جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵉⵜ ⵙⵉⴷⵉ ⵎⵓⵃⵎⴷ ⴱⵏ ⵄⴱⴷⵍⵍⴰⵀ ⴱ ⴼⴰⵙ
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم والتقنيات فاس
ⵜⴰⵖⵡⵍⵓⵜ ⵏ ⵜⵣⵔⴼⵜⵉⵏ ⴷ ⵜⵙⵙⵏⵜⵉⵏ ⴼⴰⵙ
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre /2020

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr : Amine BASSLI

Spécialité : **Génie électrique et Traitement de Signal**

Sujet de la thèse : **Réflectomètre THz Pour l'imagerie 3D des Matériaux**

Thèse présentée et soutenue le ..... Mai 2020 devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Rachid BENSLIMANE	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès, USMBA	Président
Gilles DESPAUX	PdU	Université de Montpelier	Rapporteur
Mounir RIFI	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Casablanca, UH2C	Rapporteur
Farid ABDI	PES	Faculté des Sciences et Technique, USMBA	Rapporteur
Saad Dosse Bennani	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées, USMBA	Examinateur
Stéphane BLIN	MC	Université de Montpelier	Encadrant (France)
Annick Plagellat PENARIER	MC	Université de Montpelier	Encadrante (France)
Ali BENBASSOU	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès, USMBA	Co-Encadrant
Jamal BELKADID	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès, USMBA	Directeur de Thèse

Laboratoire d'accueil : **Transmission et Traitement de l'Information (LTTI)**

Etablissement : **Ecole Supérieure de Technologie de Fès**

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Résumé de la thèse

Le domaine THz est une partie du spectre électromagnétique qui présente beaucoup d'intérêt pour la communauté scientifique et l'industrie. À cheval entre les micro-ondes et l'optique, ses propriétés particulières lui confèrent des atouts qui semblent répondre aux besoins technologiques de bon nombre d'applications.

De nos jours, les radars utilisant la technologie FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave), sont de plus en plus plébiscités pour leur simplicité. Ils sont développés et utilisés à grande échelle dans le civil et l'industrie pour les mesures.

Ce projet de thèse présente une nouvelle approche d'imagerie tridimensionnelle pour une inspection en profondeur et non destructive des matériaux. L'approche est basée sur un système radar à ondes continues modulées en fréquence (FMCW) fonctionnant dans la bande de fréquences 75-110 GHz. Les mesures de spectroscopie dans le domaine temporel démontrent qu'une telle bande de fréquences a des niveaux d'atténuation faible dans des matériaux de dimensions concentriques, offrant ainsi un compromis avantageux entre la résolution aux fréquences plus élevées et la profondeur de mesure. La configuration proposée comprend un long retard sur le signal de référence afin d'annuler les signaux redondants qui autrement dégraderaient la mesure. En outre, des techniques spécifiques de traitement du signal utilisées pour améliorer les performances du système, qui nécessitent des performances de composants strictes en termes de non-linéarité radiofréquence et de perte de retour, sont présentées. La correction de la non-linéarité des radiofréquences est basée sur une mesure de référence, et l'impact des réflexions de parasites est réduit par la moyenne des mesures effectuées sur une cible à différentes positions longitudinales. En conséquence, une amélioration du rapport S/B jusqu'à 20 dB est démontrée. Des expériences de tomographie ont été menées sur des matériaux de construction montrant une imagerie tridimensionnelle avec des résolutions longitudinales et transversales théoriquement limitées, respectivement de 5 mm et 20 mm, ouvrant ainsi la porte à des applications de surveillance des infrastructures civiles.

Mots clés : *Radar FMCW, Imagerie en profondeur Haute-résolution, onde non destructive, onde millimétrique, Imagerie 3D*

Liste des abréviations

FMCW : Frequency-Modulated Continuous Wave

Radar : RAdio Detection And Ranging

3D : Three-dimensional

TDS : Time-domain spectroscopy

TF : High Burnup Structure

FFT : Transformation de Fourier rapide

CW : Continuous Wave

THz : Térahertz

DSP : Densité Spectrale de Puissance

RF : Radiofréquence

RMS : Rapport signal à Bruit

IES : Institut d'Electronique et des Systèmes

USMBA : Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

UM : Université de Montpellier

IMEP : Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique

LAHC : Laboratoire d'Hyperfréquences et Caractérisation

Remerciements

Je voudrais avant toute chose remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce travail.
Mes remerciements s'adressent à Mr Rachid BENSLIMANE pour l'honneur qu'il m'a fait de présider mon jury, Aussi je suis très reconnaissant à Mr Gilles DESPAUX, Mr Mounir RIFI et Mr Farid ABDI d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, ainsi que l'examinateur Mr Saad Dosse Bennani d'avoir accepté d'examiner ce travail, et qui se sont, pour ce fait, déplacés pour assister à cette soutenance.

Je tiens à remercier particulièrement mes encadrants de thèse Mr Stéphane Blin, Mme Annick Penarier de m'avoir confié ces travaux de recherche et fait bénéficier de leurs connaissances et de leurs savoir-faire. Tout au long de ce travail, ils ont su m'apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de leurs compétences et de leurs réelles qualités humaines. Je remercie également Mr Philippe Nouvel pour le support technique et sans lui les bancs de manips n'auront pas pu être mis en place.

Je n'oublie pas également l'ensemble des membres de l'équipe TéHO de l'Institut d'Électronique et des Systèmes (IES) et mes collègues Mohamed Mahi Turé, Mohammed Hammoud, Isidore Diof et Alaeddin Abbess de m'avoir accompagné et soutenu et surtout de m'avoir créer une bonne ambiance tout au long de ma thèse.

Je remercie mes directeurs de thèse Mr Jamal Belkadid et Mr Ali Benbassou pour avoir encadré ce travail avec patience et pour leurs nombreux conseils précieux qui m'ont permis d'avancer tout au long de ma recherche.

Un petit clin d'œil à mes amis qui m'ont encouragée depuis le début de mes études spécialement Saad Mothahir et Yassine chaibi, Eziani Sadik, Mohammed Serhani, Mohamed Amine Zahir et Hassan Ansari.

Enfin, un grand merci à ma mère et mon père qui m'inspirent chaque jour par leur force et par leur détermination. Merci à mon frère Anass et mes deux sœurs Amal et Meryem pour leurs soutiens inconditionnels. Merci encore une fois pour m'avoir soutenu tout au long de ma vie et spécialement dans cette thèse. Sans vous, ce travail ne serait pas ce qu'il est.

Enfin un grand Merci à ma chère Hind qui m a suivie et soutenue depuis le début de cette thèse et qui a cru en moi.

"Ce sont les échecs bien supportés qui donnent le droit de réussir." Jean Mermoz

Résumé

Le domaine THz est une partie du spectre électromagnétique qui présente beaucoup d'intérêt pour la communauté scientifique et l'industrie. À cheval entre les micro-ondes et l'optique, ses propriétés particulières lui confèrent des atouts qui semblent répondre aux besoins technologiques de bon nombre d'applications. De nos jours, les radars utilisant la technologie FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave), sont de plus en plus plébiscités pour leur simplicité. Ils sont développés et utilisés à grande échelle dans le civil et l'industrie pour les mesures.

Ce projet de thèse présente une nouvelle approche d'imagerie tridimensionnelle pour une inspection en profondeur et non destructive des matériaux. L'approche est basée sur un système radar à ondes continues modulées en fréquence (FMCW) fonctionnant dans la bande de fréquences 75-110 GHz. Les mesures de spectroscopie dans le domaine temporel démontrent qu'une telle bande de fréquences a des niveaux d'atténuation faible dans des matériaux de dimensions concentriques, offrant ainsi un compromis avantageux entre la résolution aux fréquences plus élevées et la profondeur de mesure. La configuration proposée comprend un long retard sur le signal de référence afin d'annuler les signaux

redondants qui autrement dégraderaient la mesure. En outre, des techniques spécifiques de traitement du signal utilisées pour améliorer les performances du système, qui nécessitent des performances de composants strictes en termes de non-linéarité radiofréquence et de perte de retour, sont présentées. La correction de la non-linéarité des radiofréquences est basée sur une mesure de référence, et l'impact des réflexions de parasites est réduit par la moyenne des mesures effectuées sur une cible à différentes positions longitudinales. En conséquence, une amélioration du rapport S / B jusqu'à 20 dB est démontrée. Des expériences de tomographie ont été menées sur des matériaux de construction montrant une imagerie tridimensionnelle avec des résolutions longitudinales et transversales théoriquement limitées, respectivement de 5 mm et 20 mm, ouvrant ainsi la porte à des applications de surveillance des infrastructures civiles.

Titre : caractérisation des matériaux non destructives avec un système radar FMCW dans le domaine Térahertz.

Mots-clés : *Radar FMCW, Imagerie en profondeur Haute-résolution, onde non destructive,onde millimétrique , Imagerie 3D*

Abstract

This Manuscript reports a novel three-dimensional imaging approach for remote, non-destructive material inspection at depth. The approach is based on a Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) radar system operating in the 75– 110 GHz frequency band. Time-domain spectroscopy measurements demonstrate that such a frequency band has manageable attenuation levels in cm long materials, thereby offering an advantageous resolution-versus-measurement-depth trade-off compared to higher frequencies. The proposed setup includes a long delay on the reference signal in order to cancel redundant signals that would otherwise degrade the measurement. Furthermore, specific signal-processing techniques used to improve the performance of the system, which requires stringent component performances in terms of Radio Frequency nonlinearity and return loss, are presented. Radio Frequency nonlinearity correction is based on a reference measurement, and the impact of deleterious reflections is reduced by averaging measurements conducted on a target at different longitudinal positions. As a result, an improvement of the S/N ratio up to 20 dB is demonstrated. Tomography experiments were conducted on building

materials showing three-dimensional imaging with theoretically-limited longitudinal and transverse resolutions, of 5 mm and 20 mm, respectively, thus opening the door to civil infrastructure monitoring applications.

Title : Characterization of non-destructive materials with an FMCW radar system in the Terahertz domain.

Mots-clés : *Radar FMCW, depth imaging, High-resolution, non-destructive wave, millimeter wave imaging, Imagerie 3D*

Table des matières

Table des figures **15**

Liste des tableaux **21**

Introduction générale **23**

1 L'imagerie 3D **29**

1.1 Application de l'imagerie 3D 30

1.1.1 La protection civile 30

1.1.2 Les contrôles de sûreté 31

1.2 Caractérisation des matériaux 32

1.2.1 La radiographie 32

1.2.2 Technologie nucléaire 37

1.3 La Technologie Térahertz 39

1.3.1 Définition 39

1.3.2 Avantages 40

1.3.3 Les Défis 41

1.3.4 Domaines d'application 42

1.3.5 Comparaison des Technologies 43

1.3.6 L'imagerie Térahertz 44

1.3.7 L'imagerie avec des impulsions Térahertz : THz-TDS . . . 45

1.3.8 L'imagerie en ondes continues CW 47

1.4 Bande fréquentielle adaptée à la pénétration des matériaux de construction 50

1.5 Les systèmes Radar FMCW 54

1.5.1 Interférence instantanée entre deux ondes 55

1.5.2 Radar CW 56
1.5.3 Radar FMCW 58
1.6 Objectifs et besoin industriel 62
1.7 Conclusion 64

2 La mise en place du radar FMCW 65
2.1 Les composants du système radar FMCW 66
2.1.1 Le générateur de fréquences 68
2.1.2 La source THz 68
2.1.3 La diode de détection 69
2.1.4 Miroir parabolique 70
2.1.5 Lame séparatrice 70
2.2 Propriétés des faisceaux gaussiens 71
2.3 Techniques de traitement de signal 76
2.3.1 Généralité sur le traitement de Signal 76
2.3.2 Non-linéarités radio-fréquences 79
2.3.3 Réflexions parasites 85
2.3.4 Amélioration de la précision de mesure 88
2.4 Imagerie 3D 89
2.5 En résumé 94

3 Résultat et traitement de signal 95
3.1 Caractérisation 3D des matériaux à l'aide d'un réflectomètre à ondes millimétriques 96
3.1.1 Ajustements du traitement du signal 99
3.1.2 Résolution et application de tomographie 101
3.2 Conclusion 107

4 Mesure d'indice de réfraction des matériaux 109
4.1 Caractérisation des matériaux dans l'état liquide et solide 111
4.2 Traitement du signal pour améliorer la résolution 115
4.2.1 La méthode différentielle 115
4.3 En résumé 119

Conclusion 121

Bibliographie **125**

Table des figures

1.1 Structure à un instant donné des champs électriques et magnétiques, E et B, de l'onde se propageant dans la direction z. 33

1.2 Le spectre électromagnétique. 34

1.3 Images à rayons X de trois colis différents. L'identification des objets est basée sur la présentation en trois couleurs [7]. 36

1.4 Images photographiques et radiographiques de colis à contenu organique : poudre et liquide [7]. 37

1.5 Liaison logarithmique de la puissance émise en fonction de la fréquence de différentes technologies sources THz [33]. 42

1.6 Configuration de l'imagerie THz-TDS [source : [43]]. 47

1.7 Impulsion Térahertz et son spectre [source : [43]]. 47

1.8 Radar FMCW à 300 GHz pour détecter les cibles cachées [32], a) et b) présentent un mannequin avec une pièce métallique, c) présente une imagerie 3D ou nous voyons clairement qu'il y a un object caché.. 49

1.9 Mesure de transmission de deux types de matériaux céramiques (# A et # B) par TDS , montrant le niveau de bruit estimé à 500 GHz 51

1.10 Schéma d'un radar CW. 57

1.11 Forme de signal radar FMCW. 59

1.12 Principe du radar FMCW. 60

1.13 Type de modulation du radar à onde continu. 61

2.1 Schéma fonctionnel illustrant notre système radar FM-CW. Dans la figure nous montrons la fréquence instantanée détectée dans le temps du signal réfléchi sur la face avant (vert) et le signal réfléchi sur la face arrière (bleu). 67

2.2 Schéma présentant les informations et le principes du multiplicateur de fréquence basé sur une diode Schottky 69

2.3 Représentation de la transmission et réflexion du côté réfléchissant (en haut) et coté opaque (en bas). 72

2.4 Intensité du faisceau gaussien. 73

2.5 Propriétés d'intensité gaussien. 73

2.6 Compromis entre transversal et longitudinal limité par diffraction résolutions. Le point correspond à la configuration choisie. La résolution transversale, basée sur le critère de 10 à 90% 75

2.7 Spectre du signal sinusoïdal avec deux fréquences proches, signal rouge est sans fenêtrage. 79

2.8 Spectre du signal sinusoïdal et d'une fréquence de 500 Hz avec plusieurs type de fenêtrages 80

2.9 Puissance de sortie de la source RF. (a) présente la DSP du signal d'émission tout seul avec la DSP d'un signal brut détecté avec le système FM-CW pour un matériau homogène. Ce signal brut est représenté dans (b - d) et comparé aux signaux de post-traitement après, respectivement, correction de non-linéarité RF, fenêtrage de Hamming et les deux. 81

2.10 Figure du haut : le spectre noir correspond à la moyenne des spectres colorés, en utilisant l'amplitude du spectre moyen comme référence, figure bas : Comparaison entre une mesure brute (sans traitement du signal) et le traitement complet centrés sur les fréquences de battement correspondant au matériau homogène sous test. 87

2.11 Interpolation d'un signal aléatoire échantillonné par la méthode d'interpolation. 89

2.12 Vue mécanique d'une pièce de téflon avec un défaut à l'intérieur, les unités sont en cm. Les chiffres 1 à 4 correspondent aux quatre champs électriques qui sont réfléchis sur le matériau, conduisant ainsi à des fréquences de battement d'intérêt. 90

2.13 Algorithme des techniques de traitement du signal appliquées. . . 90

2.14 Balayage longitudinal FM-CW du matériau après traitement complet du signal. Nous pouvons identifier les fréquences attendues reportées dans le tableau 2.1 avec une précision adéquate (résolution spectrale de 40 Hz), les fréquences de battement indésirables et souhaitées sont représentées par des lignes verticales en pointillés et continues, respectivement. 92

2.15 Tomographie FM-CW après un balayage transversal (x, y). Une coupure en x et y est représentée. 93

3.1 Configuration FM-CW modifiée pour la suppression de la redondance des signaux. 97

3.2 Spectre des signaux réfléchis simulé à l'aide du miroir externe. Les pics basses fréquences (zone rouge) restent identiques à la configuration sans miroir externe, c'est-à-dire y compris les fréquences de battement redondantes. Les pics haute fréquence f_{0i} (en vert) correspondent au battement des interfaces avec le miroir externe, permettant ainsi l'observation de toutes les interfaces mais sans aucune redondance. L'encart montre un rendu expérimental en 3D du réflectomètre à ondes millimétriques à balayage transversal pour un morceau de téflon présentant un défaut interne. Les faces avant et arrière de la pièce et le défaut interne sont clairement visibles 98

3.3 Technique de calcul de la moyenne du réflectomètre à ondes millimétriques. Lorsque le matériau testé est déplacé le long de z, les signaux d'intérêt sont décalés en fréquence tandis que les signaux parasites restent à la même fréquence ou sont décalés en fréquence différemment. Les signaux mesurés à différentes positions bien connues le long de z sont ensuite décalés d'une fréquence connue qui dépend des positions de z avant la moyenne. 100

3.4 Spectre mesuré en utilisant le miroir externe pour le matériau testé sans traitement de signal (brut) et avec le traitement de signal complet (correction de non linéarité RF, fenêtrage de Hamming et calcul de moyenne). 102
3.5 Tomographie utilisant le réflectomètre à ondes millimétriques à balayage transversal pour un morceau de téflon présentant un défaut interne. Les faces avant et arrière de la pièce et du défaut interne sont clairement visibles sans aucune fréquence de battement redondante. Une coupe le long de x et y est présentée. . . . 103
3.6 Mesures de résolution transversale et longitudinale. (a) Mesure de la résolution transversale en appliquant le critère de 10 - 90 % le long des dimensions x et y. (b) Mesure de résolution longitudinale. Le signal détecté est mesuré lorsque la distance d entre deux cibles se rapproche le long de z. Un décalage d'amplitude artificiel est ajouté à chaque mesure pour une meilleure visibilité. La résolution est mesurée avec et sans fenêtrage de Hamming . . 105
3.7 Critère de Rayleigh pour déterminer la résolution longitudinal. . 106
3.8 Images 3D de matériaux en béton utilisant le réflectomètre à ondes millimétriques pour des échantillons de béton cellulaire (haut) et armé (bas). 107

4.1 Vue mécanique du matériaux de test (à gauche), et d'une pièce en métal pour mesurer le terme $2B/cT$ (à droite) 112
4.2 DSP du signal détecté pour un téflon de 6 cm 113
4.3 Le support en téflon rempli de paraffine avec un métal pour avoir une réflexion totale. 113
4.4 Le spectre de puissance du signal détecté par la diode du radar réfléchie par le support représenté sur la figure 4 rempli de paraffine 114
4.5 Deux signaux sinusoïdaux avec une petite différence de fréquence pour montrer la méthode différentielle 116
4.6 Spectre mesuré sans traitement du signal (bleu) et avec la méthode différentielle (orange). 117
4.7 Changement de la fréquence de battement en passant de l'état solide à l'état liquide. 118

4.8 L'indice de réfraction passe de l'état solide à l'état liquide. Les lignes violettes indiquent le niveau des états 100 % solide et liquide. 118

Liste des tableaux

1.1 Avantages et inconvénients fondamentaux de plusieurs technologies utilisées pour l'imagerie 3D. 44
1.2 Principales caractéristiques des deux types de radar Pulse et FMCW. 50

2.1 Couples possibles de signaux réfléchis et leur fréquence de battement associée. Seuls les signaux de temps qui impliquent la réflexion frontale (# 1) sont souhaités pour une image réaliste du matériau.. 91

4.1 pics de fréquences détecté pour la paraffine en état solide et liquide.114

Introduction

Les matériaux de constructions comme le béton armé, le béton cellulaire, la céramique sont très difficiles à contrôler tout simplement car l'intérieur de ces pièces n'est pas visible après leur fabrication. Donc la présence de fissures ou de trous à l'intérieur de ses matériaux ne peut pas être vue à l'œil nu. Ceci pose un grand problème dans l'industrie de matériaux de construction surtout quand ses matériaux sont utilisées dans des applications qui nécessitent des pièces parfaites sans trous ni fissures à l'intérieur, comme par exemple dans la construction des grands fours dans lesquels les briques en céramique peuvent exploser avec la chaleur si elles sont défectueuses.

L'objectif de cette thèse est de proposer un banc de réflectométrie expérimental afin d'obtenir d'un côté une imagerie 3D des matériaux et d'en détecter leur éventuels défauts et d'un autre côté de déterminer l'indice de réfraction des matériaux.

Donc, dans un premier temps il faut déterminer le domaine fréquentiel qui permet aux ondes de pénétrer dans ces matériaux et qui permet d'obtenir une

meilleure résolution avec un coût bas pour répondre à notre problématique.

L'étude concerne des défauts tels que des trous et des fissures, qui sont de l'ordre du millimètre. Pour pouvoir les distinguer, il existe deux solutions basées soit sur le mode impulsion ou sur le mode à ondes continues. Dans notre cas, nous avons choisi la solution basée sur les ondes continues avec une modulation de fréquence pour réaliser un radar FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) dans le domaine Térahertz.

Le radar FMCW se base sur les réflexions des ondes après chaque changement de milieux (changement d'indice de réfraction), une étude a montré que les systèmes radar à CW (onde continue) sont les mieux adaptés par rapport aux systèmes basées sur les impulsions pour des raisons de coût et de facilité d'utilisation industrielle.

Le domaine THz est une partie du spectre électromagnétique qui présente beaucoup d'intérêt pour la communauté scientifique et l'industrie. À cheval entre les micro-ondes et l'optique, ses propriétés particulières lui confèrent des atouts qui semblent répondre aux besoins technologiques d'un bon nombre d'applications. Le rayonnement THz reste plus ou moins directif et peut ainsi être manœuvré au moyen des techniques optiques pour la constitution d'image. Ces ondes sont pénétrantes aux matériaux isolants qui peuvent être opaques dans le visible, l'onde THz est profitable à l'imagerie, la spectroscopie pour la sécurité

notamment dans les contrôles aéroportuaires. De plus, incluant un rayonnement peu énergétique et non-ionisant, il reste non destructif au contact de la matière ce qui laisse envisager des applications en industrie comme le contrôle de qualité.

Aussi, beaucoup de molécules et de matériaux possèdent des signatures spectrales particulières dans le domaine THz ce qui attribue à cette technologie une capacité d'identification et de caractérisation des matières, souvent employées en astronomie notamment pour l'analyse de matières dans le milieu interstellaire d'où l'intérêt d'utiliser ce domaine dans notre système.

Dans ce manuscrit, nous allons présenter un état de l'art des systèmes d'imagerie 3D. Nous allons présenter différents systèmes qui contiennent plusieurs problèmes dans le but de montrer l'originalité de notre travail. Par la suite aussi nous allons présenter les différents composants de notre système radar et justifier le choix de notre bande passante (75-110 GHz). Ensuite, nous présenterons des solutions de traitement de signal pour tous les problèmes de non-linéarité de puissance et de réflexions parasites qui limitent la qualité des images 3D construits.

Par le biais de notre système, nous allons montrer la possibilité de mesurer l'indice de réfraction des matériaux dans cette bande de fréquence et l'application du traitement de signal pour améliorer la résolution. Cette technique de mesure d'indice de matériaux avec notre système transportable peut résoudre

plusieurs problématiques d'ordre industrielles et agronomes comme la possibilité de savoir si un raisin est mûr sans l'endommager ou bien détecter l'état solide ou liquide d'un matériau comme la paraffine qui est très utilisée dans le stockage d'énergie d'où la nécessité de connaître son état.

Notre manuscrit sera organisé de la manière suivante :

— Le premier chapitre présente le contexte de l'étude. Il donne notamment une synthèse bibliographique sur l'aspect imagerie 3D et le domaine Térahertz, ensuite les différents systèmes radar avec leurs définitions, leurs principes et une synthèse de comparaison. Après nous allons montrer le résultat des tests expérimentaux qui justifie le choix de la bande de fréquence du radar développé. Ce chapitre se termine par le positionnement de la thèse : problématiques et objectifs.

— Le deuxième chapitre est dédié à la présentation de tous les éléments de notre système radar proposé. Ensuite nous allons présenter les premiers résultats du Teflon comme matériau de test, en montrant les techniques de traitement de signal pour améliorer le rapport signal à bruit et pour bien visualiser tous les défauts. Dans la fin de ce chapitre, nous allons montrer des résultats de tomographie des pièces de test sur lesquels nous avons un problème de redondances des signaux détectés.

— Le troisième chapitre décrit la solution qui permet de visualiser clairement

sans bruit les défauts à l'intérieur des matériaux en se basant sur un signal de référence, nous allons donc ajuster les techniques de traitement de signal proposées précédemment. Ensuite, nous allons montrer les performances de notre système d'imagerie 3D en résolution longitudinale et transversale.

— Le dernier chapitre présente la méthode de mesure d'indices de réfractions des matériaux dans cette bande de fréquences. Comme échantillon de test, nous allons travailler sur la paraffine afin de voir si son état physique peut être déterminé et comment nous pouvons calculer le pourcentage de la paraffine en état liquide dans une pièce de paraffine.

Enfin, nous allons parfaire ce manuscrit par une conclusion sur les travaux réalisés et les perspectives répondant à de nouvelles problématiques soulevées dans cette étude.

Chapitre 1

L'imagerie 3D

Dans ce premier chapitre, nous présentons le contexte de l'étude avec une synthèse bibliographique sur l'aspect imagerie 3D et le domaine Térahertz. Ensuite nous définissons les différents systèmes radar qui existent dans l'industrie et la littérature. Leurs principes sont présentés et leurs avantages et inconvénients sont comparés. Enfin, une expérimentation en transmission sur des pièces en céramique est présentée afin de justifier le choix de la bande de fréquence du radar développé.

L'imagerie 3D des matériaux, des humains ou plus généralement à travers les milieux diélectriques opaques, est devenue un sujet de recherche stratégique, compte tenu de son utilisation dans plusieurs applications de sécurité et de défense. Il s'agit de la détection et la localisation des cibles potentielles cachées, par exemple sous des vêtements ou à l'intérieur des matériaux ou des milieux à risques.

1.1 Application de l'imagerie 3D

Parmi les applications de l'imagerie 3D nous trouvons :

1.1.1 La protection civile

Une première application est la détection de cibles ensevelies sous terre ou sous les décombres. Dans un contexte de sécurité militaire, de telles cibles

peuvent prendre la forme de mines ou toutes autres charges explosives, de cache d'armes et de tunnels. Pour d'autres applications, il s'agit de canalisation et de câbles enterrés. De tels systèmes sont souvent dénommés radars à pénétration de sol (GPR, en anglais, Ground Penetrating Radar) à base d'impulsions. Les points critiques pour de telles applications sont liés aux caractéristiques de la propagation du rayonnement électromagnétique à travers le sol, et à l'interface entre l'air et le sol (fréquence, propriétés du sol,...)[1, 2].

1.1.2 Les contrôles de sûreté

Un autre débouché est la détection des armes cachées (fusils, couteaux ou explosifs) transportées par une personne sous les vêtements ou cachées dans les bagages. Compte tenu de la grande variété de formes, des orientations d'observation et des méthodes de déguisement, ces cibles sont mieux évaluées par l'observation directe des images acquises par des technologies de détection avancées. Les ondes Térahertz peuvent pénétrer de nombreux matériaux non métalliques tels que le papier, le tissu, le cuir. Elles peuvent donc être facilement utilisées dans les systèmes d'imagerie de détection des armes dissimulées. Toutefois, afin de distinguer de façon fiable les menaces réelles des autres objets fréquemment transportés comme les téléphones cellulaires, les stylos et les montres, des images de haute résolution sont nécessaires.[84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92]

1.2 Caractérisation des matériaux

L'imagerie 3D des matériaux est une application nécessitant un grand pouvoir de pénétration et de résolution afin de détecter les défauts et les fissures en position et en dimension dans des matériaux, ou tout simplement mesurer les indices de réfraction de ces derniers. Cette application est très demandée dans l'industrie de matériaux surtout soit pour le contrôle des bâtiments ou dans la recherche de précision de construction.

Pour réaliser l'imagerie 3D des matériaux , il existe plusieurs solutions s'appuyant sur le principe du radar en transmission et en réflexion.
Parmi les systèmes qui peuvent réaliser l'imagerie 3D des matériaux nous trouvons :

1.2.1 La radiographie

Avant de présenter la radiographie il faut commencer par définir l'onde électromagnétique.
Une onde électromagnétique est due à un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires oscillants en phase figure 1.1. Elle se propage dans le vide à la vitesse de la lumière (c = 299792458 m/s). Dans le cas d'une onde sinusoïdale ou monochromatique, elle a une fréquence ν définie et une période $T = 1/\nu$. La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde en une

période, soit $\lambda = cT = c/\nu$.

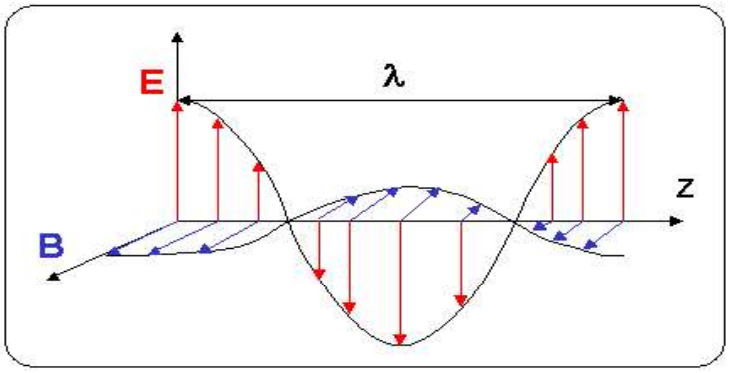


FIGURE 1.1 – Structure à un instant donné des champs électriques et magnétiques, E et B, de l'onde se propageant dans la direction z.

Une onde électromagnétique est généralement constituée d'une superposition d'ondes de fréquences différentes. La répartition quantitative de la puissance propagée selon la fréquence est appelée le « spectre » de l'onde.

Le modèle corpusculaire du rayonnement électromagnétique est mieux adapté aux rayonnements de hautes fréquences. En effet, nous considérons qu'un faisceau est constitué de photons : des particules sans masse qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Chaque photon transporte une quantité d'énergie E proportionnelle à la fréquence de l'onde $E = h\nu$, où h est la constante de Planck [3].

Les ondes électromagnétiques sont classées et nommées en fonction de leur domaine de fréquence comme nous pouvons voir sur la figure 1.2. Bien que de

même nature, les ondes, d'un domaine de fréquence à l'autre, correspondent à des mécanismes d'émission différents et exigent des techniques de détection variées.

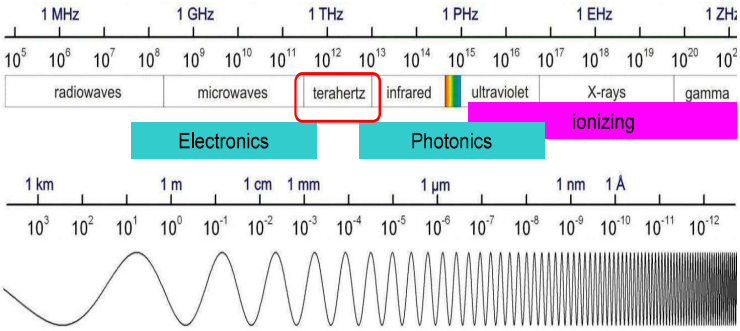


FIGURE 1.2 – Le spectre électromagnétique.

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique, au même titre que la lumière visible, l'ultra-violet, l'infra-rouge, les micro-ondes, les ondes radio ou les rayons gamma.

Nous appelons rayons X les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 10^{16} Hz et 10^{20} Hz. Les longueurs d'ondes sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-12} m, et les énergies des photons X sont comprises entre 40 et 4.10^5 eV (1 eV correspond à $1,6.10^{-19}$ J, c'est l'énergie d'un photon dans l'infra-rouge). Ces énergies sont de l'ordre de grandeur des énergies de liaison des électrons des couches internes des atomes (de l'ordre du keV). Le domaine des rayons X se situe entre l'ultra-violet et les rayons gamma.

Lors de la propagation à travers un milieu matériel, les rayons X peuvent être déviés par les atomes du milieu (diffusion) ou bien absorbés. C'est ce dernier phénomène qui est mis en jeu dans les applications médicales de la radiographie. Dans la représentation corpusculaire, un photon entre en collision avec les électrons liés aux atomes du milieu matériel traversé (électrons des couches internes). Si l'énergie E du photon incident est suffisante (supérieure à l'énergie de liaison W de l'électron), il peut arracher un électron du cortège atomique. Cet électron, appelé « photo-électron », est éjecté avec l'énergie cinétique $E_{cin} = E - W$. Les photo-électrons transfèrent ensuite leur énergie cinétique au milieu en provoquant des ionisations le long de leurs trajectoires.

Ce phénomène d'ionisation dû aux rayons X est à l'origine de beaucoup de leurs effets, en particulier biologiques. Ces ionisations déclenchent une succession de réactions physico-chimiques pouvant aboutir à une modification des fonctions et des structures cellulaires. Ce sont donc les photo-électrons qui, par les dommages qu'ils créent dans les tissus vivants, sont la cause des lésions provoquées par les rayons X.

Le principe est celui des ombres chinoises. Le faisceau de rayons X produit par un tube à rayons X est émis en direction de la zone du corps humain à examiner, et son intensité est « modulée » par l'absorption différentielle des organes traversés. L'image est recueillie en sortie sur un détecteur (plaque photographique

par exemple).

Le coefficient d'atténuation des rayons X dépend de la composition chimique des tissus traversés. Il est élevé pour l'os, moyen pour les tissus mous et faible pour la graisse. Les os contiennent en effet des sels minéraux (phosphore, calcium, magnésium) qui sont des éléments de numéro atomique plus élevés que les constituants principaux des tissus mous (oxygène, carbone, hydrogène, azote...). Ils absorbent donc plus les rayons X.

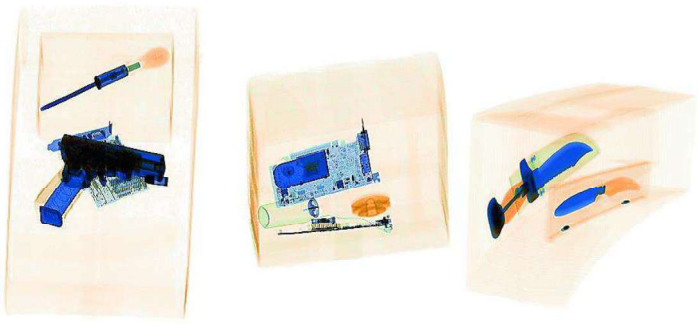


FIGURE 1.3 – Images à rayons X de trois colis différents. L'identification des objets est basée sur la présentation en trois couleurs [7].

Les images de la figure 1.3 montrent clairement le contenu des colis. Les différentes couleurs des images indiquent la nature matérielle, ce qui peut être identifié comme organique inorganique ou métallique. En ce qui concerne la figure 1.4, les poudres ne sont pas bien identifiées dans la première image et il n'y a aucune information sur le contenu chimique des deux bouteilles.

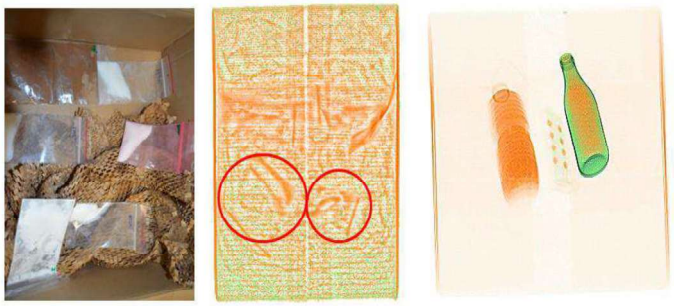


FIGURE 1.4 – Images photographiques et radiographiques de colis à contenu organique : poudre et liquide [7].

L'inconvénient des systèmes d'imagerie basé sur les rayons X est que la cible doit être proche du système et donc ils ne fonctionnent pas pour l'imagerie à distance. De plus, le phénomène d'ionisation déclenche une succession de réactions physico-chimiques pouvant aboutir à une modification des fonctions et des structures cellulaires de la cible.

De plus, la loi de Rayleigh indique que l'intensité d'une onde électromagnétique diffusée par un milieu est inversement proportionnelle à la 4ème puissance de sa longueur d'onde λ ce qui signifie que plus la longueur d'onde est grande, moins le rayonnement est diffusé et donc mieux transmis.

1.2.2 Technologie nucléaire

Les technologies de détection nucléaire sont utilisées dans l'imagerie des matériaux épais et de haute densité. Ils impliquent deux aspects différents : La

détection non neutronique et la détection neutronique.

La détection non neutronique peut être basée sur le sondage de l'atome avec des particules, telles que des photons et des protons, qui interagissent avec des atomes et émettent une signature en fonction des propriétés des noyaux cibles. Les techniques neutroniques consistent à irradier la cible par un flux neutronique. L'interaction des neutrons avec les noyaux cibles génère un rayonnement secondaire, qui est détecté et analysé. Cette méthode est essentiellement utilisée pour identifier le contenu chimique relatif d'éléments spécifiques comme le carbone, l'oxygène, l'aluminium, le soufre et de nombreux autres éléments [8, 9, 10]. Les principaux avantages de l'utilisation des technologies nucléaires sont :

A) la capacité de profondeur de pénétration élevée : par exemple dans les métaux, c'est la principale raison de son choix pour le dépistage des conteneurs.

B) La spécificité de différencier les matériaux organiques et inorganiques.

C) La facilité d'implémentation dans les espaces de travail en raison des systèmes portables fabriqués.

Cependant, les sources de neutrons produisent des doses de rayonnement nuisibles si elles ne sont pas protégées correctement ou à l'arrêt correct. De plus, la présence de matières nucléaires sur un site augmente la menace des terroristes qui tentent de voler le matériel ou de le disperser de façon explosive

[11, 12, 13, 14].

1.3 La Technologie Térahertz

1.3.1 Définition

De nos jours, nous utilisons de très nombreux mécanismes physiques issus de l'interaction entre un matériau et les diverses parties du spectre électromagnétique. Cependant, à l'exemple de la région X qui fut longtemps méconnue, une autre partie du spectre électromagnétique est restée longtemps inaccessible. Cette région située vers les ondes sub-millimétriques a été qualifiée de « Gap Térahertz», la cause de ce gap était le manque de sources et de détecteurs exploitables aux fréquences concernées. La figure 1.2 montre la place occupée par le domaine Térahertz dans le spectre électromagnétique et les relations de correspondance entre fréquence, énergie et longueur d'onde. Nous limiterons son intervalle de définition entre 100 GHz et 10 THz (1 THz = 10^{12}Hz), soit en terme de longueur d'onde 30 μm et 3 mm.

Le domaine Térahertz, de par sa position entre l'optique et les hyperfréquences s'avère un espace pluridisciplinaire. En effet, les propriétés physiques d'un matériau aux longueurs d'onde Térahertz présentent un intérêt pour la communauté scientifique car elles sont restées discrètes avant l'utilisation récente de spectromètres Térahertz.

1.3.2 Avantages

Les ondes de THz partagent les caractéristiques des domaines des infrarouges et des micro-ondes, à savoir :

A) Non ionisants : les photons dans la région de THz ont des énergies faibles, allant de 0,41 meV à 124 meV. Cette faible énergie n'a pas d'effet ionisant sur les tissus biologiques [15].

B) Signature chimique / empreintes digitales : solide, liquide ou gaz, plusieurs matériaux ont leur signature unique après l'interaction avec les ondes THz, ce qui permet leur identification. Cette propriété est largement exploitée dans les applications de spectroscopie THz comme par exemple le cas de l'identification des poudres [7].

C) Transmission / pénétration élevée dans les matériaux diélectriques : de nombreux matériaux amorphes sont transparents pour les ondes THz, comme le plastique, le textile, le papier, etc. Cela permet des applications d'inspection sans contact d'imagerie.

D) Absorption de liquides polaires tels que l'eau : cette particularité met en évidence le potentiel des ondes THz dans des applications spécifiques. En outre, étant absorbées par l'eau, les ondes THz ne peuvent pas pénétrer plus de plusieurs dizaines de microns à travers la peau, par exemple.

Une des principales limites des ondes Térahertz est qu'elles ne peuvent pas traverser le métal. Mais la combinaison de toutes les autres caractéristiques mentionnées précédemment, fournit aux rayonnements THz un potentiel élevé dans de nombreuses applications. Cependant, les deux systèmes de génération et de détection de THz doivent être robustes pour rendre les solutions THz fiables.

1.3.3 Les Défis

La position de la bande THz dans le spectre EM est située entre la bande micro-ondes et la bande infrarouge, ce qui nous offre la possibilité de trouver des dispositifs électroniques ou optiques pour les processus de génération / détection. Malgré le développement avancé des systèmes THz, le problème fondamental de nos jours est la limitation de la puissance émise par les sources THz. Par conséquent, de nombreux champs d'application n'ont pas changé jusqu'aux rayonnements THz et la gamme EM de 0,3 à 10 THz est toujours considérée comme un écart technologique en raison de la quantité de sources peu coûteuses à faible consommation disponible dans cette gamme. Comme le montre la figure 1.5 [16] qui représente la puissance de sortie par rapport à la fréquence pour de nombreuses sources de Térahertz, la puissance générée diminue de façon spectaculaire avec la fréquence et limite les choix de bandes de fréquences accessibles avec une puissance acceptable pour les applications. Pourtant, les scientifiques continuent leurs efforts pour obtenir de meilleures performances sur les appa-

reils THz. À l'heure actuelle, les défis consistent au développement de sources compactes de puissance à haut rendement et de détecteurs compacts à haute sensibilité, qui devraient également être portables, accordables et peu coûteux.

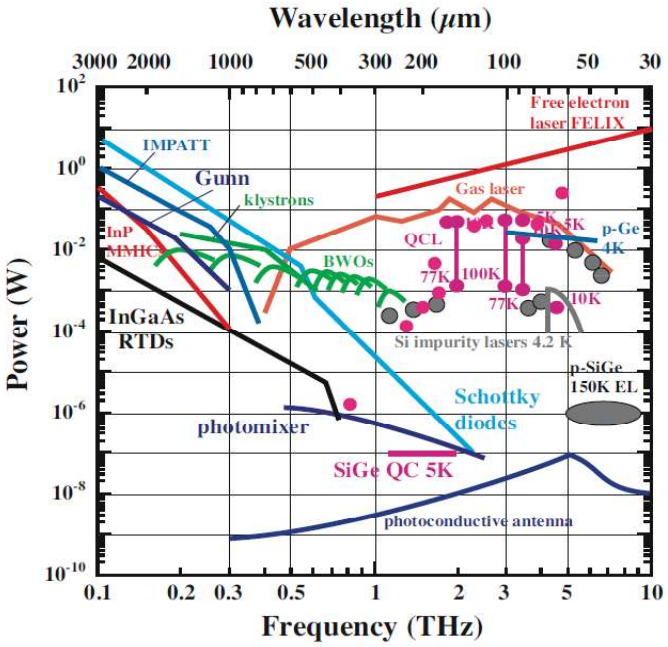


FIGURE 1.5 – Liaison logarithmique de la puissance émise en fonction de la fréquence de différentes technologies sources THz [33].

1.3.4 Domaines d'application

Le Térahertz s'intéresse beaucoup aux applications de la biologie, de la médecine et de la biomédecine en raison des niveaux d'énergie plus faibles du rayonnement Térahertz qui limitent les dommages aux cellules et aux tissus en

raison des effets thermiques. Les effets de rayonnement de deux fréquences, 120 et 130 GHz, sur des échantillons biologiques sont discutés par Scarfi et al [15] et aucun impact dangereux n'est démontré. L'imagerie et la spectroscopie de Térahertz ont déjà été appliquées par différents groupes du monde entier pour la reconnaissance des états structurels des protéines [17], l'analyse des composants de l'ADN [18] et l'exécution du séquençage de l'ADN de labelfree [19].

1.3.5 Comparaison des Technologies

Une comparaison des avantages et des inconvénients de chaque technologie discutée précédemment est résumée dans le tableau 1.1.

Parmi les techniques de détection pour l'imagerie 3D, la radiographie est la plus efficace, avec un balayage rapide, fournissant des images 3D détaillées. Cependant, les rayons X peuvent aboutir à une modification des fonctions et des structures cellulaires des cibles à caractériser et en plus pour l'imagerie 3D les systèmes en rayons X nécessitent que la cible soit en contact et donc cela ne permet pas de réaliser des mesures à distance.

Pour la technologie nucléaire les sources de neutrons produisent des doses de rayonnement nuisibles si elles ne sont pas protégées correctement, donc c'est dangereux et compliqué. Ainsi, l'imagerie spectrale THz est très utile pour les mesures à distance et n'est pas dangereuse même sur les humains. Pour ces raisons, l'imagerie THz, a été étudiée dans ce travail, en tant que technologie

Technologie	Avantage	inconvénient
Technologies nucléaires	Pénétration élevée. Identification élémentaire. Possibilité de pénétrer profondément dans les conteneurs.	Trés compliqué et dangereux pour la santé.
Rayons X	Haute résolution. Pénétration élevée.Tridimensionnel Représentation d'objets.	Aucune identification chimique des matériaux. Dangereux pour la santé lorsque les personnes sont exposées aux rayons X. pas de mesure à distance.
Térahertz	Haute résolution. mesure sans contact. Tridimensionnel Représentation d'objets.	la difficulté à obtenir aujourd'hui une source Térahertz de forte puissance et d'aussi bonne résolution que les rayons X.

TABLE 1.1 – Avantages et inconvénients fondamentaux de plusieurs technologies utilisées pour l'imagerie 3D.

complémentaire aux rayons X.

Cette fenêtre fréquentielle : le Térahertz (THz) située entre le domaine optique et le domaine des micro-ondes sera alors la zone fréquentielle de notre système pour les raisons que nous avons présentées.

1.3.6 L'imagerie Térahertz

Il existe deux types d'images Térahertz, continues et pulsées. Dans les deux cas, des impulsions Térahertz à large bande ou des ondes continues sont générées, orientées pour interagir avec l'échantillon et capturées soit dans la transmission,

soit en mode réflexion. En mode de transmission, le détecteur se trouve de l'autre côté de l'échantillon pour détecter les ondes. En mode réflexion, le détecteur se trouve du même côté que l'échantillon, car l'émetteur est positionné de manière à capturer la réflexion à partir de l'échantillon.

Au début du domaine THz, la faisabilité de l'imagerie THz avec système pulsé a été démontrée [27]. Le développement de systèmes continus, ainsi que des lasers en cascade quantique, a ouvert de nouvelles portes pour l'imagerie THz. Alors que l'imagerie à impulsions THz a l'avantage de fournir une image avec une large information de fréquence comprise entre 0,1 et 5 THz, l'avantage de l'imagerie THz à ondes continues réside dans le fait qu'elle possède une densité spectrale de puissance supérieure [29]. Le problème avec ces systèmes est la difficulté d'obtenir une puissance de sortie élevée pour les fréquences plus élevées. La puissance de sortie la plus élevée accomplie a été montrée par des chercheurs japonais [21]. Ils ont signalé avoir atteint 30 mW à 3,1 THz avec des lasers en cascade quantique. C'est largement élevé à cette fréquence.

1.3.7 L'imagerie avec des impulsions Térahertz : THz-TDS

La spectroscopie de domaine temporel Térahertz (THz-TDS) est une technique spectroscopique à large bande basée sur l'utilisation d'impulsions optiques ultra-courtes pour générer et détecter une impulsion cohérente THz. Par cette

méthode, l'amplitude et la phase du champ électrique THz sont mesurées. Cette technique spectroscopique est apparue au milieu des années 1980 dans les travaux de Auston [34], elle est devenue une technique applicable à l'analyse des matériaux avec le premier système TDS conçu et rapporté en 1989 [35]. Récemment, la spectroscopie Térahertz dans le domaine temporel a trouvé des applications dans divers domaines de la science des matériaux, tels que la détection de gaz [36, 37], la mesure des propriétés matérielles de solides tels que les polymères [38], les supraconducteurs [39, 40] ainsi que la spectroscopie de liquides [41, 42], etc.

Dans l'imagerie pulsée de Térahertz, les impulsions peuvent être générées en utilisant des antennes non linéaires ou dipolaires. Ces impulsions sont destinées à interagir avec un échantillon, et sont ensuite observées dans le domaine temporel. Une configuration typique d'imagerie THz est illustrée sur la figure 1.6 [43].

Le système est basé sur la génération d'impulsions THz et la détection grâce à des antennes photoconductrices excitées par un laser femtoseconde. Le faisceau THz est focalisé à l'emplacement de l'échantillon en utilisant quatre miroirs paraboliques permettant la caractérisation de quelques mm^2 de surface. Les impulsions THz détectées sont numériquement transformées dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier pour obtenir leur module et

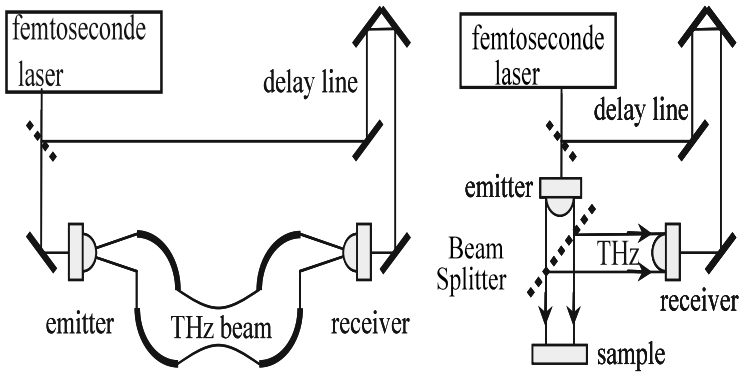


FIGURE 1.6 – Configuration de l'imagerie THz-TDS [source : [43]].

leur phase. Un spectre de puissance typique détecté sans échantillon est montré dans la figure. 1.7 [43] .

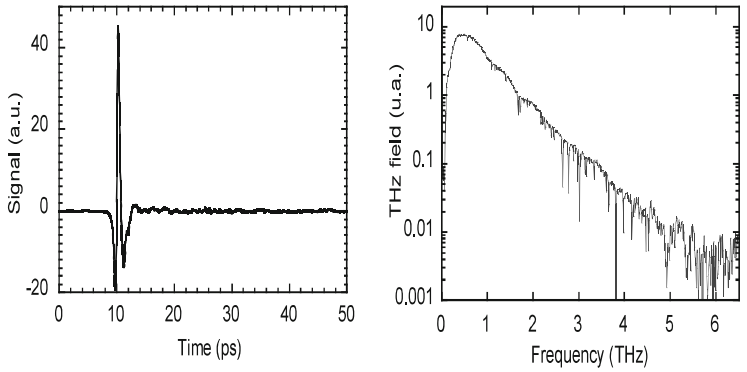


FIGURE 1.7 – Impulsion Térahertz et son spectre [source : [43]].

1.3.8 L'imagerie en ondes continues CW

Les systèmes d'imagerie à ondes continues sont des systèmes de mesure à courte portée. Dans son fonctionnement, le système à CW transmet continuellement des ondes électromagnétiques modulées pour détecter des cibles dans la

zone environnante avec une puissance très faible. Par conséquent, le niveau de puissance des signaux arrivants sur le récepteur ou l'antenne Rx est également très faible [26].

Une étude antérieure a révélé que le système à CW est mieux adapté que les TDS pour les raisons suivantes : il obtient un pourcentage plus élevé de cibles valides, donne de faibles taux d'alarmes fausses, il est plus facile à utiliser à courte portée, moins complexe, plus sécurisé et à moindre coût [25]. Dans notre travail nous sommes particulièrement intéressés à une onde continue modulée en fréquence pour développer un radar FMCW (Frequency Modulated Continuous waves). Le radar émet une onde sinusoïdale temporelle avec une variation linéaire de sa fréquence. Les radars FMCW THz ont déjà été développés par plusieurs équipes de recherche pour la détection d'objets et d'armes dans les aéroports [27, 28]. Avec ces différents systèmes, l'imagerie 3D est réalisée uniquement par pénétration du signal THz au niveau du tissu. Il permet de visualiser des objets cachés sous vêtements [29, 30], mais ne permet pas de réaliser une image 3D réelle d'un matériau et de détecter ses défauts comme nous le proposons dans notre système. La figure 1.8 présente un exemple des résultats des travaux des chercheurs qui ont développé un système d'imagerie 3D pour une utilisation dans les aéroports, afin de détecter les armes cachées. Dans ce système, le principe du radar FMCW est utilisé avec une fréquence de 600 GHz pour avoir une

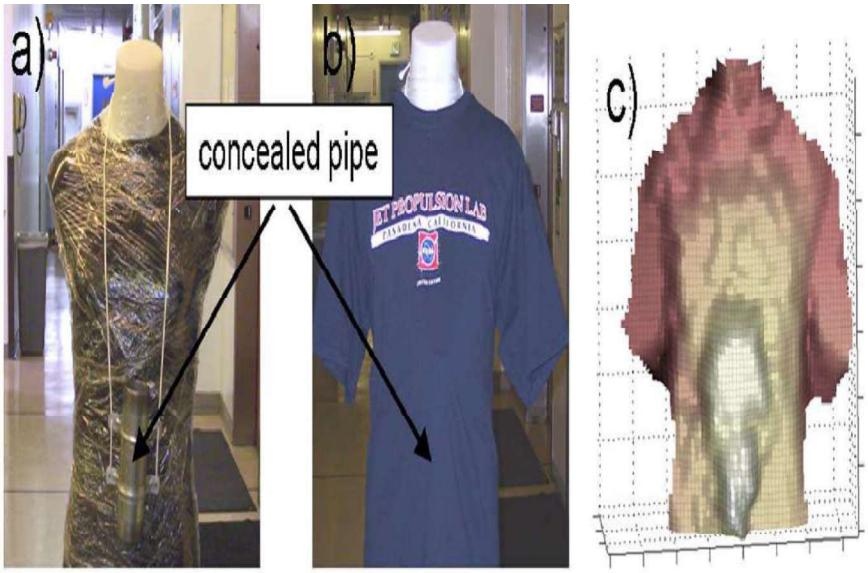


FIGURE 1.8 – Radar FMCW à 300 GHz pour détecter les cibles cachées [32], a) et b) présentent un mannequin avec une pièce métallique, c) présente une imagerie 3D ou nous voyons clairement qu'il y a un object caché..

résolution inférieure à 1 cm pour des cibles placées de 4 m du radar.

Ce système détecte les objets métalliques cachés sans l'utilisation de la notion de pénétration dans les matériaux, il se base sur la transparence des tissus dans le domaine Térahertz, et pour la construction de l'image le système se base sur les réflexions les plus fortes.

Dans notre projet le but est de pénétrer dans des matériaux et caractériser ce qui est à l'intérieur.

Nous présentons sur le tableau 1.2 une comparaison entre le TDS et le FMCW

.

	TDS	FMCW
Traitement	Capacité de traitement liée à la fréquence d'échantillonnage	Conversion directe de la fréquence en distance
Détection	Zone aveugle à faible distance	Pas de zone aveugle, Détection continue
Mesure de vitesse	Mesure directe de vitesse	L'effet Doppler nécessite l'utilisation des rampes croissantes et décroissantes
Mesure de distance	Pour les grandes résolutions il faut des impulsions étroites	La résolution est liée à la bande passante
Coûts et taille de système	Pour les grandes résolutions le couts est très élevé et le système est encombrant	Moins couteux et moins encombrant

TABLE 1.2 – Principales caractéristiques des deux types de radar Pulse et FMCW.

En conclusion, le système du FMCW permet la détection la plus simple des distances en étant moins couteux et moins encombrant, mais avec une résolution limitée, contrairement au TDS qui est plus chére et encombrant.

1.4 Bande fréquentielle adaptée à la pénétration des matériaux de construction

Dans le domaine Térahertz plus nous montons en fréquence plus la résolution sera meilleure mais de l'autre côté, chaque matériau utilisé suit la loi de la diffraction en $1/\lambda^4$ dite de Rayleigh.

Des mesures préliminaires de transmission ont été effectuées par J.F. Roux (IMEP-LAHC) dans le cadre d'une collaboration en utilisant une configuration TDS pour identifier la gamme de fréquences de transparence pour les matériaux de construction typiques. La figure 1.9 présente les résultats de deux types de matériaux céramiques, appelés #A et #B, en utilisant un système TDS pour mesurer le spectre de transmission du matériau. Un spectre de puissance typique détecté sans échantillon est illustré sur la figure 1.9 (courbe noire).

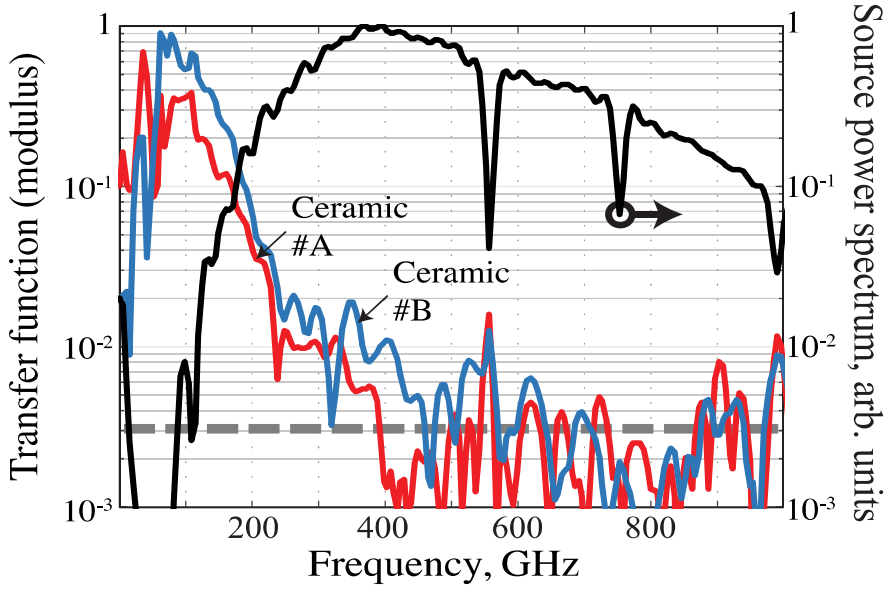


FIGURE 1.9 – Mesure de transmission de deux types de matériaux céramiques (# A et # B) par TDS , montrant le niveau de bruit estimé à 500 GHz

Les échantillons de céramique ont été préparés sous la forme de plaques parallèles et ont été caractérisés dans une expérience de transmission. Le module

de fonction de transfert de la céramique de 6,5 mm de long du type #A et de 5,6 mm de long du genre #B est représenté à la figure 1.9 (courbes rouges et bleue).

la dynamique est estimée à 60 dB et s'étend jusqu'à 4 THz où le signal atteint le niveau de bruit (non représenté). Dans la plage de fréquences inférieure, la densité de puissance du signal diminue rapidement et le niveau de bruit augmente, de sorte que la dynamique est fortement réduite au-dessous de 150 GHz. Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante dans des conditions d'humidité normales, conduisant à des lignes d'absorption de vapeur d'eau, comme nous pouvons l'observer autour de 550 et 750 GHz.

A partir de 400 GHz nous remarquons que le niveau de puissance détecté est en dessous du bruit de fond (courbe pointillée grise). Il est clair que ces échantillons atténuent le signal pour les fréquences supérieures à 250 GHz, où la transmission est environ 1 %. Nous pensons que les pertes de transmission sont principalement dues à la diffraction de l'onde THz dans le matériau. En effet, les matériaux de construction présentent des inhomogénéités à des tailles presque aussi grandes que la longueur d'onde, conduisant ainsi à de fortes pertes par diffraction de Rayleigh et Mie. Cette hypothèse est confirmée par le fait qu'au fur et à mesure que les fréquences atteignent 300 GHz et plus, le signal transmis par les échantillons passe en dessous du niveau de bruit de détection. A noter

que le signal transmis est également réduit en raison des différences d'indice optique air / céramique / air.

Les configurations TDS et FMCW (voir chapitre 4) ont permis de mesurer un indice optique proche de 2,84 (+/- 0,02 dans la bande des 75-110 GHz pour la céramique #A) pour ces céramiques, une atténuation que les lois de Fresnel seules ne peuvent expliquer (les pertes de transmission de Fresnel seraient de 5 dB pour les deux interfaces) lorsque la fréquence augmente. Pour la partie inférieure du spectre THz (c'est-à-dire au-dessous de 200 GHz), la transmission des échantillons est supérieure ($> 0,1$), mais l'étude de leurs propriétés devient peu fiable en raison de la densité de puissance réduite de l'impulsion picoseconde THz pour les fréquences au-dessous de 100 GHz.

Si ces mesures TDS préliminaires ont été effectuées sur deux types de céramique uniquement, nous nous attendons à un comportement similaire pour d'autres matériaux de construction, dans la mesure où ils sont secs, non conducteurs et avec une granulométrie similaire à celle de la longueur d'onde du rayonnement. Une étude exhaustive des matériaux devrait être menée pour évaluer leurs propriétés à ces fréquences, mais toutes les mesures TDS rapportées des matériaux de construction [110, 111, 113] ont montrée que l'atténuation est forte et augmente avec la fréquence. L'étude de matériaux multicouches serait également intéressante, comme par exemple pour les diffuseurs composites diélectriques /

métalliques ayant des formes arbitraires [92].

En conclusion, il apparaît que la gamme de fréquences basses THz est plus utile pour la caractérisation et l'inspection des matériaux de construction, car l'atténuation due à la diffraction est plus faible. Cependant, dans les systèmes TDS, pour des raisons physiques liées à la courte durée de l'impulsion THz photo-générée, la densité spectrale de puissance maximale des sources est généralement supérieure à quelques centaines de THz et ne correspond pas à la gamme de fréquences considérée dans l'étude. De plus, les sources THz utilisées dans les systèmes TDS sont basées sur des techniques de photo-mélange, avec une puissance de sortie bien inférieure à celle disponible en utilisant des chaînes multipliées en fréquence pilotées par un synthétiseur, ce qui motive l'utilisation de cette dernière source pour les mesures de transmission.

1.5 Les systèmes Radar FMCW

Comme son nom l'indique, un radar (RAdio Detection And Ranging) est un système utilisant des ondes électromagnétiques (RAdio) pour détecter la présence de cibles et les localiser en distance, vitesse, angles. Les systèmes radar sont couramment utilisés pour la surveillance de domaines, aérien, terrestre, ou maritime.

Le principe de base des systèmes radars peut être résumé en quatre étapes :

émission et propagation d'une onde électromagnétique, rétro-diffusion de cette onde par une cible sous forme d'écho de l'onde, réception et analyse du signal reçu par le radar.

1.5.1 Interférence instantanée entre deux ondes

Avant de présenter les systèmes radar à ondes continues nous allons expliquer la notion de battement ou interférence instantanée entre deux ondes qui est la base de notre système et de tous les systèmes radar à ondes continues.
La différence de fréquence entre le signal émis et reçu (réfléchi) est obtenue par la somme des deux signaux, produisant un nouveau signal, c'est ce qu'on appelle un battement qui peut être utilisé pour déterminer la distance et/ou la vitesse d'une cible. Le phénomène de battement est une interférence instantanée qui intervient entre deux ondes de fréquences légèrement différente et elle est caractérisée par une fréquence égale à la différence des deux fréquences.
Nous Pouvons alors montrer que si l'on appelle $E_1(t)$ et $E_2(t)$ les ondes sinusoïdales de référence émis et de réflexion en champ électrique :

$$E_1(t) = e^{i\omega_1(t)t} \tag{1.1}$$

$$E_2(t) = e^{i\omega_2(t)t} \tag{1.2}$$

Nous pouvons alors écrire que $E_{tot} = E_1(t) + E_2(t)$ et montrer que l'intensité lumineuse de l'onde mesurée par la photo-diode en réception (redressement) est proportionnelle au module du champ total au carré soit :

$$I_{mes}(t) = |E_{tot}|^2 = (E_0 e^{i\omega_1(t)t} + E_0 e^{i\omega_2(t)t})(E_0 e^{-i\omega_1(t)t} + E_0 e^{-i\omega_2(t)t}) \quad (1.3)$$

Enfin en posant $I_0 = E_0^2$ nous montrons que :

$$I_{mes}(t) = 2I_0(1 + cos(w_1(t) - w_2(t))) \quad (1.4)$$

Nous remarquons alors que le signal mesuré en sortie de photo-diode, est un signal sinusoïdal strictement positif dont la fréquence fondamentale représente le battement crée par la différence de distance entre le trajet de l'onde de référence et celui de l'onde réfléchie par la cible.

1.5.2 Radar CW

Le radar le plus simple consiste en un émetteur RF sans modulation de fréquences et un récepteur qui mélange le signal émis et le signal reçu. Si la cible a une vitesse par rapport au radar, le signal reçu aura une fréquence différente de celle du signal émis à cause de l'effet Doppler (L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps), le détecteur étant sensible à la différence de fréquences de ces deux signaux

reçus. Cette différence de fréquence est appelée "fréquence de battement", elle est proportionnelle à la vitesse de la cible selon l'équation suivante :

$$f_b = 2f_0\frac{v_r}{c} \tag{1.5}$$

f_0 est la fréquence de l'oscillateur local, v_r est la vitesse relative et c est la vitesse de la lumière. Ce système radar CW (continuous wave), ne fournit aucune information sur la distance, et son intérêt réside dans sa simplicité illustrée par la figure 1.10. Ce système se constitue d'un oscillateur de fréquences local qui génère le signal à envoyer, un circulateur qui permet au même temps d'envoyer le signal vers la cible et recevoir le signal réfléchi par cette dernière à l'aide d'une antenne et un amplificateur de puissance.

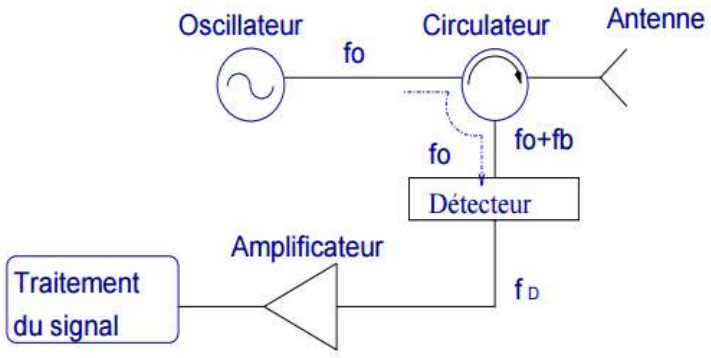


FIGURE 1.10 – Schéma d'un radar CW.

1.5.3 Radar FMCW

Dans le cas du radar FM-CW, la fréquence transmise change en fonction du temps d'une façon connue. Si nous voulons détecter une cible placée à une distance R, nous obtiendrons un signal réfléchi après un temps $T = 2R/c$, que nous mélangerons avec le signal transmis, produisant une fréquence de battement f_b comme dans les systèmes CW . Cette fréquence sera uniquement due à la distance de la cible, puisqu'il n'y aura pas d'effet Doppler car la cible ne bouge pas. Une fonction en dents de scie pour la modulation de fréquence est la plus simple et la plus souvent utilisée en émission. La figure 1.11 présente la forme du signal qui consiste à émettre une onde dont la fréquence instantanée évolue au cours du temps sur une bande B avec une période T appelé communément « chirp ». Le signal est linéaire et la fréquence instantanée est donnée par :

$$f(t) = f_0 + \frac{B}{T}t \tag{1.6}$$

Le signal émis s'écrit :

$$S_e(t) = A_0 sin(2\pi[f_0 t + \frac{B}{2T}t^2]) \tag{1.7}$$

avec A_0 présente l'amplitude du signal d'émission. Le signal reçu de la cible à une distance R est retardé par τ et s'écrit :

$$S_r(t) = B_0 sin(2\pi[f_0(t-\tau) + \frac{B}{2T}(t-\tau)^2]) \tag{1.8}$$

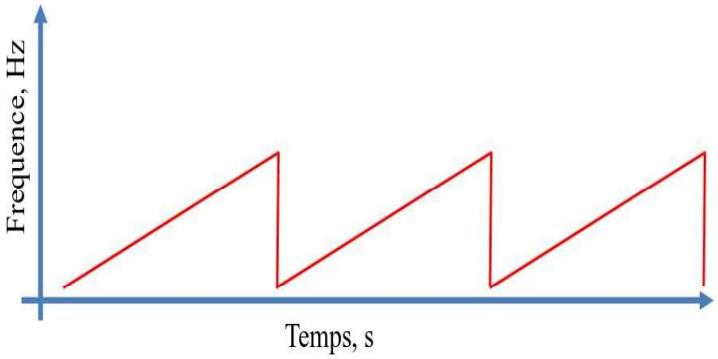


FIGURE 1.11 – Forme de signal radar FMCW.

avec $\tau = \frac{2R}{c}$ et B_0 présente la puissance du signal réfléchi.

Le retard entre le signal émis et le signal reçu se traduit par une différence de fréquence constante f_b, Le signal détecté est le produit des deux signaux :

$$S_b(t) = S_e(t).S_r(t) = B_0 cos2(\pi[\frac{2f_0R}{c} + \frac{2BR}{cT}t - \frac{B}{2T}(\frac{2R}{c})^2]) \qquad (1.9)$$

Le seul terme variant dans le temps est celui du milieu, $2BR/cT$ (pour une cible non mobile), le signal de battement sera donc :

$$f_b = 2BR/cT \qquad (1.10)$$

Lorsque l'objet de sondage a une vitesse radiale par rapport au radar, le décalage Doppler f_D modifie alors le résultat. En effet, la différence de fréquence f_b est à ce moment égale à $f_b + f_D$. Selon la direction du déplacement de la cible par rapport au radar, cette différence va varier :

— La fréquence relative de l'écho va diminuer si l'objet s'éloigne.

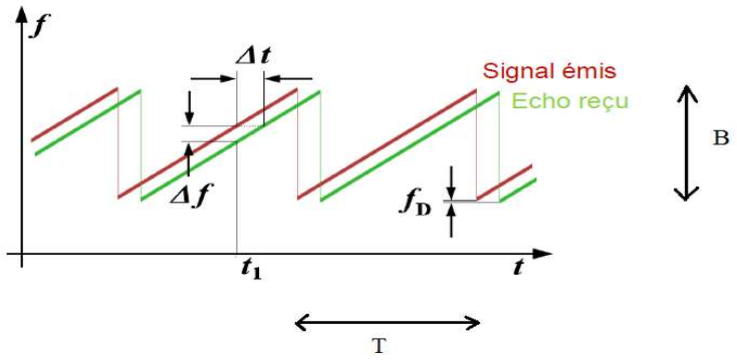


FIGURE 1.12 – Principe du radar FMCW.

— La fréquence relative de l'écho va augmenter si l'objet se rapproche.

Ainsi à la variation en dents de scie de la fréquence de la figure 1.12 va s'ajouter f_D (positif ou négatif). En utilisant une variation miroir de celle-ci, f_D se soustrait.

Il y a plusieurs types de modulations utilisées selon les besoins comme présentées sur la figure 1.13 :

— Modulation en dents-de-scie :

  Utilisée pour une grande portée du radar et dans une situation avec un minimum d'influence du décalage Doppler (ex. un radar de navigation maritime).

— Modulation carrée :

  Utilisée pour une mesure très précise de la distance à courte portée en comparant les retours de deux fréquences. Cependant, les signaux de plu-

sieurs cibles simultanées ne peuvent être séparés et la portée maximale non ambigüe est très petite.

— Modulation en escalier :

Utilisée dans les mesures par interférométrie, elle étend la portée maximale non ambigüe.

— Modulation triangulaire :

Permet une séparation facile de f_b et f_D (la valeur de f_D s'inversant entre la montée et la descente en fréquence).

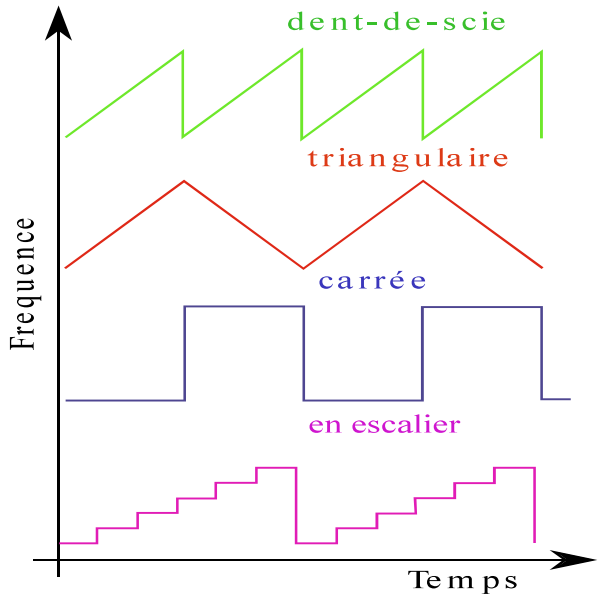


FIGURE 1.13 – Type de modulation du radar à onde continu.

Parmi ces quatre modulations de fréquences des systèmes radar FMCW nous avons utilisé la modulation dent-de-scie parce que notre application vise

la détection de plusieurs réflexions sur une cible fixe et surtout la simplicité du système et son coût.

1.6 Objectifs et besoin industriel

L'objectif de ce sujet de thèse est de réaliser un système transportable non encombrant d'imagerie 3D pour caractériser des matériaux de construction avec un coût faible et une résolution millimétrique afin de localiser les trous et les fissures, le système que nous avons choisi est le radar FMCW dans la bande passante 75-110 GHz qui est basé sur la réflexion et la pénétration des ondes dans les matériaux .

Pour ce type d'application nous avons plusieurs difficultés comme l'absorption des ondes dans les matériaux, les réflexions de parasites, la modulation d'amplitude, la diffraction des signaux ...

Aussi avec un tel système nous ne pouvons pas avoir une bonne résolution et une bonne profondeur de mesures ce qui nous oblige de faire un choix précis de la bande de fréquence utilisée.

Notre application peut résoudre plusieurs problèmes industrielles surtout dans le domaine de construction pour la maintenance des bâtiments, des ponts sans creuser ou laisser des traces, aussi nous pouvons mesurer l'indice de réfraction de plusieurs matériaux dans l'état solide et liquide sans changer ses propriétés

physiques.

1.7 Conclusion

Après avoir décrit les techniques de l'imagerie 3D les plus utilisées et présentées dans l'industrie et la littérature, nous pouvons dire que le domaine Térahertz est le plus adapté à notre besoin puisque les signaux peuvent pénétrer dans les matériaux sans les endommager et sans danger d'utilisation. Nous avons aussi vu les différents systèmes radar FMCW qui n'utilisent pas la notion de pénétration et donc leur vraie image est en 2D, Or, pour notre étude, nous souhaitons utiliser cette fonctionnalité pour donner des vraies images 3D et visualiser l'intérieure des matériaux.

En fin de ce chapitre nous avons montré que la meilleure bande pour pouvoir pénétrer sans être absorbé par les matériaux est la bande 75-110 GHz.

Chapitre 2

La mise en place du radar FMCW

Ce deuxième chapitre présente d'abord tous les éléments de notre radar ensuite il détermine quelques bases de traitement de signal surtout pour le passage entre le domaine temporel et le domaine fréquentiel. Nous allons ainsi justifier notre résolution transversale. Après nous allons présenter les résultats théoriques et pratiques pour le Teflon sans défaut comme matériau de test où nous allons voir les différents type de bruits qui nous empêche d'avoir une image claire de l'intérieur du matériaux de test. A la fin du chapitre nous allons présenter des solutions de traitement de signal qui permettent d'améliorer le rapport signal à bruit et améliorer la qualité d'image et avec ce setup nous resterons bloqué par les signaux de redondances.

2.1 Les composants du système radar FMCW

Le but de notre système est de réaliser une image 3D des matériaux, et pour faire cela il faut ajouter quelques modifications sur le système radar FMCW traditionnel puisque nous cherchons à minimiser les réflexions parasites et nous cherchons à être collimer sur la profondeur de mesures. Le montage présenté dans la figure 2.1 montre le schéma du radar FMCW que nous avons utilisé. Dans cette partie nous allons présenter les différentes caractéristiques de chaque matériel utilisé.

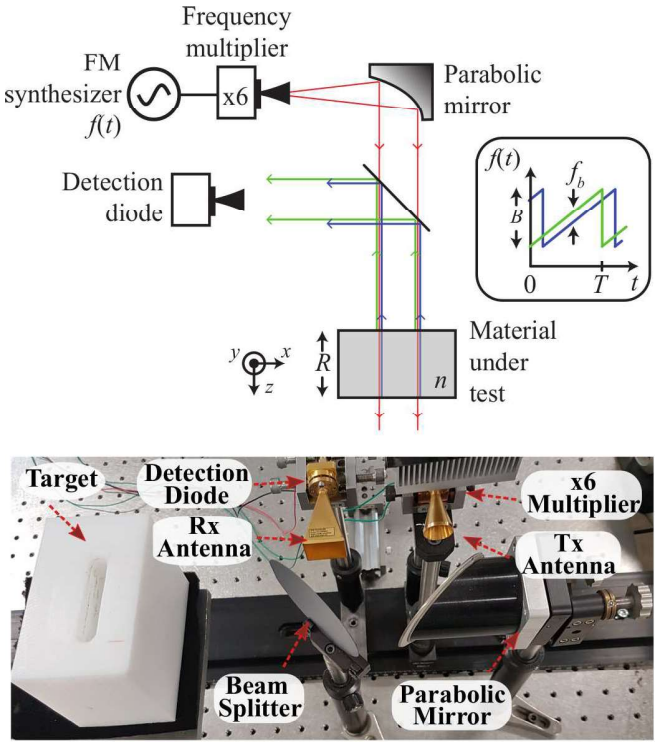


FIGURE 2.1 – Schéma fonctionnel illustrant notre système radar FM-CW. Dans la figure nous montrons la fréquence instantanée détectée dans le temps du signal réfléchi sur la face avant (vert) et le signal réfléchi sur la face arrière (bleu).

2.1.1 Le générateur de fréquences

Le choix du générateur de fréquence est très important, en effet il génère non seulement l'onde à la fréquence voulue mais également la modulation de fréquence apportée au système. Il est préférable d'opter pour un synthétiseur analogique. Ce dernier offre une meilleure résolution fréquentielle qui influe directement sur la résolution de notre système. Le synthétiseur nous génère une bande de fréquence entre 12.5–18.33 GHz sur une période T de 22 ms.

2.1.2 La source THz

Elle est constituée d'une diode Schottky dont le constructeur a volontairement modifié les caractéristiques afin d'obtenir une dynamique maximale pour son harmonique de rang 6. Elle multiplie donc par 6 la fréquence de l'onde incidente. Fonctionnant dans une gamme de fréquence comprise entre 75 GHz et 110 GHz, la fréquence initiale est donc de 12.5 GHz à 18.33GHz. Avec une puissance supportable en entrée de 8 dBm, la puissance délivrée est constante sur la totalité du domaine de fonctionnement à savoir 14 dBm de sorte que l'atténuation dans les matériaux de construction typiques est suffisamment faible pour assurer une profondeur de mesure de l'ordre du cm. Afin d'éviter que le faisceau ne diverge trop en sortie de la source, nous utilisons une antenne cornet à gain de 21 dB (VDI-WR-10) afin de limiter la diffraction à la sortie du guide d'onde

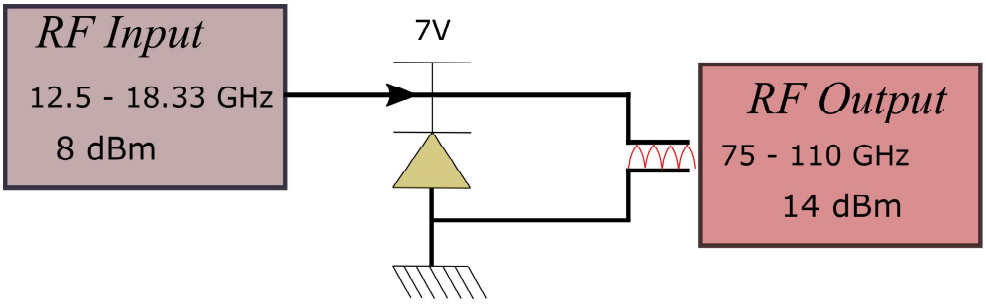


FIGURE 2.2 – Schéma présentant les informations et le principes du multiplicateur de fréquence basé sur une diode Schottky

WR10 et d'assurer un faisceau de type gaussien, avec une largeur de faisceau complète de 3 dB de 13 degrés.

2.1.3 La diode de détection

Il s'agit d'une diode Schottky (Spaceklabs DW-2 75-110 WR-10) dont le domaine de détection se situe entre 75GHz et 110GHz. Sa sensibilité est d'environ 1,5 kV / W (si elle est chargée sur une haute impédance). La diode est intégrée dans un guide d'onde en bande W avec une antenne cornet d'entrée pyramidale (sagemillimètre SAR-2309-10-S2) avec un gain nominal de 20 dBi et une ouverture de faisceau de 3 dB de 16 degrés sur le plan E et 18 degrés sur le plan H. Ici la détection en quadrature de la diode va permettre d'obtenir un battement entre un signal de référence et le signal retardé qui a été réfléchi par la cible. Pour réguler la température de notre source, nous avons utilisé un Peltier avec un capteur de température et un correcteur PID.

2.1.4 Miroir parabolique

Le choix des miroirs paraboliques aux lieux des lentilles est due aux réflexions parasites que nous cherchons à éliminer. Des miroirs paraboliques d'axe 90 ° ou 45 ° sont régulièrement exploités dans les bancs de spectroscopies. Le diamètre du point focal du miroir parabolique est spécifique à chaque longueur d'onde et égale à $\frac{4\lambda f_m}{\pi d_m}$ avec λ la longueur d'onde [7], f_m est la distance focale du miroir et d_m son ouverture. Pour collecter efficacement la radiation Térahertz, nous utilisons le miroir parabolique dans notre système pour collimater l'onde générée. Les miroirs paraboliques font l'objet d'une procédure d'alignement minutieuse et délicate.

2.1.5 Lame séparatrice

Le problème majeur de cette configuration du banc de mesure se résulte à la qualité de la lame séparatrice. En effet, contenu du domaine de fréquence dans lequel nous sommes, il existe peu de lame à moindre coût. Cette lame a donc été matérialisée par une plaque de silicium. Les caractéristiques du silicium ne sont pas connues pour de telles fréquences. Une série de test en réflexions et en transmission a donc été effectuée sur la lame afin de mesurer son coefficient de transmission et de réflexion. La lame contient deux faces, une face opaque et autre réfléchissante, nous avons fait l'objet de deux séries de mesures sur

chacune des faces de la lame. Comme nous pouvons le voir sur la figure 2.3, qui représente les mesures en transmission et en réflexion pour chaque face, la face réfléchissante offre une meilleure réflexion que la face opaque pour une transmission équivalente. La configuration retenue sera donc celle où le signal de référence sera réfléchi par la face opaque de la lame car nous devons préserver un maximum de puissance pour le faisceau traversant la brique.

2.2 Propriétés des faisceaux gaussiens

Une onde électromagnétique se propageant dans un milieu homogène est soumise aux équations de Maxwell. Après plusieurs calculs nous pouvons écrire le profil d'intensité (proportionnelle au carré du champ) du faisceau gaussien sur la forme suivante :

$$I(r,z) = I_0(z)e^{\frac{-r^2}{\omega^2}} \tag{2.1}$$

La figure 2.4 présente la forme de l'intensité du faisceau gaussien.

$R(z) = z[1 + (\frac{\pi\omega^2}{\lambda^2})^2]$: est le rayon de courbure du front d'onde qui coupe l'axe en z.

$\omega(z) = \omega_0[1 + (\frac{\lambda^2}{\pi\omega^2})^2]$: est une mesure de la décroissance – gaussienne - de l'amplitude du champ avec la distance à l'axe z comme présenté sur la figure 2.5.

Ce paramètre ω est minimal à l'origine z=0, où le rayon de courbure R est

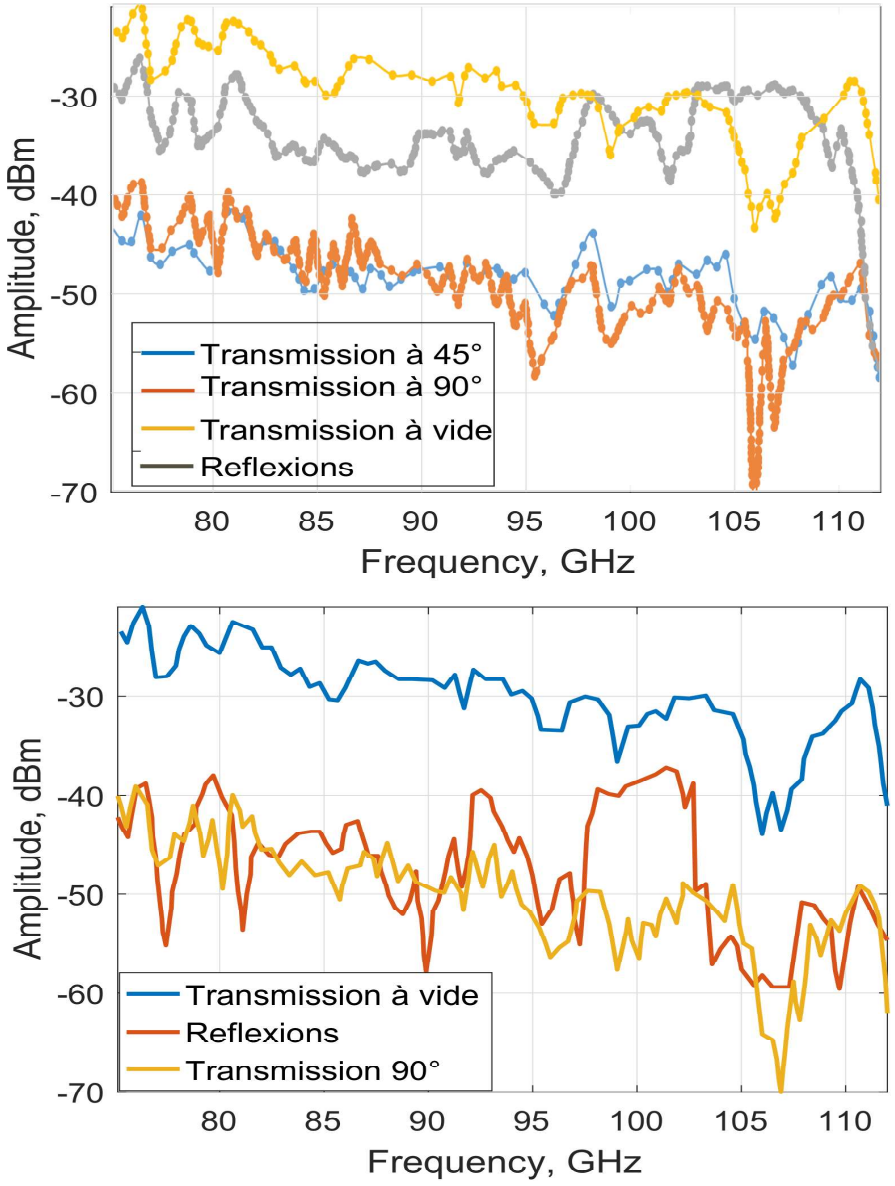


FIGURE 2.3 – Représentation de la transmission et réflexion du côté réfléchissant (en haut) et coté opaque (en bas).

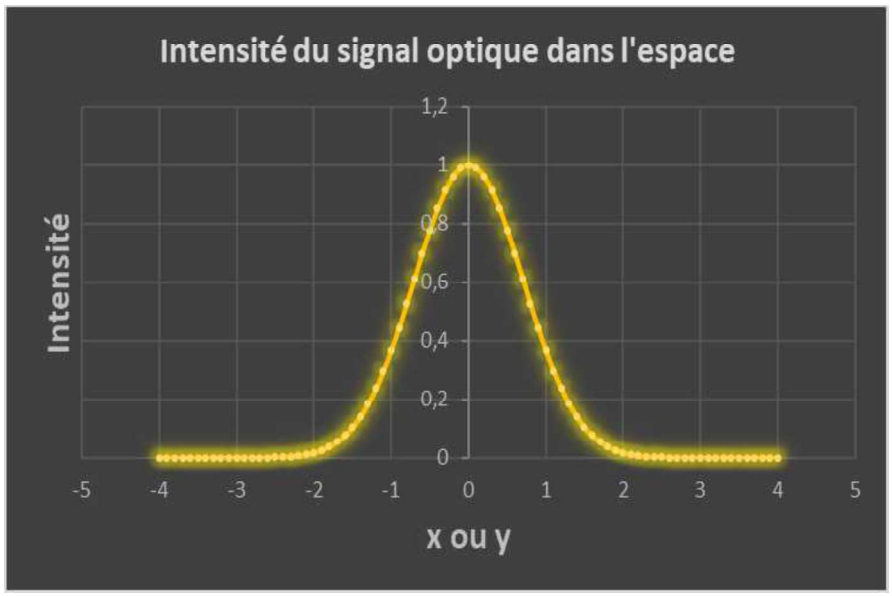


FIGURE 2.4 – Intensité du faisceau gaussien.

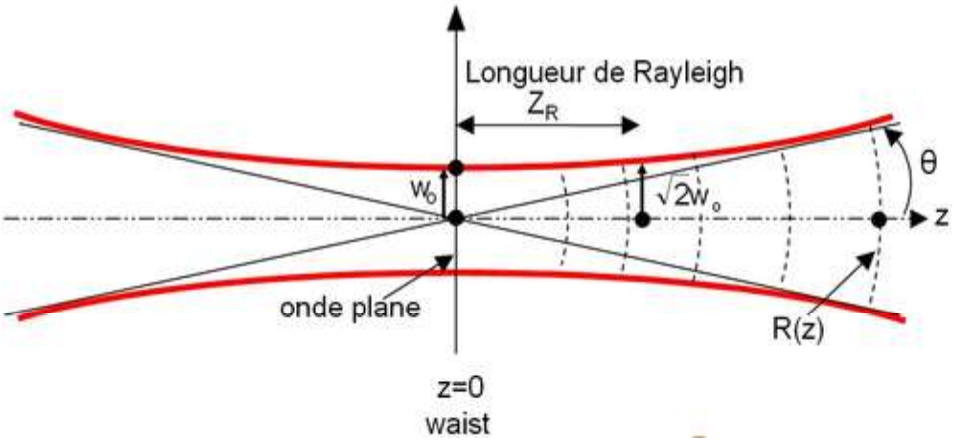


FIGURE 2.5 – Propriétés d'intensité gaussien.

infini. Sa valeur est alors notée ω_0 et nous parlons du « waist » du faisceau. La longueur de Rayleigh est la distance (comptée en partant du waist) au bout de laquelle la taille du faisceau a augmenté d'un facteur$\sqrt{2}$ (ou encore que sa surface ait doublé). C'est un paramètre important car il définit la distance sur laquelle le faisceau laser garde une taille relativement constante (comprise entre ω_0 et $\omega_0\sqrt{2}$).

Plus un faisceau est gros, moins il diverge. En optique gaussienne, « collimater un faisceau » est équivalent à « obtenir un faisceau de grand waist ». En termes de conception optique, un compromis doit être choisi entre la profondeur de mesure et la résolution transversale. À la sortie de l'antenne cornet, le faisceau est donné à 80% gaussien, par conséquent le formalisme du faisceau gaussien [105] peut être utilisé pour concevoir l'installation optique.

Notre antenne a un angle d'ouverture de 13 $^\circ$, et avec une longueur d'onde de 3 mm nous pouvons calculer le ω_0 et la longueur de Rayleigh de notre système. Pour un choix adéquat de la distance focale effective à miroir parabolique qui ajuste la taille du faisceau, la profondeur de mesure (z_R) est représentée en fonction de la taille du faisceau w_0 à 100 GHz sur la figure 2.6

Pour notre application, une taille de faisceau de 18 mm a été choisie, cela correspond à une profondeur de mesure de 34 mm pour une longueur d'onde de 3 mm. En utilisant le critère de 10 à 90% [19] décrit dans la dernière section

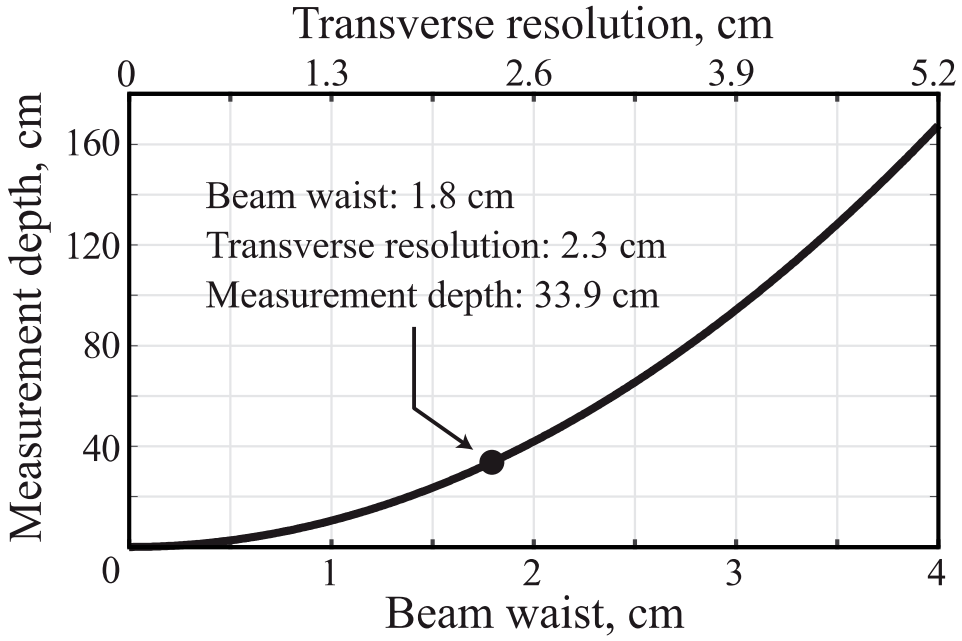


FIGURE 2.6 – Compromis entre transversal et longitudinal limité par diffraction résolutions. Le point correspond à la configuration choisie. La résolution transversale, basée sur le critère de 10 à 90%

comme méthode de mesure de la résolution transversale et en supposant un faisceau parfaitement gaussien, nous pouvons calculer la résolution théorique en étudiant la convolution entre la fonction porte et la fonction gaussienne. À partir de ces calculs, la résolution transversale est égale à 1,3 fois la taille de faisceau. Pour une taille de faisceau de 18 mm, la résolution transversale attendue est de 23,4 mm. La profondeur de mesure associée à la diffraction limitée est de 33,9 cm, dépassant ainsi comme requis la profondeur limite d'atténuation typique et la résolution longitudinale limitée à la largeur de bande de 4,3 mm (dans l'air) détaillée après.

2.3 Techniques de traitement de signal

Cette section est consacrée aux techniques de traitement du signal appliquées au radar FM-CW utilisé pour détecter de multiples défauts dans un matériau, en particulier pour le domaine des ondes millimétriques.
Comme dans tous les systèmes basés sur la modulation de fréquence sur une large bande de fréquences nous trouvons le problème de la non linéarité radio fréquence.

2.3.1 Généralité sur le traitement de Signal

En pratique les signaux sont de durée limité en temps, sans oublié que nous avons juste des échantillons de notre signal (en nombre fini de points), ces limites

nous dégradent la résolution de notre signal.

Pour considérer un signal sur une durée finie, nous multiplions un signal de durée infinie par une fonction fenêtre d'observation (également appelée fenêtre de pondération). La plus simple est la fenêtre rectangulaire (ou porte), définie comme suit : $h(t)| = \begin{cases} 1 & \text{si } t \in [T_1, T_2] \\ 0 & \text{si sinon} \end{cases}$

Pratiquement tout signal détecté $s(t)$ est multiplié par cette fenêtre, nous ne considérons ainsi que la partie comprise entre T_1 et T_2 de ce signal.

Donc notre vrai signal n'est pas s(t), mais c'est le signal tronqué : $sh(t) = s(t)h(t)$. Si nous appliquons une transformée de Fourier pour passer au domaine fréquentiel, nous obtenons le produit de convolution $Sh(f) = S(f) * H(f)$, où $H(f)$ est la transformée de Fourier (TF) de la fenêtre $h(t)$. L'utilisation d'une fenêtre de pondération va donc changer la transformée de Fourier du signal.

Il existe plusieurs fenêtres de pondération chacune à ses avantages et ses inconvénients, Les allures spectrales des fenêtres de pondérations présentent une succession de lobes : pour se rapprocher d'une fonction de Dirac. Il faut que le lobe principal soit le plus étroit possible, tandis que les lobes secondaires doivent être les plus faibles possible. Plus le lobe principal d'une fenêtre aura tendance à être étroit, plus ses lobes secondaires seront importants.

Il y a donc toujours un compromis à faire entre largeur du lobe principal et importance des lobes secondaires

Si nous prenons par exemple un signal $U(t) = cos(2f_1t) + cos(2f_2t)$,

avec une résolution fréquentielle de 10 Hz et $f_1 = 100Hz$ et $f_2 = 120$ Hz. Les résultats de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) de ce signal avec et sans Hamming sont présentés sur la figure 2.7. Le fenêtrage de Hamming est la multiplication du signal détecté par un signal de fenêtre $h(t)$ représenté par l'équation suivante : $h(t)| = \begin{cases} 0.54 - 0.46cos(2\pi t/T) & \text{si } t \in [T_1, T_2] \\ 0 & \text{si sinon} \end{cases}$ Nous pouvons voir que avec application du fenêtrage Hamming nous dégradons la résolution et nous voyons qu'un seul pic de fréquence avec un large lobe principal. D'autre part nous voyons que le rapport S/N est meilleur par rapport au signal sans fenêtrage Hamming. Nous avons donc un compromis entre un lobe principal plus étroit et le rapport signal à bruit. La figure 2.8 montre la différence entre les fenêtrages les plus utilisés en présentant la DSP d'un signal sinusoidal avec une fréquence de 500 Hz.

En général, nous remarquons que la fenêtre rectangulaire a le lobe principal le plus étroit, mais ses lobes secondaires sont les plus importants, au contraire, celle de Blackman a les plus faibles lobes secondaires, mais un lobe principal plus large. Le type de fenêtre est à choisir selon ce qu'on souhaite observer dans un spectre : la localisation des maximums, la localisation de l'énergie selon les fréquences, la valeur des maximums, etc. En général dans la détection de plusieurs réflexions dans les systèmes radar nous cherchons à réduire les lobes

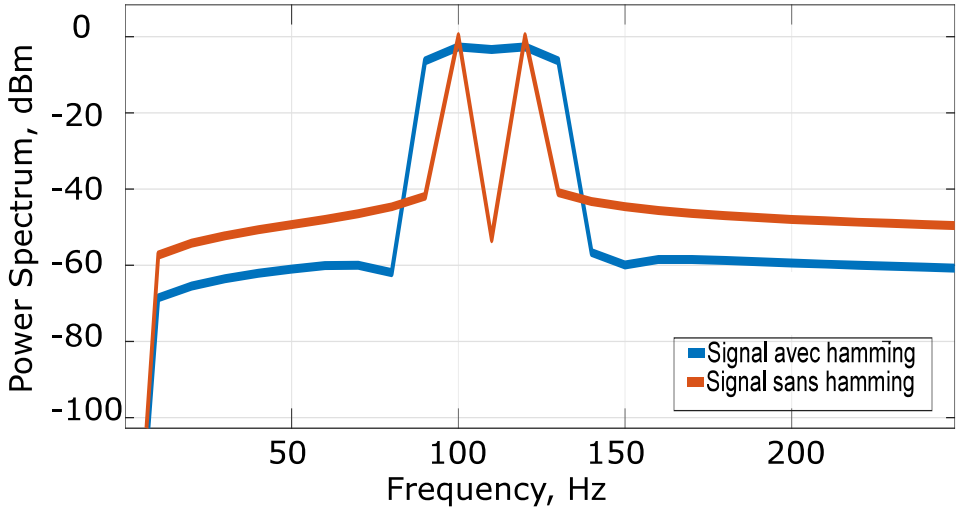


FIGURE 2.7 – Spectre du signal sinusoïdal avec deux fréquences proches, signal rouge est sans fenêtrage.

secondaires et garder une bonne résolution, le fenêtrage le plus utilisé est le fenêtrage de Hamming.

2.3.2 Non-linéarités radio-fréquences

Actuellement, les sources d'ondes millimétriques utilisent encore des multiplicateurs de fréquence actifs pour multiplier la fréquence d'un signal d'entrée piloté par un synthétiseur RF. L'utilisation de tels multiplicateurs induit une puissance de sortie réduite, mais aussi des ondes stationnaires parasites qui modulent le spectre de la puissance de sortie, comme indiqué sur la figure 2.9.

Par conséquent, comme le montre la figure 2.9 (a), lorsque la fréquence source est balayée, l'amplitude varie et des pics de parasites apparaissent dans

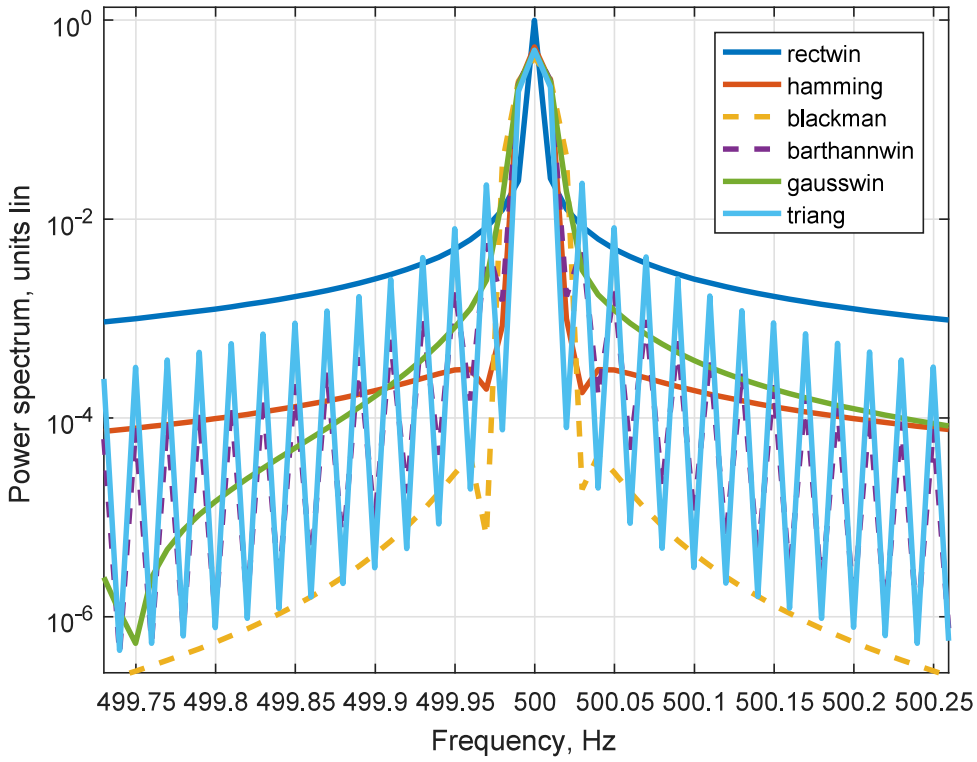


FIGURE 2.8 – Spectre du signal sinusoïdal et d'une fréquence de 500 Hz avec plusieurs type de fenêtrages

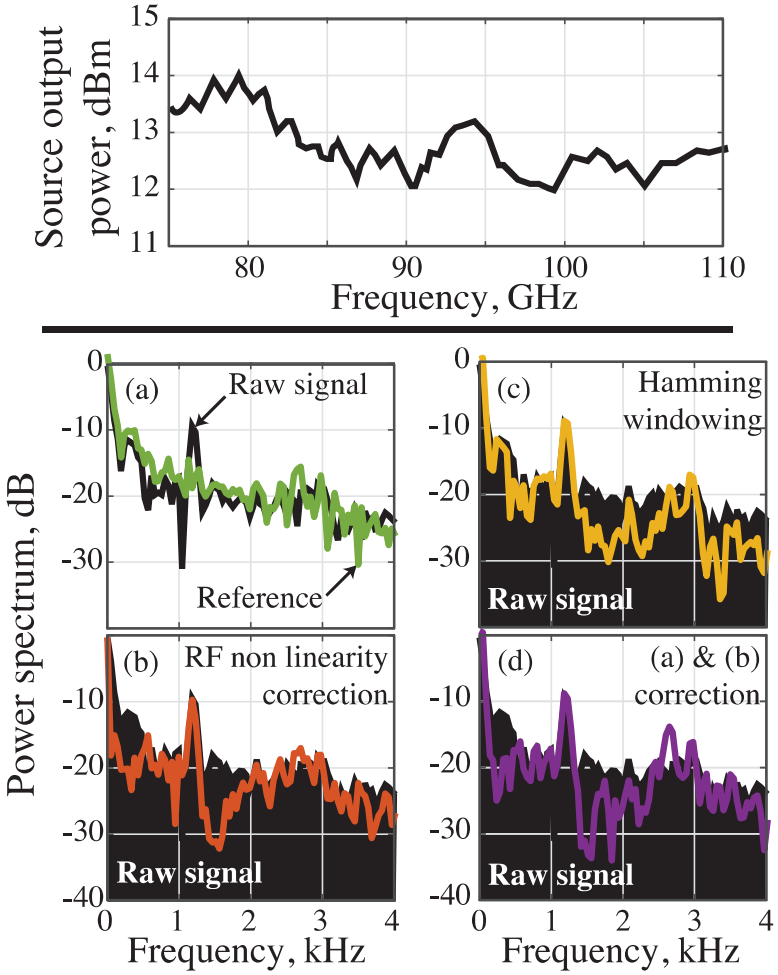


FIGURE 2.9 – Puissance de sortie de la source RF. (a) présente la DSP du signal d'émission tout seul avec la DSP d'un signal brut détecté avec le système FM-CW pour un matériau homogène. Ce signal brut est représenté dans (b - d) et comparé aux signaux de post-traitement après, respectivement, correction de non-linéarité RF, fenêtrage de Hamming et les deux.

le spectre associé obtenu à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT), qui pourrait être mal interprété comme de multiples réflexions. Ces effets ont été étudiés théoriquement dans [118, 119] et une procédure d'étalonnage a été proposée dans [87, 120] pour remédier à ce problème. Pour mieux comprendre l'impact de cette non linéarité RF sur la mesure, nous supposons une rampe de fréquence infinie avec une variation de B/T en fonction du temps, et à partir du setup présenté à la figure 2.1 dans le cas d'un matériau sans défaut interne, nous pouvons exprimer le champ détecté par la diode en fonction du temps t :

$$E(t) = \mathrm{e}^{i\,\phi(t)}\,\left[E_0(t) + \alpha\,E_0(t+\tau)\,e^{i\,2\,\pi\,f_b\,t}\,e^{i\,\phi_0}\right], \tag{2.2}$$

où $\tau = 2\,R\,n/c$ est le délai entre le signal réfléchi sur les faces avant et arrière du matériau. Le premier terme entre crochets correspond au champ électrique réfléchi sur la face avant du matériau, tandis que le second terme correspond au champ électrique réfléchi à la face arrière du matériau, présentant ainsi un décalage de fréquence f_b.

$E_0(t)$ représente la variation de l'amplitude de la source due à la variation du spectre de puissance de balayage de fréquences, qui pourrait être écrit de manière plus rigoureuse $E_0\left(f(t)\right)$.

α est un terme d'amplitude qui prend en compte l'amplitude réduite du signal réfléchi sur la face arrière, par rapport à la face avant, en raison des

coefficients de réflexion et de transmission de Fresnel.

$\phi(t)$ représente la phase du signal qui peut être dérivée de l'expression de la fréquence instantanée décrite dans la figure 2.1, et ϕ_0 représente le décalage de phase entre les deux signaux réfléchis. Dans ce contexte simplifié, l'intensité optique $I = |E(t)|^2$ détectée par la diode peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} I(t) =& |E_0(t)|^2 + \alpha^2 \, |E_0(t+\tau)|^2 \\ &+ 2\,\alpha\, E_0(t)\, E_0(t+\tau)\, \cos(2\,\pi\, f_b\, t + \phi_0). \end{aligned} \tag{2.3}$$

Idéalement, les sources d'ondes continues fournissent une puissance de sortie constante $E_0(t) = E_0$, et l'intensité détectée sera simplement une composante continue et à une composante alternative mono-fréquence à f_b. Cependant, en raison de la dépendance de la puissance de sortie sur la fréquence, $E_0(t)$ n'est pas constant et son spectre associé est convolué avec la composante continue et la composante de battement. En présence de réflexions multiples, ce bruit spectral de parasite serait convolué à chaque fréquence de battement, dégradant ainsi fortement le rapport signal sur bruit de la mesure.

Dans notre système, avec une période typique de la rampe de fréquence T de 120 ms et des retards typiques de τ compris entre la ns et la μs, nous pouvons supposer que $E(t) \approx E(t+\tau)$, ainsi la composante alternative de l'intensité

optique détectée par la diode peut être exprimée sous une forme simplifiée :

$$I_{ac}(t) \approx 2\,\alpha\,|E_0(t)|^2\,\cos(2\,\pi\,f_b\,t + \phi_0). \tag{2.4}$$

Afin de réduire le bruit dû à la non-linéarité RF, nous pouvons déduire de l'équation 2.4 que nous pourrions simplement diviser le signal détecté réfléchi par la cible $I_{ac}(t)$ par un signal de référence $|E_0(t)|^2$ qui pourrait être mesuré en remplaçant le matériau testé par un miroir parfait. Un des avantages de notre technique est que notre signal de référence présente directement le terme d'intensité $|E_0(t)|^2$, ce qui ne nécessite aucune correction supplémentaire, telle que la distance différentielle entre référence et cible, comme indiqué dans [87, 120] parce que tout simplement nous n'avons pas de battement.

Cette méthode a été mise en œuvre pour un matériau de référence, un échantillon de téflon homogène d'une longueur de 6 cm, dont l'indice de réfraction est égal à $n = 1,8$. Le téflon a été choisi pour sa faible absorption dans les longueurs d'onde millimétriques. Comme le montre la figure 2.9 (a), nous observons un signal de retour à 1,2 kHz comme prévu à partir de l'équation 1.10, mais avec un niveau de bruit important constitué de nombreuses contributions, y compris la non-linéarité RF. Comme indiqué dans la figure 2.9 (b), la non-linéarité RF est corrigée, en particulier le pic de parasites aux alentours de 250 Hz et le bruit alentours du pic d'intérêt à 1,2 kHz nous voyons surtout une grande amélioration

du rapport signal sur bruit du coté droit.

Nous pensons que le signal entre 0 et 1,2 kHz pourrait renseigner sur le coefficient de rétro-diffusion au sein de la matière et pourrait être intéressant pour caractériser l'homogénéité du matériau.

De plus, dans cette expérience réelle, il faut prendre en compte le retard dû au temps de balayage limité T. Une amélioration du rapport signal sur bruit a également été obtenue en utilisant une fenêtre de Hamming standard illustrée à la figure 2.9 (c). Enfin, la combinaison de la correction de non-linéarité RF et du fenêtrage de Hamming a permis d'améliorer le rapport signal sur bruit de 15 dB, comme le montre la figure 2.9 (d).

2.3.3 Réflexions parasites

Les réflexions parasites sont problématiques pour le système FM-CW dédié à la mesure de multiples défauts dans un matériau, car le nombre de fréquences de battement varie avec $N^2/2$ si $N >> 1$. En raison de la forte diffraction dans le matériau à tester, les réflexions de parasites les plus importantes ont lieu le long de l'axe optique, en particulier la réflexion sur l'antenne cornet (certaines d'entre elles pourraient être réduites à l'aide d'un isolateur). En raison des pertes de diffraction dans le matériau à tester, les fréquences de battement parasites sont du même ordre de grandeur que les signaux d'intérêt. Ici, nous proposons de réduire ces signaux de battement parasites en déplaçant le matériau le long

de z et en faisant la moyenne des spectres détectés.

Au fur et à mesure que le matériau se déplace le long de z, les fréquences parasites changent car le chemin relatif entre la face avant et la réflexion parasite change, tandis que les fréquences de battement d'intérêt (défauts de matière) restent stables car leur position par rapport à la face avant ne change pas.

La figure 2.10 (en haut) présente la densité spectrale de puissance d'une pièce de téflon homogène de 6 cm de profondeur mesurée à cinq positions longitudinales différentes avec un pas de 5 mm. La fréquence de battement d'intérêt à 1,2 kHz correspond aux réflexions entre les faces avant et arrière, tandis que les pics autour de 3 kHz correspondent à des réflexions parasites. Comme mentionné précédemment, la fréquence du pic d'intérêt ne change pas tandis que les fréquences parasites changent avec la position longitudinale. Nous observons que la moyenne des spectres détectés permet d'améliorer le rapport signal sur bruit de plus de 5 dB pour ces 5 positions. De toute évidence, un plus grand nombre de positions permettrait d'augmenter encore plus le rapport signal sur bruit.

Pour des mesures efficaces, les pas longitudinaux devraient être du même ordre de grandeur que la résolution longitudinale. La correction des non linéarités RF et le fenêtrage de Hamming ne sont pas implémentés pour se concentrer sur les performances de la technique de calcul de moyenne. Comme le montre la figure

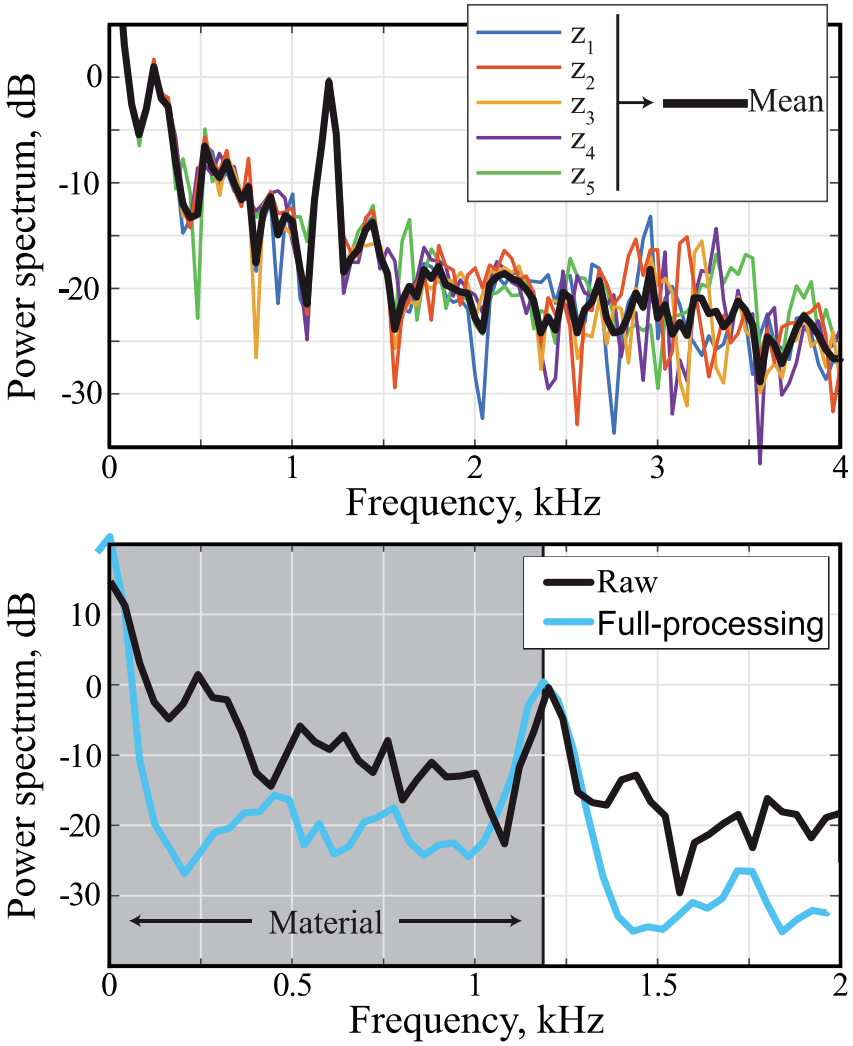


FIGURE 2.10 – Figure du haut : le spectre noir correspond à la moyenne des spectres colorés, en utilisant l'amplitude du spectre moyen comme référence, figure bas : Comparaison entre une mesure brute (sans traitement du signal) et le traitement complet centrés sur les fréquences de battement correspondant au matériau homogène sous test.

2.10 (en bas), le traitement complet (non-linéarité RF, fenêtrage de Hamming et moyennage) offre clairement une amélioration du rapport signal sur bruit jusqu'à 20 dB (à 1,3 kHz) en utilisant seulement cinq positions longitudinales pour établir une moyenne.

2.3.4 Amélioration de la précision de mesure

Comme nous avons vu dans les sections précédentes dans nos mesures, nous somme limités par la résolution fréquentielle de mesure ce qui est due à la limitation de la durée de signal.

Dans notre signal nous traitons des signaux sinusoïdaux sur une fenêtre rectangulaire, cela se traduit dans le domaine fréquentiel par une convolution du sinus cardinal avec un peigne de Dirac. Théoriquement chaque pic dans notre signal est un sinus cardinal.

Il existe en mathématique le théorème d'interpolation de Shannon qui sert à reconstituer un signal d'une manière continu à partir d'un certain nombres de points discrets. Nous allons utiliser cette méthode pour augmenter la résolution en fréquence.

L'ensemble des points du signal s'obtient par la relation suivante :

La fonction du sinus cardinal s'écrit comme suite :

$X(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x[nT].sinc(\frac{t-nT}{T})$ T étant la période d'échantillonnage. La figure 2.11 nous montre comment nous pouvons effectuer une interpolation illi-

mitée d'un signal aléatoire échantillonné par des intervalles entiers [112].

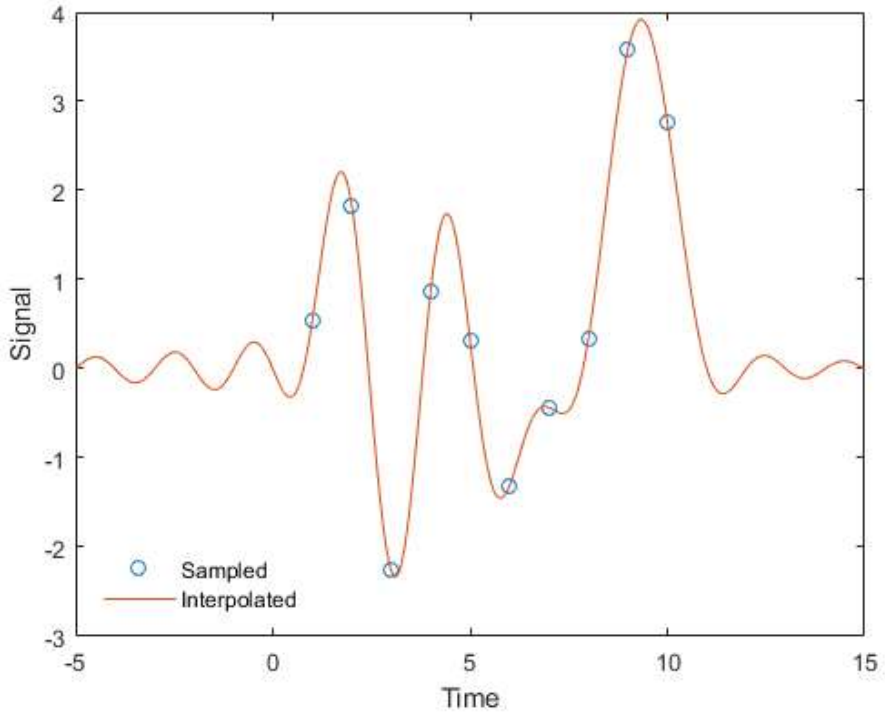


FIGURE 2.11 – Interpolation d'un signal aléatoire échantillonné par la méthode d'interpolation.

2.4 Imagerie 3D

Dans cette section, nous évaluerons les performances du radar FM-CW en effectuant une imagerie 3D sur un morceau de téflon présentant un défaut interne représenté sur la figure 2.12. Les informations longitudinales proviennent de la technique FM-CW associée aux corrections décrites précédemment qui sont

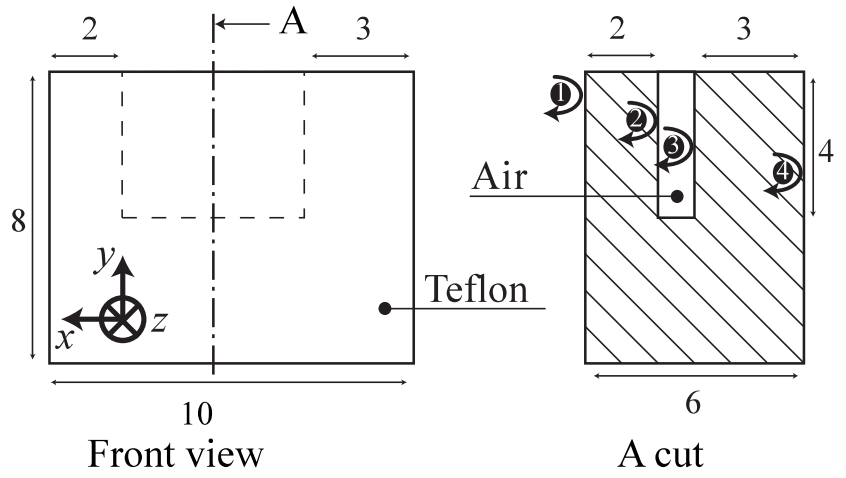


FIGURE 2.12 – Vue mécanique d'une pièce de téflon avec un défaut à l'intérieur, les unités sont en cm. Les chiffres 1 à 4 correspondent aux quatre champs électriques qui sont réfléchis sur le matériau, conduisant ainsi à des fréquences de battement d'intérêt.

synthétisées à la figure 2.13. Comme indiqué sur la figure 2.12, quatre signaux réfléchis retournent à la diode de détection et aboutissent à six signaux de battement correspondant à chaque couple de signaux réfléchis.

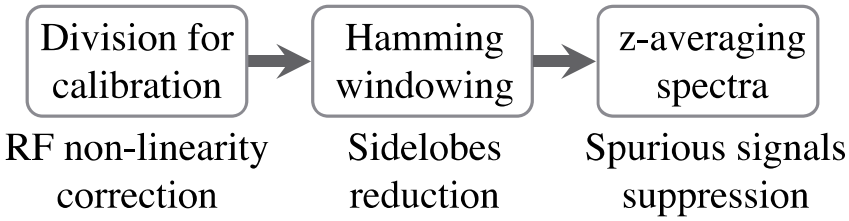


FIGURE 2.13 – Algorithme des techniques de traitement du signal appliquées.

Les informations transversales sont obtenues par un balayage transversal (x, y) du matériau grâce à un scan automatique.

Le tableau 2.1 présente les valeurs théoriques des six fréquences de battement possibles en tenant compte des dimensions et de l'indice de réfraction du matériau.

Couples des signaux réfléchis	Fréquence de battement	souhaité ?
(E_2, E_3)	f_{23} =0.106 kHz	no
(E_1, E_2)	f_{12} =0.381 kHz	yes
(E_1, E_3)	f_{13} =0.488 kHz	yes
(E_3, E_4)	f_{34} =0.572 kHz	no
(E_2, E_4)	f_{24} =0.678 kHz	no
(E_1, E_4)	f_{14} =1.060 kHz	yes

TABLE 2.1 – Couples possibles de signaux réfléchis et leur fréquence de battement associée. Seuls les signaux de temps qui impliquent la réflexion frontale (# 1) sont souhaités pour une image réaliste du matériau..

Comme le montre la figure 2.14 pour un pixel transversal donné (x, y) qui cible le défaut interne, nous observons 6 pics significatifs correspondant aux fréquences de battement attendues.

Un inconvénient de cette configuration expérimentale est que le spectre ne représente pas directement les interfaces dans le matériau, représentées par des lignes continues pour les fréquences de battement théoriques, car des fréquences de battement redondantes mais attendues existent, représentées par des lignes en pointillés sur la figure 2.14.

Néanmoins, à partir des mesures FM-CW à chaque position (x, y), il est possible

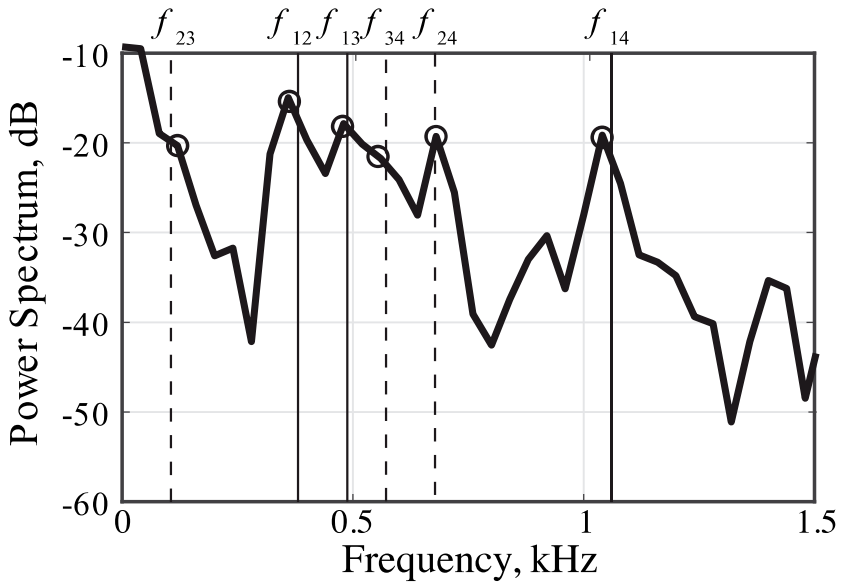


FIGURE 2.14 – Balayage longitudinal FM-CW du matériau après traitement complet du signal. Nous pouvons identifier les fréquences attendues reportées dans le tableau 2.1 avec une précision adéquate (résolution spectrale de 40 Hz), les fréquences de battement indésirables et souhaitées sont représentées par des lignes verticales en pointillés et continues, respectivement.

d'extraire des images tomographiques pour toute découpe dans le matériau en représentant simplement la densité spectrale de puissance du signal détecté. La figure 2.15 montre le spectre de puissance pour deux coupes qui ciblent le défaut interne dans ces deux directions possibles.

Ces images tomographiques montrent clairement le défaut interne et la face arrière du matériau. Concernant la face arrière, nous observons un décalage de la fréquence de battement entre les faisceaux traversant et à côté du défaut, du fait de la différence d'indice de réfraction entre le défaut (air) et le matériau

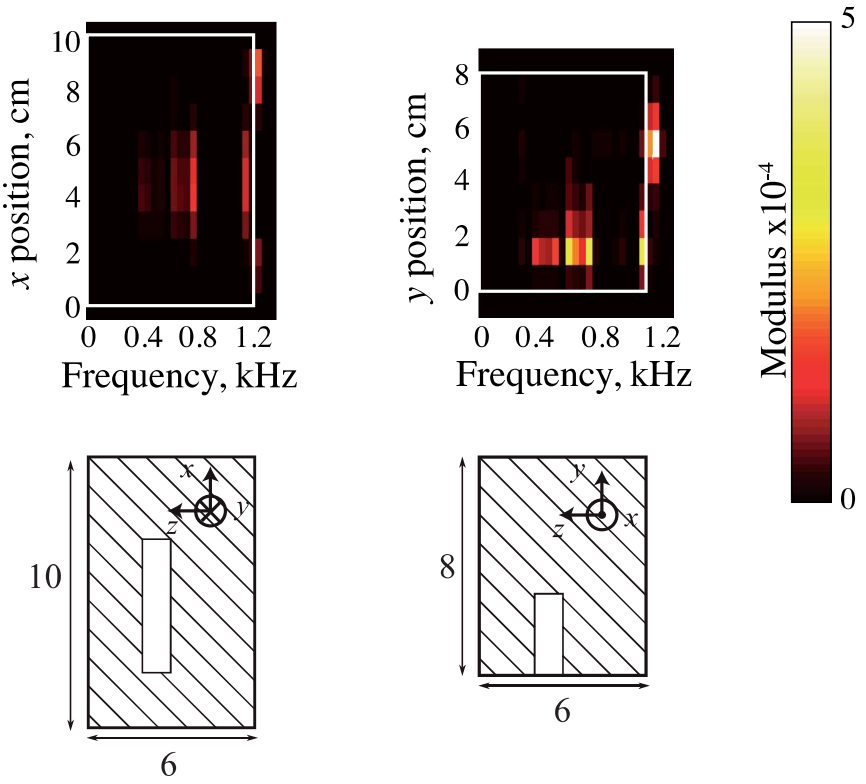


FIGURE 2.15 – Tomographie FM-CW après un balayage transversal (x, y). Une coupure en x et y est représentée.

(téflon). En ce qui concerne le défaut, nous observons plus ou moins ses faces avant et arrière, ainsi que les fréquences de pulsations supplémentaires parasites mais attendues. Au fur et à mesure que le nombre de défauts augmente, ces signaux de pulsations parasites dégradent la qualité des images tomographiques, ce qui incite à opter pour une configuration alternative, qui sera détaillée dans la section suivante.

2.5 En résumé

Dans ce chapitre nous avons définis tous les éléments de notre système radar et nous avons montré que nous pouvons détecter toutes les réflexions de la cible. Nous avons détecté trois problèmes majeurs : les réflexions de parasites , les lobes secondaires du sinus cardinal qui empêche la visualisation des faibles réflexions et la modulation d'amplitude qui vient de la non- linéarité de notre multiplieur de fréquences, Afin de corriger ces problèmes, nous avons proposé trois solutions qui sont : le fenêtrage, le moyennage et la calibration par un signal de référence.Nous avons ainsi amélioré 20 dB du rapport signal à bruit. le seul problème qui reste et la redondance des fréquences qui ne sont pas utiles et donc l'objectif du prochain chapitre est de résoudre cette problématique.

Chapitre 3

Résultat et traitement de signal

Sommaire

1.1 Application de l'imagerie 3D 30
1.1.1 La protection civile 30
1.1.2 Les contrôles de sûreté 31
1.2 Caractérisation des matériaux 32
1.2.1 La radiographie 32
1.2.2 Technologie nucléaire 37
1.3 La Technologie Térahertz 39
1.3.1 Définition 39
1.3.2 Avantages 40
1.3.3 Les Défis 41
1.3.4 Domaines d'application 42
1.3.5 Comparaison des Technologies 43
1.3.6 L'imagerie Térahertz 44
1.3.7 L'imagerie avec des impulsions Térahertz : THz-TDS 45
1.3.8 L'imagerie en ondes continues CW 47
1.4 Bande fréquentielle adaptée à la pénétration des matériaux de construction 50
1.5 Les systèmes Radar FMCW 54
1.5.1 Interférence instantanée entre deux ondes 55
1.5.2 Radar CW 56
1.5.3 Radar FMCW 58
1.6 Objectifs et besoin industriel 62
1.7 Conclusion 64

Ce troisième chapitre présente la solution pour le problème de la redondance de signaux. Un miroir parabolique a pour cela était ajouté. Nous allons présenter les nouveaux résultats d'imagerie de la pièce de teflon, ensuite nous allons montrer par des tests pratiques les performances de notre système en ce qui concerne la résolution longitudinal qui est limitée par la bande passante de 35 GHz et la résolution transversale qui est limitée par la taille de faisceau liée à la profondeur de mesure que nous ne pouvons pas diminuer.

3.1 Caractérisation 3D des matériaux à l'aide d'un réflectomètre à ondes millimétriques

Pour éviter les fréquences de battement redondantes et proposer ainsi une technique d'imagerie plus simple, nous avons proposé une configuration expérimentale très similaire à celle utilisée pour la tomographie optique cohérente pilotée par des sources à balayage de fréquence, par ex. pour une imagerie rétinienne 3D [114]. Comme le montre la figure 3.1, un miroir externe a été ajouté au schéma expérimental, ce qui est équivalent à un interféromètre de Michelson piloté par une source balayée en fréquence.

Un point important pour l'ajout de ce miroir est la distance optique entre le miroir externe et la lame séparatrice, qui doit être beaucoup plus grande que la distance entre le matériau cible et la lame séparatrice. Dans notre configuration actuelle, le miroir externe se trouve à 35 cm de la lame séparatrice, presque

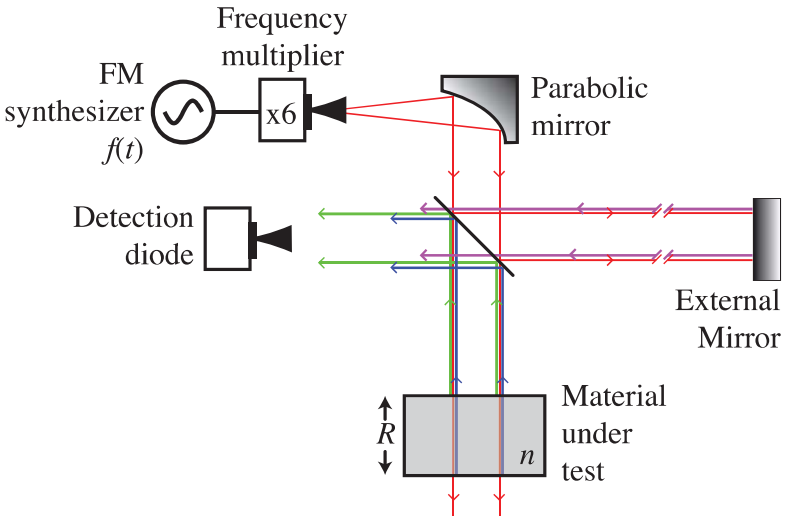


FIGURE 3.1 – Configuration FM-CW modifiée pour la suppression de la redondance des signaux.

deux fois la distance entre le matériau à tester est la lame qui est d'environ 20 cm. Par conséquent, si nous calculons le spectre de puissance attendu pour le matériau à tester (décrit dans la figure 2.12) comme présenté dans la figure 3.2, nous observons que le spectre se sépare en deux parties de fréquences de battement. Aux basses fréquences, nous observons un ensemble de pics identiques à ceux présentés précédemment pour la première configuration, ce qui inclut les signaux de battement redondants. Aux fréquences les plus élevées, nous observons quatre pics correspondants aux quatre interfaces de notre matériel à tester, y compris l'interface avant et sans aucune redondance.

En effet, les signaux de battement nuisibles correspondent à des couples de ré-

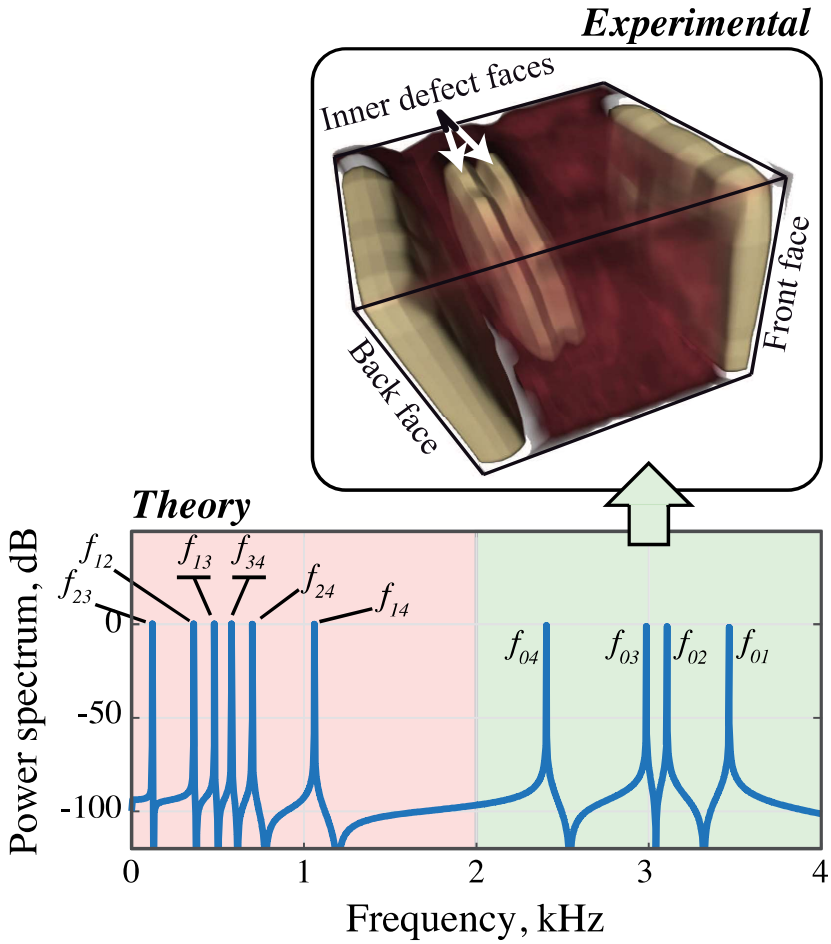


FIGURE 3.2 – Spectre des signaux réfléchis simulé à l'aide du miroir externe. Les pics basses fréquences (zone rouge) restent identiques à la configuration sans miroir externe, c'est-à-dire y compris les fréquences de battement redondantes. Les pics haute fréquence f_{0i} (en vert) correspondent au battement des interfaces avec le miroir externe, permettant ainsi l'observation de toutes les interfaces mais sans aucune redondance. L'encart montre un rendu expérimental en 3D du réflectomètre à ondes millimétriques à balayage transversal pour un morceau de téflon présentant un défaut interne. Les faces avant et arrière de la pièce et le défaut interne sont clairement visibles

flexion intra-interfaces, correspondant donc à des distances courtes et des basses fréquences. Outre la suppression de ces signaux redondants et nuisibles, l'utilisation de ce miroir externe présente les avantages suivants : signal de référence de puissance supérieure (provenant du miroir au lieu de l'interface frontale), fréquences de battement supérieures, mais raisonnables, offrant un meilleur rapport signal sur bruit rapport entre bruit d'alimentation de 50 Hz et bruit possible en $1/f$, et procédure d'étalonnage plus simple pour la suppression des non-linéarités RF (voir la section 2.3.2). Une imagerie 3D simple et expérimentale du matériau est alors possible, comme indiqué dans la figure 3.2, en traçant simplement la plage des hautes fréquences du spectre de puissance détecté (voir la figure 3.2), après avoir appliqué uniquement la suppression de non-linéarité RF et le traitement de fenêtrage de Hamming.

3.1.1 Ajustements du traitement du signal

Comme mentionné précédemment, la technique de suppression de non-linéarité RF est plus facile à mettre en œuvre, car le miroir externe peut servir de référence fixe pour mesurer la puissance de sortie de la source en fonction de la fréquence sans le matériau à tester. Cependant, l'ajout de ce miroir externe nécessite d'ajuster la technique de moyennage spatial présentée précédemment.
En effet, comme présenté à la figure 3.3 pour un matériau homogène sans défaut interne, lorsque le matériau est déplacé le long de z, le signal de battement

correspondant aux faces avant et arrière reste toujours le même sur la même fréquence f_{sp}, parce que la distance entre la face avant et arrière ne change pas. En ce qui concerne les fréquences des battements de la face avant et arrière avec le signal de référence f_{sp1} et f_{sp2} vont se déplacer de la même manière et le Δf reste toujours le même. Pour les fréquences de parasites dus aux battements entres les signaux des aller retour entre antennes, matériaux et le miroir externe vont se déplacer d'une autre manières tout simplement parce que les chemins optiques ne sont pas les mêmes.

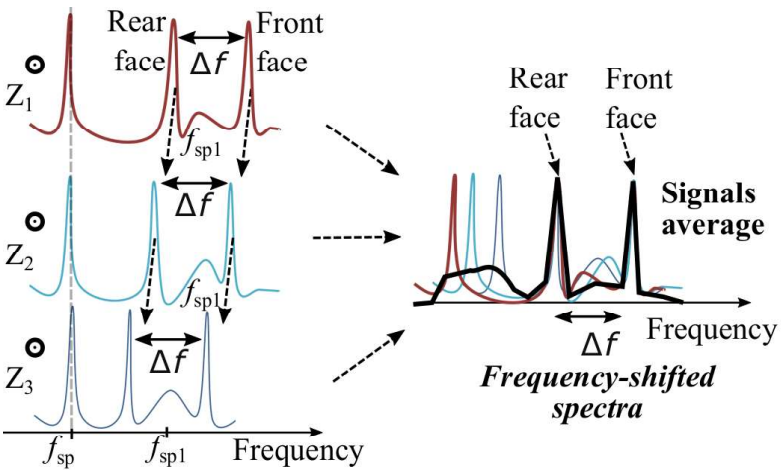


FIGURE 3.3 – Technique de calcul de la moyenne du réflectomètre à ondes millimétriques. Lorsque le matériau testé est déplacé le long de z, les signaux d'intérêt sont décalés en fréquence tandis que les signaux parasites restent à la même fréquence ou sont décalés en fréquence différemment. Les signaux mesurés à différentes positions bien connues le long de z sont ensuite décalés d'une fréquence connue qui dépend des positions de z avant la moyenne.

Tant que le balayage de z est contrôlé, le décalage de fréquence du signal

d'intérêt est connu (de l'équation 1.10), et peut être corrigé avant de calculer la moyenne des spectres, comme indiqué dans la figure 3.3. Donc l'amplitude des signaux parasites est réduite et l'amélioration du rapport signal sur bruit est améliorée. Notez que la fréquence de battement correspondant à la face avant est supérieure à celle correspondant à la face arrière, car la distance optique entre la face avant et le miroir externe est plus grande car ce miroir est éloigné du séparateur de faisceau.

Une moyenne ultérieure permettra ensuite d'améliorer le rapport signal sur bruit sans dégradation de la résolution longitudinale. La figure 3.4 montre un exemple du spectre obtenu pour une position donnée (x, y) dans laquelle le défaut interne peut être observé. Cette figure confirme que le traitement du signal améliore le rapport signal sur bruit de la mesure et que les quatre interfaces du matériau à tester sont clairement visibles, de manière bien meilleure que celle obtenue sans miroir extérieur (voir figure 2.14 à titre de comparaison), car les fréquences de battement redondantes ne dégradent pas ce spectre hautes fréquences.

3.1.2 Résolution et application de tomographie

La figure 3.5 montre des images tomographiques de la pièce en téflon présentée à la figure 2.12.

Si nous comparons avec la figure 2.15, nous confirmons que l'image ne présente plus de fréquences de battement parasites, offrant ainsi une représentation

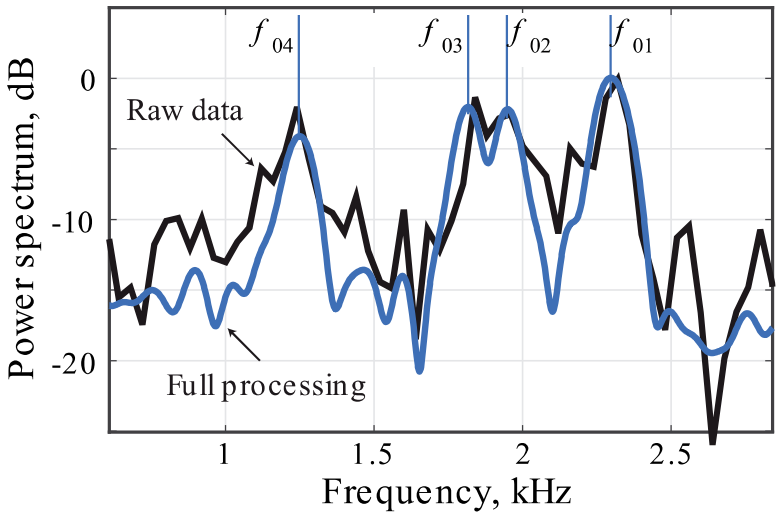


FIGURE 3.4 – Spectre mesuré en utilisant le miroir externe pour le matériau testé sans traitement de signal (brut) et avec le traitement de signal complet (correction de non linéarité RF, fenêtrage de Hamming et calcul de moyenne).

beaucoup plus précise du matériau à tester avec des résolutions longitudinale et transversale qui correspondent aux valeurs théoriques limites, comme détaillé dans les sections suivantes.

Les fréquences de battement parasites sont en réalité visibles si l'on examine de près les positions négatives (environ -4 cm), mais à des niveaux de puissance beaucoup plus bas que les fréquences d'intérêt.

Comme mentionné précédemment (voir figure 2.1), la résolution transversale attendue dépend du diamètre du faisceau choisi (18 mm) pour une profondeur de mesure longitudinale suffisante. Pour mesurer la résolution transversale, nous avons utilisé le critère 10-90 % proposé par exemple dans [116], qui consiste à

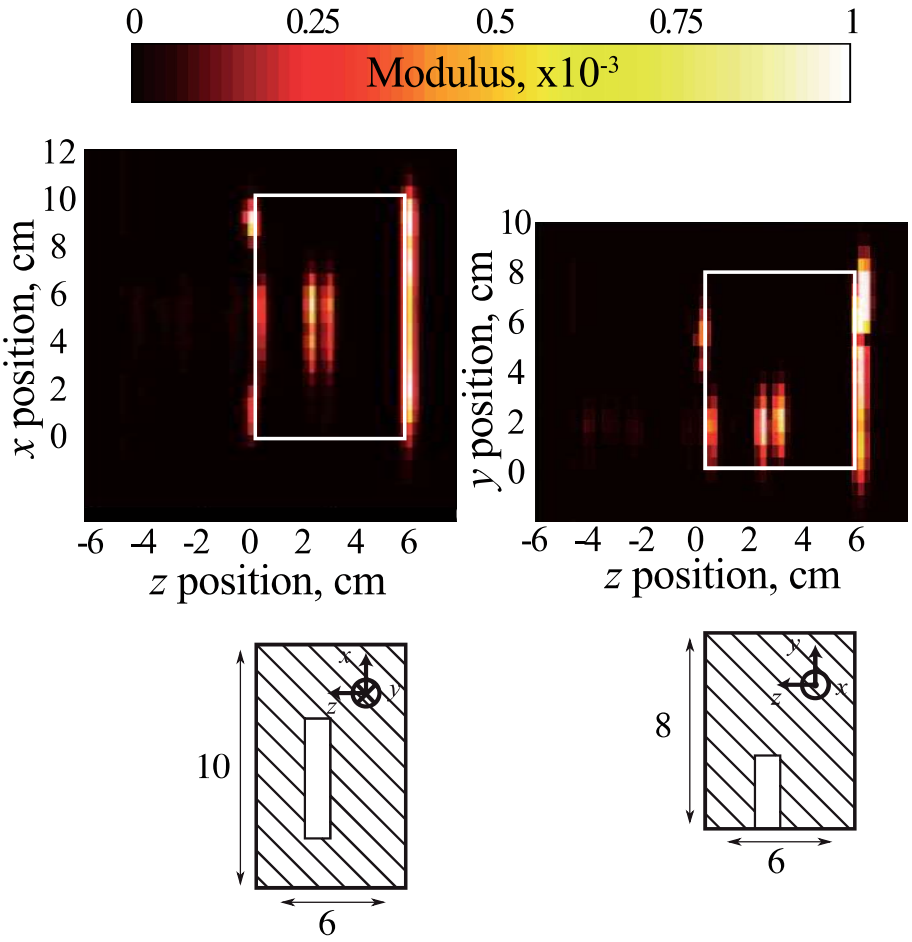


FIGURE 3.5 – Tomographie utilisant le réflectomètre à ondes millimétriques à balayage transversal pour un morceau de téflon présentant un défaut interne. Les faces avant et arrière de la pièce et du défaut interne sont clairement visibles sans aucune fréquence de battement redondante. Une coupe le long de x et y est présentée.

mesurer l'amplitude du signal de battement lorsqu'une cible réfléchissante nette traverse le faisceau, avec son côté tranchant perpendiculaire à la direction de déplacement.

La résolution est définie comme la distance nécessaire pour observer une amplitude de battement allant de 10% à 90% de la valeur maximale, comme indiqué dans la figure 3.6 (en haut). Des résolutions transversales de 20,1 mm ont été mesurées pour les directions x et y, qui sont en bon accord avec la taille du faisceau dimensionnée par le miroir parabolique (23 mm comme indiqué sur la figure 2.1).

Pour mesurer la résolution longitudinale, deux cibles semi-transparentes séparées par une distance d le long de la dimension longitudinale z ont été observées à l'aide du réflectomètre. Lorsque la distance d diminue, les fréquences des signaux de battement entre la face arrière de la cible avant et la face avant de la cible arrière se rapprochent, comme indiqué dans la figure 3.6 (en bas).

Ici, la résolution longitudinale est définie lorsque la vallée entre les deux pics atteint 50% de l'amplitude maximale selon le critère de Rayleih.

Le critère de Rayleigh stipule que deux pics sont séparables pour une configuration où la première annulation du premier pic correspond au maximum du second voir la figure 3.7.

Dans la figure 3.6, nous avons mesuré une résolution longitudinale d'environ 5

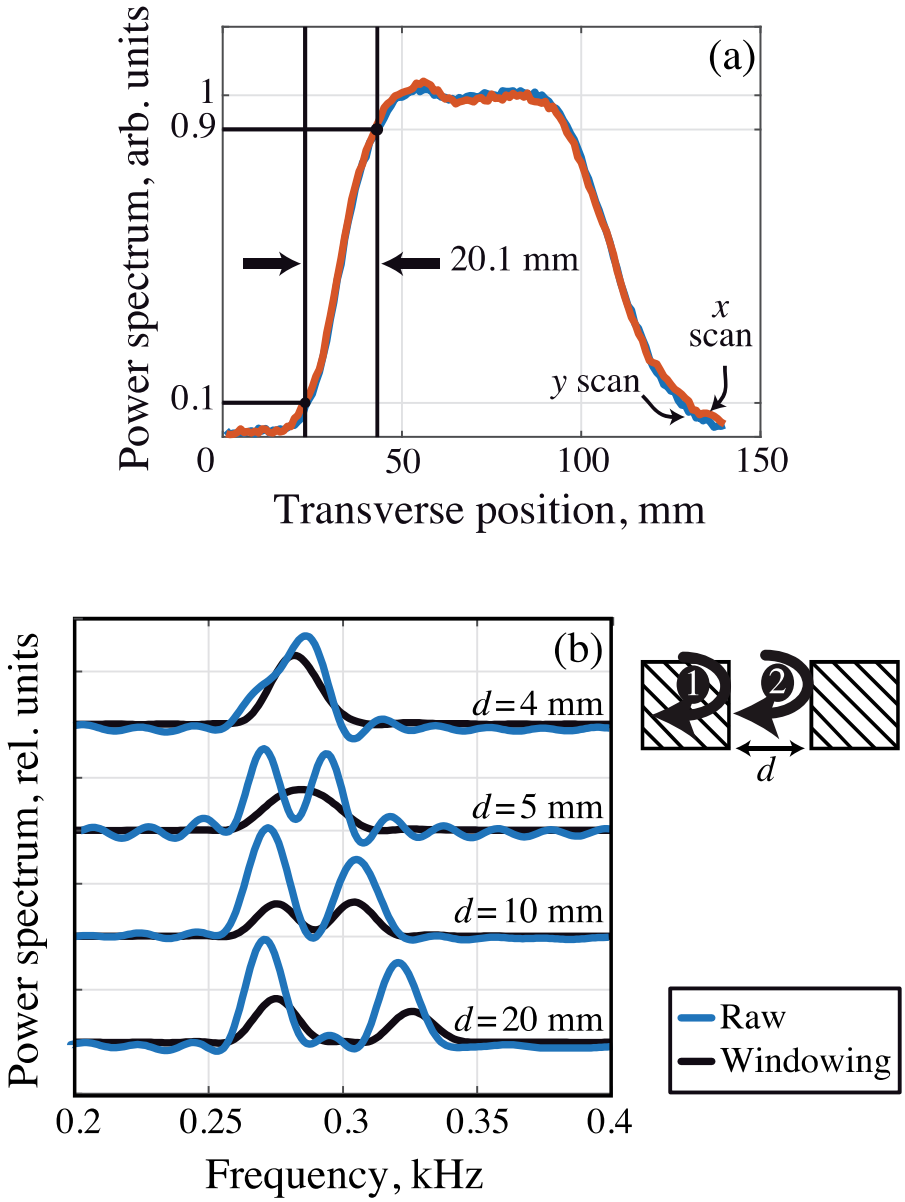


FIGURE 3.6 – Mesures de résolution transversale et longitudinale. (a) Mesure de la résolution transversale en appliquant le critère de 10 - 90 % le long des dimensions x et y. (b) Mesure de résolution longitudinale. Le signal détecté est mesuré lorsque la distance d entre deux cibles se rapproche le long de z. Un décalage d'amplitude artificiel est ajouté à chaque mesure pour une meilleure visibilité. La résolution est mesurée avec et sans fenêtrage de Hamming

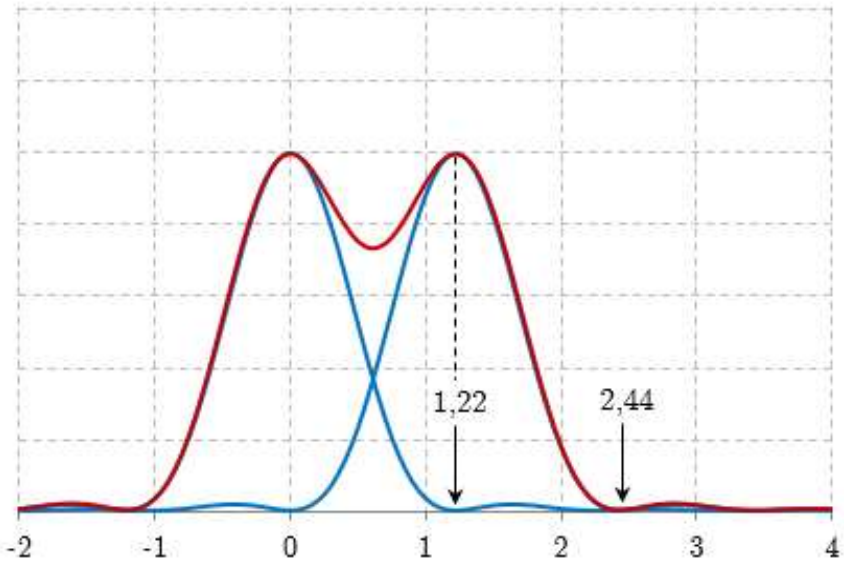


FIGURE 3.7 – Critère de Rayleigh pour déterminer la résolution longitudinal.

mm sans fenêtre, et d'environ 10 mm avec la méthode de Hamming. La résolution théorique est limitée par la bande de fréquence balayée B [122].

Comme le temps de balayage T est limité, la résolution relative de la FFT est : $1/T$, ce qui donne, en utilisant l'équation 1.10, une résolution spatiale longitudinale $\Delta R = c/(2Bn)$ de 4,3 mm (pour $n = 1$ et $B = 35$ GHz), en bon accord avec la résolution expérimentale de 5 mm.

Enfin, nous présentons dans la figure 3.8 deux images 3D de matériaux en béton réels, à savoir des échantillons de béton cellulaire et des échantillons en béton armé. Le rendu de ces images 3D a également été amélioré à l'aide de l'application Volume Viewer de MATLAB ®. Ces images montrent que cette

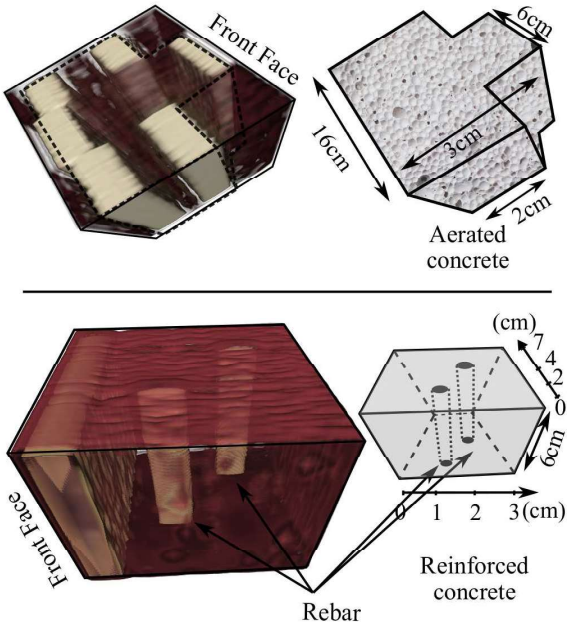


FIGURE 3.8 – Images 3D de matériaux en béton utilisant le réflectomètre à ondes millimétriques pour des échantillons de béton cellulaire (haut) et armé (bas).

configuration de réflectomètre peut être utilisée pour observer les parties internes des matériaux de construction. Malgré les fortes pertes de diffusion de l'échantillon en béton cellulaire, les faces avant et arrière de l'échantillon de 3 cm de profondeur peuvent être observées. Pour l'échantillon de béton armé, les barres d'armature de 3 mm de diamètre peuvent être observées et ainsi contrôlées à l'aide d'une méthode non destructive et sans contact.

3.2 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré que l'ajout du miroir de référence nous a permis de mieux visualiser les différentes faces de la pièce du teflon sans bruit

des signaux de redondances. Nous avons aussi montré les améliorations des techniques de traitement présentées dans le chapitre deux pour les adapter au nouveau setup. ensuite nous avons présenté les performances de notre système en terme de résolution longitudinale qui est de 5 mm sans fenêtrage et de 7 mm avec fenêtrage et la résolution transversale qui est de 20.1 mm.

Chapitre 4

Mesure d'indice de réfraction des matériaux

Sommaire

2.1 Les composants du système radar FMCW 66
2.1.1 Le générateur de fréquences 68
2.1.2 La source THz 68
2.1.3 La diode de détection 69
2.1.4 Miroir parabolique 70
2.1.5 Lame séparatrice 70
2.2 Propriétés des faisceaux gaussiens 71
2.3 Techniques de traitement de signal 76
2.3.1 Généralité sur le traitement de Signal 76
2.3.2 Non-linéarités radio-fréquences 79
2.3.3 Réflexions parasites 85
2.3.4 Amélioration de la précision de mesure 88
2.4 Imagerie 3D 89
2.5 En résumé 94

Les matériaux diélectriques sont utilisés dans de nombreux domaines, du domaine des télécommunications au domaine militaire. L'étude des propriétés de certains matériaux se généralise de plus en plus notamment en science des matériaux, en électrotechnique et en électronique. Ces dernières années, le développement du domaine des dispositifs à grande vitesse et des systèmes hyperfréquences nécessite une parfaite compréhension des caractéristiques des différents matériaux. La spectroscopie Térahertz donne accès à l'indice de réfraction complexe d'une grande variété de matériaux [123], tels que les diélectriques [124], les semi-conducteurs [125], les liquides [126] et les supraconducteurs [127]. Dans ce chapitre, nous proposons une application de notre radar pour mesurer l'indice de réfraction des matériaux. Une configuration de réflectométrie expérimentale est présentée ainsi que des techniques de traitement du signal associées pour mesurer l'indice de réfraction des matériaux diélectriques, sur la base d'un radar à onde continue modulé en fréquence (FM-CW) fonctionnant dans la bande W (75-110 GHz). Le radar FMCW est mieux adapté que les autres systèmes pour les raisons suivantes : économique, moins complexe, et nous n'avons aucune condition sur l'épaisseur des matériaux dans la limite de l'absorption.

L'indice de réfraction n, d'un environnement transparent est défini par le rapport entre la vitesse de propagation de la lumière dans le vide c, et sa vitesse dans cet environnement $v = c/n$. Comme nous avons montré dans le deuxième

chapitre le retard entre le signal réfléchi par la face avant et le signal réfléchi par la face arrière du matériau dépend de l'indice de réfraction de ce dernier. Si nous connaissons les autres paramètres de notre radar comme la période de notre signal, la bande passante et la longueur du matériaux à mesurer, nous pouvons alors déterminer l'indice de réfraction n.

4.1 Caractérisation des matériaux dans l'état liquide et solide

Comme matériau d'essai, nous utilisons le téflon pour sa faible absorption dans la plage de longueurs d'onde inférieure au millimètre. Pour mesurer l'indice de réfraction, nous déterminons d'abord le terme $2B/cT$ en utilisant deux métaux séparés par une distance de 4 cm comme le montre la figure 4.1. La diode détecte deux signaux réfléchis Rm1 et Rm2 et nous trouvons une fréquence pic de 640 Hz. Dans ce cas l'onde est propagée dans l'air et donc $n = 1$ ce qui donne $2B/cT = 16326Hz/m$, avec une période T = 120 ms (le choix de T ne change rien dans les performances de système, il change que les valeurs des fréquences de battement).

Ensuite, nous utilisons un téflon de 6 cm comme cible et nous trouvons un pic de fréquence de 1,665 kHz comme montré sur La figure 4.2 qui présente la densité spectrale du signal détecté avec la diode. Si nous appliquons l'équation 4.1 en remplaçant tous les paramètres par leurs valeurs, nous trouvons que

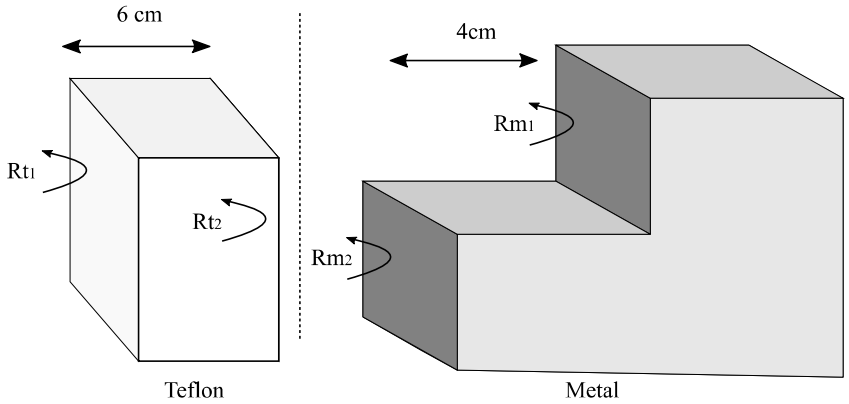


FIGURE 4.1 – Vue mécanique du matériaux de test (à gauche), et d'une pièce en métal pour mesurer le terme $2B/cT$ (à droite)

l'indice de réfraction du téflon égal à 1,8.

$$f_b = 2BR/cT \tag{4.1}$$

Après la mesure de l'indice de réfraction du téflon nous calculerons l'indice de réfraction de la paraffine à l'état solide et liquide. Nous avons fabriqué un support en téflon pour le remplir de paraffine et nous ajoutons un métal pour avoir une réflexion totale P3 comme le montre la figure 4.3.

Puisque nous avons trois réflexions, les faces avant / arrière du téflon (P1 / P2) et la face métallique (P3), nous avons trois battements : P1P2 et P1P3 et P2P3. La figure 4.4 présente les trois fréquences de battement pour les deux états liquide et solide. Pour vérifier les fréquences, nous savons que F13-F23 =

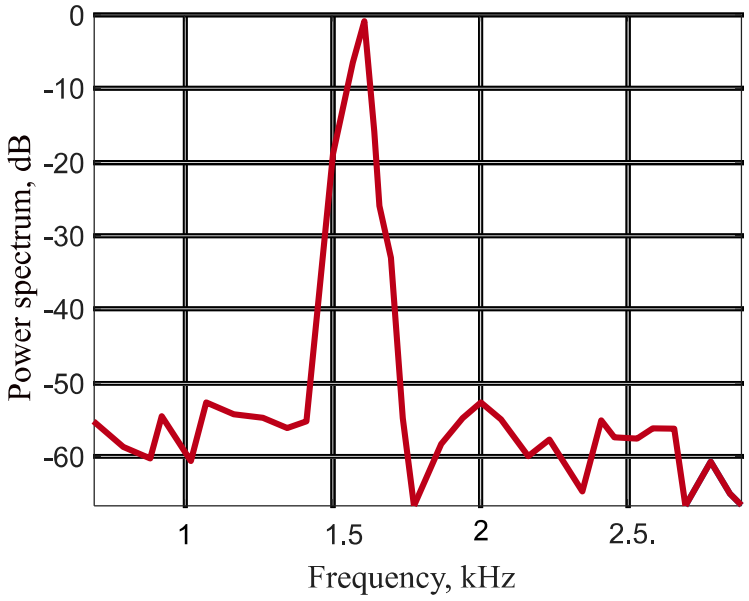


FIGURE 4.2 – DSP du signal détecté pour un téflon de 6 cm

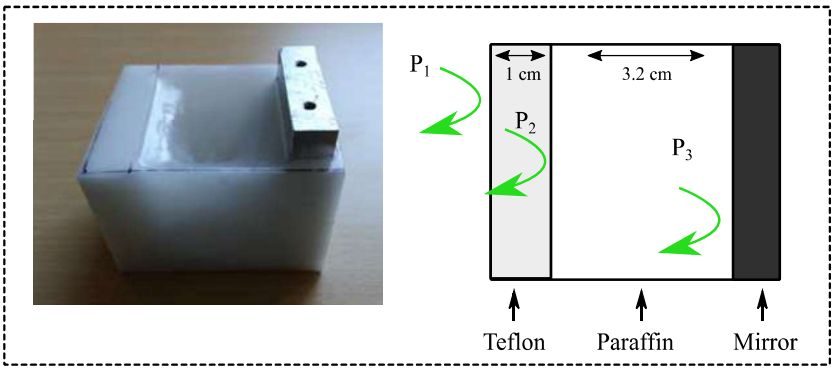


FIGURE 4.3 – Le support en téflon rempli de paraffine avec un métal pour avoir une réflexion totale.

F12.

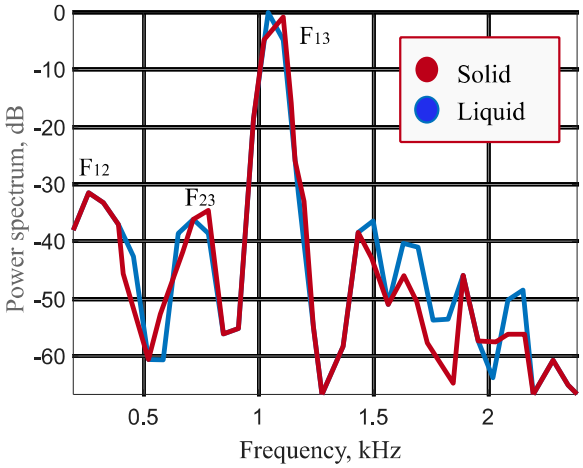


FIGURE 4.4 – Le spectre de puissance du signal détecté par la diode du radar réfléchie par le support représenté sur la figure 4 rempli de paraffine

Pour les deux états, nous avons trouvé trois pics d de fréquence présentés dans le tableau 4.1.

Frequency (kHz)	F12	F23	F13
Solid	0,323	0,776	1,1
Liquid	0,323	à,712	1,036

TABLE 4.1 – pics de fréquences détecté pour la paraffine en état solide et liquide.

F12 pour les deux états ne change pas et c'est normal car il représente le battement entre les deux faces du téflon. D'autre part nous avons une différence entre l'état solide et le liquide pour les fréquences du battement F23 et F13. Étant donné que la FFT impose une résolution minimale de 64 Hz, nous ne

pouvons pas être sûrs des valeurs des fréquences pour les deux états pour déterminer l'indice de réfraction exactement parce que la différence est de l'ordre de résolution.

La fréquence qui nous intéresse est le F23 puisque elle ne présente que la partie propagée dans la paraffine, nous retrouvons pour l'état solide une fréquence de battement de 776 Hz et une fréquence de battement de 712 Hz pour l'état liquide.

4.2 Traitement du signal pour améliorer la résolution

4.2.1 La méthode différentielle

Le changement d'état du paraffine en passant de l'état solide à l'état liquide se traduit par une différence de fréquence très faible. Pour visualiser ce changement, nous utiliserons la méthode du changement de phase que nous expliquons juste après, cette technique permet de mesurer les petites différences d'indice en mesurant la petite variation de fréquence.

Afin d'expliquer le principe de la méthode, nous considérons par exemple deux signaux sinusoïdaux de fréquences f1 et f2 avec $f2 = f1 + \delta$ comme le montre la figure 4.5 avec t1 = T1 et t2 = T2 avec t1 et t2 les premiers maximums pour les deux sinus qui commencent à la même origine.

Puisque t1 = 1 / f1 et t2 = 1 / f2 , cela nous donne f2 = f1 * t1 / t2.

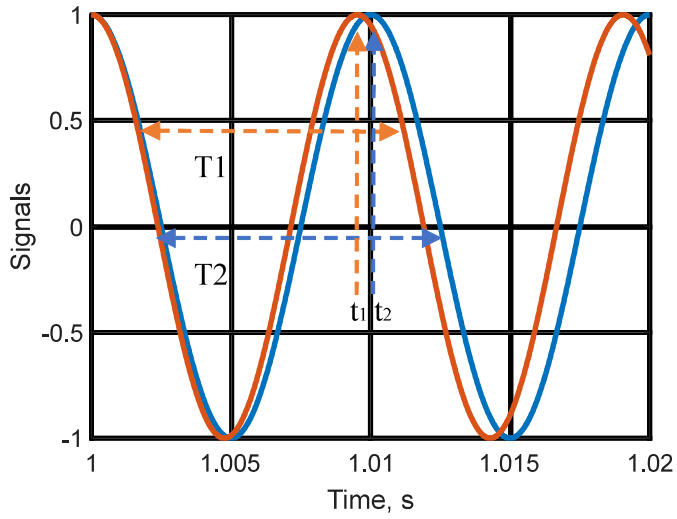


FIGURE 4.5 – Deux signaux sinusoïdaux avec une petite différence de fréquence pour montrer la méthode différentielle

La technique consiste à mesurer le déplacement d'un max (ti) observable par l'oscilloscope alors que le décalage de fréquence est limité par la résolution de notre FFT.

Les figures 4.6 et 4.7 montrent les résultats de la configuration avec le support illustré sur la figure 4.3 rempli de la paraffine en état solide que nous faisons fondre. Au début, nous avons mesuré le signal détecté sur l'oscilloscope toutes les 5 minutes jusqu'à la transition totale à l'état liquide. Les points en bleu sont les résultats de notre méthode radar FMCW en traitant la fréquence, nous observons que celle-ci reste fixée à la valeur de 776 Hz pendant 50 min et juste après elle chute directement à 712 Hz, ce qui est expliqué par la limitation de

la résolution.

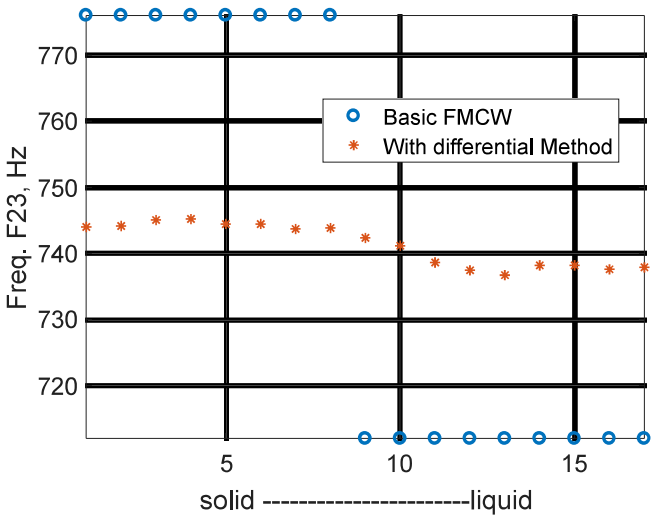


FIGURE 4.6 – Spectre mesuré sans traitement du signal (bleu) et avec la méthode différentielle (orange).

Pour appliquer la méthode, nous avons supposé une fréquence f1 égale à 744 Hz. Cette valeur ne donne pas la vraie valeur des fréquences. Mais avec cette méthode différentielle, nous avons une évolution continue de la fréquence, nous pouvons donc mesurer le pourcentage de liquide et de solide dans le support comme présenté par les points en orange.

Si nous appliquons l'équation radar FMCW, nous pouvons déterminer l'indice comme le montre la figure 4.8.

En appliquant la méthode des phases, nous avons une valeur de 1,425 à l'état solide et une valeur de 1,413 à l'état liquide avec une résolution pratique

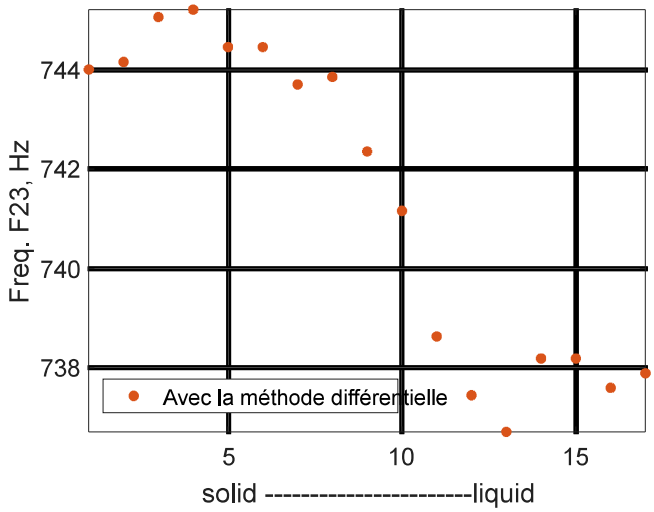


FIGURE 4.7 – Changement de la fréquence de battement en passant de l'état solide à l'état liquide.

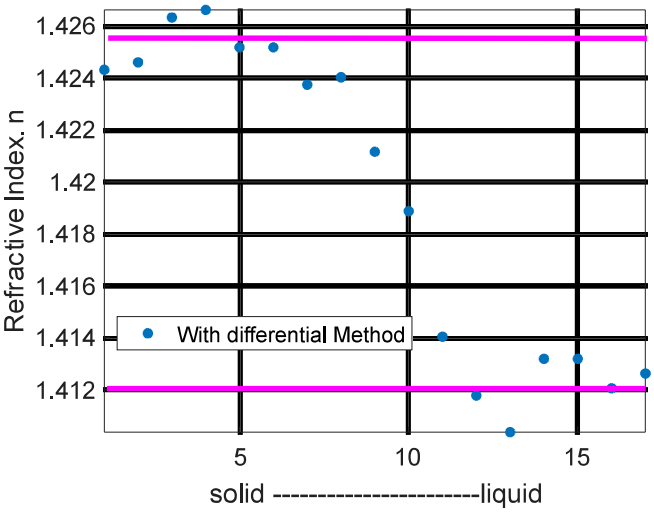


FIGURE 4.8 – L'indice de réfraction passe de l'état solide à l'état liquide. Les lignes violettes indiquent le niveau des états 100 % solide et liquide.

de 0,002. L'avantage de cette technique est qu'on peut voir le changement d'état du matériau, mais elle ne nous donne pas vraiment la bonne valeur de l'indice car nous ne connaissons pas la vraie fréquence f1.

4.3 En résumé

Dans ce chapitre nous avons vu comment nous pouvons mesurer l'indice de réfraction des matériaux avec notre système radar sans miroir externe dans la bande de fréquences 75-110 Ghz. Nous avons montré que nous pouvons même voir les petites variations grâce à la méthode différentielle du traitement de signal qui permet de voir le quantité du solide et du liquide dans la paraffine.

Conclusion

Dans ce manuscrit, nous avons présenté la possibilité d'utiliser un radar FMCW à ondes millimétriques pour la caractérisation des matériaux grâce aux techniques d'imagerie 3D. Nous avons montré que le meilleur compromis entre l'atténuation (due à la diffusion) et la résolution a été obtenu pour les fréquences porteuses dans la bande W, au moins pour les matériaux de construction. Nous avons montré aussi que les systèmes TDS ne fournissent pas suffisamment d'informations car des fréquences plus élevées sont impliquées, réduisant ainsi la profondeur de mesure à quelques millimètres. Nous avons montré que les systèmes FMCW en bande W offrent une profondeur de mesure attrayante de quelques centimètres pour un coût inférieur et un système plus compact, mais sont limités par les non-linéarités RF et les réflexions parasites.

Des techniques de traitement du signal spécifiques et originales comme la calibration et la moyenne spatiale ont été mises en œuvre pour réduire les non-linéarités RF et pour diminuer l'impact des réflexions parasites offrant une amélioration du rapport S / B jusqu'à 20 dB. En outre, une configuration FMCW

originale basée sur un signal de référence à longue distance a été mise en œuvre pour détecter plusieurs défauts internes. Cette configuration permet d'éviter les signaux redondants qui gâcheraient autrement les images matérielles, tout en conservant une résolution transversale élevée et une longue profondeur de mesure. Des expériences de tomographie offrant des résolutions théoriquement limitées (transversales et longitudinales) ont donc été démontrées pour des matériaux de construction réels, prouvant ainsi l'intérêt de tels systèmes pour un diagnostic en temps réel et non destructif des matériaux et des infrastructures civiles.

Une autre application de notre système radar transportable est la mesure de l'indice de réfraction des matériaux dans l'état liquide et solide. La méthode différentielle du traitement de signal nous permet d'observer des petites variations d'indice de réfraction. Des expériences de mesure d'indice ont été démontrées pour la paraffine pour quantifier la partie solide et liquide dans un support de mesure. Une technique de traitement de signal différentielle a été développée pour améliorer la résolution de calcul.

Ce système pourrait permettre de réaliser un examen exhaustif des matériaux de construction typiques pour évaluer les propriétés des matériaux. Pour plus de précision, pour une géométrie arbitraire, il pourrait être nécessaire de combiner la configuration proposée avec des techniques d'imagerie 3D avancées

qui ont déjà été signalées pour l'imagerie THz, par ex. techniques impliquant des mesures avec différents champs de vision, ou combinant des mesures de transmission et de réflexion. Enfin, des améliorations continues des techniques de traitement du signal devraient permettre de mesurer l'atténuation de Rayleigh et / ou Mie, telle qu'elle est effectuée dans des réflectomètres optiques pulsés, améliorant ainsi les informations possibles qui pourraient être extraites du matériau.

Bibliographie

[1] KIM, Namgyu, KIM, Sehoon, AN, Yun-Kyu, et al. "A novel 3D GPR image arrangement for deep learning-based underground object classification". *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, p. 1-12.

[2] Aziz, Azie S., et al. "Locating and characterizing burials using 3D ground-penetrating radar (GPR) and terrestrial laser scanning (TLS) at the historic Mueschke Cemetery, Houston, Texas." *Journal of Archaeological Science* : Reports 8 (2016) : 392-405.

[3] SKOOG, Douglas Arvid, HOLLER, F. James, et NIEMAN, Timothy A. "Principes d'analyse instrumentale". *De Boeck Supérieur*, 2003.

[4] G. Harding, "X-ray scatter tomography for explosives detection," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 71, pp. 869–881, 2004.

[5] K. Wells and D. A. Bradley, "A review of X-ray explosives detection techniques for checked baggage," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 70, no. 8, pp. 1729–1746, 2012.

[6] R. Ewing, "A critical review of ion mobility spectrometry for the detection of explosives and explosive related compounds," *Talanta*, vol. 54, pp. 515–529, 2001.

[7] SLEIMAN, Joyce Bou. "Imagerie et spectroscopie térahertz : application aux problématiques de défense et de sécurité." 2016. Thèse de doctorat.

[8] T. J. Shaw, D. Brown, J. D'Arcy, F. Liu, P. Shea, M. Sivakumar, and T. Gozani, "Small threat and contraband detection with TNA-based systems," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 63, no. 5, pp. 779–782, 2005.

[9] D. Strellis and T. Gozani, "Classifying threats with a 14-MeV neutron interrogation system," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 63, no. 5, pp. 799–803, 2005.

[10] D. Sudac, S. Blagus, and V. Valkovic, "Chemical composition identification using fast neutrons," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 61, no. 1, pp. 73–79, 2004.

[11] R. Osman, Ahmad ; Abd-elrhman, Ashraf ; Bashter, ll ; Megahid, "Detection and Identification of Contraband in Air Cargo Containers Using Neutron Based Techniques," *J. Nucl. Energy Sci. Power Gener. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 2–6, 2013.

[12] W. A. Megahid, R.M., Osman, A.M., Kansouhfg,"Neutron Based Techniques for the Detection of Illicit Materials and Explosives. In : Satellite Meeting held within the framework of the IAEA" "*International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators.* 2009. p. 4-8

[13] T. Gozani, "The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 213, pp. 460–463, 2004.

[14] D. Sudac, S. Blagus, and V. Valkovic, "Inspections for contraband in a shipping container using fast neutrons and the associated alpha particle technique : Proof of principle," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 241, no. 1, pp. 798–803, 2005.

[15] M. R. Scarfi, M. Romano, R. Di Pietro, O. Zeni, A. Doria, G. P. Gallerano, E. Giovenale, G. Messina, A. Lai, and G. Campurra, "THz exposure of whole blood for the study of biological effects on human lymphocytes," *J. Biol. Phys.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 171–176, 2003.

[16] D. J. Paul, "The progress towards terahertz quantum cascade lasers on silicon substrates," Laser Photon. Rev., vol. 4, no. 5, pp. 610–632, 2010.

[17] A. Markelz, S. Whitmire, J. Hillebrecht, and R. Birge, "THz time domain spectroscopy of biomolecular conformational modes," *Phys. Med. Biol.*, vol. 47, no. 21, p. 3797, 2002.

[18] B. M. Fischer, M. Walther, and P. U. Jepsen, "Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time-domain spectroscopy," *Phys. Med. Biol.*, vol. 47, no. 21, p. 3807, 2002.

[19] P. H. Bolivar, M. Brucherseifer, M. Nagel, H. Kurz, and A. Bosserhoff, "Label-free probing of genes by time-domain terahertz sensing," Phys. Med. Biol., vol. 47, no. 21, p. 3815, 2002.

[20] V. P. Wallace, A. J. Fitzgerald, S. Shankar, N. Flanagan, R. Pye, J. Cluff, and D. D. Arnone, "Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma ex vivo and in vivo," Br. J. Dermatol., vol. 151, no. 2, pp. 424–432, 2004.

[21] R. M. Woodward, V. P. Wallace, R. J. Pye, B. E. Cole, D. D. Arnone, E. H. Linfield, and M. Pepper, "Terahertz pulse imaging of ex vivo basal cell carcinoma," J. Invest. Dermatol., vol. 120, no. 1, pp. 72–78, 2003.

[22] K. J. Siebert, T. Löffler, H. Quast, M. Thomson, T. Bauer, R. Leonhardt, S. Czasch, and H. G. Roskos, "All-optoelectronic continuous wave THz imaging for biomedical applications," Phys. Med. Biol., vol. 47, no. 21, p. 3743, 2002.

[23] L. Ho, R. Müller, M. Römer, K. C. Gordon, J. Heinämäki, P. Kleinebudde, M. Pepper, T. Rades, Y. C. Shen, and C. J. Strachan, "Analysis of sustained-release tablet film coats using terahertz pulsed imaging," J. Control. release, vol. 119, no. 3, pp. 253–261, 2007.

[24] P. F. Taday, I. V Bradley, D. D. Arnone, and M. Pepper, "Using terahertz pulse spectroscopy to study the crystalline structure of a drug : a case study of the polymorphs of ranitidine hydrochloride," J. Pharm. Sci., vol. 92, no. 4, pp. 831–838, 2003.

[25] W. Butler, P. Poitevin, and J. Bjornholt, "Benefits of Wide Area Intrusion Detection Systems using FMCW Radar," *Security Technology, 2007 41st Annual IEEE International Carnahan Conference*, pp. 176-182, 8-11 Oct 2007

[26] W. Sediono and A. A. Lestari, "2D Image Reconstruction of Radar INDERA," *International Conference on Mechatronics (ICOM)*, vol. 4, 17- 19 May 2011 2011.

[27] B, K. Cooper et al "Penetrating 3-D Imaging at 4- and 25-m Range Using a Submillimetre-Wave Radar" *IEEE transactions on microwave theory and techniques,* Vol.56, NO.12, December 2008.

[28] B. Mencia-Oliva, J. Grajal, A. Badolato "100-GHz FMCW Radar FrontEnd for ISAR and 3D Imaging" *Radar Conference (RADAR)*, 2011 IEEE.

[29] G-V.Borja and all"Three-Dimensional Millimeter-Wave Portal for Human Body Imaging", *Homeland Security (HST) 2012 IEEE Conference on Technologies for*, pp. 196-201, 2012.

[30] R, J .Dengler et al "Toward real-time penetrating imaging radar at 670 GHz", *Microwave Symposium Digest, 2009. MTT '09. IEEE MTT-S International*, vol., no., pp.941-944, 7-12 June 2009.

[31] S. O. Piper, "Receiver Frequency Resolution for Range Resolution in Homodyne FMCW Radar," *National Telesystems Conference Proceedings, Atlanta, GA*, 16- 17 June 1993.

[32] B, K. Copper et al. "Penetrating 3-D imaging at 4-and 25-m range using a submillimeter-wave radar". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,* 2008, vol. 56, no 12, p. 2771-2778.

[33] Sleiman, Joyce Bou. Imagerie et spectroscopie térahertz : application aux problématiques de défense et de sécurité. Diss. 2016.

[34] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, "Picosecond photoconducting Hertzian dipoles," Appl. Phys. Lett., vol. 45, no. 3, pp. 284–286, 1984.

[35] M. Van Exter, C. Fattinger, and D. Grischkowsky, "Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor," Opt. Lett., vol. 14, no. 20, pp. 1128–1130, 1989.

[36] D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, R. Neelamani, R. G. Baraniuk, and M. C. Nuss, "Gas sensing using terahertz time-domain spectroscopy," Appl. Phys. B Lasers Opt., vol. 67, no. 3, pp. 379–390, 1998

[37] R. A. Cheville and D. Grischkowsky, "Far-infrared foreign and self-broadened rotational linewidths of high-temperature water vapor," JOSA B, vol. 16, no. 2, pp. 317–322, 1999.

[38] T.-I. Jeon, D. Grischkowsky, A. K. Mukherjee, and R. Menon, "Electrical characterization of conducting polypyrrole by THz time-domain spectroscopy," Appl. Phys. Lett., vol. 77, no. 16, pp. 2452–2454, 2000

[39] S. D. Brorson, R. Buhleier, I. E. Trofimov, J. O. White, C. Ludwig, F. F. Balakirev, H.-U. Habermeier, and J. Kuhl, "Electrodynamics of high-temperature superconductors investigated with coherent terahertz pulse spectroscopy," JOSA B, vol. 13, no. 9, pp. 1979–1993, 1996.

[40] I. Wilke, M. Khazan, C. T. Rieck, P. Kuzel, C. Jaekel, and H. Kurz, "Time-domain Terahertz spectroscopy as a diagnostic tool for the electrodynamic properties of high temperature superconductors," Phys. C Supercond., vol. 341, pp. 2271–2272, 2000.

[41] T. Ikeda, A. Matsushita, M. Tatsuno, Y. Minami, M. Yamaguchi, K. Yamamoto, M. Tani, and M. Hangyo, "Investigation of inflammable liquids by terahertz spectroscopy," Appl. Phys. Lett., vol. 87, no. 3, p. 34105, 2005.

[42] N. Vieweg, B. M. Fischer, M. Reuter, P. Kula, R. Dabrowski, M. A. Celik, G. Frenking, M. Koch, and P. U. Jepsen, "Ultrabroadband terahertz spectroscopy of a liquid crystal," Opt. Express, vol. 20, no. 27, pp. 28249–28256, 2012.

[43] ROUX, J.-F., et al "Principles and applications of THz time domain spectroscopy". *In : Physics and Applications of Terahertz Radiation. Springer, Dordrecht*, 2014. p. 203-231.

[44] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 2, p. 97, 2007.

[45] D. M. Mittleman, "Twenty years of terahertz imaging," *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, pp. 9417–9431, Apr 2018.

[46] S. Gu, C. Li, X. Gao, Z. Sun, and G. Fang, "Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 60, no. 12, pp. 3877–3885, 2012.

[47] Q. Song, Y. Zhao, A. Redo-Sanchez, C. Zhang, and X. Liu, "Fast continuous terahertz wave imaging system for security," *Opt. Commun.*, vol. 282, no. 10, pp. 2019–2022, 2009.

[48] T. M. Goyette, J. C. Dickinson, K. J. Linden, W. R. Neal, C. S. Joseph, W. J. Gorveatt, J. Waldman, R. Giles, and W. E. Nixon, "1.56 terahertz 2-frames per second standoff imaging," in *Terahertz Technol. App.*, vol. 6893, p. 68930J, 2008.

[49] K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart, B. Thomas, G. Chattopadhyay, and P. H. Siegel, "THz imaging radar for standoff personnel screening," *IEEE Trans. THz Sci. and Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 169–182, 2011.

[50] D. M. Sheen, D. L. McMakin, T. E. Hall, and R. H. Severtsen, "Active millimeter-wave standoff and portal imaging techniques for personnel screening," in *Proc. IEEE Conf. Technol. Homeland Security*, Boston, MA, May 2009, pp. 440–447.

[51] T. Loeffler, "3D-Terahertz-tomography for material inspection and security," in *Proc. OPTO 2009 & IRS*^{2}, pp. 179–184, 2009.

[52] D. A. Robertson, P. N. Marsh, D. R. Bolton, R. J. Middleton, R. I. Hunter, P. J. Speirs, D. G. Macfarlane, S. L. Cassidy, and G. M. Smith, "340-GHz 3D radar imaging test bed with 10-Hz frame rate," in *Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XV*, vol. 8362, p. 836206, 2012.

[53] J. Grajal, A. Badolato, G. Rubio-Cidre, L. Úbeda-Medina, B. Mencia-Oliva, A. Garcia-Pino, B. Gonzalez-Valdes, and O. Rubiños, "3-D high-resolution imaging radar at 300 GHz with enhanced FoV," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 3, pp. 1097–1107, 2015.

[54] G. Ghazi, "Modeling and experimental validation for 3D mm-wave radar imaging," Ph.D. dissertation, Northeastern Univ., 2017.

[55] T. Henriksson, N. Joachimowicz, C. Conessa, and J.-C. Bolomey, "Quantitative microwave imaging for breast cancer detection using a planar 2.45 GHz system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 10, pp. 2691–2699, 2010.

[56] S. Kharkovsky and R. Zoughi, "Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation-overview and recent advances," *IEEE Instrum. & Meas. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 26–38, 2007.

[57] M. T. Ghasr, J. T. Case, and R. Zoughi, "Novel reflectometer for millimeter-wave 3-D holographic imaging," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 5, pp. 1328–1336, 2014.

[58] K. Kawase, T. Shibuya, S. Hayashi, and K. Suizu, "THz imaging techniques for nondestructive inspections," *C. R. Phys.*, vol. 11, no. 7-8, pp. 510–518, 2010.

[59] T. Musch, "A high precision 24-GHz FMCW radar based on a fractional-N ramp-PLL," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 2, pp. 324–327, 2003.

[60] T. Jaeschke, C. Bredendiek, S. Küppers, and N. Pohl, "High-precision D-band FMCW-radar sensor based on a wideband SiGe-transceiver MMIC," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 62, no. 12, pp. 3582–3597, 2014.

[61] J. P. Guillet, B. Recur, L. Frederique, B. Bousquet, L. Canioni, I. Manek-Hönninger, P. Desbarats, and P. Mounaix, "Review of terahertz tomography techniques," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 35, no. 4, pp. 382–411, 2014.

[62] D. A. Robertson, D. G. Macfarlane, R. I. Hunter, S. L. Cassidy, N. Llombart, E. Gandini, T. Bryllert, M. Ferndahl, H. Lindström, J. Tenhunen *et al.*, "High resolution, wide field of view, real time 340GHz 3D imaging radar for security screening," in *Proc. SPIE 10189, Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XX*, 101890C, May 2017.

[63] G. Rubio-Cidre, A. Badolato, L. Úbeda-Medina, J. Grajal, B. Mencia-Oliva, and B.-P. Dorta-Naranjo, "DDS-based signal-generation architecture comparison for an imaging radar at 300 GHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 11, pp. 3085–3098, 2015.

[64] K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart, T. Bryllert, G. Chattopadhyay, E. Schlecht, J. Gill, C. Lee, A. Skalare, I. Mehdi *et al.*, "Penetrating 3-D imaging at 4-and 25-m range using a submillimeter-wave radar," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 56, no. 12, Pa, pp. 2771–2778, 2008.

[65] F. Friederich, K. May, B. Baccouche, C. Matheis, M. Bauer, J. Jonuscheit, M. Moor, D. Denman, J. Bramble, and N. Savage, "Terahertz radome inspection," *Photonics*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2018.

[66] A. Bassli, A. Benbassou, J. Belkadid, A. Pénarier, S. Blin, and P. Nouvel, "THz reflectometer for 3D imaging at 100 GHz," *IEEE Int. Conf. WITS*, 2017.

[67] A. Bassli, A. Abbes, P. Nouvel, A. Penarier, M. Myara, J. Belkadid, and S. Blin, "Three-dimensional imaging of materials at 0.1 THz for inner-defect detection," *French-German Terahertz Conf.*, 2019.

[68] W. L. Chan, J. Deibel, and D. M. Mittleman, "Imaging with terahertz radiation," *Reports Progress Phys.*, vol. 70, no. 8, p. 1325, 2007.

[69] J.-F. Roux, F. Garet, and J.-L. Coutaz, "Principles and applications of THz time domain spectroscopy," in *Phys. Appl. Terahertz Radiat.*. Springer, 2014, pp. 203–231.

[70] A. Abina, U. Puc, A. Jeglič, and A. Zidanšek, "Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and building materials," *Appl. Spectrosc. Rev.*, vol. 50, no. 4, pp. 279–303, 2015.

[71] R. Piesiewicz, C. Jansen, S. Wietzke, D. Mittleman, M. Koch, and T. Kürner, "Properties of building and plastic materials in the THz range," *Int. J. Infrared Millim. Waves*, vol. 28, no. 5, pp. 363–371, 2007.

[72] M. Schwerdtfeger, E. Castro-Camus, K. Krügener, W. Viöl, and M. Koch, "Beating the wavelength limit : three-dimensional imaging of buried sub-wavelength fractures in sculpture and construction materials by terahertz time-domain reflection spectroscopy," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 3, pp. 375–380, 2013.

[73] S. R. Chinn, E. A. Swanson, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 340–342, 1997.

[74] A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, 1986.

[75] D. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani, R. Baraniuk, J. Rudd, and M. Koch, "Recent advances in terahertz imaging," *Appl. Phys. B*, vol. 68, pp. 1085–1094, 1999.

[76] C. Am Weg, W. von Spiegel, R. Henneberger, R. Zimmermann, T. Loeffler, and H. G. Roskos, "Fast active THz cameras with ranging capabilities," *J. Infrared, Millim. Terahertz Waves*, vol. 30, no. 12, pp. 1281–1296, 2009.

[77] S. O. Piper, "Homodyne FMCW radar range resolution effects with sinusoidal nonlinearities in the frequency sweep," in *Proc. Int. Radar Conf.*, Alexandria, VA, USA, pp. 563–567, May 1995.

[78] H. Griffiths, "The effect of phase and amplitude errors in FM radar," in *IEE High Time-Bandwidth Product Waveforms in Radar Sonar Colloq.*, London, U.K., pp. 9/1–9/5, 1991.

[79] B. Mencia-Oliva, J. Grajal, O. A. Yeste-Ojeda, G. Rubio-Cidre, and A. Badolato, "Low-cost CW-LFM radar sensor at 100 GHz," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 2, pp. 986–998, 2013.

[80] H.-H. Ko, K.-W. Cheng, and H.-J. Su, "Range resolution improvement for FMCW radars," in *European Radar Conf.*, pp. 352–355, 2008.

[81] M. A. Richards, *Fundamentals of radar signal processing*, Tata McGraw-Hill Education, 2005.

[82] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 2, p. 97, 2007.

[83] D. M. Mittleman, "Twenty years of terahertz imaging," *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, pp. 9417–9431, Apr 2018.

[84] S. Gu, C. Li, X. Gao, Z. Sun, and G. Fang, "Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 60, no. 12, pp. 3877–3885, 2012.

[85] Q. Song, Y. Zhao, A. Redo-Sanchez, C. Zhang, and X. Liu, "Fast continuous terahertz wave imaging system for security," *Opt. Commun.*, vol. 282, no. 10, pp. 2019–2022, 2009.

[86] T. M. Goyette, J. C. Dickinson, K. J. Linden, W. R. Neal, C. S. Joseph, W. J. Gorveatt, J. Waldman, R. Giles, and W. E. Nixon, "1.56 terahertz 2-frames per second standoff imaging," in *Terahertz Technol. App.*, vol. 6893, p. 68930J, 2008.

[87] K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart, B. Thomas, G. Chattopadhyay, and P. H. Siegel, "THz imaging radar for standoff personnel screening," *IEEE Trans. THz Sci. and Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 169–182, 2011.

[88] D. M. Sheen, D. L. McMakin, T. E. Hall, and R. H. Severtsen, "Active millimeter-wave standoff and portal imaging techniques for personnel screening," in *Proc. IEEE Conf. Technol. Homeland Security*, Boston, MA, May 2009, pp. 440–447.

[89] T. Loeffler, "3D-Terahertz-tomography for material inspection and security," in *Proc. OPTO 2009 & IRS*^{2}, pp. 179–184, 2009.

[90] D. A. Robertson, P. N. Marsh, D. R. Bolton, R. J. Middleton, R. I. Hunter, P. J. Speirs, D. G. Macfarlane, S. L. Cassidy, and G. M. Smith, "340-GHz 3D radar imaging test bed with 10-Hz frame rate," in *Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XV*, vol. 8362, p. 836206, 2012.

[91] J. Grajal, A. Badolato, G. Rubio-Cidre, L. Úbeda-Medina, B. Mencia-Oliva, A. Garcia-Pino, B. Gonzalez-Valdes, and O. Rubiños, "3-D high-resolution imaging radar at 300 GHz with enhanced FoV," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 3, pp. 1097–1107, 2015.

[92] G. Ghazi, "Modeling and experimental validation for 3D mm-wave radar imaging," Ph.D. dissertation, Northeastern Univ., 2017.

[93] T. Henriksson, N. Joachimowicz, C. Conessa, and J.-C. Bolomey, "Quantitative microwave imaging for breast cancer detection using a planar 2.45 GHz system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 10, pp. 2691–2699, 2010.

[94] S. Kharkovsky and R. Zoughi, "Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation-overview and recent advances," *IEEE Instrum. & Meas. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 26–38, 2007.

[95] M. T. Ghasr, J. T. Case, and R. Zoughi, "Novel reflectometer for millimeter-wave 3-D holographic imaging," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 5, pp. 1328–1336, 2014.

[96] K. Kawase, T. Shibuya, S. Hayashi, and K. Suizu, "THz imaging techniques for nondestructive inspections," *C. R. Phys.*, vol. 11, no. 7-8, pp. 510–518, 2010.

[97] T. Musch, "A high precision 24-GHz FMCW radar based on a fractional-N ramp-PLL," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 2, pp. 324–327, 2003.

[98] T. Jaeschke, C. Bredendiek, S. Küppers, and N. Pohl, "High-precision D-band FMCW-radar sensor based on a wideband SiGe-transceiver MMIC," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 62, no. 12, pp. 3582–3597, 2014.

[99] J. P. Guillet, B. Recur, L. Frederique, B. Bousquet, L. Canioni, I. Manek-Hönninger, P. Desbarats, and P. Mounaix, "Review of terahertz tomography techniques," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 35, no. 4, pp. 382–411, 2014.

[100] D. A. Robertson, D. G. Macfarlane, R. I. Hunter, S. L. Cassidy, N. Llombart, E. Gandini, T. Bryllert, M. Ferndahl, H. Lindström, J. Tenhunen *et al.*, "High resolution, wide field of view, real time 340GHz 3D imaging radar for security screening," in *Proc. SPIE 10189, Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XX*, 101890C, May 2017.

[101] G. Rubio-Cidre, A. Badolato, L. Úbeda-Medina, J. Grajal, B. Mencia-Oliva, and B.-P. Dorta-Naranjo, "DDS-based signal-generation architecture comparison for an imaging radar at 300 GHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 11, pp. 3085–3098, 2015.

[102] K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart, T. Bryllert, G. Chattopadhyay, E. Schlecht, J. Gill, C. Lee, A. Skalare, I. Mehdi *et al.*, "Penetrating 3-D imaging at 4-and 25-m range using a submillimeter-wave radar," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 56, no. 12, Pa, pp. 2771–2778, 2008.

[103] F. Friederich, K. May, B. Baccouche, C. Matheis, M. Bauer, J. Jonuscheit, M. Moor, D. Denman, J. Bramble, and N. Savage, "Terahertz radome inspection," *Photonics*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2018.

[104] J. Grajal, A. Badolato, G. Rubio-Cidre, L. U beda-Medina, B. Mencia-Oliva, A. Garcia-Pino, B. Gonzalez-Valdes, and O. Rubinos, "3-d high-resolution imaging radar at 300 ghz with enhanced fov " IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 3, pp.1097–1107, 2015.

[105] A. E. Siegman, Lasers. University Science Books, 1986.

[106] A. Bassli, A. Benbassou, J. Belkadid, A. Pénarier, S. Blin, and P. Nouvel, "THz reflectometer for 3D imaging at 100 GHz," *IEEE Int. Conf. WITS*, 2017.

[107] A. Bassli, A. Abbes, P. Nouvel, A. Penarier, M. Myara, J. Belkadid, and S. Blin, "Three-dimensional imaging of materials at 0.1 THz for inner-defect detection," *French-German Terahertz Conf.*, 2019.

[108] W. L. Chan, J. Deibel, and D. M. Mittleman, "Imaging with terahertz radiation," *Reports Progress Phys.*, vol. 70, no. 8, p. 1325, 2007.

[109] J.-F. Roux, F. Garet, and J.-L. Coutaz, "Principles and applications of THz time domain spectroscopy," in *Phys. Appl. Terahertz Radiat.*. Springer, 2014, pp. 203–231.

[110] A. Abina, U. Puc, A. Jeglič, and A. Zidanšek, "Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and building materials," *Appl. Spectrosc. Rev.*, vol. 50, no. 4, pp. 279–303, 2015.

[111] R. Piesiewicz, C. Jansen, S. Wietzke, D. Mittleman, M. Koch, and T. Kürner, "Properties of building and plastic materials in the THz range," *Int. J. Infrared Millim. Waves*, vol. 28, no. 5, pp. 363–371, 2007.

[112] MARKS, Robert J. II. Introduction to Shannon sampling and interpolation theory. Springer Science ,Business Media, 2012.

[113] M. Schwerdtfeger, E. Castro-Camus, K. Krügener, W. Viöl, and M. Koch, "Beating the wavelength limit : three-dimensional imaging of buried sub-wavelength fractures in sculpture and construction materials by terahertz time-domain reflection spectroscopy," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 3, pp. 375–380, 2013.

[114] S. R. Chinn, E. A. Swanson, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 340–342, 1997.

[115] A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, 1986.

[116] D. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani, R. Baraniuk, J. Rudd, and M. Koch, "Recent advances in terahertz imaging," *Appl. Phys. B*, vol. 68, pp. 1085–1094, 1999.

[117] C. Am Weg, W. von Spiegel, R. Henneberger, R. Zimmermann, T. Loeffler, and H. G. Roskos, "Fast active THz cameras with ranging capabilities," *J. Infrared, Millim. Terahertz Waves*, vol. 30, no. 12, pp. 1281–1296, 2009.

[118] S. O. Piper, "Homodyne FMCW radar range resolution effects with sinusoidal nonlinearities in the frequency sweep," in *Proc. Int. Radar Conf.*, Alexandria, VA, USA, pp. 563–567, May 1995.

[119] H. Griffiths, "The effect of phase and amplitude errors in FM radar," in *IEE High Time-Bandwidth Product Waveforms in Radar Sonar Colloq.*, London, U.K., pp. 9/1–9/5, 1991.

[120] B. Mencia-Oliva, J. Grajal, O. A. Yeste-Ojeda, G. Rubio-Cidre, and A. Badolato, "Low-cost CW-LFM radar sensor at 100 GHz," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 2, pp. 986–998, 2013.

[121] H.-H. Ko, K.-W. Cheng, and H.-J. Su, "Range resolution improvement for FMCW radars," in *European Radar Conf.*, pp. 352–355, 2008.

[122] M. A. Richards, *Fundamentals of radar signal processing*, Tata McGraw-Hill Education, 2005.

[123] R.J. Bell, Introductory Fourier Transform Spectroscopy (Academic, New-York, 1972).

[124] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and Ch. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," J. Opt. Soc. Amer. B, vol. 7, pp. 2006–2015, Oct. 1990.

[125] J. E. Pedersen and S. R. Keiding, "THz time-domain spectroscopy of nonpolar liquids," IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 2518–2522, Oct. 1992

[126] WHITAKER, John F., GAO, Feng, et LIU, Yongqian. Terahertz bandwidth pulses for coherent time-domain spectroscopy. In : Nonlinear Optics

for High-Speed Electronics and Optical Frequency Conversion. International Society for Optics and Photonics, 1994. p. 168-177.

[127] S. Gu et al., "Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 60, no. 12, pp. 3877–3885, Oct, 2012

Articles et Communications

Communications :

Amine BASSLI, Annick Penarier, Stéphane Blin, Philippe Nouvel " Radar FMCW pour la caractérisation de matériaux " Les Journées Nano, Micro et Optoélectronique JNMO 2016 Village Vacances La Gaillarde, 30/05/2016 – 01/06/2016.

Amine BASSLI, Belkadid Jamal, Ali Benbassou " Réflectomètre THz pour la caractérisation de matériaux" La Journée des Doctorants du LSSC, Centre de conférence, FST, Fès, Maroc 20/12/2016

Amine BASSLI, Belkadid Jamal, Ali Benbassou, Annick Penarier, Stéphane Blin, Philippe Nouvel " THz reflectometer for 3D imaging at 100 GHz" International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems WITS 2017 , 19-20/04/2017

Bassli, Amine ; Nouvel, Philippe ; Penarier, Annick ; Myara, Mikhael ; Belkadid, Jamal " Three-Dimensional Imaging of Materials at 0.1 THz for Inner-Defect Detection " French-German THz Conference FGTC 2019 , Kaiserslautern, Germany 2-5/04/2019 .

Articles :

Amine Bassli ; Stéphane Blin ; Philippe Nouvel ; Mikhaël Myara ; Jean-François Roux ; Ali Benbassou ; Jamal Belkadid ; Annick Penarier " Three-Dimensional Imaging of Materials at 0.1 THz for Inner-Defect Detection Using a Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar " IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 13 January 2020 page(s) : 1-10.

Amine BASSLI, Belkadid Jamal, Ali Benbassou, Annick Penarier, Stéphane Blin, Philippe Nouvel "Refractive Index Measured Using a Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar at 100 GHz " The International Journal on Engineering Applications (IREA), 10/10/2019 Vol 7, No 4 (2019), Scopus