



Donner aux étudiants les moyens d'expérimenter pratiquement les ondes THz

Travaux pratiques avec des radars FMCW

Jean-Paul Guillet^{2,3,*}, Charlotte Sury¹, Tristan Dubois¹, Frédéric Fauquet⁴, Laurent Oyhenart¹,
and Frédéric Darracq¹

¹ Université de Bordeaux, UF science de l'ingénieur, Laboratoire IMS, Talence, France

² Université de Bordeaux, IUT GEII de Bordeaux, Laboratoire IMS, Gradignan, France

³ Université de Bordeaux, Laboratoire CEDS EA 7440, Bordeaux, France

⁴ CNRS, Laboratoire IMS, Talence, France

*Auteur de correspondance : jean-paul.guillet@u-bordeaux.fr

Résumé : *Les travaux pratiques traditionnels en térahertz (THz) reposent souvent sur des systèmes coûteux, encombrants et complexes, ce qui les rend inaccessibles à de nombreux établissements d'enseignement et limite l'interaction pratique pour les étudiants. Cet article présente une nouvelle approche de l'enseignement du térahertz à l'aide de systèmes radar FMCW 122 GHz compacts. Ces appareils abordables permettent aux étudiants de s'engager dans un apprentissage pratique et kinesthésique tout en développant leurs compétences en traitement du signal via LabVIEW. Nous décrivons la configuration matérielle et logicielle, décrivons les expériences clés telles que la mesure de la résolution et l'évaluation de la distance, et soulignons les avantages pédagogiques de cette solution accessible et évolutive. Enfin, nous discutons de son potentiel pour la vulgarisation scientifique et les avancées futures dans l'enseignement du THz.*

Mots clés : Éducation térahertz, radar FMCW, apprentissage kinesthésique, expériences pratiques, configuration sur table, SiliconRadar SiGe, programmation LabVIEW, traitement du signal THz, mesure de la résolution, évaluation de la distance, systèmes radar compacts, outils pédagogiques THz accessibles, apprentissage THz interactif, systèmes THz abordables, vulgarisation scientifique.

Abstract: Empowering students to experience THz

terahertz waves practically: Practical work with FMCW radars

Traditional terahertz (THz) labs often rely on expensive, bulky, and complex systems, making them inaccessible to many educational institutions and limiting hands-on interaction for students. This paper

presents a novel approach to terahertz education using compact 122 GHz FMCW radar systems. These affordable devices allow students to engage in hands-on, kinesthetic learning while developing their signal processing skills via LabVIEW. We describe the hardware and software setup, outline key experiments such as resolution measurement and distance estimation, and highlight the pedagogical benefits of this accessible and scalable solution. Finally, we discuss its potential for science outreach and future advancements in THz education.

Keywords: Terahertz Education, FMCW Radar, Kinesthetic Learning, Hands-on Experiments, Tabletop Setup, SiliconRadar SiGe, LabVIEW Programming, THz Signal Processing, Resolution Measurement, Range Assessment, Compact Radar Systems, Accessible THz Educational Tools, Interactive THz Learning, Affordable THz Systems, popularization of science.

1. Introduction

Les ondes térahertz (THz) se situent entre les régions micro-ondes et infrarouges, avec des fréquences allant de 0,1 à 10 THz (longueurs d'onde de 3 mm à 30 μm). Souvent appelée « gap THz », cette bande de fréquence a historiquement été sous-explorée en raison des défis technologiques liés à la génération et à la détection de ces ondes. Les progrès récents ont cependant permis de développer cette thématique [1].

Les propriétés des ondes térahertz en font un outil précieux pour la recherche et l'industrie. Elles sont non ionisantes, ce qui garantit leur sécurité, et possèdent la capacité de pénétrer divers matériaux non métalliques tels que les plastiques, les textiles et les céramiques. De plus, de nombreux matériaux présentent des signatures d'absorption uniques dans la gamme térahertz, permettant une identification spectrale précise [2]. Ces caractéristiques ont ouvert la voie à l'utilisation du rayonnement térahertz dans l'imagerie, la spectroscopie, la communication et la détection.

Parmi les domaines d'application les plus prometteurs figure l'imagerie térahertz, qui a démontré un potentiel important dans des domaines tels que la médecine, la science des matériaux et la préservation du patrimoine culturel. Par exemple, l'imagerie térahertz a été utilisée avec succès pour détecter les tissus cancéreux en analysant les différences d'indice dans des tissus [3]. Dans les études sur le patrimoine culturel, elle s'est avérée utile pour révéler des couches cachées dans des peintures et évaluer l'intégrité d'artefacts historiques sans causer de dommages [4, 5, 6]. Par ailleurs, la nature non destructive de l'imagerie térahertz a permis son utilisation pour évaluer la corrosion des matériaux revêtus et détecter les défauts structuraux des composants industriels [7]. En plus de l'imagerie, la spectroscopie térahertz est devenue un outil essentiel pour l'analyse des matériaux et des produits chimiques. Sa capacité à identifier les empreintes spectrales des molécules est particulièrement précieuse dans des domaines tels que les biosciences, où elle est utilisée pour étudier la dynamique des protéines et les processus cellulaires [2]. Les applications de sécurité ont également bénéficié de la technologie térahertz, car elle permet la détection d'explosifs et de stupéfiants dissimulés en fonction de leurs caractéristiques d'absorption uniques [1]. Une autre application des ondes THz est la communication sans fil. La gamme haute fréquence des ondes THz offre une bande passante étendue, ce qui en fait un candidat idéal pour les systèmes de communication de nouvelle génération avec des taux de transfert de données dépassant 100 Gbps [8]. De même, les progrès

de la tomographie THz ont permis la reconstruction d'images tridimensionnelles de structures complexes, élargissant encore l'utilité de cette technologie dans l'analyse non invasive [9]. Bien que les progrès de la technologie térahertz soient impressionnants, des défis subsistent. L'efficacité des sources et des détecteurs THz doit être améliorée et le coût de ces systèmes doit être réduit pour faciliter une adoption plus large [10]. De plus, l'intégration de dispositifs térahertz dans des systèmes compacts et portables continue de poser des défis techniques importants. Néanmoins, des techniques comme l'usage de guides d'ondes ou la réalité augmentée peuvent apporter des solutions [11, 12].

L'étude des ondes térahertz (THz) a donc suscité une attention considérable ces dernières années en raison de leurs propriétés et applications uniques dans l'imagerie, la détection et la communication. Malgré leur importance, l'enseignement des concepts THz reste difficile en raison de la dépendance aux configurations de laboratoire traditionnelles. Actuellement, l'enseignement pratique des ondes THz serait principalement via des visites de laboratoires, sur des systèmes complexes et coûteux, qui ne permettent pas vraiment une prise en main des systèmes par les étudiants. Cet article propose un exemple de module d'enseignement pouvant répondre à ce défi.

2. Méthodologie

2.1. Configuration expérimentale

Le système proposé utilise un module radar SiliconRadar SiGe FMCW de 122 GHz (ou 244 GHz) (figure 1-a) monté sur un support produit par fabrication additive (figure 1-b et c). Cette conception facilite l'intégration de deux lentilles (par exemple en PTFE), ce qui permet un réglage flexible du faisceau et la personnalisation des configurations expérimentales. La taille compacte et la portabilité inhérente du système le rendent parfaitement adapté à un placement sur des tables de classe, sans nécessiter une table optique. De plus, avec un coût inférieur à 800 euros par unité, le système est une option abordable pour les établissements d'enseignement. Son évolutivité a été démontrée par la capacité de huit étudiants à travailler simultanément, avec des étudiants supplémentaires partageant les systèmes si nécessaire.

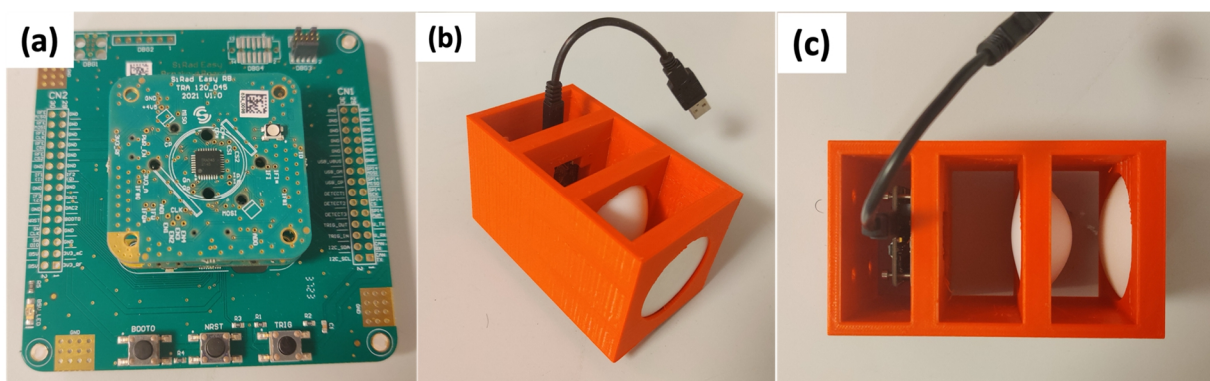


Figure 1. (a) Vue de dessus du radar FMCW utilisé (b) Vue de profil du dispositif (c) Vue de dessus avec notamment les deux lentilles en PTFE, de focales 4 et 10cm.

L'environnement de travail proposé repose sur LabVIEW, l'un des objectifs de cet enseignement étant d'initier les étudiants à cet outil de programmation graphique largement utilisé dans le domaine de l'instrumentation. Dans cette optique, le système radar est

directement interfacé avec LabVIEW. Un instrument virtuel (VI) simple est mis à disposition pour permettre l'acquisition et la visualisation des données. Les étudiants sont ensuite invités à aller plus loin en exploitant LabVIEW pour traiter et analyser les signaux radar. Cette approche leur permet de développer des compétences concrètes en acquisition de données, en traitement du signal, en programmation, et en mise en application des concepts théoriques dans des situations proches du réel.

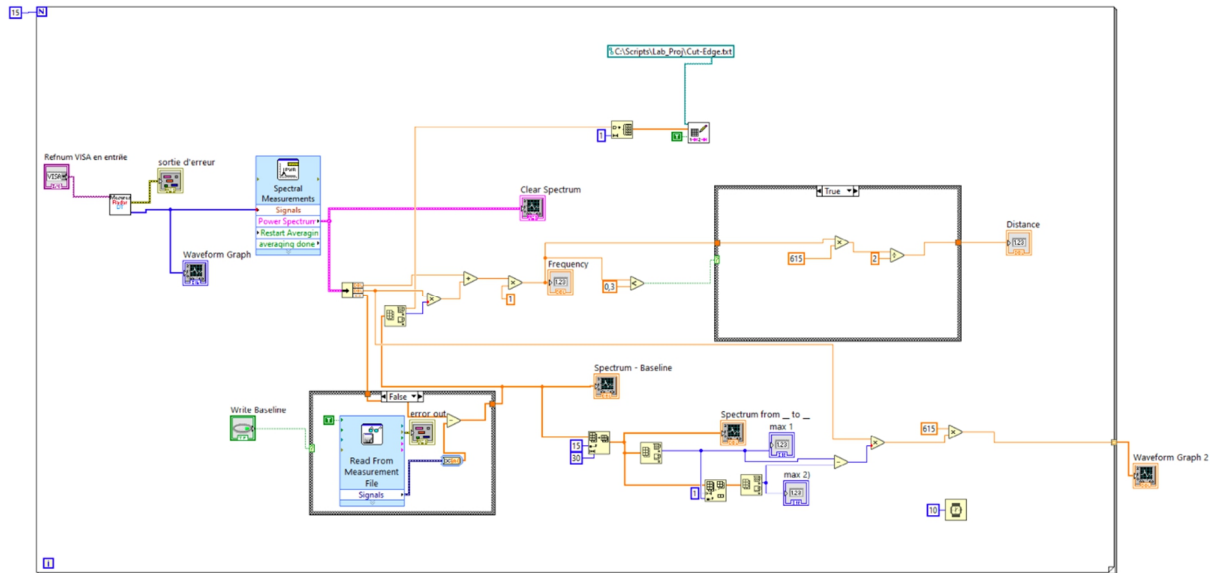


Figure 2. Exemple de code utilisé pour traiter les données radar.

3. Traitement du signal

3.1. Traitements de données faits par tous les étudiants

L'activité pédagogique comporte une composante importante de traitement du signal, le but étant de prendre en main Labview, créer des sous-VI.

A partir des données mesurées par le radar, les étudiants ont notamment fait :

1. Traitements Temporels : • Acquisition du signal radar en domaine temporel avec visualisation en temps réel. Conversion et traitement du signal brut provenant du radar (VISA ou port série).
2. Transformée de Fourier Rapide (FFT) : • Transformation du signal temporel en domaine fréquentiel (FFT) pour identifier les fréquences caractéristiques (fréquence de battement).
3. Calibration et Correction du Bruit : • Acquisition d'une mesure de référence (baseline) sans objet devant le radar pour soustraire le bruit environnemental des mesures suivantes (normalisation du signal).
4. Analyse Spectrale et Détection de Pics : • Analyse des spectres fréquentiels pour détecter les pics correspondant aux réflexions sur différentes surfaces (interfaces des objets). • Conversion des valeurs spectrales en unités logarithmiques (dBm) pour améliorer la visualisation des pics.

5. Mesures de Distance et Épaisseur : • Calcul de la distance des objets à partir des fréquences de battement détectées. • Détermination précise de l'épaisseur des objets à partir des réflexions sur les surfaces avant et arrière.
6. Méthode “Knife-edge” : • Analyse de la forme du faisceau radar à l'aide de la méthode « knife-edge » pour déterminer la taille et le profil du faisceau radar.

3.2. Traitements plus avancés faits par quelques étudiants

En fonction de leur avancement, et en fonction de leur projet, certains étudiants ont aussi pu implémenter des traitements spécifiques :

1. Zero-padding : • Application du zero-padding pour augmenter la résolution fréquentielle dans la FFT.
2. Analyse par Fenêtre Glissante (Knife-edge amélioré) : Utilisation d'une fenêtre temporelle glissante pour affiner la détection des pics dans des données bruitées
3. Évaluation Comparative de la Réflectivité des Matériaux : • Mesure comparative de la réflectivité de différents matériaux (plastique, caoutchouc, métal) pour caractériser les performances du radar selon la nature des matériaux.
- 4 Calibration Expérimentale Précise : • Détermination expérimentale des coefficients de calibration (formule empirique) pour assurer la fiabilité des mesures (exemple : coefficient de conversion fréquence-distance de 225 GHz/cm).
5. Utilisation de sous-VI (subVI) spécifiques LabVIEW : • Intégration et création de sous-programmes spécifiques pour automatiser et simplifier les traitements comme la conversion en dBm.

3.3. Engagement et motivation intrinsèque

Certains étudiants ont spontanément dépassé les objectifs initiaux des travaux pratiques [13], réalisant volontairement des activités supplémentaires, illustrant ainsi une forte motivation intrinsèque et un état de « flow » caractérisé par le plaisir d'explorer et d'approfondir les concepts abordés. A la fin des TP, ces étudiants ont développé un système de génération sonore dépendant du signal. Il s'agit d'une conversion du signal radar en feed-back sonore, où la fréquence du son varie en fonction de la distance de l'objet détecté, permettant une détection acoustique intuitive en temps réel.

4. Apprentissage kinesthésique et optique THZ

Ces travaux pratiques offrent une expérience d'apprentissage kinesthésique particulièrement riche en permettant aux étudiants de manipuler directement les composants du système radar térahertz. En ajustant physiquement la position des éléments optiques, tels que les lentilles ou les obstacles lors de la méthode dite du « knife-edge », les étudiants perçoivent intuitivement, par le geste, la forme gaussienne du faisceau radar ainsi que ses propriétés spatiales. Ce processus tactile facilite non seulement l'évaluation concrète de la taille et du profil du faisceau,

mais permet également aux apprenants de mieux visualiser et appréhender la présence invisible des ondes millimétriques, créant ainsi un lien tangible entre les concepts théoriques et la réalité expérimentale.

5. Conclusion

L'approche que nous avons développée vise à transformer l'enseignement des ondes térahertz en le rendant plus accessible, interactif et ancré dans la réalité pratique. Cette démarche s'appuie sur l'utilisation de radars FMCW compacts et à coût raisonnable, dont l'interface est assurée par le logiciel LabVIEW. Cette configuration permet aux étudiants de s'engager activement dans l'exploration des propriétés fondamentales des ondes THz à travers des expériences pratiques ou chaque étudiant a son système. Nous considérons que cette méthode contribue significativement au développement de compétences techniques essentielles en instrumentation et en traitement du signal. De plus, la manipulation directe des dispositifs favorise une compréhension physique plus approfondie des phénomènes étudiés.

L'intégration de ces outils au sein d'un environnement pédagogique permet de réduire l'obstacle technologique souvent associé au domaine des térahertz, en particulier pour les institutions ne disposant pas d'infrastructures de recherche accessibles aux étudiants. La modularité inhérente à notre dispositif offre également la possibilité d'une progression pédagogique structurée, allant de mesures élémentaires à des analyses plus complexes, s'adaptant ainsi au niveau d'acquisition de chaque étudiant.

Les observations issues de nos premières mises en œuvre indiquent un niveau d'engagement élevé de la part des étudiants. Nous avons même constaté des initiatives spontanées d'extension des travaux pratiques, telles que le développement d'une interface de détection sonore. Ces exemples témoignent de la capacité de ce dispositif à stimuler la motivation intrinsèque, l'autonomie et la curiosité scientifique, facteurs déterminants pour un apprentissage en profondeur.

À court terme, l'objectif est d'enrichir davantage ces activités pédagogiques par l'introduction de nouvelles fonctionnalités logicielles, notamment des modules dédiés à l'analyse spectrale avancée et l'intégration de techniques de traitement basées sur l'intelligence artificielle. L'ajout d'une base de données de matériaux et d'un système de reconnaissance automatique d'objets à partir de leur signature radar représente également une voie de développement prometteuse.

À plus long terme, le but est de mutualiser cette approche pédagogique via une plateforme collaborative en open-source. Nous souhaitons ainsi permettre aux enseignants et aux chercheurs de partager leurs modules, leurs protocoles expérimentaux et leurs outils logiciels. Nous sommes convaincus qu'une telle communauté pourrait accélérer la démocratisation de l'enseignement des ondes térahertz et encourager l'émergence d'une culture scientifique partagée autour de ces technologies avancées.

Références

- [1] A. LEITENSTORFER et al. "The 2023 terahertz science and technology roadmap". In : *Journal of Physics D : Applied Physics* 56.22 (2023),p.223001.

- [2] A. G. MARKELZ et D. M. MITTLEMAN. “Pers-pective on terahertz applications in bioscience and biotechnology”. In : *Acs Photonics* 9.4 (2022), p. 1117-1126.
- [3] L. MAVARANI et al. “NearSense—advances to-wards a silicon-based terahertz near-field imaging sensor for Ex vivo breast tumour identification”. In : *Frequenz* 72.3-4 (2018), p. 93-99.
- [4] S. SIRRO et al. “TeraPulse Lx for terahertz imaging of painting on canvas”. In : *Journal of Phy-sics : Conference Series*. T. 1866. 1. IOP Publi-shing. 2021, p. 012004.
- [5] K. FUKUNAGA et al. “Terahertz imaging sys-tems : a non-invasive technique for the analysis of paintings”. In : *O3A : Optics for Arts, Archi-itecture, and Archaeology II*. T. 7391. SPIE. 2009, p.119-127.
- [6] Q. CASSAR et al. “Characterization of varnish ageing and its consequences on terahertz ima-gery : Demonstration on a painting presumed of the french renaissance”. In : *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 41 (2020), p. 1556-1566.5.
- [7] X. JIANG, Y. XU et D. ZHAO. “Terahertz Non-destructive testing and imaging of corrosion in coated steel plates”. In : *Construction and Buil-ding Materials* 385 (2023), p. 131427.
- [8] G. VALUŠIS et al. “Roadmap of terahertz imaging 2021”. In : *Sensors* 21.12 (2021), p. 4092.
- [9] Y.-C. HUNG et al. “Terahertz deep learning fusion computed tomography”. In : *Optics Express* 32.10 (2024), p. 17763-17774.
- [10] L. CHUSSEAU et J.-P. GUILLET. “Coupling and propagation of Sommerfeld waves at 100 and 300 GHz”. In : *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 33 (2012), p. 174-182.
- [11] M. PAN et al. “Guided reflectometry imaging unit using millimeter wave FMCW radars”. In : *IEEE Transactions on Terahertz Science and Techno-logy* 10.6 (2020), p. 647-655.
- [12] J.-P. GUILLET, F. FAUQUET et J. RIOULT. “Augmented reality terahertz (AR-THz) sensing and imaging with frequency-modulated continuous-wave radar”. In : *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 45.5 (2024), p. 433-443.
- [13] M. CSIKSZENTMIHALYI et M. CSIKZENTMIHALY. *Flow : The psychology of optimal experience*. T. 1990. Harper & Row New York, 1990.

Biographie des auteurs

Jean-Paul Guillet : Docteur de l’université Montpellier 2 (2010), maître de conférences de l’université de Bordeaux depuis 2013, chercheur invité un an à UCLA en 2023, hors classe depuis 2025, affecté au laboratoire IMS pour la recherche et au département GEII de l’IUT de Bordeaux pour les enseignements. Mes travaux de recherches se focalisent sur les composants et systèmes terahertz et leurs applications.

Charlotte Sury : Docteure de l’Université Bordeaux 1 (2011), enseignante-chercheuse sous contrat LRU sur le projet CMA CAP ELENA depuis février 2025, intégrée à l’équipe RUDII du laboratoire IMS, mes travaux contribuent au développement de l’attractivité des métiers de l’électronique sur la Région Nouvelle Aquitaine.

Tristan Dubois a obtenu son master et son doctorat en génie électrique à l’Université de Montpellier (France) en 2006 et 2009. Il a été chercheur postdoctoral au Centre de recherche POLYGRAMES (Montréal, Canada) en 2010 et 2011. En 2012, il a rejoint le laboratoire IMS de l’Université de Bordeaux, où il est actuellement maître de conférences. Ses principaux domaines de recherche portent sur l’étude de la compatibilité électromagnétique et plus

particulièrement sur l'étude des effets des interférences électromagnétiques sur les composants et systèmes électroniques.

Frédéric Fauquet est né à Pessac, en France, en 1977. Il a obtenu le Diplôme Universitaire de Technologie en électronique de l'Université de Bordeaux, en France, en 1998. Il a travaillé pendant 14 ans à l'Observatoire de Physique du Globe (OPGS UMS 833), à Clermont-Ferrand, où il a contribué au développement d'une station multicateurs autonome. En 2014, il s'est installé à Bordeaux pour rejoindre l'équipe laser et térahertz du laboratoire IMS en tant qu'ingénieur de recherche.

Laurent Oyhenart : Maître de conférences à l'université de Bordeaux, il est responsable du thème de recherche DEVICES du laboratoire IMS et est également rattaché au consortium LightTECH où il étudie la propagation de la lumière dans les milieux complexes. Parallèlement, il est responsable de la 2^e année du parcours systèmes embarqués du Master MA, où il enseigne à la fois les fondamentaux des systèmes embarqués et les thématiques liées à ses recherches.

Frédéric Darracq : Docteur de l'université Bordeaux 1 (2002), maître de conférences de l'université de Bordeaux depuis 2006, hors classe depuis 2024, affecté au laboratoire IMS pour conduire des recherches sur l'application des lasers à la simulation des effets des radiations sur les composants électroniques et à la détection de défauts. Depuis quelques mois, je réoriente mon activité de recherche sur l'application des ondes THZ.