

Développement de l'imagerie à un pixel aux fréquences
électromagnétiques térahertz (THz) avec l'utilisation d'un
modulateur de type microsystème électromécaniques
(MEMS)

par

Louis-Philip BÉLIVEAU

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 12 SEPTEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Louis-Philip Béliceau, 2022



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. François Blanchard directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Bora Ung, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Frederic Nabki, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 AOÛT 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord adresser mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le professeur François Blanchard. Sans son orientation, son expertise, ses conseils et son support, je ne serais pas en train d'écrire ces lignes aujourd'hui. C'est grâce à sa passion pour le sujet et sa patience autant en laboratoire que dans ses explications théoriques qu'aujourd'hui je suis en mesure de réaliser des expériences THz en laboratoire et je lui en suis reconnaissant.

J'aimerais également remercier l'équipe de Tera-ETS, qui m'a supporté à travers les nombreux projets et expériences qui ont pu être réalisés durant ma maîtrise. Particulièrement, j'aimerais remercier Xavier pour son support et sa patience avec les nombreux alignements effectués. Merci d'avoir fait en sorte que même les expériences ratées soient enrichissantes et de m'avoir permis de garder le moral à travers tous les problèmes d'équipements qui sont survenus. Je tiens également à remercier Joël pour m'avoir permis de participer à ma première expérience de modulation d'ondes THz, j'attends impatiemment de voir les résultats des prochaines expériences de génération de trains d'impulsions THz. Merci à Léo de m'avoir permis d'évacuer mes frustrations tout en augmentant mon niveau de grimpe en m'accompagnant au Allez-up entre les heures de rédaction de mon mémoire.

Je voudrais également dédier ce paragraphe au remerciement de Mariia, qui a été là pour m'aider pendant ces deux dernières années. En tant qu'amie, collègue et parfois psychologue, tu m'as grandement aidé dans mon apprentissage et mes moments difficiles. Que ce soit dans le milieu professionnel ou académique, je n'ai aucun doute que nos futures collaborations seront fructueuses!

Merci également à Maiko, ma femme, qui a fait ce parcours avec moi et qui a partagé mes bonheurs et mes peines. Merci de m'avoir toujours supporté malgré les longues heures de travail et d'absence. Depuis ton arrivée au Canada, nous avons traversé ensemble de nombreux défis. La route a été longue, mais je crois que nous pouvons dire que la destination en valait

les efforts. Merci d'avoir accepté de tout laisser derrière pour venir vivre avec moi. Tu as largement droit à ta part du mérite pour mon succès dans ce parcours.

Finalement, j'aimerais remercier mes parents, pour leur soutien depuis ma naissance et particulièrement pendant cette partie de mon parcours académique. Pendant que je planifiais mon avenir, vous traversiez l'enfer. Je vous dois une dette que je ne pourrai jamais rembourser et je tiens à ce que vous me sachiez à quel point je vous suis reconnaissant. J'espère pouvoir vous donner une fois de plus l'occasion d'être fier. Sincèrement, merci.

DÉVELOPPEMENT DE L'IMAGERIE À UN PIXEL AUX FRÉQUENCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES TÉRAHERTZ AVEC L'UTILISATION D'UN MODULATEUR DE TYPE MICROSYSTÈME ÉLECTROMÉCANIQUE

Louis-Philip BÉLIVEAU

RÉSUMÉ

Le domaine des Térahertz (THz) est une technologie dans laquelle les performances et applications se sont multipliées au cours des vingt dernières années. Les énormes progrès réalisés ont ouvert la porte à de nombreuses avancées scientifiques ainsi qu'à de premières applications industrielles THz. Dans ce contexte, la modulation THz est de plus en plus explorée pour de nombreuses applications, telles que l'imagerie, la communication, la spectroscopie, etc.

Ce travail vise à contribuer à l'avancement des méthodes de modulation THz existants en présentant de nouvelles applications de modulation THz par transducteurs ultrasoniques micro-usinés piézoélectriques (PMUT) ainsi qu'en démontrant une nouvelle méthode de communication THz utilisant un dispositif « digital micro-mirror device » (DMD) ainsi qu'un miroir échelon. L'objectif final de la recherche présenté était de permettre l'imagerie THz en utilisant un modulateur PMUT.

Le texte commence par une revue de la théorie, concepts ou principes de base couvrant différentes méthodes d'émission et de détection d'ondes THz. La revue détaille ensuite la spectroscopie THz, les différentes méthodes de modulations THz existantes et conclut sur la possibilité d'utiliser ces modulations dans un contexte d'imagerie THz.

Ensuite, la fabrication des dispositifs PMUT utilisés, les hypothèses et les configurations expérimentales, ainsi que la conception du circuit et du programme de contrôle de la matrice de PMUT sont présentées dans la section méthodologie du mémoire.

Les résultats des différentes expériences réalisées sont ensuite également présentés dans la section résultats. L'application de l'imagerie par acquisition de pixels compressés n'ayant pu être réalisée pour des raisons techniques, ce chapitre se termine par les résultats de la caractérisation de la matrice de PMUT et de son contrôleur, suivis d'une conclusion sur sa fonctionnalité.

Finalement, ce mémoire se conclut par un résumé des différents résultats de recherche qui y sont présentés, suivi de recommandations sur les améliorations possibles aux divers systèmes conçus afin d'obtenir de meilleurs résultats, de corriger certains défauts ou d'expliquer les applications futures permises par la technologie démontrée dans ce document.

Mots-clés: Térahertz TDS, PMUT, Spectroscopie Térahertz, Acquisition à un pixel, Acquisition compressée

Development of single-pixel imaging at terahertz (THz) electromagnetic frequencies using a microelectromechanical system (MEMS) modulator

Louis-Philip BÉLIVEAU

ABSTRACT

The Terahertz (THz) domain is a technology in which performances and applications have multiplied over the last two decades. The enormous progress made has opened the door to many scientific advances and, in certain cases, to the first industrial THz applications. In this context, THz modulation is increasingly explored for many applications, such as imaging, communication, spectroscopy, etc.

This work aims to contribute to the advancement of existing THz modulation methods by presenting new applications of THz modulation using a piezoelectric micromachined ultrasonic transducers (PMUT) as well as by demonstrating a new method of THz communication using a digital micro-mirror device (DMD) and an echelon mirror. The final goal of the research presented was to enable THz imaging using a PMUT modulator.

The text begins with a literature review covering different methods of THz emission and detection. The literature review then details the THz spectroscopy, the different existing THz modulation methods and concludes with the possibility to use these modulations in a THz imaging context.

Following the literature review, the fabrication of the PMUT devices used, the hypotheses and experimental configurations as well as the design of the circuit and the control program of the PMUT array are presented in the methodology section of the thesis.

The results of the various experiments performed are then also presented in the results section. Since the application of imaging by acquisition to a compressed pixel could not be performed for technical reasons, this chapter ends with the results of the characterization of the PMUT array and its controller, followed by a conclusion on its functionality.

Finally, this thesis concludes with a summary of the various research achievements presented in this thesis, followed by recommendations on possible improvements to the various systems designed to obtain better results, to correct certain defects or to explain the future applications allowed by the technology demonstrated in this text.

Keywords: Terahertz TDS, PMUT, Terahertz spectroscopy, Single pixel acquisition, Compressed acquisition

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Les ondes térahertz	1
1.2 Comparaison avec les longueurs d'ondes traditionnelles	2
1.3 Les applications des ondes térahertz.....	3
1.4 Les limitations des ondes térahertz	4
1.5 Organisation du mémoire.....	6
CHAPITRE 2 LES ONDES THZ	9
2.1 Génération d'ondes THz	9
2.1.1 Antennes photoconductrices (PCA).....	9
2.1.2 Redressement optique (OR).....	11
2.1.3 Spintronique.....	12
2.2 Détection d'ondes THz	14
2.2.1 Échantillonnage temporel	14
2.2.2 Antennes photoconductrices (PCA) en détection	17
2.2.3 Ligne à délais rapide	18
2.3 Spectroscopie THz dans le domaine temporel.....	21
2.3.1 Comparaison avec les systèmes infrarouge par transformé de fourrier (FTIR)	22
2.3.2 Extraction de paramètre optiques.....	22
2.4 Modulation d'ondes THz	24
2.4.1 Modulations THz existantes	24
2.4.2 Exemple d'application de modulation d'amplitude du faisceau Optique.....	29
2.4.3 Exemple d'application de modulation spatiale du faisceau THz.....	31
2.5 Imagerie THz	34
2.5.1 Imagerie THz passive vs Imagerie THz-TDS.....	34
2.5.2 L'imagerie par caméra THz	38
2.5.3 L'imagerie TDS par CS	40
CHAPITRE 3 SPECTROSCOPIE THZ À L'AIDE DE TRANSDUCTEURS ULTRASONIQUES MICRO-USINÉS PIÉZOÉLECTRIQUES.....	43
3.1 Transducteurs ultrasoniques micro-usinés piézoélectriques.....	43
3.1.1 PMUT simple.....	43
3.1.2 Matrice de PMUT	45
3.2 Spectroscopie dérivée	47
3.2.1 Hypothèse dans le THz avec PMUT simple	48
3.2.2 Hypothèse avec matrice de PMUT	49
3.2.3 Apprentissage des systèmes THz : Développement de communication par paquet THz.....	50
3.2.4 Intégration de PMUT simple pour spectroscopie dérivée.....	52

3.2.5	Intégration de matrice de PMUT pour modulation de THz.....	54
3.3	Conception du contrôleur de PMUT	56
3.3.1	Hypothèse de contrôle de PMUT	56
3.3.2	Approche logicielle.....	59
3.3.3	Méthode de caractérisation du contrôleur.....	61
CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....		65
4.1	Résultats de communication par paquets THz.....	65
4.1.1	Contexte	65
4.1.2	Génération de train d'impulsion	65
4.1.3	Encodage d'information dans le train d'impulsion.....	68
4.1.4	Applications futures	69
4.2	Résultats de spectroscopie THz dérivée	70
4.2.1	Contexte	70
4.2.2	Spectroscopie dérivée par PMUT simple	70
4.2.3	Simulation sur matrice de PMUT	75
4.2.4	Spectroscopie dérivée par matrice de PMUT	77
4.3	Résultats de caractérisation de matrice PMUT pour acquisition compressée	81
4.3.1	Caractérisation de déplacement et de fréquence d'oscillation.....	81
4.3.2	Caractérisation de paramètres de vitesse de modulation	84
4.3.3	Caractérisation avec contrôleur.....	86
4.3.4	Conclusion sur la fonctionnalité de la matrice.....	88
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		89
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		168

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Spectre électromagnétique	1
Figure 2.1	Schéma de génération THz par antenne photoconductrice :.....	10
Figure 2.2	Principe de génération d'onde THz ETHzt à partir d'une impulsion optique $\hbar\omega$ par redressement optique	11
Figure 2.3	Principe de fonctionnement d'un émetteur THz spintronique :.....	13
Figure 2.4	Schéma simplifié d'acquisition THz-TDS tiré de Neu & Schmuttenmaer (2018, p.3).....	15
Figure 2.5	Principe d'acquisition THz TDS :.....	16
Figure 2.6	Schéma de détection THz par antenne photoconductrice :.....	18
Figure 2.7	Variation des signaux térahertz mesurés dans les deux périodes de l'opto réflecteur dans la ligne à retard optique oscillante (à droite) et la position correspondante de l'opto réflecteur dans la ligne à retard optique oscillante (à gauche). Tiré de Jin et al. (2007, p.4).....	20
Figure 2.8	Principe d'utilisation de transformé de Fourier rapide (FFT) pour convertir une acquisition de domaine temporel en domaine fréquentiel tiré de Zhuldybina (2021, p.54).....	21
Figure 2.9	Schéma de géométrie de spectroscopie THz en réflexion ou en transmission :	23
Figure 2.10	Configuration expérimentale de modulation du faisceau optique :	26
Figure 2.11	Reconstruction d'imagerie à un pixel compressé à l'aide d'un disque métallique tournant :	27
Figure 2.12	Dispositif modulateur spatial de lumière (SLM) pour moduler la phase aux fréquences THz :	28
Figure 2.13	Configuration expérimentale permettant d'effectuer une acquisition à un pixel compressé à partir d'un faisceau THz incident à un prisme de silicium photo excité par une impulsion optique modulée par un DMD tiré de Stantchev et al.(2020, p.4).....	30
Figure 2.14	Modulateur THz à partir de matrice de PMUT :.....	32

Figure 2.15	Analyse de signal THz modulé par PMUT :.....	33
Figure 2.16	Exemple d'imagerie THz :.....	35
Figure 2.17	Signal THz temporel après acquisition sur échantillons :.....	36
Figure 2.18	Signal THz fréquentiel après acquisition sur échantillons :.....	37
Figure 2.19	Acquisition THz par matrice de transistors à effet de champ (FET)	38
Figure 2.20	Acquisition par caméra THz basée sur matrice de FET :	39
Figure 3.1	Illustration du dispositif PMUT simple : (a) Illustration du dispositif PMUT et de ses bornes; (b) Illustration du dispositif PMUT en vue explosée; (c) Du déplacement des différentes pièces du PMUT tiré de Amirkhan et al., (n.d., p.2)	44
Figure 3.2	Illustration de la matrice PMUT développée :.....	45
Figure 3.3	Configuration expérimentale de test de PMUT à l'aide d'un vibromètre	46
Figure 3.4	Comparaison de signaux THz dérivés intégrés à un signal d'ordre 0 :	49
Figure 3.5	Configuration expérimentale de génération de train d'impulsion THz :	51
Figure 3.6	Configuration expérimentale de spectroscopie THz dérivée utilisant un PMUT simple.....	53
Figure 3.7	Configuration expérimentale de spectroscopie THz dérivée utilisant une matrice de PMUT	55
Figure 3.8	Schéma simplifié du circuit de contrôle par optocoupleur de la matrice de PMUT.....	57
Figure 3.9	Schéma simplifié du circuit de contrôle par interrupteur AC à contrôle sérialisé	58
Figure 3.10	Diagramme de fonctionnement de l'algorithme de contrôle du circuit embarqué contrôlant la matrice de PMUT et de sa relation avec l'interface d'utilisateur	60
Figure 3.11	Schéma de configuration de test :	62
Figure 4.1	Génération de train d'impulsion à l'aide d'un miroir à échelon :.....	66

Figure 4.2	Modulation du train d'impulsion à l'aide des motifs programmés sur le DMD :	67
Figure 4.3	Encodage d'information dans un train d'impulsion THz : (a) Encodage de ETS en encodant 1 bit par 3 impulsions; (b) Encodage de ETS2021! en encodant 1 bit par impulsion Tiré de Edouard et al., (2022, p.6).....	69
Figure 4.4	Acquisition THz sur PMUT simple :.....	71
Figure 4.5	Signaux THz acquis par PMUT simple intégrés et normalisés:	72
Figure 4.6	Signaux THz normalisés représentés dans le domaine fréquentiel :.....	73
Figure 4.7	Indice de réfraction du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenu par spectroscopie THz dérivée à différentes harmoniques, intégrées ou non, comparé à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle	74
Figure 4.8	Coefficient d'absorption du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenu par spectroscopie THz dérivée à différentes harmoniques, intégrées ou non, comparés à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle	75
Figure 4.9	Résultat de simulation d'acquisition de signal THz TDS à l'aide de la matrice de PMUT développée :	76
Figure 4.10	Acquisition THz sur matrice de PMUT : Acquisition du signal de référence d'ordre 0 (sans oscillation des PMUT) et de la 1 ^{ère} harmonique pour a) la référence et b) l'échantillon (Si).....	78
Figure 4.11	Signaux THz acquis par matrice de PMUT intégrés et normalisé: Signal d'ordre 0 à la 1 ^{ère} harmonique intégrée pour a) la référence et b) l'échantillon (Si)	78
Figure 4.12	Signaux THz normalisés représentés dans le domaine fréquentiel :.....	79
Figure 4.13	Indice de réfraction du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenu par spectroscopie THz dérivée de la 1 ^{ère} harmonique, intégrée ou non, comparé à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle	80
Figure 4.14	Coefficient d'absorption du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenu par spectroscopie THz dérivée de la 1 ^{ère} harmonique, intégrée ou non, comparé à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle	81

Figure 4.15	Vitesse de déplacement des 16 PMUT de la matrice développée en fonction de la fréquence d'excitation appliquée à leurs bornes	82
Figure 4.16	Caractérisation des déplacements des PMUT de la matrice développée : a) Déplacement moyen des PMUT en fonction de la tension appliquée; b) déplacements individuels à différentes tensions pour les PMUT 1 à 16 (A1 à D4).....	83
Figure 4.17	Caractérisation du nombre d'impulsions nécessaires pour placer un PMUT dans un mode d'oscillation stable	84
Figure 4.18	Caractérisation du taux maximal de masques par seconde applicable sur la matrice effectuée par variation de la période des optocoupleurs de contrôle.....	85
Figure 4.19	Caractérisation des déplacements des différents PMUT de la matrice lors de l'application de masques spécifiques :	86

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AC	Alternative Current
ADC	Analog-to-Digital Converter
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASK	Amplitude Shift Keying
ASOPS	Asynchronous Optical Sampling
BER	Bit Error Rate
CAD	Canadian Dollar
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CS	Compressive Sensing
CW	Continuous Wave
DC	Direct Current
DMD	Digital Micromirror Device
ECOPS	Electronically Controlled Optical Sampling
EM	Electromagnetic
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FET	Field-Effect Transistor
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Ferromagnetic
FTIR	Fourier transform infrared
HDPE	High-Density Polyethylene
IR	Infrared
ISHE	Inverse Spin-Hall Effect

LED	Light-Emitting Diode
MEMS	Micro-Electromechanical System
NM	Nonferromagnetic
OODL	Oscillating Optical Delay Lines
OOK	On-Off Keying
OR	Optical Rectification
OSCAT	Optical Sampling by Laser Cavity Tuning
PBS	Polarized Beam Splitter
PCA	Photoconductive Antenna
PCB	Printed Circuit Board
PMUT	Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers
RIP	Restricted Isometry Property
SLM	Spatial Light Modulator
SOI	Silicon On Insulator
SNR	Signal to Noise Ratio
TDS	Time Domain Spectroscopy
THz	Terahertz
THz-TDS	Time Domain Spectroscopy of Terahertz frequencies
UV	Ultraviolet
V _{pp}	Peak-to-Peak Voltage

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

c	vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
d	distance (m)
V	tension électrique (volt)
I	courant électrique (ampère)
J	densité de courant (A/m^2)
f	fréquence (hertz)
P	polarisation
T	transmission
ω	fréquence angulaire ($2\pi f$)
Hz	unité de fréquence (hertz)
kHz	kilohertz (10^3 hertz)
THz	terahertz (10^{12} hertz)
Ω	unité de résistance (ohm)
R	résistance (Ω)
Z	impédance (Ω)
\vec{E}, E	champ électrique (V/m)
\vec{H}, H	champ magnétique (A/m)
\hbar	constante de Planck divisée par 2π ($\hbar = 1.0546 \times 10^{-34} \text{ Js}$)
ϵ_0	$\epsilon_0 \epsilon_r$ permittivité du vide ($(8.85 \times 10^{-12} \text{ C/Vm})$)
ϵ_r	permittivité relative ou constante diélectrique
ϵ	$\epsilon_0 \epsilon_r$ permittivité d'un milieu
μ_0	perméabilité du vide ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

μ_r	perméabilité relative
μ	$\mu_0\mu_r$ perméabilité magnétique
\propto	proportionnalité
$\frac{\partial}{\partial t}$	dérivée partielle
$\frac{\partial^2}{\partial t^2}$	dérivée partielle double
α	coefficient d'absorption (m^{-1})
n	indice de réfraction
γ	Angle
θ	Angle
Δ	différence, décalage, delta
δ	plus petite valeur résolue, résolution d'un système
Φ	matrice $n \times n$ de coefficient pour CS
Ψ	base de représentation de vecteur pour CS
Θ	matrice de détection $\Phi\Psi$
b/s	bit par seconde, unité de vitesse de transfert d'information
kb/s	kilobit par seconde (10^3 b/s)
Mb/s	Mégabit par seconde (10^6 b/s)
Gb/s	Gigabit par seconde (10^9 b/s)
Tb/s	Térabit par seconde (10^{12} b/s)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Les ondes térahertz

Le rayonnement térahertz (THz) est une partie du spectre électromagnétique (EM) située entre les fréquences infrarouges (IR) et les micro-ondes. Plus précisément, les fréquences sont comprises entre 0.1 et 10 THz (Dhillon et al., 2017; Mittleman, 2017). Il est possible de visualiser où se situe le spectre THz par rapport aux spectres de régions plus connues en observant la Figure 1.1.

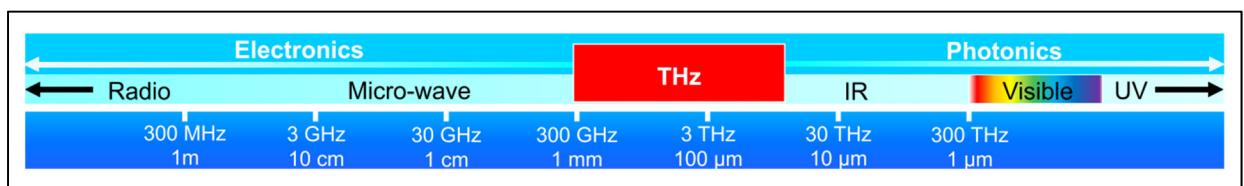


Figure 1.1 Spectre électromagnétique
Tiré de Zhuldybina (2021, p.34)

Pendant de nombreuses années, cette région était connue sous le nom de « THz Gap » en raison du manque de méthodes appropriées d'émission et de détection dans la gamme THz. Au cours des dernières décennies, le développement de diverses techniques de génération et de détection des ondes THz a permis à cette gamme de fréquences d'atteindre un niveau de maturité similaire à celui des régions EM voisines (Dhillon et al., 2017; Mittleman, 2017). Le rayonnement THz offre de nombreuses propriétés intéressantes pour une grande variété d'applications. Quelques-unes des propriétés remarquables de ce spectre sont énumérées ci-dessous (Woodward, 2005) :

- La capacité de pénétrer divers matériaux optiquement opaques, par exemple les polymères, les plastiques, les céramiques, le papier ou le bois.
- Ces ondes sont non ionisantes due à la faible énergie des photons (quelques meV), ce qui la rend sans danger pour la santé.

- La résolution spatiale plus élevée ($100 \mu\text{m}$) que le spectre des micro-ondes en raison de la longueur d'onde plus courte ($\lambda=300 \mu\text{m}$ à 1THz).
- La forte absorption par une multitude de molécules telles que l'eau, l'ADN, la drogue, etc.
- La capacité d'étudier des interactions avec la matière à une échelle sous la picoseconde.

Cette dernière caractéristique est obtenue grâce à l'émission et la détection cohérente d'ondes THz, qui permettent une mesure d'information résolue en phase lors de l'acquisition. Elle sera explorée plus en profondeur dans le chapitre 2 de cette thèse. Une propriété qui n'a pas été mentionnée précédemment, mais qui est cruciale pour comprendre la technologie THz, est le fait que la gamme THz est inaccessible à la fois pour l'électronique conventionnelle, car la fréquence est trop élevée, et pour l'optique conventionnelle, car les sources et les détecteurs sont inadaptés pour ces ondes. Cela a conduit au développement d'équipements THz spécifiques pour la génération et la détection de ces ondes qui seront également abordés dans le chapitre 2 de cette thèse.

1.2 Comparaison avec les longueurs d'onde traditionnelles

En tenant compte des caractéristiques mentionnées précédemment, il est possible d'identifier de nombreux scénarios dans lesquels les ondes THz offrent de nouvelles possibilités par rapport aux régions avoisinantes du spectre électromagnétique. La technologie THz offre notamment des avantages par rapport aux systèmes présentement intégrés dans l'industrie dans les gammes suivantes :

- **Rayons-X :** Les rayonnements THz sont non-ionisants et ne présentent pas de risques pour la santé en raison de leur faible énergie photonique précédemment mentionnée, ce qui rend les THz déployables avec moins de contraintes que les rayons X. (Fan et al., 2017)
- **Infrarouge :** Les ondes THz pénètrent des matériaux diélectriques et sont moins susceptibles aux diffusions de Rayleigh et de Mie.
- **Micro-ondes :** L'utilisation d'ondes THz permet d'obtenir une résolution supérieure à celle des micro-ondes due à leur courte longueur d'onde. De plus, certaines

empreintes moléculaires se situent dans la plage d'onde THz, permettant l'utilisation de cette dernière pour leur identification (Hoshina et al., 2009; Sizov, 2017).

- **Ultrasons :** Les ondes THz permettent l'inspection de matériau sans contact là où les ultrasons ne le permettent pas (Fan et al., 2017).

Ces avantages par rapport aux différentes technologies existantes font des THz un choix intéressant pour de nombreuses applications, qui seront discutées dans la section suivante.

1.3 Les applications des ondes térahertz

La position particulière des ondes THz dans le spectre électromagnétique en font une solution intéressante pour les applications requérant l'inspection de matériel de manière non invasive et non destructive (Dhillon et al., 2017; Fan et al., 2017; Zhuldybina et al., 2019).

L'une des principales applications non destructives des ondes THz est la spectroscopie. D'une part, l'utilisation des ondes THz pour des applications de spectroscopie est vue comme complémentaire aux technologies infrarouges commercialement disponibles grâce à sa gamme dynamique supérieure dans la gamme des infrarouges lointains, en plus de donner accès à des empreintes moléculaires spécifiques telles que l'eau, les explosifs, les narcotiques et certains produits pharmaceutiques (Dhillon et al., 2017; Jepsen et al., 2011). Les ondes THz sont également transparentes à de nombreux matériaux qui sont opaques aux ondes optiques telles que les polymères, le plastique, le papier et le bois, ce qui en fait un bon choix pour des applications d'inspections de ces matériaux (Guerboukha et al., 2018a; Jansen et al., 2010). Grâce à sa pénétration supérieure dans des matériaux tels que le béton et différents isolants, l'utilisation de THz pour des inspections de sécurités dans le domaine de la construction a également été suggérée (Tao et al., 2020). L'utilisation d'ondes THz permet en outre de recourir à spectroscopie dans le domaine temporel (TDS) qui enregistre simultanément les informations de phase et d'amplitude ce qui permet d'obtenir facilement les propriétés THz des matériaux tels que l'indice complexe de réfraction, le coefficient d'absorption, etc. La THz-TDS sera discutée plus en profondeur dans la section 2 de ce texte.

En plus des applications spectroscopiques des ondes THz, de nombreuses autres applications potentielles des ondes THz existent en raison de leurs propriétés uniques. La pénétration de la matière ainsi que le faible risque d'ionisation en font une gamme d'ondes potentiellement utilisable dans le domaine de la sécurité intérieure (Cooper et al., 2011; Woodward, 2005) en permettant la détection par imagerie de divers matériaux à travers les vêtements d'une personne sans mettre la personne à risque. Une autre application prometteuse grâce aux propriétés de ces ondes est la tomodensitométrie THz. Des résultats semblables à ceux obtenus à partir d'une tomodensitométrie conventionnelle faite à l'aide de rayons X ont démontré la possibilité d'utiliser les ondes THz comme alternative plus sécuritaire pour cette application (Bessou et al., 2012). En outre, les ondes THz possèdent également un grand potentiel dans des applications telles que l'imagerie (Chauvin et al., 2020; Shen et al., 2012; Stantchev et al., 2020; Watts et al., 2014), le contrôle de qualité (Zhuldybina et al., n.d.) et les télécommunications (Akyildiz et al., 2014; Federici & Moeller, 2010). La position des THz dans la bande électromagnétique en fait la prochaine étape logique pour la prochaine technologie de vitesse de communication sans fil (Akyildiz et al., 2014; Federici & Moeller, 2010). Récemment, des systèmes de communication THz ont démontré une vitesse de transfert allant jusqu'à 160 Gb/s (Nellen et al., 2022). D'ailleurs, une expérience visant de futures applications en télécommunications THz, a d'ailleurs été développée au courant de cette thèse et sera discutée dans le chapitre 3.

1.4 Les limitations des ondes térahertz

Bien que les nombreuses caractéristiques uniques des ondes THz et les avantages que cette plage d'onde possède par rapport à d'autres plages du spectre électromagnétique sont intéressants, il est important de garder en tête que de nombreuses limitations existent tout de même pour cette technologie. D'une part, pour les systèmes d'imageries, la résolution des THz est limitée par sa longueur d'onde. En effet, les ondes à plus haute fréquence permettent une meilleure résolution. La spectroscopie en champ proche a pour but de contrer cette limitation, mais elle n'est pas convenable à toutes les applications (Tonouchi, 2007; Woodward, 2005). D'autre part, la propagation des ondes THz est affectée par de nombreux paramètres

atmosphériques, tels que la présence de vapeur d'eau, qui absorbe les THz lors d'émission dans l'air. Il en résulte que la distance de transmission d'information à des fréquences THz est limitée. De nombreuses recherches sont faites pour développer des méthodes qui permettent d'augmenter la portée des ondes, mais ça n'en demeure pas moins une limitation à tenir compte lors de la conception de système THz (Chen et al., 2021). Une dernière limitation à mentionner est la haute consommation d'énergie des systèmes THz. Les systèmes reposant sur une génération optique par laser sont gourmands en consommation énergétique et le taux d'efficacité de conversion d'énergie en champ THz demeure très faible (Chen et al., 2021). De plus, une solution à la limitation en distance suggérée est l'augmentation de la puissance émise, ce qui accentue le problème de consommation d'énergie, tout et enlevant l'avantage sécuritaire des THz puisque les sources à puissances élevées comportent des risques pour la santé (Woodward, 2005). Des méthodes d'émission de THz efficace sont en développement, mais sont généralement dans l'ordre de 1% d'efficacité de conversion d'onde laser au mieux (Fülöp et al., 2014; Guiramand et al., 2022) et il faut garder en considération que le laser est fondamentalement une technologie à faible efficacité énergétique. Il est important de mentionner que des technologies alternatives ne dépendant pas de laser femtosecondes pulsé ont été développées. Parmi ces technologies, on retrouve la génération électronique par technologie de semi-conducteur complémentaire à oxyde métallique (CMOS), la génération par diode à tunnel résonnant et la génération par laser quantique cascades (Asada & Suzuki, 2021; Sengupta et al., 2018; Tredicucci et al., 2004). Avec ces méthodes, des ondes THz peuvent être générées à partir de seulement quelques mW de puissance (Sengupta et al., 2018). Cependant, ces alternatives n'offrent pas la résolution temporelle à l'échelle de la picoseconde nécessaire pour étudier la dynamique de phénomènes physiques, qui nécessite un laser femtoseconde cohérent qui est dispendieux à l'achat et consomme une grande quantité d'énergie. En bref, malgré le potentiel des ondes THz, de nombreux obstacles se dressent sur leur intégration dans l'industrie.

1.5 **Organisation du mémoire**

Ce mémoire décrit l'application d'une méthode novatrice de modulation de faisceau THz, la modulation par transducteurs ultrasoniques micro-usinés piézoélectriques (PMUT). Les PMUT sont pour effectuer l'acquisition de la dérivée d'impulsions THz et cette acquisition est par la suite utilisée pour effectuer la spectroscopie de divers matériaux, démontrant ainsi la première spectroscopie dérivative à l'aide d'ondes THz. La configuration expérimentale réalisée ainsi que les résultats obtenus seront discutés dans cette thèse. La thèse décrit également l'application de PMUT pour l'imagerie THz à un pixel à l'aide d'échantillonnage compressé (CS). Pour y parvenir, la conception d'une matrice de PMUT ainsi que d'un circuit de contrôle ont été effectués et seront détaillés dans le texte. Les essais effectués en laboratoire pour évaluer les performances du système développé seront également discutés par la suite. La thèse décrit en outre une méthode novatrice de génération de train d'impulsions aux fréquences THz permettant un transfert de donné sans fil à des vitesses THz. La méthode repose sur l'utilisation de miroir à échelon pour générer des trains d'impulsion en série avec un dispositif « digital micro-mirror device » (DMD) pour les moduler. La configuration expérimentale réalisée ainsi que les résultats publiés seront également discutés dans la thèse.

Le chapitre 2 de ce mémoire consiste en une revue de la théorie, concepts ou principes de base THz nécessaires pour mettre en contexte le lecteur avec les expériences et les conceptions réalisées au cours de la recherche menant à cette thèse. La description commence par expliquer les différentes méthodes de générations d'ondes THz utilisées pendant les expériences, soit la génération par antenne photoconductrice (PCA), la génération par redressement optique (OR) et la génération par spintronique. Ensuite, la détection des ondes THz est également expliquée. L'échantillonnage THz temporel, la méthode de détection par PCA et l'utilisation de ligne à délais rapide y sont expliqués. Le chapitre explique ensuite le principe TDS qui a été utilisé pendant les expériences. La modulation THz est ensuite expliquée afin d'établir un comparatif avec les différentes modulations utilisées dans les expériences de la thèse. Diverses méthodes de modulation sont également expliquées dans cette section. Finalement, ce chapitre fait le lien

avec les concepts expliqués et introduit l'imagerie THz ainsi que les méthodes existantes pour améliorer sa qualité et sa rapidité.

Le chapitre 3 de ce mémoire présente la méthodologie de ce mémoire. La description, la caractérisation et la conception du dispositif PMUT simple et de la matrice de PMUT utilisé sont décrites dans la première section de ce chapitre. Les hypothèses par rapport à ces deux types de dispositifs ainsi que leurs montages expérimentaux sont par la suite expliqués. Une description d'une expérience de communication THz par paquet est également effectuée dans cette sous-section. Le chapitre décrit ensuite la conception effectuée pour contrôler la matrice de PMUT. La conception matérielle et logiciel ainsi que la caractérisation du contrôleur sont décrits dans cette section.

Dans le chapitre 4, les résultats des expériences décrites précédemment sont présentés. La première description effectuée est celle de l'expérience de communication par paquet THz. Par la suite, les résultats se concentrent sur les spectroscopies effectuées avec différents dispositifs PMUT. Finalement, ce chapitre décrit les résultats de la caractérisation de la matrice de PMUT développée au cours de cette recherche et conclu sur le niveau de fonctionnalité de la matrice.

Enfin, ce manuscrit se termine par une conclusion sur les différentes expériences effectuées, suivi de discussions sur les résultats et de suggestion d'amélioration afin de guider les futurs chercheurs qui voudront continuer à explorer les possibilités de la modulation par PMUT.

CHAPITRE 2

LES ONDES THZ

2.1 Génération d'ondes THz

Les systèmes THz sont généralement séparés en deux catégories : (1) les systèmes à larges bandes, qui génèrent une impulsion THz dite large bande et qui sont principalement générés de façon photonique et donc à partir d'impulsions lasers et (2) les systèmes à bandes étroites, aussi connu sous le nom de systèmes à ondes continues (CW), qui génèrent une seule fréquence à l'aide de photo mélangeurs (Tao et al., 2020). Comme les expériences décrites dans cette thèse ont été réalisées avec des systèmes à impulsions large bande, seules les méthodes permettant de générer de telles impulsions seront abordées. Plus précisément, les méthodes de génération par antenne photoconductrice (PCA), par rectification optique (OR) et par spintronique ont été utilisées pendant les expériences décrites dans le chapitre 4. Les principes de fonctionnement de ces méthodes seront expliqués dans ce chapitre.

2.1.1 Antennes photoconductrices (PCA)

Une PCA typique est constituée de deux électrodes déposées sur un semi-conducteur, comme le montre la Figure 2.1. Ces électrodes sont polarisées par une tension. Pour générer une impulsion THz, un laser à impulsion femtoseconde est focalisé entre les deux électrodes, comme le montre la Figure 2.1 a), où l'on peut observer une impulsion optique d'énergie $\hbar\omega$ entrer en contact avec le substrat de l'antenne entre deux électrons polarisés par une tension E_{DC} . Les photons de l'impulsion laser, ayant une énergie supérieure à la largeur de bande interdite du semi-conducteur, sont absorbés par ce dernier et génèrent des électrons libres $N(t)$. Ainsi, les porteurs de charges (des paires de trous et d'électrons) passent de la bande de valence à la bande de conduction du semi-conducteur. Le semi-conducteur passe donc en un instant très court de l'état d'isolant à un état conducteur. Ainsi, les porteurs de charges libres sont accélérés par le champ de polarisation dans une seule direction, générant un photocourant. Par la suite,

les variations de densité du photocourant génèrent une impulsion électromagnétique dans les fréquences THz. Le champ électrique de l'impulsion THz est proportionnel à la dérivée du photocourant tel que : Un courant transitoire $J(t)$ est généré entre les deux électrodes en raison de la tension de polarisation qui leur est appliquée (voir Figure 2.1 b)). Par conséquent, la Figure 2.1 c) illustre qu'une onde THz d'amplitude temporelle $E(t) \propto E_p \frac{dJ}{dt}$, où E_p représente le champ de polarisation appliqué sur les bornes de l'antenne, est générée par la variation de ce courant.

Un autre facteur déterminant la fonctionnalité d'une PCA est la forme et la longueur des électrodes. Parmi les formes existantes, on retrouve les lignes à bandes, « bow-tie » et les dipôles (Jepsen et al., 2011).

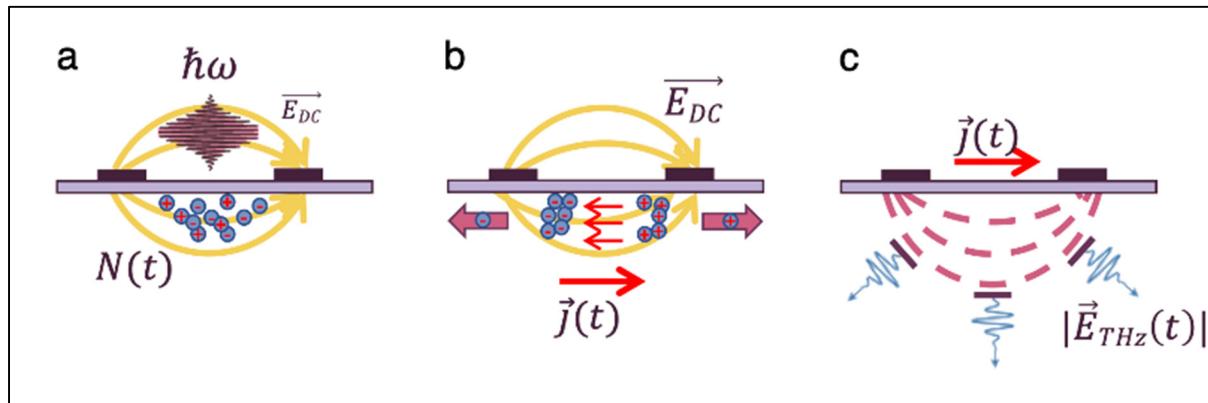


Figure 2.1 Schéma de génération THz par antenne photoconductrice :
a) Génération d'électrons libres ($N(t)$) à l'arrivée de l'impulsion optique ($\hbar\omega$); b) Accélération des électrons dans le champ (\vec{E}_{DC}) menant à la création de photo courant ($\vec{j}(t)$);
c) Impulsion THz $|\vec{E}_{THz}(t)|$ émise
Tiré de Zhuldybina (2021, p.42)

Le semi-conducteur le plus communément utilisé dans les PCA est le *GaAs* en raison de sa grande propriété diélectrique et de sa grande mobilité de porteurs (Burford & El-Shenawee, 2017), ce qui lui permet d'avoir un temps de recombinaison faible. L'énergie de bande du *GaAs* est de ~ 1.42 eV, ce qui est légèrement inférieur à l'énergie des photons d'un faisceau laser de 800nm. Les expériences décrites dans cette thèse ont été en partie réalisées avec un laser de 800nm projeté sur une PCA de type « bow-tie ». L'un des points forts de cette méthode

est sa haute efficacité avec des lasers d'intensité relative faible puisqu'elle implique l'absorption à un photon. L'un de ses points faibles est la fragilité des PCA ainsi que leur coût de fabrication relativement élevée.

2.1.2 Redressement optique (OR)

Le principe de la génération de THz par OR repose sur l'utilisation d'un cristal non centrosymétrique qui possède donc une susceptibilité optique non linéaire de second ordre comme on peut voir dans la Figure 2.2. Lorsqu'une impulsion laser femtoseconde traverse un milieu non linéaire non centrosymétrique, une polarisation induite ($P(t)$) résulte du déplacement des charges dans le milieu (Guerboukha et al., 2018a). La polarisation de second ordre de P décrit le processus OR. La polarisation variant dans le temps dans le cristal agit comme un terme source et va générer un champ électromagnétique THz exprimé par : $|\vec{E}_{THz}|^2 \propto |\vec{P}^2|$ (Guerboukha et al., 2018a).

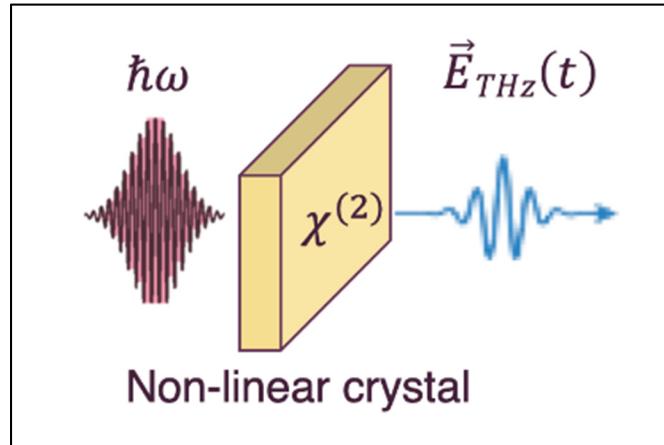


Figure 2.2 Principe de génération d'onde THz $\vec{E}_{THz}(t)$ à partir d'une impulsion optique $\hbar\omega$ par redressement optique
Tiré de Zhuldybina, (2021, p.44)

Une génération efficace de THz peut être obtenue lorsque la vitesse de groupe de l'impulsion laser et la vitesse de phase de l'impulsion THz générée sont les mêmes dans le cristal. Ces conditions sont remplies lorsque l'indice de réfraction de groupe pour la gamme d'ondes

optique (n_{opt}^{gr}) du cristal non centrosymétrique utilisé est égal à l'indice de réfraction du cristal aux ondes THz générés (n_{THz}).

$$n_{opt}^{gr}(\omega_{opt}) = n_{THz}(\omega_{THz}), \quad (2.1)$$

Tiré de Zhuldybina, (2021, p.45)

Dans le contexte des expériences décrites dans cette thèse, les cristaux utilisés étaient le *ZnTe* et le *LiNbO₃*. Ils ont été utilisés avec un laser de pompe de 800 nm et 1000 nm respectivement. Le fait que la génération par OR repose sur un phénomène non linéaire rend son efficacité relativement faible et nécessite généralement l'utilisation de lasers amplifiés, ce qui peut rendre cette génération couteuse malgré le faible coût de production des cristaux. Sa facilité d'utilisation ainsi que son coût est un avantageux par rapport à l'utilisation d'émetteurs PCA en fait néanmoins une alternative intéressante. De plus, la largeur de bande de cette méthode est comparable à celle des PCA.

2.1.3 Spintronique

Le principe de génération d'onde THz à l'aide d'un émetteur spintronique repose sur les propriétés spintroniques et photoniques des films de métaux ultrafins. L'émetteur est constitué d'un film mince de ferromagnétique (FM) et d'une mince couche d'un métal non ferromagnétique (NM). Similairement aux deux méthodes précédemment décrites, un laser femtoseconde pulsé est dirigé sur l'émetteur, qui produit par la suite un champ électrique THz. Le principe peut être visualisé dans la Figure 2.3. L'impulsion laser interagit d'abord avec la couche FM de l'émetteur, qui est magnétisée de manière antiparallèle à l'émetteur. L'incidence de l'impulsion génère un courant fortement polarisé en spin, qui se propage dans l'axe z en direction du métal NM. En entrant dans le métal NM, l'effet de Hall inversé (ISHE) va convertir le courant de spin j_s en un courant transverse orienté en x $j_c = \gamma j_s$, où γ est l'angle de propagation dans le milieu NM (Seifert et al., 2016). Le champ électrique généré par le courant est le champ THz émis par l'émetteur. Notez que le film spintronique doit être polarisé par un aimant. L'amplitude du champ dans le domaine fréquentiel peut s'exprimer par la formule :

$$E(\omega) = Z(\omega) e \int_0^d dz \gamma(z) j_s(z, w), \quad (2.2)$$

Tiré de Seifert et al., (2016, p.485)

où $Z(\omega)$ représente l'impédance fréquentielle de la couche NM, e représente la charge élémentaire et d représente l'épaisseur de la couche NM. L'amplitude du champ est linéairement proportionnelle à l'intensité de l'impulsion-pompe incidente au matériau FM.

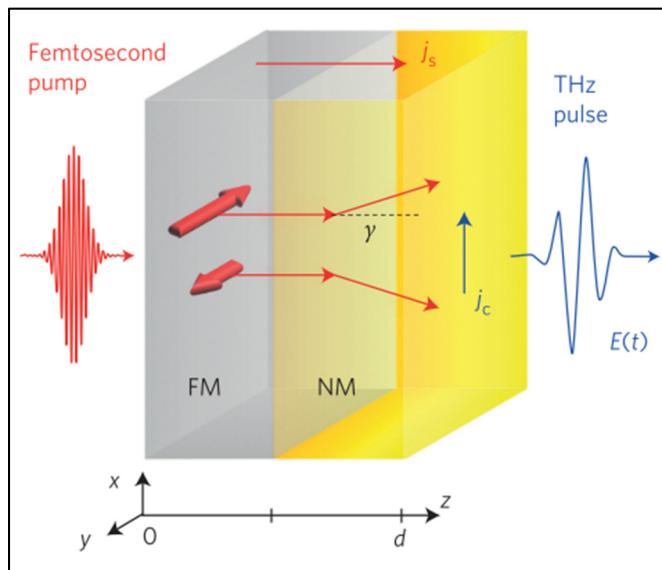


Figure 2.3 Principe de fonctionnement d'un émetteur THz spintronique :

Une impulsion laser femtoseconde excite les électrons dans la couche métallique, modifiant ainsi leur vitesse de bande et lançant un courant dans la direction z. Comme, dans la couche FM, la mobilité des électrons « spin-up »(majoritaires) est nettement supérieure à celle des électrons « spin-down » (minoritaires), le courant z est polarisé en spin. Dans la couche NM, l'interaction spin-orbite dévie les électrons de spin-up et de spin-down dans des directions opposées et transforme le courant de spin j_s en un courant de charge transversale ultrarapide $j_c = \gamma j_s$, conduisant à l'émission d'un transitoire électromagnétique THz.

Tiré de Seifert et al.(2016, p.2)

Il est à noter que l'amplitude du champ THz émis est grandement influencé par le choix du métal NM de l'émetteur (Seifert et al., 2016). Dans le cadre des spectroscopies THz réalisées avec un émetteur spintronique décrites dans le chapitre 3, un spintronique constitué de 3 couches ultramince a été utilisé. Les couches sont constituées de tungstène (W), de matériau ferromagnétique $Co_{0.5}Fe_{0.35}B_{0.1}$ et de platine (Pt). La raison pour laquelle le tungstène a été ajouté est pour permettre un meilleur couplage entre l'onde incidente et la couche

ferromagnétique, permettant ainsi d'augmenter le champ THz généré. Cette méthode de génération se distingue par sa largeur de bande qui est supérieure à celle des PCA et de l'OR. De plus, le spintronique a l'avantage d'être considéré comme 2D par rapport aux ondes THz et optiques, ce qui élimine les problèmes d'accord de phase qu'on retrouve dans la génération OR. En dépit de ces points forts, le spintronique est limité par son faible champ électrique, ce qui limite son signal sur bruit par rapport aux autres méthodes.

2.2 Détection d'ondes THz

Tout comme la génération, la détection d'onde THz nécessite des méthodes et des technologies particulières en raison des limitations des méthodes conventionnelles face à cette plage d'ondes. Cette section a pour but de mettre le lecteur en contexte avec la méthode d'acquisition permettant d'effectuer la spectroscopie dans le domaine temporel, de décrire la méthode de détection THz qui a été utilisée lors des expériences décrites dans cette thèse et d'expliquer les méthodes existantes d'amélioration de performances d'acquisition à l'aide de ligne à délais rapide.

2.2.1 Échantillonnage temporel

L'échantillonnage temporel est une méthode d'acquisition dont le but est de pouvoir capturer l'amplitude d'une impulsion THz en fonction du temps afin de pouvoir reconstituer l'impulsion émise. Une impulsion THz typique a généralement une durée entre 10-100ps (Guerboukha et al., 2018a) et la résolution temporelle qu'on souhaite obtenir pour tracer le champ électrique de l'impulsion dans le domaine temporel est de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes (Neu & Schmuttenmaer, 2018). Étant donné que cette vitesse d'acquisition est trop rapide pour les photodiodes conventionnelles, l'échantillonnage temporel des ondes THz doit recourir à une astuce qui consiste à utiliser la dimension spatiale pour assigner une mesure de champ à un délai temporel précis. La Figure 2.4 permet de visualiser une disposition expérimentale typique pour effectuer un échantillonnage temporel d'onde THz.

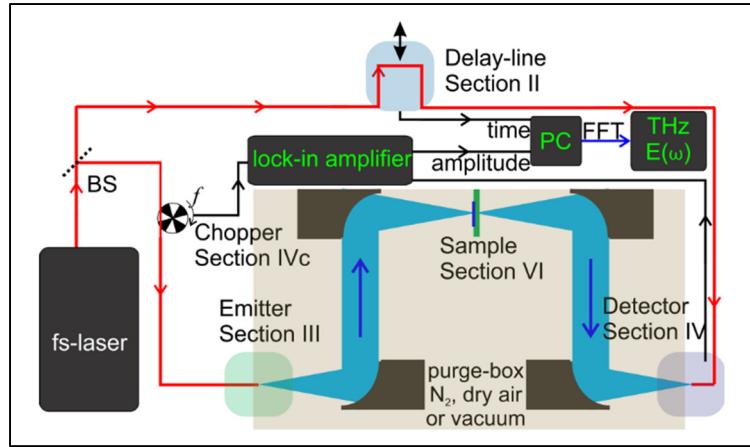


Figure 2.4 Schéma simplifié d'acquisition THz-TDS
Tiré de Neu & Schmuttenmaer (2018, p.3)

Le principe consiste à émettre une impulsion laser à la fois sur l'émetteur et le détecteur. Le laser incident à l'émetteur est appelé pompe et sa distance parcourue d_{pompe} et celui incident au détecteur est appelé sonde et sa distance parcourue d_{sonde} . En s'assurant de créer un chemin optique tel que :

$$d_{pompe} + d_{THz} = d_{sonde}, \quad (2.3)$$

où d_{THz} représente la distance parcourue par le champ THz entre l'émetteur et le détecteur, on peut mesurer le champ THz en un point spécifique de l'impulsion dans l'axe du temps. En utilisant une ligne à délai contrôlée par ordinateur, on peut allonger le chemin optique de la sonde et ainsi effectuer une mesure d'un point temporel différent et ainsi reconstituer point à point l'impulsion. La Figure 2.5 illustre la reconstruction de l'impulsion par variation de position de ligne à délai.

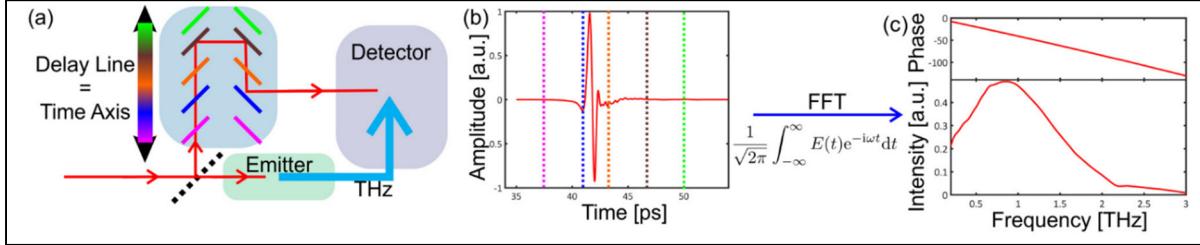


Figure 2.5 Principe d’acquisition THz TDS :

(a) Illustration simplifiée du TDS. Les différentes couleurs correspondent à différentes positions de la ligne de retard. Ces positions correspondent à différents points de temps dans (b);(b) Signal THz mesuré dans le domaine temporel; (c) Transformation de Fourier rapide (FFT) du signal dans le domaine fréquentiel. Le panneau supérieur montre la phase non enveloppée de la transformée de Fourier complexe et le panneau inférieur montre l’amplitude

Tiré de Neu & Schmuttenmaer (2018, p4)

La résolution temporelle obtenue par cette méthode est déterminée en convertissant la distance de déplacement en temps en considérant que l’onde THz et l’impulsion laser se déplacent à la vitesse de la lumière. On peut donc écrire la formule de du délai temporel

$$\Delta_t = \frac{2\Delta z}{c}, \quad (2.4)$$

où Δ_t est le délai temporel en fonction de la distance parcourue, Δz est la distance de parcourue, c est la vitesse de la lumière dans l’espace et le facteur 2 est utilisé pour exprimer le fait que l’impulsion laser parcourt deux fois la distance optique due au déplacement de la ligne à délais (Guerboukha et al., 2018b). On peut également voir dans la Figure 2.5 qu’une fois que l’échantillonnage temporel complété, il est possible d’utiliser une transformée de Fourier rapide (FFT) pour obtenir le champ THz complexe $E(\omega)$ dans le domaine fréquentiel :

$$E(\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)}, \quad (2.5)$$

Tiré de Neu & Schmuttenmaer, (2018, p.10)

où $A(\omega)$ est l’amplitude du champ et $\varphi(\omega)$ est la phase, tous deux dans le domaine fréquentiel. L’utilisation de ce champ pour performer des spectroscopies sera plus amplement discutée dans la section 2.2.3 de cette thèse.

Deux autres éléments importants à mentionner dans cette configuration sont le hacheur optique ainsi que l’amplificateur à verrouillage (« lock-in amplifier ») qui permet d’améliorer

significativement le ratio signal sur bruit (SNR) de la détection de l'onde. Le principe consiste à « hacher » le signal optique, produisant ainsi une modulation du signal à une fréquence typiquement entre 0.1 à 4 kHz. Une fréquence de hachage élevée est désirable en raison de la relation entre le bruit thermique qui est proportionnel à $1/f_{hachage}$ (Neu & Schmuttenmaer, 2018). L'amplificateur à verrouillage effectuera une moyenne de la lecture du détecteur sur une période définie par la fréquence de verrouillage, typiquement égale que la fréquence de hachage. En démodulant ensuite le signal, on ramène la lecture d'amplitude à une fréquence de courant direct (DC) et il est alors possible d'appliquer un filtre passe-bas pour éliminer le plus de bruit possible. La fréquence de ce filtre, ou à l'inverse de sa période τ , sera déterminée en fonction du temps d'acquisition à chaque position du déplacement de la ligne à délais. Il est à noter que pour permettre d'obtenir une lecture stable de l'amplificateur, la constante de temps d'intégration τ doit être au minimum 3 fois inférieur au temps entre chaque déplacement de la ligne à délais afin de permettre au condensateur de l'acquisition de se charger. Un mécanisme de détection permettant à l'amplificateur d'obtenir une lecture proportionnelle au champ THz sera détaillé dans la section suivante.

2.2.2 Antennes photoconductrices (PCA) en détection

La détection de l'impulsion THz à l'aide d'une PCA est similaire à la génération, sans toutefois appliquer de polarisation sur les électrodes. Une impulsion laser de sonde est focalisée sur l'antenne, rendant le substrat semi-conducteur conducteur pendant la durée de l'impulsion. En faisant correspondre l'arrivée de l'impulsion optique de la sonde avec l'arrivée du champ THz, un photocourant est induit entre les électrodes de l'antenne. Ce photocourant étant linéairement proportionnel à l'amplitude du champ THz (Burford & El-Shenawee, 2017), il peut être utilisé pour acquérir le signal THz. Un schéma typique d'un système de détection de rayonnement THz par PCA est représenté dans la Figure 2.6.

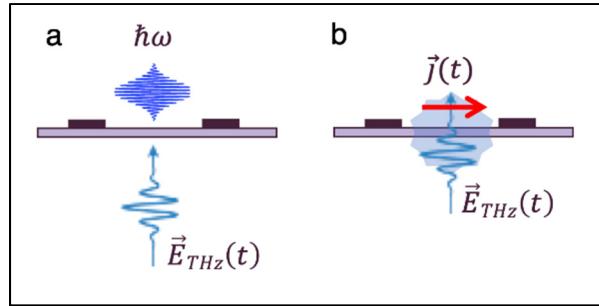


Figure 2.6 Schéma de détection THz par antenne photoconductrice :

a) une impulsion optique $\hbar\omega$ entre en incidence avec l'antenne simultanément avec un champ THz $\vec{E}_{THz}(t)$; b) Un courant transient $\vec{j}(t)$ proportionnel au champ $\vec{E}_{THz}(t)$; est induit entre les deux électrodes
Tiré de Zhuldybina (2021, p.50)

Bien que des fréquences allant jusqu'à environ 20 THz de largeur de bande (fréquence maximale) avec une forte absorption dans la bande entre 7 et 9 THz, la plupart des PCA commerciales disponibles offrent généralement une bande passante entre 3.5 et 6 THz (Burford & El-Shenawee, 2017). C'est le cas de l'antenne PCA utilisée dans les configurations décrites dans le chapitre 3 de cette thèse, une antenne Teravil atteignant une fréquence maximale d'environ 4.5 THz.

2.2.3 Ligne à délais rapides

En tenant compte de la durée des impulsions THz de quelques picosecondes, il est commun d'utiliser une résolution temporelle $\delta_t = 0.01ps$, en utilisant l'équation :

$$\Delta_t = \frac{2\Delta z}{c},$$

(2.4)

on trouve que pour obtenir une résolution de l'ordre des μm , ou d'environ $1.5 \mu m$ dans le cas actuel. Il est important de noter que la résolution spatiale étant liée à la résolution temporelle, on peut obtenir la fréquence maximale f_{max} et la résolution fréquentielle δf d'une acquisition grâce aux la relation suivante :

$$f_{max} = \frac{1}{2\delta_t} = \frac{c}{4\Delta z}, \quad (2.6)$$

Tiré de Guerboukha et al., (2018b, p.871)

$$\delta f = \frac{1}{\Delta t_{max}} = \frac{c}{2\Delta z_{max}}, \quad (2.7)$$

Tir. de Guerboukha et al., (2018b, p.871)

On observe donc que pour maximiser la résolution fréquentielle d'une acquisition, il faut augmenter la distance totale de déplacement de la ligne à délais soit en augmentant le nombre de points à acquérir, soit en augmentant δ_z . Avec une impulsion THz à capturer de 50 picosecondes et une résolution temporelle $\delta_t = 0.01ps$, au moins 5000 points sont nécessaires pour capturer l'impulsion. En tenant en compte le fait que pour obtenir une précision de 1.5 μm , les lignes à délais conventionnelles doivent en général se déplacer à un rythme permettant une acquisition d'environ 1s par point, on déduit que les acquisitions temporelles peuvent durer plusieurs heures, ce qui n'est pas idéal. C'est pourquoi diverses technologies de lignes à délais ont été développées. Plusieurs méthodes existent, telles que les miroirs rotatifs (Guerboukha et al., 2018b), le contrôle électronique d'échantillonnage optique (ECOPS) ou bien la ligne à délais optique oscillante (OODL). Cette dernière méthode a été intégrée pour un montage expérimental et sera brièvement expliquée.

Le concept d'une OODL consiste à installer un optoréflecteur sur une plateforme oscillant à une fréquence définie et possédant un asservissement de la position de la plateforme. En couplant l'asservissement sur la position de la plateforme, il est possible d'effectuer des acquisitions à des positions précises associées à des délais temporels d'impulsion. La Figure 2.7 illustre le principe (Jin et al., 2007).

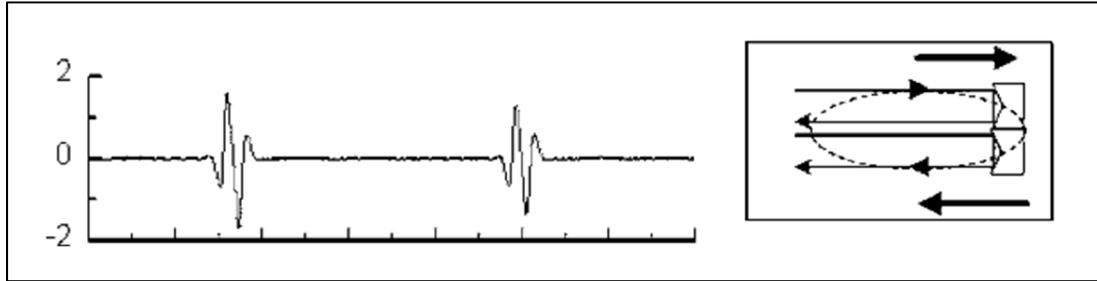


Figure 2.7 Variation des signaux térahertz mesurés dans les deux périodes de l'opto réflecteur dans la ligne à retard optique oscillante (à droite) et la position correspondante de l'opto réflecteur dans la ligne à retard optique oscillante (à gauche).

Tiré de Jin et al. (2007, p.4)

Lors d'une oscillation complète, le système parcourt un chemin correspondant à la durée optique de l'impulsion et permet d'effectuer l'acquisition du signal 2 fois lorsque qu'utilisé avec un circuit d'acquisition de données analogique (ADC). Des vitesses allant jusqu'à 100Hz (100 allers-retours par secondes) parcourant des distances correspondantes à un délai optique allant jusqu'à 150 ps peuvent ainsi être obtenues, accélérant significativement l'obtention de résultat d'acquisition d'onde THz (Jin et al., 2007).

Il est également important de rappeler qu'en utilisant un amplificateur à verrouillage avec un temps d'intégration standard, soit $\delta_{tstd} = 1ms$ (Guerboukha et al., 2018b), la ligne à délais doit donc arrêter à chaque position pendant au moins 3 ms pour permettre à trois constantes de temps d'intégration de passer et enregistrer une valeur. On obtient un temps d'acquisition d'au moins 15 s par acquisition en tenant compte des 5000 points à acquérir, ce qui n'est pas idéal pour des applications en temps réel. Parmi les méthodes pour obtenir des acquisitions rapides sans sacrifier de SNR se trouvent le moyennage d'acquisition par amplificateur à verrouillage et l'utilisation de box-car. Il a été démontré qu'en utilisant une OODL opérant à une fréquence d'oscillation de 4 Hz et un moyennage de 20 acquisitions avec un amplificateur à verrouillage, il était possible d'obtenir une plage dynamique 15 dB plus élevée qu'avec une acquisition standard avec ligne à délais lente et un temps d'intégration de 400 s sur une fenêtre de 8 ps (Hoberg et al., 2019). Il est important de noter que l'acquisition standard dans l'expérience

avait durée 990 s et l'acquisition par OODL avait duré seulement 5 s. Des résultats encore plus performants ont également été prouvés en utilisant l'intégration par box-car, permettant d'obtenir une plage de 24 dB supérieure à une acquisition de 105 s de temps d'intégration pour une fenêtre d'acquisition de 10 ps. Ces deux méthodes seront brièvement discutées dans le chapitre de la méthodologie de la thèse.

2.3 Spectroscopie THz dans le domaine temporel

Tel qu'il est possible de l'observer dans la Figure 2.8m, la spectroscopie THz dans le domaine temporel (THz-TDS) consiste à effectuer une transformée de fourrier d'une onde THz obtenu par échantillonnage temporel. Le rapport entre le pas d'échantillonnage δ_z et la résolution temporelle δ_t ainsi que la durée totale de l'impulsion acquise Δt_{max} et la résolution fréquentielle δf ayant été expliqué dans la section précédente, cette section met l'emphasis sur les caractéristiques qui distinguent la THz-TDS des techniques conventionnelles et du processus d'extraction de paramètres optique à partir du champ $E_{(\omega)}$ obtenu par FFT après l'échantillonnage.

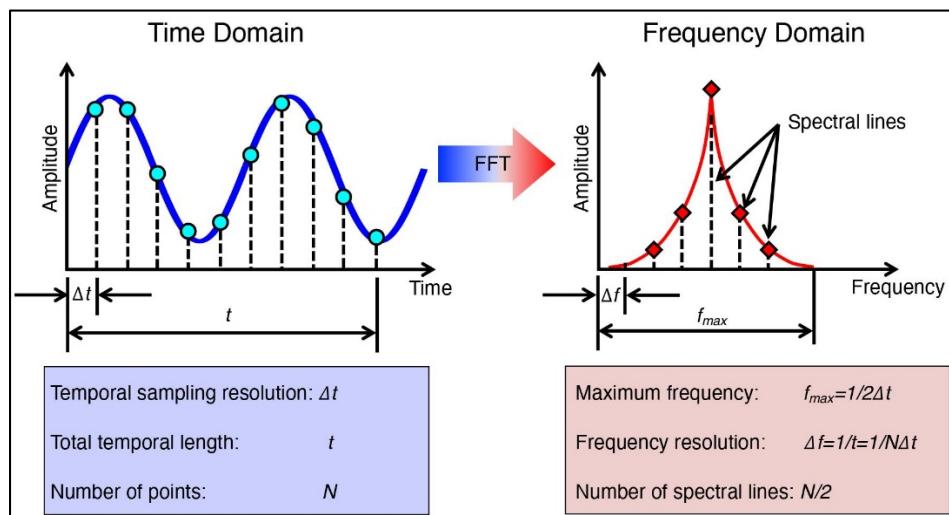


Figure 2.8 Principe d'utilisation de transformé de Fourier rapide (FFT) pour convertir une acquisition de domaine temporel en domaine fréquentiel
tiré de Zhuldybina (2021, p.54)

2.3.1 Comparaison avec les systèmes infrarouges par transformé de fourrier (FTIR)

Étant donné que les systèmes FTIR commerciaux ont la capacité d'opérer à des fréquences allant jusqu'à 1.5 THz (Gowen et al., 2012), il est pertinent d'établir un comparatif avec les méthodes. Les systèmes possèdent l'avantage d'être une technologie commercialement développée. Cependant, dans les plages de fréquences THz, la gamme dynamique des FTIR est limitée lorsque comparée à celle des THz (Gowen et al., 2012). En outre, la méthode THz étant d'abord résolue temporellement, elle permet d'obtenir l'information sur la phase de l'onde directement puisque que le champ $E(t)$ est obtenu directement, tandis qu'un système FTIR ne mesure que l'intensité $E^2(t)$, n'offrant pas directement l'information. L'utilisation de système THz est donc préférable dans la gamme de fréquence des bas THz puisqu'elle permet facilement l'extraction des paramètres optiques à l'aide de l'information de la phase obtenue par THz-TDS.

2.3.2 Extraction de paramètres optiques

L'extraction des paramètres optiques tels que l'indice de réfraction d'un échantillon, son coefficient d'absorption et sa fonction diélectrique peuvent facilement être extraits à partir des données récoltées par THz-TDS. Pour bien comprendre les mathématiques derrière cette extraction, il est utile de visualiser l'interaction d'un champ THz incident à un échantillon quelconque comme on peut voir dans la Figure 2.9.

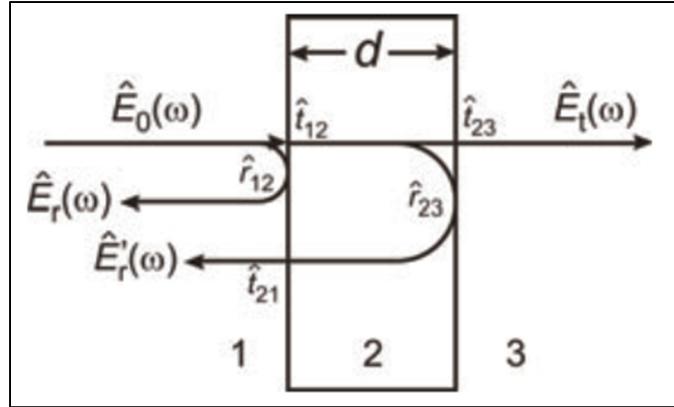


Figure 2.9 Schéma de géométrie de spectroscopie THz en réflexion ou en transmission :

$\hat{E}_0(\omega)$ est le champ THz incident, $\hat{E}_t(\omega)$ est le champ transmis et $\hat{E}_r(\omega)$ et $\hat{E}'_r(\omega)$ sont respectivement les champs réfléchis par la première et la deuxième interface de l'échantillon

Tiré de Jepsen et al.(2011, p.133)

En supposant une analyse en transmission, comme c'est le cas dans les expériences décrites dans cette thèse, on comprend que seul le champ $\hat{E}_t(\omega)$ sera détecté par le détecteur THz du montage. Pour obtenir les paramètres d'un échantillon, une comparaison doit être faite avec un milieu sans échantillon. Le champ détecté ainsi sera appelé champ de référence $\hat{E}_{ref}(\omega)$, et sera considéré équivalent à une l'onde THz initiale $\hat{E}_0(\omega)$ En tenant compte des interactions avec les différentes surfaces, on peut exprimer l'équation du champ :

$$\hat{E}_{sam}(\omega) = \hat{E}_t(\omega) = \hat{E}_0(\omega) \hat{t}_{12} \hat{t}_{23} e^{-\alpha d/2} e^{i(n-1)\omega d/c}, \quad (2.8)$$

Tiré de Jepsen et al., (2011, p.133)

À l'aide des deux champs acquis séparément, il est possible d'isoler les paramètres de transmission en fonction de la fréquence, soit l'amplitude de transmission $T(\omega)$ et la phase $\varphi(\omega)$. Pour ce faire on applique une division point à point des deux spectres échantillonnés :

$$\frac{\hat{E}_{sam}(\omega)}{\hat{E}_{ref}(\omega)} = \frac{\hat{E}_0(\omega) \hat{t}_{12} \hat{t}_{23} e^{-\alpha d/2} e^{i(n-1)\omega d/c}}{\hat{E}_0(\omega)} = \hat{t}_{12} \hat{t}_{23} e^{-\alpha d/2} e^{i(n-1)\omega d/c} = T(\omega) e^{i\varphi(\omega)}, \quad (2.9)$$

Tiré de (Jepsen et al., 2011).

En utilisant les formules de calcul d'indice de réfraction $n(\omega)$, de coefficient d'absorption $\alpha(\omega)$ et la fonction diélectrique ε (Jepsen et al., 2011):

$$n(\omega) = 1 + \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d}, \quad (2.10)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln\left(\frac{(n+1)^2}{4n} T(\omega)\right), \quad (2.11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = (n + i\kappa)^2, \quad (2.12)$$

$$\kappa(\omega) = \varphi(\omega)c/2\omega, \quad (2.13)$$

Tirés de Jepsen et al., (2011, p.133).

Il est possible d'obtenir les paramètres optiques d'un échantillon. Dans les formules précédentes, d représente l'épaisseur de l'échantillon, c la vitesse de la lumière et κ le coefficient d'extinction. Ces méthodes de calculs ont été utilisées pour réaliser les spectroscopies décrites dans le chapitre 3 de cette thèse.

2.4 Modulation d'ondes THz

Les nombreuses applications possibles des ondes THz offrent de nombreuses raisons de vouloir les moduler. La modulation peut en effet être utile pour des applications telles que la communication sans fil (Akyildiz et al., 2014; Ma et al., 2019; Rahm et al., 2013), l'imagerie à un seul coup (Hafez et al., 2016) et l'acquisition à un pixel (Rout, 2016b; Shen et al., 2012; Stantchev et al., 2020). Cette thèse étant axée sur l'acquisition à un pixel, seules les méthodes de modulations destinées à cette application seront discutées dans cette section.

2.4.1 Modulations THz existantes

La modulation THz peut s'effectuer par diverses techniques puisque les systèmes eux-mêmes possèdent de nombreuses dimensions. Parmi ces techniques, on retrouve la modulation de phase, d'amplitude, de polarité, de spin, de longueur d'impulsion, de spectre, et la modulation spatiale dans la direction de propagation de l'impulsion (Rahm et al., 2013). Ces techniques se distinguent par les caractéristiques de l'impulsion THz qu'elles modulent pour y encoder l'information. En plus de tenir en compte des techniques de modulation, il est important de considérer quelle partie du système est modulée. Il est en effet possible de moduler le faisceau pompe optique ou le faisceau THz.

La modulation optique consiste à moduler le faisceau pompe, faisant en sorte que l'émetteur THz, recevant un faisceau modulé, émet une onde THz elle-même modulée. Elle peut être effectuée, par exemple, avec des dispositifs miroirs électromécaniques (MEMS) utilisés pour moduler directement le faisceau optique projeté sur l'émetteur THz ou bien en utilisant avantage de la production de porteur de charges lorsque la lumière incidente à un semi-conducteur excédé l'énergie de bande dudit semi-conducteur (Ivanov Stantchev & Pickwell-MacPherson, 2021; Rahm et al., 2013; Stantchev et al., 2020). Il est alors possible de projeter un faisceau THz sur le semi-conducteur recevant l'onde optique modulé et l'onde THz s'en retrouve similairement modulée. Avec cette modulation, l'amplitude du faisceau est le paramètre modulé. La Figure 2.10 permet d'illustrer un système fonctionnant par modulation optique sur semi-conducteur.

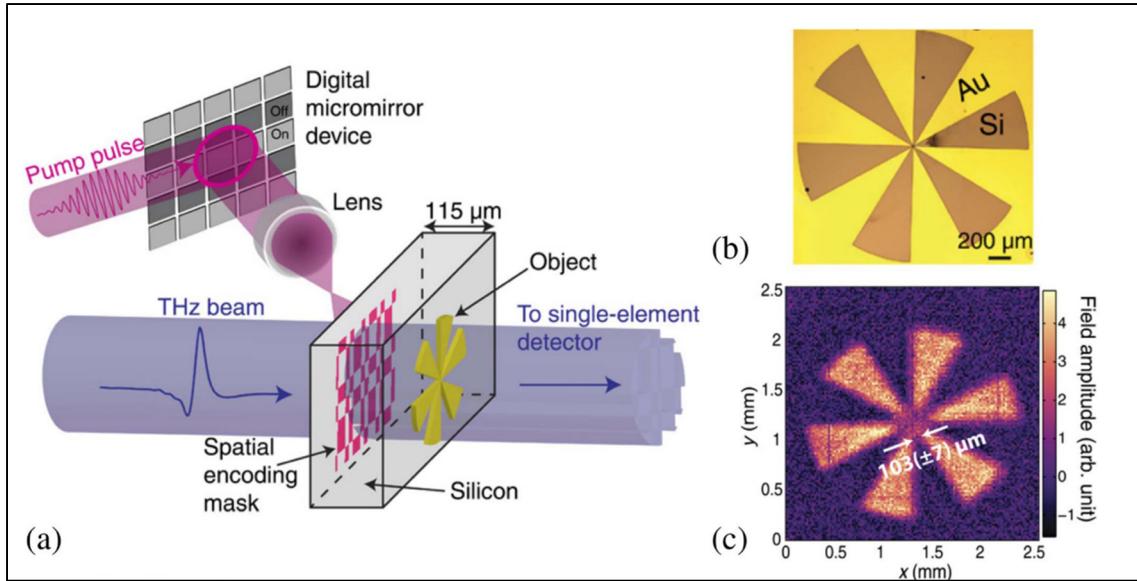


Figure 2.10 Configuration expérimentale de modulation du faisceau optique : (a) configuration expérimentale utilisant une plaque de silicium et un DMD pour générer les masques de modulation; (b) Image optique de l'étoile métallique utilisée comme objet à imager; (c) reconstruction à partir de l'acquisition à un pixel compressé tiré de Guerboukha et al. (2018, p.902)

On peut identifier les avantages des modulations optiques comme étant la facilité d'alignement, puisque le faisceau optique est visible tandis que le faisceau THz ne l'est pas, ce qui en fait une méthode plus facile à mettre en place. De plus, la modulation optique permet de moduler tout le spectre THz à des vitesses élevées (Rahm et al., 2013; Stantchev et al., 2020), ce qui n'est pas le cas des méthodes de modulation du faisceau THz, qui souvent sont soit limitées en vitesse de modulation ou en spectre modulé (Wang et al., 2019). La modulation optique permet en outre d'obtenir un ratio de modulation allant jusqu'à 100%, ce qui n'est également pas réalisable avec toutes les méthodes de modulation du faisceau (Wang et al., 2019). L'un des désavantages de cette méthode est sa limitation à la modulation de l'amplitude et l'incapacité jusqu'à présent de générer des modulations à plusieurs niveaux. La modulation est donc limitée à une modulation allumée ou éteinte (Stantchev et al., 2020). Un autre désavantage de cette méthode est la nécessité d'utiliser deux lasers différents, l'un pour la génération du THz, l'autre pour l'excitation du silicium, ce qui augmente la complexité du système ainsi que son coût.

Comme son nom l'indique, la modulation du faisceau THz, elle, consiste à placer un modulateur directement dans le faisceau THz entre l'émetteur et le détecteur. En raison des propriétés des ondes THz, les modulateurs optiques ne peuvent généralement pas être utilisés pour performer cette modulation. Ces pourquoi des solutions alternatives telles que la modulation par disque de métaux, qui consiste à engraver des motifs de modulation sur un disque métallique, laissant ainsi passer seulement un faisceau THz modulé à travers avant de rejoindre le détecteur (Shen et al., 2012). Cette approche est illustrée dans la Figure 2.11.

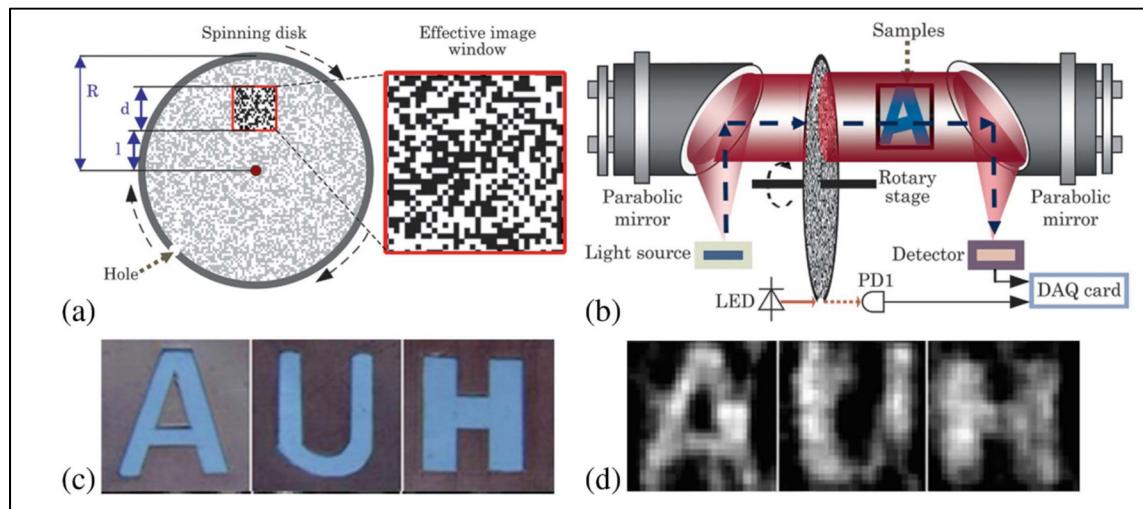


Figure 2.11 Reconstruction d'imagerie à un pixel compressé à l'aide d'un disque métallique tournant :

(a) Schéma du disque métallique; (b) Montage expérimental; (c) Image optique des objets à reconstituer (d) Reconstruction d'image de 32x32 pixels en utilisant 160 mesures.

Tiré de Guerboukha et al. (2018, p.900)

Cette méthode permettait la modulation en amplitude du faisceau THz, mais était limité en vitesse et ne pouvait que moduler à des niveaux tout allumé ou tout éteint. Une autre méthode explorée qui a gagné en popularité dernièrement pour la modulation du faisceau THz est la modulation par métamatériaux actifs électriquement contrôlés.

Les métamatériaux sont des matériaux dont les propriétés ne sont pas présentes dans la nature. Ils sont souvent créés artificiellement pour avoir des propriétés spécifiques utiles à des applications particulières. Par exemple, les métamatériaux peuvent être créés pour être

transparents à certains types d'ondes, ou pour avoir un indice de réfraction négatif, ce qui leur permet de courber la lumière de manière inhabituelle. Dans le contexte de la modulation THz, les métamatériaux sont conçus de manière à pouvoir affecter la phase ou l'amplitude d'une onde à des fréquences THz.

La méthode de modulation par métamatériaux consiste à utiliser des matrices de métamatériaux résonnant à une plage de fréquences THz spécifique pouvant être modulées. Les métamatériaux en question peuvent être faits à partir de cristaux liquides, de spintroniques, de supraconducteurs, etc. (Wang et al., 2019). La Figure 2.12 démontre un exemple d'application de métamatériaux pour la modulation de THz.

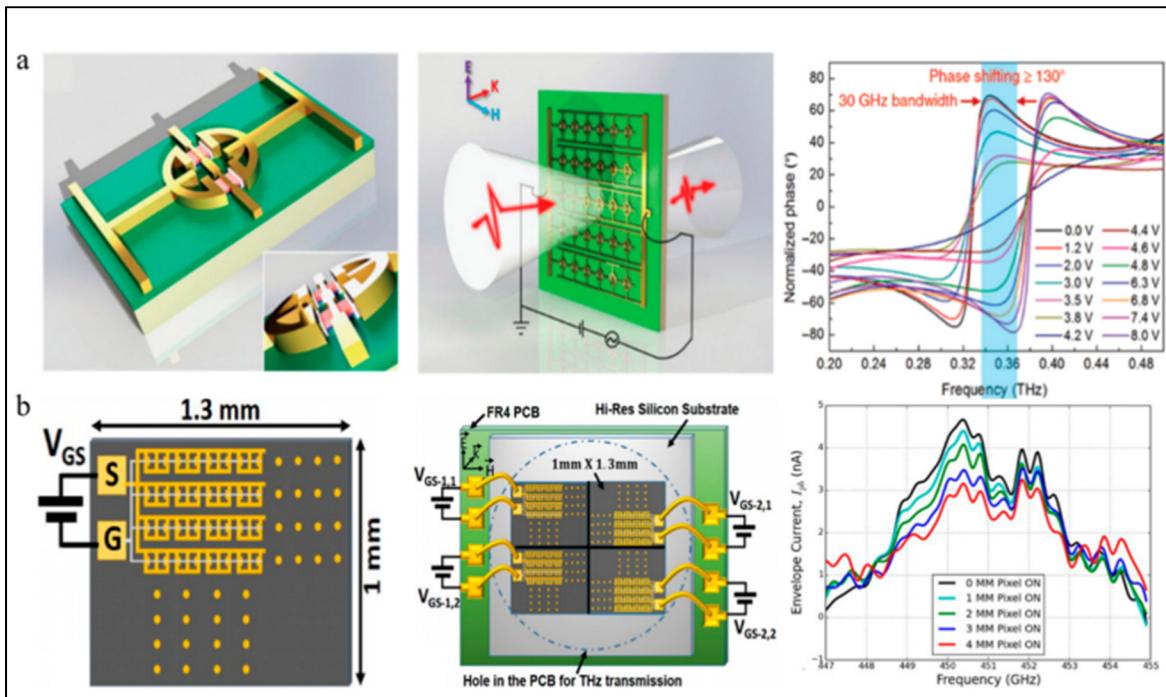


Figure 2.12 Dispositif modulateur spatial de lumière (SLM) pour moduler la phase aux fréquences THz :

(a) Structure unitaire du modulateur de phase et figure représentant le changement de phase par fréquence; (b) Structure d'un modulateur de front d'onde THz et caractérisation en activant chaque structure unitaire du SLM.

Tiré de Wang et al., (2019, p.13)

Comme on peut le voir dans la Figure 2.12 la modulation du faisceau à l'aide de métasurfaces (la version 2D des métamatériaux) rends également possible la modulation de la phase du faisceau THz, ce qui est avantageux dans certains contextes (Wang et al., 2019). Parmi les autres avantages se trouvent la simplicité du système, ne requérant que l'addition d'un modulateur dans le faisceau THz contrairement à certains montages optiques qui sont plus complexes. Un autre avantage est la capacité de varier le niveau de modulation, en contrôlant par exemple la tension appliquée sur les métasurfaces, il est possible de moduler l'onde à divers pourcentages(Wang et al., 2019). De plus, de nombreux modulateurs sont générés de manière compatible à la technologie CMOS, ce qui faciliterait leur intégration dans une éventuelle production de masse (Rout, 2016a). Cette méthode comporte également des points faibles, comme le fait que les métasurfaces sont généralement de bande étroite, ce qui veut dire que dans le cas d'une application sur impulsion THz, seule une partie du spectre THz sera modulé, limitant ainsi le signal sur bruit de la détection. De plus, comme il était mentionné précédemment, la modulation du faisceau se retrouve également limitée en vitesse lorsqu'il est question de modulation physique avec des disques métalliques (Shen et al., 2012).

Parmi les nombreuses expériences de modulations ayant été performées à travers les années, deux seront détaillées dans les sous-sections suivantes. Ces techniques ont été sélectionnées parce qu'elles sont pertinentes pour les applications d'imagerie à un pixel et que leurs performances sont considérées comme les plus prometteurs actuellement.

2.4.2 Exemple d'application de modulation d'amplitude du faisceau Optique

La première approche abordée ici est l'utilisation d'un dispositif DMD comme modulateur spatial de lumière (SLM) dans le faisceau optique. Tel que brièvement expliqué précédemment, dans cette disposition expérimentale, le faisceau optique (dans ce cas un laser à onde continue de 450 nm) est d'abord modulé pour générer le motif qui modulera le champ THz. En effet, l'application d'une forte excitation optique à du silicium à haute résistivité modifie la réponse du matériau, qui passe de diélectrique à conducteur du point de vue des THz. Ceci est dû à l'augmentation du porteur de charge qui déplace la fréquence du plasma de

Drude au-dessus des fréquences THz. La Figure 2.13 présente le montage expérimental qui constitue le système d'imagerie THz d'acquisition à un pixel le plus rapide à ce jour.

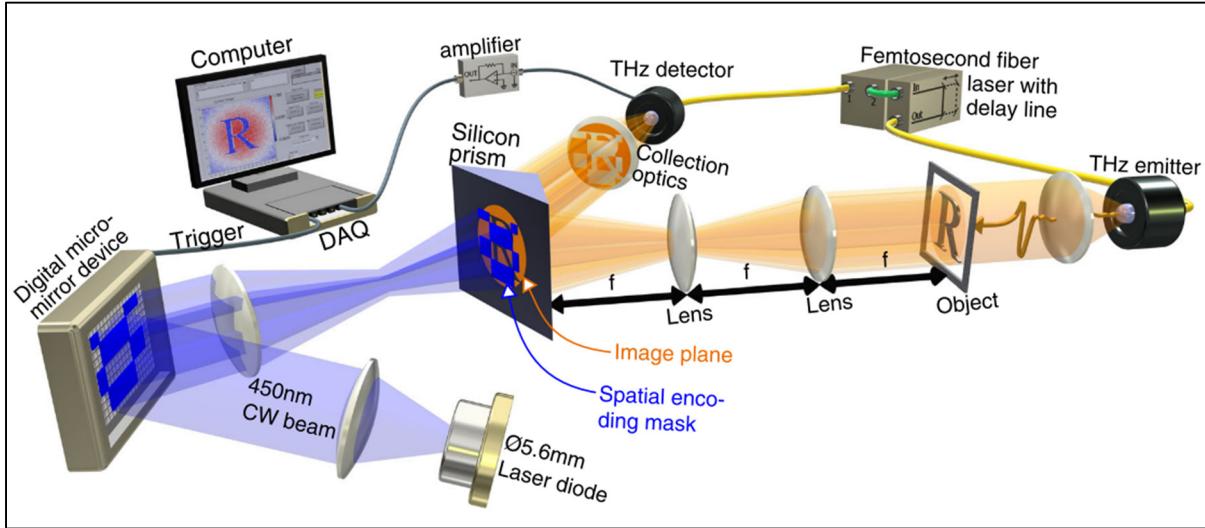


Figure 2.13 Configuration expérimentale permettant d'effectuer une acquisition à un pixel compressé à partir d'un faisceau THz incident à un prisme de silicium photo excité par une impulsion optique modulée par un DMD
tiré de Stantchev et al.(2020, p.4)

Dans ce montage, le faisceau THz est envoyé dans un prisme de silicium dans une configuration de réflexion interne totale (TIR). Le coefficient de réflexion de polarisation S (r_s) du faisceau THz sur la surface du prisme de Silicium pompé par le laser de 450nm peut être exprimée comme suit :

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t - Z_0 \sigma}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t + Z_0 \sigma}, \quad (2.14)$$

Tiré de Stantchev et al., (2020, p.3)

Où σ est la conductivité, Z_0 est l'impédance de l'espace libre, n_1 et n_2 sont respectivement l'indice de réfraction du silicium et de l'air, et θ_i et θ_t sont respectivement les angles d'incidence et de transmission. Puisque le coefficient de réflexion de la polarisation P (r_p) prenant une forme similaire (Stantchev et al., 2020), cette équation montre que l'augmentation de la conductivité réduira la réflexion, donc que l'opposé du masque éclairé sur la surface sera réfléchi dans le champ THz allant au détecteur (Stantchev et al., 2020). Tout comme dans le montage précédent, le but de l'expérience était d'utiliser la modulation pour utiliser la méthode

CS. Le résultat de l'expérience a été la capacité de générer des images THz par CS à un taux de 6 images par seconde, avec une résolution de 32×32 pixels et en utilisant un taux d'échantillonnage de 40% en utilisant des masques Hadamard. Ce taux a été atteint pour des données 2D, mais l'auteur a noté la possibilité de réaliser un THz-TDS et d'acquérir des images 3D, avec l'inconvénient de devoir ralentir l'acquisition en raison de la nécessité d'acquérir des images à de multiples points temporels.

2.4.3 Exemple d'application de modulation spatiale du faisceau THz

La deuxième approche abordée a été la source d'inspiration pour la recherche qui est décrite dans cette thèse. Elle consiste en l'utilisation de dispositifs PMUT pour agir en tant que différentiateur du champ THz, ce qui permet l'acquisition de la dérivée de l'onde THz émise. Le principe, illustré dans la Figure 2.14 (a), consiste à faire réfléchir l'onde THz émise sur un dispositif PMUT oscillant à sa fréquence de résonance et de verrouiller un amplificateur à verrouillage à cette fréquence. Pour comprendre comment une telle méthode d'acquisition permet d'obtenir la dérivée d'une onde, une explication mathématique est essentielle. En considérant le signal acquis par l'amplificateur à verrouillage $s(t)$ d'amplitude A oscillant à une fréquence angulaire $\omega_{mod} = 2\pi f_{mod}$ autour d'une valeur moyenne \bar{s} , où f_{mod} à la fréquence de modulation du champ THz, on obtient l'équation suivante pour exprimer le signal acquis :

$$s(t) = \bar{s} + A \sin(\omega_{mod} t), \quad (2.15)$$

Tiré de (Amirkhan et al., n.d.)

Puisque l'oscillation du dispositif PMUT fait varier la distance parcourue par le champ THz, le détecteur obtient un signal variant temporellement

$$V(t) = V(s(t)), \quad (2.16)$$

Tiré de (Amirkhan et al., n.d.)

En supposant que la modulation A est suffisamment petite, il est possible d'approximer $V(s)$ par une expansion en série de Taylor sur \bar{s} . Le passage à travers l'amplificateur à verrouillage fournit une lecture qui est proportionnelle non seulement à la modulation A , mais aussi à la dérivée de la réponse du système au stimulus, évaluée à $s = \bar{s}$:

$$V_{lect} = \frac{A}{\sqrt{2}} \frac{dV}{ds} |_s, \quad (2.17)$$

Tiré de Amirkhan et al., (n.d., p.2)

Il est ainsi possible d'acquérir la dérivée d'une onde en utilisant cette méthode, ce qui a été démontré par (Amirkhan et al., n.d.).

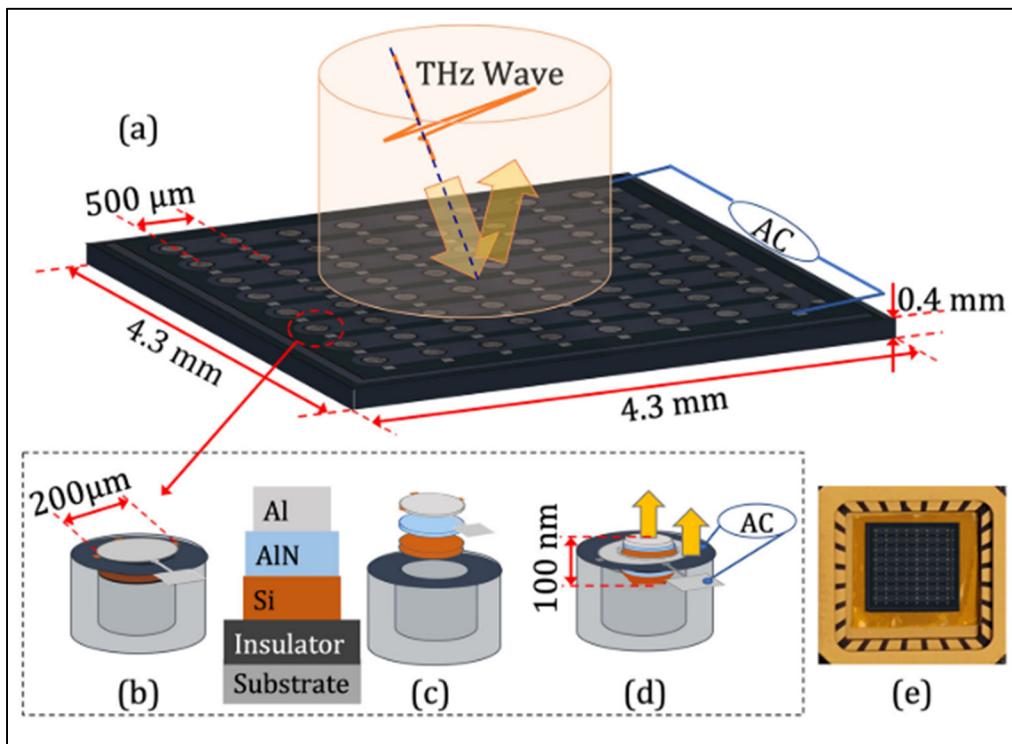


Figure 2.14 Modulateur THz à partir de matrice de PMUT :

(a) Illustration de la matrice de PMUT sur substrat de silicium; (b) Cellule unitaire; (c) Vue explosive des matériaux d'une cellule unitaire; (d) Principe de fonctionnement avec courant AC; (e) Photographie d'une matrice dans un « Leadless Chip Carrier » (LCC)

Tiré de Amirkhan et al., (n.d., p.3)

La modulation par dispositifs PMUT est intéressante pour l'acquisition d'onde THz pour de nombreuses raisons. Premièrement, contrairement à des méthodes de modulation du faisceau optique, toute la lumière THz est envoyée vers le détecteur, ce qui offre la possibilité d'obtenir un meilleur rapport signal/bruit. Il est également de noter que le montage expérimental consiste à moduler l'impulsion THz directement, ce qui est moins complexe que des montages à deux lasers qui modulent l'onde optique. Un autre avantage notable est que, contrairement aux modulateurs métamatériaux, qui sont limités à une certaine bande passante, le modulateur

PMUT est à large bande, ce qui permet une acquisition TDS modulée. Un autre point intéressant est que, comme on peut le voir dans la Figure 2.15 c) l'amplitude de l'oscillation du PMUT dépend de l'amplitude de la tension aux bornes des différents PMUT.

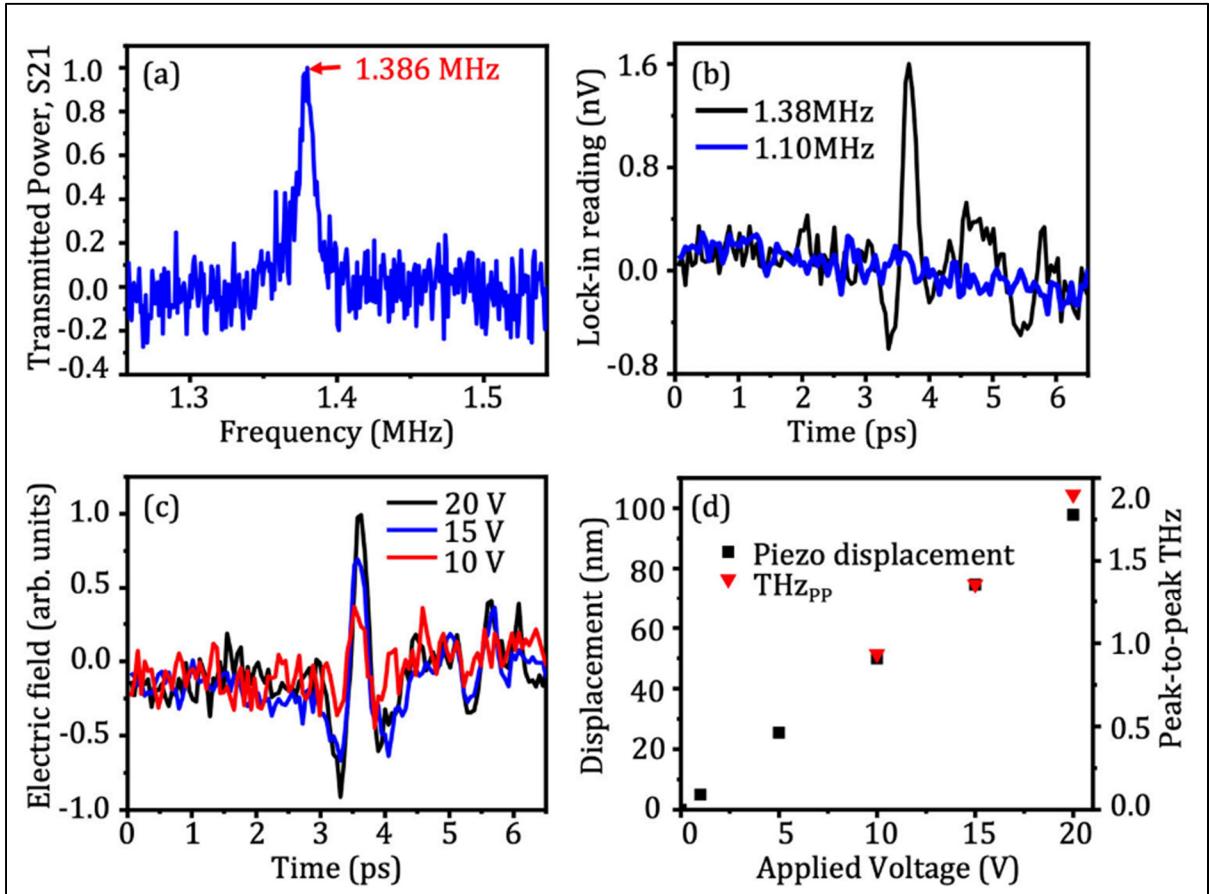


Figure 2.15 Analyse de signal THz modulé par PMUT :

(a) Fréquence de résonance moyenne obtenue par analyseur de réseau; (b) Champ THz mesuré en activant la matrice à 1.1MHz et 1.38MHz; (c) Dépendance du champ THz mesuré envers la tension d'activation des PMUT; (d) Corrélation entre le déplacement des PMUT, le Champ THz mesuré et la tension appliquée aux bornes de la matrice

Tiré de Amirkhan et al. (n.d., p.4)

Il donc est possible, avec la conception d'un contrôleur en conséquence, de permettre la modulation de niveaux autres qu'allumé ou éteint. Enfin, le dernier avantage du modulateur par PMUT est son faible coût. Sans passer à la production de masse, il est possible de produire un réseau de PMUT pour un coût de 100\$ dollars canadiens (CAD) pour 15 dispositifs, ce qui, combiné à un coût d'environ 200\$ pour le contrôleur, permet d'obtenir un système plutôt

abordable. Malheureusement, ces avantages ont un coût. Comme on peut le voir dans la Figure 2.15 d) la force du signal modulé détecté par l'amplificateur à verrouillage dépend du déplacement à la fréquence de résonance, ce qui ajoute une complexité à la conception du dispositif PMUT. La conception d'une matrice PMUT a été effectuée au cours de la recherche décrite dans ce texte et sera détaillée dans le chapitre 3.

2.5 Imagerie THz

L'une des applications les plus recherchées des ondes THz est l'imagerie THz. De nombreuses applications d'imagerie THz ont été développées dans différents projets de recherche avec les années, mais l'un des principaux objectifs des développements demeure l'accélération de la rapidité d'acquisition. Cette section détaille les différents types d'imagerie ainsi que certaines techniques utilisées pour parvenir à accélérer le processus d'imagerie THz.

2.5.1 Imagerie THz passive vs Imagerie THz-TDS

Parmi les types d'imagerie THz qui ont été développés au courant des dernières années, on peut lister l'imagerie TDS, l'imagerie par conductivité, l'imagerie thermique, l'imagerie en champ proche, etc. (Guerboukha et al., 2018b). Dans cette section, une abstraction sera faite de la technologie utilisée et l'imagerie THz sera divisée en deux catégories : l'imagerie dite passive et l'imagerie TDS. Les techniques développées pour permettre d'accélérer ces deux catégories d'imageries seront par la suite expliquées dans les sections 2.5.2 et 2.5.3. La méthode utilisée dans la Figure 2.16 est un excellent exemple pour comprendre la différence entre l'imagerie passive et TDS.

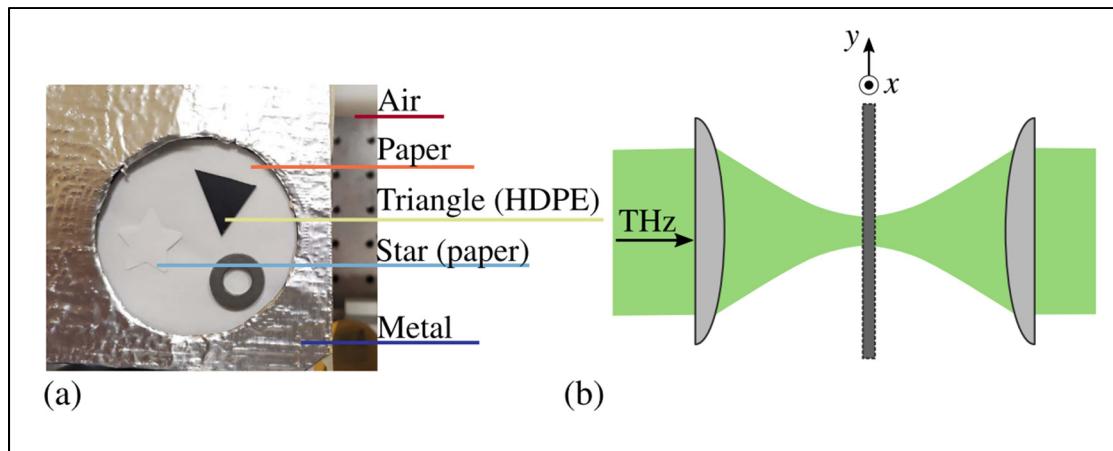


Figure 2.16 Exemple d'imagerie THz :
 (a) Photographie des différents échantillons à imager; (b) Axes de mouvement (x,y) de l'échantillon dans le faisceau THz
 tiré de Guerboukha et al., (2018a, p.849)

L'expérience consiste à utiliser un détecteur THz à un pixel standard, couplé à la méthode de balayage de trame, qui consiste à installer un échantillon sur un support mobile permettant de déplacer l'échantillon et d'effectuer une acquisition point par point de chaque pixel d'une image. Plusieurs échantillons de différents types de matériaux ont été utilisés pour illustrer les réponses différentes du spectre THz en fonction de son interaction avec la matière. En effectuant une acquisition TDS à chaque point, on peut reconstruire une image temporelle et spectrale telle que visible dans la Figure 2.17 et la Figure 2.18.

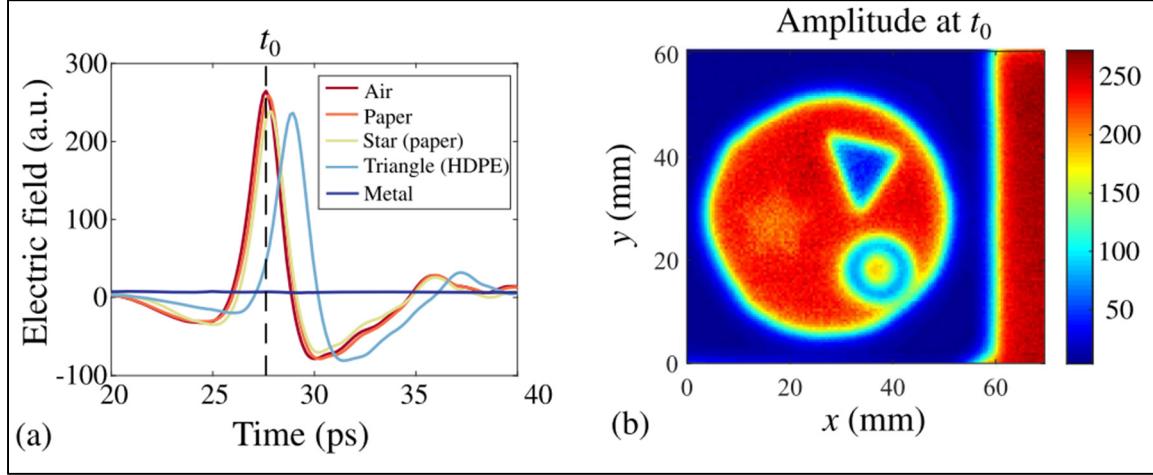


Figure 2.17 Signal THz temporel après acquisition sur échantillons :
 (a) exemple de signaux temporels pour différentes positions/échantillons; (b) Amplitude du champ électrique à $t_0 = 27.6$ ps
 Tiré de Guerboukha et al., (2018a, p.849)

On peut voir dans la Figure 2.17 une image de l'amplitude des échantillons pour un temps t_0 qui coïncide avec le temps où l'amplitude maximale du champ dans l'air est atteinte. On peut constater qu'en raison du délai de propagation dans le matériau, choisir un temps différent pour reconstituer une image en deux dimensions aurait donné une image fort différente si jamais le temps choisi avait été le temps où le champ incident avec le polyéthylène de haute densité (HDPE) était à son maximal. Le même principe peut être repris en utilisant les transformées de fourriers de chaque point acquis. En bref, le principe de l'imagerie TDS consiste à effectuer une acquisition temporelle à chaque point, permettant ainsi de construire une image en 3 dimensions, la troisième dimension étant le domaine temporel ou fréquentiel. On peut imaginer les bénéfices d'une telle acquisition dans des applications où une signature fréquentielle existe, comme pour le contrôle de la qualité ou les inspections pharmaceutiques (Guerboukha et al., 2018b; Jansen et al., 2010). Il est important de prendre aussi en considération la nécessité d'acquérir l'image point par point en déplaçant l'échantillon après chaque acquisition, ce qui rend ce genre d'acquisition très long à effectuer (c'est-à-dire, en sachant qu'il faut multiplier le temps d'acquisition d'une acquisition TDS par le nombre de pixels à échantillonner).

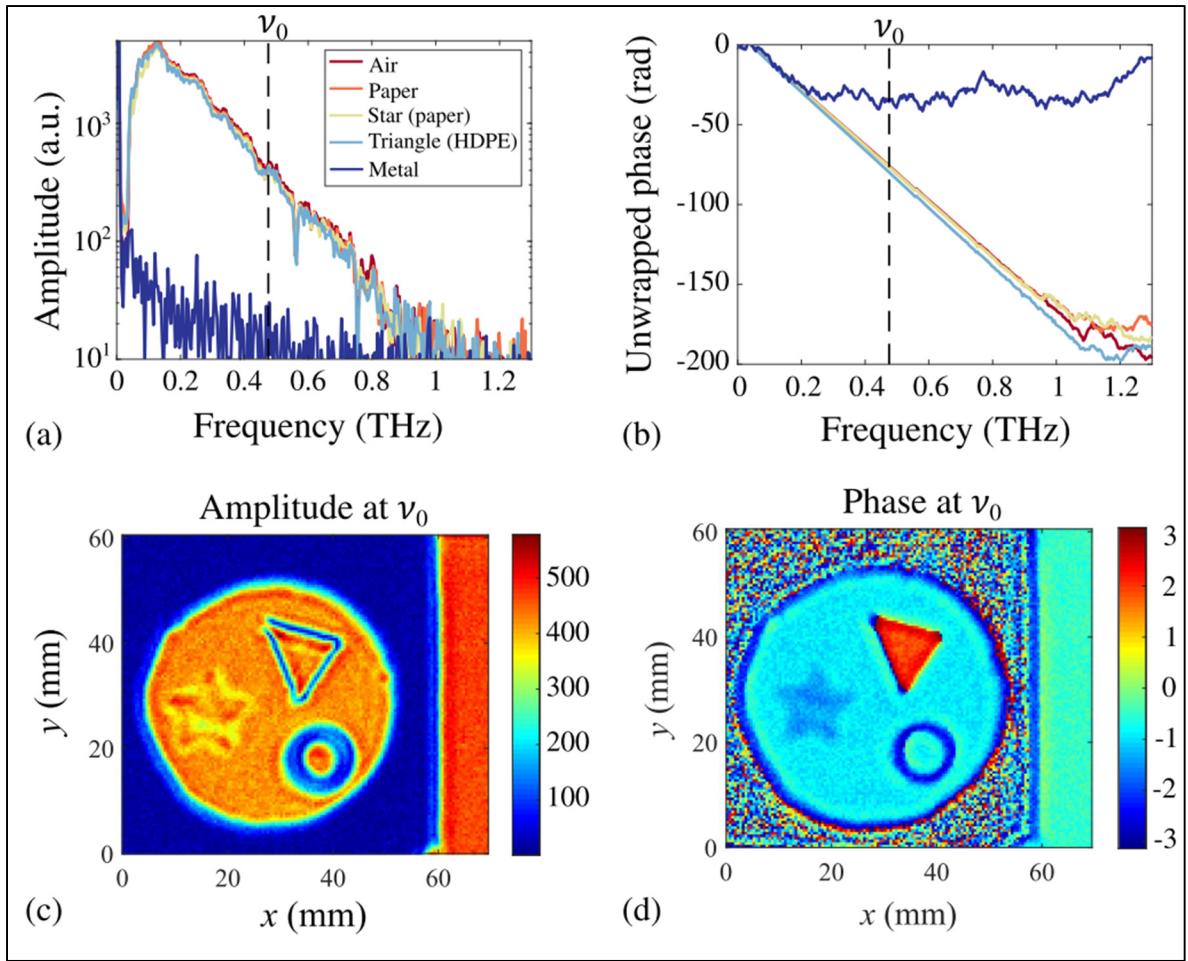


Figure 2.18 Signal THz fréquentiel après acquisition sur échantillons :
 (a) Amplitude et (b) phase du spectre pour différentes positions/échantillons; (c) Amplitude et (d) phase sur l'image THz à $\nu_0 = 0.475$ THz
 Tiré de Guerboukha et al., (2018a, p.849)

En contraste, l'imagerie dite passive consiste à reconstruire une image THz en deux dimensions, sans tenir en compte de la dimension temporelle ou fréquentielle de l'image. La Figure 2.19 démontre un exemple d'image obtenu par cette méthode.

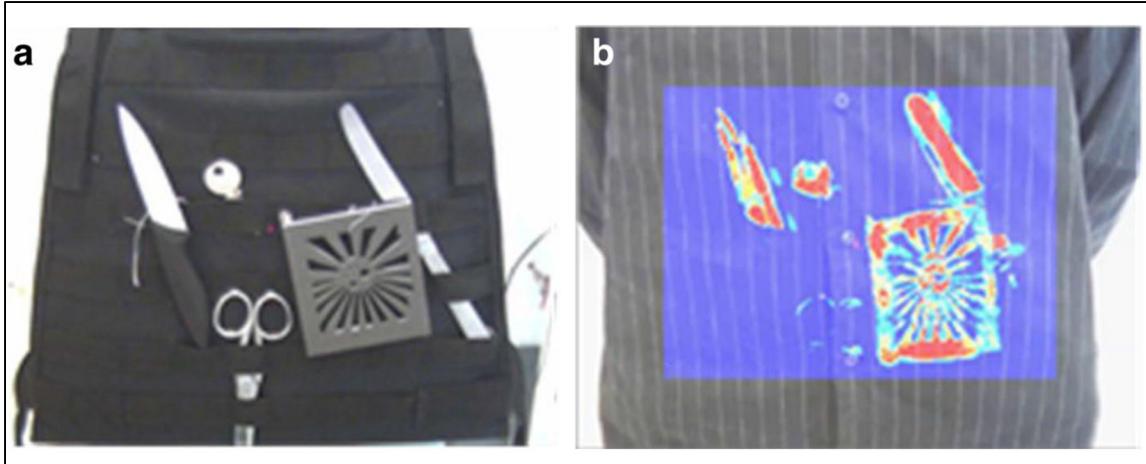


Figure 2.19 Acquisition THz par matrice de transistors à effet de champ (FET) :
 (a) Photographies visibles des objets à imager; (b) Image obtenue par imagerie THz passive
 Tiré de Simoens et al.,(2015, p.976)

Ce type d'acquisition peut être effectuée à l'aide de microbolomètre, de cellule Golay ou de transistors à effet de champ (FET) en utilisant excitation d'ondes plasmoniques pour obtenir une réponse aux ondes THz (Guerboukha et al., 2018b). L'imagerie passive partage les caractéristiques des FTIR d'être sensibles à l'intensité du champ détecté et de ne pas être sensibles à l'information de phase de l'acquisition (Jansen et al., 2010). Cette catégorie d'imagerie a l'avantage d'être plus rapide à effectuer en raison de l'absence d'une troisième dimension à échantillonner. Elle possède également l'avantage d'être plus facile à paralléliser, rendant possible la méthode d'accélération discutée dans le chapitre suivant : les caméras THz.

2.5.2 L'imagerie par caméra THz

Le concept de caméra THz se rapproche des dispositifs d'acquisition standard qu'on retrouve dans les appareils photo standard dans l'optique ou le but est d'utiliser des matrices de détecteur afin d'effectuer une acquisition en parallèle permettant de rapidement obtenir une image. Deux technologies de capteurs pour les caméras THz ont été considérées comme attrayantes au cours des dernières années, les capteurs thermiques et les capteurs basés sur les FET. Les caméras THz thermiques utilisent soit des matrices de cellules Golay, de capteurs pyroélectriques ou de microbolomètres. Les systèmes à bases de détecteurs pyroélectriques sont même actuellement commercialement disponibles, mais requièrent des champs THz

intenses, ce qui restreint leurs applications possibles (Guerboukha et al., 2018b). Les caméras THz FET, tel que mentionnées précédemment, mesurent les tensions rectifiées des transistors de leur matrice après l'interaction avec une onde THz incidente. Elles ont l'avantage de pouvoir bien s'intégrer avec la technologie CMOS de l'industrie et de pouvoir détecter des champs THz relativement faibles (1-20nW (Guerboukha et al., 2018b)). Un exemple d'utilisation de caméra FET peut être observé dans la Figure 2.20. On peut y apercevoir une image de résolution de 32x32 pixels obtenu à un taux de 25 images par seconde (Guerboukha et al., 2018b).

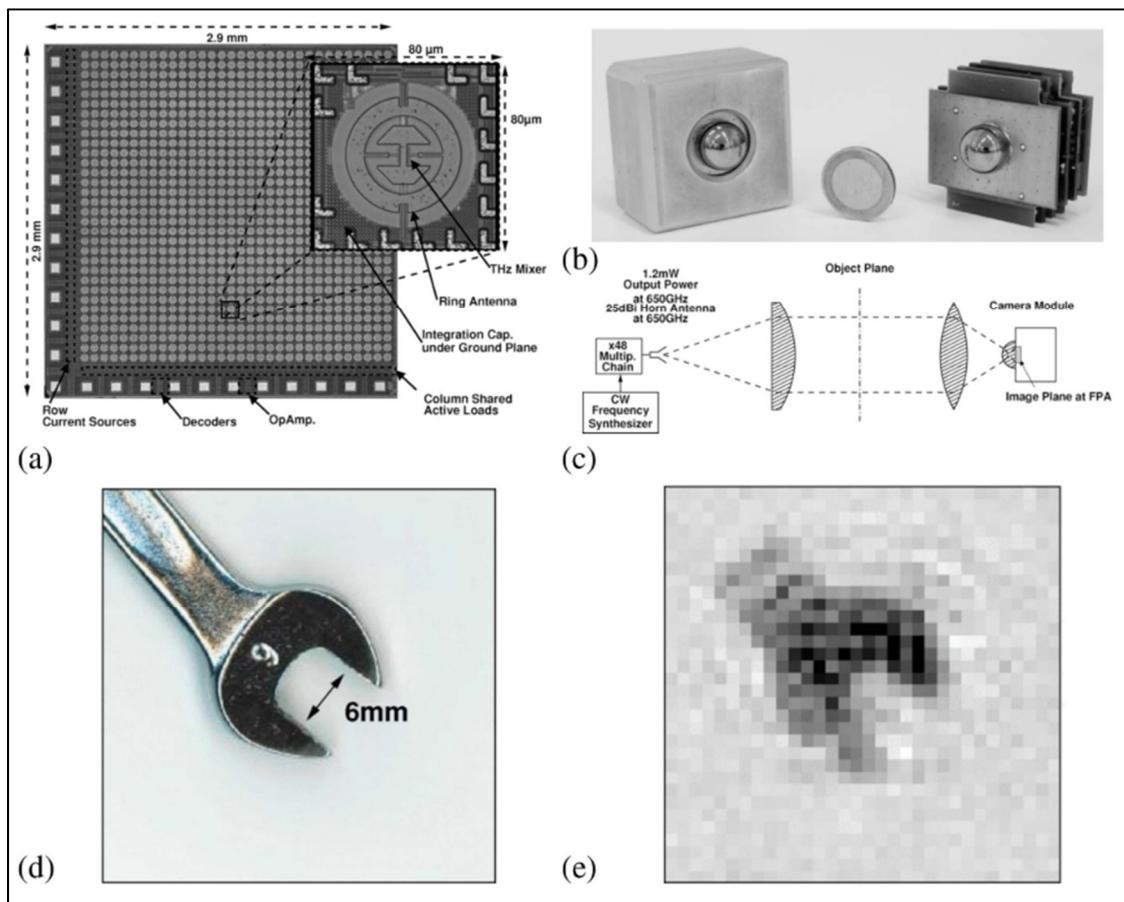


Figure 2.20 Acquisition par caméra THz basée sur matrice de FET :
 (a) Micrograph de la matrice 32x32 au plan focal du système; (b) Photographie de la caméra THz développée; (c) Configuration expérimentale en transmission; (d) Photographie de la clé de 6mm; (e) Image THz obtenue à un taux de 25 images par secondes

Tiré de Guerboukha et al., (2018a, p.891)

Il est cependant à noter que les différentes caméras THz développées à ce jour permettent une acquisition proportionnelle à l'intensité du champ et ne donne donc pas d'information sur la phase de l'onde, ce qui restreint leur utilisation. Une application privilégiée pour ce genre de caméra est la sécurité en raison de la capacité de détection de métal qu'elles permettent d'effectuer (Dhillon et al., 2017; Simoens et al., 2015).

2.5.3 L'imagerie TDS par CS

Bien que des méthodes d'acquisitions TDS rapides existent telles que les OODL les systèmes d'échantillonnage optique asynchrone (ASOPS), ECOPS et d'échantillonnage optique par accord de la cavité laser (OSCAT) (Guerboukha et al., 2018b), etc. le défi de l'acquisition de plusieurs pixels pour créer une image TDS en temps réel subsiste. La parallélisation de détecteur PCA a été tentée par le passé, mais s'est heurtée à des limitations telles que la grande consommation d'une matrice de PCA, la difficulté de conception d'optiques permettant de focaliser sur les différents détecteurs simultanément et la diaphonie entre les différentes PCA (Guerboukha et al., 2018b). D'autres solutions ont donc été suggérées, dans lesquelles se trouve la méthode CS.

La CS est une technique d'imagerie relativement nouvelle qui s'est révélée prometteuse pour plusieurs applications, notamment l'imagerie médicale, l'astronomie et le traitement du signal (Zanotto et al., 2020). Cette technique repose sur le fait que de nombreux signaux sont épars dans certains domaines, ce qui signifie qu'ils peuvent être représentés avec beaucoup moins d'échantillons que les méthodes traditionnelles (Zanotto et al., 2020). La CS tire parti de cette « sparsité » en utilisant beaucoup moins d'échantillons que les méthodes traditionnelles, ce qui peut réduire le temps et le coût global du processus d'imagerie. Dans beaucoup de domaines, dont les THz, la CS vise à réduire la quantité de données nécessaires à l'acquisition en tirant parti du fait qu'un grand nombre de signaux acquis sont considérés comme K-Sparse, ce qui signifie que lors de l'acquisition d'une image de N pixels, en représentant l'image x dans une base ψ , seuls K coefficients ont des valeurs élevées, où $K \ll N$. L'équation : $x = \psi \psi^T x$

$1 \otimes N \otimes s_i \psi_i \rightarrow x = \Psi s$, (2.18) montre comment une image x peut être représentée comme un équivalent d'un vecteur s dans le domaine ψ (Chiani, 2021).

$$x = \sum_{i=1}^N s_i \psi_i \rightarrow x = \Psi s, \quad (2.18)$$

Tiré de Chiani (2021, p.1)

L'objectif est alors d'acquérir un nombre $M \approx K$ de coefficients qui peuvent ensuite être utilisés pour reconstruire une image du signal initial (Chiani, 2021). Pour ce faire, il faut utiliser une matrice de détection Θ pour moduler une lecture d'un seul pixel entrant et déterminer un algorithme de reconstruction pour transformer la lecture s en une image y en utilisant l'équation suivante :

$$y = \Phi x = \Phi \Psi s = \Theta s, \quad (2.19)$$

Tiré de Chiani, (2021, p.1)

Le modèle d'acquisition CS, décrit mathématiquement précédemment par $y = \Phi x$ où $x \in R^N$ est un signal d'entrée, de longueur N , $\Phi \in R^N \times N$ est une matrice de mesure $M \times N$ et $y \in R^N$ est le vecteur de mesure de longueur, consiste à multiplier un signal d'entrée par des matrices de mesure pour générer des mesures qui seront appelées mesures compressives. Le défi consiste donc à choisir une matrice de mesure stable de telle sorte que l'information importante, contenue dans les K coefficients du signal s , puisse être récupérée tout en n'acquérant qu'une fraction du signal x . Pour ce faire, il faut choisir une matrice appropriée Φ et une base appropriée Ψ , ce qui donne un choix de Θ dépendant de la qui doit préserver les K entrés non nulles du signal s . Ceci est fait en concevant une matrice Θ qui respecte à la fois la propriété d'isométrie restreinte (RIP) (Chiani, 2021) donnée par l'équation :

$$1 - \epsilon \leq \frac{\|\Theta v\|_2}{\|v\|_2} \leq 1 + \epsilon, \quad (2.20)$$

Tiré de Chiani, (2021, p.2)

et qui est incohérente, ce qui signifie que les lignes de Φ ne peuvent pas représenter de manière éparse les colonnes de Ψ (Rani et al., 2018). Parmi les solutions populaires pour satisfaire ces exigences, on retrouve les matrices Hadamard, les matrices aléatoires et les matrices de Fourier avec leurs bases respectives.

Une fois la matrice d'acquisition déterminée, la deuxième partie du défi CS est la reconstruction du signal x à partir de M mesures. Le signal x peut être récupéré en résolvant $y = \Phi x$, un système d'équation linéaire sous-déterminé qui a un nombre infini de solutions possibles. Une des solutions les plus appropriées trouvées à ce jour pour la reconstruction est l'utilisation d'une norme ℓ_1 , qui peut commodément déterminer une solution K -sparse avec une forte probabilité en utilisant $M \geq cK \log(N/K)$ mesures (Chiani, 2021). D'autres algorithmes ont été développés, mais ne seront pas abordés dans ce document.

Concrètement, pour les THz, l'application de la CS consiste à moduler le faisceau THz par l'une des méthodes mentionnées dans la section 2.4 avec des masques de bases et de domaine satisfaisant aux conditions d'incohérence et RIP. Un algorithme de reconstruction peut ensuite être utilisé pour reconstruire les images à partir des acquisitions. Des expériences THz ont démontré la possibilité de générer des images THz-TDS avec ce procédé, dont l'application démontrée en 2.4.2 (Stantchev et al., 2020). Dans cette thèse, une méthode de modulation novatrice sera explorée pour permettre d'effectuer des acquisitions compressées à l'aide de PMUT.

CHAPITRE 3

SPECTROSCOPIE THZ À L'AIDE DE TRANSDUCTEURS ULTRASONIQUES MICRO-USINÉS PIÉZOÉLECTRIQUES

3.1 Transducteurs ultrasoniques micro-usinés piézoélectriques

En continuation avec le travail effectué par (Amirkhan et al., n.d.), le but de la recherche décrite dans cette thèse était de démontrer la pertinence de l'utilisation de dispositifs PMUT en tant que différentiateur pour les ondes THz. Pour cela, des expériences ont tout d'abord été effectuées avec un dispositif PMUT similaire à celui utilisé dans l'article, puis avec une matrice de dispositifs PMUT. Cette section décrit les dispositifs utilisés, leurs conceptions ainsi que leurs caractérisations.

3.1.1 PMUT simple

Le premier dispositif PMUT utilisé a été conçu au préalable pour démontrer son efficacité en tant que différentiateur THz. Une représentation graphique du dispositif peut être observée dans la Figure 3.1 a).

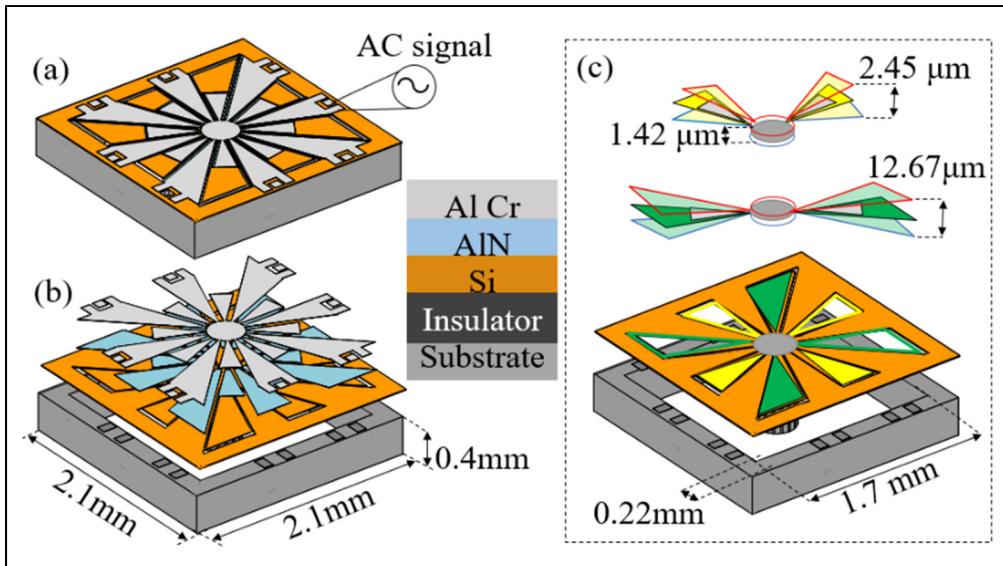


Figure 3.1 Illustration du dispositif PMUT simple :

(a) Illustration du dispositif PMUT et de ses bornes; (b) Illustration du dispositif PMUT en vue explosée; (c) Du déplacement des différentes pièces du PMUT tiré de Amirkhan et al., (n.d., p.2)

Le dispositif possède une surface de $2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$ d'un substrat de silicium sur isolant creux à l'intérieur (SOI) de 0.4 mm d'épaisseur. Les dimensions de la cavité de ce SOI creux sont de $1.7 \times 1.7 \text{ mm}^2$. Cet espace vide à l'intérieur du PMUT permet à ces ailes de se déplacer sur des longueurs allant jusqu'à $12.67 \mu\text{m}$ (Amirkhan et al., n.d.) lorsqu'un courant alternatif (AC) est appliqué sur les électrodes d'aluminium de la partie active du PMUT. Cette partie du PMUT consiste en un empilement, visible dans la Figure 3.1 b), constituée, de bas en haut, d'une couche de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur d'aluminium (Al), de $0.02 \mu\text{m}$ d'épaisseur de chrome (Cr), et un matériau piézoélectrique de $0.5 \mu\text{m}$ d'épaisseur (nitrule d'aluminium) déposé sur une couche de silicium (Si) de $10 \mu\text{m}$ d'épaisseur qui est elle-même déposée sur le substrat SOI. Une couche isolante supplémentaire de dioxyde de silicium de $0.2 \mu\text{m}$ est déposé entre la couche de Si et l'empilement multicouche métallique pour prévenir les courts-circuits. La fréquence de résonance du dispositif en question est de 10.82 kHz et l'amplitude d'excitation de 20 V crête à crête (c-à-c). Plus de détails sur la caractérisation du dispositif sont disponibles dans (Gratuze, 2022).

3.1.2 Matrice de PMUT

Le second dispositif utilisé était une matrice de dispositifs PMUT spécialement conçue pour des paramètres optimaux pour opérer avec les ondes THz, contrairement aux dispositifs précédemment décrit, qui avait initialement été conçu pour la récupération d'énergie vibratoire (Gratuze, 2022). La matrice est composée de 16 dispositifs PMUT placés 4 à 4, comme on peut le voir dans la Figure 3.2.

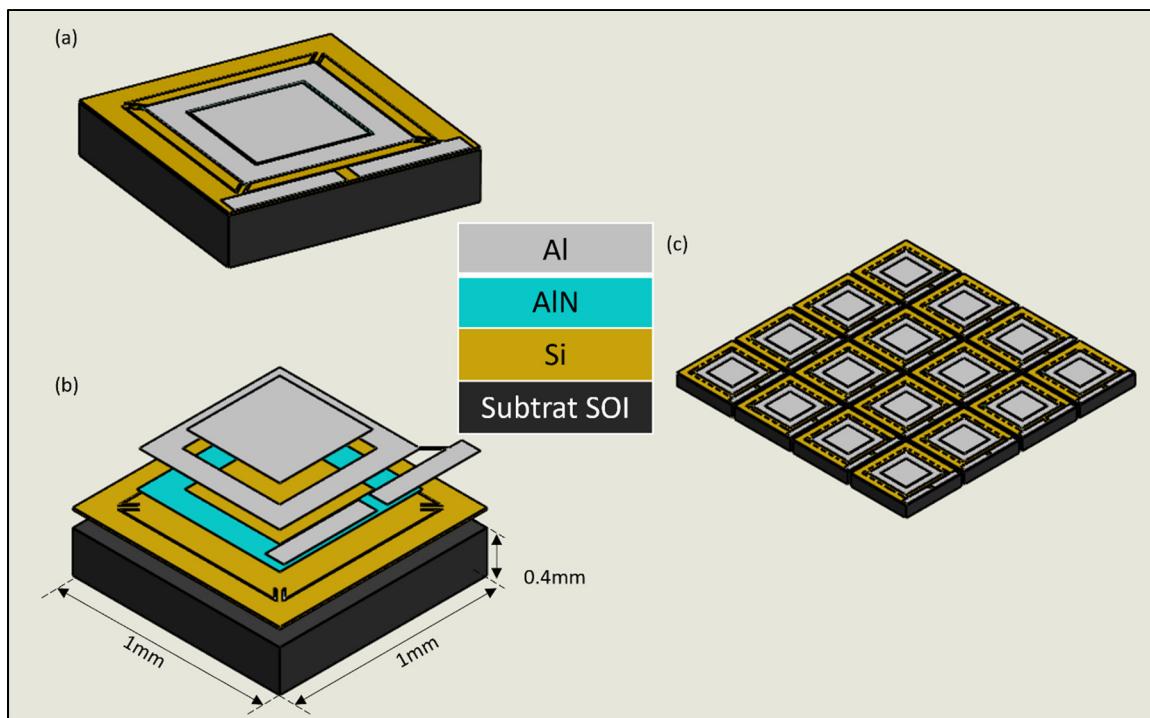


Figure 3.2 Illustration de la matrice PMUT développée :
 (a) D'un PMUT unitaire de la matrice; (b) D'une vue explosée d'un PMUT unitaire et de ses dimensions; (c) De la matrice de PMUT développée durant cette recherche

Le dispositif possède une surface de $0.9 \times 0.9 \text{ mm}^2$ d'un substrat de silicium sur isolant creux à l'intérieur (SOI) de 0.4 mm d'épaisseur. Les dimensions de la cavité de dispositif creux sont de $0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$. Les différentes couches du PMUT sont faites, de haut en bas, d'une surface de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur d'aluminium (Al), d'un matériau piézoélectrique de $0.5 \mu\text{m}$ d'épaisseur (nitrate d'aluminium) et d'une couche de silicium (Si) de $10 \mu\text{m}$ d'épaisseur qui est elle-même déposée sur le substrat SOI. Dans la surface d'aluminium, un carré intérieur est découpé. Ce

carré est la partie vibrante du PMUT, il est en fait attaché au reste de l'aluminium par ses quatre coins. Un déplacement estimé à $1 \mu\text{m}$ était prévu pour ce dispositif. La matrice consiste à regrouper 16 dispositifs semblables sur une même puce, en ayant un écart de $200 \mu\text{m}$ entre chaque dispositif, pour une surface totale de $4.3 \times 4.3\text{mm}^2$ et incluant un rebord de $100 \mu\text{m}$ autour des dispositifs.

La caractérisation a été à l'aide d'un vibromètre, suivant le schéma expérimental illustré dans la Figure 3.3. L'utilisation d'un vibromètre permet la visualisation de la forme de mode du dispositif, via la mesure de la vitesse de 2500 points à intervalles réguliers sur la zone couverte par le dispositif MEMS. Un système de gestion de données de Polytec est utilisé, le contrôleur du vibromètre utilisé est le OFV-2570 de Polytec et l'unité laser est le OFV- 534 de Polytec. Pour obtenir ces résultats, l'excitation du PMUT est assurée par un générateur de fonctions de type 33250A d'Agilent. Un balayage des fréquences entre 1 – 100kHz a été effectué pour valider la fréquence de résonance du PMUT.

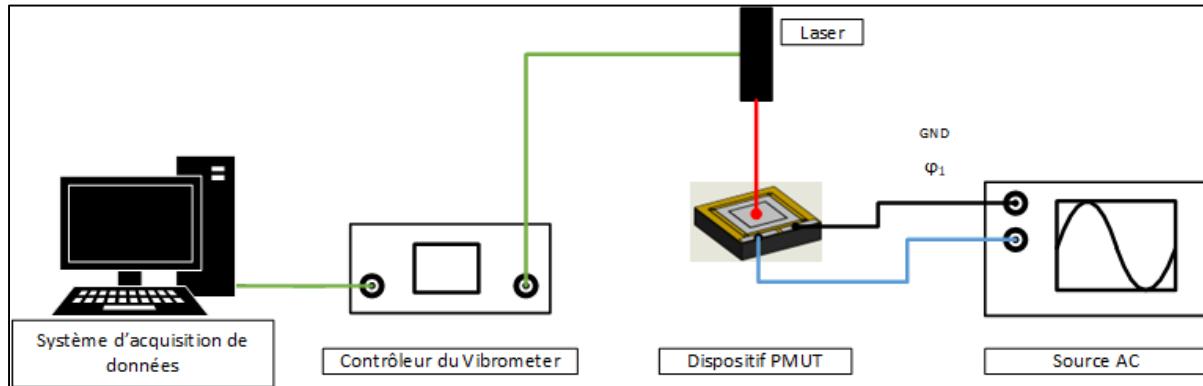


Figure 3.3 Configuration expérimentale de test de PMUT à l'aide d'un vibromètre

Pour caractériser les PMUT un à un, trois points physiques étaient sélectionnés sur le carré intérieur oscillant sur chaque PMUT, puis une acquisition par balayage était effectuée. Une variation des tensions appliquées a également été effectuée pour déterminer la relation entre la tension d'excitation et le déplacement mesuré des différents PMUT d'une même matrice. En plus de caractériser le déplacement de chaque PMUT en fonction de l'amplitude et la fréquence appliquée à ses bornes, le temps d'allumage et d'extinction a également été mesuré au

vibromètre en appliquant la tension d'excitation d'un PMUT à sa fréquence de résonance pendant un nombre de cycles déterminé. Le nombre de cycles ainsi que le temps requis pour passer de l'état d'arrêt à la pleine oscillation ont été mesurés. La même mesure de temps et de cycle a été mesurée lors du passage de l'état de pleine oscillation à l'arrêt. Le but de ces mesures était de valider la vitesse à laquelle une matrice pourrait changer de masques d'activation. Une fois les PMUT d'une matrice individuellement caractérisées, des tests de masques ont été effectués sur la matrice. Appliquer un masque consiste à sélectionner quels PMUT de la matrice sont actifs et quels sont éteints. Par la suite, le vibromètre effectuait une mesure de déplacement sur chaque PMUT et la distance des déplacements était enregistrée. Le but était d'évaluer la diaphonie entre les PMUT activés et ceux éteints afin de valider la possibilité de moduler un éventuel champ THz. Dans le cas où la diaphonie serait trop forte, il serait impossible de distinguer le déplacement d'un PMUT activé par rapport à un PMUT éteint, ce qui rendrait impossible de distinguer un signal entre deux masques appliqués différents.

Le procédé de fabrication des PMUT était le même que pour la fabrication du PMUT simple, soit le procédé PiezoMUMPs de MEMSCAP (Amirkhan et al., 2020b). Une fois la fabrication complétée, la dernière étape restante était la liaison par fil des PMUT. Différentes méthodes ont été essayées, des liaisons à la main ainsi que des liaisons utilisant une machine de liaison par fil automatique M17S fabriquées par F&K ont été effectuées entre la matrice de PMUT et une puce de montage, permettant ainsi de souder la puce de montage à un circuit imprimé (PCB) ou bien directement entre une puce et un PCB. Les mêmes caractérisations ont été effectuées pour chaque méthode de liaisons.

3.2 Spectroscopie dérivée

Après l'introduction de la spectrophotométrie dérivée dans les années 1950, la spectroscopie dérivée a gagné en importance entre les années 1970-1980 (Talsky et al., 1978). Cette méthode est utilisée dans les spectres IR et ultraviolets (UV) principalement pour permettre d'analyser l'absorption en raison de ses nombreux avantages qualitatifs et quantitatifs (Owen, 1995).

Cette section décrit comment les hypothèses émises par rapport aux résultats d'une acquisition dérivée avec un système THz ainsi que les montages expérimentaux effectués pour intégrer cette spectroscopie dans le domaine THz.

3.2.1 Hypothèse dans le THz avec PMUT simple

La spectroscopie dérivée optique, dite conventionnelle, est principalement utilisée dans des spectres d'absorbances de diverses substances (Owen, 1995). Elle peut être obtenue en modulant la lumière d'un système ou en procédant à une acquisition spectroscopique standard et en dérivant le spectre d'absorption calculé par la suite. Ce type de spectroscopie possède des avantages tels que l'augmentation de la résolution spectrale d'absorbance, l'élimination de bruit DC, l'élimination des signaux large bande, etc. (Owen, 1995). Ces avantages se manifestent différemment dans un système d'acquisition THz-TDS puisque la spectroscopie est effectuée dans le domaine temporel dans ce cas. Dans le contexte du THz-TDS, pour effectuer une spectroscopie dérivée, il est essentiel d'utiliser un amplificateur à verrouillage et de verrouiller l'amplificateur sur la fréquence d'oscillation du PMUT. En verrouillant l'amplificateur sur les harmoniques supérieures de la fréquence d'oscillation, il est possible d'obtenir les dérivées d'ordres correspondantes aux harmoniques utilisées. Il a par ailleurs été démontré qu'en intégrant la courbe temporelle obtenue un nombre de fois correspondant à l'ordre de dérivation du signal acquis, on pouvait retrouver un signal normalisé équivalent au signal acquis à l'ordre 0. (Amirkhan et al., n.d.). Ces résultats sont illustrés dans la Figure 3.4. Il est également intéressant de remarquer que, dans le domaine spectral des signaux intégrés, on observe un signal sur bruit légèrement supérieur dans les fréquences supérieures lorsqu'on augmente l'ordre de dérivation de l'acquisition.

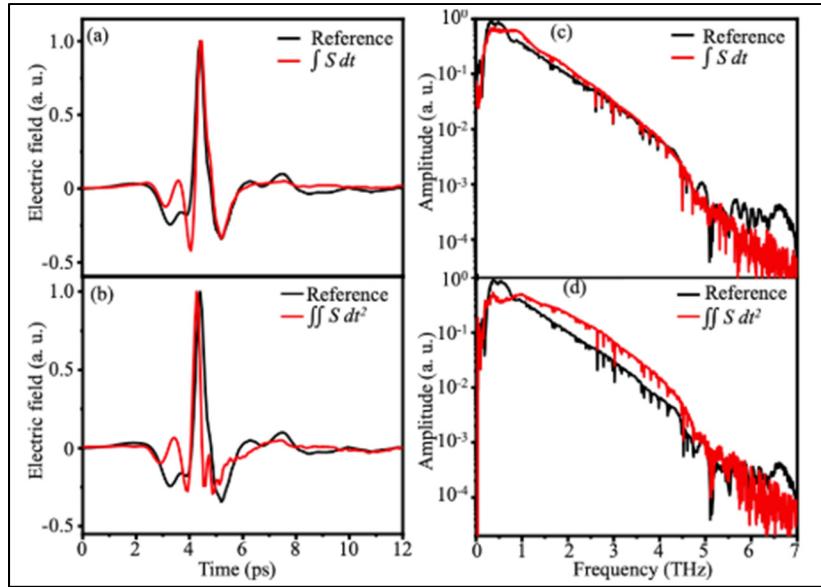


Figure 3.4 Comparaison de signaux THz dérivés intégrés à un signal d'ordre 0 :

(a) et (b) comparaison du signal de la première harmonique intégrée dans le domaine temporel et fréquentiel respectivement; (c) et (d) comparaison du signal de deuxième harmonique intégré à deux reprises dans les domaines temporel et fréquentiel respectivement
Tiré de Amirkhan et al., (n.d., p.5)

En conséquence, l'hypothèse de départ était qu'il serait possible d'extraire un indice de réfraction et un coefficient d'absorption égal à celui obtenu dans les acquisitions d'ordre 0 et peut-être plus précis avec les mesures de la littérature à haute fréquence. Un montage expérimental permettant de valider cette hypothèse a été effectué et sera décrit dans la sous-section 3.2.4. Le silicium a été choisi comme échantillon à caractériser par spectroscopie dérivée puisque son indice de réfraction et son coefficient d'absorption sont connus pour les fréquences THz entre 0.5 et 4.5 THz (Dai et al., 2004).

3.2.2 Hypothèse avec matrice de PMUT

Initialement, la validation du fonctionnement de la matrice de PMUT a été faite en modulant chaque PMUT de la matrice de manière à utiliser la matrice comme dispositif PMUT simple. L'analyse du Silicium a également été effectuée dans cette expérience. L'hypothèse initiale de cette expérience était que l'amplitude du signal détecté serait inférieure à celle d'un PMUT

simple étant donné que les PMUT de la matrice étaient supposés avoir un déplacement maximal de $1\mu m$ comparé à plus de $12\mu m$ pour le dispositif simple. Cependant, le mouvement de la matrice devait être linéaire, contrairement au mouvement des ailettes du PMUT simple, ce qui laissait suggérer que la matrice aurait peut-être moins de bruit dû à la simplicité du mouvement. Une expérience THz-TDS a donc également été réalisée avec la matrice pour valider la qualité de son signal par rapport à un PMUT simple. D'un point de vue d'acquisition compressée, l'hypothèse était que l'activation de différents PMUT de la matrice selon les masques Hadamard causerait une variation du signal selon la présence d'objet dans le faisceau THz incident au PMUT. Ces signaux pourraient donc être utilisés pour reconstruire une image TDS en utilisant un algorithme de reconstruction approprié.

3.2.3 Apprentissage des systèmes THz : Développement de communication par paquet THz

Avant de commencer à mettre en place les montages réalisés pour tester les hypothèses émises par rapport à la spectroscopie dérivée dans des systèmes THz-TDS, un montage de modulation de THz par modulation optique dans le but de développer un encodage d'information par paquet dans les ondes THz a été effectuée. Ce projet a été effectué en collaboration avec Joël-Édouard Nkeck et a mené à une publication (Edouard et al., 2022). Cette sous-section décrit brièvement le montage ainsi que les hypothèses qui y sont reliées. Le but de cette expérience était d'utiliser un miroir échelon pour générer un train d'impulsions laser puis de moduler cette impulsion à l'aide d'un DMD afin de pouvoir générer un train d'impulsions THz. Un schéma du montage expérimental est illustré dans la Figure 3.5.

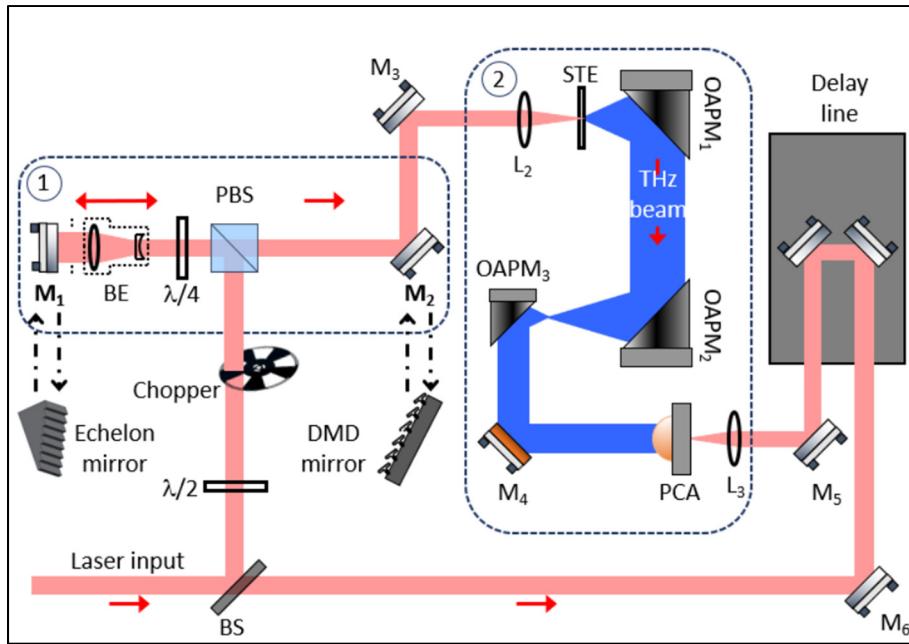


Figure 3.5 Configuration expérimentale de génération de train d'impulsion THz :

Les miroirs M1 et M2 peuvent être remplacés par un miroir échelon et le DMD respectivement

Tiré de Edouard et al., (2022, p.7)

Dans ce montage expérimental, le laser utilisé était un laser femtoseconde oscillateur Chameleon Discovery NX de la société Coherent, Inc. La longueur d'onde de l'impulsion femtoseconde émise par le laser a été ajustée à 800 nm. Pour cette configuration d'expérience pompe-sonde, le faisceau laser a été divisé en deux à l'aide d'un séparateur de faisceau (BS) 90:10, 90 % de la puissance optique était envoyée dans le faisceau de pompe pour la génération du train d'impulsions et du rayonnement THz, tandis que 10 % étaient envoyées dans le faisceau de sondes pour la détection THz via un échantillonnage photoconducteur. Le détecteur THz était une antenne photoconductrice GaAs basse température de Teravil de modèle DET-8. Le train d'impulsions est généré à l'aide d'un miroir en échelon, d'un commutateur de polarisation optique et d'un expandeur de faisceau (BE). Afin de projeter un faisceau optique normal à la surface de l'échelon, un commutateur de polarisation optique, composé d'un séparateur de faisceau polarisé (PBS) et d'une plaque quarte d'onde, sépare le faisceau optique incident du faisceau optique réfléchi de l'échelon. Le miroir de l'échelon est un miroir étagé Ni-P de la société Sodick F.T. Co., avec un pas de 150 μm de large et 75 μm de haut, générant

un délai entre deux petits faisceaux consécutifs de 1 ps et 500 fs, selon le côté éclairé. Ensuite, le train d'impulsions optiques est projeté sur DMD DLP4500 .45 WXGA d'Ajile, où il est modulé et où l'on y encode l'information à transmettre. Le train d'impulsions optique est focalisé sur un dispositif spintronique à trois couches (W/Co0.5Fe0.35B0.15/Pt) qui génère un train d'onde THz lors de l'interaction avec le train d'impulsion laser modulé. Il est à noter que, comme indiqué dans la Figure 3.5, les miroirs M1 et M2 doivent être remplacés respectivement par le miroir échelon et le DMD afin de pouvoir générer les trains d'impulsions et de les moduler. Les trains d'ondes THz générés ainsi que l'encodage d'information par cette méthode seront expliqués dans le chapitre 4 de ce mémoire.

3.2.4 Intégration de PMUT simple pour spectroscopie dérivée

Le montage expérimental permettant d'effectuer la spectroscopie de silicium a été effectué conformément à la Figure 3.6. Le montage expérimental a été effectué avec divers émetteur. Deux cristaux non-linéaires (ZnTe et LiNbO₃), un émetteur spintronique (W/Co_{0.5}Fe_{0.35}B_{0.15}/Pt) ainsi qu'une antenne photoconductrice Teravil de modèle EMT-8. La détection a, quant à elle, été effectuée par antenne photoconductrice Teravil de modèle DET-8 pour tous les émetteurs.

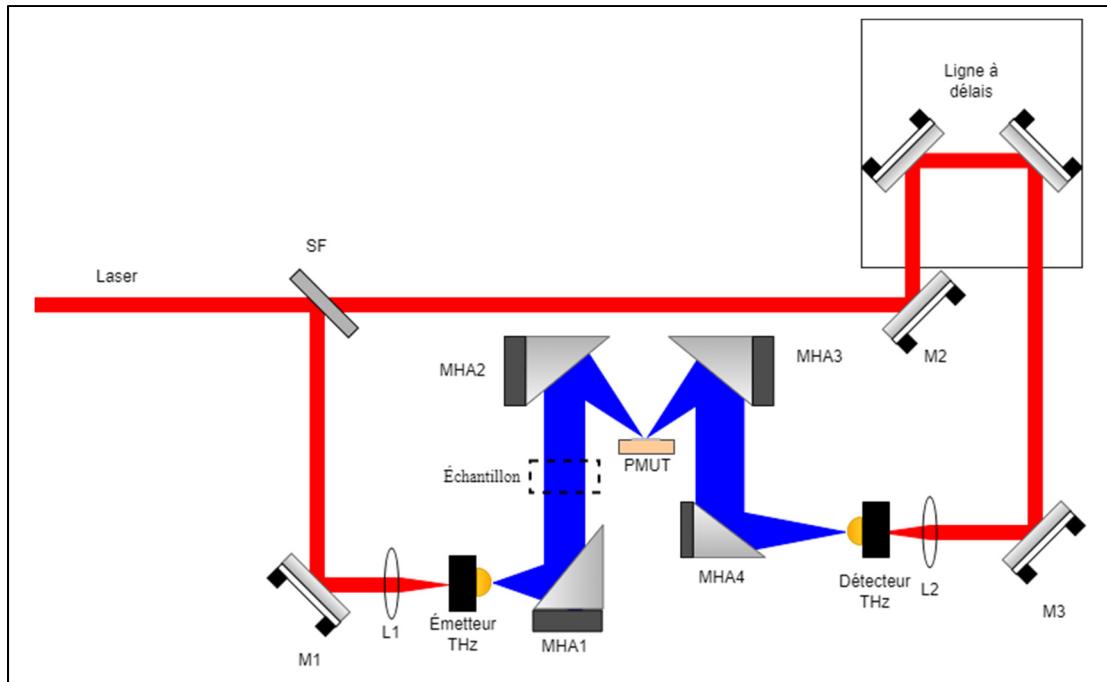


Figure 3.6 Configuration expérimentale de spectroscopie THz dérivée utilisant un PMUT simple

Puisque le PMUT utilisé dans ce contexte avait une surface mobile ponctuelle, il était essentiel de focaliser le faisceau THz sur le dispositif PMUT. C'est pourquoi quatre miroirs hors-axe ont été utilisés. Le premier sert d'abord à créer un faisceau collimaté où l'échantillon sera exposé aux ondes THz, le faisceau est ensuite focalisé sur le dispositif PMUT par un deuxième miroir hors-axe, où il est réfléchi vers un troisième miroir hors-axe qui recollimate le faisceau. Le dernier miroir hors axe focalise le faisceau sur le détecteur DET-8. Les acquisitions du détecteur étaient par la suite mesurées par un amplificateur à verrouillage UHFLI de Zurich Instrument, avant d'être par la suite traitées sur Matlab pour obtenir les paramètres optiques désirés. Il est à noter que l'amplificateur de Zurich Instrument permet d'obtenir simultanément jusqu'à 4 harmoniques du signal sur lequel il est verrouillé. Afin d'extraire les paramètres optiques désirés, la méthode décrite par la méthode décrite dans (Jepsen, 2019) a été utilisée afin d'éliminer les problèmes pouvant se produire lors du déroulement de phase. Les étapes mathématiques à effectuer à la suite d'une acquisition temporelle du signal consistent en :

1. Moyenner le signal des acquisitions temporelles du signal de référence
2. Effectuer une transformée de Fourier pour récupérer le spectre du signal

3. Convertir les valeurs complexes du spectre fréquentiel de manière à obtenir la phase et l'amplitude pour chaque fréquence
4. Dérouler la phase dans le domaine fréquentiel
5. Insérer l'échantillon à analyser dans le montage
6. Répéter les étapes 1 à 4 pour le signal de l'échantillon
7. Utiliser les équations $n(\omega) = 1 + \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d}$,

$$(2.10) \quad \text{et} \quad \alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln\left(\frac{(n+1)^2}{4n} T(\omega)\right) ,$$

(2.11) pour extraire l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption de l'échantillon.

Le code conçu pour l'analyse des résultats est joint en annexe de cette thèse.

3.2.5 Intégration de matrice de PMUT pour modulation de THz

Le montage expérimental effectué pour valider le fonctionnement de la matrice avec des ondes THz était plus simple que celui utilisé pour la spectroscopie dérivée sur un dispositif PMUT simple. La raison étant que l'émetteur EMT-8 de Teravil, également utilisé dans ce montage, émettait un faisceau THz d'un diamètre d'environ 4 mm, ce qui correspondait pratiquement à la surface mobile de la matrice de PMUT. L'utilisation de miroirs hors axe pour focaliser ou collimater le faisceau THz n'était pas nécessaire. Le montage expérimental final est illustré dans la Figure 3.7.

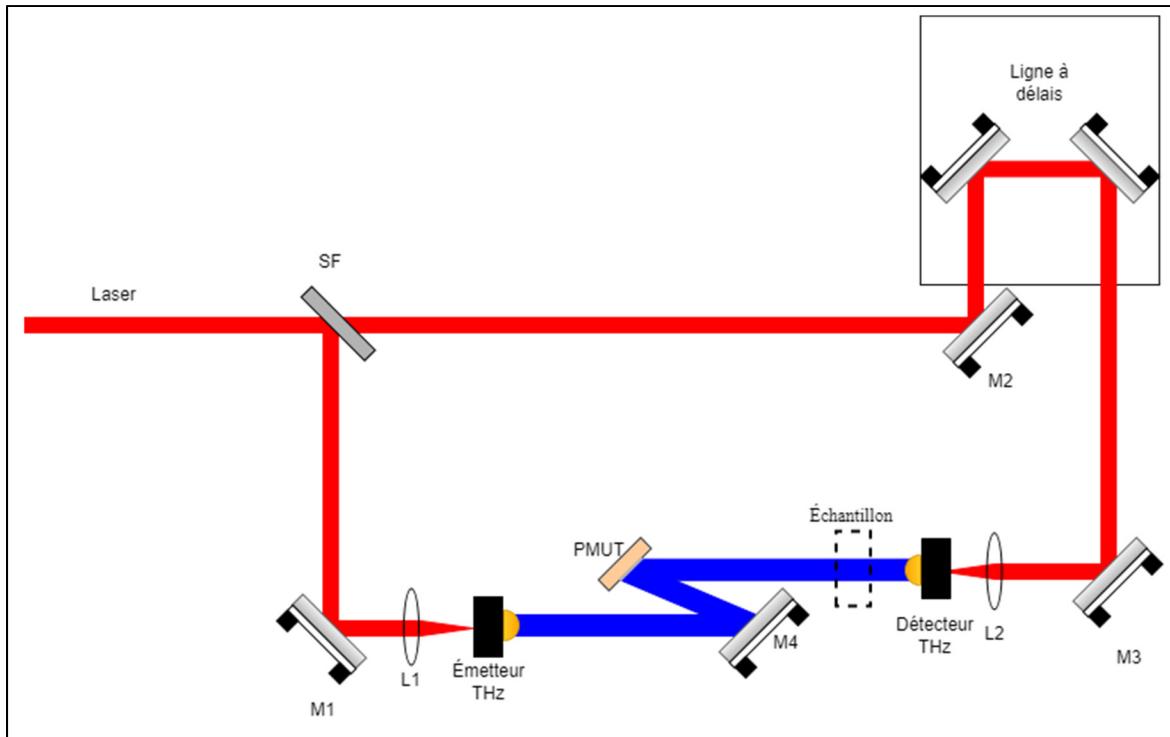


Figure 3.7 Configuration expérimentale de spectroscopie THz dérivée utilisant une matrice de PMUT

Le même détecteur DET-8 de Teravil a été utilisé pour ce montage. Le montage de la matrice a également repris le même procédé de détection et de traitement de données pour la spectroscopie dérivée effectuée. La première étape pour valider la possibilité d'effectuer une acquisition compressée avec le montage a été l'application de masques et l'analyse des signaux THz résultants de l'application de masques. Le plan était ensuite d'appliquer une suite de masque d'Hadamard, effectuer une acquisition TDS pour chaque masque et d'effectuer une reconstruction d'image pour chaque point fréquentiel et temporel afin d'analyser les différents résultats de reconstructions en temps et en fréquence. Une croix métallique a été choisie comme objet à mettre à la place de l'échantillon en raison de l'interaction entre les ondes THz et le métal. Malheureusement, les expériences en acquisition compressées n'ont pas pu être réalisées. La raison derrière cet échec est expliquée dans la section des résultats de cette thèse.

3.3 Conception du contrôleur de PMUT

Pour pouvoir commander la matrice de PMUT conçue pour la modulation d'ondes THz, il était nécessaire de concevoir un circuit électronique spécialisé. En effet, les contraintes d'alimentation des PMUT faisaient en sorte qu'il était impossible d'utiliser un système standard tel qu'un système de contrôle de matrice de diodes électroluminescentes (LED). Cette section détaille les hypothèses de conception du circuit, le logiciel embarqué développé pour contrôler le circuit ainsi que la caractérisation des circuits et du logiciel qui a été effectuée.

3.3.1 Hypothèse de contrôle de PMUT

Lors de la planification de la conception de la matrice de PMUT, certains ont été déterminés d'avance, permettant ainsi de prévoir quel type de matériel serait essentiel au contrôle de la matrice. Ces paramètres sont :

- La fréquence de résonance prévue : 60 kHz
- Le temps requis pour qu'un PMUT passe de l'arrêt à un régime d'oscillation stable : 60 μ s
- Le temps requis pour qu'un PMUT passe de l'oscillation stable à l'arrêt : 80 μ s
- La tension nécessaire qu'un PMUT ait déplacement optimal : 10 volts crête à crête (Vpp)

En fixant ces paramètres, il était possible de sélectionner les composantes nécessaires au circuit de contrôle. La nécessité d'envoyer plusieurs périodes d'oscillation pour permettre d'obtenir une oscillation stable d'un PMUT a fait en sorte qu'il était impossible d'utiliser un type d'adressage par modulation de largeur d'impulsion (PWM), méthode utilisée pour contrôler des matrices de LED (Technologies, n.d.). Il était donc essentiel de concevoir un circuit qui possédait 16 sorties de contrôles indépendantes. La première hypothèse était que, pour diminuer la complexité du circuit à concevoir, d'utiliser des matrices d'optocoupleur contrôlées par des registres à décalages afin de minimiser les nombres de broches de microcontrôleur utilisées. Un schéma simplifié du circuit de contrôle peut être observé dans la Figure 3.8. En bref, le circuit peut être alimenté par prise micro-USB, donc par une tension de

5V. L'utilisation d'optocoupleur (U1 à Ux) permet d'isoler les tensions DC et AC de circuits et ainsi cette approche a l'avantage de ne nécessiter qu'un régulateur linéaire pour alimenter toute la circuiterie avec 3.3V. Les bascules à décalés et matrices d'optocoupleurs utilisées sont respectivement la puce SN74LV164ADR de Texas Instrument et la puce AQSS221N2S de Panasonic. Les PMUT ont été représentés dans le schéma par des inductances, ce qui est la représentation typique de ces composantes.

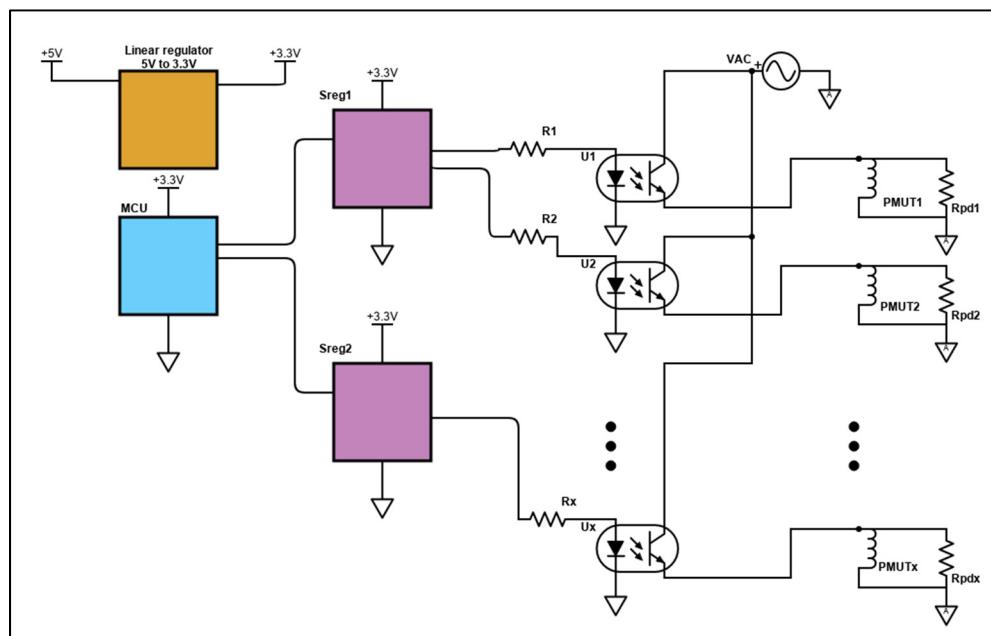


Figure 3.8 Schéma simplifié du circuit de contrôle par optocoupleur de la matrice de PMUT

Afin de prévenir une éventuelle diaphonie entre les traces de chaque PMUT, des résistances de type pull down ont été placées en parallèle aux dispositifs PMUT, qui ont prouvé pouvoir diminuer le temps de réponse des PMUT en plus d'assurer de garder la tension d'excitation de ceux à 0V lorsque leur optocoupleur de contrôle est en position fermée (Chang, 2007). Les optocoupleurs possèdent cependant le défaut d'être couteux et d'avoir un temps d'activation relativement lent, soit entre 30 et 200 μ s pour les optocoupleurs sélectionnés.

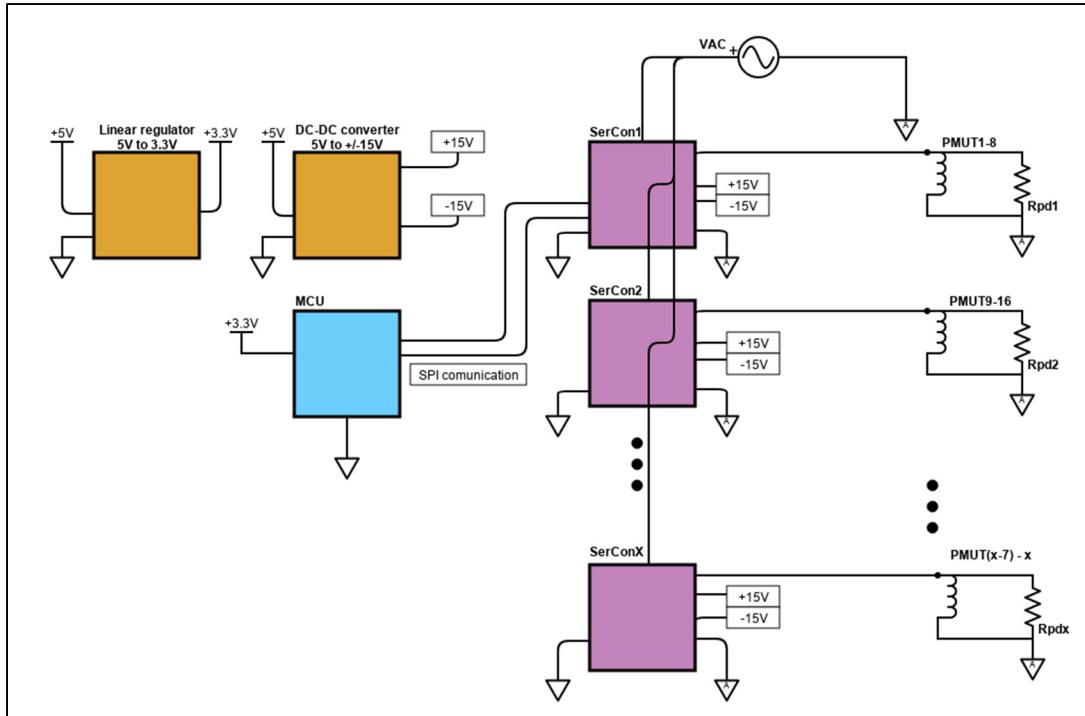


Figure 3.9 Schéma simplifié du circuit de contrôle par interrupteur AC à contrôle sérialisé

Il est important de mentionner que les optocoupleurs sélectionnés sont de faible capacitance, ce qui en fait l'un des optocoupleurs les plus rapides sur le marché. Une autre approche a été utilisée pour concevoir un circuit qui opérerait un plus grand nombre de PMUT, soit une matrice 8x8 en prévision d'une amélioration des dispositifs. Ce circuit est illustré dans la Figure 3.9. Les puces de registres à décalages et de matrices d'optocoupleurs ont été remplacées par une puce MAX335CWG de la compagnie Maxim Integrated, puce qui a pour fonction de contrôler par protocole SPI des interrupteurs de courant alternatif. Le revers de la médaille de cette conception est qu'elle nécessite un convertisseur de courant direct pour fournir l'alimentation nécessaire au circuit d'interrupteurs afin d'alimenter les tensions de rail des transistors interne de ces derniers. C'est pourquoi il a été nécessaire d'ajouter un convertisseur de tension DC-DC RB-0515D de la compagnie Relcom, qui permet d'obtenir des tensions de +15 et -15V pour alimenter le MAX335CWG. Les deux choix de conceptions utilisent le même microcontrôleur, le STM32F446RET6 de la compagnie ST, sélectionné pour son accessibilité et la rapidité du développement avec des outils tels que le Cube et STM32Ide ainsi que la plaquette de développement NUCLEO_F446RE. Il est à noter que les PMUT ainsi

que leur résistance de type pull down étaient soudés sur une plaquette séparée de la plaquette de circuit de contrôle afin de faciliter l'installation de PMUT dans un montage expérimental. Les schémas des circuits décrits dans cette sous-section, réalisés avec le logiciel Altium Designer, sont disponibles en annexe de cette thèse.

3.3.2 Approche logicielle

Le développement logiciel du contrôleur de PMUT a été séparé en deux parties. La première partie consistait à développer le logiciel embarqué en langage C sur la plateforme STM32IDE et la deuxième consistait à développer l'interface de contrôle d'utilisation en langage Matlab dans l'environnement du même nom. La relation entre ces deux logiciels est illustrée par un schéma dans la Figure 3.10. Cette sous-section effectuera une brève description de ces deux logiciels.

Le logiciel embarqué du système a été développé en premier lieu afin puisqu'il était critique à la fonctionnalité du projet. Le programme consiste en une machine à état qui reçoit les commandes envoyées par l'ordinateur qui lui est connecté par protocole USB CDC et la place dans une mémoire tampon en attendant que l'interpréteur la lise. Le système est donc dans une boucle où il va constamment interroger la mémoire, puis dans l'éventualité d'une réception de commande, l'interpréteur prend une décision sur la commande à effectuer puis lance la routine correspondante. Les commandes programmées sont :

- L'interrogation du masque actif
- La mise à jour du masque actif
- L'interrogation de la séquence en mémoire dans le microcontrôleur
- La mise à jour de la séquence en mémoire dans le microcontrôleur
- Le lancement de la séquence d'affichage
- L'arrêt de la séquence d'affichage.

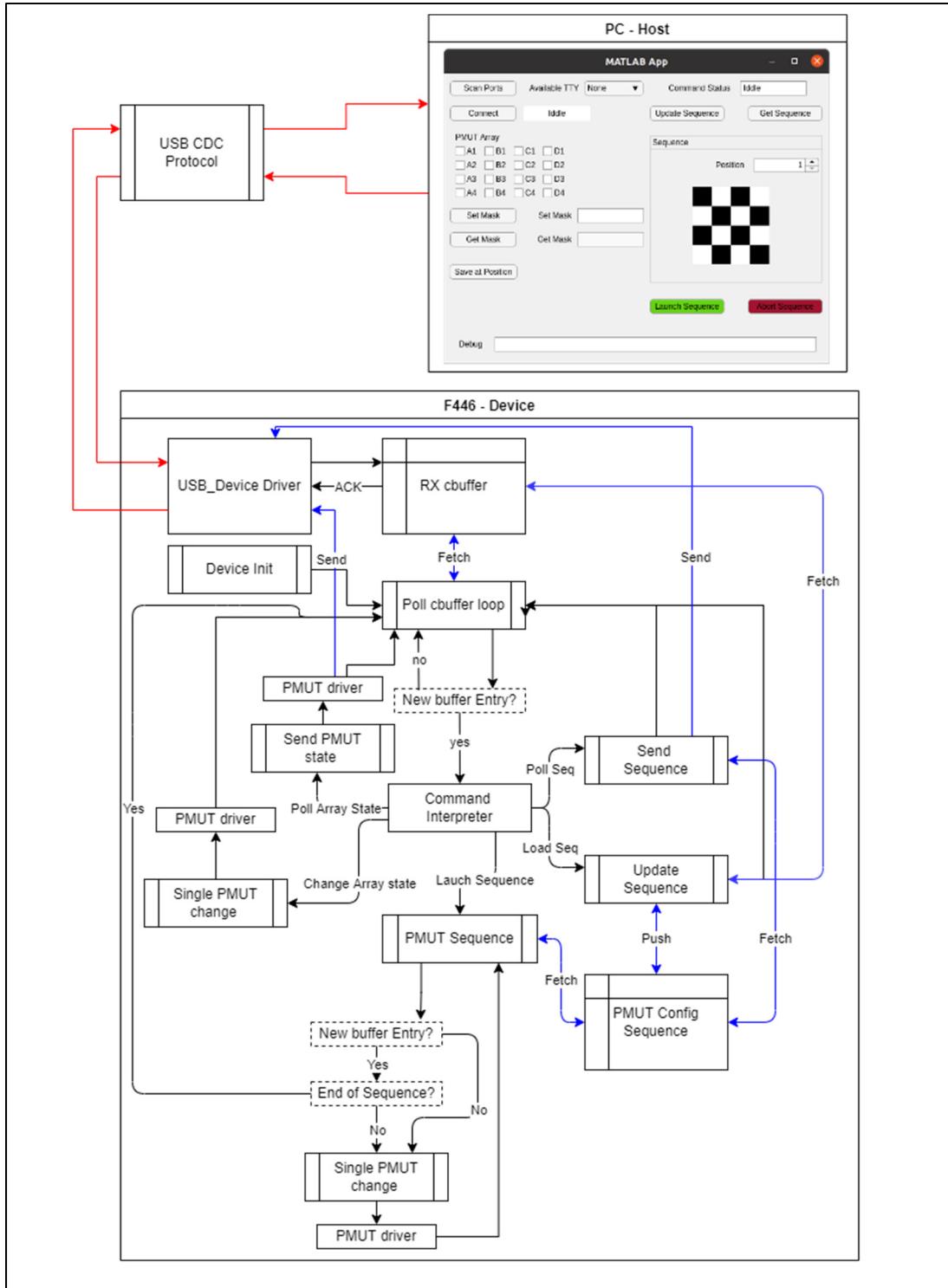


Figure 3.10 Diagramme de fonctionnement de l'algorithme de contrôle du circuit embarqué contrôlant la matrice de PMUT et de sa relation avec l'interface utilisateur

Les commandes de masques actifs offrent la possibilité de changer immédiatement le masque actif sur la matrice de PMUT, tandis que les commandes de séquences ont pour but de permettre à un utilisateur de lancer une séquence d'affichage sur la matrice de PMUT. Le but étant de permettre le contrôle dans un contexte d'acquisition rapide. Le code correspondant à la machine à état ainsi qu'au pilote de PMUT se trouve également dans l'annexe de cette thèse.

L'interface utilisateur, quant à elle, consiste en une simple application visuelle développée dans l'environnement Matlab. Elle permet à l'utilisateur de transmettre les commandes listées précédemment en traduisant les interactions avec l'interface en commandes qui seront interprétées par le microcontrôleur. L'interface permet de facilement déterminer quel masque activer sur la matrice en cochant les cases correspondantes dans les cases à cocher de l'interface. Elle permet en outre de sauvegarder une séquence de masque en image et de les afficher afin de pouvoir observer la séquence à afficher avant de l'envoyer au système embarqué. Son code se trouve également en annexe de cette thèse.

3.3.3 Méthode de caractérisation du contrôleur

La caractérisation du contrôleur a été effectuée pour la première version du circuit (fonctionnant avec optocoupleurs) du contrôleur seulement étant donné que la deuxième version n'a pas été fabriquée ni assemblée dans le temps consacré à cette recherche. Cette caractérisation s'est d'abord effectuée d'un point de vue logiciel. D'une part, un champ identifié par « Debug » dans l'interface de l'application Matlab permettait de recevoir une confirmation de la commande reçue en provenance du circuit de contrôle, ce qui a permis de valider la communication entre l'ordinateur et le circuit. Par la suite, en utilisant l'environnement de développement STM32IDE en mode déverminage, il a été possible de valider l'interprétation des commandes par le code du microcontrôleur. Cette même fonction a permis de valider l'exécution des fonctions du circuit de contrôle d'un point de vue logiciel. La validation de l'interaction entre le programme embarqué et le matériel a été effectuée en deux étapes. La première étape consistait à valider l'adressage des différents PMUT à partir de

boîtes à cocher de l'interface utilisateur sur l'ordinateur. La Figure 3.11 démontre un schéma simplifié du branchement pour ce test.

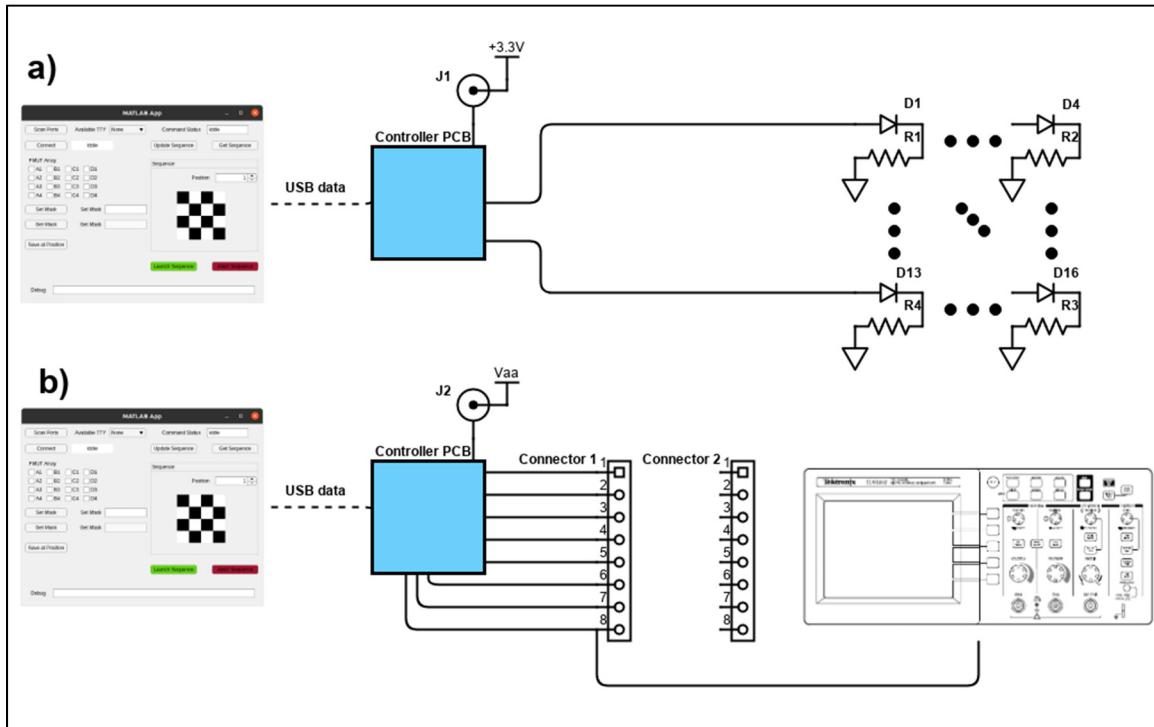


Figure 3.11 Schéma de configuration de test :
a) D'adressage par matrice de LED et b) De fonctionnalité AC par oscilloscope

Une matrice de LED a été utilisée afin de pouvoir avoir une confirmation visuelle des activations du contrôleur. Puisque les matrices de LED standard sont typiquement branchées de manière à être utilisées par contrôle par PWM, la matrice a été conçue en branchant 16 LED individuellement à chaque sortie du circuit de contrôle un signal DC de 3.3V a été branché à la place du signal AC servant à activer les PMUT. Par la suite, la deuxième caractérisation consistait à valider la capacité des optocoupleurs du circuit à transmettre et isoler un courant alternatif. Cette vérification a été effectuée à l'aide d'un oscilloscope. La vérification consistait d'abord à activer une sortie de PMUT à la fois et de valider le signal AC présent sur la borne ainsi que sur les bornes voisines pour vérifier la présence de diaphonie, puis d'effectuer les mêmes vérifications lors d'activation de masque sur la matrice. Puisque les résistances de type

Pull down étaient situées sur le circuit externe où la matrice de PMUT était soudée, la validation s'est également effectuée en branchant les sorties à leur PMUT respectif.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

4.1 Résultats de communication par paquets THz

4.1.1 Contexte

Comme il l'a été mentionné précédemment dans ce document, les fréquences THz, particulièrement entre 95GHz et 3THz, ont beaucoup de potentiel pour le futur des télécommunications (Akyildiz et al., 2014). Elles sont considérées comme étant la plage d'onde qui sera utilisée dans le développement de la technologie 6G, qui sera successeur au 5G (Rappaport et al., 2019). L'un des principaux obstacles à surmonter pour permettre l'utilisation de ces ondes pour la télécommunication reste cependant la modulation d'impulsion, qui doit être effectuée dans des délais inférieurs à la picoseconde, ce qui n'est pas possible avec l'électronique dite conventionnelle comme la technologie CMOS. Pour contrer cette limitation, la modulation optique a été utilisée dans de nombreuses expériences (Ahn et al., 2004; Weiner, 2000, 2011) pour générer des trains d'impulsions contrôlés. L'expérience décrite précédemment en 3.2.3 s'est réalisée dans le contexte de la thèse de doctorat de Joël Édouard Nkeck. Elle consiste en le développement d'une méthode de modulation optique permettant d'obtenir une modulation dynamique en combinant deux éléments optiques, soit un miroir à échelon et dispositif numérique à micromiroirs. La principale contribution apportée par ce travail a été le développement de masques de modulation pour l'encodage d'information dans les impulsions optiques ainsi que le contrôle du DMD. Les sous-sections suivantes discutent des résultats de la génération obtenue en utilisant le miroir échelon avec ou sans le DMD, de l'encodage d'information en utilisant des motifs définis sur le DMD et des applications possibles de la technologie développée.

4.1.2 Génération de train d'impulsion

Pour confirmer l'hypothèse initiale, qui était la possibilité de générer un train d'impulsion à des fréquences et durées correspondantes aux dimensions du miroir à échelon, l'acquisition de

l'impulsion THz a d'abord été réalisée sans l'utilisation du DMD. La Figure 4.1 illustre les différentes impulsions obtenues selon l'orientation du miroir en a) et b).

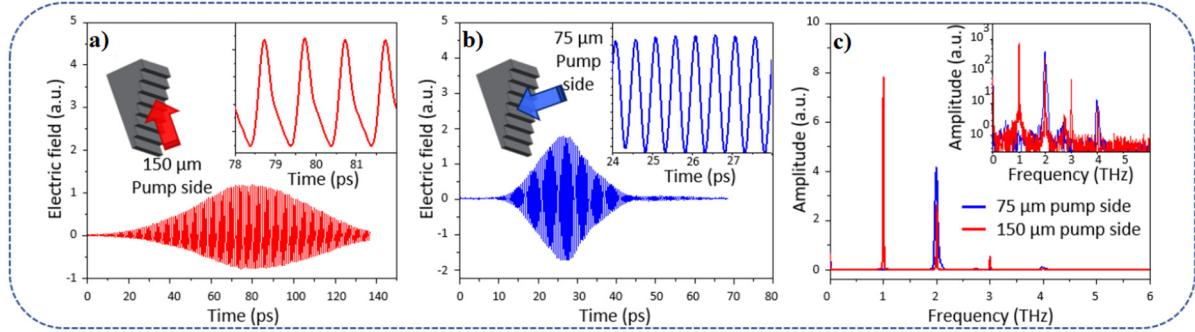


Figure 4.1 Génération de train d'impulsion à l'aide d'un miroir à échelon :
 a) Train d'impulsion THz obtenu en éclairant les marches de $150 \mu\text{m}$ de l'échelon, l'encadré montre une vue magnifiée des impulsions générées; b) Train d'impulsion THz obtenu en éclairant les marches de $75 \mu\text{m}$ de l'échelon, l'encadré montre une vue magnifiée des impulsions générées; c) FFT des impulsions de $150 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$ en rouge et bleu respectivement, l'encadré montre le graphe avec une échelle logarithmique dans l'axe y
 tiré de Edouard et al., (2022, p.4)

On peut observer dans la Figure 4.1 a) un train d'impulsion qui variait entre 128 et 133 impulsions à une fréquence de 1THz, tandis qu'on observe un train d'impulsion d'entre 60 à 67 impulsions à une fréquence de 2THz dans la Figure 4.1 b), ce qui correspond aux attentes envers le système. Dans les encadrés internes des Figure 4.1 a) et b), on peut voir un plan rapproché des deux ondes. On constate que l'onde de 2THz est presque parfaitement sinusoïdale de près, mais que dans les deux cas le train d'impulsion préserve un aspect gaussien dans l'ensemble. La Figure 4.1 permet d'observer le domaine fréquentiel des deux acquisitions. Le plan rapproché permet d'observer le spectre fréquentiel dans une échelle logarithmique. On constate d'abord dans le spectre que le contenu fréquentiel est de bande mince, principalement contenu dans la première harmonique des deux différentes configurations. Le facteur de qualité estimé est de 86 et 51 pour les fréquences de 1 et 2THz respectivement. Ces résultats valident donc la possibilité de générer des trains d'impulsions en utilisant un miroir échelon de manière passive. Il est intéressant de mentionner qu'en changeant le diamètre du faisceau pompe, on

change le nombre d'impulsions générées dans le domaine temporel, mais on n'affecte pas la fréquence de l'onde porteuse du train d'impulsion.

Une fois la génération passive validée, l'étape suivante consistait à valider la possibilité de dynamiquement moduler ces impulsions en ajoutant le DMD au montage de manière à contrôler les trains d'impulsion avec une méthode active. La Figure 4.2 illustre différents exemples de modulation en variant la durée des impulsions modulées par le DMD.

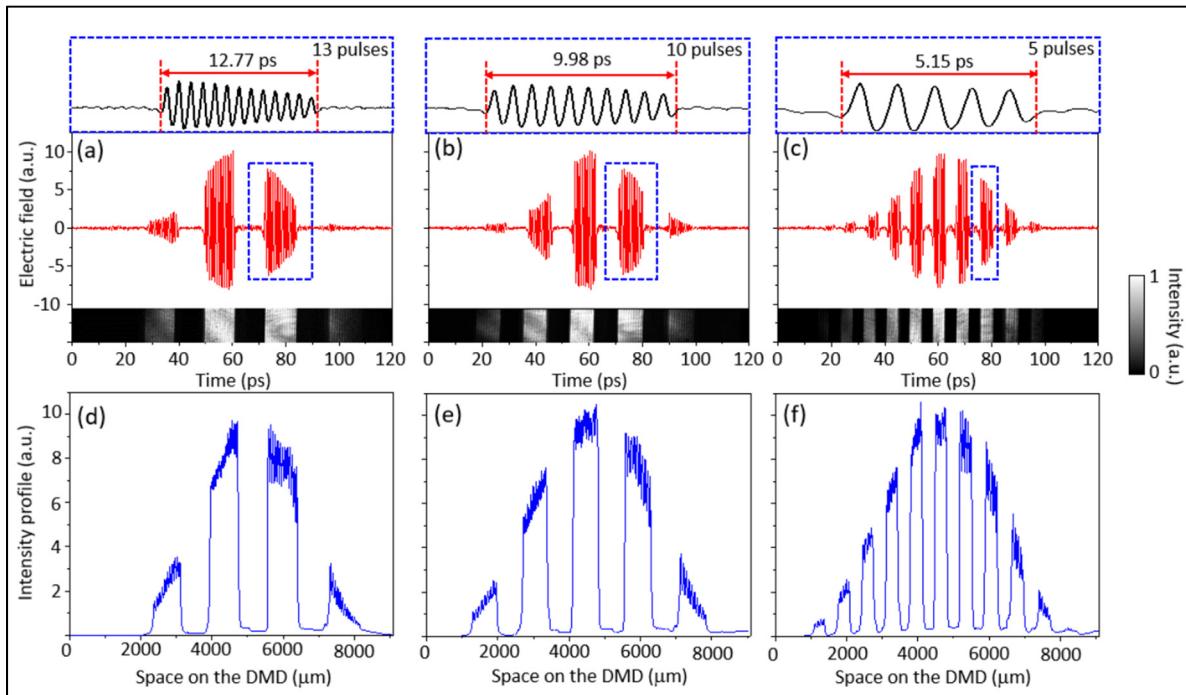


Figure 4.2 Modulation du train d'impulsion à l'aide des motifs programmés sur le DMD : Génération de paquets de (a) 13 impulsions, (b) 10 impulsions et (c) 5 impulsions avec image de l'intensité lumineuse après le passage dans le DMD; Profile d'intensité correspondant à des paquets de (d) 13 impulsions, (e) 10 impulsions et (f) 5 impulsions

Tiré de Edouard et al., (2022, p.5)

Ces modulations ont été rendues possibles en alignant l'orientation des lignes de micromiroirs du DMD avec les lignes du miroir échelon. On peut voir dans les Figure 4.2 a), b) et c) des masques de modulation appliqués sur le DMD permettant d'alterner entre des sections du DMD qui réfléchissent le laser vers l'émetteur THz et des sections qui réfléchissent le laser dans un bloqueur de faisceau. On voit qu'en variant les largeurs des raies de ces motifs sur le

DMD, on peut obtenir une variation correspondante dans le train d'impulsion THz émis. Les Figure 4.2 d), e) et f) permettent d'observer les profils d'intensité correspondante des groupes d'impulsions contenant respectivement 13, 10 et 5 impulsions par groupes.

4.1.3 Encodage d'information dans le train d'impulsion

Afin de démontrer une application possible de la méthode de modulation développée, un exemple d'encodage d'information a été effectué. En utilisant l'encodage de touche marche-arrêt (OOK), il est possible d'encoder un bit d'information par impulsion. Pour ce faire, il fallait déterminer le nombre précis de rangées de micromiroirs correspondant à l'épaisseur d'une marche du miroir échelon, soit 7 micromiroirs par marche d'échelon. L'information a donc été encodée en suivant le protocole de code standard américain pour l'échange d'informations (ASCII), dans lequel il est possible d'encoder une lettre par 8 bits d'information. Le message initialement encodé est : « ETS2021! », ce qui correspondait au code ASCII : « 0100 0101 0101 0100 0101 0011 0011 0010 0011 0000 0011 0010 0011 0001 0010 0001 ». On peut observer le résultat de cet encodage dans la Figure 4.3 b). On peut voir que la portion du signal correspondant au maximum de l'onde gaussienne du train d'impulsion, on peut facilement distinguer les « 1 » des « 0 » tandis que dans la section périphérique du signal, l'amplitude limitée rend la distinction difficile. En effectuant le même encodage, cette fois en encodant 1 bit par 3 impulsions, il a été possible d'encoder « ETS », ou « 0100 0101 0101 0100 0101 0011 » en ASCII. On peut constater, en observant la Figure 4.3 qu'il est nettement plus facile de distinguer le code avec ce groupement, au détriment de la vitesse de transmission. L'encodage à un bit par impulsion a le désavantage de diviser par 3 le taux de données transmises. On note cependant un ratio d'erreur plus élevé dans l'encodage 1 bit par impulsion. En effet, l'encodage à 1 bit par 3 impulsions possédait un taux d'erreur sur les bits (BER) d'environ 4%, tandis que l'encodage à 1 bit par impulsion possédait un BER d'environ 9%.

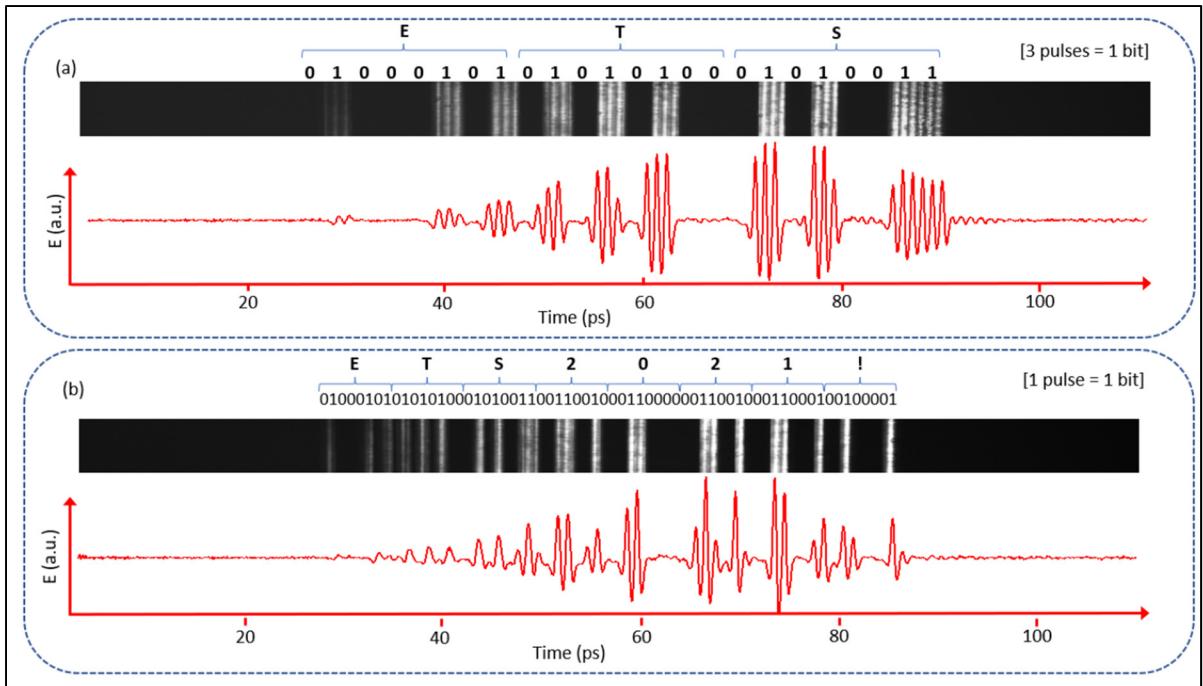


Figure 4.3 Encodage d'information dans un train d'impulsion THz : (a) Encodage de ETS en encodant 1 bit par 3 impulsions; (b) Encodage de ETS2021! en encodant 1 bit par impulsion

Tiré de Edouard et al., (2022, p.6)

4.1.4 Applications futures

À la lumière des résultats obtenus précédemment, on peut envisager la possibilité d'utiliser un système comparable en télécommunication pour obtenir des vitesses 6G. Cependant, la vitesse maximale de modulation du DMD utilisée est de 6kHz, ce qui limite le nombre d'impulsions maximal à 768kb/s dans le cas où 128 impulsions sont modulées par configuration de DMD. En utilisation la modulation par variation d'amplitude (ASK) plutôt que l'OOK, il serait possible d'augmenter le nombre de bits par impulsion. Dans un scénario où on encode 4 niveaux d'amplitude différents, on obtient une vitesse maximale de 3Mb/s, ce qui demeure loin du 1Tb/s qui a été précédemment mentionné. Afin d'utiliser le plein potentiel de cette méthode, il faudrait donc remplacer le DMD par un dispositif capable de moduler à des vitesses supérieures, or, un tel dispositif existe dans la littérature, pouvant atteindre une modulation allant jusqu'à 80MHz (He et al., 2019). En bref, cette démonstration permet d'entrevoir des

expériences futures intéressantes qui pourraient être intégrées un jour à des systèmes de télécommunications 6G.

4.2 Résultats de spectroscopie THz dérivée

4.2.1 Contexte

Les résultats de cette sous-section se veulent une continuation de (Amirkhan et al., 2020a), dans lequel il a été démontré qu'une matrice de PMUT pouvait être utilisée comme différentiateur pour ondes THz, mais dont les résultats étaient restreints par le faible déplacement de 100nm de la matrice de PMUT utilisée (Amirkhan et al., 2020a). Ces résultats sont également une continuation de l'expérience faite en (Amirkhan et al., n.d.), dans laquelle un dispositif PMUT simple avait démontré la capacité de générer un signal dérivé suffisant pour effectuer une spectroscopie, mais dans laquelle la spectroscopie n'avait pas été démontrée. Dans ce contexte, le premier objectif de l'expérience était de prouver qu'une spectroscopie dérivée peut permettre de récupérer la même information qu'une spectroscopie THz conventionnelle. Le deuxième objectif, dans le cas où le premier objectif était atteint, était d'utiliser cette méthode pour récupérer l'information en 2D, permettant ainsi d'effectuer de l'imagerie à un pixel à l'aide d'une matrice de PMUT et de modulation suivant les masques d'Hadamard. Ce chapitre présente les résultats de spectroscopies dérivées comparées à des spectroscopies dites conventionnelles premièrement pour un PMUT simple, et par la suite pour une matrice de PMUT. L'échantillon analysé était une plaque de silicium de 3mm d'épaisseur.

4.2.2 Spectroscopie dérivée par PMUT simple

Les acquisitions THz TDS effectuées en laboratoire pour obtenir le signal de référence sont illustrées dans la Figure 4.4 a), tandis que la Figure 4.4 b) illustre le signal TDS lorsque l'échantillon est inséré dans le montage expérimental.

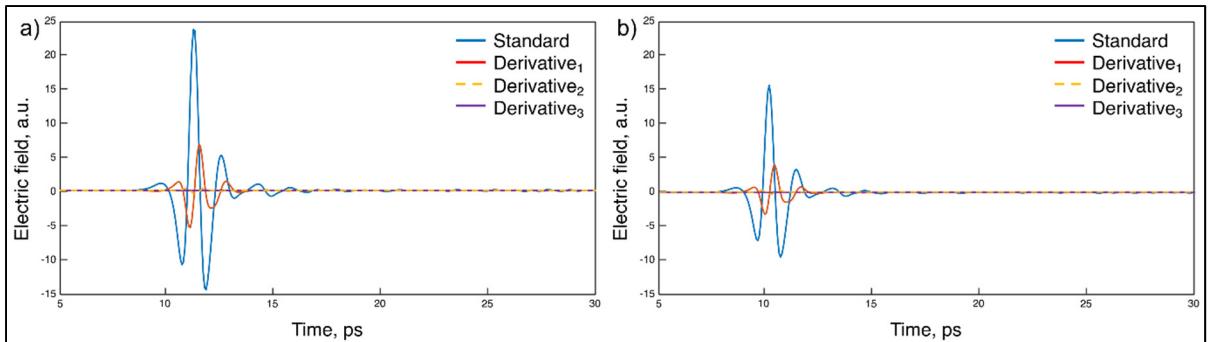


Figure 4.4 Acquisition THz sur PMUT simple :
Acquisition du signal de référence d'ordre 0 (sans oscillation des PMUT) et des 3 premières harmoniques pour a) la référence et b) l'échantillon (Si)

On remarque que la forme de l'onde est similaire entre le signal de référence et celui de l'échantillon, ce qui s'explique par la faible absorption du silicium aux fréquences THz. L'impulsion de l'échantillon est décalée temporellement d'environ 25ps par rapport à la référence, ce qui est attribué à l'indice de réfraction du silicium. On remarque également que l'amplitude du signal temporel diminue significativement lorsqu'on incrémente l'ordre de l'harmonique d'acquisition, et ce autant pour la référence que pour l'échantillon. Afin de permettre une comparaison plus explicite des signaux dans le domaine temporel, les signaux dérivés ont été intégrés un nombre de fois correspondant à leur ordre de dérivée. Les résultats de ce processus sont illustrés dans la Figure 4.5. Il est à noter que les signaux intégrés ont été normalisés par rapport à leur valeur maximale par la suite afin de permettre d'analyser la capacité à récupérer le signal d'ordre 0 à partir des différentes harmoniques. La Figure 4.5 a) et b) permet de comparer les signaux intégrés au signal d'ordre 0 pour le signal de référence et le signal d'échantillon respectivement.

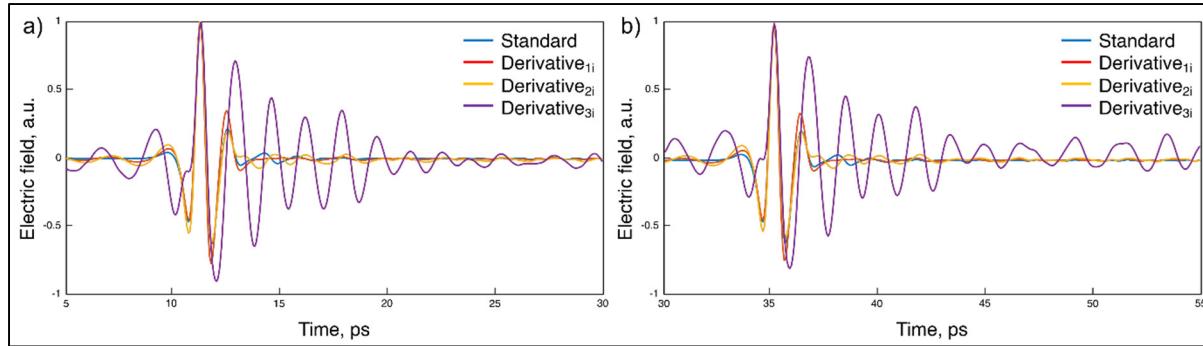


Figure 4.5 Signaux THz acquis par PMUT simple intégrés et normalisés:
Signal d'ordre 0 comparé aux 3 premières harmoniques intégrées pour a) la référence et b)
l'échantillon (Si)

On constate que, dans les deux signaux, la reconstruction permet de reconstituer un signal d'ordre 0 dont les oscillations THz varient légèrement en amplitude, mais dont les positions temporelles restent les mêmes. La fidélité de l'amplitude de reconstruction décroît lorsqu'on augmente l'ordre de dérivé. À partir des deuxièmes et troisièmes ordres, on peut voir des oscillations de plus en plus marquées situées temporellement avant et après les principaux pics des signaux THz détectés.

L'étape suivante de la spectroscopie était d'effectuer les comparaisons des différents signaux dans le domaine fréquentiel. Pour ce faire, les signaux temporels originaux ainsi que les signaux obtenus par intégrations des signaux dérivés ont été normalisés par rapport à leurs valeurs maximales respectives. Par la suite, la transformée de Fourier des sept différents signaux a été effectuée afin de récupérer les signaux dans le domaine fréquentiel. La Figure 4.6 illustre les différents signaux dans le domaine fréquentiel pour l'acquisition de référence en a) et l'acquisition de l'échantillon en b). On peut y observer les signaux entre 0.5 et 2.5 THz. En observant le signal de référence à l'ordre 0, on constate que le signal THz émis possède une amplitude inférieure au niveau de bruit aux fréquences supérieures à 2.1 THz. Cette limite est due au type d'émetteur utilisé lors de l'acquisition, qui était un cristal non linéaire LiNbO₃ (Guiramand et al., 2022).

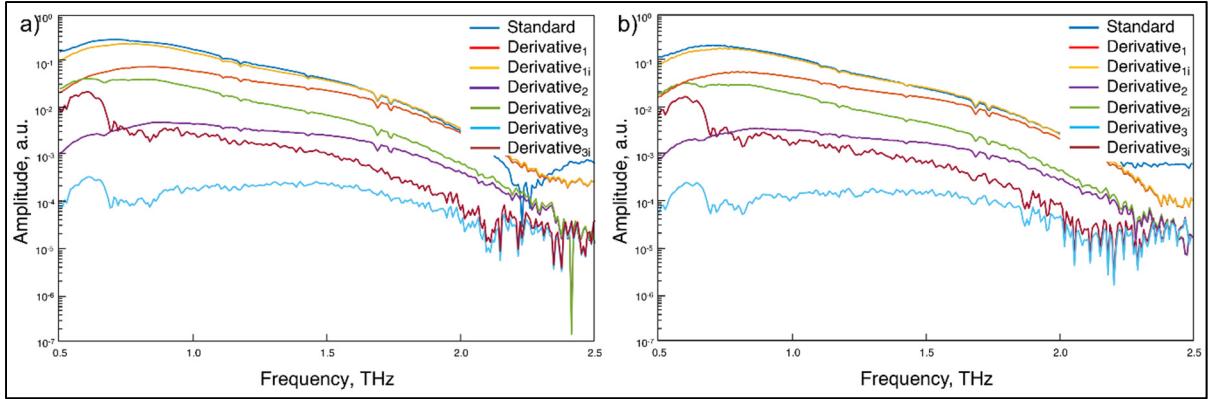


Figure 4.6 Signaux THz normalisés représentés dans le domaine fréquentiel : Signaux dans le domaine fréquentiel de l’acquisition d’ordre 0 (Standard) et des acquisitions dérivées intégrées et non intégrées pour a) la référence et b) l’échantillon

Il est intéressant de constater que les signaux des harmoniques possèdent à la fois une amplitude et un niveau de bruit moins élevé que le signal d’ordre 0. Il est également intéressant de constater que l’intégration des signaux permet d’augmenter l’amplitude normalisée dans les fréquences où le signal THz est supérieur au niveau de bruit, mais ne semble pas augmenter l’amplitude du niveau de bruit. Dans le cas de l’échantillon, on observe un niveau de bruit d’environ 1×10^{-3} et un signal maximal d’environ 2.5×10^{-1} , donnant un SNR d’environ 250, tandis que le niveau de bruit du signal de première harmonique semble se trouver un peu plus bas, soit 3×10^{-4} , avec un signal maximal d’environ 2×10^{-1} , ce qui correspond à un SNR d’environ 666. Bien que ces résultats laissent suggérer qu’une spectroscopie dérivée pourrait obtenir de meilleurs résultats, on constate grâce à la Figure 4.7 que les 2 premières harmoniques donnent des résultats similaires aux résultats de l’ordre 0 en ce qui concerne l’indice de réfraction. Les signaux de la 3^e harmonique, intégrés ou non, ont une variation par rapport aux autres signaux en raison du niveau de bruit supérieur dû à la faible amplitude du signal de 3^e harmonique. L’indice obtenu est cependant conforme à la littérature (Dai et al., 2004), soit environ 3.417 pour les fréquences entre 0.5 et 2 THz. On constate cependant qu’à partir d’environ 2.1 THz, les valeurs commencent à descendre, alors que selon la littérature elles devraient demeurer relativement stables, voir augmenter légèrement. Le phénomène semble moins apparent pour les 1^{ere} et 2^e harmoniques, mais demeure néanmoins présent. La Figure 4.8 illustre les valeurs de coefficient d’absorption obtenues avec l’équation

$$n(\omega) = 1 + \frac{\varphi(\omega)c}{\omega_d}, \quad (2.10)$$

à partir des signaux dans le domaine fréquentiel de chaque harmonique. Il est important de prendre en considération que la chute abrupte du signal aux fréquences est normale et prévisible étant donné que l'expérience a été réalisée avec un émetteur LiNb03 qui ne produisait pas de signal au-delà ce cette fréquence.

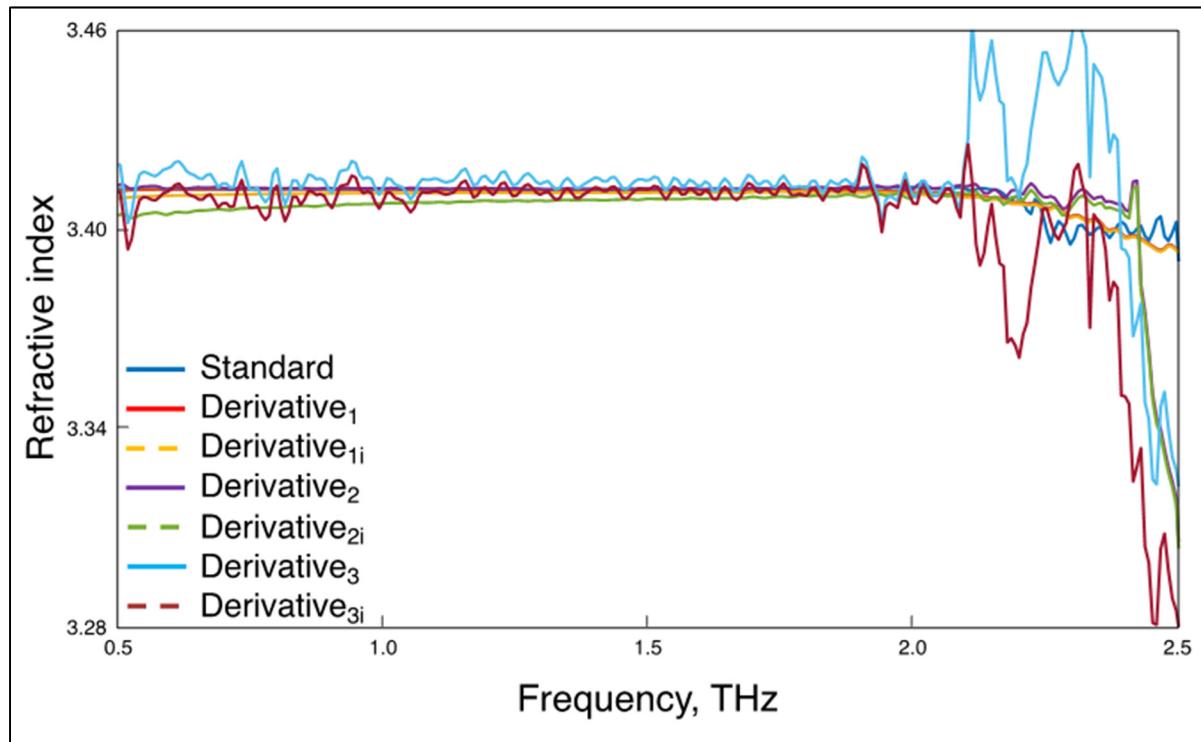


Figure 4.7 Indice de réfraction du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenus par spectroscopie THz dérivée à différentes harmoniques, intégrées ou non, comparé à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle

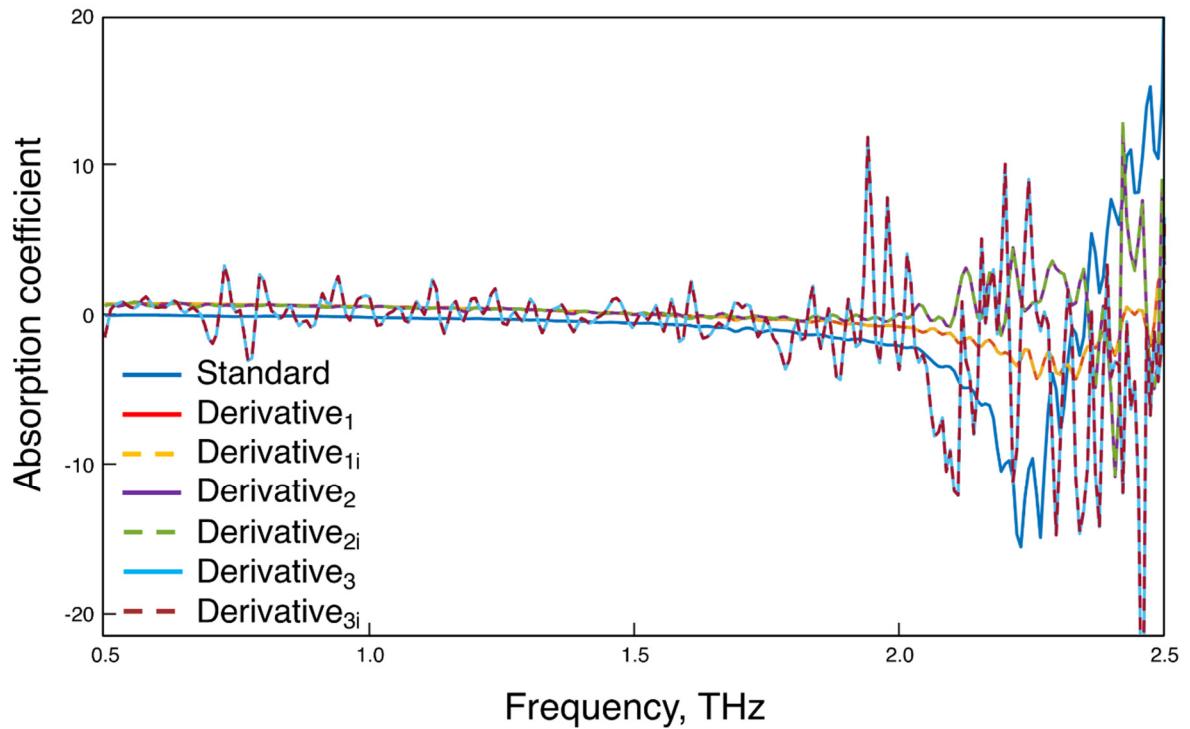


Figure 4.8 Coefficient d'absorption du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenu par spectroscopie THz dérivée à différentes harmoniques, intégrées ou non, comparé à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle

On constate encore une fois que les différents signaux deviennent de plus en plus bruités dans les fréquences supérieures à 2.1 THz. Les valeurs d'absorption calculées demeurent très près de 0 pour le signal d'ordre 0 $\frac{W}{cm}$, ce qui est conforme à la littérature (Dai et al., 2004). On observe cependant des valeurs négatives, ce qui est impossible et qui est donc attribuable à des erreurs d'acquisitions. Les signaux dérivés, quant à eux, ne possèdent pas de valeur négative, mais sont supérieurs à la littérature, variant aux alentours de 1 $\frac{W}{cm}$ dans les fréquences où le signal THz est plus fort que le niveau de bruit.

4.2.3 Simulation sur matrice de PMUT

Une simulation d'une acquisition THz TDS par matrice de PMUT a été effectuée en amont de la fabrication du dispositif afin de valider la capacité potentielle d'effectuer une acquisition

dérivée. La simulation par « Finite Difference Time Domain » (FDTD) a été effectuée en utilisant le logiciel Lumerical, qui permet d'effectuer des analyses temporelles par éléments finis. La Figure 4.9 illustre les résultats de la simulation dans le domaine temporel et le domaine.

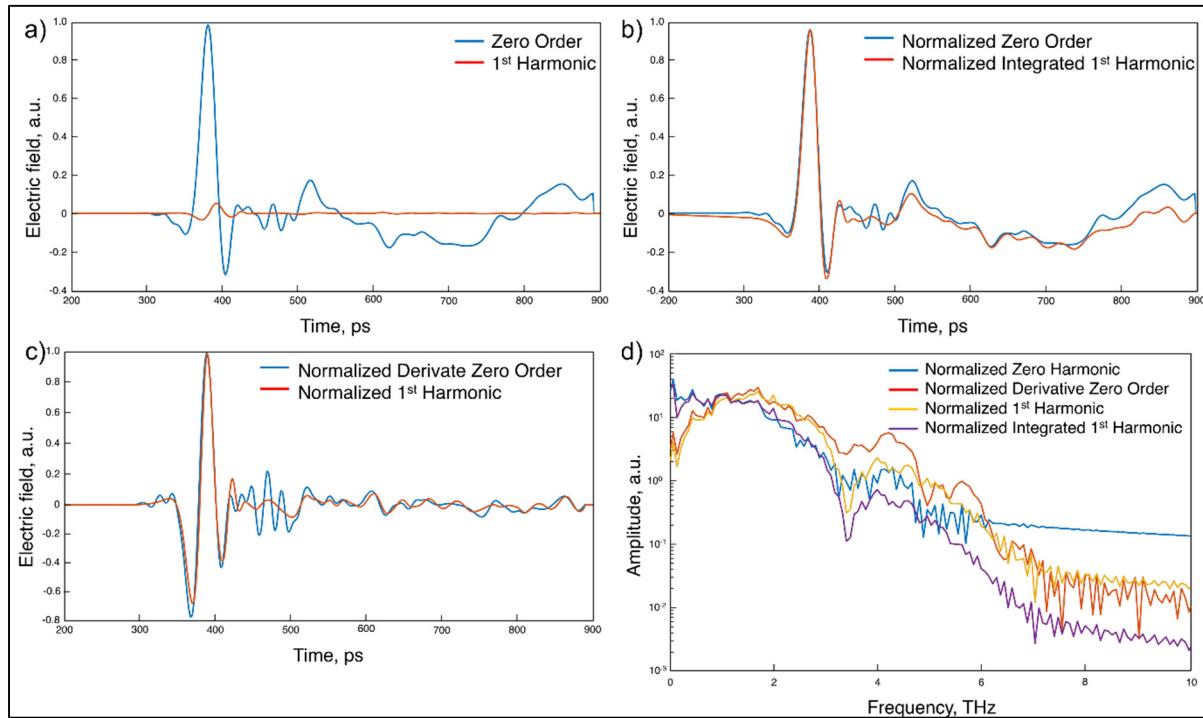


Figure 4.9 Résultat de simulation d'acquisition de signal THz TDS à l'aide de la matrice de PMUT développée :

- a) Acquisition temporelle du signal d'ordre 0 et de la première harmonique; b) Comparaison entre le signal d'ordre 0 normalisé et le signal de la première harmonique intégré puis normalisé; c) Comparaison entre le signal d'ordre 0 dérivé puis normalisé et du signal de première harmonique normalisé ; d) Comparaison de tous les signaux normalisées dans le domaine fréquentiel après transformation par FFT

fréquentiel. Les Figure 4.9 a), b) et c) permettent de comparer respectivement le signal d'ordre 0 original à celui de la 1^{ère} harmonique originale, le signal d'ordre 0 dérivé puis normalisé au signal de 1^{ère} harmonique normalisée et le signal d'ordre 0 normalisé au signal de première harmonique intégrée puis normalisée. La Figure 4.9 d) permet de comparer tous les spectres normalisés entre eux. On remarque que, dans le domaine fréquentiel, l'intégration de la 1^{ère} harmonique semble résulter en un signal plus fort dans les basses fréquences, tandis que la dérivation mathématique de l'ordre 0 résulte en un spectre semblable au spectre de la

l'acquisition de la 1^{ère} harmonique, c'est-à-dire un spectre ou la fréquence d'amplitude maximale est légèrement augmentée. On constate que la fréquence d'amplitude maximale est d'environ 0.5THz pour les spectres d'ordre 0 et intégré, tandis que la fréquence d'amplitude maximale est plus près de 2THz pour les spectres dérivés mathématiquement ou par acquisition. On constate également un niveau de bruit inférieur à partir d'environ 5THz en comparant le spectre de la 1^{ère} harmonique intégré et celui de l'acquisition d'ordre 0. La simulation confirme donc la possibilité d'utiliser la matrice pour effectuer une acquisition TDS dérivée. La spectroscopie d'échantillon n'a pas été effectuée par simulation.

4.2.4 Spectroscopie dérivée par matrice de PMUT

Afin de comparer la performance de la matrice de PMUT avec le dispositif simple, une spectroscopie a été effectuée en utilisant la matrice comme un seul PMUT, c'est-à-dire en activant tous les PMUT de la matrice en même temps pour réfléchir un faisceau THz d'un diamètre d'environ 4mm. Lors des premiers essais pour récupérer un signal THz en réflexion sur la matrice, il a été remarqué que l'amplitude maximale du champ détecté augmentait lorsque certains PMUT étaient éteints. Ce phénomène contre-intuitif est dû à des défauts de fabrication de la matrice qui seront expliqués dans la section 4.3.3 de ce mémoire. Il est également important de noter que, le déplacement moyen des PMUT de la matrice étant inférieur au déplacement du PMUT simple, le signal dérivé obtenu par la matrice de PMUT était trop faible pour permettre l'acquisition de la 2^e et la 3^e harmonique. La Figure 4.10 illustre la différence d'amplitude entre l'acquisition d'ordre 0 et l'acquisition dérivée de la première harmonique pour la référence en a) et pour l'échantillon en b). L'échantillon utilisé dans cette spectroscopie était la même plaque de silicium que celle qui avait été utilisée en 4.2 dans la spectroscopie par PMUT simple.

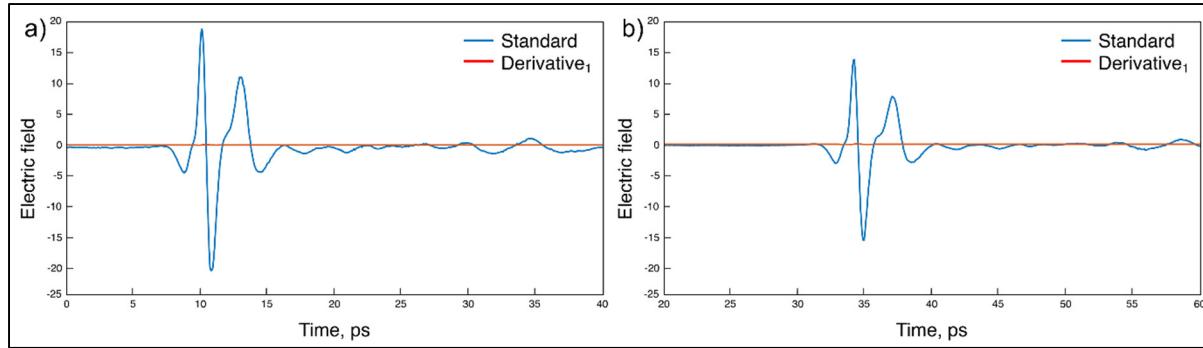


Figure 4.10 Acquisition THz sur matrice de PMUT : Acquisition du signal de référence d'ordre 0 (sans oscillation des PMUT) et de la 1^{ère} harmonique pour a) la référence et b) l'échantillon (Si)

On constate que l'amplitude du signal de la 1^{ère} harmonique est comparable à celle de l'amplitude de la 3^e harmonique de la spectroscopie effectuée par PMUT simple précédemment. En intégrant le signal dérivé et en normalisant les deux signaux, on constate une forte oscillation présente avant et après l'impulsion principale de l'onde THz détectée. La Figure 4.11 illustre le phénomène pour la référence en a) et l'échantillon en b).

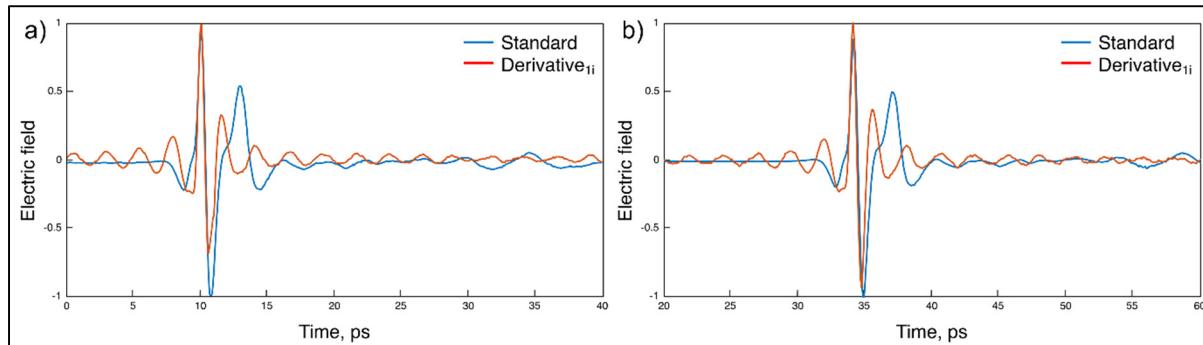


Figure 4.11 Signaux THz acquis par matrice de PMUT intégrés et normalisé: Signal d'ordre 0 à la 1^{ère} harmonique intégrée pour a) la référence et b) l'échantillon (Si)

On constate que le signal intégré, en majeur partie, est plus bruité que le signal d'ordre 0. On peut donc supposer un faible SNR, ce qui est confirmé par le signal obtenu par transformé de Fourier des signaux d'ordre 0, de 1^{ère} harmonique et de 1^{ère} harmonique intégrée, illustrés dans la Figure 4.12.

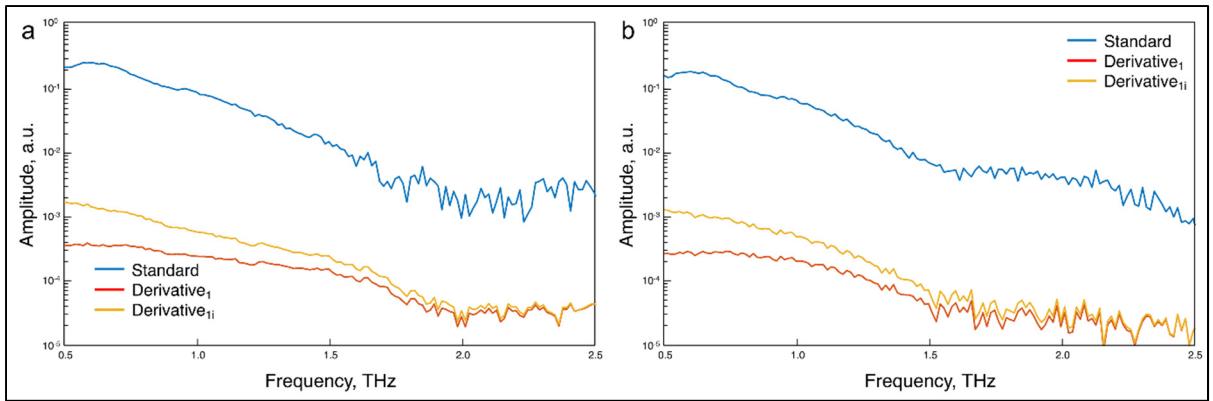


Figure 4.12 Signaux THz normalisés représentés dans le domaine fréquentiel : Signaux dans le domaine fréquentiel de l’acquisition d’ordre 0 (Standard) et l’acquisition dérivée de la 1^{ère} harmonique intégrée (jaune) et non intégrée (rouge) pour a) la référence et b) l’échantillon

On observe le domaine fréquentiel de l’acquisition de la référence dans la Figure 4.12 a) et celui de l’échantillon dans la Figure 4.12 b). Une large différence peut être constatée entre l’amplitude maximale du signal d’ordre 0 et celle de la 1^{ère} harmonique. Dans le cas de la référence, en considérant une amplitude normalisée maximale d’environ 2.5×10^{-1} à environ 0.6THz et un niveau de bruit d’environ $4 * 10^{-3}$, on obtient un niveau de SNR d’environ 62.5, tandis que pour le spectre de la 1^{ère} harmonique intégrée, avec une amplitude normalisée maximale d’environ 1.8×10^{-3} et un niveau de bruit d’environ 4×10^{-5} , on obtient un niveau de SNR d’environ 45. Il est important de considérer que, pour les deux types d’acquisitions, le signal semble inférieur au niveau de bruit pour les fréquences supérieures à 2THz. La Figure 4.13 confirme la limite fréquentielle du système par les valeurs de l’indice de réfraction obtenues pour le silicium.

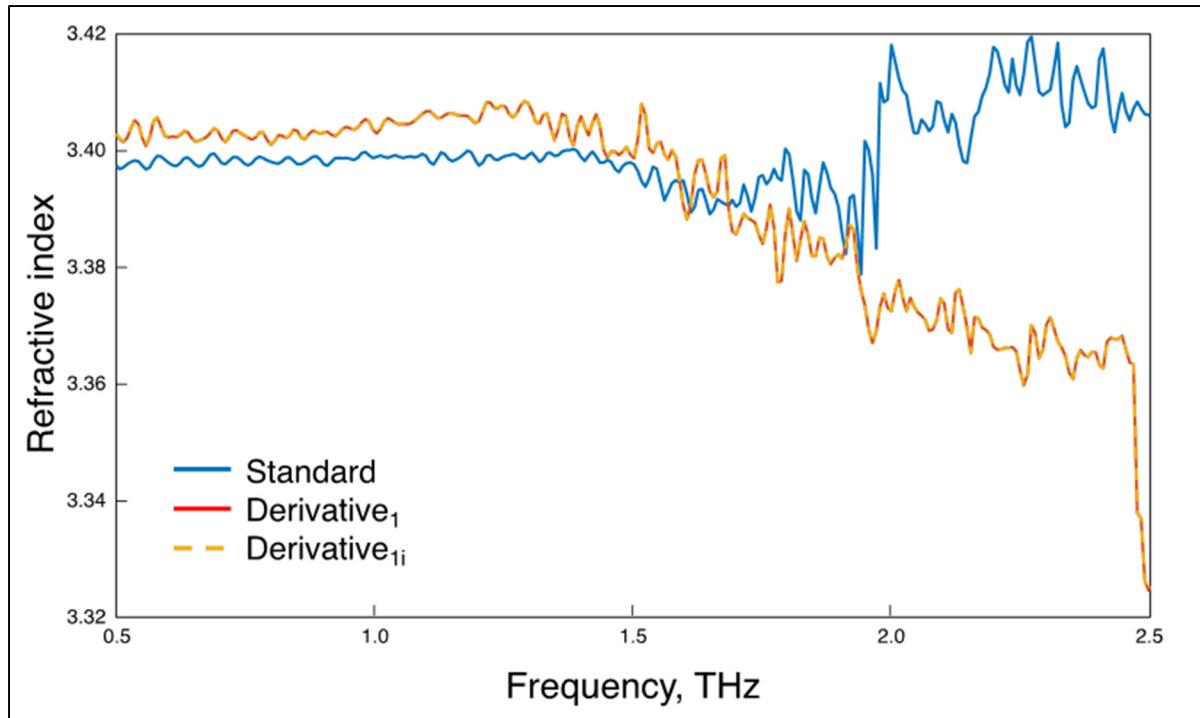


Figure 4.13 Indice de réfraction du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenu par spectroscopie THz dérivée de la 1^{ère} harmonique, intégrée ou non, comparé à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle

On constate que les valeurs sont stables jusqu'à environ 1.5THz à des valeurs d'environ 3.4 pour l'acquisition d'ordre 0 et 3.405 pour la 1^{ère} harmonique. Ces valeurs sont légèrement différentes de la littérature, mais diffèrent de moins de 1% de la valeur théorique jusqu'à 1.5THz, après quoi le signal de la 1^{ère} harmonique chute, tandis que la valeur de l'ordre 0 augmente progressivement. Il est à noter que, selon la littérature (Dai et al., 2004), l'indice de réfraction du silicium devrait se maintenir à environ 3.4175 jusqu'à 4.5THz. La Figure 4.14 permet de constater la même portée fréquentielle dans le calcul du coefficient d'absorption. On constate que la valeur du coefficient d'absorption est près de 0 pour les valeurs acquises par l'ordre 0, tandis que les valeurs de la première harmonique sont légèrement négatives. Les valeurs augmentent légèrement à partir de 1THz, ce qui est conforme à la théorie, cependant l'augmentation est énormément supérieure à la théorie, qui veut que la valeur du coefficient d'absorption du silicium soit d'environ 0.01, ce qui ne correspond pas aux valeurs mesurées par l'ordre 0, soit 3.37 ni par la 1^{ère} harmonique, soit 5.24.

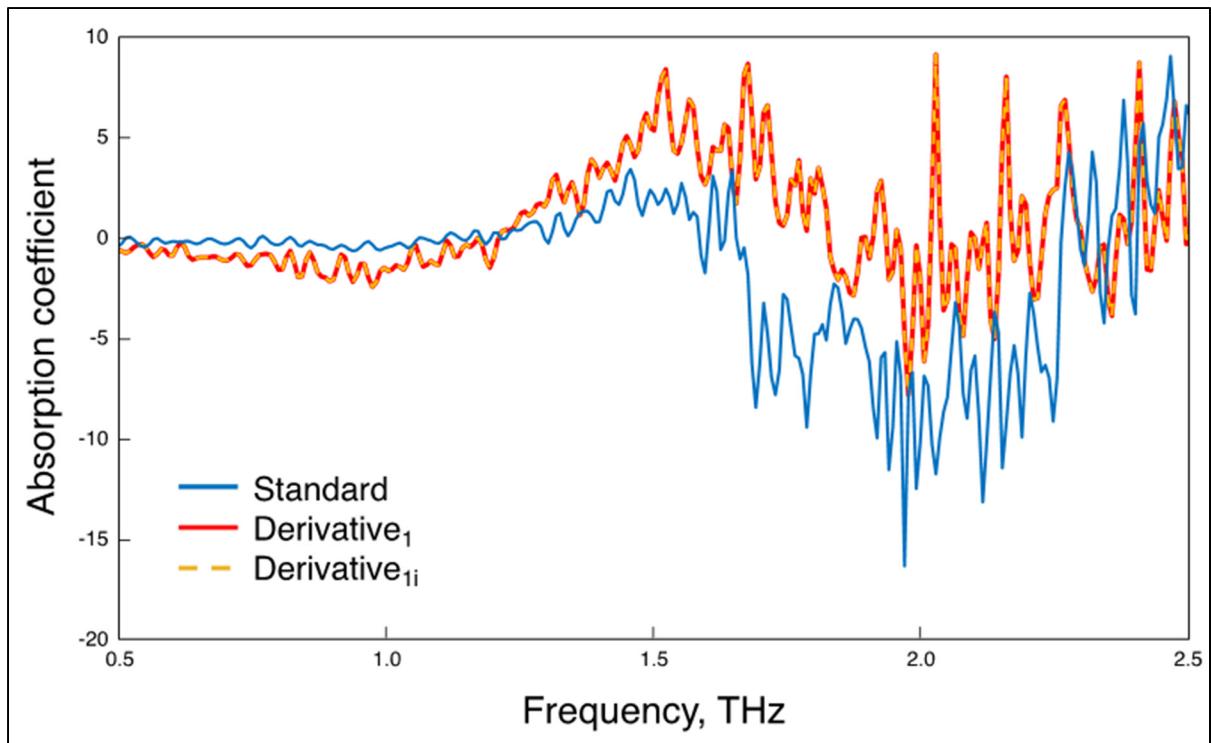


Figure 4.14 Coefficient d'absorption du Silicium entre 0.5 et 2.5 THz obtenu par spectroscopie THz dérivée de la 1^{ère} harmonique, intégrée ou non, comparé à l'indice de réfraction d'ordre 0 obtenu par spectroscopie THz conventionnelle

Le niveau de bruit élevé de l'acquisition semble donc limiter la capacité à extraire le coefficient d'absorption en utilisant la matrice de PMUT.

4.3 Résultats de caractérisation de matrice PMUT pour acquisition compressée

Avant de procéder à des tests d'acquisition compressée avec la matrice de PMUT, il était essentiel de caractériser la matrice afin de valider sa fonctionnalité et ses paramètres d'opération optimaux. Cette section présente les résultats de la caractérisation des paramètres d'oscillation des PMUT individuels, de la vitesse d'opération maximale de la matrice et de la capacité de la matrice à appliquer les masques désirés.

4.3.1 Caractérisation de déplacement et de fréquence d'oscillation

Le premier paramètre à valider était la fréquence maximale d'opération de la matrice. Après avoir effectué les mesures par vibromètre selon le schéma présenté en 3.1.2, il a été possible

d'identifier la fréquence et la vitesse de déplacement en m/s des 16 PMUT de la matrice. La Figure 4.15 permet de visualiser les différences entre les PMUT.

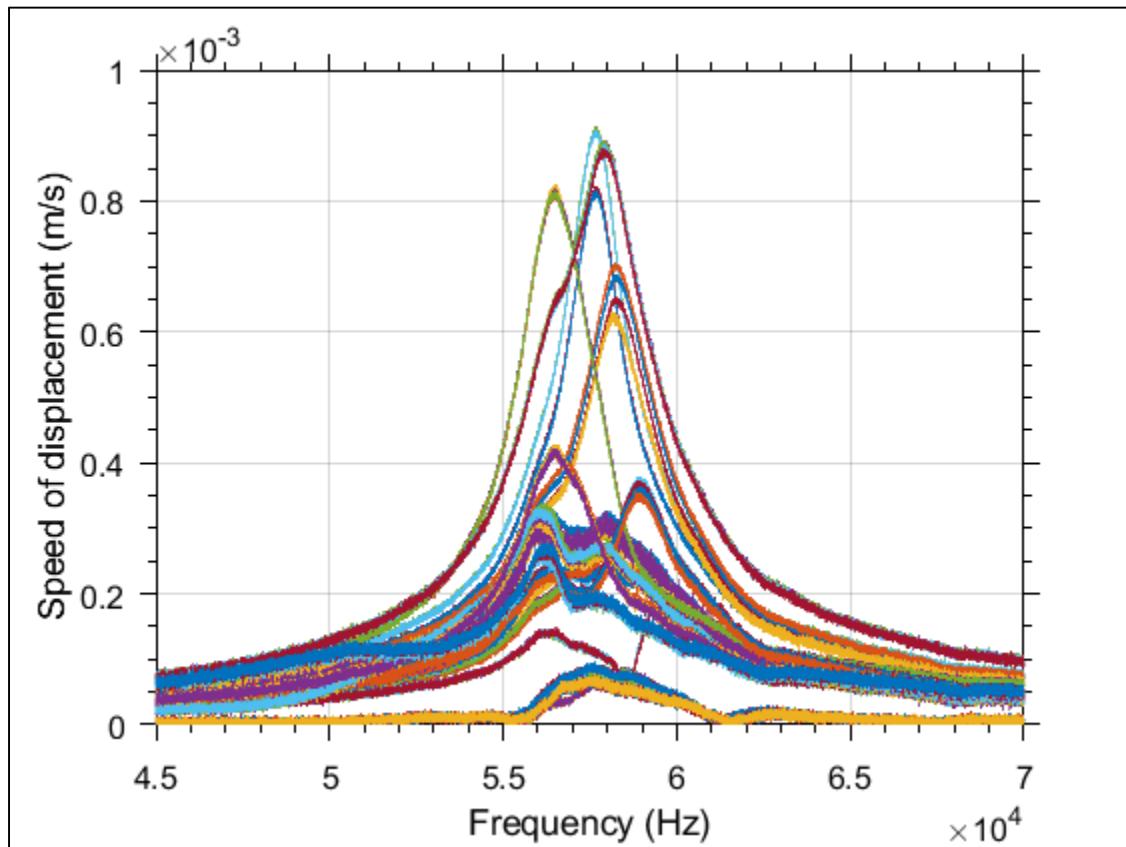


Figure 4.15 Vitesse de déplacement des 16 PMUT de la matrice développée en fonction de la fréquence d'excitation appliquée à leurs bornes

En fonction de la fréquence d'excitation appliquée à leurs bornes. On constate un certain écart dans la vitesse de déplacement de certains PMUT. On constate une déviation d'environ 667.67Hz, ce qui correspond à une déviation de 1.17%, ce qui, comparé aux valeurs de la littérature(Luo et al., 2021), correspond à des performances optimales du procédé de fabrication de la matrice. En notant la position des vitesses maximales en fonction de la fréquence, on obtient une fréquence moyenne de 57.45kHz, et une fréquence médiane de 57.66kHz. On peut identifier 57.5kHz comme fréquence à laquelle la majorité des PMUT est activée et le déplacement moyen est au maximum. À partir des valeurs de vitesses mesurées,

il est possible d'obtenir l'amplitude du déplacement en intégrant la vitesse dans le temps. Ces déplacements ont été calculés et sont visibles dans la Figure 4.16 a) et b).

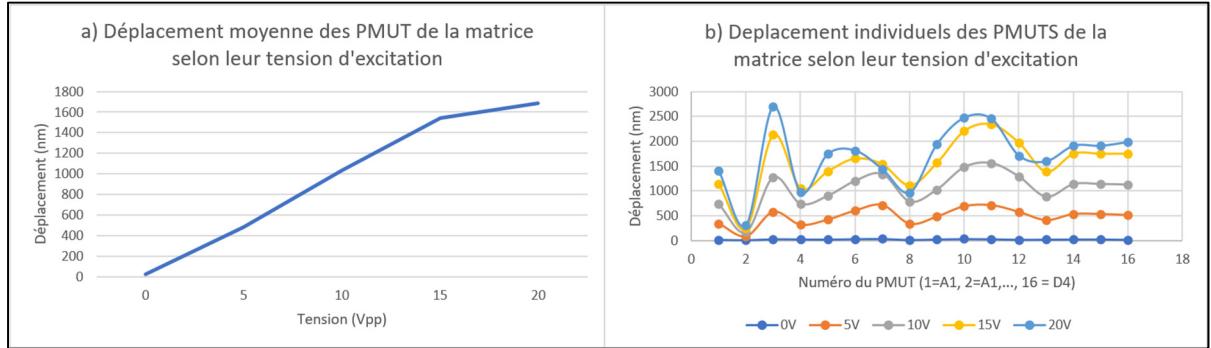


Figure 4.16 Caractérisation des déplacements des PMUT de la matrice développée : a) Déplacement moyen des PMUT en fonction de la tension appliquée; b) déplacements individuels à différentes tensions pour les PMUT 1 à 16 (A1 à D4)

La figure a) permet de visualiser le déplacement moyen des PMUT à une fréquence d'excitation de 57.5 kHz à des tensions variant de 0 à 20 Vpp. Il est important de sélectionner une fréquence maximisant les déplacements car les acquisitions THz sont effectuées par amplificateur à verrouillage, qui ne peut être synchronisé avec plus d'une fréquence à la fois. On peut donc confirmer qu'on obtient un déplacement moyen maximal de 17500 nm à une tension de 20Vpp. La Figure 4.16 b) permet d'observer l'évolution individuelle de chaque PMUT de la matrice en fonction de la tension d'excitation. Il est intéressant de noter que, pour les PMUT #4,7,8 et 12, l'amplitude du déplacement réduit avec l'augmentation de la tension d'excitation. C'est pourquoi il a été nécessaire d'observer la moyenne telle que mentionnée précédemment. On constate également que le PMUT #2 a une amplitude de déplacement faible à toutes ces fréquences, ce qui laisse supposer qu'il est potentiellement court-circuité et donc non fonctionnel. Il est à noter que les tests d'amplitudes ont été effectués dans une configuration où tous les PMUT étaient activés en même temps. Plus de détails sur la fonctionnalité seront discutés dans la section 4.3.3.

4.3.2 Caractérisation de paramètres de vitesse de modulation

Une fois la fréquence d'utilisation caractérisée, la vitesse maximale de modulation des PMUT a également été caractérisée. Pour ce faire, la même configuration de test utilisant le vibromètre a été utilisée. Le principe consistait à envoyer un nombre d'impulsions défini à un PMUT et à mesurer le temps nécessaire pour passer d'arrêt à oscillation maximale. La Figure 4.17 illustre l'amplitude d'oscillation d'un PMUT de la matrice en fonction de du nombre de périodes de l'impulsion d'excitation utilisée. Ces mesures ont été effectuées en plaçant le PMUT #3 sous vibromètre et en appliquant à ses bornes la fréquence d'opération déterminée, soit 57.5 kHz pendant un délai correspondant à un nombre d'impulsions définies.

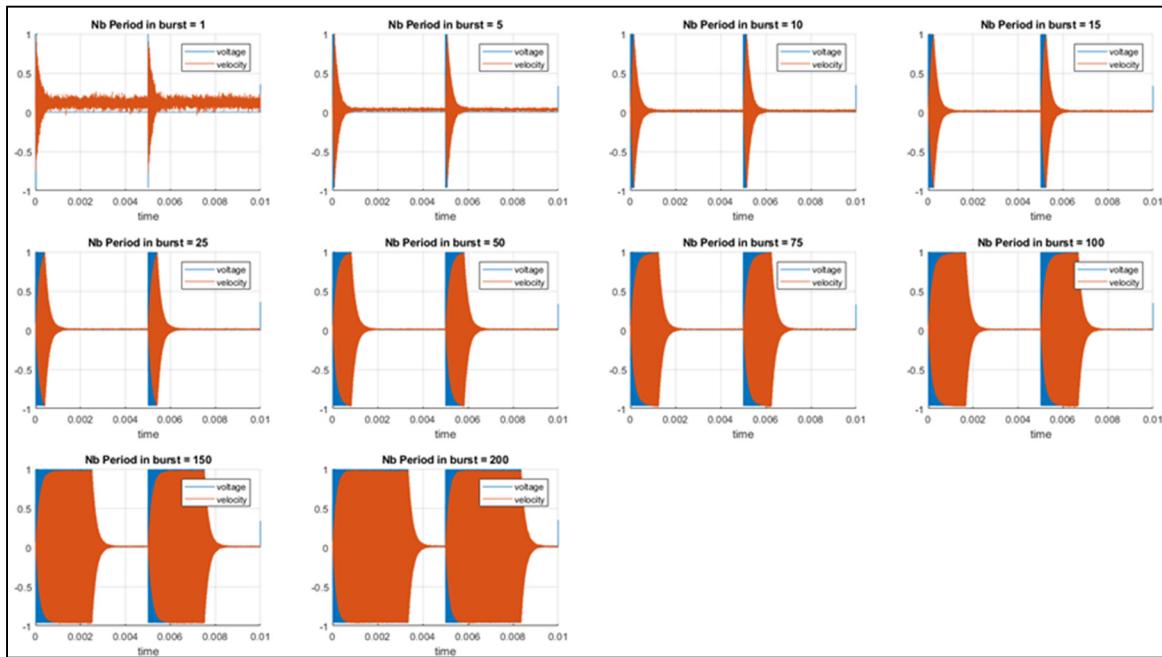


Figure 4.17 Caractérisation du nombre d'impulsions nécessaires pour placer un PMUT dans un mode d'oscillation stable

Afin de valider si un nombre d'impulsions était suffisant pour placer un PMUT dans un état d'activation complète, il fallait vérifier si l'amplitude d'oscillation du PMUT parvenait à se stabiliser avant l'arrêt des impulsions à ses bornes. On constate, en comparant les différents graphes de la Figure 4.17, que l'amplitude maximale n'est atteinte qu'après une activation d'au moins 75 impulsions. La période minimale d'activation serait donc d'environ $1315\mu\text{s}$, ce

qui correspond à une fréquence de 760 Hz, pour laquelle les deux modèles de circuits de contrôle conçus, décrits dans la section 3.3 de ce texte, sont amplement capables de fonctionner. Cette vérification ne tient cependant en compte que le temps d'activation, ce qui ne valide pas la capacité du PMUT à retourner au repos entre les périodes d'activations et qui ne valide donc pas la fréquence de modulation maximale du système.

Afin de valider la fréquence de modulation maximale, un test d'opération continu a été effectué. Le test consistait à appliquer un signal de 57.5kHz aux bornes d'un PMUT et de le moduler à l'aide du circuit de contrôle par optocoupleur. La Figure 4.18 permet d'illustrer les résultats obtenus à diverses fréquences d'opération.

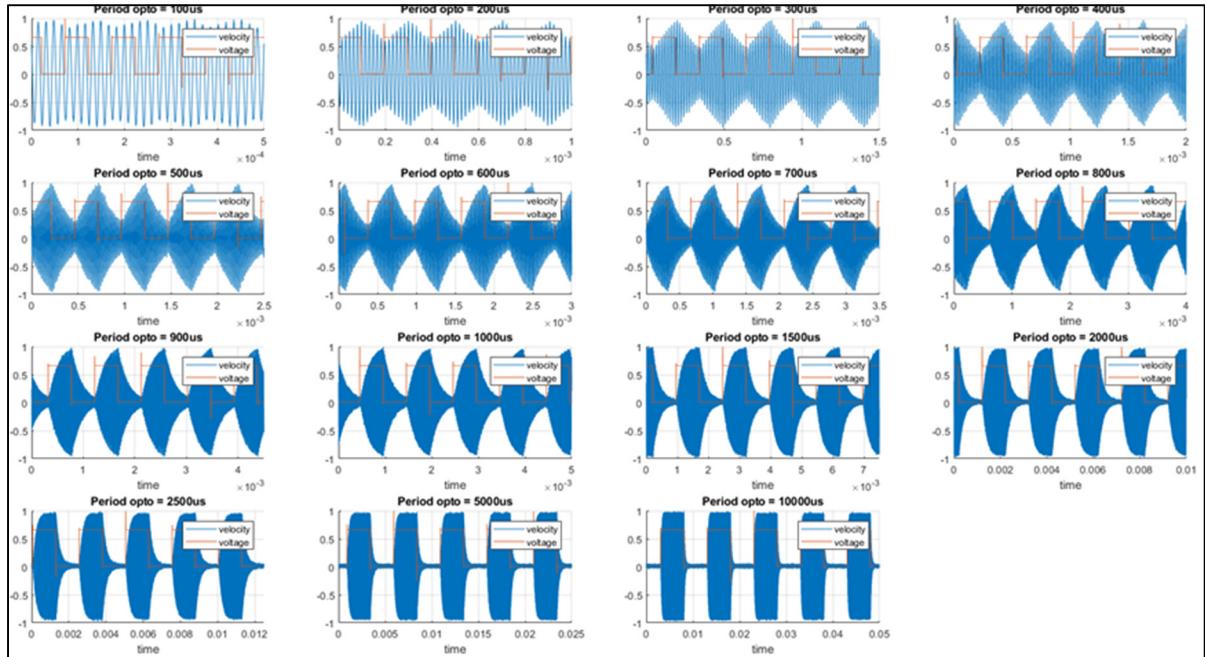


Figure 4.18 Caractérisation du taux maximal de masques par seconde applicable sur la matrice effectuée par variation de la période des optocoupleurs de contrôle

Dans cette figure, on peut observer les amplitudes normalisées mesurées par vibromètre lorsque le PMUT #3 est activé en fonction de la période de modulation appliquée sur l'optocoupleur de contrôle. On peut observer qu'il est difficile de différencier les cycles d'activation des cycles où la tension appliquée est nulle pour les périodes inférieures à 1500us. On voit que l'amplitude des PMUT commence à correspondre à la modulation de

l'optocoupleur à partir d'une période 2000us, qui correspond à une fréquence maximale d'utilisation de 500Hz.

4.3.3 Caractérisation avec contrôleur

Le but de la dernière étape de caractérisation consistait à vérifier s'il était possible d'appliquer des masques d'activation sur la matrice en sélectionnant les PMUT activés. Pour ce faire, des mesures de vibromètre ont été effectuées sur chaque PMUT lorsqu'un motif d'activation était appliqué. La Figure 4.19 permet de visualiser différents masques appliqués et les amplitudes mesurées sur les PMUT correspondants. Dans la Figure 4.19 b), une image de la matrice de PMUT illustre à quel identifiant (entre A1 et C4) correspond chaque PMUT. Pour une matrice idéale, un PMUT identifié comme étant activé (on), aurait une amplitude mesurée de quelques μm tandis qu'un PMUT identifié comme éteint (off) aurait une amplitude mesurée nulle.

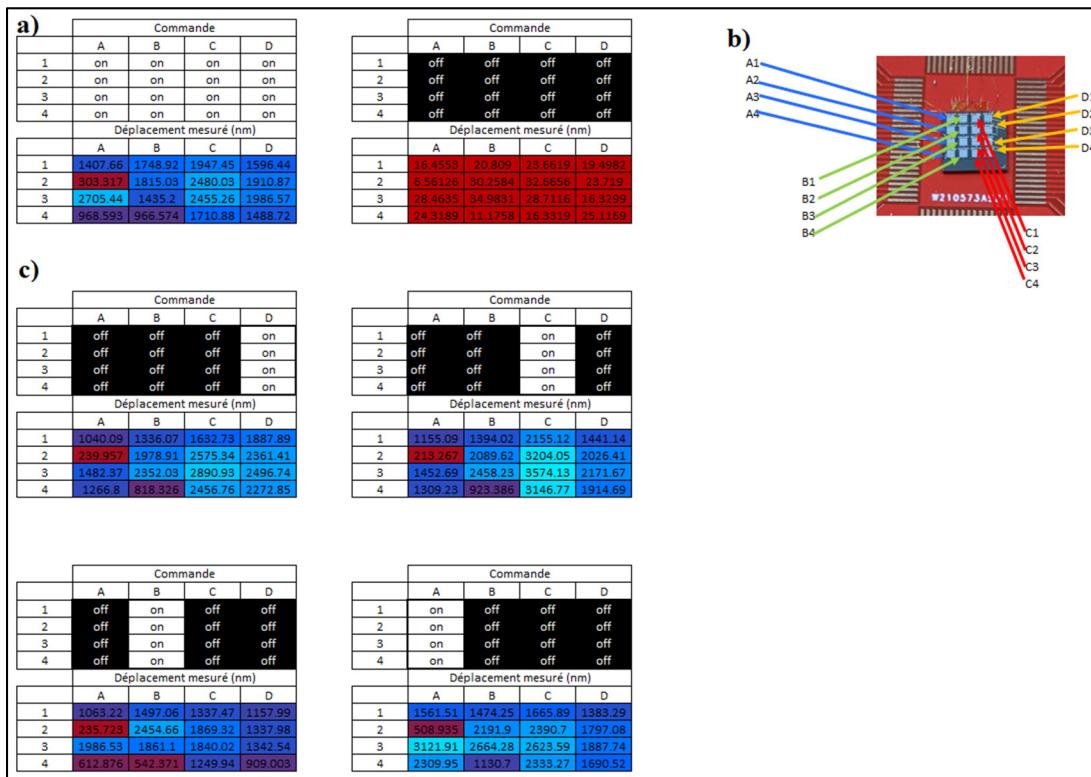


Figure 4.19 Caractérisation des déplacements des différents PMUT de la matrice lors de l'application de masques spécifiques :

Tableaux du haut : masque appliqué au niveau du contrôleur, tableau du bas : déplacement des PMUT mesurés par vibromètre pour a) Les masques complètement allumé et complètement éteint et c) Les masques d'activation une colonne à la fois; b) Photo de la matrice et identification de ses PMUT

On peut remarquer dans la Figure 4.19 a) que, pour les configurations complètement activée et complètement éteinte, il est possible d'observer une différence d'au moins 296nm pour chaque PMUT. On note cependant une grande variation dans les amplitudes atteintes par que PMUT. On peut voir dans la Figure 4.19 c) les mesures correspondantes à des motifs d'activation dans lesquels une colonne de PMUT était activée à la fois. On constate alors de multiples problèmes dans les activations détectées. Premièrement, de nombreux PMUT possèdent une activation plus grande lorsqu'une seule colonne est activée. Dans certains cas, comme pour le PMUT A4, l'amplitude obtenue est plus grande lorsque la colonne D est activée et la colonne A éteinte que lorsque tous les PMUT sont activés. Ce phénomène s'explique en deux parties. La première partie s'explique par le fait que certains PMUT étaient court-circuités, ce qui causait une chute de la tension d'activation de la matrice et résultait en une diminution globale de l'intensité de chaque PMUT. Cette première partie n'explique cependant pas pourquoi certains PMUT auraient une amplitude d'oscillation non nulle lorsqu'ils n'étaient pas activés. Ce qui explique ce comportement est la deuxième partie du problème : la diaphonie. La diaphonie présente entre les PMUT faisait en sorte que l'activation d'un dispositif entraînait l'activation de son voisin. Après vérifications, il a été conclu que la diaphonie était un phénomène physique, causé par la propagation des vibrations d'un PMUT à ces voisins. Cette diaphonie fait également en sorte que certains PMUT bougent plus lorsque leurs voisins sont activés que lorsqu'ils sont eux-mêmes activés, comme c'est le cas du PMUT B4 ou pour le PMUT B3. La faible oscillation de ceux-ci lorsqu'ils sont activés s'explique soit par court-circuit, défaut de conception ou fréquence d'excitation différente de 58kHz. En bref, en analysant uniquement les déplacements des PMUT sans connaître le masque d'excitation, il est difficile de discerner les PMUT actifs des PMUT éteints.

4.3.4 Conclusion sur la fonctionnalité de la matrice

En conclusion, la caractérisation de la matrice de PMUT permet d'observer une fonctionnalité limitée du dispositif. La fabrication a permis d'obtenir des résultats qui sont comparables à l'état de l'art selon la littérature (Luo et al., 2021), mais ultimement la différence entre les fréquences de résonance des différents PMUT de la matrice et les courts-circuits font en sorte que l'amplitude d'excitation des différents PMUT varie grandement d'un PMUT à l'autre. Cependant, le plus grand problème provient de la diaphonie entre les PMUT, qui fait en sorte que certains PMUT oscillent plus lorsqu'ils sont éteints qu'allumés dans certaines conditions, ce qui rendrait l'acquisition à un pixel compressé difficile. Des suggestions pour corriger les problèmes et des pistes d'amélioration sont suggérées dans le chapitre final de ce mémoire.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Résumé

En conclusion, ce mémoire décrit le développement d'un nouveau dispositif de modulation spatiale de lumière reposant sur les principes de l'acquisition de signaux dérivés THz. Cette méthode de modulation possède des avantages suivants par rapport aux méthodes existantes :

1. Modulation complète sur toute la bande THz, contrairement à la modulation de faisceau THz par SLM
2. Possibilité de moduler à des valeurs intermédiaires entre 0 et 1 contrairement à la modulation optique par SLM
3. Conservation de tout le faisceau THz contrairement à la modulation THz par disques de métaux
4. Prix faible comparé aux alternatives : 100\$ CAD pour 15 matrices, 200\$ en fabrication du contrôleur

En plus de la réalisation et la caractérisation de ce système de modulation de lumière spatiale, une autre contribution de ce mémoire est la présentation d'une méthode de modulation par paquet ouvrant la porte à de nouvelles méthodes de communications par THz dans le futur. Enfin, la dernière contribution de ce mémoire est la présentation de la première spectroscopie dérivée THz à partir de dispositif PMUT, ouvrant également la porte à des applications spectroscopiques futures. Dans cette section, un retour sera effectué sur les résultats des expériences décrites précédemment et des améliorations aux divers systèmes seront suggérées.

Discussion et recommandations :

Système de communication par paquets THz

Le système de communication par paquet présenté dans ce mémoire ouvre une nouvelle porte à la transmission massive d'information aux fréquences THz sans le besoin de composante haute fréquence. Cependant, il reste encore des défis à relever. D'une part, lorsque l'encodage à 1 bit par impulsion est utilisé, on constate que, vers la fin du message, 1 bit réfléchi (de valeur 1) résulte en 2 impulsions THz plutôt que 1. Ce problème pourrait être réglé par amélioration de l'alignement du DMD avec le miroir échelon. Au cours de l'expérience, il a été observer qu'en tentant d'améliorer l'alignement de la fin du message, le début du message se désalignait.

Il est donc possible que la diffraction du faisceau laser entre le miroir échelon et le DMD soit en cause, ce qui pourrait être résolu par l'ajout d'une lentille pour rendre le faisceau collimaté. Malgré ce problème à résoudre, un fait remarquable de cette méthode est que la précision subpicoseconde de l'encodage de l'information ne dépend que de conditions d'optiques géométriques et non de composante électronique ultrarapide.

Un autre problème du système est lié à la forme gaussienne du train d'impulsions, ce qui rend les valeurs aux extrémités du message difficile à observer. Une amélioration serait d'utiliser le DMD pour façonner le train d'impulsion de manière à égaliser chaque impulsion en amplitude, ou bien simplement d'utiliser une lentille diffractive pour rendre le faisceau plat et ainsi éliminer l'aspect gaussien du train d'impulsion. En plus de résoudre les problèmes de faibles signaux, l'égalisation du train d'impulsion permettrait d'utiliser un encodage ASK, ce qui pourrait augmenter le taux de transfert d'information du système. Enfin, la détection du train d'impulsion est actuellement faite par un système THz TDS à l'aide d'une ligne à délais, ce qui rend la détection inefficace (voir inutile) dans un système de communication. L'utilisation d'une méthode d'acquisition en un seul coup(Shan et al., 2000) permettrait de transférer des données en temps réel, ce qui rendrait le système utilisable pour des applications de communications réelles.

Spectroscopie dérivée par PMUT

La spectroscopie dérivée du silicium a permis d'obtenir des résultats similaires à la spectroscopie dite conventionnelle. Si on ne peut pas cependant affirmer que cette spectroscopie présente des avantages, on peut néanmoins remarquer que, dans les résultats obtenus par PMUT simple, que le SNR est supérieur dans les fréquences de plus de 2THz pour la première harmonique du signal dérivé. Ce signal de meilleure qualité entraîne une moins grande déviation par rapport à la valeur d'indice attendue de 3.4175 du silicium. On constate également que le coefficient d'absorption est également plus stable à ces fréquences. Cependant, le coefficient d'absorption de la première harmonique semble avoir un décalage par rapport à la valeur qu'il devrait avoir. Ce décalage a été attribué au mouvement complexe du dispositif étant donné que les oscillations de la surface sont composées d'oscillation centrale

suivie du déplacement des ailettes du PMUT (Gratuze, 2022), ce qui pourrait avoir un impact négatif sur la détection du signal. Cette hypothèse implique que l'utilisation d'un PMUT possédant un déplacement uniforme permettrait d'éliminer ce décalage. Les dispositifs de la matrice de PMUT possèdent un tel déplacement, ce qui devrait améliorer le résultat de la spectroscopie. Malheureusement, les résultats de la spectroscopie utilisant la matrice n'ont pas confirmé cette hypothèse. Les résultats de la spectroscopie utilisant le signal dérivé de la matrice de PMUT étaient significativement moins précis que ceux obtenus à partir des mesures d'un seul PMUT. Ces inexactitudes peuvent être expliquées par plusieurs facteurs : tout d'abord, parce que la petite surface active (30 %) était répartie sur une grande surface physique et que, dans l'ensemble, la surface active du PMUT unique était globalement plus efficace ; en outre, un faisceau THz collimaté a été utilisé plutôt qu'un faisceau focalisé, ce qui fait qu'une partie du signal a été réfractée par le substrat du PMUT plutôt que par sa surface mobile en aluminium, ce qui peut avoir provoqué des interférences dans le signal détecté. En plus, le déplacement des PMUT dans la matrice était nettement inférieur à celui d'un PMUT unique, ce qui a limité l'amplitude du signal dérivé détecté et donc son SNR. Enfin, il a été constaté, après la réalisation des acquisitions, que l'antenne photoconductrice utilisée comme détecteur était partiellement endommagée, ce qui a augmenté significativement le niveau de bruit dans le signal détecté par ce détecteur. Ce problème a malheureusement été identifié vers la fin de ma thèse de maitrise.

Afin d'améliorer la précision des résultats spectroscopiques, la première étape serait de concevoir une matrice de PMUT avec un déplacement uniforme d'environ $10\mu\text{m}$, comparable au déplacement du PMUT unique utilisé dans ce travail. Un tel dispositif permettrait de concentrer les THz uniquement sur la surface oscillante en aluminium du PMUT et de confirmer si le changement détecté dans le coefficient d'absorption peut être éliminé. L'utilisation d'une bonne antenne de détection photoconductrice serait également obligatoire pour obtenir des résultats avec un SNR plus élevé.

Il est à noter que le bris de l'antenne de détection n'est pas le seul problème technique qui a été surmonté au cours des expériences réalisées. De nombreux autres problèmes ont été

identifiés et surmontés au cours des nombreuses itérations du montage expérimental. Ce paragraphe fait une brève énumération de certains problèmes rencontrés. Par exemple, l'expérience a été réalisée initialement à l'aide d'un émetteur spintronique, qui était progressivement détruit par le laser et qui a donc dû être remplacé par un émetteur en LiNbO₃ dans le but d'obtenir un champ d'une amplitude supérieure. Ce détecteur s'est avéré difficile à aligner, en plus d'être limité en fréquence à environ 2 THz, alors que l'antenne de détection utilisée pouvait détecter un signal jusqu'à 4.5 THz avec la spintronique. Ajouté au fait que le LiNbO₃ n'ayant pas un spectre d'amplitude espérée, ces limitations ont mené au remplacement de l'émetteur par l'antenne PCA de Teravil mentionné précédemment. Différentes anomalies dans les détections ont par la suite permis de réaliser que l'antenne de détection utilisée était endommagée, elle fut donc remplacée par une antenne Batops pendant que l'antenne Teravil a été envoyée en réparation. Cette antenne permettait d'obtenir un signal sur bruit acceptable avec les acquisitions conventionnelles, cependant les câbles de connexions de l'antenne étaient exposés, et captaient un bruit en provenance du générateur de fonction qui activait les PMUTS. Un niveau de bruits élevé en résultait donc lors des acquisitions dérivées. Diverses tentatives de blindage électrique furent effectuées mais le niveau de bruit des acquisitions dérivées n'a jamais pu être amené au niveau normal de l'instrument de mesure. Pendant ce temps, un bris sur l'antenne d'émission fut détecté et cette antenne fut envoyée en réparation. Lorsque les deux antennes Teravil réparées ont de nouveau été utilisées pour effectuer des expériences, il a été détecté que le laser introduisait des préimpulsions, et donc du bruit, lorsqu'il était utilisé à moins de 100% de sa capacité (3W). Des étages d'atténuation optiques ont donc dû être ajoutés pour pouvoir opérer sans préimpulsions. Cet lors de cette dernière configuration que le bris final de l'antenne de détection a de nouveau été détecté. Il est à noter que d'autres problèmes tels que des matrices de PMUTs fautives à plus de 50% ainsi qu'un retard d'un an dans la livraison de la machine de liaison par fil automatique sont également survenus durant les problèmes de laboratoire décrits ci-haut.

Acquisition par pixel compressé avec une matrice de PMUT

L'acquisition par pixel compressé n'a pas pu être réalisée en raison des problèmes d'opération de la matrice de PMUT détectés lors de la caractérisation. Notamment, il est impossible de distinguer les PMUT activés des PMUT au repos dans des configurations où tous les PMUT ne sont pas activés en même temps. Si la source de ce problème a été attribuée au procédé de fabrication de la matrice et à l'état de la technologie des PMUT, il demeure tout de même des améliorations qui pourraient permettre au circuit de contrôle de pallier à ses problèmes. La première amélioration serait de connecter au circuit de contrôle un courant AC déphasé de 180 degré du courant AC activant les PMUT. Le but serait d'envoyer un courant AC qui annulerait les vibrations transmises par diaphonie, permettant de maintenir les PMUT non activés à l'arrêt. Pour ce faire, les optocoupleurs devraient être remplacés par des interrupteurs AC qui permettraient de connecter les PMUT de la matrice soit au signal d'activation, soit à un signal plus faible déphasé de 180 degrés. Une deuxième amélioration serait de varier les résistances de type « pull-down » qui ont été installées sur le circuit de contrôle des PMUT en caractérisant l'impact sur l'amplitude et la vitesse d'arrêt des PMUT. Le choix des résistances actuelles a été fait selon la recommandation de la littérature (Chang, 2007), mais aucune caractérisation n'a été effectuée pour valider si l'impact était positif selon les requis du système. En bref, quelques modifications simples au circuit de contrôle pourraient rendre fonctionnel le système actuel et il serait possible de passer à l'étape suivante, qui consiste à essayer d'imager un objet par onde THz en utilisant une acquisition à un pixel compressé.

ANNEXE I

CODE MATLAB POUR SPECTROSCOPIE THZ-TDS

Le but de cette section est de présenter la structure du code MATLAB permettant de directement d'extraire les données d'acquisition effectuée à par THz-TDS en utilisant l'amplificateur à verrouillage UHFLI de Zurich du laboratoire d'opto-électronique de l'ETS, d'extraire les paramètres optiques désirés et de les afficher à l'écran. Ce code se sépare donc en trois parties, soit l'importation des données dans l'environnement MATLAB, l'extraction des paramètres optiques et l'affichage des résultats.

IMPORTATION DES DONNÉES :

```
%% DATA IMPORT %
% this script averages a number of acquisition into an average sample and
% an average reference dataset which are then plotted and recorded in the
% DATA folder
% DATA Structure should be as follows:
% DATA/Folder_name
%   -> Reference
%   -> Sample_name_1
%   -> ...
%   -> Sample_name_x
%   -> All
%     -> xxx_01.dxx
%     -> ...
%     -> xxx_xx.dxx
%   -> Derivate
%     -> xxx_01.dxx
%     -> ...
%     -> xxx_xx.dxx

%% LOAD USER PARAMETERS %
param_gen;

%% LOAD DATA %
dirs = dir(data_load_folder);
% Looking through all subfolders of the main data folder
for i = 1 : length(dirs)
    dir_name = dirs(i).name;
    % Excluding "." and ".." sub folder names
    if(dir_name ~= "." & dir_name ~= "..")

        all_files =
        dir(fullfile(strcat(data_load_folder, dir_name, "/All/"), "* .txt"));
    end
end
```

```

    derive_files =
dir(fullfile(strcat(data_load_folder,dir_name,"/Derivate/"), "*.txt")));
    % Determining the length of the array, inefficient but removes
need
    % for a user parameter
    if ~isempty(derive_files)
        params =
importdata(strcat(derive_files(1).folder,'/'),derive_files(1).name));
        data_length = length(params.data(:,2));
        time_steps = abs(params.data(1,1));
    end

    standard = zeros(data_length,1);
    derives_mix = zeros(data_length,derive_num);
    derives_pure = zeros(data_length,derive_num); % acquisition
made without pulse modulation

    all_files_num = 0;
    der_files_num = 0;

    for j = 1: length(all_files)
        Filename = all_files(j).name;
        file_data =
importdata(strcat(all_files(j).folder,'/'),Filename));
        standard = standard + file_data.data(:,2);
        derives_mix(:,1) = derives_mix(:,1) + +
file_data.data(:,5);
        derives_mix(:,2) = derives_mix(:,2) + +
file_data.data(:,6);
        derives_mix(:,3) = derives_mix(:,3) + +
file_data.data(:,7);
        all_files_num = all_files_num + 1;
    end

    for j = 1: length(derive_files)
        Filename = derive_files(j).name;
        file_data =
importdata(strcat(derive_files(j).folder,'/'),Filename));
        derives_pure(:,1) = derives_pure(:,1) + +
file_data.data(:,5);
        derives_pure(:,2) = derives_pure(:,2) + +
file_data.data(:,6);
        derives_pure(:,3) = derives_pure(:,3) + +
file_data.data(:,7);
        der_files_num = der_files_num + 1;
    end

    if all_files_num ~= 0
        standard = standard./all_files_num;
        derives_mix = derives_mix./all_files_num;
    end

    if derive_num ~= 0
        derives_pure = derives_pure./der_files_num;
    end

```

```

    end

    if disp ~= 0
        plot(standard);
        hold on;
        for j = 1:derivate_num
            plot(derivates_mix(:,j));
        end
        for j = 1:derivate_num
            plot(derivates_pure(:,j));
        end
        hold off;
        legend_names = ["Standard"];
        for j = 1:derivate_num
            legend_names = [legend_names; strcat("Derivate-mix-",
ndum2str(j))];
        end
        for j = 1:derivate_num
            legend_names = [legend_names; strcat("Derivate-pure-",
num2str(j))];
        end
        legend(legend_names);
    end

    if saveResults ~= 0
        data_save_folder = strcat(data_load_folder, dir_name);
        saveName = strcat(data_save_folder, '/', 'data.mat');
        save(saveName, 'time_steps', 'data_length', 'standard',
'derivates_mix', 'derivates_pure');
    end
end

```

EXTRACTION DES PARAMÈTRES OPTIQUES :

```

%% REFRACTIVE INDEX EXTRACTION
% This script imports two sets of THz data acquisition: Reference data
and
% sample data. It uses those sets to calculate the refraction index of
the
% sample. The refraction index, absorption coefficient, thickness of
% substrate and frequencies are then saved
clear;
close all;

% Path to functions %
addpath("./utility");

% Path to data
addpath('./DATA');
%% LOAD USER PARAMETERS

```

```

param_gen;

%% BEGIN EXTRACTION
dirs = dir(data_load_folder);
% Loading Reference Data %
if exist(strcat(data_load_folder,"Reference"), 'dir')
    reference = load(strcat(data_load_folder, "Reference", '/data.mat'));

    % This step assumes the reference and sample have the same time
    % steps.
    % If it doesn't the analysis is not valid.
    time_steps = reference.time_steps * 1e-12; % Converts time steps in
    % pico seconds
    sig_len = reference.data_length;
    ref_data = zeros(sig_len, sig_num); % Array of signal of standard,
    % derivatives acuquired with standard and derivative acquired by themmselves
    ref_data(:,1) = reference.standard;

    if(use_pure == 1)
        ref_data(:,2:4) = reference.derivates_pure;
    else
        ref_data(:,2:4) = reference.derivates_mix;
    end
    for j = 2:sig_num
        if signal_flip(j-1) == 1
            ref_data(:,j) = -ref_data(:,j);
        end
    end
end

% Isolating the position of both peaks to allows keeping same length
% of signal for both reference and sample signals
ref_peak_val = zeros(sig_num,1);
ref_peak_pos = zeros(sig_num,1);
for j = 1: sig_num
    [ref_peak_val(j), ref_peak_pos(j)] = signal_peak(ref_data(:,j));
end

% Loading Sample Data %
if exist(strcat(data_load_folder, sample_name), 'dir')
    dir_name = sample_name;
    output_subdir = strcat(output_folder, dir_name, "/");
    % Excluding ".." and "..." sub folder names
    if(dir_name ~= ".." && dir_name ~= "..." && dir_name ~= "Reference")
        sample = load(strcat(data_load_folder, dir_name, '/data.mat'));
        smp_data = zeros(sig_len, sig_num);
        smp_data(:,1) = sample.standard;
        if(use_pure == 1)
            smp_data(:,2:4) = sample.derivates_pure;
        else
            smp_data(:,2:4) = sample.derivates_mix;
        end
        for j = 2:sig_num
    end
end

```

```

if signal_flip(j-1) == 1
    smp_data(:,j) = -smp_data(:,j);
end
end

padded_ref = zeros(padded_len, sig_num);
padded_smp = zeros(padded_len, sig_num);

% Isolating the position of peaks to allows keeping same length
% of signal for both reference and sample signals
smp_peak_val = zeros(sig_num,1);
smp_peak_pos = zeros(sig_num,1);
peak_pos_dif = zeros(sig_num,1);
for j = 1: sig_num
    [smp_peak_val(j), smp_peak_pos(j)] =
    signal_peak(smp_data(:,j));
    peak_pos_dif(j) = smp_peak_pos(j) - ref_peak_pos(j);

    if(time_cut < sig_len)
        if (time_cut + peak_pos_dif(j)+1) > sig_len
            ref_data(time_cut + 1: sig_len, j) = 0;
        else
            ref_data(time_cut + 1: sig_len, j) = 0;
            smp_data(time_cut + peak_pos_dif + 1: sig_len, j) = 0;
        end
    else
        ref_data(sig_len-peak_pos_dif+1: sig_len, j) = 0;
    end
end

padded_ref(:,j) = pad_data(ref_data(:,j), padded_len);
padded_smp(:,j) = pad_data(smp_data(:,j), padded_len);
end

ref_data = padded_ref;
smp_data = padded_smp;

if ~exist(output_folder, 'dir')
    mkdir(output_folder);
    mkdir(output_subdir);
else
    if ~exist(output_subdir, 'dir')
        mkdir(output_subdir);
    end
end

% Computing Refractive Index and absorption coefficient
if ~exist(strcat(output_folder, "/Reference"), 'dir')
    for j = 1: sig_num

        % integration of signal for all derivates
        if j > 1
            der_num = mod(j-2, derivatives_num)+1;

```

```

        ref_data_int = harmonic_down(ref_data(:,j),
time_steps, der_num, filter_type);
        smp_data_int = harmonic_down(smp_data(:,j),
time_steps, der_num, filter_type);

        [ref_Frq,smp_Frq,f] = freq_domain(ref_data_int,
smp_data_int, time_steps);

        % Fix a problem in the Hard filtering
        ref_Frq(1) = ref_Frq(2);
        smp_Frq(1) = smp_Frq(2);

        % Identify the range of frequencies that can be
considered as part
        % of signal and not noise
        [thrs1, thrs2] = find_noise_threshold(smp_Frq,SNR);
        ref_t0 = ref_peak_pos * time_steps;
        smp_t0 = smp_peak_pos * time_steps;

        % Correction of phase (experimental)
        phase_dif = phase_difference(ref_Frq, smp_Frq, f,
ref_t0(j), smp_t0(j), thrs1, thrs2, phase_unwrap, phase_correction,
debug);

        T = transmission_function(ref_Frq, smp_Frq);
        [n, a, k] = refractive_index(T, phase_dif, thickness,
c, f);

        s_ref_data = ref_data_int;
        s_smp_data = smp_data_int;
        save_name =
strcat("Derivative_",num2str(der_num), '_i.mat');
        save_path = strcat(output_folder,dir_name,"/");

        save(strcat(save_path,save_name),'n','a','f','time_steps',
'thickness','s_ref_data','s_smp_data','ref_Frq','smp_Frq','ref_phase',
'smp_phase','phase_dif');
        end

        [ref_Frq,smp_Frq,f] = freq_domain(ref_data(:,j),
smp_data(:,j), time_steps);

        % Identify the range of frequencies that can be
considered as part
        % of signal and not noise
        [thrs1, thrs2] = find_noise_threshold(smp_Frq,SNR);

        ref_t0 = ref_peak_pos * time_steps;
        smp_t0 = smp_peak_pos * time_steps;

        if debug == 1
            % DEBUG ONGOING %
            figure(3);
            plot(ref_data(:,j));
            hold on

```

```

        plot(smp_data(:,j));
        hold off
        legend("Reference", "Sample");
        % DEBUG ONGOING %
    end

    [phase_dif,ref_phase, smp_phase] =
phase_difference(ref_Frq, smp_Frq, f, ref_t0(j), smp_t0(j), thrs1, thrs2,
phase_unwrap, phase_correction, debug);

    T = transmission_function(ref_Frq, smp_Frq);
    [n, a, k] = refractive_index(T, phase_dif, thickness, c,
f);

    s_ref_data = ref_data(:,j);
    s_smp_data = smp_data(:,j);
    if j == 1
        save_name = strcat("Standard", '.mat');
    else
        save_name =
strcat("Derivative_", num2str(der_num), '.mat');
    end

    save_path = strcat(output_folder, dir_name, "/");

    save(strcat(save_path, save_name), 'n', 'a', 'f', 'time_steps',
'thickness', 's_ref_data', 's_smp_data', 'ref_Frq', 'smp_Frq', 'ref_phase',
'smp_phase', 'phase_dif');
    end
else
    disp("Reference data not found, can't compute Refractive
index");
    end
end
end

```

AFFICHAGE DES RÉSULTATS :

```

%% REFRACTIVE INDEX COMPARING %
% This script compares previously obtained indexes of refraction and
% coefficient of absorption graphically. To generate the necessary .mat
% files, run the Refraction_index_extraction.m script
close all;

%% LOAD PARAMETERS %
param_gen;

%% LOADING DATA %
data_path = strcat(output_folder, "/", sample_name, "/");
file_num = length(signal_names);
% Determining the length of the array, inefficient but removes need

```

```

% for a user parameter
sig_len =
length(load(strcat(data_path,signal_names(1),".mat")).s_ref_data);
frq_len = length(load(strcat(data_path,signal_names(1),".mat")).ref_Frq);

%finds the lowest length of signal in case signals are of different
length
%so a downsample will be applied to allow to display signal of different
%length
for i = 1:file_num
    tmp_len_d =
length(load(strcat(data_path,signal_names(i),".mat")).s_ref_data);
    tmp_len_f =
length(load(strcat(data_path,signal_names(i),".mat")).ref_Frq);
    time_steps =
load(strcat(data_path,signal_names(i),".mat")).time_steps;
    if( tmp_len_d < sig_len)
        sig_len = tmp_len_d;
    end
    if( tmp_len_f < frq_len)
        frq_len = tmp_len_f;
    end
end

time = (0:sig_len-1) * time_steps;
smp_sig_data = zeros(sig_len, file_num);
ref_sig_data = zeros(sig_len, file_num);
smp_frq_data = zeros(frq_len, file_num);
ref_frq_data = zeros(frq_len, file_num);
n_data = zeros(frq_len, file_num);
a_data = zeros(frq_len, file_num);
f_data = load(strcat(data_path,signal_names(1),".mat")).f;

for i = 1:file_num
    file_data = load(strcat(data_path,signal_names(i),".mat"));

    tmp_len_d = length(file_data.s_ref_data);
    if(tmp_len_d > sig_len)
        d_factor = round(tmp_len_d/sig_len);
        ref_sig_data(:,i) = downsample(file_data.s_ref_data, d_factor);
        smp_sig_data(:,i) = downsample(file_data.s_smp_data, d_factor);
        ref_frq_data(:,i) = downsample(file_data.ref_Frq, d_factor);
        smp_frq_data(:,i) = downsample(file_data.smp_Frq, d_factor);
        n_data(:,i) = downsample(file_data.n, d_factor);
        a_data(:,i) = downsample(file_data.a, d_factor);

    else
        ref_sig_data(:,i) = file_data.s_ref_data;
        smp_sig_data(:,i) = file_data.s_smp_data;
        ref_frq_data(:,i) = file_data.ref_Frq;
        smp_frq_data(:,i) = file_data.smp_Frq;
        n_data(:,i) = file_data.n;
        a_data(:,i) = file_data.a;
        f_data = load(strcat(data_path,signal_names(i),".mat")).f;
    end
end

```

```

end

%% REFRACTIVE INDEX DISPLAY %
fig1 = figure(1);
set(fig1,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
for i = 1:file_num
    plot(f_data,n_data(:,i));
    hold on;
end
hold off;
axis padded;
xlim([min_freq max_freq]);
title("Refractive index");
legend(signal_names);

%% ABSORPTION COEFFICIENT DISPLAY %
fig2 = figure(2);
set(fig2,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
for i = 1:file_num
    plot(f_data,a_data(:,i));
    hold on;
end
hold off;
axis padded;
xlim([min_freq max_freq]);
title("Absorption coefficient");
legend(signal_names);

%% SIGNAL WAVEFORM DISPLAY %
fig3 = figure(3);
set(fig3,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
subplot(1,2,1);
plot(time, ref_sig_data(:,1));
disp_names = signal_names(1);
hold on;
for i = 2:file_num
    if ~contains(signal_names(i), "_i")
        plot(time, ref_sig_data(:,i));
        disp_names = [disp_names signal_names(i)];
    end
    hold on;
end
hold off;
axis padded;
title("Reference waveform");
legend(disp_names);

subplot(1,2,2);
plot(time, smp_sig_data(:,1));
disp_names = signal_names(1);
hold on;
for i = 2:file_num
    if ~contains(signal_names(i), "_i")
        plot(time, smp_sig_data(:,i));
        disp_names = [disp_names signal_names(i)];
    end
    hold on;
end

```

```

    end
    hold on;
end
hold off;
axis padded;
title("Sample waveform");
legend(disp_names);

%% SIGNAL INTEGRATED WAVEFORM DISPLAY %
fig4 = figure(4);
set(fig4,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
subplot(1,2,1);
plot(time, normalize_signal(ref_sig_data(:,1)));
disp_names = signal_names(1);
hold on;
for i = 2:file_num
    if contains(signal_names(i), "_i")
        plot(time, normalize_signal(ref_sig_data(:,i)));
        disp_names = [disp_names signal_names(i)];
    end
    hold on;
end
hold off;
axis padded;
title("Reference integrated waveform");
legend(disp_names);

subplot(1,2,2);
plot(time, normalize_signal(smp_sig_data(:,1)));
disp_names = signal_names(1);
hold on;
for i = 2:file_num
    if contains(signal_names(i), "_i")
        plot(time, normalize_signal(smp_sig_data(:,i)));
        disp_names = [disp_names signal_names(i)];
    end
end
hold off;
axis padded;
title("Sample integrated waveform");
legend(disp_names);

%% SIGNAL FREQUENCY DOMAIN DISPLAY %
fig5 = figure(5);
set(fig5,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
subplot(1,2,1);
for i = 1:file_num
    plot(f_data, abs(ref_fq_data(:,i)));
    hold on;
end
hold off;
axis padded;
set(gca, 'YScale', 'log', 'XScale', 'linear');
xlim([min_freq max_freq]);
title("Reference frequency domain");

```

```
legend(signal_names);

subplot(1,2,2);
for i = 1:file_num
    plot(f_data, abs(smp_frq_data(:, i)));
    hold on;
end
hold off;
axis padded;
set(gca, 'YScale', 'log', 'XScale', 'linear');
xlim([min_freq max_freq]);
title("Sample frequency domain");
legend(signal_names);

%% SAVE FIGURES %
saveas(fig1, strcat(data_path, sample_name, "_Refractive_index.png"));
saveas(fig2, strcat(data_path, sample_name,
"_Absorption_coefficient.png"));
saveas(fig3, strcat(data_path, sample_name, "_Waveforms_.png"));
saveas(fig4, strcat(data_path, sample_name,
"_Integrated_waveforms.png"));
saveas(fig5, strcat(data_path, sample_name, "_Frequency_domain.png"));
```


ANNEXE II

CIRCUIT ALTIUM DU CONTRÔLEUR DE MATRICE 4X4

Cette section montre le schéma complet ainsi que le PCB du contrôleur de la matrice de 16 PMUT afin de clarifier la conception décrite dans le texte ainsi qu'à titre informatif pour les futurs étudiants qui souhaiteraient reprendre la conception. Le schéma est séparé en 5 parties : Le niveau supérieur du schéma, l'alimentation du circuit, le microcontrôleur et ses branchements, l'interface série-parallèle par registres à décalages et les optocoupleurs. Le PCB est affiché en version 2D, 3D de face et 3D de dos.

SCHÉMA : NIVEAU SUPÉRIEUR

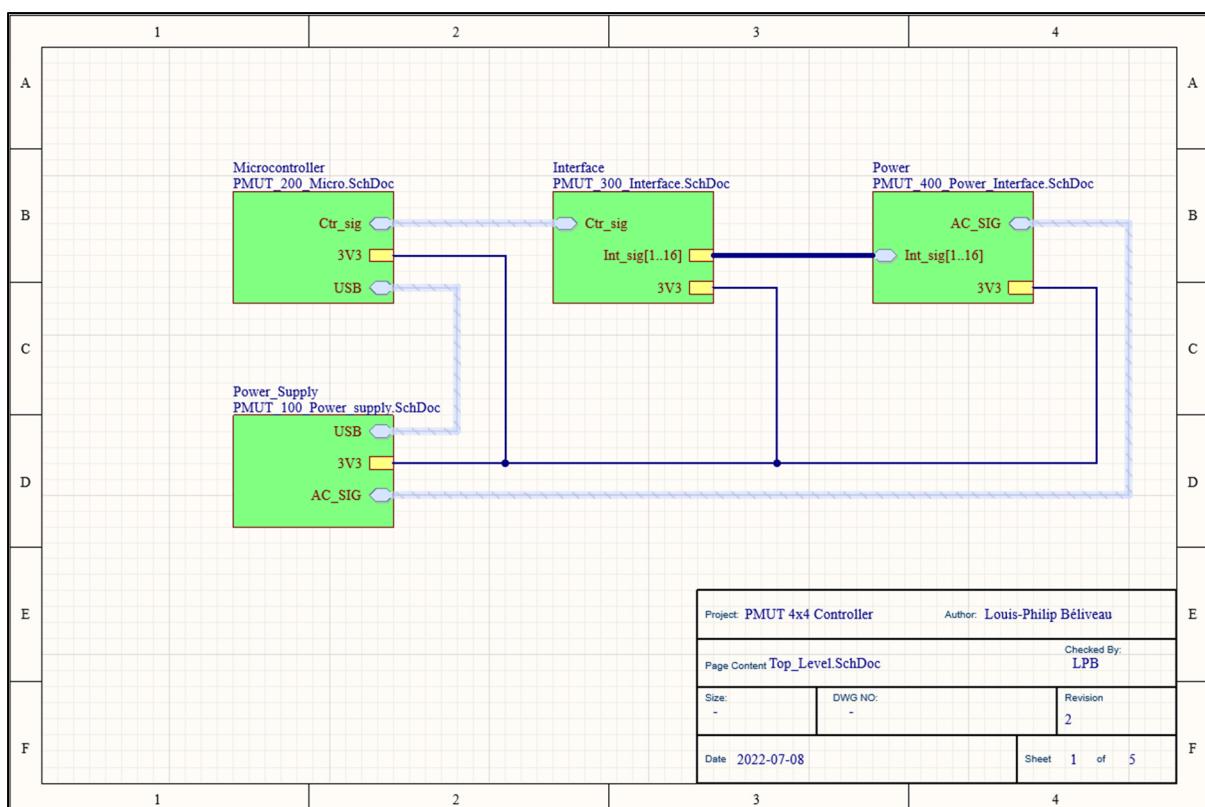


Figure-A II- 1

Niveau supérieur du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

SCHÉMA : ALIMENTATION

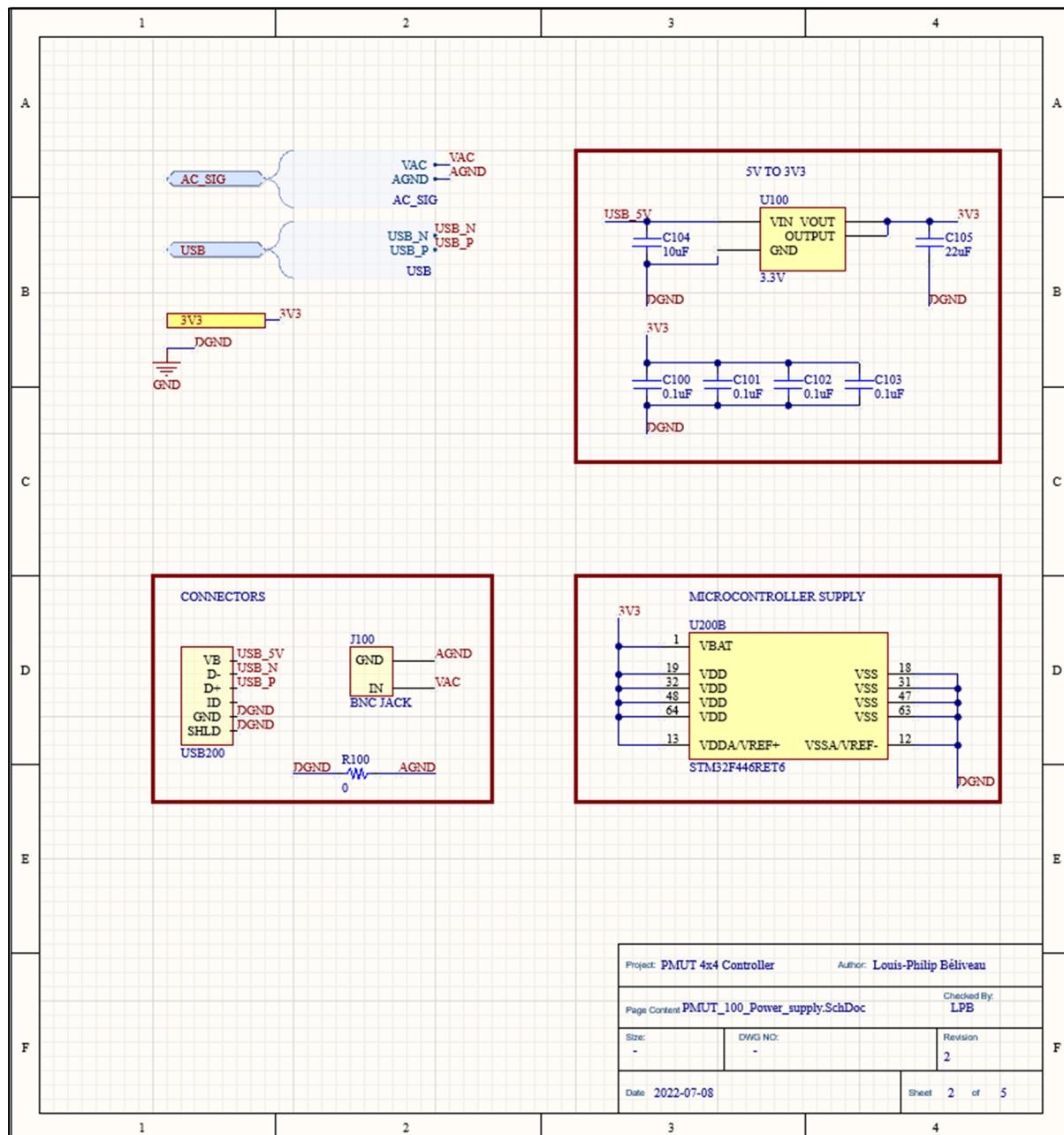


Figure-A II- 2 Étage d'alimentation du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

SCHÉMA : MICROCONTRÔLEUR

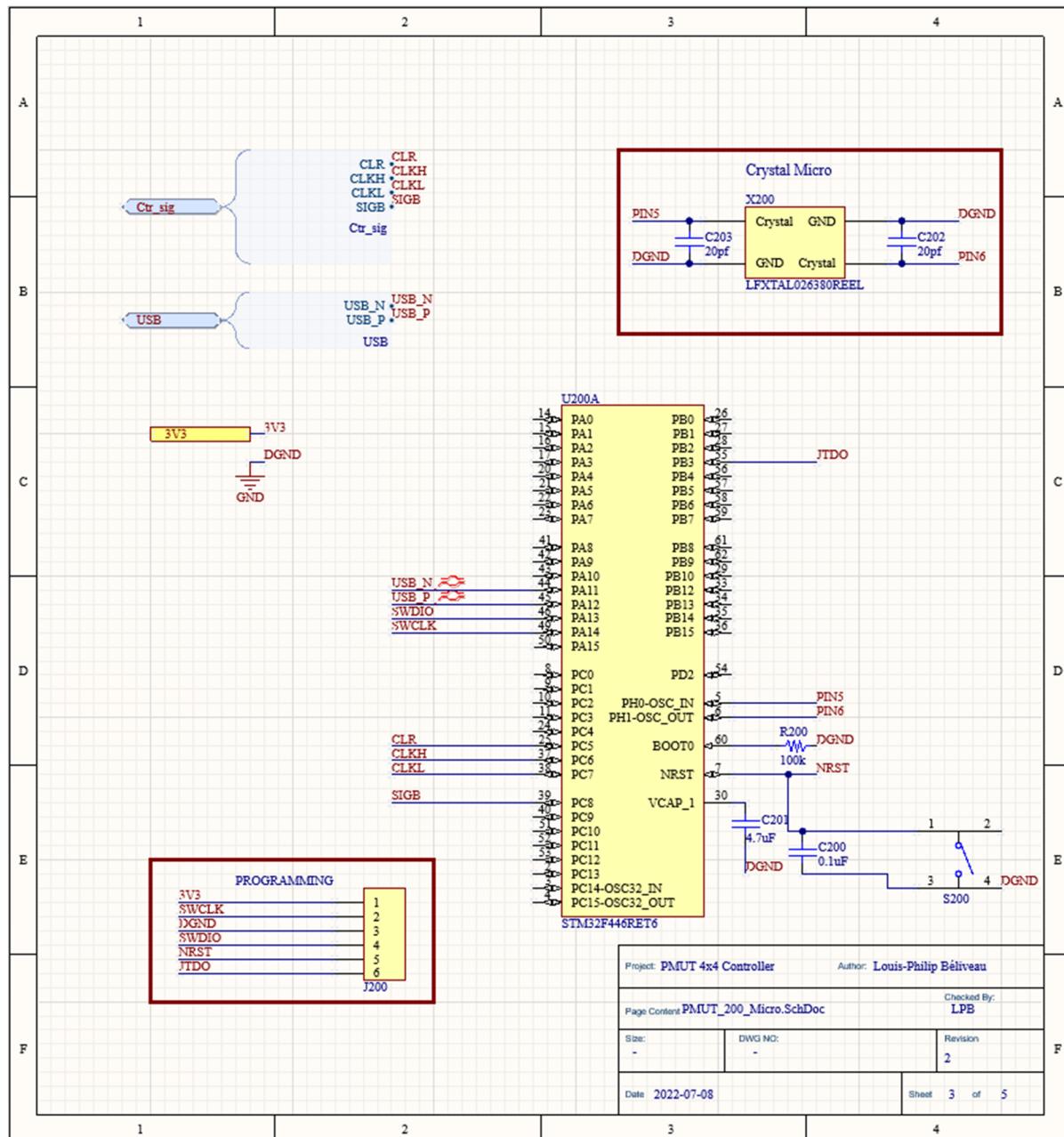


Figure-A II- 3

Étage des branchements du microcontrôleur du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

SCHÉMA : REGISTRES À DÉCALAGE

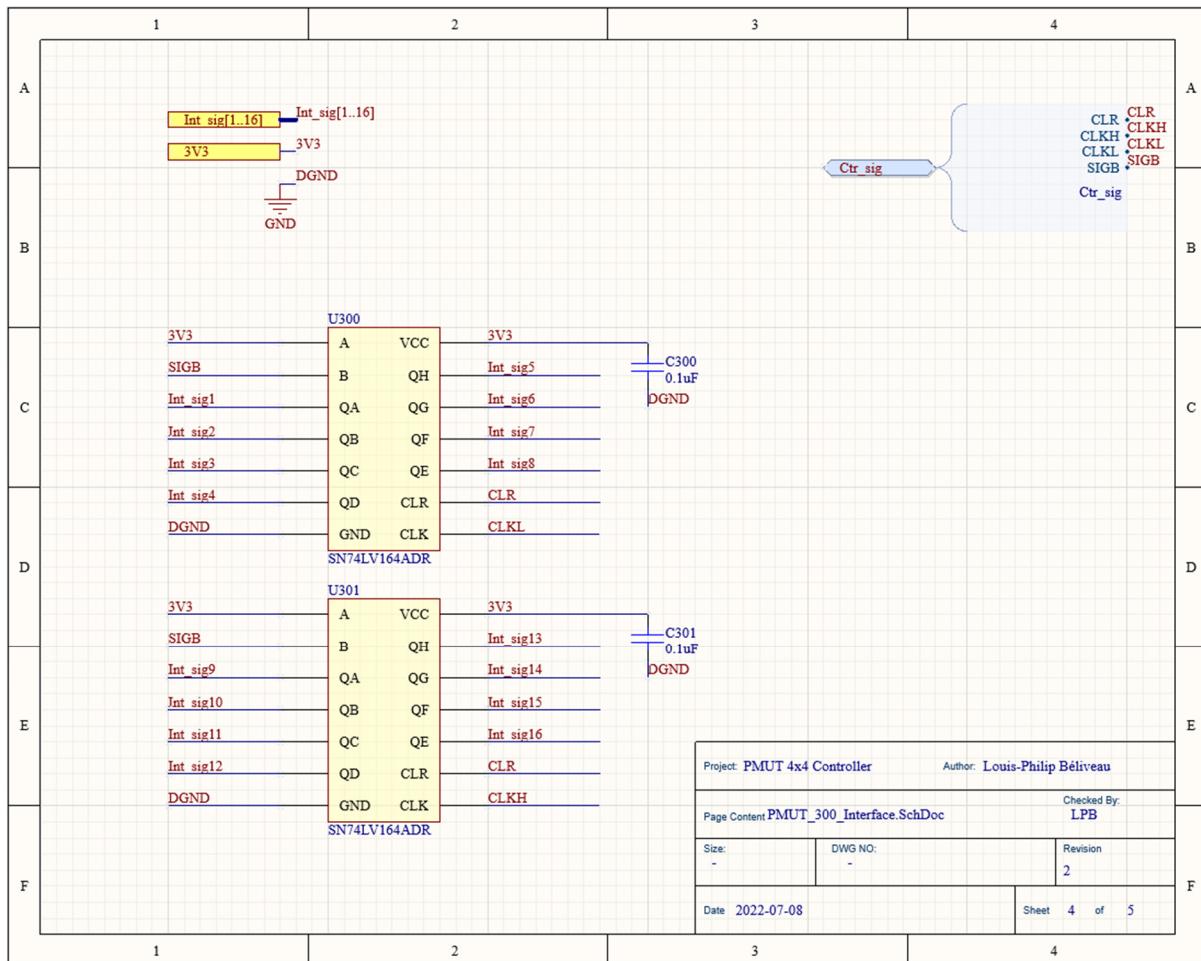


Figure-A II- 4 Étage des registres à décalage du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

SCHÉMA : OPTOCOUPLEURS

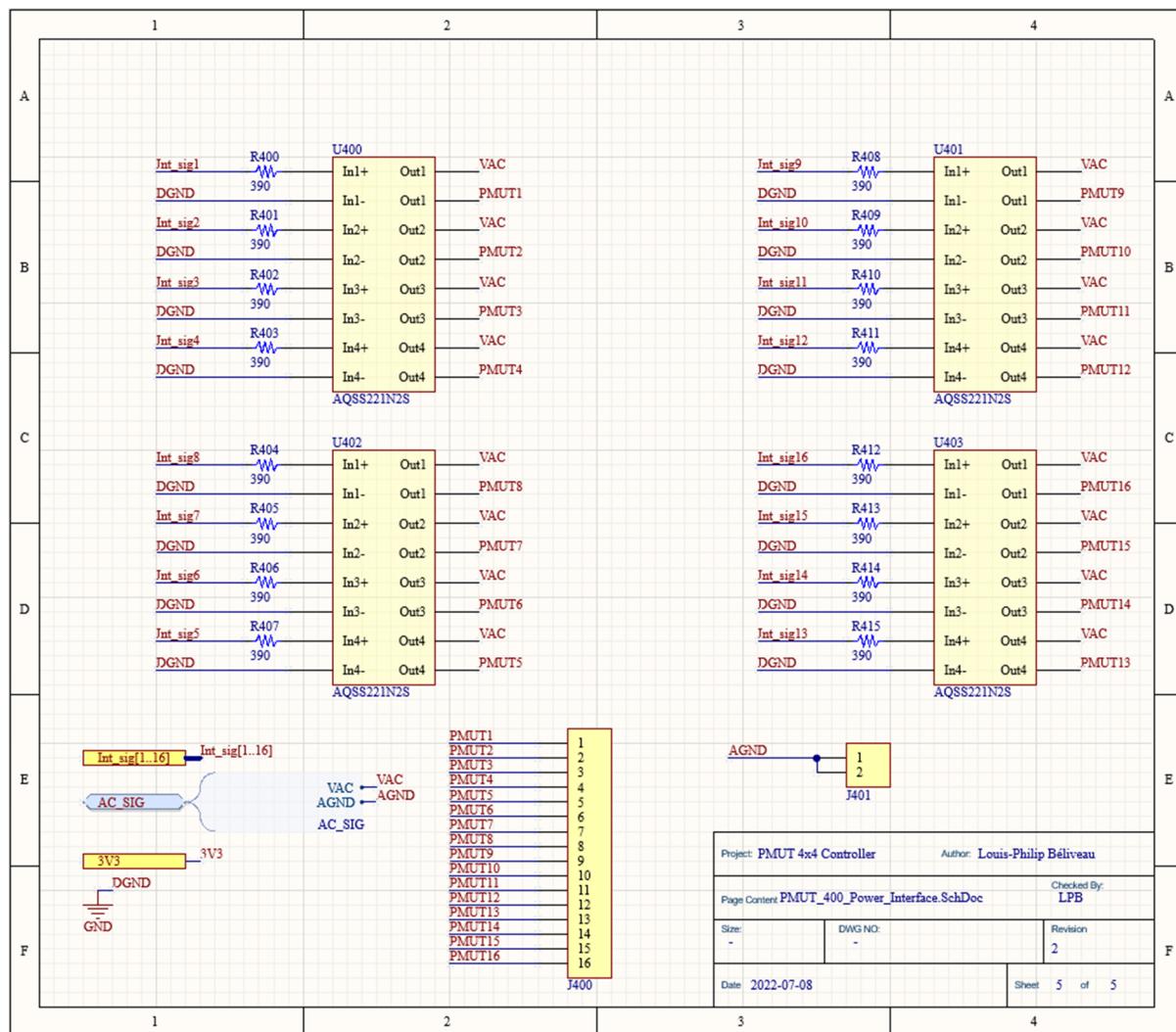


Figure-A II- 5

Étage des optocoupleur du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

PCB : VUE 2D

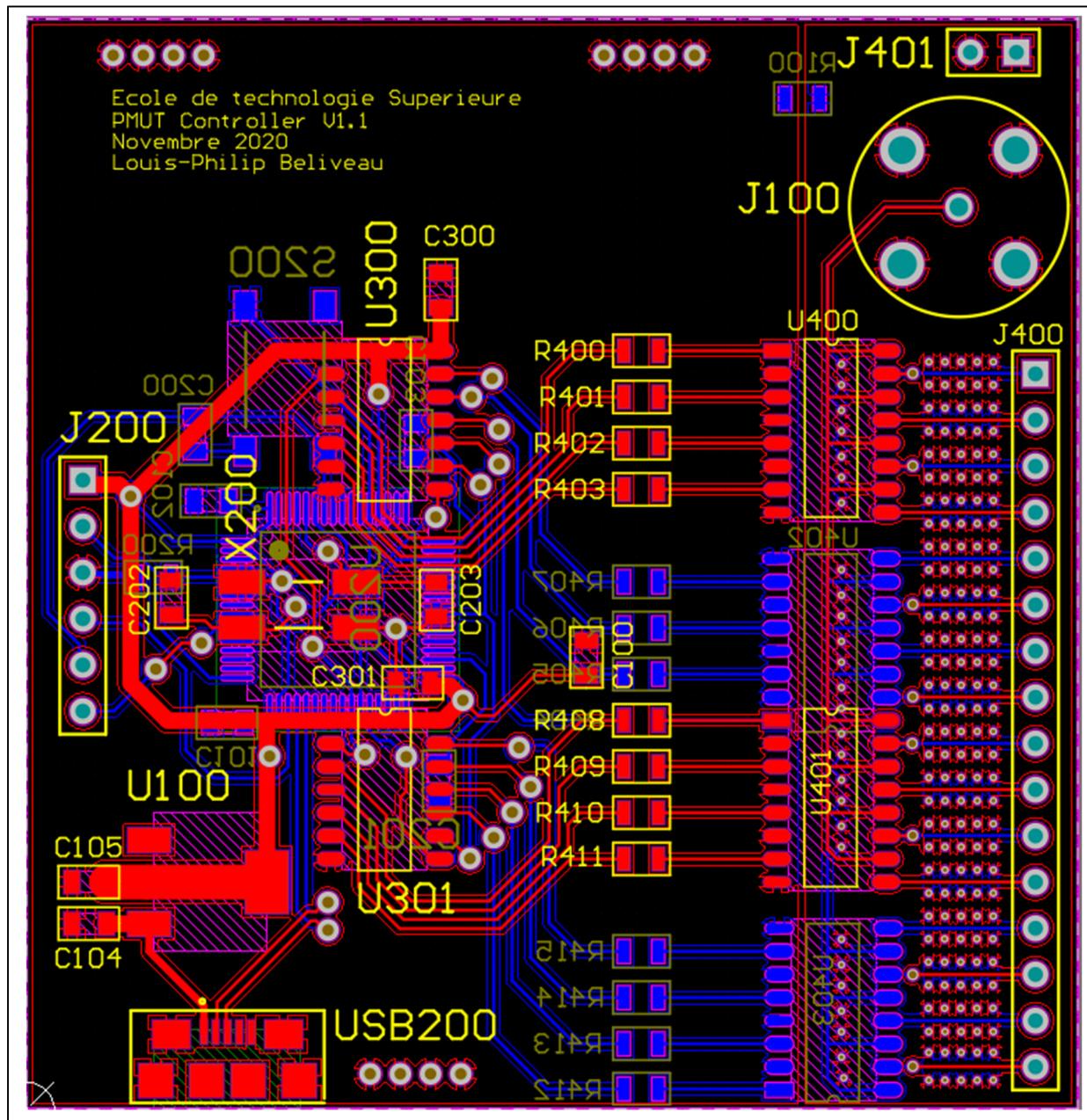


Figure-A II- 6 Vue 2D du PCB du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

PCB : VUE 3D DE FACE

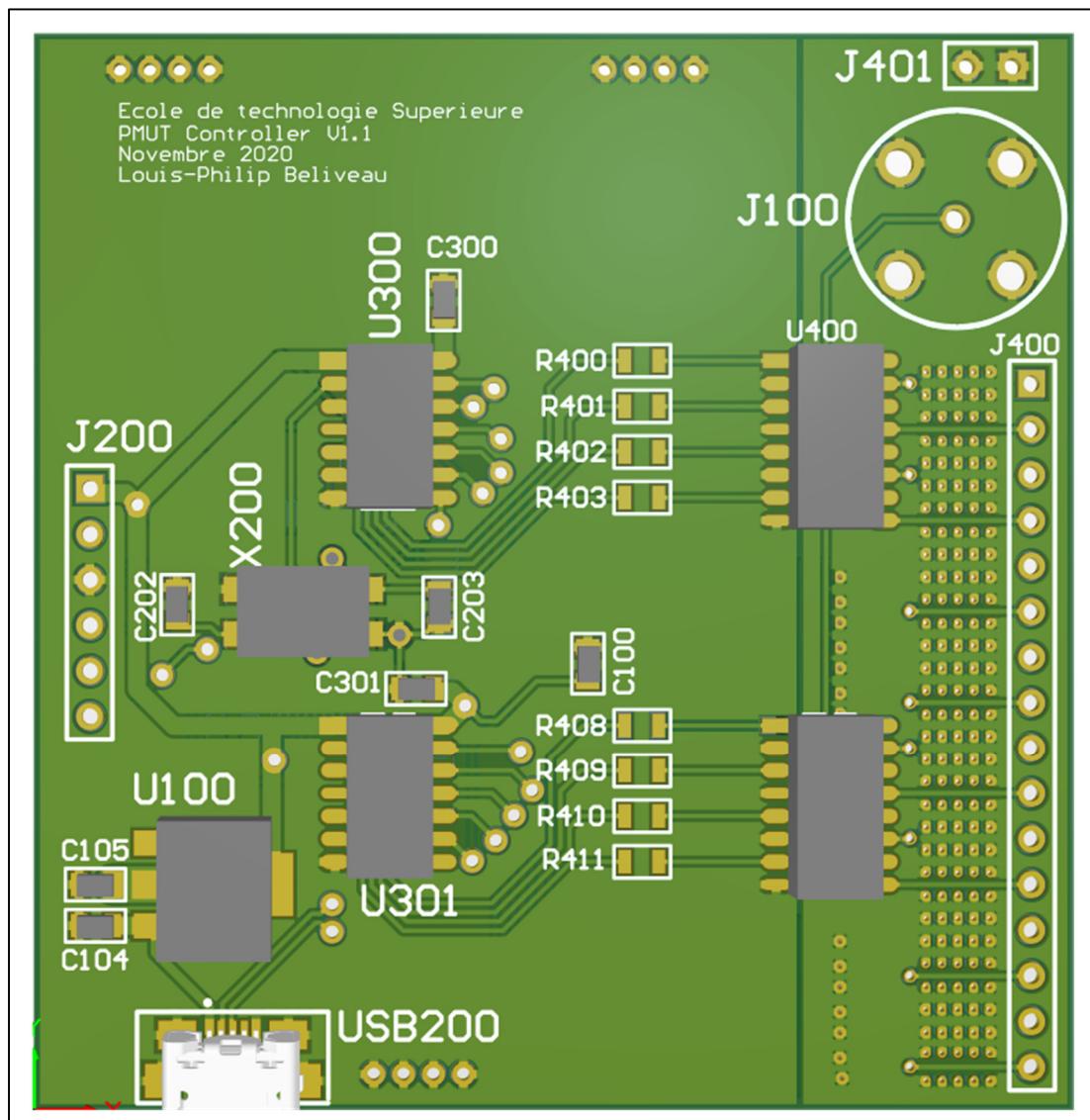


Figure-A II- 7

Vue 3D de face du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

PCB : VUE 3D DE DOS

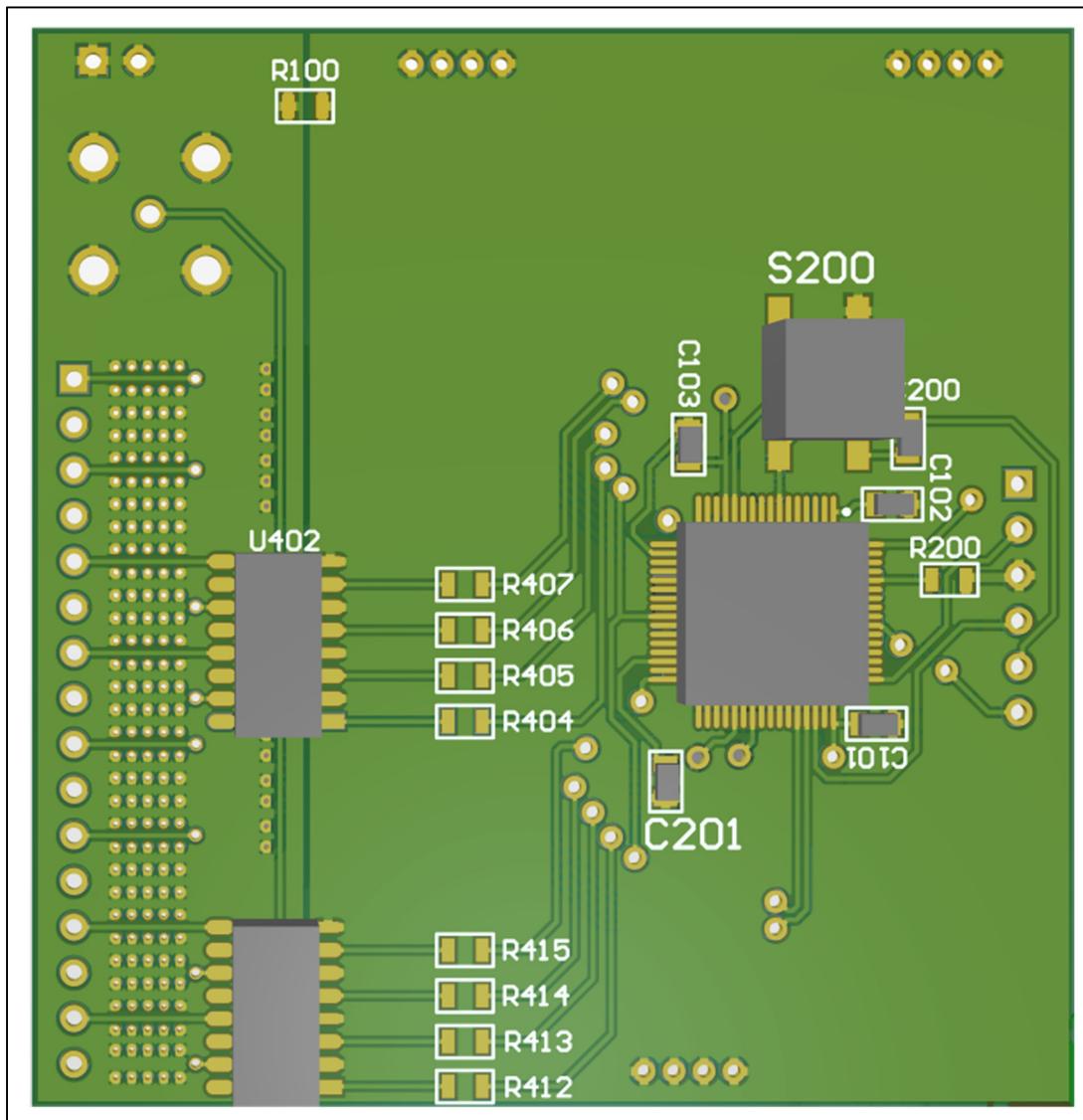


Figure-A II- 8 Vue 3D de dos du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 4x4

ANNEXE III

CIRCUIT ALTIUM DU CONTRÔLEUR DE MATRICE 8X8

Cette section montre le schéma complet ainsi que le PCB du contrôleur de la matrice de 64 PMUT afin de clarifier la conception décrite dans le texte ainsi qu'à titre informatif pour les futurs étudiants qui souhaiteraient reprendre la conception. Le schéma est séparé en 5 parties : Le niveau supérieur du schéma, l'alimentation du circuit, le microcontrôleur et ses branchements, l'interface série-parallèle par interrupteur AC et les connecteurs. Le PCB est affiché en version 2D, 3D de face et 3D de dos.

SCHÉMA : NIVEAU SUPÉRIEUR

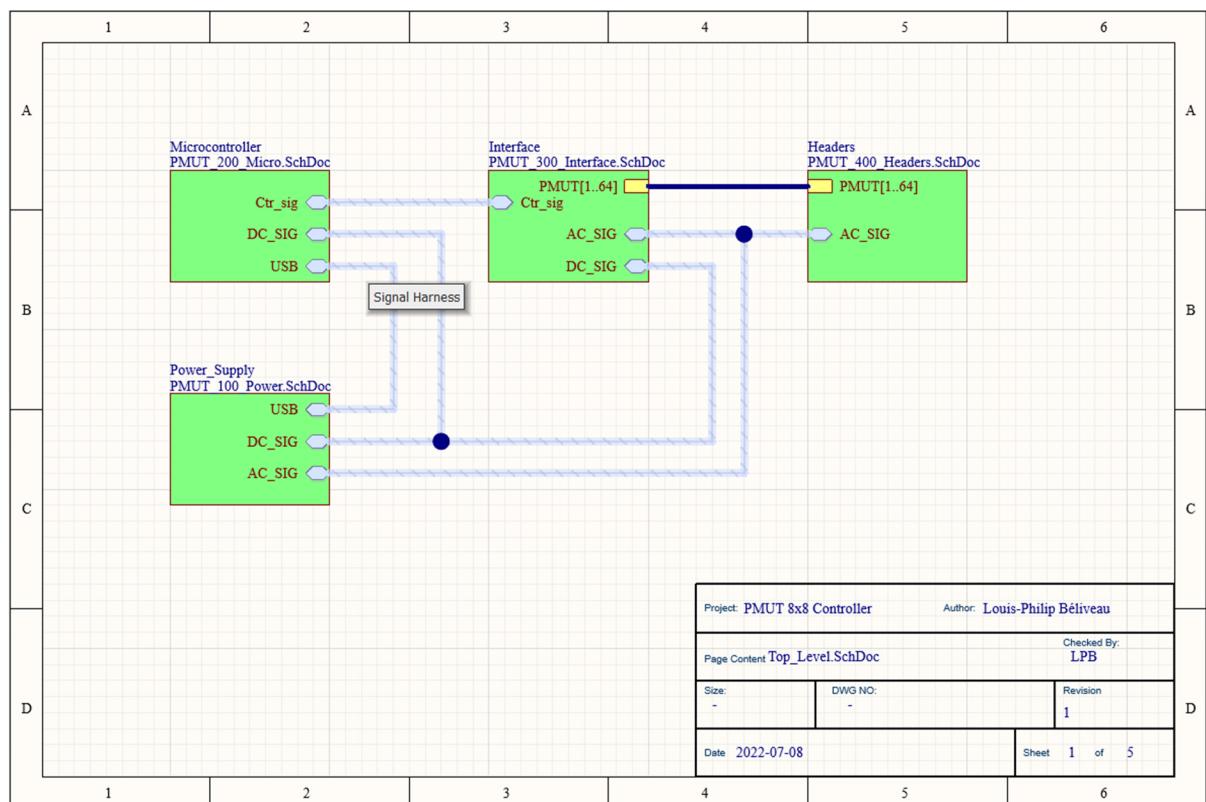


Figure-A III- 1

Niveau supérieur du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

SCHÉMA : ALIMENTATION

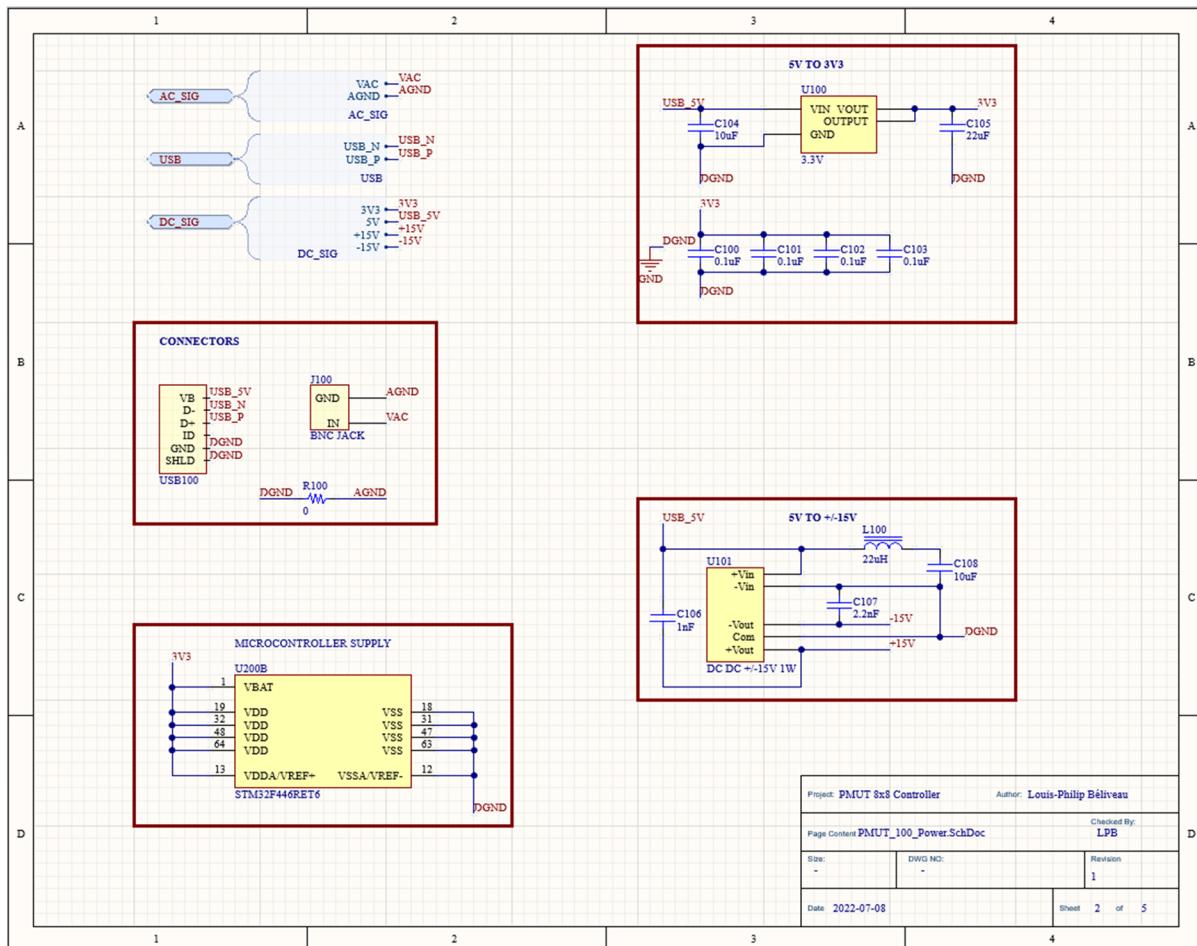


Figure-A III- 2 Étage d'alimentation du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

SCHÉMA : MICROCONTRÔLEUR

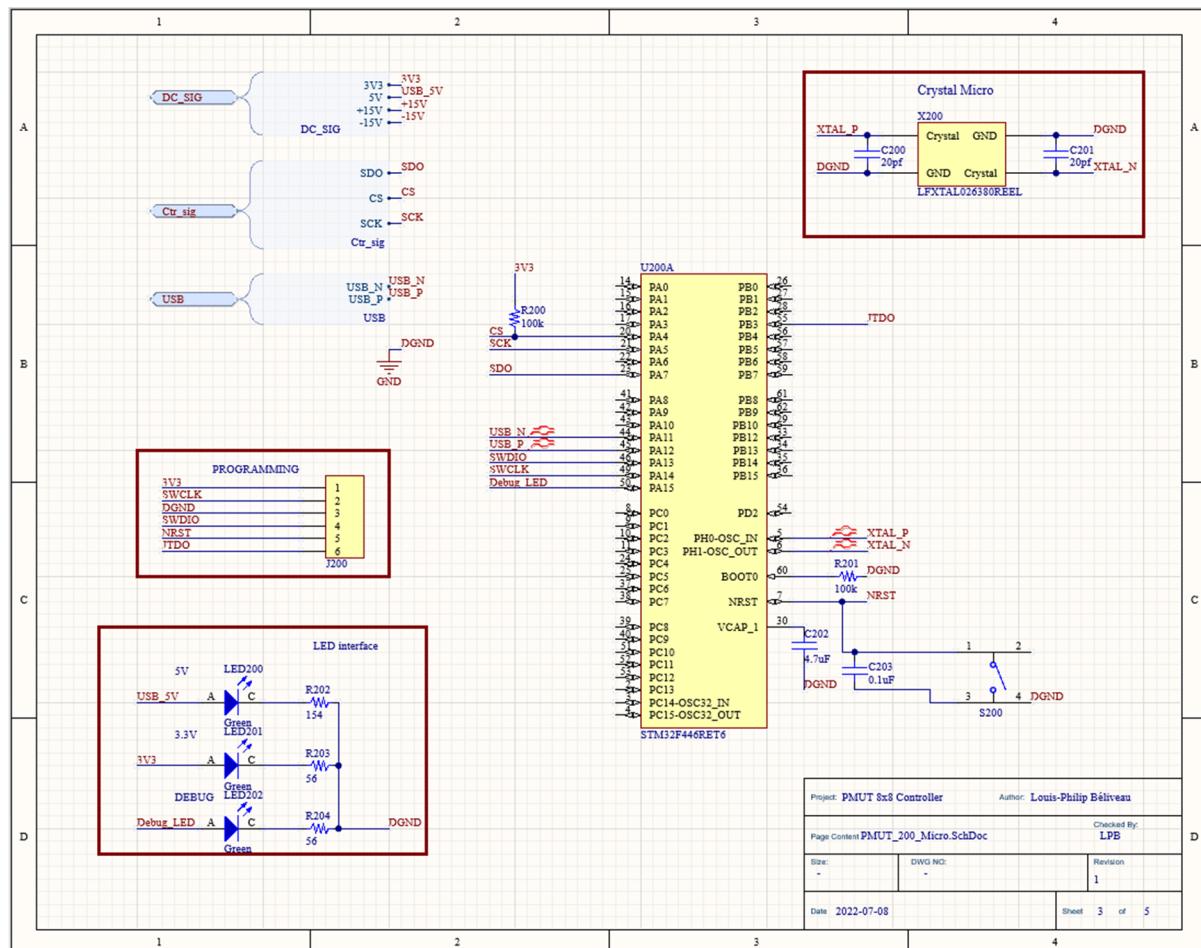


Figure-A III- 3

Étage des branchements du microcontrôleur du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

SCHÉMA : INTERRUPEURS AC

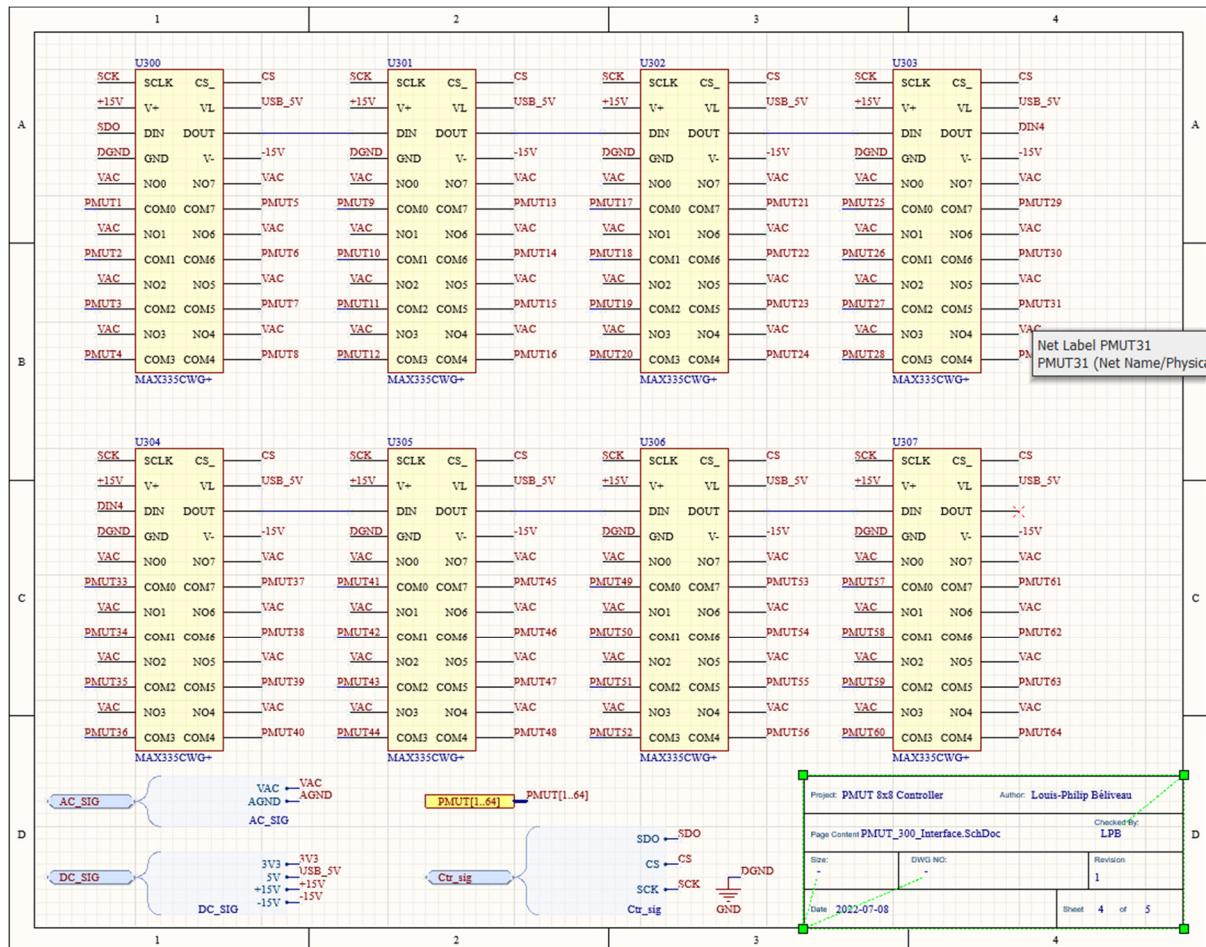


Figure-A III- 4

Étage des interrupteurs AC du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

SCHÉMA : CONNECTEURS

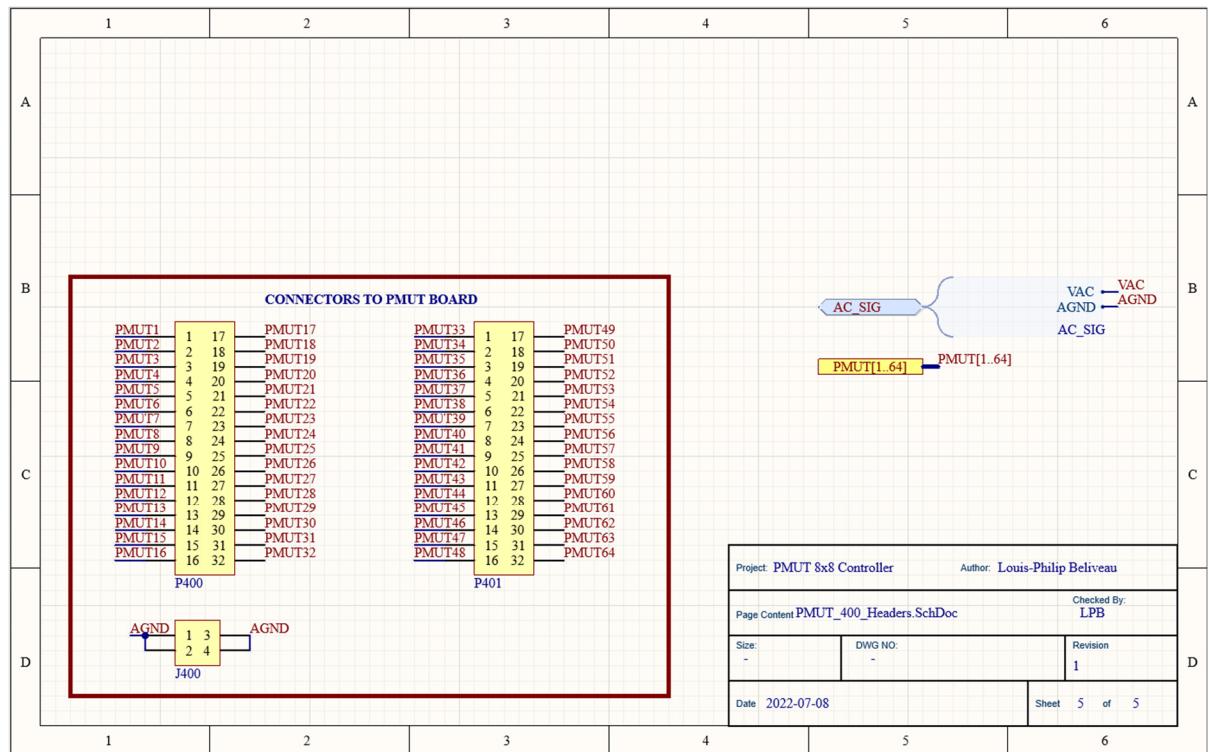


Figure-A III- 5 Étage des connecteurs du schéma du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

PCB : VUE 2D

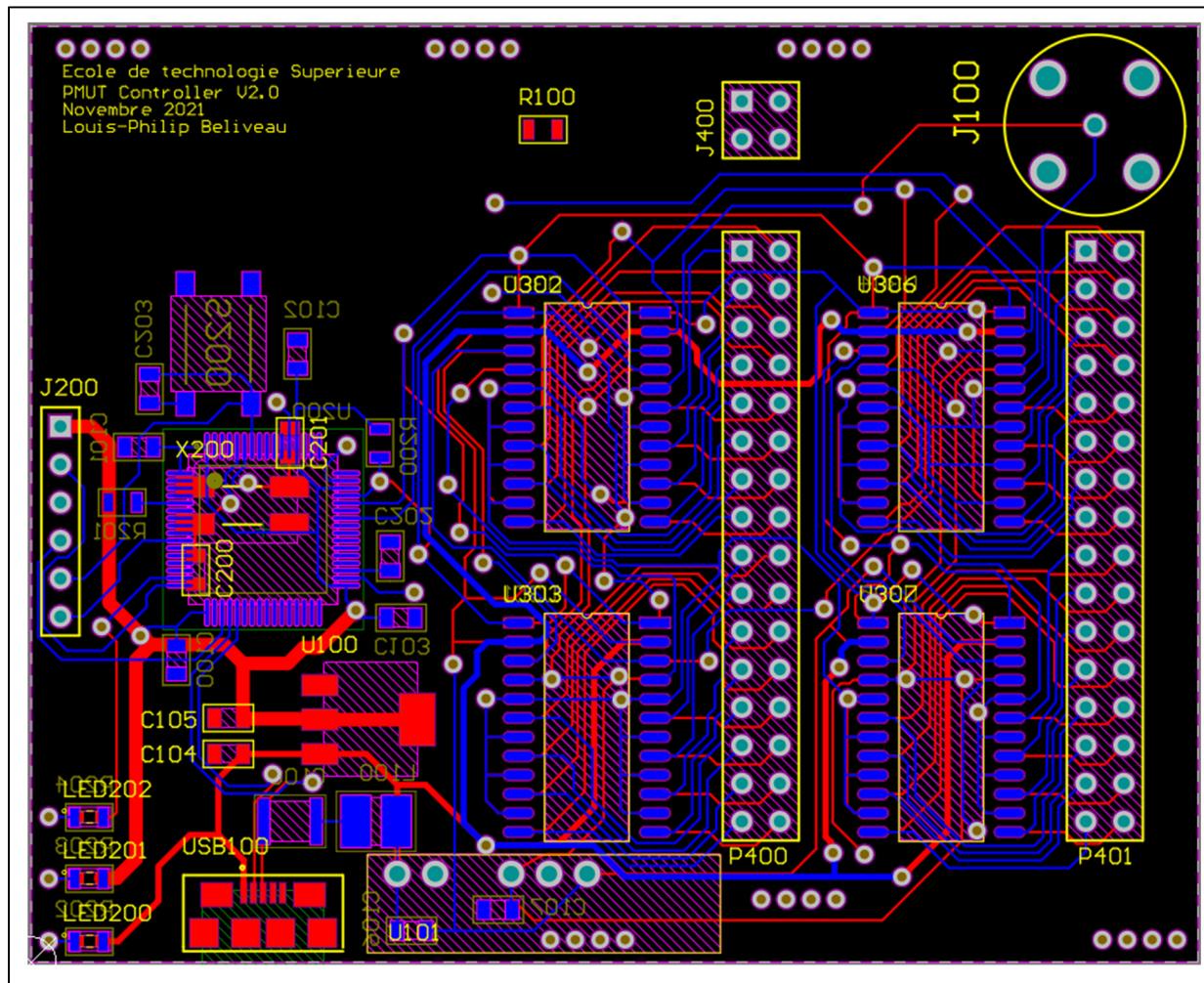


Figure-A III- 6

Vue 2D du PCB du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

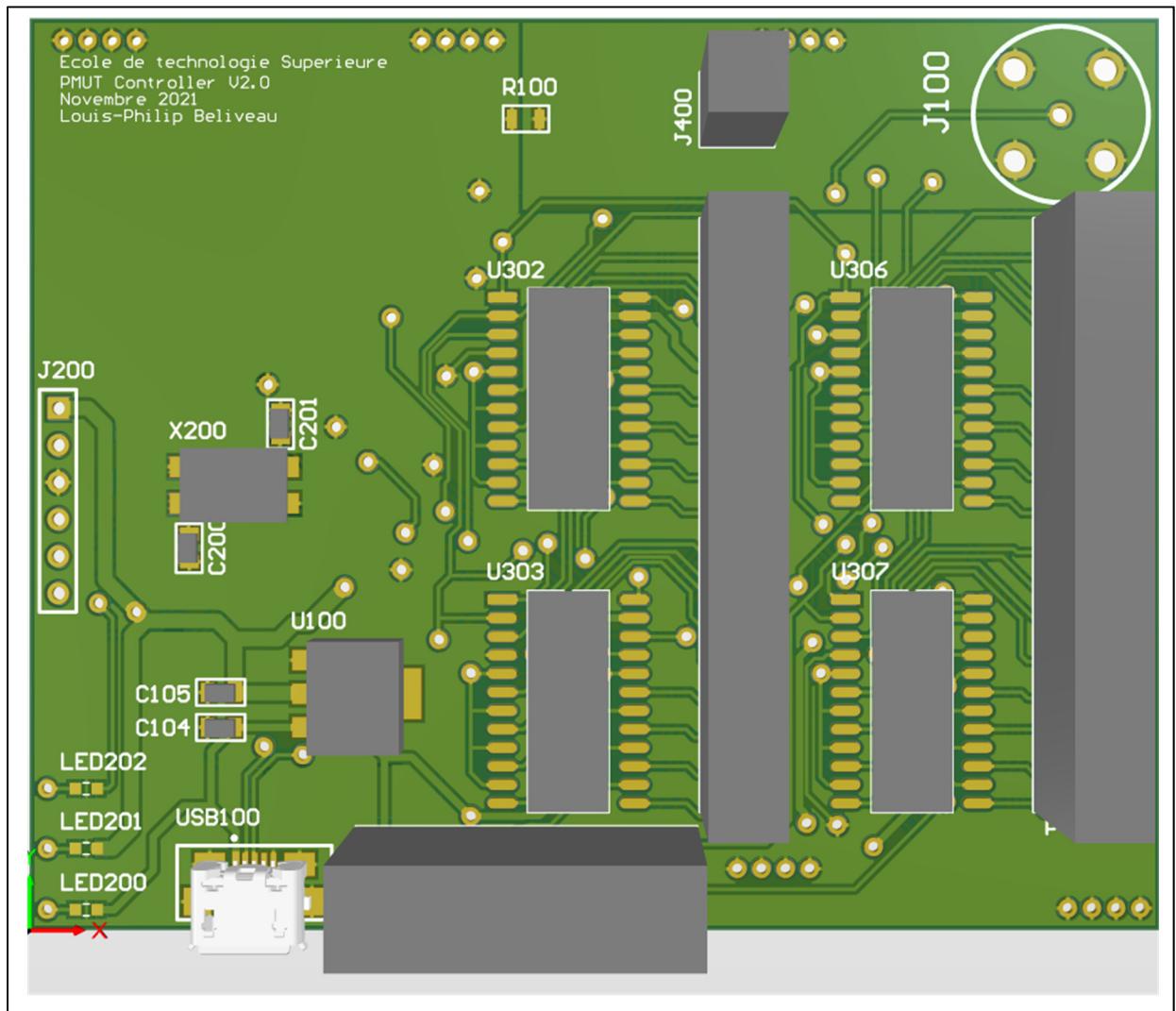
PCB : VUE 3D DE FACE

Figure-A III- 7

Vue 3D de face du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

PCB : VUE 3D DE DOS

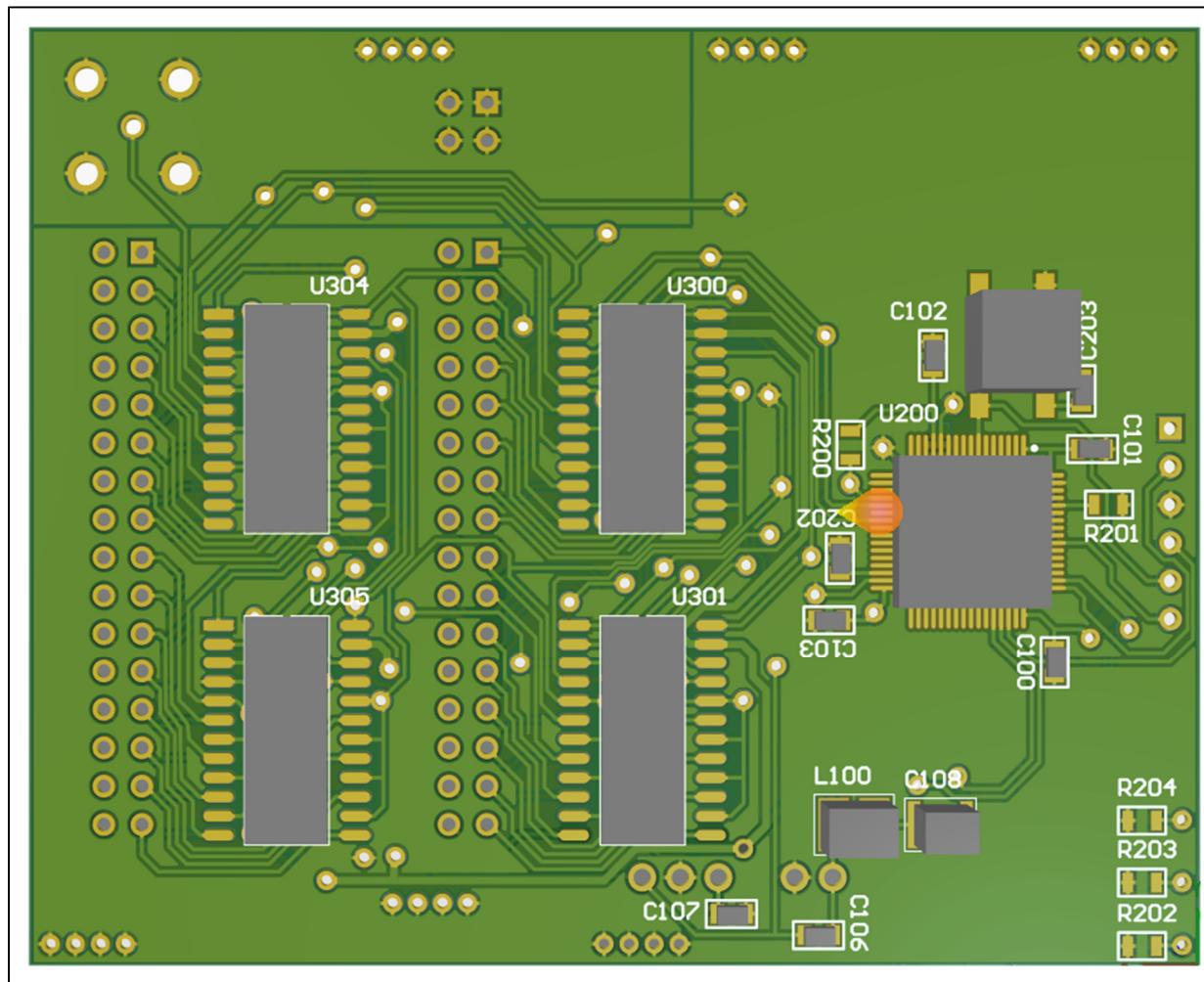


Figure-A III- 8

Vue 3D de dos du circuit de contrôle de la matrice de PMUT 8x8

ANNEXE IV

CODE DU CONTRÔLEUR DE MATRICE 4x4 EN LANGAGE C

Cette section présente le code embarqué utilisé pour contrôler une matrice de 16 PMUT. Afin de limiter le nombre de pages consacrées au code, les fichiers jugés triviaux ont été omis.

BOUCLE PRINCIPALE (main.c):

```
int main(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 1 */
    state_tst cState = {idle,0};
    uint16_t clkPin[MASK_SIZE] = {CLKH_Pin, CLKL_Pin};
    pmut_device_tst pmutArray;
    /* USER CODE END 1 */

    /* MCU Configuration-----*/
    /*-----*/
    /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the
    Systick. */
    HAL_Init();

    /* USER CODE BEGIN Init */

    /* USER CODE END Init */

    /* Configure the system clock */
    SystemClock_Config();

    /* USER CODE BEGIN SysInit */

    /* USER CODE END SysInit */

    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();
    MX_USB_DEVICE_Init();
    MX_TIM9_Init();
    /* USER CODE BEGIN 2 */

    init(&cState, &pmutArray, CLKL_GPIO_Port, CLR_GPIO_Port, CLR_Pin,
SIGB_Pin, clkPin, &htim9);
    /* USER CODE END 2 */

    /* Infinite loop */
    /* USER CODE BEGIN WHILE */
    while (1)
```

```
{
    cState.next (&cState);
    /* USER CODE END WHILE */

    /* USER CODE BEGIN 3 */
}
/* USER CODE END 3 */
}
```

MACHINE À ÉTAT (state.c):

```
*****
*****
*
* Filename      : state.c
* Author        : Louis-Philip Beliveau
* Description   : This file holds all functions of the state machine of
the PMUT controller
*
*****
*****
*/
#include <stdbool.h>
#include "state.h"
#include "usbd_cdc_if.h"
#include "protocol.h"
#include "config.h"
#include "pattern_storage.h"

#if TEST_MODE
#include <string.h>
#endif

/*
*****
*****
* public Variables
*****
*****
*/
buffer_t cbuffer; // Meant to be accessed on interrupts by USB service
/*
*****
*****
* private Variables
*****
```

```
*****
 */
static uint8_t ack[ACK_SIZE] = {CDC_ACK, '\n'};
static uint8_t nack[ACK_SIZE] = {CDC_NACK, '\n'};
static uint8_t sof = CDC_SOF;
static uint8_t eof = CDC_EOF;
static uint8_t getMsk = GET_MSK;
static uint8_t getSeq = GET_SEQ;
static pat_buf_tst patternBuf;
static pmut_device_tst *pmutArray;

/*
*****
 * private FUNCTIONS
*****
 */
static bool Check_SOF(uint8_t byte)
{
    bool valid_sof = false;

    //VALIDATE START OF FRAME
    if(byte == CDC_SOF)
    {
        valid_sof = true;
    }
    else
    {
        valid_sof = false;
    }

    return valid_sof;
}

static bool Check_EOF(uint8_t byte)
{
    bool valid_eof = false;

    //VALIDATE START OF FRAME
    if(byte == CDC_EOF)
    {
        valid_eof = true;
    }
    else
    {
        valid_eof = false;
    }

    return valid_eof;
}
```

```

}

/*
*****
* PUBLIC FUNCTIONS
*****
*/
void init(state_tst *state, pmut_device_tst *pmut, GPIO_TypeDef
*pmut_clk_port, GPIO_TypeDef *clr_b_port,
      uint16_t clr_pin, uint16_t b_pin, uint16_t *reg_clk_pins,
TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    pmutArray = pmut;

    buffer_init(&cbuffer, BUFFER_SIZE);
    pat_buf_init(&patternBuf, MASK_SIZE, PMUT_NUMBER);
    pmut_init(pmutArray, pmut_clk_port, clr_b_port, clr_pin, b_pin,
reg_clk_pins, htim);

    state->next = idle;
}

void idle(state_tst *state)
{
    //Next state idle unless frame is received
    state->next = idle;

    if(cbuffer.count >= MIN_COMMAND_SIZE)
    {
#if TEST_MODE
        uint8_t *tmp = "Entering Command interpreter\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp, strlen(tmp));
#endif
        state->next = command_interpreter;
    }
}

void command_interpreter(state_tst *state)
{
    uint8_t bufferByte;
    uint8_t command;

    bool validCommand = false;

    state->next = command_interpreter; // Stays in command interpreter
until more bytes come through

    buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
}

```

```

        if(Check_SOF(bufferByte)) //No action taken if start of frame not
detected
{
    //CHECK COMMAND CODE
    buffer_pull(&cbuffer, &command);

    switch(command)
    {
        case SET_MSK:
            state->next = Single_Change;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case GET_MSK:
            state->next = Single_send;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case LCH_SEQ:
            state->next = PMUT_Sequence;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case UPD_SEQ:
            state->next = Update_sequence;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case GET_SEQ:
            state->next = Send_Sequence;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        default:
            //Invalid command, byte flushed
            state->next = idle;
            CDC_Transmit_FS(nack, ACK_SIZE);
    }

#if TEST_MODE
    uint8_t *tmp_in = "Invalid command, byte flushed\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif
    break;
}
if(validCommand)
{
    buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
    if(!Check_EOF(bufferByte))
    {
        state->next = idle;
    }

#if TEST_MODE
    uint8_t *tmp_in = "Invalid EOF, command flushed\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif
}
validCommand = false;

```

```

        }

    }

else
{
    state->next = idle;
}
}

void Single_Change(state_tst *state)
{
    static uint32_t byteCount = 0;
    static uint8_t change_mask[MASK_SIZE] = {0};
    static bool Valid_SOF = false;
    uint8_t dataByte;

    state->next = Single_Change;

    //LOAD DATA FROM BUFFER
    if(cbuffer.count > 0)
    {
        buffer_pull(&cbuffer, &dataByte);
        if(!Valid_SOF)
        {
            if(Check_SOF(dataByte)) //No action taken if start of frame
not detected
            {
                Valid_SOF = true;
            }
            else
            {
                state->next = idle; // Goes back to idle if invalid data
frame is received
#endif TEST_MODE
                uint8_t *tmp_in = "Invalid SOF\r\n";
                CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif
            }
        }
        else
        {
            if(byteCount < SET_MSK_DATA_SIZE) // If data expected,
assumes data byte
            {
                change_mask[byteCount++] = dataByte;
            }
            else // If EOF expected, assumes EOF
            {
                //VERIFY RECEIVED EOF
                if(Check_EOF(dataByte))
                {
                    //UPDATE PATTERN THROUGH SHIFT REGISTER DRIVER
                    pmut_array_set(pmutArray, change_mask);
#endif TEST_MODE
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        uint8_t *tmp_in = "Loading following state: ";
        CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
        CDC_Transmit_FS(change_mask, strlen(change_mask));
        uint8_t *tmp_out = "\r\nBack to idle\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));
#endif

        state->next = idle;
    }
    else
    {
        // Frame not properly ended, no action taken
        state->next = idle;
    }
    Valid_SOF = false;
    byteCount %= SET_MSK_DATA_SIZE;
}
}
}

void Single_send(state_tst *state)
{
    uint8_t activeMask [MASK_SIZE] = {0};

#ifndef TEST_MODE
    uint8_t *tmp_in = "Sending active pattern to host\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif

    //Gets Active Pattern from PMUT driver
    pmut_array_get(pmutArray, activeMask);

    //Sends it back to host
    CDC_Transmit_FS(&sof, 1);
    CDC_Transmit_FS(&getMsk, 1);
    CDC_Transmit_FS(activeMask, MASK_SIZE);
    CDC_Transmit_FS(&eof, 1);
    CDC_Transmit_FS((uint8_t *)"\n", 1);
    state->next = idle;

#ifndef TEST_MODE
    uint8_t *tmp_out = "\r\nBack to idle\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));
#endif
}

void PMUT_Sequence(state_tst *state)
{
    static uint32_t patIdx = 0; //Display pattern
    uint32_t i;
    uint8_t activeMask [MASK_SIZE] = {0};
    uint8_t bufferByte;
}

```

```

state->next = PMUT_Sequence;

#if TEST_MODE
    if(patIdx == 0)
    {
        uint8_t *tmp_in = "Entering Display Sequence\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
    }
#endif

//CHECK IF NEW DATA IN BUFFER
if(cbuffer.count >= MIN_COMMAND_SIZE)
{
    buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
    if(Check_SOF(bufferByte))
    {
        buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
        if(bufferByte == ABT_SEQ)
        {
            buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
            if(Check_EOF(bufferByte))
            {
                patIdx = 0;
                state->next = idle; //Abort command accepted, going
to idle
                CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            }
        }
    }
}

// FETCH PATTERN AT PATTERN INDEX
pat_buf_get(&patternBuf, patIdx, activeMask, MASK_SIZE);

//UPDATE PATTERN THROUGH PMUT DRIVER
pmut_array_set(pmutArray, activeMask);

for(i = 0; i < SCAN_NUMBER; i++)
{
    HAL_Delay(SCAN_DELAY);

    pmut_array_flip(pmutArray);
#endif TEST_MODE
    volatile uint8_t test = 0;
    uint8_t *tmp_out = "\r\nDisplaying Pattern : ";
    CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));
}

```

```

        uint8_t nb[4] = {0};
        sprintf(nb, "%d: ", patIdx);
        test = strlen(nb);
        CDC_Transmit_FS(nb, strlen(nb));

        uint8_t nbb[3] = {0};
        pmut_array_get(pmutArray, nbb);
        test = strlen(nbb);
        CDC_Transmit_FS(nbb, strlen(nbb));
#endif
    }

    // INCREMENT DISPLAY INDEX IN SEQUENCE
    patIdx++;

    if (patIdx >= PMUT_NUMBER)
    {
        patIdx = 0;
        //When all patterns have been displayed, back to idle mode
        state->next = idle;
#ifndef TEST_MODE
        uint8_t *tmp_out = "\r\nSequence completed, going to idle\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));
#endif
    }
}

void Send_Sequence(state_tst *state)
{
    uint32_t patIdx;
    uint8_t maskBuffer[UPD_SEQ_DATA_SIZE] = {0};
#ifndef TEST_MODE
    uint8_t *tmp_in = "Entering Send to host Sequence\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif

    //FETCH ALL PATTERNS
    for (patIdx = 0; patIdx < patternBuf.maxIndex; patIdx++)
    {
        pat_buf_get(&patternBuf, patIdx, &maskBuffer[MASK_SIZE * patIdx],
MASK_SIZE);
    }

    //SENDS LOADED MASKS THROUGH CDC
    CDC_Transmit_FS(&sof, 1);
    CDC_Transmit_FS(&getSeq, 1);
    CDC_Transmit_FS(maskBuffer, UPD_SEQ_DATA_SIZE);
    CDC_Transmit_FS(&eof, 1);
    CDC_Transmit_FS((uint8_t *)"\r\n", 1);
    state->next = idle;

#ifndef TEST_MODE
    uint8_t *tmp_out = "\r\nBack to idle\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));

```

```

#endif
}

void Update_sequence(state_tst *state)
{
    uint32_t patIdx;
    uint8_t bufferByte;
    uint8_t maskBuffer[UPD_SEQ_DATA_SIZE] = { 0 };

    state->next = Update_sequence;

#if TEST_MODE
    static uint8_t flag = 0;
    if(flag == 0)
    {
        uint8_t *tmp_in = "Entering update loaded patterns Sequence\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
        flag = 1;
    }
#endif

    if(cbuffer.count >= UPD_SEQ_CMD_SIZE)
    {
        buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
        if(Check_SOF(bufferByte))
        {
            for(patIdx = 0; patIdx < UPD_SEQ_DATA_SIZE; patIdx++)
            {
                buffer_pull(&cbuffer, &maskBuffer[patIdx]);
            }
            buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
            if(Check_EOF(bufferByte))
            {
                // LOADED MASKS FROM CIRCBUFFER INTO PATTERN BUFFER
                for(patIdx = 0; patIdx < PMUT_NUMBER; patIdx++)
                {
                    pat_buf_set(&patternBuf, patIdx,
&maskBuffer[MASK_SIZE * patIdx], MASK_SIZE);
                }
                state->next = idle;
            }
            if TEST_MODE
                uint8_t *tmp_out = "Back to idle\r\n";
                CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));
                flag = 0;
        }
    }
}

```

PILOTE DE PMUT (PMUT.c) :

```
/*
*****
* Filename      : PMUT.c
* Author        : Louis-Philip Beliveau
* Description   : Interface for Control of PMUT array (Size must be
defined), currently stubbed for the demo version on breadboard
* DEMO Setup   : Direct control of PMUT through a single AQSS221N2S
Optocoupler Array controlling up 4 PMUT singals
* Real Setup   : Control through SN74LV164ADR shift register able to
output 8 signals (2 Optocoupler array per shift register)

*****
****/
```

```
/*
*****
* LOCAL INCLUDES

*****
*/
/* Standard */
#include <string.h>

/* Service */
#include "PMUT.h"

/*
*****
* LOCAL DEFINES

*****
*/

```

```
/*
*****
* LOCAL DATA
*****
```

```
*****
*/
/*
*****
* PRIVATE FUNCTIONS
*****
*/
static uint32_t pmut_update_shift_registers(pmut_device_tst *dev, const
uint8_t *mask)
{
    uint32_t i;
    uint32_t retVal = -1;
    // TODO: implement shift register driver
    for(i = 0; i < N_SHIFT_REG; i++)
    {
        shift_reg_load(&dev->sreg[i], &mask[i]);
    }
    retVal = 0;

    return retVal;
}
/*
*****
* PUBLIC FUNCTIONS
*****
*/
//! pmut_init: Initialises a PMUT structure
/*!
Brief:

param:
return: none
*/
void pmut_init(pmut_device_tst *pmut, GPIO_TypeDef *pmut_clk_port,
    GPIO_TypeDef *clr_b_port, uint16_t clr_pin, uint16_t b_pin,
    uint16_t *reg_clk_pins, TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    uint32_t i;
    uint32_t sregSize = (PMUT_NUMBER / MASK_SIZE);
    pmut->shift_clk_port = pmut_clk_port;
    pmut->clr_b_port = clr_b_port;
    pmut->clr_pin = clr_pin;
}
```

```

pmut->b_pin = b_pin;

memcpy(pmut->reg_clk_pins, reg_clk_pins, N_SHIFT_REG);

for(i = 0; i < N_SHIFT_REG; i++)
{
    shift_reg_init(&pmut->sreg[i], pmut_clk_port, clr_b_port,
clr_b_port,
                    clr_pin, reg_clk_pins[i], b_pin, sregSize, htim);
}

pmut_array_clear(pmut);
}

uint32_t pmut_array_set(pmut_device_tst *dev, const uint8_t *mask)
{
    uint32_t retVal = -1;

    if(!pmut_update_shift_registers(dev, mask))
    {
        memcpy(dev->active_mask, mask, PMUT_MASK_SIZE);
        retVal = 0;
    }

    return retVal;
}

uint32_t pmut_array_flip(pmut_device_tst *dev)
{
    uint32_t i;
    uint32_t retVal = -1;
    uint8_t mask[PMUT_MASK_SIZE];

    for(i = 0; i < PMUT_MASK_SIZE; i++)
    {
        mask[i] = ~dev->active_mask[i];
    }

    if(!pmut_update_shift_registers(dev, mask))
    {
        memcpy(dev->active_mask, mask, PMUT_MASK_SIZE);
        retVal = 0;
    }

    return retVal;
}

uint32_t pmut_array_get(const pmut_device_tst *dev, uint8_t *mask)
{
    uint32_t retVal = -1;

    memcpy(mask, dev->active_mask, PMUT_MASK_SIZE);

    return retVal;
}

```

```

uint32_t pmut_array_clear(pmut_device_tst *dev)
{
    uint32_t i;
    uint32_t retVal = -1;

    for(i = 0; i < N_SHIFT_REG; i++)
    {
        shift_reg_clear(&dev->sreg[i]);
    }
    memset(dev->active_mask, 0, PMUT_MASK_SIZE);
    retVal = 0;
    return retVal;
}

```

PROTOCOL DE COMUNICACION (protocol.h) :

```

/*****
*****
*   *
*   * Filename      : protocol.h
*   * Author        : Louis-Philip Beliveau
*   * Description   : This file holds the define for the communication
*   *                  protocol through the cdc device
*   *                  The protocol is supposed to have the following structure
*   *                  Start of frame byte -> Command/Data -> End of frame byte
*   *
*****
*****/
#ifndef PROJECT_PROTOCOL_H_
#define PROJECT_PROTOCOL_H_

#include "config.h"
/*



*****



*   * DEFINES



*****



*   /
#if TEST_MODE                                // Using different values in
test mode to make easier testing with putty
#define MIN_COMMAND_SIZE      3           // Minimal number of bytes in
command
#define ACK_SIZE              2           // Size of acknowledgment of
command sent back to host (same for nack)

```

```

#define CDC_SOF          0x73          // Start of Frame byte
#define CDC_EOF          0x65          // End of Frame byte
#define CDC_ACK          0x6b          // Acknowledgment byte
#define CDC_NACK          0x6e          // No acknowledgment byte
#define SET_MSK_DATA_SIZE MASK_SIZE      // Size of the DATA portion
of the protocol in bytes,1 bit/PMUT
#define UPD_SEQ_DATA_SIZE (MASK_SIZE * PMUT_NUMBER) // Size of the
DATA portion of the protocol in bytes,
                                         // 1
bit/PMUT * number of masks
#define UPD_SEQ_CMD_SIZE    UPD_SEQ_DATA_SIZE + 2 // Size of the
Size of the command + Data size

//Possible commands
typedef enum cmd_
{
    SET_MSK = 0x61,      // Change current array pattern
    GET_MSK,             // Poll current array pattern
    LCH_SEQ,             // Start display sequence going through loaded
patterns
    UPD_SEQ,             // Load new pattern sequence in memory
    GET_SEQ,             // Poll loaded sequence
    ABT_SEQ              // Abort Sequence, command to stop a display
sequence
} cmd_tet;
#else
#define MIN_COMMAND_SIZE 3 // Minimal number of bytes in
command
#define ACK_SIZE          2 // Size of acknowledgment of
command sent back to host (same for nack)
#define CDC_SOF          0xFE          // Start of Frame byte
#define CDC_EOF          0xFF          // End of Frame byte
#define CDC_ACK          0xFD          // Acknowledgment byte
#define CDC_NACK          0xFC          // No acknowledgment byte
#define SET_MSK_DATA_SIZE MASK_SIZE      // Size of the DATA portion
of the protocol in bytes,1 bit/PMUT
#define UPD_SEQ_DATA_SIZE (MASK_SIZE * PMUT_NUMBER) // Size of the
DATA portion of the protocol in bytes,
                                         // 1
bit/PMUT * number of masks
#define UPD_SEQ_CMD_SIZE    LOAD_SEQ_DATA_SIZE + 2 // Size of the
Size of the command + Data size

//Possible commands
typedef enum cmd_
{
    SET_MSK = 0,          // Change current array pattern
    GET_MSK,             // Poll current array pattern
    LCH_SEQ,             // Start display sequence going through loaded
patterns
    UPD_SEQ,             // Load new pattern sequence in memory
    GET_SEQ,             // Poll loaded sequence
    ABT_SEQ              // Abort Sequence, command to stop a display
sequence
} cmd_tet;

```

```
#endif /* TEST MOTE */
#endif /* PROJECT_PROTOCOL_H_ */
```

PILOTE DE REGISTRE À DÉCALAGE (shift_reg.c) :

```
/*********************************************
*****
* Filename      : shift_reg.c
* Author        : Louis-Philip Beliveau
* Description   : Driver for a SN74LV164ADR, used with A input always
high. Operated at 20MHz using a general purpose timer
*                  The same interrupt handler is used for all shift
register so the service can only be used for one shift
*                  register at the time
*
*****
****/
```

```
#include "shift_reg.h"
#include <stdbool.h>

/*
*****
* LOCAL VARIABLES
*****
*/
static shift_reg_tst *targetSreg;
static volatile bool busy = false;
static uint32_t timTick = 0;
/*
*****
* PUBLIC FUNCTIONS
*****
*/
void shift_reg_init(shift_reg_tst *sreg, GPIO_TypeDef *shift_clk_port,
GPIO_TypeDef *shift_clr_port,
      GPIO_TypeDef *shift_b_port, uint16_t clrPin, uint16_t clkPin,
      uint16_t bPin,
```

```

        uint32_t sregSize, TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    sreg->shift_b_port = shift_b_port;
    sreg->shift_clk_port = shift_clk_port;
    sreg->shift_clr_port = shift_clr_port;
    sreg->bPin = bPin;
    sreg->clkPin = clkPin;
    sreg->clrPin = clrPin;
    sreg->htim = htim;
    sreg->sregSize = sregSize;

    HAL_GPIO_WritePin(sreg->shift_b_port, sreg->bPin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(sreg->shift_clk_port, sreg->clkPin, GPIO_PIN_RESET);

    shift_reg_clear(sreg);
}

void shift_reg_config_pin(shift_reg_tst *sreg, uint16_t ioPin,
shift_reg_pin_tet pinType)
{
    switch(pinType)
    {
        case B_PIN:
            sreg->bPin = ioPin;
            break;
        case CLK_PIN:
            sreg->clkPin = ioPin;
            break;
        case CLR_PIN:
            sreg->clrPin = ioPin;
            break;
        default:
            break;
    }
}

void shift_reg_load(shift_reg_tst *sreg, const uint8_t *regByte)
{
    while(busy); // Wait until previous load is over before initiating
a new one

    targetSreg = sreg;
    targetSreg->sregByte = *regByte;
    busy = true;
    HAL_TIM_Base_Start_IT(sreg->htim);
}

void shift_reg_clear(shift_reg_tst *sreg)
{
    while(busy); // Wait in case a load is being done to avoid clearing
an active shift register
    // Toggle Clear pin during 1 ms to clear shift register
    HAL_GPIO_WritePin(sreg->shift_clr_port, sreg->clrPin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_Delay(1);
    HAL_GPIO_WritePin(sreg->shift_clr_port, sreg->clrPin, GPIO_PIN_SET);
}

```

```

    HAL_Delay(1);

    sreg->sregByte = 0;
}

/*
*****
* INTERRUPT HANDLER
*****
*/
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    GPIO_PinState clkBit;

    if (!(timTick % 2))
    {
        // Generate falling edge on CLK pin
        HAL_GPIO_WritePin(targetSreg->shift_clk_port, targetSreg->clkPin,
GPIO_PIN_RESET);

        // Set Bpin state on the falling edge of the CLK pin
        // Ton/Toff of Bpin must be lower than the timer period
        clkBit = (targetSreg->sregByte >> (timTick/2) & 1);
        HAL_GPIO_WritePin(targetSreg->shift_b_port, targetSreg->bPin,
clkBit);
    }
    else
    {
        // Generate rising edge on CLK pin
        HAL_GPIO_WritePin(targetSreg->shift_clk_port, targetSreg->clkPin,
GPIO_PIN_SET);
    }
    timTick++;

    if (timTick > (targetSreg->sregSize * 2))
    {
        timTick = 0;
        busy = false;
        HAL_GPIO_WritePin(targetSreg->shift_clk_port, targetSreg->clkPin,
GPIO_PIN_RESET);
        HAL_GPIO_WritePin(targetSreg->shift_b_port, targetSreg->bPin,
GPIO_PIN_RESET);
        HAL_TIM_Base_Stop_IT(htim);
    }
}

```

ANNEXE V

CODE DU CONTRÔLEUR DE MATRICE 8X8 EN LANGAGE C

Cette section présente le code embarqué utilisé pour contrôler une matrice de 64 PMUT. Afin de limiter le nombre de pages consacrées au code, les fichiers jugés triviaux ont été omis. Les fichiers de protocole et de boucle principale ont été omis parce qu'ils étaient identiques à ceux du code de contrôle de la matrice de 16PMUT.

MACHINE À ÉTAT (main.c):

```
/*
*****
* Filename    : state.c
* Author      : Louis-Philip Beliveau
* Description : This file holds all functions of the state machine of
the PMUT controller
*

*****
*/
#include <stdbool.h>
#include "state.h"
#include "usbd_cdc_if.h"
#include "protocol.h"
#include "config.h"
#include "pattern_storage.h"

#if TEST_MODE
#include <string.h>
#endif

/*
*****
* public Variables
*****
*/
buffer_t cbuffer; // Meant to be accessed on interrupts by USB service
```

```

/*
*****
***** private Variables *****
*****
*/
static uint8_t ack[ACK_SIZE] = {CDC_ACK, '\n'};
static uint8_t nack[ACK_SIZE] = {CDC_NACK, '\n'};
static uint8_t sof = CDC_SOF;
static uint8_t eof = CDC_EOF;
static uint8_t getMsk = GET_MSK;
static uint8_t getSeq = GET_SEQ;
static pat_buf_tst patternBuf;
static pmut_device_tst *pmutArray;

/*
*****
***** private FUNCTIONS *****
*****
*/
static bool Check_SOF(uint8_t byte)
{
    bool valid_sof = false;

    //VALIDATE START OF FRAME
    if(byte == CDC_SOF)
    {
        valid_sof = true;
    }
    else
    {
        valid_sof = false;
    }

    return valid_sof;
}

static bool Check_EOF(uint8_t byte)
{
    bool valid_eof = false;

    //VALIDATE START OF FRAME
    if(byte == CDC_EOF)
    {
        valid_eof = true;
    }
    else

```

```

    {
        valid_eof = false;
    }

    return valid_eof;
}

/*
*****
* PUBLIC FUNCTIONS
*****
*/
void init(state_tst *state, pmut_device_tst *pmut, GPIO_TypeDef
*spi_cs_port,
          uint8_t spi_cs_pin, SPI_HandleTypeDef *spi)
{
    pmutArray = pmut;

    buffer_init(&cbuffer, BUFFER_SIZE);
    pat_buf_init(&patternBuf, MASK_SIZE, PMUT_NUMBER);
    pmut_init(pmutArray, spi_cs_port, spi_cs_pin, spi);

    state->next = idle;
}

void idle(state_tst *state)
{
    //Next state idle unless frame is received
    state->next = idle;

    if(cbuffer.count >= MIN_COMMAND_SIZE)
    {
#if TEST_MODE
        uint8_t *tmp = "Entering Command interpreter\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp, strlen(tmp));
#endif
        state->next = command_interpreter;
    }
}

void command_interpreter(state_tst *state)
{
    uint8_t bufferByte;
    uint8_t command;

    bool validCommand = false;
}

```

```

state->next = command_interpreter; // Stays in command interpreter
until more bytes come through

buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
if(Check_SOF(bufferByte)) //No action taken if start of frame not
detected
{
    //CHECK COMMAND CODE
    buffer_pull(&cbuffer, &command);

    switch(command)
    {
        case SET_MSK:
            state->next = Single_Change;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case GET_MSK:
            state->next = Single_send;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case LCH_SEQ:
            state->next = PMUT_Sequence;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case UPD_SEQ:
            state->next = Update_sequence;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        case GET_SEQ:
            state->next = Send_Sequence;
            validCommand = true;
            CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            break;
        default:
            //Invalid command, byte flushed
            state->next = idle;
            CDC_Transmit_FS(nack, ACK_SIZE);
    }
    #if TEST_MODE
        uint8_t *tmp_in = "Invalid command, byte flushed\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
    #endif
    break;
}
if(validCommand)
{
    buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
    if(!Check_EOF(bufferByte))
    {
        state->next = idle;
    }
    #if TEST_MODE
        uint8_t *tmp_in = "Invalid EOF, command flushed\r\n";
    #endif
}

```

```

        CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif
    }
    validCommand = false;
}
}

else
{
    state->next = idle;
}
}

void Single_Change(state_tst *state)
{
    static uint32_t byteCount = 0;
    static uint8_t change_mask[MASK_SIZE] = {0};
    static bool Valid_SOF = false;
    uint8_t dataByte;

    state->next = Single_Change;

    //LOAD DATA FROM BUFFER
    if(cbuffer.count > 0)
    {
        buffer_pull(&cbuffer, &dataByte);
        if(!Valid_SOF)
        {
            if(Check_SOF(dataByte)) //No action taken if start of frame
not detected
            {
                Valid_SOF = true;
            }
            else
            {
                state->next = idle; // Goes back to idle if invalid data
frame is received
#endif TEST_MODE
                uint8_t *tmp_in = "Invalid SOF\r\n";
                CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif
            }
        }
        else
        {
            if(byteCount < SET_MSK_DATA_SIZE) // If data expected,
assumes data byte
            {
                change_mask[byteCount++] = dataByte;
            }
            else // If EOF expected, assumes EOF
            {
                //VERIFY RECEIVED EOF
                if(Check_EOF(dataByte))
                {

```

```

        //UPDATE PATTERN THROUGH SHIFT REGISTER DRIVER
        pmut_array_set(pmutArray, change_mask);

#if TEST_MODE
        uint8_t *tmp_in = "Loading following state: ";
        CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
        CDC_Transmit_FS(change_mask, strlen(change_mask));
        uint8_t *tmp_out = "\r\nBack to idle\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));
#endif

        state->next = idle;
    }
    else
    {
        // Frame not properly ended, no action taken
        state->next = idle;
    }
    Valid_SOF = false;
    byteCount %= SET_MSK_DATA_SIZE;
}
}
}

void Single_send(state_tst *state)
{
    uint8_t activeMask[MASK_SIZE] = { 0 };

#if TEST_MODE
    uint8_t *tmp_in = "Sending active pattern to host\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif

    //Gets Active Pattern from PMUT driver
    pmut_array_get(pmutArray, activeMask);

    //Sends it back to host
    CDC_Transmit_FS(&sof, 1);
    CDC_Transmit_FS(&getMsk, 1);
    CDC_Transmit_FS(activeMask, MASK_SIZE);
    CDC_Transmit_FS(&eof, 1);
    CDC_Transmit_FS((uint8_t *)"\n", 1);
    state->next = idle;

#if TEST_MODE
    uint8_t *tmp_out = "\r\nBack to idle\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));
#endif
}

void PMUT_Sequence(state_tst *state)
{

```

```

static uint32_t patIdx = 0; //Display pattern
uint32_t i;
uint8_t activeMask [MASK_SIZE] = {0};
uint8_t bufferByte;

state->next = PMUT_Sequence;

#ifndef TEST_MODE
    if(patIdx == 0)
    {
        uint8_t *tmp_in = "Entering Display Sequence\r\n";
        CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
    }
#endif

//CHECK IF NEW DATA IN BUFFER
if(cbuffer.count >= MIN_COMMAND_SIZE)
{
    buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
    if(Check_SOF(bufferByte))
    {
        buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
        if(bufferByte == ABT_SEQ)
        {
            buffer_pull(&cbuffer, &bufferByte);
            if(Check_EOF(bufferByte))
            {
                patIdx = 0;
                state->next = idle; //Abort command accepted, going
to idle
                CDC_Transmit_FS(ack, ACK_SIZE);
            }
        }
    }
}

// FETCH PATTERN AT PATTERN INDEX
pat_buf_get(&patternBuf, patIdx, activeMask, MASK_SIZE);

//UPDATE PATTERN THROUGH PMUT DRIVER
pmut_array_set(pmutArray, activeMask);

for(i = 0; i < SCAN_NUMBER; i++)
{
    // TODO: DETERMINE PROPER DELAY BETWEEN MASK SWITCH
    HAL_Delay(SCAN_DELAY);
}

```

```

        pmut_array_flip(pmutArray);

#if TEST_MODE
    volatile uint8_t test = 0;
    uint8_t *tmp_out = "\r\nDisplaying Pattern : ";
    CDC_Transmit_FS(tmp_out, strlen(tmp_out));

    uint8_t nb[4] = {0};
    sprintf(nb, "%d: ", patIdx);
    test = strlen(nb);
    CDC_Transmit_FS(nb, strlen(nb));

    uint8_t nbb[3] = {0};
    pmut_array_get(pmutArray, nbb);
    test = strlen(nbb);
    CDC_Transmit_FS(nbb, strlen(nbb));
#endif
}

//TODO: Implement proper sequence for mask
// INCREMENT DISPLAY INDEX IN SEQUENCE
patIdx++;

if (patIdx >= PMUT_NUMBER)
{
    patIdx = 0;
    //When all patterns have been displayed, back to idle mode
    state->next = idle;
#endif
}

void Send_Sequence(state_tst *state)
{
    uint32_t patIdx;
    uint8_t maskBuffer[UPD_SEQ_DATA_SIZE] = {0};
#if TEST_MODE
    uint8_t *tmp_in = "Entering Send to host Sequence\r\n";
    CDC_Transmit_FS(tmp_in, strlen(tmp_in));
#endif

    //FETCH ALL PATTERNS
    for (patIdx = 0; patIdx < patternBuf.maxIndex; patIdx++)
    {
        pat_buf_get(&patternBuf, patIdx, &maskBuffer[MASK_SIZE * patIdx], MASK_SIZE);
    }

    //SENDS LOADED MASKS THROUGH CDC
    CDC_Transmit_FS(&sof, 1);
    CDC_Transmit_FS(&getSeq, 1);
    CDC_Transmit_FS(maskBuffer, UPD_SEQ_DATA_SIZE);
    CDC_Transmit_FS(&eof, 1);
}

```



```
}
```

PILOTE DE PMUT

```
/*
*****
*****
*
* Filename      : PMUT.c
* Author        : Louis-Philip Beliveau
* Description   : Interface for Control of PMUT array (Size must be
defined), currently stubbed for the demo version on breadboard
* Real Setup   : Control through 8 MAX335 ac switch able to output 8
signals each
*****
*****
****/
```

```
/*
*****
*****
* LOCAL INCLUDES
*****
*****
*/
/* Standard */
#include <string.h>

/* Service */
#include "PMUT.h"

/*
*****
*****
* LOCAL DEFINES
*****
*****
*/
/* LOCAL DATA
```

```
*****
*/
/*
* PRIVATE FUNCTIONS

*****
*/
static uint32_t pmut_update_shift_registers(pmut_device_tst *dev,const
uint8_t *mask)
{
    uint32_t i;
    uint32_t retVal = -1;
    // TODO: implement shift register driver
    for(i = 0; i < N_ANALOG_SW; i++)
    {
        max335_load_byte(&dev->analog_switch, &mask[i]);
    }
    retVal = 0;

    return retVal;
}
/*
*****
* PUBLIC FUNCTIONS

*****
*/
//! pmut_init: Initialises a PMUT structure
/*! Brief:
    param:
    return: none
*/
void pmut_init(pmut_device_tst *pmut, GPIO_TypeDef *cs_port,
               uint8_t cs_pin, SPI_HandleTypeDef *spi)
{
    max335_init(&pmut->analog_switch, cs_port, cs_pin, spi);

    pmut_array_clear(pmut);
}

uint32_t pmut_array_set(pmut_device_tst *dev,const uint8_t *mask)
```

```

{
    uint32_t retVal = -1;

    if(!pmut_update_shift_registers(dev, mask))
    {
        memcpy(dev->active_mask, mask, PMUT_MASK_SIZE);
        retVal = 0;
    }

    return retVal;
}

uint32_t pmut_array_flip(pmut_device_tst *dev)
{
    uint32_t i;
    uint32_t retVal = -1;
    uint8_t mask[PMUT_MASK_SIZE];

    for(i = 0; i < PMUT_MASK_SIZE; i++)
    {
        mask[i] = ~dev->active_mask[i];
    }

    if(!pmut_update_shift_registers(dev, mask))
    {
        memcpy(dev->active_mask, mask, PMUT_MASK_SIZE);
        retVal = 0;
    }

    return retVal;
}

uint32_t pmut_array_get(const pmut_device_tst *dev, uint8_t *mask)
{
    uint32_t retVal = -1;

    memcpy(mask, dev->active_mask, PMUT_MASK_SIZE);

    return retVal;
}

uint32_t pmut_array_clear(pmut_device_tst *dev)
{
    uint32_t i;
    uint32_t retVal = -1;

    for(i = 0; i < N_ANALOG_SW; i++)
    {
        max335_clear(&dev->analog_switch);
    }
    memset(dev->active_mask, 0, PMUT_MASK_SIZE);
    retVal = 0;
    return retVal;
}

```

PILOTE DE MAX335 (MAX335.c) :

```
*****
*****
* 
* Filename      : MAX335.c
* Author        : Louis-Philip Beliveau
* Description   : Driver for a MAX335, analog switch with an SPI
interface. The maximum SCLK speed of the MAX335 is 2.1MHz
*                  so the SPI frequency has to be adjusted in
consideration. CPOL = 0 and CPHA = 0 is used as per recommended
*                  in the datasheet.
* 
*****
```

```
*****
```

```
#include "MAX335.h"
#include <stdbool.h>

/*
*****
```

```
*****
```

```
* LOCAL VARIABLES
```

```
*****
```

```
*****
```

```
*/
```

```
static max335_tst *device;
static volatile bool deviceBusy = false;
static uint8_t clearByte = 0;
```

```
/*
*****
```

```
*****
```

```
* PUBLIC FUNCTIONS
```

```
*****
```

```
*****
```

```
*/
```

```
void max335_init(max335_tst *dev, GPIO_TypeDef *cs_port, uint16_t csPin,
SPI_HandleTypeDef *spi)
{
    device = dev;
    device->spiHandle = spi;
    device->spiCsPin = csPin;
    device->spi_cs_port = cs_port;

    // Clear max335 register on init
    max335_clear(dev);
}
```

```

void max335_load_byte(max335_tst *dev, const uint8_t *dataByte)
{
    while(deviceBusy); // waits for DMA SPI TX flag to indicate TX
completed

    device = dev;
    deviceBusy = true;
    device->dataByte = *dataByte;
    HAL_GPIO_WritePin(device->spi_cs_port, device->spiCsPin,
GPIO_PIN_RESET);
    HAL_SPI_Transmit_DMA(device->spiHandle, &device->dataByte,
sizeof(device->dataByte));
}

void max335_clear(max335_tst *dev)
{
    while(deviceBusy); // waits for DMA SPI TX flag to indicate TX
completed

    device = dev;
    deviceBusy = true;
    HAL_GPIO_WritePin(device->spi_cs_port, device->spiCsPin,
GPIO_PIN_RESET);
    HAL_SPI_Transmit_DMA(device->spiHandle, &clearByte,
sizeof(clearByte));
}

/*
*****
*****
* INTERRUPT HANDLER
*****
*/
void HAL_SPI_TxCpltCallback(SPI_HandleTypeDef *hspi)
{
    HAL_GPIO_WritePin(device->spi_cs_port, device->spiCsPin,
GPIO_PIN_SET);
    deviceBusy = false;
}

```

ANNEXE VI

CODE DE L'INTERFACE UTILISATEUR MATLAB

La section présente le code utilisé pour interfaçer l'ordinateur de contrôle avec le circuit de contrôle des PMUT.

```
classdef PMUT_control_exported < matlab.apps.AppBase

    % Properties that correspond to app components
    properties (Access = public)
        UIFigure                               matlab.ui.Figure
        SaveatPositionButton                   matlab.ui.control.Button
        SequencePanel                          matlab.ui.container.Panel
        Image                                   matlab.ui.control.Image
        PositionSpinner                        matlab.ui.control.Spinner
        PositionSpinnerLabel                  matlab.ui.control.Label
        GetMaskEditField                      matlab.ui.control.EditField
        GetMaskEditFieldLabel                matlab.ui.control.Label
        SetMaskEditField                      matlab.ui.control.EditField
        SetMaskEditFieldLabel                matlab.ui.control.Label
        DebugEditField                        matlab.ui.control.EditField
        DebugEditFieldLabel                  matlab.ui.control.Label
        PMUTStatusLabel                       matlab.ui.control.Label
        D4CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        D3CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        D2CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        D1CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        C4CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        C3CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        C2CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        C1CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        B4CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        B3CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        B2CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        B1CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        A4CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        A3CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        A2CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        A1CheckBox                            matlab.ui.control.CheckBox
        CommandStatusEditField               matlab.ui.control.EditField
        CommandStatusEditFieldLabel          matlab.ui.control.Label
        connectionLabel                      matlab.ui.control.Label
        AbortSequenceButton                  matlab.ui.control.Button
        LaunchSequenceButton                matlab.ui.control.Button
        GetSequenceButton                   matlab.ui.control.Button
        UpdateSequenceButton                matlab.ui.control.Button
        GetMaskButton                        matlab.ui.control.Button
        SetMaskButton                        matlab.ui.control.Button
        ConnectButton                        matlab.ui.control.Button
```

```

AvailableTTYDropDown      matlab.ui.control.DropDown
AvailableTTYDropDownLabel matlab.ui.control.Label
ScanPortsButton          matlab.ui.control.Button

end

properties (Access = private)
    portList = "" % String of the available ports
    port;
    getMask = uint8([0,0]);
    setMask = uint8([0,0]);
    command = "none";
    testMode = 1;
    img_name; % path to temporary buffer image
    img; % buffer for UI image update
end

properties (Access = public)
    protocol;
    sequence;
    PMUTnumber = 16; % Number of PMUT controlled by the device
    maskSize = 2; % size of a mask in bytes
end

methods (Access = private)
    function initialize(app,~)
        app.protocol = generate_protocol(app.testMode);
        app.connectionLabel.Text = "Idle";

        app.sequence = uint8(zeros(app.PMUTnumber,app.maskSize));
        for i = 1:app.PMUTnumber
            app.img_name = sprintf('./ressources/%d.png',i);
            if ~isfile(app.img_name)
                app.sequence(i,:) = app.setMask;
                imwrite(mask_to_image(app.setMask,
app.maskSize),app.img_name);
            else
                app.img = imread(app.img_name);
                app.sequence(i,:) = image_to_mask(app.img,
app.maskSize);
            end
        end
        app.img_name =
sprintf('./ressources/%d.png',app.PositionSpinner.Value);
        app.img = imread(app.img_name);
        app.Image.ImageSource = repmat(app.img, 1, 1, 3);
    end

    function updateCheckBox(app,~)
        set(app.A1CheckBox,'value',bitget(app.setMask(1),8));
        set(app.A2CheckBox,'value',bitget(app.setMask(1),7));
        set(app.A3CheckBox,'value',bitget(app.setMask(1),6));
        set(app.A4CheckBox,'value',bitget(app.setMask(1),5));
        set(app.B1CheckBox,'value',bitget(app.setMask(1),4));
        set(app.B2CheckBox,'value',bitget(app.setMask(1),3));
        set(app.B3CheckBox,'value',bitget(app.setMask(1),2));

```

```

        set (app.B4CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(1),1));
        set (app.C1CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),8));
        set (app.C2CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),7));
        set (app.C3CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),6));
        set (app.C4CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),5));
        set (app.D1CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),4));
        set (app.D2CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),3));
        set (app.D3CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),2));
        set (app.D4CheckBox, 'value',bitget (app.setMask(2),1));
    end
end
methods (Access = public)

    function setInputMask(app,~)
        app.GetMaskEditField.Value =
sprintf ('%02X%02X',app.protocol.pld(1),app.protocol.pld(2));
    end
    function refreshSequence(app,~)
        for i = 1:app.PMUTnumber
            app.img = mask_to_image(app.sequence(i,:), app.maskSize);
            app.img_name = sprintf ('./ressources/%d.png',i);
            imwrite(app.img, app.img_name);

            if i == app.PositionSpinner.Value
                app.Image.ImageSource = repmat(app.img, 1, 1, 3);
            end
        end
    end
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

    % Code that executes after component creation
    function startupFcn(app)
        initialize(app);
    end

    % Button pushed function: ScanPortsButton
    function ScanPortsButtonPushed(app, event)
        app.portList = serialportlist ("available");
        if isempty(app.portList) == 0
            app.AvailableTTYDropDown.Items = app.portList;
        end
    end

    % Button pushed function: ConnectButton
    function ConnectButtonPushed(app, event)
        try
            app.port =
serialport(app.AvailableTTYDropDown.Value,115200);
            configureCallback(app.port,"terminator",@(src,evt)
serialCallback(app, evt, src, evt));
        end
    end
end

```

```

        app.connectionLabel.Text = "Connected";
    catch e
        app.connectionLabel.Text = "Failed";
    end
end

% Button pushed function: SetMaskButton
function SetMaskButtonPushed(app, event)
    app.command = "SetMask";
    %newmask = app.SetMaskEditField.Value;
    newmask = app.setMask;

    set_mask(app.port, newmask, app.protocol);
end

% Button pushed function: GetMaskButton
function GetMaskButtonPushed(app, event)
    app.command = "GetMask";
    write(app.port, app.protocol.getMskCmd, "uint8");
end

% Button pushed function: UpdateSequenceButton
function UpdateSequenceButtonPushed(app, event)
    app.command = "UpdateSeq";
    % TODO: Generate Hadamar mask and send them
    update_sequence(app.port, app.sequence, app.protocol);
end

% Button pushed function: GetSequenceButton
function GetSequenceButtonPushed(app, event)
    app.command = "FetchSeq";
    get_mask(app.port, app.protocol);
end

% Button pushed function: LaunchSequenceButton
function LaunchSequenceButtonPushed(app, event)
    app.command = "LaunchSeq";
    write(app.port, app.protocol.lchSeqCmd, "uint8");
end

% Button pushed function: AbortSequenceButton
function AbortSequenceButtonPushed(app, event)
    app.command = "StopSeq";
    write(app.port, app.protocol.abtSeqCmd, "uint8");
end

% Value changed function: SetMaskEditField
function SetMaskEditFieldValueChanged(app, event)
    value = app.SetMaskEditField.Value;
    if strlength(value) <= 2
        app.setMask(1) = hex2dec(value);
    elseif strlength(value) <=4
        temp = char(value);
        app.setMask(1) = hex2dec(temp(1:2));
        app.setMask(2) = hex2dec(temp(3:end));
    end
end

```

```

    else
        temp = char(value);
        app.setMask(1) = hex2dec(temp(1:2));
        app.setMask(2) = hex2dec(temp(3:4));
    end
    app.updateCheckBox();
end

% Value changed function: A1CheckBox
function A1CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 8,
app.A1CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%%02X%%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
end

% Value changed function: A2CheckBox
function A2CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 7,
app.A2CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%%02X%%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
end

% Value changed function: A3CheckBox
function A3CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 6,
app.A3CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%%02X%%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
end

% Value changed function: A4CheckBox
function A4CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 5,
app.A4CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%%02X%%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
end

% Value changed function: B1CheckBox
function B1CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 4,
app.B1CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%%02X%%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
end

% Value changed function: B2CheckBox
function B2CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 3,
app.B2CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%%02X%%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
end

```

```

% Value changed function: B3CheckBox
function B3CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 2,
app.B3CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%.02X%.02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

% Value changed function: B4CheckBox
function B4CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(1) = bitset(app.setMask(1), 1,
app.B4CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%.02X%.02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

% Value changed function: C1CheckBox
function C1CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 8,
app.C1CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%.02X%.02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

% Value changed function: C2CheckBox
function C2CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 7,
app.C2CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%.02X%.02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

% Value changed function: C3CheckBox
function C3CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 6,
app.C3CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%.02X%.02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

% Value changed function: C4CheckBox
function C4CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 5,
app.C4CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%.02X%.02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

% Value changed function: D1CheckBox
function D1CheckBoxValueChanged(app, event)
    app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 4,
app.D1CheckBox.Value);
    app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%.02X%.02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

```

```

    end

    % Value changed function: D2CheckBox
    function D2CheckBoxValueChanged(app, event)
        app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 3,
app.D2CheckBox.Value);
        app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%02X%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

    % Value changed function: D3CheckBox
    function D3CheckBoxValueChanged(app, event)
        app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 2,
app.D3CheckBox.Value);
        app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%02X%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end
% Value changed function: D4CheckBox
    function D4CheckBoxValueChanged(app, event)
        app.setMask(2) = bitset(app.setMask(2), 1,
app.D4CheckBox.Value);
        app.SetMaskEditField.Value =
sprintf('%02X%02X',app.setMask(1),app.setMask(2));
    end

    % Button pushed function: SaveatPositionButton
    function SaveatPositionButtonPushed(app, event)
        imwrite(mask_to_image(app.setMask,
app.maskSize),app.img_name);
        app.sequence(app.PositionSpinner.Value,:)= app.setMask;
        app.img = imread(app.img_name);
        app.Image.ImageSource = repmat(app.img, 1, 1, 3);
    end

    % Value changed function: PositionSpinner
    function PositionSpinnerValueChanged(app, event)
        app.img_name =
sprintf('./ressources/%d.png',app.PositionSpinner.Value);
        app.img = imread(app.img_name);
        app.Image.ImageSource = repmat(app.img, 1, 1, 3);
    end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

    % Create UIFigure and components
    function createComponents(app)

        % Create UIFigure and hide until all components are created
        app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
        app.UIFigure.Position = [100 100 580 437];
        app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';

        % Create ScanPortsButton

```

```

app.ScanPortsButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.ScanPortsButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ScanPortsButtonPushed, true);
app.ScanPortsButton.Position = [10 405 100 22];
app.ScanPortsButton.Text = 'Scan Ports';

% Create AvailableTTYDropDownLabel
app.AvailableTTYDropDownLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.AvailableTTYDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.AvailableTTYDropDownLabel.Position = [124 405 80 22];
app.AvailableTTYDropDownLabel.Text = 'Available TTY';

% Create AvailableTTYDropDown
app.AvailableTTYDropDown = uidropdown(app.UIFigure);
app.AvailableTTYDropDown.Items = {};
app.AvailableTTYDropDown.Placeholder = 'None';
app.AvailableTTYDropDown.Position = [212 405 89 22];
app.AvailableTTYDropDown.Value = {};

% Create ConnectButton
app.ConnectButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.ConnectButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ConnectButtonPushed, true);
app.ConnectButton.Position = [10 367 100 22];
app.ConnectButton.Text = 'Connect';

% Create SetMaskButton
app.SetMaskButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.SetMaskButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@SetMaskButtonPushed, true);
app.SetMaskButton.Position = [10 213 100 22];
app.SetMaskButton.Text = 'Set Mask';

% Create GetMaskButton
app.GetMaskButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.GetMaskButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@GetMaskButtonPushed, true);
app.GetMaskButton.Position = [10 177 100 22];
app.GetMaskButton.Text = 'Get Mask';

% Create UpdateSequenceButton
app.UpdateSequenceButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.UpdateSequenceButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @UpdateSequenceButtonPushed, true);
app.UpdateSequenceButton.Position = [311 367 112 22];
app.UpdateSequenceButton.Text = 'Update Sequence';

% Create GetSequenceButton
app.GetSequenceButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.GetSequenceButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @GetSequenceButtonPushed, true);
app.GetSequenceButton.Position = [459 367 112 22];
app.GetSequenceButton.Text = 'Get Sequence';

% Create LaunchSequenceButton

```

```

    app.LaunchSequenceButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
    app.LaunchSequenceButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @LaunchSequenceButtonPushed, true);
    app.LaunchSequenceButton.BackgroundColor = [0.3922 0.8314
0.0745];
    app.LaunchSequenceButton.Position = [311 76 112 22];
    app.LaunchSequenceButton.Text = 'Launch Sequence';

    % Create AbortSequenceButton
    app.AbortSequenceButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
    app.AbortSequenceButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @AbortSequenceButtonPushed, true);
    app.AbortSequenceButton.BackgroundColor = [0.6353 0.0784
0.1843];
    app.AbortSequenceButton.Position = [459 76 112 22];
    app.AbortSequenceButton.Text = 'Abort Sequence';

    % Create connectionLabel
    app.connectionLabel = uilabel(app.UIFigure);
    app.connectionLabel.BackgroundColor = [1 1 1];
    app.connectionLabel.HorizontalAlignment = 'center';
    app.connectionLabel.Position = [121 367 100 22];
    app.connectionLabel.Text = 'Disconnected';

    % Create CommandStatusEditFieldLabel
    app.CommandStatusEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
    app.CommandStatusEditFieldLabel.HorizontalAlignment =
'right';
    app.CommandStatusEditFieldLabel.Position = [334 405 98 22];
    app.CommandStatusEditFieldLabel.Text = 'Command Status';

    % Create CommandStatusEditField
    app.CommandStatusEditField = uieditfield(app.UIFigure,
'text');
    app.CommandStatusEditField.Placeholder = 'Idle';
    app.CommandStatusEditField.Position = [447 405 100 22];

    % Create A1CheckBox
    app.A1CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.A1CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@A1CheckBoxValueChanged, true);
    app.A1CheckBox.Text = 'A1';
    app.A1CheckBox.Position = [18 310 45 22];

    % Create A2CheckBox
    app.A2CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.A2CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@A2CheckBoxValueChanged, true);
    app.A2CheckBox.Text = 'A2';
    app.A2CheckBox.Position = [18 289 45 22];

    % Create A3CheckBox
    app.A3CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.A3CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@A3CheckBoxValueChanged, true);

```

```

app.A3CheckBox.Text = 'A3';
app.A3CheckBox.Position = [18 268 45 22];

% Create A4CheckBox
app.A4CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
app.A4CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@A4CheckBoxValueChanged, true);
app.A4CheckBox.Text = 'A4';
app.A4CheckBox.Position = [18 247 45 22];

% Create B1CheckBox
app.B1CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
app.B1CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@B1CheckBoxValueChanged, true);
app.B1CheckBox.Text = 'B1';
app.B1CheckBox.Position = [62 310 45 22];

% Create B2CheckBox
app.B2CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
app.B2CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@B2CheckBoxValueChanged, true);
app.B2CheckBox.Text = 'B2';
app.B2CheckBox.Position = [62 289 45 22];

% Create B3CheckBox
app.B3CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
app.B3CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@B3CheckBoxValueChanged, true);
app.B3CheckBox.Text = 'B3';
app.B3CheckBox.Position = [62 268 45 22];

% Create B4CheckBox
app.B4CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
app.B4CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@B4CheckBoxValueChanged, true);
app.B4CheckBox.Text = 'B4';
app.B4CheckBox.Position = [62 247 45 22];

% Create C1CheckBox
app.C1CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
app.C1CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@C1CheckBoxValueChanged, true);
app.C1CheckBox.Text = 'C1';
app.C1CheckBox.Position = [106 310 45 22];

% Create C2CheckBox
app.C2CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
app.C2CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@C2CheckBoxValueChanged, true);
app.C2CheckBox.Text = 'C2';
app.C2CheckBox.Position = [106 289 45 22];

% Create C3CheckBox
app.C3CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);

```

```
    app.C3CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@C3CheckBoxValueChanged, true);
    app.C3CheckBox.Text = 'C3';
    app.C3CheckBox.Position = [106 268 45 22];

    % Create C4CheckBox
    app.C4CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.C4CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@C4CheckBoxValueChanged, true);
    app.C4CheckBox.Text = 'C4';
    app.C4CheckBox.Position = [106 247 45 22];

    % Create D1CheckBox
    app.D1CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.D1CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@D1CheckBoxValueChanged, true);
    app.D1CheckBox.Text = 'D1';
    app.D1CheckBox.Position = [150 310 45 22];

    % Create D2CheckBox
    app.D2CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.D2CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@D2CheckBoxValueChanged, true);
    app.D2CheckBox.Text = 'D2';
    app.D2CheckBox.Position = [150 289 45 22];

    % Create D3CheckBox
    app.D3CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.D3CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@D3CheckBoxValueChanged, true);
    app.D3CheckBox.Text = 'D3';
    app.D3CheckBox.Position = [150 268 45 22];

    % Create D4CheckBox
    app.D4CheckBox = uicheckbox(app.UIFigure);
    app.D4CheckBox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@D4CheckBoxValueChanged, true);
    app.D4CheckBox.Text = 'D4';
    app.D4CheckBox.Position = [150 247 45 22];

    % Create PMUTArrayLabel
    app.PMUTArrayLabel = uilabel(app.UIFigure);
    app.PMUTArrayLabel.Position = [18 331 71 22];
    app.PMUTArrayLabel.Text = 'PMUT Array';

    % Create DebugEditFieldLabel
    app.DebugEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
    app.DebugEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
    app.DebugEditFieldLabel.Position = [18 19 44 22];
    app.DebugEditFieldLabel.Text = 'Debug';

    % Create DebugEditField
    app.DebugEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
    app.DebugEditField.Position = [77 19 485 22];
```

```

% Create SetMaskEditFieldLabel
app.SetMaskEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.SetMaskEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.SetMaskEditFieldLabel.Position = [123 213 70 22];
app.SetMaskEditFieldLabel.Text = 'Set Mask';

% Create SetMaskEditField
app.SetMaskEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
app.SetMaskEditField.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@SetMaskEditFieldValueChanged, true);
app.SetMaskEditField.Interruptible = 'off';
app.SetMaskEditField.Position = [202 213 100 22];

% Create GetMaskEditFieldLabel
app.GetMaskEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.GetMaskEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.GetMaskEditFieldLabel.Position = [136 177 57 22];
app.GetMaskEditFieldLabel.Text = 'Get Mask';

% Create GetMaskEditField
app.GetMaskEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
app.GetMaskEditField.Interruptible = 'off';
app.GetMaskEditField.Editable = 'off';
app.GetMaskEditField.Position = [202 177 100 22];

% Create SequencePanel
app.SequencePanel = uipanel(app.UIFigure);
app.SequencePanel.Title = 'Sequence';
app.SequencePanel.Position = [311 123 260 221];

% Create PositionSpinnerLabel
app.PositionSpinnerLabel = uilabel(app.SequencePanel);
app.PositionSpinnerLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PositionSpinnerLabel.Position = [94 166 48 22];
app.PositionSpinnerLabel.Text = 'Position';

% Create PositionSpinner
app.PositionSpinner = uislider(app.SequencePanel);
app.PositionSpinner.Limits = [1 16];
app.PositionSpinner.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@PositionSpinnerValueChanged, true);
app.PositionSpinner.Position = [157 166 100 22];
app.PositionSpinner.Value = 1;

% Create Image
app.Image = uiimage(app.SequencePanel);
app.Image.Position = [64 26 116 120];

% Create SaveatPositionButton
app.SaveatPositionButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.SaveatPositionButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @SaveatPositionButtonPushed, true);
app.SaveatPositionButton.Position = [9 128 102 22];
app.SaveatPositionButton.Text = 'Save at Position';

```

```
% Show the figure after all components are created
app.UIFigure.Visible = 'on';
end
end
% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = PMUT_control_exported

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.UIFigure)

% Execute the startup function
runStartupFcn(app, @startupFcn)

if nargout == 0
    clear app
end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.UIFigure)
end
end
end
```

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ahn, J., Efimov, A. V., Averitt, R. D., & Taylor, A. J. (2004). Programmable terahertz waveforms generated via optical rectification of shaped, ultrafast laser pulses. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 96 A(20), 485–486.

Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., & Han, C. (2014). Terahertz band: Next frontier for wireless communications. *Physical Communication*, 12, 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.006>

Amirkhan, F., Gratuze, M., Ropagnol, X., Ozaki, T., Nabki, F., & Blanchard, F. (n.d.). *Terahertz time-domain derivative spectrometer using a large-aperture piezoelectric micromachined device*.

Amirkhan, F., Robichaud, A., Ropagnol, X., Gratuze, M., Ozaki, T., Nabki, F., & Blanchard, F. (2020a). Active terahertz time differentiator using piezoelectric micromachined ultrasonic transducer array. *Optics Letters*, 45(13), 3589. <https://doi.org/10.1364/ol.393917>

Amirkhan, F., Robichaud, A., Ropagnol, X., Gratuze, M., Ozaki, T., Nabki, F., & Blanchard, F. (2020b). Simulation study of a piezoelectric micromachined ultrasonic transducer as terahertz differentiator. *Optics InfoBase Conference Papers, Part F186-(c)*, 5–6. <https://doi.org/10.1364/noma.2020.nom4c.5>

Asada, M., & Suzuki, S. (2021). Terahertz emitter using resonant-tunneling diode and applications. *Sensors (Switzerland)*, 21(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/s21041384>

Bessou, M., Chassagne, B., Caumes, J. P., Pradère, C., Maire, P., Tondusson, M., & Abraham, E. (2012). Three-dimensional terahertz computed tomography of human bones. *Applied Optics*, 51(28), 6738–6744. <https://doi.org/10.1364/AO.51.006738>

Burford, N. M., & El-Shenawee, M. O. (2017). Review of terahertz photoconductive antenna technology. *Optical Engineering*, 56(1), 010901. <https://doi.org/10.1117/1 oe.56.1.010901>

Chang, K. T. (2007). Effects of a parallel resistor on electrical characteristics of a piezoelectric transformer in open-circuit transient state. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54(1), 107–116. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2007.216>

Chen, Z., Han, C., Wu, Y., Li, L., Huang, C., Zhang, Z., Wang, G., & Tong, W. (2021). Terahertz Wireless Communications for 2030 and Beyond: A Cutting-Edge Frontier. *IEEE Communications Magazine*, 59(11), 66–72. <https://doi.org/10.1109/MCOM.011.2100195>

Chiani, M. (2021). Compressive Sensing. *Electronic Sensor Design Principles*, July, 236–248. <https://doi.org/10.1017/9781139629225.006>

Cooper, K. B., Dengler, R. J., Llombart, N., Thomas, B., Chattopadhyay, G., & Siegel, P. H. (2011). THz imaging radar for standoff personnel screening. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(1), 169–182. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2159556>

Dai, J., Zhang, J., Zhang, W., & Grischkowsky, D. (2004). Terahertz time-domain spectroscopy characterization of the far-infrared absorption and index of refraction of high-resistivity, float-zone silicon. *Journal of the Optical Society of America B*, 21(7), 1379. <https://doi.org/10.1364/josab.21.001379>

Dhillon, S. S., Vitiello, M. S., Linfield, E. H., Davies, A. G., Hoffmann, M. C., Booske, J., Paoloni, C., Gensch, M., Weightman, P., Williams, G. P., Castro-Camus, E., Cumming, D. R. S., Simoens, F., Escorcia-Carranza, I., Grant, J., Lucyszyn, S., Kuwata-Gonokami, M., Konishi, K., Koch, M., ... Johnston, M. B. (2017). The 2017 terahertz science and technology roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(4). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/4/043001>

Edouard, J., Beliveau, L., & Ropagnol, X. (2022). *Parallel generation and coding of a terahertz pulse train*. March. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1414459/v1>

Fan, S., Li, T., Zhou, J., Liu, X., Liu, X., Qi, H., & Mu, Z. (2017). Terahertz non-destructive imaging of cracks and cracking in structures of cement-based materials. *AIP Advances*, 7(11). <https://doi.org/10.1063/1.4996053>

Fülöp, J. A., Ollmann, Z., Lombosi, C., Skrobol, C., Klingebiel, S., Pálfalvi, L., Krausz, F., Karsch, S., & Hebling, J. (2014). Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe - Technical Digest*, 2014-Janua(17), 20155–20163. <https://doi.org/10.1364/oe.22.020155>

Gowen, A. A., O'Sullivan, C., & O'Donnell, C. P. (2012). Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control. *Trends in Food Science and Technology*, 25(1), 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.12.006>

Gratuze, M. (2022). *Étude, conception et caractérisation de structures «MEMS» résonantes non linéaires pour la récupération d'énergie vibratoire et la génération d'ultrasons par*.

Guerboukha, H., Nallappan, K., & Skorobogatiy, M. (2018a). Toward real-time terahertz imaging. *Advances in Optics and Photonics*, 10(4), 843. <https://doi.org/10.1364/aop.10.000843>

Guerboukha, H., Nallappan, K., & Skorobogatiy, M. (2018b). Toward real-time terahertz imaging. *Advances in Optics and Photonics*, 10(4), 843. <https://doi.org/10.1364/aop.10.000843>

Guiramand, L., Nkeck, J. E., Ropagnol, X., Ozaki, T., & Blanchard, F. (2022). Near-optimal intense and powerful terahertz source by optical rectification in lithium niobate crystal. *Photonics Research*, 10(2), 340. <https://doi.org/10.1364/prj.428418>

Hafez, H. A., Chai, X., Ibrahim, A., Mondal, S., Férachou, D., Ropagnol, X., & Ozaki, T. (2016). Intense terahertz radiation and their applications. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 18(9), 1–48. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/9/093004>

He, M., Xu, M., Ren, Y., Jian, J., Ruan, Z., Xu, Y., Gao, S., Sun, S., Wen, X., Zhou, L., Liu, L., Guo, C., Chen, H., Yu, S., Liu, L., & Cai, X. (2019). High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond. *Nature Photonics*, 13(5), 359–364. <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0378-6>

Hoberg, C., Balzerowski, P., & Havenith, M. (2019). Integration of a rapid scanning technique into THz time-domain spectrometers for nonlinear THz spectroscopy measurements. *AIP Advances*, 9(3), 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.5080653>

Hoshina, H., Hayashi, A., Miyoshi, N., Miyamaru, F., & Otani, C. (2009). Terahertz pulsed imaging of frozen biological tissues. *Applied Physics Letters*, 94(12), 1–4. <https://doi.org/10.1063/1.3106616>

Ivanov Stantchev, R., & Pickwell-MacPherson, E. (2021). Spatial Terahertz-Light Modulators for Single-Pixel Cameras. *Terahertz Technology [Working Title]*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96691>

Jansen, C., Wietzke, S., Peters, O., Scheller, M., Vieweg, N., Salhi, M., Krumbholz, N., Jördens, C., Hochrein, T., & Koch, M. (2010). Terahertz imaging: Applications and perspectives. *Applied Optics*, 49(19). <https://doi.org/10.1364/AO.49.000E48>

Jepsen, P. U. (2019). Phase Retrieval in Terahertz Time-Domain Measurements: a “how to” Tutorial. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00578-0>

Jepsen, P. U., Cooke, D. G., & Koch, M. (2011). Terahertz spectroscopy and imaging - Modern techniques and applications. *Laser and Photonics Reviews*, 5(1), 124–166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000011>

Jin, Y. S., Jeon, S. G., Kim, G. J., Kim, J. Il, & Shon, C. H. (2007). Fast scanning of a pulsed terahertz signal using an oscillating optical delay line. *Review of Scientific Instruments*, 78(2), 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.2437764>

Luo, G. L., Kusano, Y., & Horsley, D. A. (2021). Airborne Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers for Long-Range Detection. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 30(1), 81–89. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2020.3037298>

Ma, Z. T., Geng, Z. X., Fan, Z. Y., Liu, J., & Chen, H. D. (2019). Modulators for Terahertz Communication: The Current State of the Art. *Research*, 2019(3), 1–22. <https://doi.org/10.34133/2019/6482975>

Mittleman, D. M. (2017). Perspective: Terahertz science and technology. *Journal of Applied Physics*, 122(23). <https://doi.org/10.1063/1.5007683>

Nellen, S., Lauck, S., Peytavit, E., Sriftgiser, P., Schell, M., Ducournau, G., & Globisch, B. (2022). Coherent Wireless Link at 300 GHz with 160 Gbit/s Enabled by a Photonic Transmitter. *Journal of Lightwave Technology*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/jlt.2022.3160096>

Neu, J., & Schmuttenmaer, C. A. (2018). Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS). *Journal of Applied Physics*, 124(23). <https://doi.org/10.1063/1.5047659>

Owen, A. J. (1995). Uses of Derivative Spectroscopy. *Spectroscopy*, 8.

Rahm, M., Li, J. S., & Padilla, W. J. (2013). THz wave modulators: A brief review on different modulation techniques. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34(1), 1–27. <https://doi.org/10.1007/s10762-012-9946-2>

Rani, M., Dhok, S. B., & Deshmukh, R. B. (2018). A Systematic Review of Compressive Sensing: Concepts, Implementations and Applications. *IEEE Access*, 6(c), 4875–4894. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793851>

Rappaport, T. S., Xing, Y., Kanhere, O., Ju, S., Madanayake, A., Mandal, S., Alkhateeb, A., & Trichopoulos, G. C. (2019). Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6g and beyond. *IEEE Access*, 7, 78729–78757. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522>

Rout, S. (2016a). *Active Metamaterials for Terahertz Communication and Imaging*. May. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4861.7849>

Rout, S. (2016b). *Active Metamaterials for Terahertz Communication and Imaging A dissertation submitted by Saroj Rout in partial fulfillment of the requirements for the degree of Advisor : Professor Sameer Sonkusale Active Metamaterials for Terahertz Communication and Imag*. May. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4861.7849>

Seifert, T., Jaiswal, S., Martens, U., Hannegan, J., Braun, L., Maldonado, P., Freimuth, F., Kronenberg, A., Henrizi, J., Radu, I., Beaurepaire, E., Mokrousov, Y., Oppeneer, P. M., Jourdan, M., Jakob, G., Turchinovich, D., Hayden, L. M., Wolf, M., Münzenberg, M., ... Kampfrath, T. (2016). Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation. *Nature Photonics*, 10(7), 483–488. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.91>

Sengupta, K., Nagatsuma, T., & Mittleman, D. M. (2018). Terahertz integrated electronic and hybrid electronic–photonic systems. *Nature Electronics*, 1(12), 622–635. <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0173-2>

Shan, J., Weling, A. S., Knoesel, E., Bartels, L., Bonn, M., Nahata, A., Reider, G. A., & Heinz, T. F. (2000). Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling. *Optics Letters*, 25(6), 426. <https://doi.org/10.1364/ol.25.000426>

Shen, H., Gan, L., Newman, N., Dong, Y., Li, C., Huang, Y., & Shen, Y. C. (2012). Spinning disk for compressive imaging. *Optics Letters*, 37(1), 46. <https://doi.org/10.1364/ol.37.000046>

Simoens, F., Meilhan, J., & Nicolas, J. A. (2015). Terahertz Real-Time Imaging Uncooled Arrays Based on Antenna-Coupled Bolometers or FET Developed at CEA-Leti. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(10), 961–985. <https://doi.org/10.1007/s10762-015-0197-x>

Sizov, F. F. (2017). Infrared and terahertz in biomedicine. *Semiconductor Physics Quantum Electronics and Optoelectronics*, 20(3), 273–283. <https://doi.org/10.15407/spqeo20.03.273>

Stantchev, R. I., Yu, X., Blu, T., & Pickwell-MacPherson, E. (2020). Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector. *Nature Communications*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16370-x>

Talsky, G., Mayring, L., & Kreuzer, H. (1978). High-Resolution, Higher-Order UV/VIS Derivative Spectrophotometry. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 17(11), 785–799. <https://doi.org/10.1002/anie.197807853>

Tao, Y. H., Fitzgerald, A. J., & Wallace, V. P. (2020). Non-contact, non-destructive testing in various industrial sectors with terahertz technology. *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030712>

Technologies, A. (n.d.). *Introduction to Driving LED Matrices Application Note 1216*. 2, 1–15.

Tonouchi, M. (2007). Cutting-edge terahertz technology. *Nature Photonics*, 1(2), 97–105. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.3>

Tredicucci, A., Köhler, R., Beltram, F., Beere, H. E., Linfield, E. H., Davies, A. G., & Ritchie, D. A. (2004). Terahertz quantum cascade lasers. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 21(2–4), 846–851. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2003.11.137>

Wang, L., Zhang, Y., Guo, X., Chen, T., Liang, H., Hao, X., Hou, X., Kou, W., Zhao, Y., Zhou, T., Liang, S., & Yang, Z. (2019). A review of THz modulators with dynamic tunable metasurfaces. *Nanomaterials*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/nano9070965>

Weiner, A. M. (2000). Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators. *Review of Scientific Instruments*, 71(5), 1929–1960. <https://doi.org/10.1063/1.1150614>

Weiner, A. M. (2011). Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial review. *Optics Communications*, 284(15), 3669–3692. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.03.084>

Woodward, R. M. (2005). <title>Terahertz technology in global homeland security (Invited Paper)</title>. *Optics and Photonics in Global Homeland Security*, 5781(0), 22–31. <https://doi.org/10.1117/12.606392>

Zanotto, L., Piccoli, R., Dong, J. L., Morandotti, R., & Razzari, L. (2020). Single-pixel terahertz imaging: A review. *Opto-Electronic Advances*, 3(9), 1–15. <https://doi.org/10.29026/oea.2020.200012>

Zhuldybina, M. (2021). *Quality control of printed electronics using terahertz radiation*.

Zhuldybina, M., Ropagnol, X., & Blanchard, F. (n.d.). Towards in-situ quality control of conductive printable electronics: a review of possible pathways. *Flexible and Printed Electronics*. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aa6e9f>

Zhuldybina, M., Ropagnol, X., Trudeau, C., Bolduc, M., Zednik, R. J., & Blanchard, F. (2019). Contactless in situ electrical characterization method of printed electronic devices with terahertz spectroscopy. *Sensors (Switzerland)*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030444>