technique, de plus, la teneur en

humidité affecte directement les résultats. Certaines études appliquent ce moyen d'inspection pour caractériser les tableaux et les peintures sur bois (Zhang et al., 2017), par contre, aucune application n'était discutée pour l'analyse d'un matelas contaminé avec des métaux.

#### 1.4.5. Proche infrarouge

Certaines solutions pour la décontamination électromagnétique du matelas sont déduites des industries de recyclage du bois, du verre ou du plastique. La base consiste à étudier l'interaction des ondes électromagnétiques (dans le domaine infrarouge) avec les matériaux, et plus particulièrement le bois. Ces rayons se situent tout près du domaine visible du spectre électromagnétique et les analyses faites avec cette technique attaquent seulement la surface de l'échantillon (chimie de surface) (Figure 1.5). La simple préparation des échantillons et la collecte rapide des résultats favorisent le proche infrarouge par rapport aux autres domaines électromagnétiques. En effet, l'excitation des échantillons par ces ondes fournit des informations sur certaines combinaisons d'atomes fondamentales telles que : C-H, O-H, etc. (So et al., 2004).



**Figure 1.5** : Application du proche infrarouge pour le tri des matériaux (Tatzer et al., 2005)

Les capteurs proches infrarouges sont souvent utilisés pour l'industrie de recyclage du bois ou du papier. La technique se base sur la reconnaissance des matériaux à partir de leur chimie de surface. En outre, elle peut examiner les parties du bois contaminées chimiquement (Mauruschat et al., 2016) ou distinguer les papiers recouverts (Borel et al., 2007). L'industrie de recyclage utilise d'autres techniques pour la reconnaissance et la détection des contaminants, telles que la spectroscopie d'émission atomique de plasma (Martin et al., 2005) et la fluorescence X (Hasan et al., 2011). Le Tableau 1.6 montre les avantages et les inconvénients de l'analyse de chimie de surface. La méthode est simple et la collecte des résultats est rapide. De plus, elle permet d'avoir un produit final avec 98 % de pureté dans le cas de la séparation du bois contaminé (De Groot et al., 2002).

**Tableau 1.6 :** Avantages et limites de l'inspection infrarouge

<b>Avantages</b>	<b>Limites</b>
i) Collecte facile des résultats	i) Examine seulement la chimie de
ii) Favorise 98 % de pureté du produit final	surface

#### 1.4.6. Micro-ondes

Les micro-ondes peuvent être une solution pour le contrôle non destructif des matériaux diélectriques. Celle-ci se base sur l'émission des ondes électromagnétiques, dont une partie sera transmise et l'autre réfléchi lors du changement du facteur diélectrique ou à la rencontre des contaminants. Cette technique est la plus utilisée pour détecter les corps étrangers dans les composites. En effet, les micro-ondes ont remplacé les inspections faites par le courant de Foucault dédié aux matériaux conducteurs d'électricité (Little Jr, 2002).

À partir d'un modèle bidimensionnel, cette solution permet de fournir des informations sur la nature et la localisation des contaminants (Edwards, 2004). D'un point de vue théorique, la technique nécessite une source de micro-ondes et un système de traitement des données (Kasal et al., 2010). Deux modes opératoires sont distingués en fonction du mouvement de l'onde dans l'échantillon : par transmission et par réflexion (Kasal et al., 2010). La technique des micro-ondes présente certains avantages au niveau de la détection des corps étrangers et des nœuds dans les troncs d'arbres, elle permet aussi d'avoir des informations sur la densité et l'humidité du matériau. Le Tableau 1.7 résume les avantages et les inconvénients de la technique des micro-ondes.

**Tableau 1.7 : Avantages et limites de la technique des micro-ondes**

Avantages	Limites
i) Informations sur la densité et l'humidité ii) Détection des nœuds dans les troncs d'arbres	i) Hétérogénéité du matelas (le matelas est plein d'air)

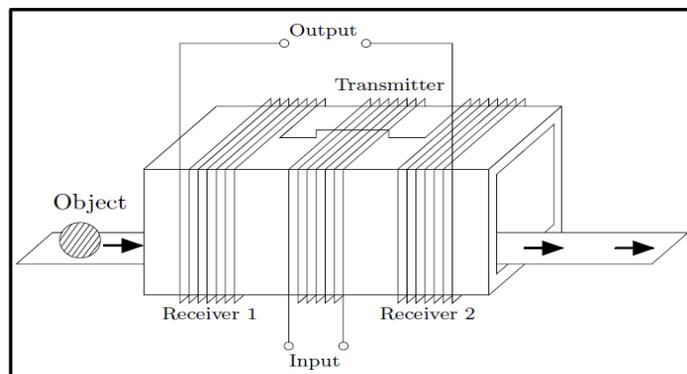
#### 1.4.7. Détecteurs de métaux

Trois grandes familles de détecteurs de métaux électromagnétiques sont distinguées : les détecteurs à impulsion, ceux à feuille métallique et ceux à trois bobines équilibrées. Le système le plus utilisé est celui des trois bobines équilibrées (Figure 1.6). Il constitue 90 % des détecteurs installés à l'échelle industrielle. Ces machines comportent une bobine d'émission et deux bobines de réception (Edwards, 2004).

La détection des corps étrangers se base sur la création du courant de Foucault à la surface du contaminant (Abbas et al., 1986). L'excitation de la bobine émettrice avec un champ magnétique variable permet de produire un champ magnétique qui induit dans les deux bobines réceptrices une tension appelée voltage induit. En outre, il existe

une relation entre les trois bobines constituant le détecteur en l'absence du contaminant et lors de son apparition dans la zone active du dispositif (Hansen et al., 2008 ; Zhao et al., 2014).

Le montage de Yamazaki et al. (2002) permet de différencier entre les contaminants magnétiques et ceux qui ne le sont pas, en fonction du déphasage entre le signal de la source et à la sortie de l'amplificateur différentiel. La même étude affirme qu'il existe une relation entre la taille de l'échantillon et l'amplitude enregistrée.



**Figure 1.6** : Détecteur de métaux à trois bobines équilibrées (Hansen et al., 2008)

Le Tableau 1.8 montre les avantages et les limites d'un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées. Les propriétés physiques des corps étrangers (conductivité et perméabilité) agissent sur le champ magnétique produit et par la suite sur le voltage induit dans les bobines réceptrices (Yamazaki et al., 2002).

**Tableau 1.8** : Avantages et limites d'un détecteur de métaux

Avantages	Limites
i) Peu coûteux et facile à implanter	i) Les lamelles en bois peuvent affecter les propriétés magnétiques du milieu
ii) Favorise des réponses pertinentes pour l'industrie agroalimentaire	
iii) Prévoir le type et la taille du contaminant	

a. Propriétés physiques des contaminants : la perméabilité

La perméabilité est une propriété physique relative à chaque matériau. Elle indique la possibilité de former un dipôle en la présence d'un champ magnétique. Cette propriété est souvent liée à la perméabilité du vide  $\mu_0$ . Ceci conduit donc à la notion de perméabilité relative  $\mu_r$  et de perméabilité totale d'un milieu  $\mu$  (relation 1.1) ;

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad (1,1)$$

Le champ magnétique B peut s'écrire en fonction de la source du champ magnétique H dans la relation suivante (relation 1.2) ;

$$B = \mu * H \quad (1.2)$$

Il est possible aussi de définir la susceptibilité d'un matériau dans l'équation (1,3). Dans cette relation, M est le champ magnétique induit associé à chaque matériau ;

$$\kappa = \frac{M}{H} \quad (1.3)$$

La perméabilité relative peut aussi s'exprimer en fonction de la susceptibilité (relation 1.4) ;

$$\mu_r = 1 + \kappa \quad (1.4)$$

Selon la réponse des matériaux aux champs magnétiques, ils sont classés en trois catégories en fonction de leurs propriétés magnétiques soit : diamagnétique, paramagnétique et ferromagnétique (Jiles, 2016).

Les matériaux diamagnétiques sont caractérisés par une perméabilité relative  $\mu_r$  qui est souvent inférieure à 1 et une susceptibilité négative. Le cuivre, l'or et l'argent sont les diamagnétiques les plus connus. Ces derniers sont caractérisés par un petit champ magnétique répulsif lors de leurs présences dans un champ magnétique. La force répulsive de ces matériaux est faible vis-à-vis du champ appliqué. Les moments magnétiques, produits par le mouvement orbital des électrons libres et par les spins, tendent à s'aligner d'une manière inverse par rapport au champ appliqué.

L'aimantation des diamagnétiques cesse dès que le champ magnétisant est supprimé, et tout changement de température n'a aucune influence sur les propriétés des diamagnétiques.

Les matériaux paramagnétiques sont légèrement attirés par les aimants. En effet, il existe un champ magnétique dans ces matériaux parce qu'il n'y a pas d'annulation totale des moments dipolaires des électrons.

Leurs moments magnétiques sont légèrement supérieurs à 1 et leurs susceptibilités sont positives, mais elle est très faible. Le moment magnétique pour ces matériaux est divisé en deux parties, la première est parallèle au champ appliqué, tant dit que l'autre est antiparallèle. L'aluminium et le tungstène sont les matériaux paramagnétiques les plus connus. La température affecte les propriétés des diamagnétiques jusqu'à atteindre un seuil appelé température de Curie.

Les matériaux ferromagnétiques sont des matériaux qui possèdent un moment magnétique même en l'absence d'un champ extérieur appliqué. Leur susceptibilité est positive et grande. Vu que les moments magnétiques dépendent de la puissance du champ extérieur, ils sont presque tous alignés au champ extérieur. Ces matériaux peuvent conserver une partie du champ même après son annulation. Les ferromagnétiques les plus connus sont : le fer, le nickel et l'acier. En plus, ces derniers se comportent comme les paramagnétiques en termes d'influence de la température.

#### b. Propriétés physiques des contaminants : la conductivité

La conductivité est une propriété expliquant les mouvements des charges électriques dans un matériau en la présence d'un champ électrique. Elle dépend de la température et de la composition du matériau. Trois classes de matériaux sont identifiées : les diélectriques, les semi-conducteurs et les conducteurs (j'iles, 2016).

Les matériaux diélectriques, aussi connus comme isolants, sont des matériaux dont les charges électriques libres ne subissent que de faibles mouvements. Par la suite, il n'y a pas de circulations de courants dans ces matériaux.

Pour les matériaux conducteurs, il existe des mouvements de charges électriques entre les atomes qui constituent les matériaux (Jiles, 2016). La conductivité d'une substance est déterminée par la densité de charge  $\varphi_e$  et la mobilité des électrons  $\mu_e$  d'où la conductivité  $\sigma$  est exprimée dans l'équation (1.5) ;

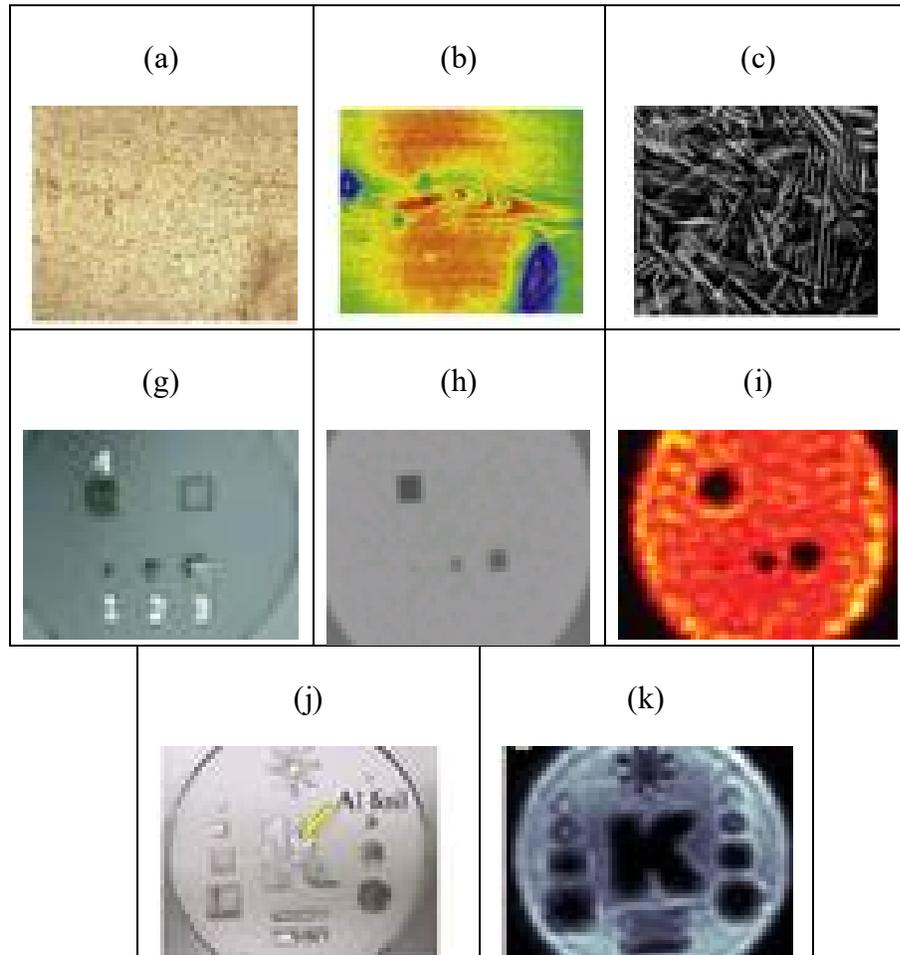
$$\sigma = - \varphi_e * \mu_e \quad (1.5)$$

Finalement, les semi-conducteurs se caractérisent par une conductivité entre les conducteurs et les diélectriques. L'augmentation de la température pour ces matériaux augmente la conductivité.

### 1.5. Évaluation du potentiel de détection des techniques étudiées

La Figure 1.7 présente quelques imageries électromagnétiques pour des défauts dans les matériaux diélectriques. De plus, certaines de ces images collectent des informations sur les contaminants métalliques. Cette partie est présentée pour évaluer le potentiel de détection des techniques proposées dans ce chapitre.

L'objectif est d'identifier les corps les moins denses, les plus petits et les plus profonds dans la matière vis-à-vis des propriétés d'un matelas en lamelles (épaisseur importante, propriétés diélectriques, etc.). La Figure 1.7 (a) et (b) montre une étude comparative entre une image digitale et une image infrarouge (Niemz et al., 2012). La réponse thermique des zones affectées est différente par rapport à l'image optique. En effet, la thermographie permet d'obtenir une carte de la distribution de la densité des matériaux inspectés. Néanmoins, cette technique manque de précision pour les défauts profonds. La Figure 1.7 (c) (Aderhold et al., 2010) montre une carte de répartition des lamelles pour un panneau de bois pris avec une source à rayon X. Cette technique permet d'étudier le profil de densité des panneaux de bois.



**Figure 1.7 :** Évaluation du potentiel de détection des techniques étudiées (Niemz et al., 2012, Kim et al., 2012, Aderhold et al., 2010)

D'ailleurs, elle ne présente pas des problèmes de pénétration dans les matériaux. Cependant, cette solution est nuisible à la santé humaine en milieu de travail. La Figure 1.7 (j) (h) (i) (j), et (k) montre une étude comparative entre la tomographie X et les imageries térahertz (Kim et al., 2012). Les ondes térahertz (Figure 1.7 (i) et (k)) sont plus efficaces grâce à leurs aptitudes à détecter des contaminants non denses. Le Tableau 1.9 résume l'utilité de chacune des techniques vis-à-vis des applications liées au bois.

**Tableau 1.9** : Domaines d'application des techniques étudiées (Bucur 2003)

<b>Technique</b>	<b>Paramètre de contrôle</b>	<b>Longueur d'onde (m)</b>	<b>Échantillon à analyser</b>	<b>Caractère observé</b>
<b>Rayonnement ionisant</b>	Atténuation de rayon X	$10^{-12}$ - $10^{-9}$	Arbre, log, composites	Carte de densité, contaminant métallique, les vides, les nœuds
<b>Thermique</b>	Température	$10^{-5}$ - $10^{-4}$	Arbre, composites, bois d'œuvre	Pourriture, direction des fibres, humidité,
<b>NMR</b>	Relaxation des atomes	$10^{-2}$ - $10^5$	Arbre, Bois d'œuvre, composites	Vitalité des arbres, humidité, nœuds, séchage du bois, maladies des champignons
<b>Térahertz</b>	Vitesse de lumière dans le matériau	$10^{-3}$ - $3.10^{-3}$	Matelas, composites	Carte de densité, pourriture, contaminants métalliques, vides
<b>NIR et MIR</b>	Chimie de surface	$7,8. 10^{-7}$ - $2, 5.10^{-6}$	Bois, composites	Groupement fondamental à la surface
<b>Détecteur de métaux</b>	Conductivité et perméabilité	--	Matelas en bois, bille/bûche, arbres	Voltage induit dans les bobines réceptrices

En revanche, les imageries X (Figure 1.7 (h)) permettent de détecter les contaminants les plus denses. L'évaluation des ondes térahertz par rapport aux images optiques Figure 1.7 (j) et (k) (Kim et al., 2012) montre que l'imagerie térahertz permet d'identifier les formes, même complexes, des plus minces des contaminants métalliques. La plupart de ces solutions ne peuvent pas servir à la détection des contaminants métalliques dans un matelas en bois. Une grille de sélection a été remplie dans l'optique de sélectionner la technique la plus adéquate pour notre application (Tableau 1.10).

Quelques paramètres de l'environnement de l'équipement sont pris en considération, spécifiquement, l'impact de l'équipement sur la santé, la robustesse, etc. Ces paramètres ont permis d'établir une grille de sélection. En effet, chacun de ces paramètres est noté de 1 à 5. Dès alors, 1 présente la pondération « pas du tout satisfaisante » et 5 représente la pondération « très satisfaisante ». Ces notes seront pondérées par rapport à l'importance du paramètre considéré (voir les facteurs de pondération entre parenthèses dans le Tableau 1.10). En comparant les résultats de cette analyse, il est possible de conclure que quatre techniques pourraient être efficaces pour une évaluation non destructive d'un matelas contaminé par les métaux : la thermographie infrarouge, les ondes térahertz, les détecteurs de métaux et l'infrarouge (chimie de surface) selon la grille de sélection proposée.

**Tableau 1.10** : Critères de choix des techniques

<b>Techniques</b>	<b>Effi- cacité (2)</b>	<b>Santé (3)</b>	<b>Robustesse</b>	<b>Surface à couvrir (2)</b>	<b>Écono- mie (2)</b>	<b>Total</b>
<b>Rayons X</b>	8	1,5	3,5	5	6	24
<b>Thermographie infrarouge</b>	5	12	2	5	7	31
<b>Imagerie térahertz</b>	9	12	3,5	5	7	36,5
<b>Résonnance magnétique</b>	4	3	2	8	6	23
<b>Infrarouge (Nir, Mir)</b>	4	10,5	3	7	6	30,5
<b>Détecteur de métaux</b>	7	10,5	3,5	8	8	37

Afin de sélectionner la meilleure technique, une étude de la faisabilité financière est nécessaire, tels que ; les fournisseurs disponibles et l'estimation du budget des équipements (Tableau 1.11). La première partie de cette étude a examiné des méthodes basées sur l'imagerie du spectre électromagnétique qui sont utiles pour étudier la structure interne et caractériser le bois. Le principal champ d'utilisation des imageries tridimensionnelle est la caractérisation physique du matériau ; une estimation de la

durée de vie ou une reconnaissance des défauts internes. Toutefois, ces méthodes peuvent être des alternatives pour la détection et l'identification des corps étrangers métalliques. Par contre, certaines présentent une complication d'installation ou des manques de précision.

**Tableau 1.11 : Faisabilité des solutions**

	<b>Thermographie infrarouge</b>	<b>Imagerie térahertz</b>	<b>Infrarouge</b>	<b>Détecteur de métaux</b>
<b>Fournisseur</b>	Infratec	Terasense	--	Mettler Toledo
<b>Budget estimé</b>	50 à 150 k\$	27 k\$	--	30 k\$

Le détecteur à trois bobines équilibrées, la thermographie infrarouge, l'imagerie Térahertz et l'infrarouge sont les solutions pertinentes d'inspection sélectionnées dans la section précédente. L'analyse avec les ondes térahertz ne sera pas étudiée dans le cadre de ce travail suite au prix élevé de l'équipement. Le détecteur de métaux présente un moyen simple, peu coûteux pour l'inspection des matelas et la détection des corps étrangers métalliques. Il reste à l'adapter dans une usine de bois en tenant compte de l'influence de la conductivité et de la perméabilité du matériau et des propriétés des contaminants. Par la suite, une tentative de conception et de réalisation d'un détecteur de métaux ainsi qu'une caractérisation basée sur la transformée de Fourier des contaminants a été effectuée. En effet, l'analyseur infrarouge permet de reconnaître facilement les contaminants métalliques à partir de leurs chimies de surface. Des imageries thermiques seront appliquées à la prochaine section pour les mêmes objectifs de recherche.

## CHAPITRE 2

### MATÉRIEL ET MÉTHODE

#### 2.1. Objectifs et hypothèses

L'objectif général de cette étude est de détecter des corps étrangers métalliques lors de l'étape de formation du matelas en bois dans une usine de transformation des panneaux à lamelles orientées.

Les objectifs spécifiques seront divisés aux sous-objectifs suivants :

- i) Évaluer le potentiel d'une caractérisation physico-chimique avec des capteurs FTIR, pour la détection des contaminants métalliques à partir de leur chimie de surface ;
- ii) Évaluer le potentiel d'une caméra thermique de type FLIR-i7 pour détecter et localiser les contaminants métalliques dans des panneaux à base de bois ;
- iii) Concevoir un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées dédié à la détection des contaminants métalliques dans un matelas en bois contaminé et analyser la dépendance de ses résultats (phase et amplitude) de la fréquence d'excitation et des propriétés des contaminants ;

Afin de faciliter l'étude, quelques hypothèses simplificatrices sont prises en considération ;

- i) Les contaminants métalliques peuvent être détectés facilement à partir de leurs chimies de surface et une couche d'oxyde existante à la surface des matériaux métalliques est caractérisée par une réponse intrinsèque.
- ii) La caméra thermique peut servir à la détection des contaminants métalliques et les résultats thermiques dépendent de la forme, la position et la profondeur des contaminants dans le panneau à base de bois.
- iii) Le détecteur de métaux à trois bobines équilibrées pourrait être une alternative pour la décontamination électromagnétique du matelas et ses résultats dépendent de la taille, des propriétés magnétiques (du matelas et des contaminants), de la position du contaminant par rapport au centre du détecteur et de la fréquence d'excitation de la bobine émettrice.

## 2.2. Caractérisation visuelle, thermique et caractérisation physico-chimique des contaminants et des zones de brûlures

### 2.2.1. Préparation des échantillons

Cette partie consiste à fabriquer des panneaux à lamelles orientées contaminées. Des contaminants métalliques ont été incorporés dans le matelas en bois avant l'étape de pressage. L'étude des dégâts et des impacts lors de l'apparition d'un contaminant métallique sur le produit final constitue le but de cette approche. Les expériences sont effectuées en variant la profondeur du corps étranger par rapport à la surface du panneau, la taille et la forme de l'intrus. En variant ces paramètres, les résultats attendus incluent l'analyse de leurs impacts sur le produit (qualité, brûlures, etc.) et sur les plateaux de la presse.

#### a. Matériel

Les lamelles de bois utilisées sont des lamelles de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) de la société Norbord de Lasarre. Chacune de ces lamelles a une longueur d'environ 14 mm, une largeur entre 3 et 5 mm et une épaisseur de moins d'un

millimètre. Les lamelles utilisées sont mélangées à la résine isocyanate et de la cire (produit du 26/02/2019). Le mélange contient 0,4 % de cire et 2,2 % de résine isocyanates. Le composite sera par la suite pressé avec une presse chaude.

#### b. Fabrication des panneaux à lamelles orientées

La formation du matelas à lamelles orientées en bois est faite manuellement avec un moule en bois de dimensions 260\*260\*100 mm (Figure 2.1). En effet, chaque plan de lamelles possède une orientation spécifique. Le matelas est pressé à chaud en suivant ce cycle : un chauffage des plateaux à 180 degrés pendant 25 minutes, un pressage à 300 KN et finalement, une chute de température jusqu'à 40 degrés avec un maintien de pressage à 300 KN. Le choix de ce cycle (temps et température de pressage) est le plus proche du cycle suivi pour le plus mince produit de Norbord.



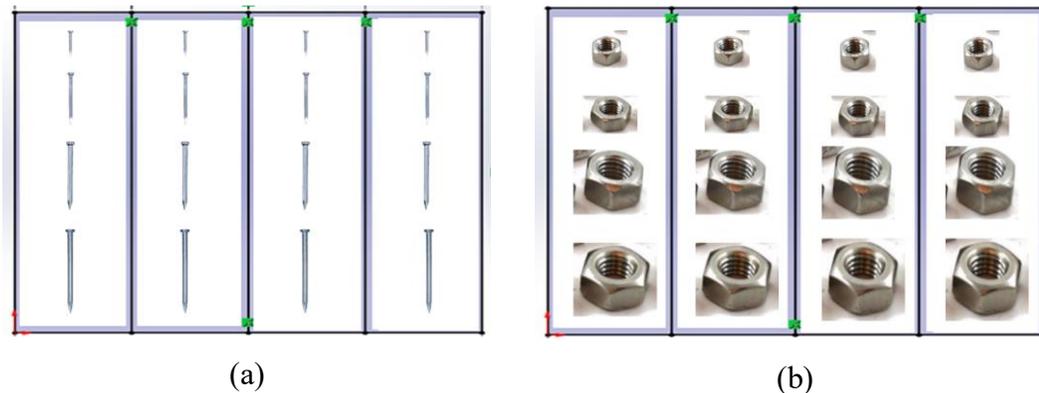
**Figure 2.1** : Moule utilisé pour la mise en forme

#### c. Fabrication des panneaux à lamelles orientées contaminées

Deux types de contaminants ont été sélectionnés pour être incorporés dans le matelas en bois ; des vis et des écrous (Figure 2.2a-2.2b). L'expérience consiste à incorporer une fois des vis et une autre fois des écrous dans un matelas à lamelles orientées. En effet, quatre vis qui possèdent respectivement quatre dimensions différentes : M8, M10, M12 et M14 ont été incorporés dans le matelas en bois. La même expérience est

répétée pour le cas des écrous qui possèdent respectivement les dimensions suivantes ;  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{5}{16}$ ,  $\frac{3}{8}$  et  $\frac{7}{16}$ .

Le matelas est divisé en quatre colonnes équidistantes de 6,5 cm (Figure 2.2a-2.2b), dont quatre contaminants de tailles différentes. Ces derniers sont incorporés dans chacune des colonnes. Ces blocs de quatre contaminants sont placés respectivement à la 2<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup>, 6<sup>e</sup> et 8<sup>e</sup> couche de lamelles pour chaque colonne afin d'étudier l'effet de la profondeur du contaminant. En effet, un panneau qui possède une densité de  $650 \text{ kg/m}^3$  contient environ 10 couches de lamelles en utilisant le moule du laboratoire.



**Figure 2.2 :** Incorporation des contaminants dans le matelas (a. Vis, b. Écrous)

Afin de protéger la presse de mise en forme du laboratoire, deux plateaux protecteurs en aluminium sont ajoutés entre le matelas contaminé et les plateaux de la presse (Figure 2.3). En outre, l'aluminium permet d'examiner visuellement les dégâts produits aux surfaces des plateaux de la presse.



**Figure 2.3 :** Pressage des matelas contaminés

### 2.2.2. Caractérisation visuelle des panneaux contaminés

La caractérisation visuelle consiste en une description des défauts à la surface du panneau et des défauts produits sur les plateaux de la presse en variant la profondeur, la taille et la forme du contaminant.

### 2.2.3. Caractérisation des panneaux contaminés avec la thermographie infrarouge

La résolution de la problématique de cette recherche peut être effectuée avec une caméra thermique. En effet, les contaminants métalliques présentent une hétérogénéité physique dans les produits à base de bois et possèdent une émissivité intrinsèque. La caméra thermique utilisée pour cette expérience est de type FLIR-i7 (Figure 2.4). Le coefficient d'émissivité a été calibré à 0,3 en considérant les matériaux métalliques recherchés comme des corps métalliques brillants.



**Figure 2.4 :** Caméra thermique de type FLIR-i7

Les contaminants analysés sont ceux utilisés pour l'inspection visuelle (Figure 2.5). Effectivement, ils contiennent des contaminants à différentes profondeurs. La première colonne à droite représente les contaminants les plus proches de la surface pour chaque panneau. Ces panneaux ont été chauffés dans un four à induction à 76 degrés pour 120 secondes avant la prise des images thermiques. Subséquemment, il s'agit d'une thermographie infrarouge active. Les résultats thermiques ont été pris des deux faces de chaque échantillon.



**Figure 2.5 :** Panneaux contaminés analysés avec thermographie infrarouge (1 : panneau avec 2 colonnes contaminées avec des écrous, 2 : panneau avec 3 colonnes contaminées avec des vis, 3 : panneau avec 4 colonnes contaminées avec des écrous)

#### 2.2.4. Caractérisation physico-chimique

Les deux capteurs mi-infrarouges utilisés sont respectivement, IR-tracer 100 pour les matériaux organiques (Figure 2.6a) et Thermo-scientifique pour les matériaux inorganiques (contaminants métalliques) (Figure 2.6 b). Le spectre du peuplier faux-tremble est obtenu sur une plage de nombres d'onde entre 400 et 4000  $\text{cm}^{-1}$  avec 64 numérisations par échantillon. D'autre part, les spectres des matériaux inorganiques sont obtenus sur une plage de nombres d'ondes entre 450 et 750  $\text{cm}^{-1}$ .



(a)

(b)

**Figure 2.6 :** IR-tracer (a. disponible au laboratoire de biomatériaux de l'UQAT, b. disponible au laboratoire de chimie du cégep de Jonquière)

##### a. Caractérisation physico-chimique des zones de brûlure

La caractérisation physico-chimique des zones de brûlure est le complément de l'inspection visuelle étudiée dans la partie précédente, elle présente une comparaison entre les pics caractéristiques du bois et des zones brûlées.

##### b. Caractérisation physico-chimique du peuplier faux-tremble et du produit commerciale

La méthode consiste à analyser un échantillon de peuplier faux-tremble et un panneau à lamelles orientées des produits du partenaire industriel (Figure 2.7). Cette approche

a été proposée pour chercher les pics caractéristiques de la résine et des ajouts existant dans les panneaux à lamelles orientées.



**Figure 2.7 :** Échantillons analysés par la technique de mi-infrarouge

### c. Caractérisation physico-chimique des contaminants métalliques

La méthode est une forme de caractérisation physico-chimique de plusieurs contaminants souvent présents dans l'industrie de transformation de bois. À titre d'exemple : l'acier, l'aluminium et le laiton. La caractérisation des matériaux inorganiques avec infrarouge n'est pas évidente. De plus, certains intrus ont été analysés, corrodés ou recouverts de papier pour avoir une idée sur la pertinence de l'approche proposée vis-à-vis de l'environnement réel de l'usine. Une description détaillée des contaminants étudiés est présentée dans le Tableau 2.1.

### 2.3.Cahier de charge d'un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées

Les études théoriques de Hansen et al. (2008), B. Liu et al. (2011), Zhao et al. (2014) et Yamazaki et al. (2002) ont été pris comme références pour la réalisation d'un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées. Ce détecteur est constitué de trois bobines : une bobine émettrice et deux bobines réceptrices.

**Tableau 2.1** : Contaminants analysés avec le capteur infrarouge (a. Contaminants de type aluminium, b. Contaminants de type acier, c. Contaminant de type laiton)

<b>a. Contaminants de type aluminium</b>		
<b>Alu 01</b>	Plaque en aluminium	
<b>Alu 01-brulé</b>	Zone de brulure de Alu 01	
<b>Al 02</b>	Plaque en aluminium	
<b>Al-br</b>	Papier aluminium-côté mat	
<b>Al-mat</b>	Papier aluminium-côté brillant	
<b>Al-Si</b>	Alliage aluminium-silicium	
<b>Al-Si recouvert avec papier</b>	Alliage aluminium-silicium recouvert avec du papier	
<b>b. Contaminants de type acier</b>		
<b>Acier 01</b>	Plaque en acier	
<b>Acier 01-corrodé</b>	Zone corrodée de la plaque 01	
<b>Acier 02</b>	Acier/contient du chrome	
<b>Acier 03</b>	Écrou commercial	
<b>Acier 04</b>	Bille de roulement	
<b>c. Contaminant de type laiton</b>		
<b>Laiton 01</b>	Sphère en laiton	

L'excitation de la bobine émettrice avec un champ magnétique variable permet de produire un champ magnétique qui induit dans les deux bobines réceptrices un voltage appelé voltage induit. Ceci explique l'existence d'une interaction entre les trois bobines constituantes du détecteur qui dépend de l'apparition des contaminants et des propriétés physiques des corps étrangers (conductivité et perméabilité). Ces propriétés servent à agir sur le champ magnétique produit et par la suite, sur le voltage induit dans les bobines réceptrices. Dans le but d'assurer la pertinence de fonctionnement de ce dispositif, une étude de son principe, de ses composants, des paramètres influençant le champ magnétique sont examinés.

### 2.3.1. Bobine émettrice

Un champ magnétique se définit, selon Ampère, comme la conséquence d'un champ électrique alternatif qui circule dans un contour fermé. L'excitation de la bobine par un champ électrique permet en effet d'avoir un champ magnétique. Ceci est valable uniquement pour les champs électriques sinusoïdaux et ne s'applique pas pour les champs statiques.

La relation entre les deux champs est donnée par la relation (2.1) ;

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu * I \quad (2.1)$$

Le champ magnétique  $B$  produit à partir de la circulation du courant électrique dans un contour fermé, dépend du produit de la perméabilité du milieu  $\mu$  et l'intensité du courant électrique  $I$ . En effet, le champ induit est un champ sinusoïdal. Une augmentation du nombre de spires  $N$ , du courant  $I$ , de la perméabilité  $\mu$  et une diminution de la longueur de la bobine conduisent à l'obtention d'un champ magnétique intense (relation 2.2) ;

$$\mathbf{B} = \mu * \frac{N * I}{T} \quad (2.2)$$

### 2.3.2. Bobines réceptrices

Un champ magnétique variable produit un champ électrique variable. Ce phénomène se produit lors de l'interaction d'un champ magnétique avec les deux bobines réceptrices et le résultat est la génération d'une force électromotrice  $emf$  dans ces deux bobines réceptrices. Selon Faraday, la force électromotrice est décrite dans la relation (2.3) ;

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Dans cette relation,  $N$  est le nombre de spires et  $\Phi$  le flux du champ magnétique. La force électromotrice est proportionnelle au nombre de spires de la bobine réceptrice et à la variation dans le champ magnétique primaire.

### 2.3.3. Inductance d'une bobine

L'inductance est la partie imaginaire de l'impédance d'une bobine. Elle explique la relation entre le voltage induit  $emf$  et les changements du courant qui le produit (relation 2.4) ;

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (2.4)$$

D'après l'équation, le voltage induit est proportionnel à l'inductance  $L$  et au courant  $I$ . L'inductance  $L$  est une propriété intrinsèque de chaque bobine qui dépend du nombre de spires  $N$ , de la surface  $A$  et de la longueur  $T$  de la bobine.

Afin d'avoir une inductance maximale, il faudra maximiser le nombre de spires  $N$  et le contour de la bobine tout en gardant sa longueur  $L$  minimale. L'augmentation de l'inductance est indésirable. En effet, c'est la partie imaginaire de la réactance et elle peut s'écrire en fonction de la fréquence  $\omega$  et le courant  $I$  dans la relation (2,5) ;

$$\frac{V}{I} = j\omega L \quad (2.5)$$

L'augmentation de la fréquence et l'inductance servent à augmenter la réactance. À ce niveau apparaît la contradiction en termes de fréquence. D'une part, il est préférable de la minimiser en réduisant l'impédance et d'autre part, son augmentation est nécessaire pour avoir un voltage induit important dans les deux bobines réceptrices.

#### 2.3.4. Interaction entre les bobines en l'absence de contaminants

Il existe une relation entre la bobine émettrice et les deux bobines réceptrices. L'excitation de cette dernière par un courant variable dans le temps donne naissance à un voltage induit dans les deux bobines réceptrices et par la suite à une force électromotrice. L'interaction entre les bobines est effectuée en traitant les deux bobines réceptrices comme deux bobines séparées. Par la suite, le voltage différentiel induit est exprimé dans la relation (2.6) ;

$$V = V1 - V2 \quad (2.6)$$

Dans cette relation, V1 et V2 sont les voltages induits respectivement dans la première et la deuxième bobine. Ces dernières sont montées de manière inverse dans le but d'avoir un courant résultant nul en l'absence des contaminants.

Notre but ultime est d'obtenir un détecteur de métaux dont la bobine émettrice contient un nombre de spires élevé et est de courte longueur. Il est préférable aussi d'avoir des bobines réceptrices qui contiennent un nombre de spires élevé tout en augmentant le changement dans le champ magnétique (augmentation de la fréquence d'excitation). L'inductance des deux types de bobines (émettrice et réceptrice) doit être minimale, ceci est atteint par une diminution du nombre de spires, de la perméabilité, de la section et de la fréquence.

#### 2.3.5. Contaminant dans un détecteur à trois bobines équilibrées

Pour étudier l'apparition d'un contaminant métallique dans un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées, il faudra assimiler le dispositif à un dipôle. Ainsi, pour chacune des bobines réceptrices, la fonction réponse suit la loi suivante (relation 2.7) ;

$$V = \frac{i\omega\mu_0}{IR} \vec{H}_R * \vec{M} * \vec{H}_T \quad (2.7)$$

$\vec{H}_R$  et  $\vec{H}_T$  sont les champs magnétiques respectivement induits dans une bobine réceptrice et une bobine émettrice. La fonction réponse dépend de la perméabilité du milieu  $\mu_0$ , de l'intensité du courant  $I$  et de la fréquence d'excitation  $f$ .

Dans le cas d'une géométrie sphérique, la fonction réponse est décrite dans la relation (2.8) ;

$$M = -2 * \pi * a^3 * (x_n + iy_n) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Cette réponse dépend de la forme du contaminant. D'après la relation (2.8), la forme sphérique possède le tenseur unitaire et la fonction réponse dépend aussi de la taille du contaminant, de la perméabilité  $\mu$  et de la conductivité et la fréquence.

La fonction complexe  $(x_n + iy_n)$  dépend des propriétés magnétiques du contaminant et de sa taille (Zhao et al., 2014).

## 2.4. Réalisation d'un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées

### 2.4.1. Description du système

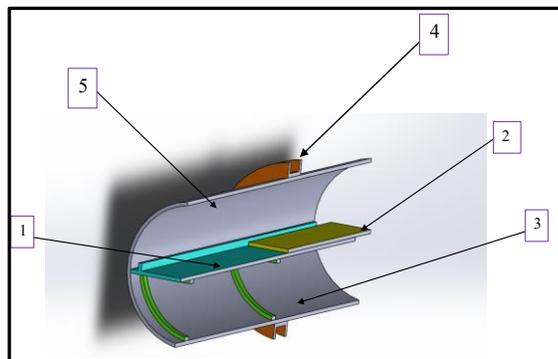
Les détecteurs de métaux ont donné des résultats satisfaisants en termes de détection des contaminants métalliques dans les chaînes de production. Ces derniers ne présentent aucun impact sur la santé humaine. Ils sont faciles à implanter dans une chaîne de production grâce à différentes formes de bobines disponibles commercialement.

Selon la littérature, aucune évaluation pour ce type de détecteur n'est faite pour l'industrie de bois. À côté de cela, le même dispositif est souvent utilisé pour la décontamination des diélectriques, par exemple son application dans l'industrie agroalimentaire.

L'approche suivie est une tentative de conception et de réalisation d'un prototype détecteur de métaux à trois bobines équilibrées pour évaluer son potentiel à décontaminer le matelas en bois. L'intérêt de cette section porte aussi sur le choix des solutions technologiques et la réalisation du dispositif de détection. Le système recherché contient trois bobines équidistantes et coaxiales, de plus, son ouverture peut être carrée ou cylindrique. L'obtention des différentes parties du détecteur est réalisée à l'aide d'une imprimante tridimensionnelle. L'étude englobe l'optimisation des paramètres des bobines tels que : le nombre de spires, la longueur, la distance entre les différents composants et les solutions techniques qui assurent la co-axialité de ces derniers. Une analyse des paramètres d'alimentation (fréquences d'excitation) sera aussi détaillée. De plus, une étude des systèmes permettant la récupération des résultats et l'amplification des signaux sera introduite dans cette section.

#### 2.4.2. Conception du dispositif expérimental

Pour pouvoir réaliser le montage, une conception « SolidWorks » d'un support de bobine et d'un bloc de glissement est réalisée (Figure 2.8). Le bloc de glissement contient un support plateau (1), un plateau (2) et deux supports (3). Le guidage en translation du plateau est fait par le biais d'une forme en U dans le porte-plateau. L'ajout d'un tube cylindrique est nécessaire afin d'assurer la co-axialité des bobines et pour maintenir le plateau au centre des bobines.



**Figure 2.8** : Conception SolidWorks pièces d'un détecteur à trois bobines équilibrées

Le Tableau 2.2 présente la nomenclature du détecteur de métaux ainsi que la fonction de chaque pièce présentée dans le dessin 3D.

**Tableau 2.2** : Nomenclature du détecteur de métaux

<b>Numéro de la pièce</b>	<b>Nom</b>	<b>Nombre de composants</b>	<b>Fonction</b>
<b>1</b>	Porte-plateau	1	Permet le glissement de la pièce 2
<b>2</b>	Plateau	1	Représente le plateau de matelas en bois
<b>3</b>	Support	2	Permet la fixation de la pièce 1
<b>4</b>	Support bobine	3	Permet l'enroulement du fil dans la cavité
<b>5</b>	Tube cylindrique	1	Assure la co-axialité des bobines

#### 2.4.3. Matériels utilisés pour la réalisation du détecteur de métaux à trois bobines équilibrées

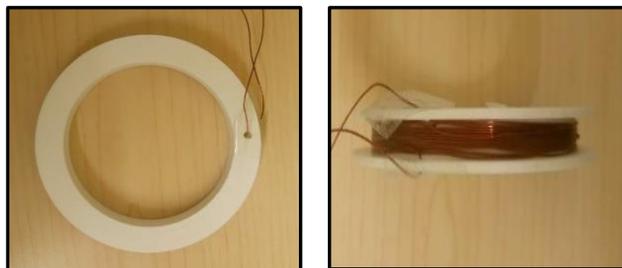
Les pièces du détecteur ont été réalisées avec une imprimante tridimensionnelle (Figure 2.9). En effet, l'imprimante est liée à un ordinateur et avec le logiciel « Print Studio », elle superpose les plans du polymère fondu jusqu'à l'obtention de la pièce finale à partir des modèles « SolidWorks ». Cette imprimante est constituée d'une tête

d'extrusion unique, la température du polymère lors de son écoulement est de l'ordre de 230 °C. Elle superpose des couches de 4 mm d'épaisseur. Ce type d'imprimante écologique ne fonctionne qu'avec un fil de polymère PLA, qui est un polymère biodégradable, provenant d'une source renouvelable.



**Figure 2.9** : Réalisation du détecteur à trois bobines équilibrées

Un fil en cuivre de type 24AWG de diamètre 0,5 mm est enroulé manuellement sur les supports imprimés pour obtenir la bobine finale (Figure 2.10). La bobine émettrice contient 25 tours de fil et chacune des deux bobines de détection contient 10 spires.



**Figure 2.10** : Enroulement manuel des fils 24 AWG manuellement autour des supports-bobine imprimés en 3D

L'enroulement est fait manuellement de telle sorte à garantir la plus courte longueur de bobine pour la bobine émettrice (pour avoir un courant plus important). Les 10 spires des bobines émettrices sont étalées pour augmenter sa longueur. Le choix du nombre

de spires est fait de sorte à garantir un courant élevé dans la bobine émettrice et pour favoriser la haute sensibilité de détection. Les deux bobines réceptrices qui sont enroulées de la même manière possèdent respectivement une inductance de l'ordre de 12,3 et 11,8  $\mu\text{H}$ . La bobine émettrice possède une inductance de l'ordre de 86,6  $\mu\text{H}$ .

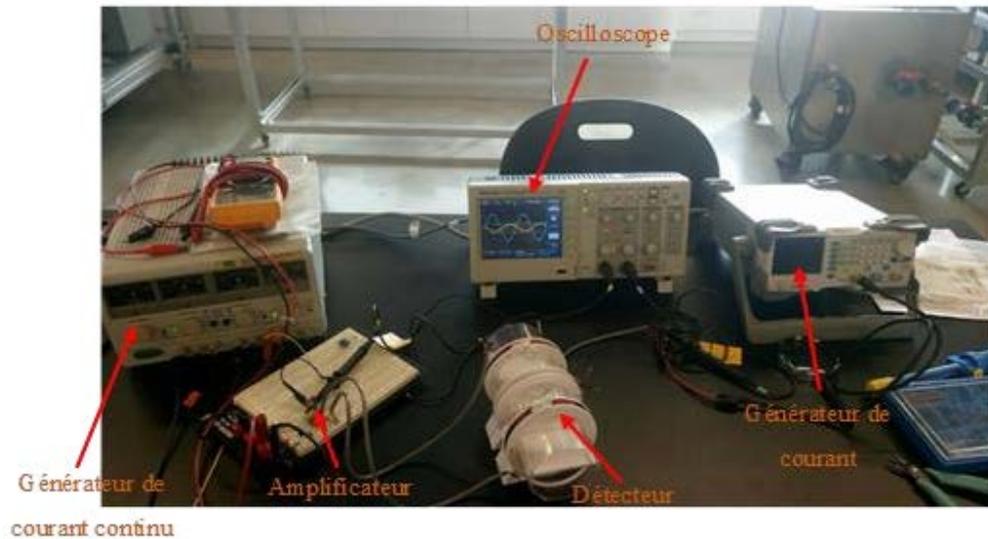
La co-axialité des trois bobines est assurée par un tube transparent qui permet le contrôle visuel des échantillons. Le diamètre du tube est de l'ordre de 71 mm. Le jeu entre le tube et les supports de bobines est rattrapé avec des cales calibrées pour rendre les bobines réceptrices symétriques par rapport à celle de l'émission. La Figure 2.11 montre les pièces imprimées en trois dimensions. Les bobines sont équidistantes de 2,5 cm.



**Figure 2.11** : Détecteur de métaux conçu avec une imprimante 3D et contient une bobine émettrice (au centre) et deux bobines réceptrices

#### 2.4.4. Alimentation du détecteur

Le montage ci-dessous montre l'alimentation du détecteur (Figure 2.12). Le générateur de courant alternatif permet d'avoir un champ électrique variable pour avoir plus de courant dans la bobine émettrice. Un amplificateur différentiel de type « AD8421ARZ-ND » permet de calculer la différence entre le voltage des deux bobines réceptrices. L'annexe (A) présente les schémas du cahier de charge pour réaliser un montage avec un gain égal à 6.



**Figure 2.12 :** Alimentation de la bobine émettrice avec un générateur de courant alternatif et visualisation de la soustraction des signaux des deux bobines réceptrices avec un amplificateur différentiel

Le montage contient un générateur de courant continu de type « RigolDp 832 » qui favorise l'alimentation de l'amplificateur différentiel de type « AD8421ARZ-ND » à 15 V. Un oscilloscope « Tektronix TDS 2012B » permet la visualisation des deux courbes. La première courbe représente le signal à l'entrée (celui du générateur alternatif) et la deuxième représente la différence entre les deux bobines réceptrices (à la sortie de l'amplificateur). En outre, toutes les données des courbes visualisées sur l'oscilloscope sont enregistrées sur des fichiers « .csv » pour qu'ils soient traités par la suite avec le logiciel « Matlab » (Annexe (B)).

### 2.5. Détection des contaminants métalliques avec un détecteur de métaux

Le Tableau 2.3 résume le protocole suivi pour la validation d'un modèle de détecteur de métaux qui peut servir à la détection des contaminants métalliques dans les matelas en bois. En effet, la réponse de l'amplitude représente le maximum d'un signal sinusoïdal enregistré à la sortie de l'amplificateur différentiel.

La réponse de déphasage est celle entre le signal de la source (signal à la bobine émettrice) et le signal à la sortie de l'amplificateur différentiel. Les contaminants utilisés pour la variation de la fréquence, de la taille et de la forme sont : un échantillon en acier qui admet un diamètre de 23,5 mm et un échantillon en laiton de géométrie complexe, avec une base d'hexagone de côté 17 mm et de longueur 50 mm. Les contaminants utilisés pour la variation de la taille sont deux échantillons en acier de diamètres respectifs : 23,5 et 12,6 mm. Le contaminant utilisé lors de l'ajout de bois est un écrou 7/16 analysé en premier lieu à vide, puis incorporé en deuxième lieu dans un petit matelas en bois de dimension 5 \* 5 cm.

La réalisation est étudiée à l'échelle du laboratoire pour un mini matelas en bois (Figure 2.11). Pour toutes les analyses qui suivent, la réponse du détecteur de métaux en l'absence des contaminants est prise en considération. Cette réponse est considérée comme réponses erronées et soustraites des réponses électromagnétiques pour les réponses d'amplitude et de déphasage (Annexe (C)). En effet, la réponse doit être nulle en l'absence du contaminant ce qui n'est pas possible pour les cas réels parce qu'il existe des problèmes d'alignement ou d'équidistance entre les trois bobines.

**Tableau 2.3** : Protocole expérimental suivi

Paramètres	Fréquence	Taille	Forme	Matériaux	Ajout du bois
<b>Échantillon</b>					
<b>Amplitude</b>	X	X	X		X
<b>Déphasage</b>				X	

### 2.5.1. Analyse de l'amplitude à la sortie de l'amplificateur différentiel

#### a. Étude de la variation de la fréquence sur la réponse d'amplitude

Deux contaminants ont été utilisés pour cette expérience. Le premier est de type acier, de géométrie sphérique et de diamètre 23,5 mm et le second est en laiton, avec une géométrie complexe avec une base d'hexagone de côté égale à 17 mm et une longueur 50,2 mm (Figure 2.13).



**Figure 2.13 :** Contaminants utilisés pour la variation de fréquence

La pénétration du champ électromagnétique dans les contaminants métalliques dépend de l'épaisseur de peau estimée avec la formule théorique suivante :

$$\delta = 1/\sqrt{\pi * f * \mu * \sigma} \quad (2.9)$$

Dans cette relation,  $f$  représente la fréquence d'excitation de la bobine émettrice,  $\mu$  est la perméabilité magnétique et  $\sigma$  est la conductivité électrique du milieu. La nuance exacte des contaminants utilisés pour cette expérience est non reconnue. Les contaminants sont censés posséder les propriétés magnétiques présentées dans le Tableau 2.4.

**Tableau 2.4** : Propriétés magnétiques des contaminants étudiés

<b>Matériaux</b>	<b>Conductivité électrique (<math>10^7</math> S/m)</b>	<b>Perméabilité magnétique (H/m)</b>
<b>Laiton</b>	1,5	1
<b>Acier</b>	0,63	150

La réponse correspond à l'amplitude enregistrée à la sortie de l'amplificateur différentiel avec une variation de fréquences. Les contaminants sont placés au centre de la bobine réceptrice et la réponse d'amplitude est enregistrée à trois fréquences respectives ; 400, 600 et 700 kHz. L'échantillon en laiton sera orienté de telle sorte que son axe soit perpendiculaire à l'axe du détecteur (ligne passante par les centres des trois bobines).

b. Étude de la variation de la forme du contaminant sur l'amplitude

Les contaminants utilisés pour cette expérience sont les mêmes utilisées pour la variation de la fréquence.

L'expérience consiste à enregistrer les réponses d'amplitude pour les échantillons pour 11 positions différentes en les déplaçant sur l'axe du détecteur. L'objectif est l'étude de l'influence de la forme sur la réponse électromagnétique d'amplitude avec une variation de la position du contaminant par rapport à la bobine émettrice. Cette dernière est excitée à 400 kHz et le centre du détecteur est confondu avec le centre de la bobine émettrice dont on distingue des positions de détection positives et négatives. La première réponse enregistrée est celle en l'absence du contaminant, elle sera considérée comme erronée et soustraite de tous les résultats obtenus.

c. Étude de la variation de la taille sur l'amplitude

Les échantillons utilisés sont de type acier, de géométrie sphérique et de diamètres respectifs ; 23,5 mm et 12,6 mm (Figure 2.14). L'objectif de l'expérience est d'étudier l'influence de la taille sur les résultats électromagnétiques d'amplitude à fréquence constante de l'ordre de 400 kHz.



**Figure 2.14** : Contaminants utilisés pour la variation de la taille

L'analyse consiste à enregistrer l'amplitude à la sortie de l'amplificateur différentiel pour 11 positions en passant par l'axe du détecteur. Le centre de la bobine émettrice est considéré à la fois comme origine du repère et centre du détecteur. La première réponse enregistrée est celle en l'absence du contaminant et sera considérée comme erronée et soustraite de tous les résultats.

En ce qui a trait à une deuxième évaluation de la même expérience, les réponses ont été enregistrées pour trois contaminants dont les positions sont confondues avec le centre d'une bobine émettrice. En effet, cette réponse représente l'amplitude maximale.

Un échantillon en acier, sphérique et qui possède une taille plus importante que les contaminants utilisés, n'est pas disponible. Par conséquent, la réponse du laiton au centre d'une bobine émettrice est évaluée à 400 kHz.

### 2.5.2. Déphasage entre le signal d'entrée-sortie de l'amplificateur différentiel

Les échantillons utilisés pour cette expérience sont les échantillons en acier et l'échantillon en laiton (échantillons utilisés pour la variation de la fréquence). L'objectif de l'expérience est d'étudier la possibilité de différencier deux matériaux qui possèdent des propriétés magnétiques différentes (deux types de matériaux : ferromagnétique et paramagnétique) en se basant sur le déphasage du signal à la sortie de l'amplificateur et de la source (signal dans la bobine émettrice). L'expérience consiste à enregistrer les réponses de déphasage en suivant les 11 graduations et tout en le déplaçant sur la ligne passante des centres des trois bobines.

### 2.5.3. Analyse de l'incorporation du bois sur les résultats électromagnétiques

L'échantillon utilisé pour cette expérience est un écrou commercial M10. Ce dernier est analysé en premier lieu sans bois. Ensuite, il est incorporé dans un petit panneau à lamelles orientées de dimension 5\*5 cm (Figure 2.15).



**Figure 2.15 :** Analyse des réponses du détecteur de métaux en présence du bois

L'analyse consiste à enregistrer les réponses d'un écrou 7/16 une fois sans bois et une autre fois incorporée dans un petit panneau. Les 11 réponses obtenues sont enregistrées en déplaçant le contaminant sur l'axe du détecteur. De même, la première réponse enregistrée est celle en l'absence du contaminant, elle sera considérée comme erronée et soustraite du reste des résultats.

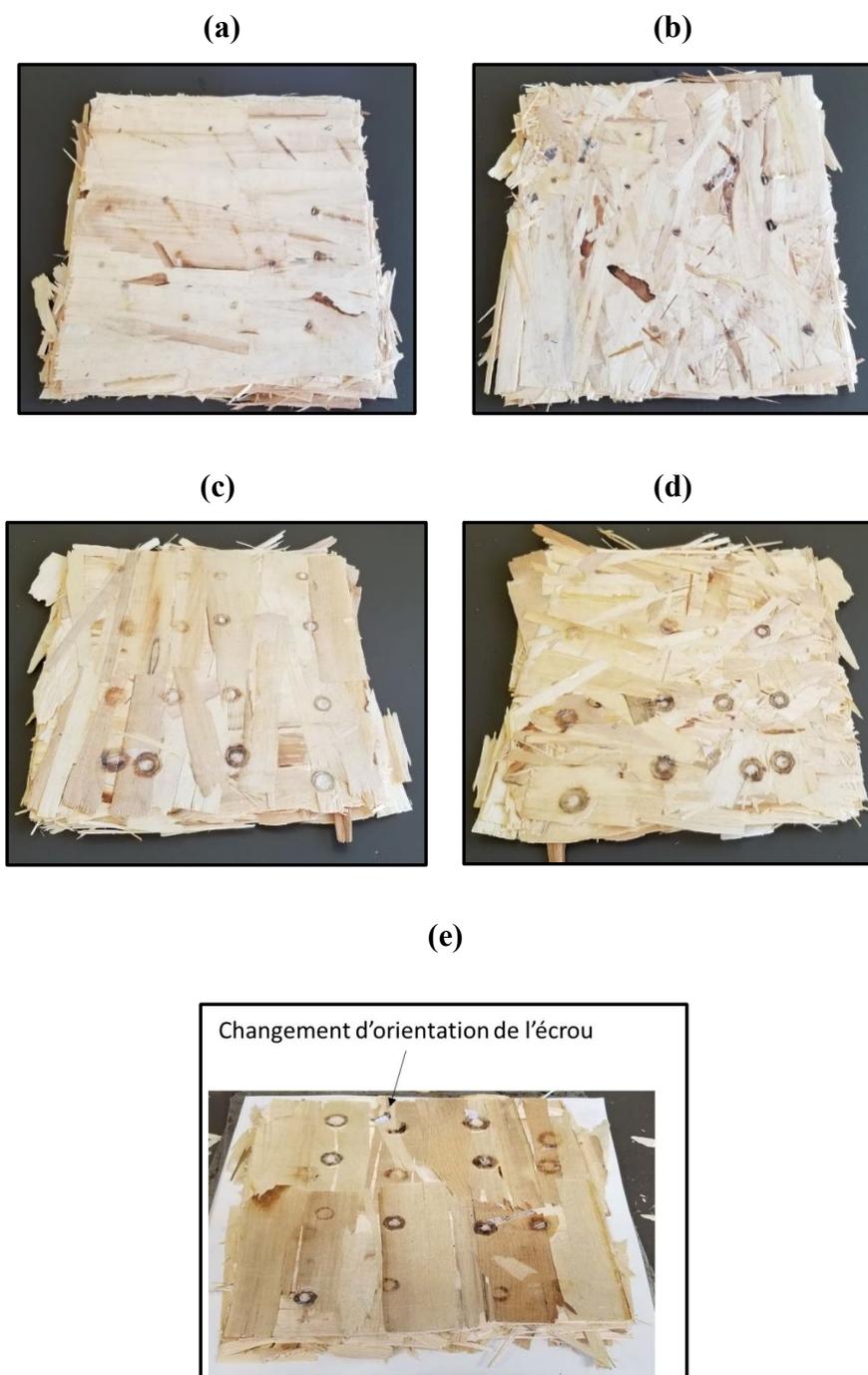
## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats de détection des intrus métalliques provenant de différentes approches soit : par une caméra thermique, par caractérisation physico-chimique et par un détecteur de métaux à trois bobines équilibrées.

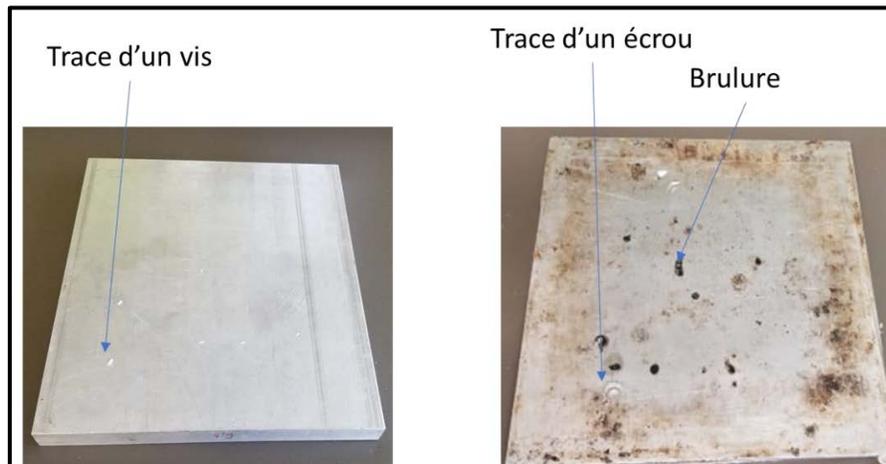
#### 3.1. Caractérisation visuelle des panneaux contaminés

La Figure 3.1 montre le résultat du pressage des panneaux à lamelles orientées contaminées avec des vis et des écrous. Des brûlures sont observées sur tous les échantillons dans les zones de contaminations. L'apparition de ces brûlures est indépendante de la profondeur, de la forme, ou de la taille des corps étrangers intrus. Plus précisément, les plus petites vis incorporées dans les couches les plus profondes sont à l'origine de défauts de surface. Par ailleurs, une diminution de l'intensité de la brûlure lorsque le contaminant est profond par rapport à la surface est observée sur la même figure. Ces résultats sont valides pour le plus mince produit commercial de Norbord (épaisseur de l'ordre de 11 millimètres). Ceci vient s'accorder avec l'étude de Suhr et al. (2015) qui mentionne que l'existence des contaminants métalliques dans le matelas est à l'origine de brûlures à la surface (sans passer par des protocoles expérimentaux). La même Figure 3.1 montre que la variation de la forme des contaminants n'empêche pas l'apparition de ces défauts.



**Figure 3.1** : Défauts de surface créés par les contaminants métalliques

Lors de cette expérience, l'orientation du contaminant a changé lors du pressage (Figure 3.2). Ce changement d'orientation a affecté la rugosité des plateaux (Figure 3.1). Par conséquent, les contaminants qui sont les plus néfastes aux équipements sont à la fois, les plus volumineux et les plus proches des plateaux de la presse. De plus, les contaminants dont l'orientation a changé et qui ont lors du pressage un côté supérieur à la distance entre les deux plateaux peuvent créer des dégâts matériels. Ces résultats s'accordent avec l'étude de Lesar et al. (2018) qui mentionne que l'apparition des contaminants augmente le risque de détérioration des équipements de mise en forme.



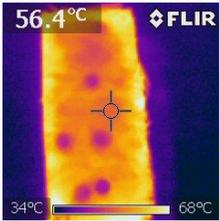
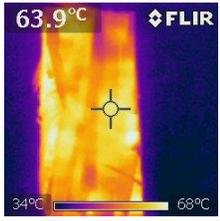
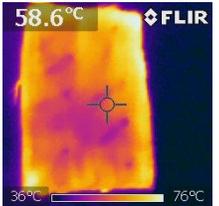
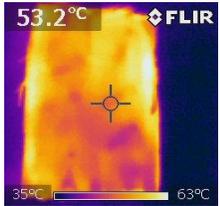
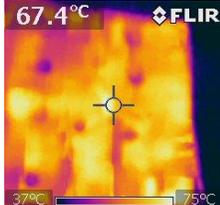
**Figure 3.2** : Endommagement des plateaux protecteurs

### 3.2.Caractérisation des panneaux avec une caméra thermique

Le Tableau 3.1 présente les images thermiques des trois échantillons analysés avec la caméra thermique. En effet, pour les différents panneaux les contaminants existent à différentes profondeurs, seuls les contaminants qui sont proches de la surface sont détectés pour les deux faces. Autrement, la thermographie infrarouge présente la limite de pénétration dans le bois. De plus, l'épaisseur des produits étudiée ne dépasse pas les 11 millimètres (panneau mince) ce qui prouve que le problème persiste pour les produits plus épais.

En comparant les imageries des panneaux contaminés avec des écrous et ceux contaminés avec les vis, il est clair que la technique permet de donner une idée sur la géométrie du contaminant ainsi que sur sa localisation. Cependant, elle ne permet pas de savoir la nature de son matériau à partir des images résultantes. En se basant sur les mêmes résultats du Tableau 3.1, une carte de la distribution de la densité est observée pour les produits inspectés. Probablement, le coefficient d'émissivité dépend de la densité pour le cas du bois. En outre, la thermographie peut être implantée pour des mesures de densité en temps réel de production. L'étude de Aderhold et al. (2010) mentionne que la pénétration présente une limite de la thermographie infrarouge appliquée sur le bois. À côté de cela, l'étude de López et al. (2013) a appliqué les imageries thermiques pour des estimations de la densité du bois.

**Tableau 3.1 : Imagerie infrarouge des panneaux contaminés**

Échantillon	Face 1	Image-FLIR	Face 2	Imager-FLIR
1				
2				
3				

### 3.3. Caractérisation physico-chimique

#### 3.3.1. Caractérisation de la chimie de surface des zones brûlées

Afin de compléter l'analyse visuelle, une analyse avec l'infrarouge à transformée de Fourier est effectuée. En effet, le bois est reconnu à partir des pics caractéristiques (Tableau 3.2), ces derniers présentent des vibrations ou des étirements au niveau des groupes fondamentaux dans la lignine, la cellulose ou l'hémicellulose. Pour le bois, un seul pic présente à la fois une vibration dans la cellulose et l'hémicellulose pour certains étirements (Tableau 3.2).

À partir des courbes de l'analyse infrarouge présentée dans la Figure 3.3, la réponse d'une zone brûlée est semblable à celle du bois. Néanmoins, l'unique différence se manifeste autour du pic de 2893 et 2970  $\text{cm}^{-1}$ .

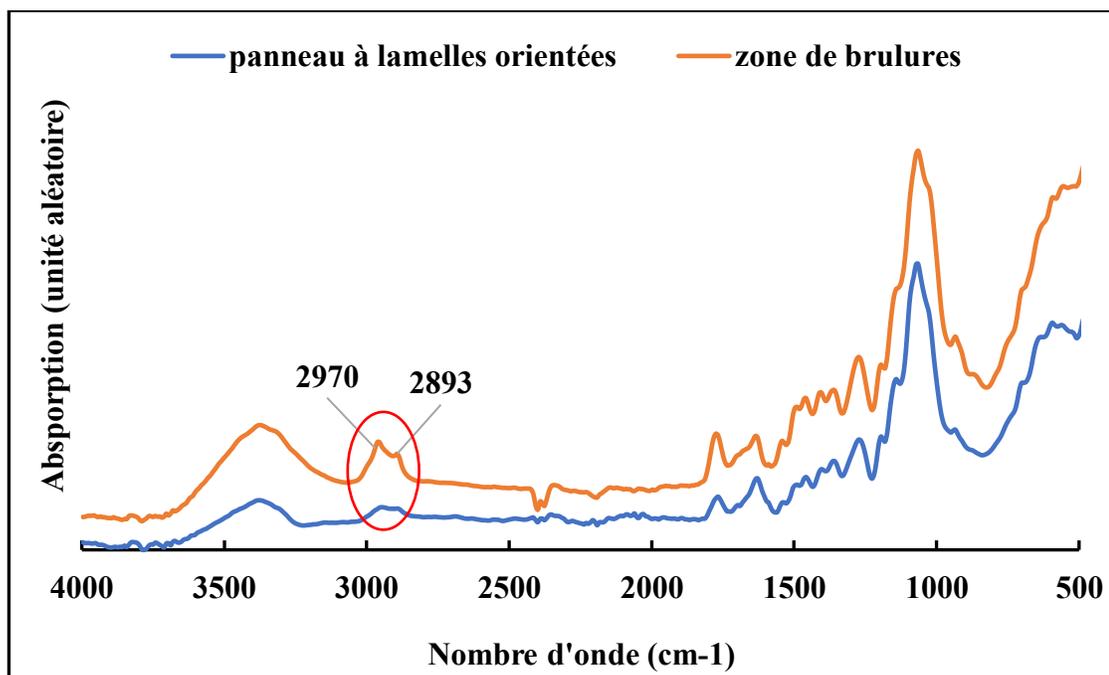


Figure 3.3 : Caractérisation de la chimie de surface des zones brûlées

**Tableau 3.2** : Analyse de la courbe FTIR du bois (Müller 2008 ; Soucy *et al.* 2016 ; El Marouani *et al.*, 2017)

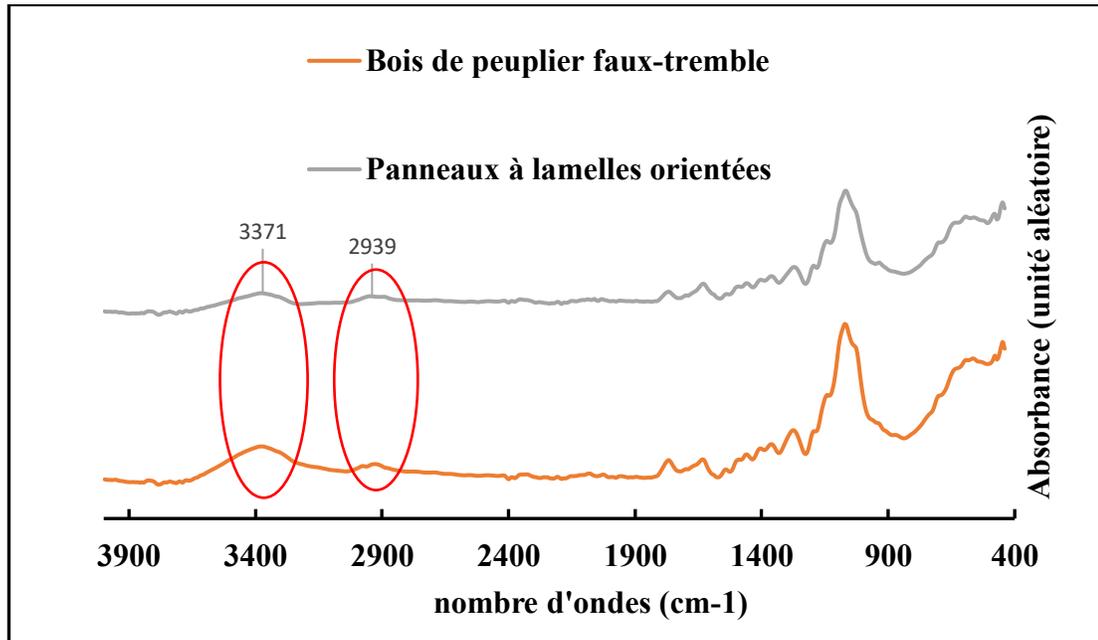
<b>Nombre d'onde</b> <b>cm<sup>-1</sup></b>	<b>Liaisons et groupements fondamentaux</b>
<b>3350</b>	Étirement de O-H dans la cellulose, la lignine et les extractives
<b>2900</b>	Étirement de C-H dans la cellulose, la lignine et les extractives
<b>1732</b>	Liaison C-O
<b>1649</b>	Vibration aliphatique de la lignine
<b>1593</b>	Vibration aromatique de la lignine
<b>1505</b>	Déformation dans la lignine
<b>1460</b>	Déformation dans la lignine
<b>1424</b>	Déformation de O-H dans la Holo cellulose
<b>1372</b>	Déformation dans le plan de C-H dans la Holo cellulose
<b>1235</b>	C= étendue dans la lignine et le xylène
<b>1157</b>	Vibration de C-O-C dans l'Holo cellulose
<b>1122</b>	C-O étendu et vibration de C-O dans cellulose
<b>1031</b>	Déformation de C-O dans la Holo cellulose

En effet, la courbe de la zone brûlée possède des valeurs plus élevées autour de ces pics. Ceci peut être expliqué par le fait que les zones de brûlures ont subi une purification.

Les brûlures à la surface conduisent à une rupture des liaisons O-H qui sont présentes à la fois à la surface et au niveau de la zone affectée, ce qui conduit à des pics plus importants dans la zone concernée résultantes de la liaison C-H. Notamment, les études de Emandi et al. (2011) et Mwaikambo et al. (2002) mentionnent que les pics autour de ces zones sont peut-être liés à un étirement dans la liaison C-H.

### 3.3.2. Caractérisation de chimie de surface du peuplier faux-tremble et du produit commercial

La Figure 3.4 montre la différence entre les spectres mi - infrarouge du peuplier faux-tremble et d'un panneau à lamelles orientées commercial. L'objectif de cette comparaison est l'analyse des différences que la résine et les additifs peuvent créer. La résine utilisée pour les panneaux à lamelles orientées est l'isocyanate et seulement, une légère différence est observée entre le spectre du bois du peuplier faux-tremble et celui du produit commercial. La différence se manifeste autour des pics 3371 et 2939  $\text{cm}^{-1}$  qui sont liés principalement aux étirements C-H et O-H (El Marouani et al., 2017). En effet, le pressage à chaud des panneaux a engendré une évaporation de l'eau à la surface. D'ailleurs, le temps rapide de pressage ne change pas la chimie de surface du panneau par rapport à celui du peuplier faux-tremble. Effectivement, le panneau à lamelles orientées peut contenir une résine caractérisée par son pic intrinsèque à l'ordre de 1500  $\text{cm}^{-1}$ , à cause des groupements chimiques qu'elle contient (Burkhard Plinke et al., 2010). Ces pics ne sont pas visibles sur la Figure 3.4 parce que les couches de surface contiennent moins de résine par rapport aux couches de centres du panneau.



**Figure 3.4 :** Spectre infrarouge du peuplier faux-tremble et des panneaux à lamelles orientées

### 3.3.3. Caractérisation de la chimie de surface des contaminants métalliques

L'aluminium est le premier contaminant sélectionné pour cette analyse. Les résultats de l'excitation de la surface du matériau avec un faisceau infrarouge sont présentés sur la Figure 3.5. En effet, ce matériau est très réactif, il est oxydable naturellement au contact de l'air atmosphérique. De plus, la surface du matériau est recouverte immédiatement d'une mince pellicule d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) amorphe, même pour les aluminiums fraîchement décapés (Landolt, 1993). En effet, l'analyse infrarouge de l'aluminium est celle de la couche ( $Al_2O_3$ ) qui se trouve à la surface. De manière générale, le développement de la couche d'oxyde à la surface des métaux est une propriété physique des matériaux métalliques et l'exception des matériaux nobles, notamment, l'or (Yang et al., 2017).

Les pics autour de  $453-548\text{ cm}^{-1}$ ,  $480-482\text{ cm}^{-1}$  et  $524\text{ cm}^{-1}$  sont ceux représentatifs de l'oxyde de l'aluminium présent à la surface. Très peu d'études ont évalué ce matériau

avec la technique du proche infrarouge. Ces pics sont déduits des travaux de Kannmori et al. (1967) et Sheibley et al. (1966). On note l'apparition d'un nouveau pic important autour de 667-673  $\text{cm}^{-1}$  sur le même spectre de l'aluminium. La recherche de Peys et al. (2017) mentionne que la bauxite, qui est composée essentiellement d'oxyde d'aluminium, possède un pic entre 600 et 700  $\text{cm}^{-1}$  sous excitation infrarouge.

La Figure 3.6 montre les spectres FTIR des contaminants à base de l'acier. Effectivement, le pic qui représente l'oxyde de fer est difficile à détecter. Cet oxyde est représenté par un pic autour de 410  $\text{cm}^{-1}$  et cette zone du nombre d'onde présente une interférence entre le proche et le lointain infrarouge.

Un pic important est observé autour de 472  $\text{cm}^{-1}$  pour l'échantillon corrodé. Ce pic représente l'oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui provient de la réaction de l'oxydation de la surface. De plus, plusieurs matériaux ferreux présentent souvent un traitement de surface (exemple de chromotation) (Dong et al., 2012).

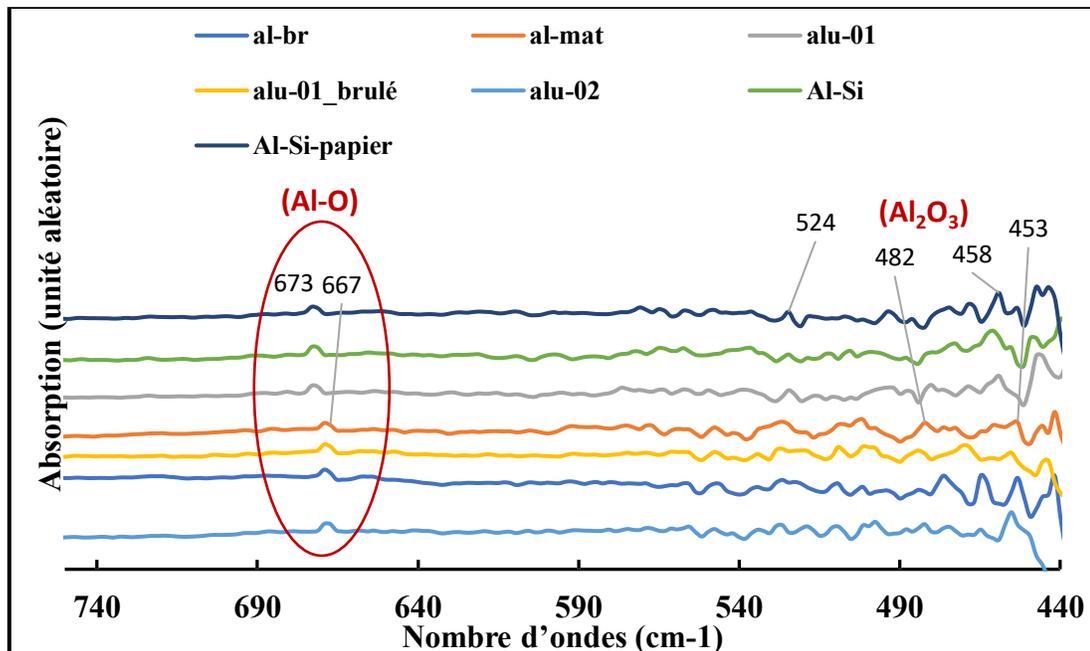
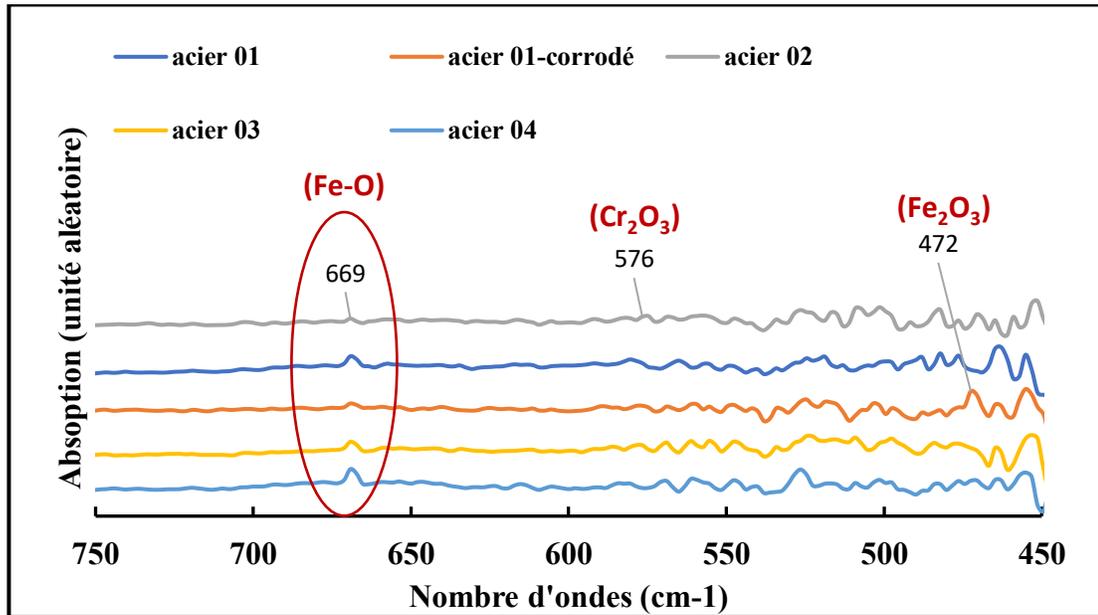


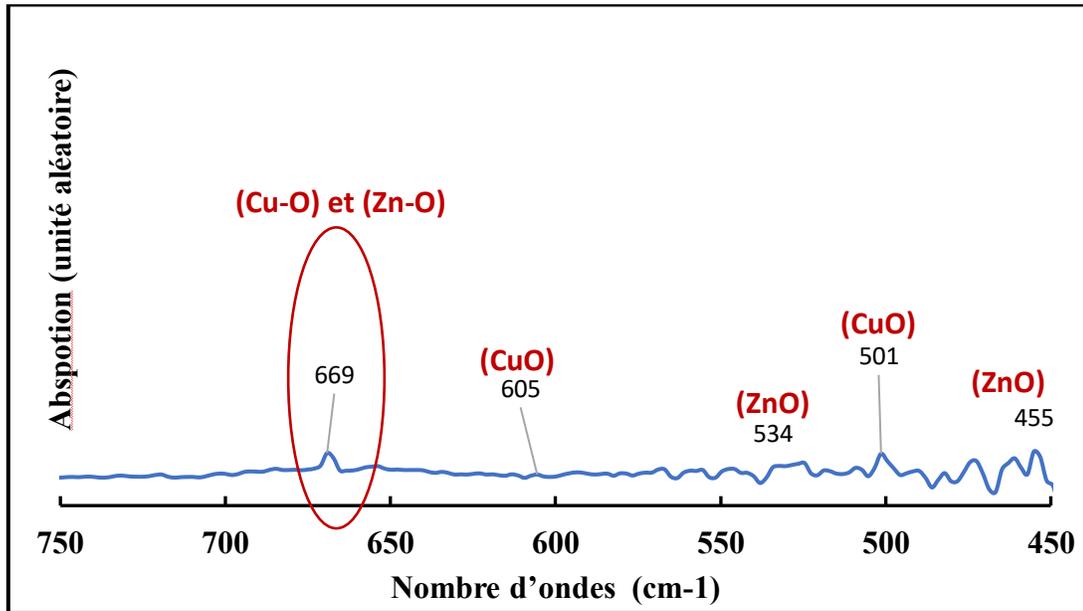
Figure 3.5 : Spectre infrarouge des contaminants à base de l'aluminium



**Figure 3.6 :** Spectre infrarouge des contaminants à base de l'acier

Un pic important est remarqué autour de  $580\text{ cm}^{-1}$ . Celui-ci qui est probablement lié à l'oxyde de chrome ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) (Kannmori et al., 1967) et la conséquence d'un traitement de surface. On note l'apparition d'un nouveau pic important autour de  $669\text{ cm}^{-1}$  sur le même spectre de l'acier.

La Figure 3.7 montre les résultats de l'analyse de la chimie de surface du laiton. Des pics liés à l'oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ) sont observés autour de  $501\text{ cm}^{-1}$  et  $606\text{ cm}^{-1}$ . À côté de cela, des pics qui représentent l'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) sont observés autour de  $455\text{ cm}^{-1}$  et  $534\text{ cm}^{-1}$  (Kannmori et al., 1967). On note l'apparition d'un nouveau pic important apparait autour de  $669\text{ cm}^{-1}$  sur le même spectre de laiton.



**Figure 3.7 :** Spectre infrarouge du contaminant à base du laiton

À partir des différentes analyses des contaminants, une conclusion très importante liée à la détection des intrus métalliques vient d'être prouvée. En effet, les oxydes de métaux possèdent un pic d'absorption autour de  $669\text{ cm}^{-1}$ . Ce pic représente l'absorption de l'oxygène lié à l'oxyde de métaux. À titre d'exemple, la vibration Al-O dans l'oxyde de l'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Il s'agit d'un résultat très important pour l'implantation d'un nouveau lecteur infrarouge répondant aux objectifs de décontamination. Les résultats de l'analyse FTIR des oxydes de métaux sont résumés dans le Tableau 3.3.

Le proche infrarouge est le plus utilisé industriellement pour la détection des contaminants pour le recyclage (Bonifazi et al., 2006 ; Mauruschat et al., 2016 ; Pigorsch et al., 2014). Subséquemment, il est possible d'utiliser cette technique pour la reconnaissance des contaminants métalliques. Par ailleurs, la solution se limite à l'analyse des contaminants qui se trouvent à la surface du matelas en lamelles.

**Tableau 3.3** : Pics caractéristiques des oxydes de métaux sous excitation infrarouge

Oxydes	Pics caractéristiques (cm <sup>-1</sup> )				
	650	600	550	500	450
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	667–673	--	524	480–482	453–458
FeO	669	--	--	--	459
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	--	--	--	472
CuO	669	606	--	501	--
ZnO	669	--	--	534	455
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	--	576-580	--	--

### 3.4. Validation et résultats du détecteur de métaux à trois bobines équilibrées

#### 3.4.1. Résultats de l'amplitude à la sortie de l'amplificateur différentiel

##### a. Étude de la variation de la fréquence sur le résultat d'amplitude

La Figure 3.8 illustre le résultat de la variation de la fréquence sur la réponse du voltage induit dans le détecteur de métaux conçu. En effet, le résultat de l'analyse deux types de contaminants à trois fréquences différentes montre une courbe décroissante pour les deux matériaux.

Le signal résultant à la sortie de l'amplificateur différentiel est la soustraction des voltages induits dans les deux bobines réceptrices et la perturbation que le contaminant a créée dans le champ électromagnétique. Les deux contaminants sont placés exactement au centre d'une bobine réceptrice dans le but d'avoir un signal maximal et

facilement détectable. L'observation d'une variation de fréquence à la sortie de l'amplificateur différentiel signifie que le courant de Foucault a bien été créé à la surface des contaminants. En effet, le champ électrique variable excitant permet la génération d'un champ magnétique variable en fonction du temps. Ce champ créé est à l'origine d'un nouveau champ magnétique, secondaire et variable en fonction du temps. Spécifiquement, le champ magnétique secondaire va générer un voltage induit dans les deux bobines réceptrices.

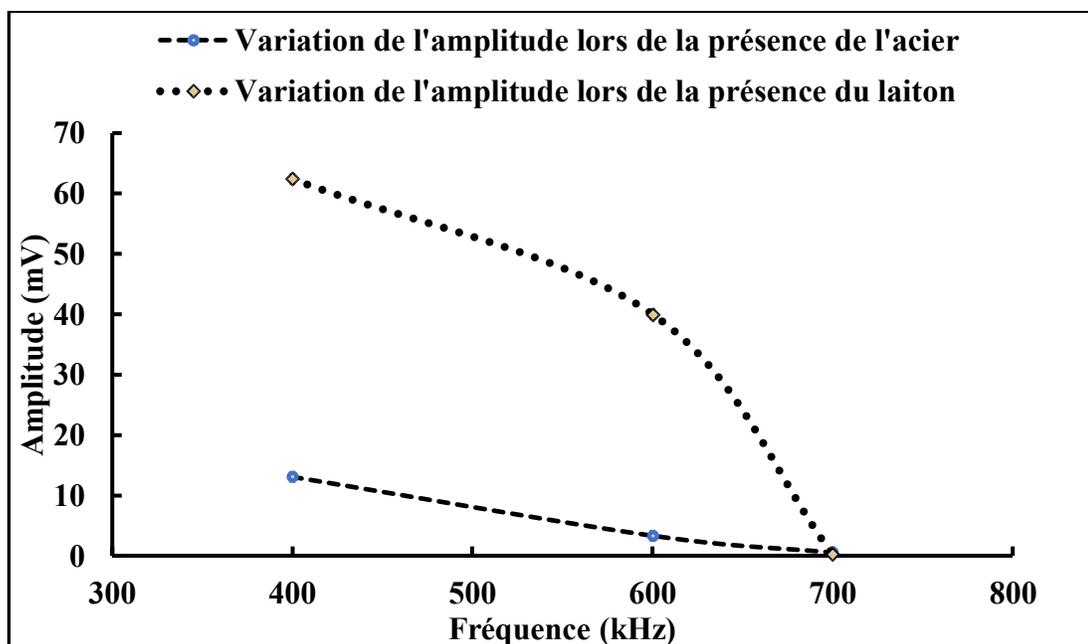
L'étude de Bruschini (2002) mentionne que le champ détecté est le résultat d'un courant de Foucault induit dans les contaminants. Cette diminution du voltage induit est expliquée par deux phénomènes. D'ailleurs, chacune des bobines est caractérisée par une inductance qui est proportionnelle à la fréquence. Par la suite, une augmentation de la fréquence est à l'origine de moins de courant dans la bobine émettrice à cause de l'importante impédance générée d'où la nécessité d'utiliser des circuits résonnants pour les alimentations à haute fréquence. Certaines recherches montrent que l'utilisation des circuits résonnants en série avec la bobine émettrice permet de générer plus de courant dans le dispositif et favorise la diminution de l'impédance des bobines (Hansen et al., 2008).

La Figure 3.9 permet d'expliquer le deuxième phénomène lié à la diminution du voltage induit dans les bobines réceptrices. En effet, lors de l'augmentation de la fréquence, une diminution de l'épaisseur de peau dans les deux contaminants est observée sur la même figure. Cette diminution est expliquée par la relation existante entre le courant de Foucault créé à la surface des contaminants, la fréquence et des propriétés magnétiques des contaminants.

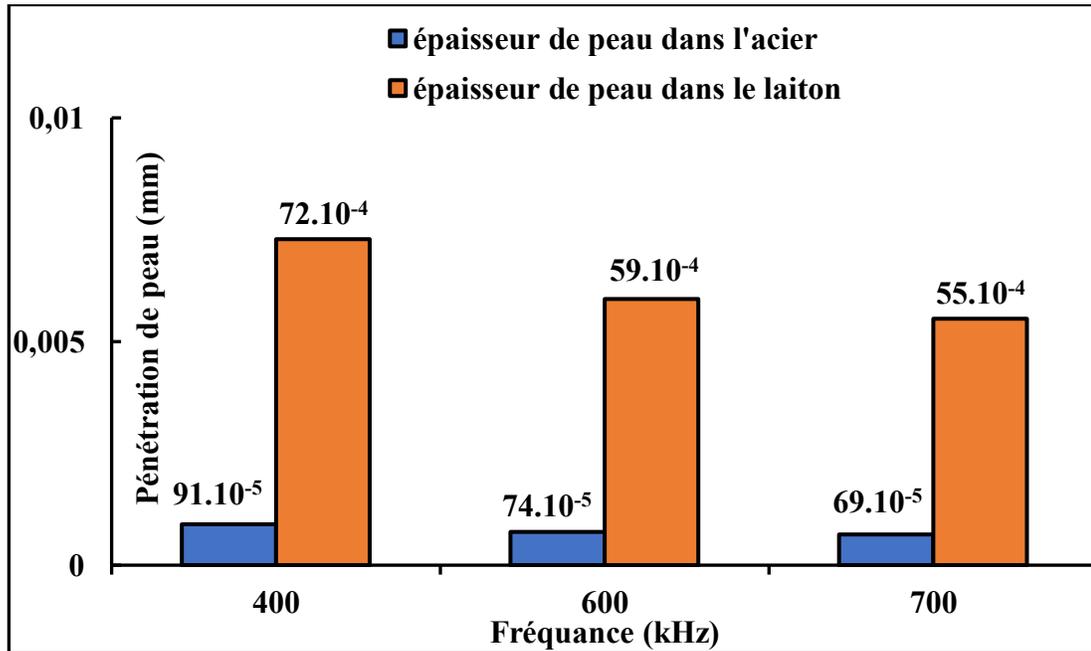
Une excitation à haute fréquence de la bobine émettrice génère moins de courant de Foucault dans les contaminants et par la suite un voltage détecté très faible. De plus, les réponses du laiton sont plus élevées que celles de l'acier. En effet, l'acier a une perméabilité beaucoup plus élevée que celle du laiton, ce qui résulte une pénétration

moins importante que l'acier. Les propriétés magnétiques de l'acier et du laiton utilisés ne sont pas connues. En effet, les propriétés magnétiques (conductivité et perméabilité) des contaminants sont déduites de la littérature (Bruschini, 2002 ; Hansen et al., 2008 ; Zhou et al., 2017).

Afin d'augmenter le niveau de pénétration dans l'épaisseur de peau des matériaux conducteurs, il est recommandé d'utiliser des détecteurs à basse fréquence pour créer un courant de Foucault important dans l'épaisseur de peau des contaminants.



**Figure 3.8 :** Résultats de la variation de la fréquence sur la réponse du voltage induit dans le détecteur de métaux conçu



**Figure 3.9 :** Épaisseur de peau dans les contaminants

Certaines recherches recommandent d'utiliser les détecteurs de métaux à basse fréquence (quelques centaines de kilohertz). À titre d'exemple, l'étude de Zhao et al. (2014) mentionnent que les plus faibles fréquences permettent plus de pénétration dans les matériaux. Afin de faciliter la détection des contaminants avec ce type de détecteur, il est nécessaire de maximiser l'épaisseur de peau et par la suite de minimiser la fréquence ou bien il est recommandé d'ajouter des circuits résonnants pour une fréquence d'excitation donnée. L'utilisation des amplificateurs de puissance est recommandée (tel que celui utilisé dans cette recherche). En effet, ce dernier produit plus de puissance dans la bobine émettrice. La fonction réponse d'amplitude détectée à la sortie de l'amplificateur différentiel est une fonction complexe qui dépend de plusieurs paramètres tels que les propriétés magnétiques.

De plus, les défauts et les concentrations de contraintes existantes dans les matériaux conducteurs d'électricité sont souvent modélisés comme des points de changement de

ces propriétés (perméabilité et conductivité). D'après cela, le dispositif conçu peut servir à détecter les concentrations de contraintes dans les matériaux non diélectriques.

L'étude de Zhou et al. (2017) montre un autre type de détecteur qui prévoit les concentrations de contraintes et les propriétés magnétiques des matériaux. Le détecteur utilisé dans sa recherche n'est pas un détecteur à trois bobines équilibrées. À l'aide de son dispositif, il a cherché à détecter le voltage induit dans les matériaux en variant les contraintes et en analysant l'influence de ce changement sur les résultats du voltage induit. En conséquence, pour les mêmes objectifs de détection des concentrations de contraintes dans les matériaux conducteurs, l'utilisation du détecteur à trois bobines équilibrées est recommandée puisqu'il peut servir à atteindre le même objectif. En effet, cette recherche nécessite une comparaison des réponses du dispositif et des résultats théoriques. De plus, les propriétés magnétiques des contaminants doivent être reconnues pour réaliser cette expérience.

#### b. Étude de la variation de la taille sur le résultat d'amplitude

La Figure 3.10 montre le résultat de la variation de la taille sur les réponses électromagnétiques de l'amplitude. En effet, les deux échantillons analysés sont de type acier et possèdent la même forme sphérique. L'expérience s'est déroulée à fréquence constante. Les deux courbes admettent deux maximums qui coïncident avec les centres des deux bobines réceptrices. Cependant, lors du passage du contaminant par le centre du détecteur, la réponse tend vers une amplitude nulle pour les deux tailles des contaminants. Cette réponse valide le bon fonctionnement du détecteur de métaux à trois bobines équilibrées. En effet, la courbe de réponse différentielle suit une allure qui passe par deux maximums qui coïncident exactement avec le centre des bobines réceptrices et qui s'annulent au centre du détecteur. Les extrémums des courbes sont proportionnels aux diamètres des contaminants sphériques.

Le contaminant sphérique qui possède un diamètre de 23,5 mm admet un maximum de l'ordre de 6 mV pour les graduations négatives. Cependant, celui qui possède 12,6 mm n'atteint que 2 mV.

À partir de la même Figure 3.10, la courbe réponse de l'échantillon qui admet une taille moins importante tend plus vers une symétrie entre les côtés positifs et négatifs du détecteur. En effet, les deux maximums détectés n'admettent pas la même amplitude. Probablement, une augmentation de la taille de l'échantillon engendre moins de symétrie pour les courbes de réponse par rapport au centre du détecteur. Le dispositif de Yamazaki et al. (2002) a entraîné la même perte de symétrie lors de l'augmentation de la taille des contaminants. Pour tous les résultats enregistrés, les contaminants ont été placés sur la ligne passant par le centre des trois bobines. Le détecteur de métaux conçu perd, possiblement, sa précision si les échantillons sont placés loin de l'axe du détecteur (ligne passante par le centre des trois bobines). En effet, une représentation de la courbe tridimensionnelle permettra d'assurer plus de précision lors de l'analyse des résultats. La recherche de Choi (2014) montre un exemple d'une courbe tridimensionnelle enregistrée pour un détecteur à trois bobines équilibrées.

La Figure 3.11 montre la grande dépendance de l'amplitude détectée avec la taille des contaminants. Vu l'indisponibilité d'un autre échantillon en acier sphérique volumineux, un autre contaminant de type laiton qui ne présente ni la même forme ni les mêmes propriétés magnétiques et dont le volume est plus important est ajouté pour cette analyse. Pour tous les résultats enregistrés, les contaminants ont été déplacés sur l'axe du détecteur, qui coïncide avec les centres des trois bobines. De plus, l'expérience s'est déroulée à fréquence constante. À partir de la courbe réponse (Figure 3.11), une courbe croissante est observée. Cette courbe a subi un changement au niveau de sa pente pour les trois échantillons, cela est probablement dû aux propriétés magnétiques ou à la différence de forme des contaminants analysés.

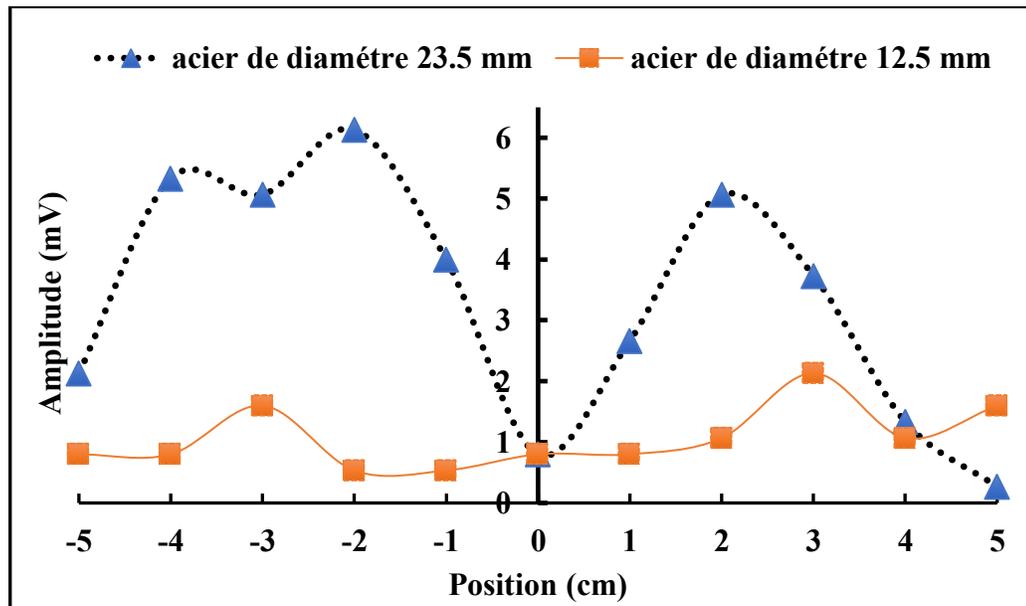


Figure 3.10 : Résultats de la variation de la taille du contaminant en acier sur les réponses électromagnétiques de l'amplitude

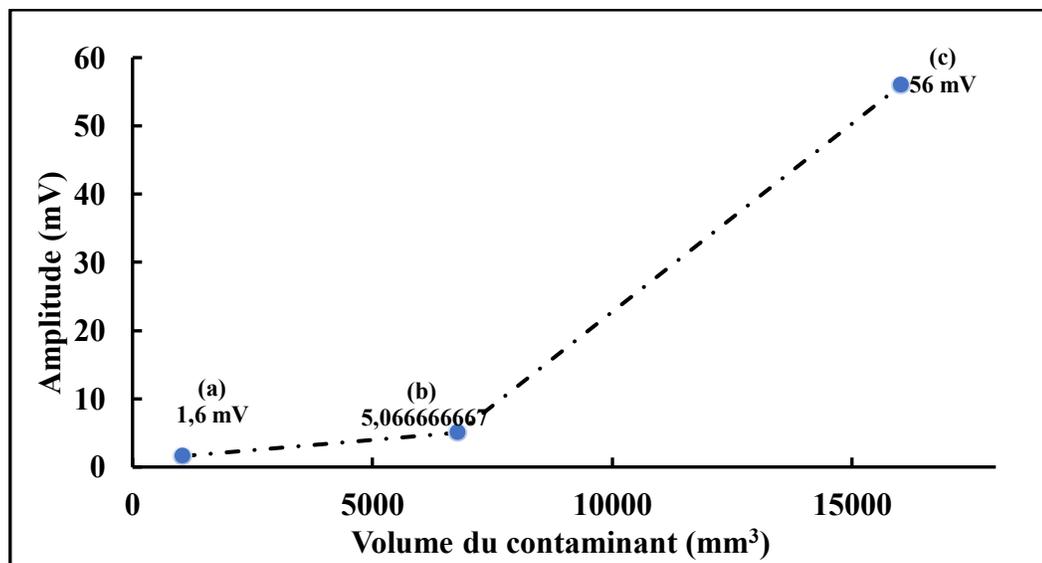


Figure 3.11: Variation de la réponse de l'amplitude au centre de la bobine réceptrice en fonction de la taille (a. sphère en acier de diamètre 12,6 mm, b. sphère en acier de diamètre 23,5 mm, c. forme complexe en laiton- base d'un hexagone de côté 17 mm)

Par conséquent, l'amplitude dépend de la taille des contaminants. Un échantillon de plus grande taille a donc une surface plus importante pour la création du courant de Foucault surfacique. Les signaux les plus intenses sont les plus faciles à détecter.

La recherche de Choi (2014) et Yamazaki et al. (2002) montrent la dépendance entre les résultats de détection de la taille et le volume des contaminants. Cependant, aucune relation n'a été mise en relief entre les résultats enregistrés et les différentes tailles des contaminants. Il en résulte que la prévision de la taille des contaminants à partir des courbes de réponse n'est pas évidente.

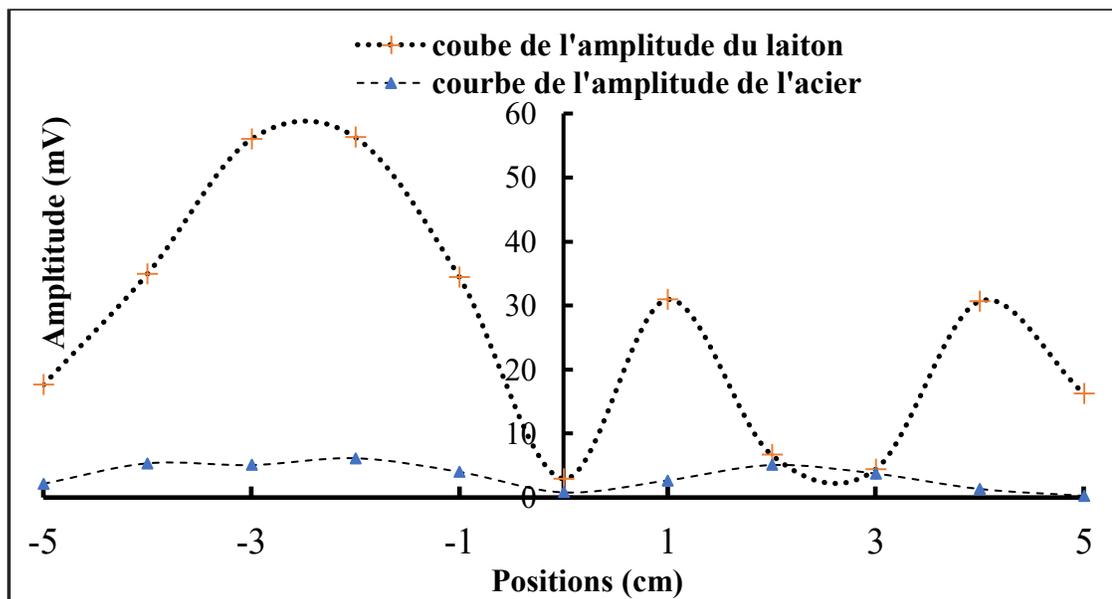
De plus, à partir de la Figure 3.10 et la Figure 3.11, l'échantillon métallique de géométrie sphérique de diamètre 12,6 mm a été détectée. Néanmoins, les résultats enregistrés sont de l'ordre de quelques millivolts. Ces résultats permettent d'aboutir à une première analyse sur la sensibilité du détecteur puisqu'il a pu détecter des petits contaminants. Il faudra noter que cette réponse a été enregistrée en plaçant l'échantillon exactement sur l'axe du détecteur. Il est fort probable que ce même contaminant ne soit pas détecté s'il est placé loin de l'axe du détecteur.

#### c. Étude de la variation de la forme des contaminants sur le résultat d'amplitude

La Figure 3.12 montre la dépendance entre les résultats d'amplitude et la forme des contaminants. En effet, l'analyse de la réponse de l'amplitude pour deux échantillons qui n'ont pas la même forme prouve cette dépendance. À partir de la même courbe, une quasi-symétrie est observée pour le contaminant de type acier. Ce dernier possède une forme sphérique et est de petite taille. En effet, le signal s'annule à la sortie de l'amplificateur différentiel. Ceci s'explique par la forme et la taille du contaminant. L'échantillon de type laiton n'est pas tout à fait un signal nul en passant par le centre du détecteur. À côté de cela, l'échantillon utilisé à une forme très complexe c'est pour cela que la courbe perd sa symétrie.

Le volume important du laiton rend la coïncidence de son centre de gravité avec les graduations du détecteur difficile. Il y a probablement eu des phénomènes d'interférence lors de l'analyse du laiton.

Le modèle théorique de Zhao et al. (2014) prouve que la forme des contaminants agit sur le tenseur multiplié par la fonction réponse. Pour une réponse sphérique, la courbe tend vers une symétrie. Cependant, les géométries non sphériques possèdent des tenseurs non unitaires et la courbe résultante ne tend pas vers une symétrie par rapport au centre du détecteur. La courbe du laiton montre des maximums plus élevés par rapport à l'acier, ceci est dû à la plus grande taille du contaminant paramagnétique. Bruschini (2002) mentionne également le fait que les résultats de l'amplitude dépendent de la forme et de la taille des contaminants.



**Figure 3.12 :** Étude de la variation de la réponse d'amplitude en fonction de la forme des contaminants

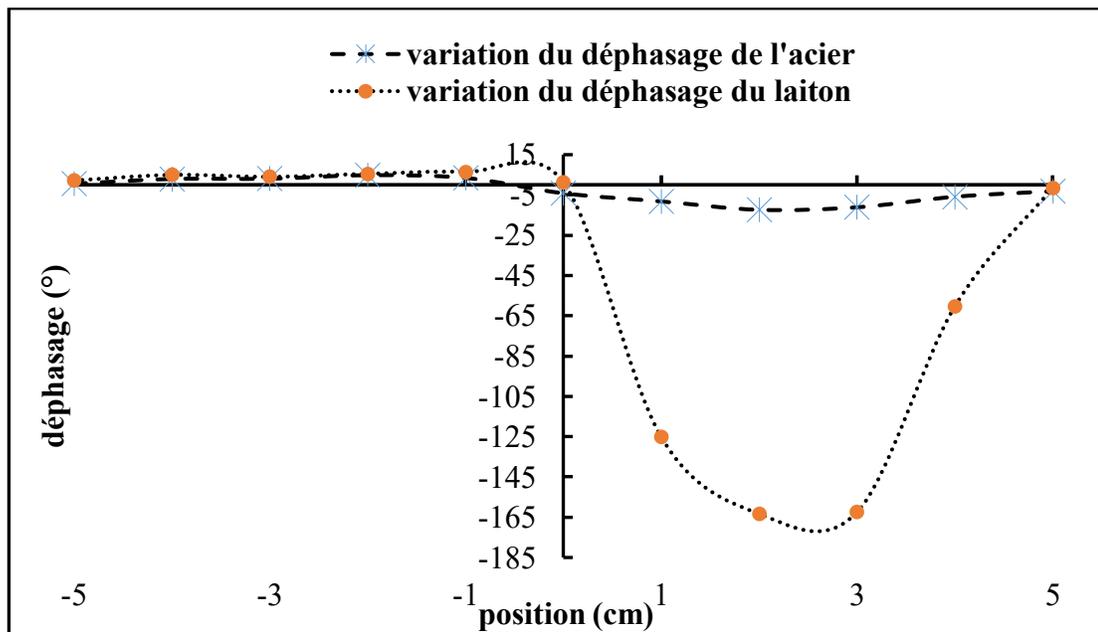
### 3.4.2. Résultats du déphasage entre le signal à la sortie de l'amplificateur différentiel et le signal de la source — cas de la variation du déphasage avec le changement du matériau du contaminant

La Figure 3.13 illustre la courbe du déphasage de l'acier et du laiton. En effet, le déphasage enregistré est celui mesuré entre le signal de la source (source d'excitation de la bobine émettrice) et le signal à la sortie de l'amplificateur différentiel. La phase de l'acier est passée de -4 degrés à +3 degrés, en le déplaçant sur l'axe du détecteur. Ce changement de phase est mesuré exactement au centre du détecteur. Les résultats tendent vers un déphasage nul en s'approchant du centre du détecteur (respectivement le centre de la bobine émettrice). La même Figure 3.13 montre la courbe de déphasage du laiton. La phase du matériau a changé de 10 degrés à -150 degrés, en le déplaçant sur l'axe du détecteur. Le matériau tend toujours vers un déphasage nul en passant par le centre du détecteur. La courbe de déphasage du laiton tend vers un déphasage nul en s'éloignant du centre du détecteur. En effet, en s'éloignant de 4 cm du centre du détecteur les contaminants risquent de ne pas être dans la zone active du dispositif.

Les deux courbes donnent des résultats de déphasage différents. Ceci est probablement dû aux différentes propriétés magnétiques des deux matériaux étudiés. L'acier est un matériau ferromagnétique qui a une perméabilité très élevée. Cependant, le laiton est un matériau paramagnétique.

À partir des résultats de déphasage, il est possible de prévoir la nature des matériaux à la suite d'une déduction de leurs courbes de déphasage. En effet, les matériaux paramagnétiques tendent vers une valeur de phase élevée à cette fréquence d'excitation. La reconnaissance du type de contaminant permet à l'industrie de prévoir la nature de celui-ci et cela permet de connaître les origines de décontamination ainsi que de prendre les mesures de prévention nécessaires contre ces contaminants.

L'étude de Yamazaki et al. (2002) a démontré la possibilité de reconnaître la nature du contaminant à partir de sa courbe de déphasage. Cependant, il a observé un passage de -60 degrés vers 30 degrés pour l'acier et un changement de phase de -90 à 90 degrés pour le laiton. Ceci s'explique par le fait que son détecteur ait été excité à 800 kHz et ses bobines soient équidistantes de 4 cm.

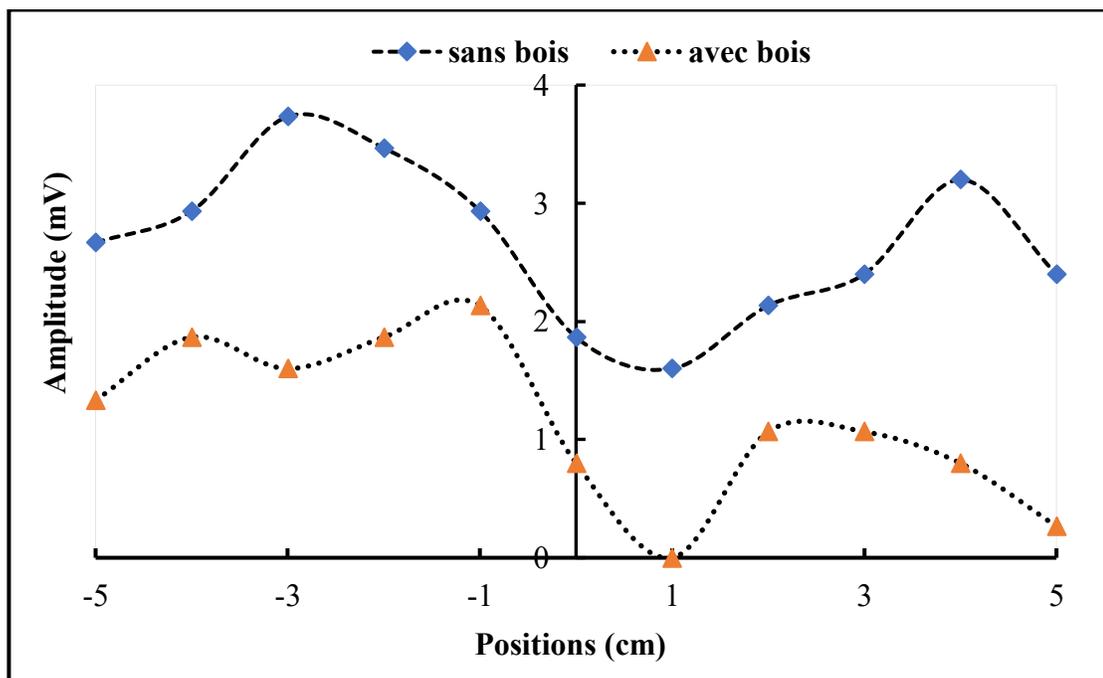


**Figure 3.13 :** Étude de la variation du déphasage de l'acier et du laiton

#### 3.4.3. Étude de l'influence des propriétés magnétiques des lamelles en bois

La Figure 3.14 montre l'analyse d'un écrou lors de la présence et l'absence du bois. Le signal ne s'annule pas au centre du détecteur. En effet, l'écrou a une géométrie complexe et creuse. De plus, le centre de gravité d'un écrou est un point qui ne contient pas de matière. En la présence du bois, les pics sont moins intenses. La présence du matériau diélectrique agit sur les propriétés magnétiques du milieu et rend la détection plus difficile. Les propriétés magnétiques du milieu ne sont plus celles du vide en la présence du bois. En plus, le bois va affaiblir les lignes de champ et par la suite le courant de Foucault créé à la surface des contaminants est moins intense.

La détection de l'écrou dans le petit matelas en bois pousse le détecteur à limiter le courant de Foucault créé à la surface du contaminant. Probablement, le courant de Foucault se limite à la surface apprenant de l'écrou. Les autres surfaces immergées dans le matelas en bois ne sont pas détectées ou elles sont influencées par les propriétés magnétiques du bois ce qui rend la détection du contaminant métallique difficile. En effet, les contaminants qui sont totalement immergés dans le matelas en bois risquent de ne pas être détectés surtout ceux des couches les plus profondes du matelas. De plus, ces résultats de détection risquent de compromettre la prévision de la taille des contaminants à cause de la diminution des amplitudes enregistrées.



**Figure 3.14 :** Étude des réponses d'un contaminant (écrou) en l'absence et en la présence des lamelles en bois

La détection des contaminants métalliques dans le matelas en bois dépend de plusieurs paramètres qui sont liés à la fois au détecteur et aux propriétés magnétiques du contaminant métallique et du matelas en bois ;

Les résultats de détection (amplitudes) sont liés à la fréquence d'excitation de la bobine émettrice et la génération du courant de Foucault dans les contaminants est meilleure à basse fréquence. Les résultats de détection (amplitudes et déphasages) dépendent des paramètres liés aux contaminants. En effet, les résultats de déphasage permettent de distinguer la nature du matériau (magnétique ou non) et par la suite une investigation des origines de contamination. De plus, les résultats d'amplitude sont proportionnels à la taille du contaminant. Néanmoins, aucune relation évidente n'était attribuée entre le signal d'amplitude et la taille. La plupart des contaminants étudiés dans cette recherche possèdent une forme sphérique pour éliminer l'effet de forme qui change les résultats du signal d'amplitude. Lors de l'ajout du bois, les pics de détection sont rendus moins intenses pour le même contaminant étudié et par la suite la détection est plus difficile pour les intrus métalliques totalement immergés dans le matelas en bois.

Le détecteur à trois bobines équilibrées possède une sensibilité élevée à l'absence du bois qui se traduit par une détection des petits contaminants (à l'ordre de 3 mm de rayon pour cette recherche). De plus, le même détecteur est très utilisé pour l'industrie agroalimentaire qui est comptée exigeant en termes de détection des intrus métalliques (Edwards, 2004).

Afin de répondre aux objectifs de cette recherche, l'implantation d'un détecteur à trois bobines équilibrées est recommandée dans divers points de la ligne de production. À titre d'exemple, après de déchiquetage, après le séchage et après chaque couche de lamelles jusqu'à la formation du matelas au complet, ceci permet d'éviter l'effet de la permittivité du bois.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La première partie de cette recherche analyse les équipements de contrôle des paramètres de production pour une usine de transformation sophistiquée. L'application de ces solutions pour assurer la haute qualité des produits à base de bois est recommandée.

Cette recherche a évalué la détection des contaminants métalliques dans un matelas en bois par voie électromagnétique et non destructive. Les résultats de l'étude comparative recommandent l'application de la méthode de thermographie et d'imagerie TéraHertz pour la détection des corps étrangers intrus. En effet, ce sont de nouvelles méthodes qui peuvent être appliquées pour la réalisation du contrôle non destructif du matelas en bois.

La technique d'infrarouge à transformée de Fourier est une solution pertinente, très souvent appliquée pour l'industrie de recyclage. Néanmoins, cette technique ne permet pas d'atteindre l'objectif de cette recherche puisqu'elle se limite à l'analyse des contaminants de surface et qu'elle ne permet pas de détecter les contaminants qui se trouvent dans le matelas. Cependant, une conclusion très importante liée à la détection des contaminants métalliques vient d'être prouvée. Les oxydes de métaux ont, indépendamment du type d'oxyde, un pic d'absorption de l'ordre de  $669\text{ cm}^{-1}$ . Ce pic représente le lien oxygène lié à l'oxyde présent à la surface des métaux. Il s'agit d'un résultat très important pour l'implantation d'un nouveau lecteur infrarouge répondant aux objectifs de décontamination dans les lignes de transformation et de recyclage du bois, peut-être après l'étape de déchiquetage des troncs d'arbres. À côté de cela, un capteur infrarouge est implanté déjà dans les usines de transformation de bois.

Probablement, un ajout d'une bande de nombres d'ondes qui contient le pic trouvé permettra un double rôle du même équipement (mesure de l'humidité et détection des contaminants).

Le détecteur de métaux à trois bobines équilibrées représente une solution économique et facile à implanter dans le matelas en bois. La validation du modèle montre que les réponses du dispositif dépendent de la fréquence d'excitation du détecteur. De plus, les résultats d'amplitude dépendent de la forme, des propriétés magnétiques et de la taille des contaminants. Le dispositif permet aussi de différencier le type de contaminant (ferromagnétique ou paramagnétique). Ceci est un résultat important pour connaître les origines de contamination. Cependant, l'apparition du bois affecte la sensibilité du détecteur conçu.

Dans le cadre de cette même recherche, des essais préliminaires ont été réalisés avec un dispositif micro-ondes de type WA 931-14b qui est constitué d'un émetteur et d'un récepteur micro-ondes et permet une excitation à 10.5 GHz. Les résultats préliminaires montrent que le bois est un matériau transparent pour les micro-ondes. Toutefois, une différence a été observée en comparant les résultats des échantillons contaminés avec une vis et non contaminés.

Afin de réaliser une étude comparative complète, il importe de s'attarder aux techniques suivantes : l'analyse avec les micro-ondes, les imageries térahertz et l'ultrason couplé à l'air. À titre d'exemple, l'ultrason couplé à l'air constitue une technique attirante qui peut servir à la localisation des contaminants dans le matelas en bois en se basant sur les ondes réfléchies lors de la rencontre de l'intrus. Son couplage à l'air élimine l'utilisation des couplant (exemple de l'eau) ce qui facilite son implantation pour des évaluations en temps réel de production. Ces techniques présentent un important effort pénétrant à travers les matériaux et sont de plus en plus utilisées en médecine grâce à leurs rayonnements non ionisants.

En effet, ces techniques ne présentent pas des problèmes de pénétration comme la thermographie infrarouge et l'infrarouge à transformée de Fourier. De plus, elles sont plus précises que le détecteur de métaux. Elles présentent des solutions de détection par voie non destructive, ne nécessitent aucun contact et sont adéquates par rapport à la vitesse réelle de transformation des panneaux à base de bois.

## RÉFÉRENCES

- Abbas, H., et Brewster, R. (1986). The detection and location of foreign metal objects in conveyed products. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 8(2), 76-84.
- Aderhold, J., et Plinke, B. (2010). Innovative Methods for Quality Control in the Wood-Based Panel Industry. In (pp. 225-249): London: Brunel Univ. Press.
- Aguilera, C., Ramos, M., et Roa, G. (2006). An automatic grading system for panels surfaces using artificial vision. *International Journal of Computers Communications et Control*, 1(2), 15-22.
- Alfredo, A., et Davim, J. P. (Eds.). (2014). *Research Developments in Wood Engineering and Technology*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 410p.
- AnalogDevices (2019). Fiche technique de l'amplificateur différentiel AD8421, É.-U. 8p. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8421.pdf>. Consulté le 12 février 2019.
- Andreu, J.-P., et Rinnhofer, A. (2003). *Modeling of internal defects in logs for value optimization based on industrial CT scanning*. Paper presented at the Fifth International Conference on Image Processing and Scanning of Wood, Bad Waldersdorf, Austria, 141-150.
- Barbu, M. C., Hasener, J., et Bernardy, G. (2014). Modern Testing of Wood-Based Panels, Process Control, and Modeling. In *Research Developments in Wood Engineering and Technology*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 410p.

- Bhandarkar, S. M., Faust, T. D., et Tang, M. (1999). Catalog: a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography. *Machine Vision and Applications*, 11(4), 171-190.
- Bonifazi, G., et Serranti, S. (2006). Imaging spectroscopy based strategies for ceramic glass contaminants removal in glass recycling. *Waste management*, 26(6), 627-639.
- Borel, P., Sabater, J., Tourtollet, G. E. P., Cochaux, A., et Veiga, J. (2007). Using NIR Spectrometry for Direct Control of Recovered Papers. *Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry*, 39(5), 58-63.
- Bruschini, C. (2002). *A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining*. Thèse de doctorat. Université de Bruxelles, 230p.
- Bucur, V. (2003). Techniques for high-resolution imaging of wood structure: a review. *Measurement Science and Technology*, 14(12), R91.
- Bucur, V. (2013). *Nondestructive characterization and imaging of wood*. Berlin, Allemagne : Springer Science et Business Media, 354p.
- Choi, K. N. (2014). Two-channel metal detector using two perpendicular antennas. *Journal of Sensors*, 14, 1-11.
- De Groot, P., Postma, G., Melssen, W., et Buydens, L. (2002). Validation of remote, on-line, near-infrared measurements for the classification of demolition waste. *Analytica Chimica Acta*, 453(1), 117-124.
- Dong, H., Hu, W., Duan, Y., Wang, X., et Dong, C. (2012). Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al filler wires. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2), 458-464.
- Edwards, M. (2004). *Detecting foreign bodies in food* (M. Edwards Ed.). Abington, England: Woodhead Publishing Limited, 305p.

- El Marouani, M., El Hrech, N., El Jastimi, J., El Hajji, A., Rghioui, L., Sebbahi, S., . . . Kifani-Sahban, F. (2017). Lignin and derivative charcoals: Functional groups involved in the adsorption phenomenon. *J. Mater. Environ. Sci*, 8(12), 4313-4322.
- Emandi, A., Ileana Vasiliu, C., Budrugaec, P., et Stamatin, I. (2011). Quantitative investigation of wood composition by integrated FT-IR and thermogravimetric methods. *Cellulose Chemistry and Technology*, 45(9), 579.
- Fernández, M. P., Tejos, C., Rojas, G., Lillo, I., Guesalaga, A., et Irrarázaval, P. (2014). 3D Non-Destructive Evaluation Techniques for Wood Analysis. In *Research Developments in Wood Engineering and Technology*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 410p.
- Funt, B. V., et Bryant, E. C. (1987). Detection of internal log defects by automatic interpretation of computer tomography images. *Forest Products Journal*, 37(1), 56-62.
- Gowen, A., O'Sullivan, C., et O'Donnell, C. (2012). Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control. *Trends in Food Science et Technology*, 25(1), 40-46.
- Gundupalli, S. P., Hait, S., et Thakur, A. (2017). A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste management*, 60, 56-74.
- Hall, L. D., Rajanayagam, V., Stewart, W. A., et Steiner, P. R. (1986). Magnetic resonance imaging of wood. *Canadian journal of forest research*, 16(2), 423-426.
- Hansen, F. T., et Vinding, L. (2008). *New Generation Metal Detector for Food*. Thèse de doctorat. Université d'Alborg, 120p.

- Hasan, A. R., Schindler, J., Solo-Gabriele, H. M., et Townsend, T. G. (2011). Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology. Part I: Detection of preservative-treated wood waste. *Waste management*, 31(4), 688-694.
- Hilbers, U., Neuenschwander, J., Hasener, J., Sanabria, S. J., Niemz, P., et Thoemen, H. (2012a). Observation of interference effects in air-coupled ultrasonic inspection of wood-based panels. *Wood science and technology*, 46(5), 979-990.
- Hilbers, U., Thoemen, H., Hasener, J., et Fruehwald, A. (2012b). Effects of panel density and particle type on the ultrasonic transmission through wood-based panels. *Wood science and technology*, 46(4), 685-698.
- Jiles, D. (2016). *Introduction to magnetism and magnetic materials* (3 ed.). New York, USA: CRC press, 146p.
- Kaestner, A. P., et Baath, L. (2005). Microwave polarimetry tomography of wood. *IEEE Sensors Journal*, 5(2), 209-215.
- Kannmori, et Yamaguchi. (1967). Application des spectres d'absorption infrarouges spectre d'absorption infrarouge de fer et d'acier d'oxyde métallique *Chimie analytique*, 16(10), 1050-1055.
- Kasal, B., Lear, G., et Tannert, T. (2010). Stress waves. In *In Situ Assessment of Structural Timber*. Bienne, Suisse : Springer, 121p.
- Kim, G.-J., Kim, J.-I., Jeon, S.-G., Kim, J., Park, K.-K., et Oh, C.-H. (2012). Enhanced continuous-wave terahertz imaging with a horn antenna for food inspection. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 33(6), 657-664.
- FAO (2016). *Produits forestiers mondiaux : Faits et chiffres 2016*. USA Retrieved from <http://www.fao.org/3/I7034FR/i7034fr.pdf>. Consulté le 23 octobre 2019.

- Landolt, D. (1993). *Traité des matériaux : corrosion et chimie de surfaces des métaux*. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 552p.
- Lesar, B., Humar, M., et Hora, G. (2018). Quality assessment of recycled wood with and without non-wooden materials from selected recycling companies in Europe. *Waste management*, 79, 362-373.
- Little Jr, J.R. *Apparatus and method for nondestructive testing of dielectric materials*. U.S. Patent No 6,359,446, 19 mars 2002.
- Liu, B., et Zhou, W. (2011). *The research of metal detectors using in food industry*. Paper presented at the Electronics and Optoelectronics, International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 4, 43-45.
- Liu, X. (2008). *Radio frequency evaluation of oriented strand board*. Thèse de doctorat. Université du Mississippi, 99p.
- López, G., Basterra, L. A., et Acuña, L. (2013). Estimation of wood density using infrared thermography. *Construction and Building Materials*, 42, 29-32.
- Martin, M. Z., Labbé, N., Rials, T. G., et Wullschleger, S. D. (2005). Analysis of preservative-treated wood by multivariate analysis of laser-induced breakdown spectroscopy spectra. *Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy*, 60(7-8), 1179-1185.
- Mauruschat, D., Plinke, B., Aderhold, J., Gunschera, J., Meinlschmidt, P., et Salthammer, T. (2016). Application of near-infrared spectroscopy for the fast detection and sorting of wood-plastic composites and waste wood treated with wood preservatives. *Wood science and technology*, 50(2), 313-331.
- Meinlschmidt, P. (2005). *Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials*. Paper presented at the 14th International Symposium of Nondestructive Testing of Wood, Hannover, Germany.

- Ministère des Forêts, des faunes et es parcs (MFFP) (2017). *Ressources et industries forestières du Québec portrait statistique*. Québec, Canada : gouvernement du Québec, p124. <https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/portrait-statistique-2017.pdf>. Consulté le 18 octobre 2019.
- Ministère des Forêts, des faunes et es parcs (MFFP) (2018). *Industries des panneaux composites à base de bois ; produits potentiels de marché en Amérique du Nord*. Québec, Canada : gouvernement du Québec, p42. [https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/Industrie\\_panneaux.pdf](https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/Industrie_panneaux.pdf). Consulté le 23 octobre 2019.
- Mwaikambo, L. Y., et Ansell, M. P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of applied polymer science*, 84(12), 2222-2234.
- Niemz, P., et Mannes, D. (2012). Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *Journal of Cultural Heritage*, 13(3), S26-S34.
- Novelline, R. A., et Squire, L. F. (2004). *Squire's fundamentals of radiology*. London, England: L'Éditorial, UPR, 638p.
- Ok, G., Kim, H. J., Chun, H. S., et Choi, S.-W. (2014). Foreign-body detection in dry food using continuous sub-terahertz wave imaging. *Food control*, 42, 284-289.
- Pedieu, R. (2008). *Valorisation des résidus d'écorce de bouleau blanc (Betula papyrifera) sous forme de fabrication de panneaux*. Thèse de Doctorat. Université Laval, 234p.
- Peys, A., Arnout, L., Hertel, T., Iacobescu, R. I., Onisei, S., Kriskova, L., Pontikes, Y. (2017). *The use of ATR-FTIR spectroscopy in the analysis of iron-silicate inorganic polymers*. Paper presented at the Proceedings of the 5th International Slag Valorization Symposium: From fundamentals to applications. Leuven, Belgium, 385-388.

- Pigorsch, E., Gaertner, G., Hollstein, F., et Meinschmidt, P. (2014). Sorting of waste wood by NIR imaging techniques. *Proc. Sensor-Based Sorting*, 127-136.
- Plinke, B., et Ben-Yacov, D. (2009). Überwachung der Klebstoffverteilung im OSB-Vlies mit ortsauflösender Spektroskopie. 8. *Holzwerkstoffkolloquium, Dresden*, 10(11.12).
- Plinke, B., et Ben-Yacov, D. (2010). Spatially resolved monitoring of adhesive application. *Adhesion adhesivesetsealants*, 7(4), 25-29.
- Prince, J. L., et Links, J. M. (2006). *Medical imaging signals and systems*: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 4p.
- Rojas, E. G. (2004). Détection des défauts internes dans les billes d'érable à sucre à l'aide d'un scanner à rayons X, 4027-4027.
- Sanabria, S. J., Furrer, R., Neuenschwander, J., Niemz, P., et Sennhauser, U. (2014). Bonding defect imaging in glulam with novel air-coupled ultrasound testing. In *Research Developments in Wood Engineering and Technology*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 410p.
- Schad, K. C., Schmoltdt, D. L., et Ross, R. J. (1996). Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs. *USDA Forest Service Research Paper FPL-RP-546*. 13 pp., 546.
- Schneider, J. M. (2012). Probing the potential of applications of Terahertz radiation in wood products. *Master's thesis, University of Northern British Columbia*, 61p.
- Sheibley, D. W., et Fowler, M. H. (1966). *Infrared spectra of various metal oxides in the region of 2 to 26 microns*. NASA Technical Note NASA TN D-3750 Washington, D.C., USA.
- So, C.-L., Via, B. K., Groom, L. H., Schimleck, L. R., Shupe, T. F., Kelley, S. S., et Rials, T. G. (2004). Near infrared spectroscopy in the forest products industry. *Forest Products Journal* 54 (3): 6-16.

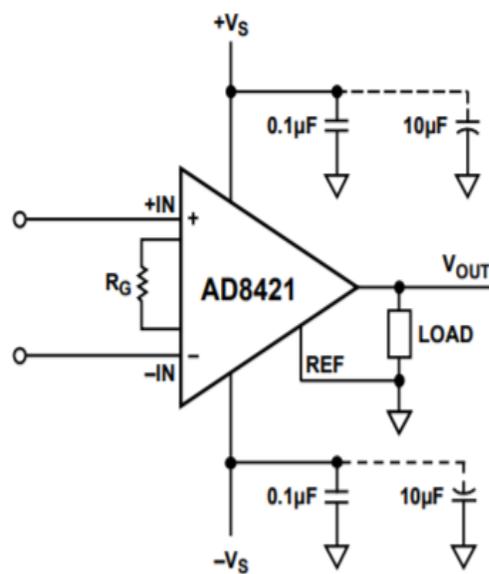
- Stark, N. M., Cai, Z., et Carll, C. (2010). Wood-based composite materials: Panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 11. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 11.1-11.28, 190, 11.11-11.28.
- Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, M. R., Santonja, G. G., Roudier, S., et Sancho, L. D. (2015). *Best available techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board. European Commission.*
- Tatzer, P., Wolf, M., et Panner, T. (2005). Industrial application for inline material sorting using hyperspectral imaging in the NIR range. *Real-Time Imaging*, 11(2), 99-107.
- Werchefani, M., Elloumi, A., Lacoste, C., Belguith, H., Gargouri, A., et Bradai, C. (2017). Influence des traitements chimiques et biologiques sur les propriétés mécaniques des biocomposites Cereplast-fibres d'Alfa. 23<sup>e</sup> Congrès français de mécanique, S32-Mécanique des renforts et des composites, 8p.
- Wieland, S. (2007). *Utilisation d'adhésifs respectueux de l'environnement pour la fabrication de panneaux dérivés du bois à faible émission de formaldéhyde : caractérisation des paramètres de pressage : évaluation des propriétés des panneaux.* Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 178p.
- Wyckhuyse, A., et Maldague, X. (2001). A study of wood inspection by infrared thermography, part I: Wood pole inspection by infrared thermography. *Research in nondestructive evaluation*, 13(1), 1-12.
- Yamazaki, S., Nakane, H., et Tanaka, A. (2002). Basic analysis of a metal detector. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 51(4), 810-814.

- Yang, C., et Wöll, C. (2017). IR spectroscopy applied to metal oxide surfaces: adsorbate vibrations and beyond. *Advances in Physics: X*, 2(2), 373-408.
- Zhang, H., Sfarra, S., Saluja, K., Peeters, J., Fleuret, J., Duan, Y., Maldague, X. (2017). Non-destructive investigation of paintings on canvas by continuous wave terahertz imaging and flash thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 36(2), 34.
- Zhao, Y., Yin, W., Ktistis, C., Butterworth, D., et Peyton, A. J. (2014). On the Low-Frequency Electromagnetic Responses of In-Line Metal Detectors to Metal Contaminants. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 63(12), 3181-3189.
- Zhou, D., Pan, M., He, Y., et Du, B. (2017). Stress detection and measurement in ferromagnetic metals using pulse electromagnetic method with U-shaped sensor. *Measurement*, 105, 136-145.

## ANNEXE (A)

- **Montage de l'amplificateur différentiel**

L'amplificateur différentiel AD8421 permet de calculer la différence entre les voltages induits dans les deux bobines émettrices. Le montage ci-dessous était la référence de son alimentation. En effet, la résistance utilisée a permis d'avoir environ un gain équivalent à 6.



(AnalogDevices, 2019)

## ANNEXE (B)

- **Traitement des courbes d'amplitude**

Les résultats sont récupérés de l'oscilloscope avec un logiciel « Openchoice », sous forme de fichier « .csv ». Ces derniers sont des courbes sinusoïdales (chaque point présenté dans les courbes précédentes est une courbe sinusoïdale). Nous avons utilisé le logiciel Matlab pour chercher le maximum de chacune des courbes. Les résultats finaux présentent les valeurs absolues des amplitudes.

Nous avons assimilé la réponse sinusoïdale à un tableau qui contient 2500 lignes et nous avons cherché son maximum avec la fonction « Matlab » suivante ;

```
max= abs (tableau (1)) ;
for i=2:2500
if (abs) tableau(i)>max) ;
max=abs (tableau (i)) ;
end
end
```

Chacune des expériences est répétée trois fois. Ensuite, une moyenne des résultats est calculée et soustraite de la réponse en l'absence de contaminant.

- **Traitement des courbes de déphasage**

Les résultats sont récupérés avec le logiciel « Openchoice » sous forme de fichier « .csv ».

Le déphasage est calculé automatiquement avec « Matlab » en utilisant la fonction suivante ;

*h1 = hilbert (E1) ;*

*h2 = hilbert (E2) ;*

[Signal est transformé en signal analytique]

*p1 = unwrap (angle (h1)) ;*

*p2 = unwrap (angle (h2)) ;*

[Calcul de la phase instantanée de chaque courbe]

*mean (p2*

## ANNEXE (C)

- Courbes de réponse d'amplitude — cas de variation de la fréquence :

i) Contaminant de type acier, sphériques-23.5 mm :

Fréquences (kHz)	Réponse en l'absence du contaminant (V)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
400	0,037 6	0,056	0,048	0,048
600	0,04	0,044	0,042	0,044
700	0,012	0,012 8	0,011 2	0,013 6

ii) Contaminant de type laiton — hexagonal de côté a= 17 mm :

Fréquences (kHz)	Réponse en l'absence du contaminant (V)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
400	0,037 6	0,1	0,1	0,1
600	0,04	0,09	0,074	0,076
700	0,012	0,012	0,012	0,012 8

iii) Variation de la pénétration en fonction de la fréquence ;

Fréquence (kHz)	Pénétration dans l'acier (mm)	Pénétration dans le laiton (mm)
400	2,902 61 E -05	0,000 230 388
600	2,369 97 E -05	0,000 188 111
700	2,194 17 E -05	0,000 174 157

- Courbes de réponse d'amplitude — cas de variation de la taille
  - iv) Contaminant : acier, sphérique de diamètre 23.5 mm ;

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	0,036 8	0,036 8	0,036 8
Position (-5)	0,037 6	0,040 8	0,038 4
Position (-4)	0,042 4	0,044	0,04
Position (-3)	0,041 6	0,041 6	0,042 4
Position (-2)	0,043 2	0,042 4	0,043 2
Position (-1)	0,038 4	0,040 8	0,043 2
Position (0)	0,036 8	0,035 2	0,036
Position (1)	0,033 6	0,034 4	0,034 4
Position (2)	0,031 2	0,032	0,032
Position (3)	0,034 4	0,032 8	0,032
Position (4)	0,036 8	0,034 4	0,035 2
Position (5)	0,037 6	0,036	0,036

- v) Contaminant : acier, sphérique de diamètre 12.6 mm ;

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	0,044 8	0,044	0,044
Position (-5)	0,044	0,042 4	0,044
Position (-4)	0,043 2	0,042 4	0,044 8
Position (-3)	0,044 8	0,043 2	0,04
Position (-2)	0,044	0,042 4	0,044 8
Position (-1)	0,043 2	0,043 2	0,044 8
Position (0)	0,044	0,043 2	0,043 2
Position (1)	0,043 2	0,043 2	0,044
Position (2)	0,041 6	0,044 8	0,043 2
Position (3)	0,039 2	0,043 2	0,044
Position (4)	0,041 6	0,043 2	0,044 8
Position (5)	0,040 8	0,044	0,043 2

- Courbes de réponse d'amplitudes-cas de la variation de la forme

vi) Contaminant : acier, sphérique de diamètre 23.5 mm ;

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	0,036 8	0,036 8	0,036 8
Position (-5)	0,037 6	0,040 8	0,038 4
Position (-4)	0,042 4	0,044	0,04
Position (-3)	0,041 6	0,041 6	0,042 4
Position (-2)	0,043 2	0,042 4	0,043 2
Position (-1)	0,038 4	0,040 8	0,043 2
Position (0)	0,036 8	0,035 2	0,036
Position (1)	0,033 6	0,034 4	0,034 4
Position (2)	0,031 2	0,032	0,032
Position (3)	0,034 4	0,032 8	0,032
Position (4)	0,036 8	0,034 4	0,035 2
Position (5)	0,037 6	0,036	0,036

vii) Contaminant de type laiton — hexagonal de côté  $a= 17$  mm :

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	0,038 4	0,042 4	0,038 4
Position (-5)	0,052 8	0,056 8	0,062 4
Position (-4)	0,071 2	0,075 2	0,077 6
Position (-3)	0,092 8	0,096 8	0,097 6
Position (-2)	0,096	0,094 4	0,097 6
Position (-1)	0,073 6	0,072 8	0,076
Position (0)	0,040 8	0,035 2	0,034 4
Position (1)	0,007 2	0,009 6	0,009 6
Position (2)	0,034 4	0,033 6	0,031 2
Position (3)	0,035 2	0,030 4	0,040 4
Position (4)	0,012 8	0,007 2	0,007 2
Position (5)	0,019 2	0,023 2	0,028

- Courbes de réponse du déphasage

viii) Courbes du déphasage par rapport au signal de la source lors de la présence du contaminant de type acier-D=23.5 mm ;

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	2,928 3	2,928 3	2,92
Position (-5)	2,949 2	2,920 1	2,938 2
Position (-4)	2,943 3	2,988 7	2,998 6
Position (-3)	2,981 8	2,988 6	2,966 3
Position (-2)	3,013 4	3,022 4	2,991 8
Position (-1)	2,993 1	2,984 9	2,980 1
Position (0)	2,844 9	2,857 4	2,856 2
Position (1)	2,779 7	2 776	2,790 6
Position (2)	2,711 7	2,721 4	2,695 6
Position (3)	2,748 3	2,715 2	2,73
Position (4)	2,842 9	2,796 6	2,827 9
Position (5)	2,863 9	2,885 1	2,864 3

ix) Courbes du déphasage par rapport au signal de la source lors de la présence du contaminant de type laiton hexagonal, a=17 mm et L=50.2 mm ;

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 1 (V)	Expérience 1 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	2,864 1	2,87	2,865 1
Position (-5)	2,923 1	2,819 5	2,970 7
Position (-4)	2,947 9	2,986 5	2 925
Position (-3)	2,99	2,904 8	2,914 5
Position (-2)	2,983 6	2,936 3	2,966 5
Position (-1)	2,986 6	2,972 8	2,974 3
Position (0)	2,936 3	2 862	2,869 1
Position (1)	0,726 9	0,541 8	0,779 2
Position (2)	0,030 8	0,012 3	0,005 6
Position (3)	0,031 4	0,047 1	0,010 1
Position (4)	0,200 7	2,832 4	2,405 2
Position (5)	2,811 6	2,832 4	2,880 9

- Courbes de réponse d'amplitudes-cas de l'incorporation des lamelles en bois  
x) Résultats de l'amplitude d'un écrou à l'absence du bois :

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	0,039 2	0,039 2	0,037 6
Position (-5)	0,044	0,039 2	0,04
Position (-4)	0,044 8	0,038 4	0,040 8
Position (-3)	0,046 4	0,040 8	0,039 2
Position (-2)	0,045 6	0,039 2	0,040 8
Position (-1)	0,044 8	0,038 4	0,040 8
Position (0)	0,044	0,037 6	0,039 2
Position (1)	0,043 2	0,038 4	0,038 4
Position (2)	0,044	0,039 2	0,038 4
Position (3)	0,044	0,039 2	0,039 2
Position (4)	0,045 6	0,04	0,039 2
Position (5)	0,043 2	0,039 2	0,04

- xi) Résultats de l'amplitude d'un écrou lors de l'ajout du bois :

Position du contaminant par rapport à la bobine émettrice (cm)	Expérience 1 (V)	Expérience 2 (V)	Expérience 3 (V)
Réponse en l'absence de contaminant	0,039 2	0,038 4	0,376
Position (-5)	0,04	0,04	0,039 2
Position (-4)	0,040 8	0,04	0,04
Position (-3)	0,040 8	0,039 2	0,04
Position (-2)	0,040 8	0,040 8	0,039 2
Position (-1)	0,040 8	0,04	0,040 8
Position (0)	0,04	0,038 4	0,039 2
Position (1)	0,039 2	0,037 6	0,038 4
Position (2)	0,036 8	0,038 4	0,036 8
Position (3)	0,037 6	0,037 6	0,036 8
Position (4)	0,039 2	0,039 2	0,039 2
Position (5)	0,039 2	0,038 4	0,038 4