

IA explicable et physique pour le développement de capteurs THz intelligents dédiés à l'industrie, l'environnement, la santé et la transition énergétique

Contexte scientifique

La fiabilité des systèmes automatisés repose sur la qualité des données fournies par les capteurs. Dans de nombreux secteurs stratégiques tels que l'industrie, la santé, l'énergie ou l'environnement, les capteurs constituent la première source d'information utilisée pour la prise de décision, le contrôle de procédés ou l'aide au diagnostic. L'intelligence artificielle (IA) est aujourd'hui largement utilisée pour améliorer le traitement, l'interprétation et l'automatisation de ces données. Toutefois, les approches actuelles reposent majoritairement sur des modèles de type « boîte noire », dont les décisions sont difficilement interprétables et parfois peu robustes face à des conditions expérimentales nouvelles ou dégradées. Dans des domaines critiques, la confiance accordée à ces systèmes exige des propriétés fortes de robustesse, de répétabilité, d'adaptabilité et d'explicabilité. L'un des principaux défis scientifiques consiste donc à développer une nouvelle génération d'algorithmes d'IA capables d'intégrer explicitement les lois physiques régissant les phénomènes observés.

Le présent travail de thèse, à la fois amont sur le plan scientifique et applicatif, sera réalisé avec le concours de l'entreprise PARSEWAVES dans le cadre d'un contrat CIFRE. Ce partenariat permettra de mener conjointement des travaux de recherche fondamentale et méthodologique sur l'intégration de connaissances physiques dans les modèles d'IA et le déploiement d'une technologie innovante, tout en confrontant leur développement à des problématiques et des données issues d'applications industrielles concrètes. La collaboration avec PARSEWAVES contribuera ainsi à orienter les travaux vers des verrous applicatifs identifiés par l'entreprise, tout en permettant la validation expérimentale des méthodes développées dans des conditions représentatives de leur utilisation future. Cette interaction étroite entre PARSEWAVES et les laboratoires partenaires favorisera également le développement d'une excellence scientifique, notamment à travers la valorisation des résultats par des communications dans des conférences internationales et des publications dans des revues scientifiques, ainsi que le transfert des connaissances et des technologies développées vers l'entreprise, notamment par la protection et la valorisation de résultats innovants susceptibles de conduire au dépôt de brevets.

Objectifs de la thèse

Cette thèse vise à développer des méthodes d'**IA guidées par la physique (Physics-Informed AI)** afin de concevoir des capteurs intelligents capables :

- d'exploiter les lois physiques connues lors de l'apprentissage ;
- d'améliorer la robustesse et la généralisabilité des modèles ;
- d'expliquer les décisions prises par l'algorithme ;
- de détecter automatiquement les erreurs de mesure ou les situations anormales ;
- d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques sous-jacents.

L'objectif principal est de proposer des architectures d'IA explicables permettant non seulement d'extraire l'information pertinente à partir des mesures, mais également d'assister l'utilisateur dans l'interprétation physique des résultats.

Domaine d'application : capteurs et imagerie THz

Les ondes térahertz (THz) occupent une position intermédiaire entre les micro-ondes et l'infrarouge. Elles présentent des propriétés particulièrement intéressantes pour l'analyse non destructive des matériaux [1] :

- pénétration à travers de nombreux matériaux diélectriques [2] ;
- mesure d'épaisseur multicouche [3] ;
- détection d'humidité [4] ;
- caractérisation de matériaux et de défauts internes [1], [2] ;
- imagerie sans contact et sans rayonnement ionisant [5].

Ces technologies trouvent aujourd'hui des applications dans l'industrie 4.0 et 5.0, le contrôle qualité et le contrôle non destructif, les télécommunications du futur [6], la sécurité [5], l'agroalimentaire [7], le domaine pharmaceutique [8], la santé et le biomédical [9], le suivi environnemental [10].

La thèse se concentrera plus particulièrement sur une problématique à fort impact sociétal : **le diagnostic énergétique des bâtiments**.

Les systèmes THz permettent en effet d'évaluer l'état des matériaux isolants au travers des matériaux structurants qui constituent les murs, de détecter la présence d'humidité, d'identifier des défauts cachés ou des délaminations et de suivre le vieillissement des structures. Ces informations sont essentielles pour évaluer de manière quantitative la performance énergétique du parc immobilier, et ainsi accompagner efficacement les objectifs de transition énergétique.

Verrous scientifiques

Malgré leurs performances, les systèmes THz restent encore limités par :

- la complexité d'interprétation des données ;
- la sensibilité aux conditions expérimentales ;
- le besoin d'expertise pour l'analyse des mesures ;
- les difficultés de transfert vers un usage industriel à grande échelle.

L'intégration raisonnée de l'IA représente une voie prometteuse pour lever ces verrous, à condition que les modèles restent cohérents avec les lois fondamentales de l'électromagnétisme.

Programme de recherche

Après l'établissement de l'état de l'art au travers d'une recherche bibliographique conséquente, le doctorant abordera les deux axes de recherche ci-dessous.

Axe 1 (Première année) – Pré-diagnostic intelligent et détection d'anomalies

L'objectif consiste à développer des outils d'IA capables d'exploiter directement certaines contraintes physiques fondamentales (causalité, relations de Kramers-Kronig, conservation de l'énergie, etc.) afin de :

- détecter automatiquement des mesures incohérentes ;
- identifier des dérives instrumentales ;
- assister le diagnostic des erreurs expérimentales ;
- améliorer la qualité des données avant leur exploitation.

Cette approche permettra de construire des systèmes de contrôle qualité intelligents intégrés directement aux capteurs THz.

Axe 2 (Deuxième année) – Modélisation avancée et découverte de modèles physiques

Le second axe portera sur le développement de modèles hybrides associant :

- réseaux de neurones informés par la physique (Physics-Informed Neural Networks – PINNs) [11-13] ;
- régression symbolique [14-17] ;
- les réseaux de Kolmogorov-Arnold (KAN) [18].
- méthodes d'IA explicable ;
- modèles inverses.

Ces outils permettront de caractériser des matériaux complexes tels que :

- structures multicouches ;
- matériaux diffusants ;
- métamatériaux ;
- matériaux évolutifs dans le temps.

L'objectif est à la fois d'accélérer l'extraction des paramètres physiques et de contribuer à l'amélioration des modèles électromagnétiques existants.

Retombées attendues

Cette thèse se situe à l'interface entre intelligence artificielle, traitement du signal et physique des ondes. Les résultats attendus contribueront au développement de capteurs intelligents fiables et explicables destinés à de nombreux secteurs industriels. Au-delà du cas d'étude consacré au diagnostic énergétique des bâtiments, les méthodologies développées pourront être transposées à des applications variées dans les domaines de l'industrie, de la santé, de l'énergie, de l'environnement et du contrôle non destructif.

Profil recherché

Le candidat, titulaire d'un Master 2 ou d'un diplôme d'ingénieur, devra posséder une solide formation dans l'un des domaines suivants :

- traitement du signal ;
- intelligence artificielle et apprentissage automatique ;
- physique des ondes ;
- électromagnétisme ;
- instrumentation ou mesures physiques ;
- mathématiques appliquées.

Des compétences en programmation scientifique (Python, Matlab ou équivalent) seront appréciées.

Cadre et organisation du travail de thèse

Le projet s'appuie sur les expertises complémentaires et reconnues du LISTIC dans le domaine de l'IA, de celle du CROMA dans le domaine des ondes THz et leurs applications. Le candidat bénéficiera d'un écosystème de partenaires académiques et industriels permettant la validation des développements sur des cas d'usage réels et retenu aura un accès à la plateforme de caractérisation fonctionnelle PLATERA.

La thèse sera réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE entre Parsewaves, startup deeptech normande qui développe un radar portable sub-THz pour la caractérisation non destructive des parois de bâtiments, et l'Université Savoie Mont Blanc (laboratoires CROMA et LISTIC).

Encadrement : la thèse sera dirigée par M. Maxime Bernier (CROMA) et co-encadrée par M. Argheesh Bhanot (LISTIC), avec la participation d'Alexandre Benoit (LISTIC). Corentin Plaine, cofondateur et directeur technique de Parsewaves, assurera l'encadrement côté entreprise.

Lieu de travail : le doctorant sera salarié de Parsewaves et basé dans ses locaux à Hérouville-Saint-Clair (Caen, Normandie), au sein de l'équipe R&D, avec un poste de travail dédié au calcul.

Suivi : une à deux réunions mensuelles en visioconférence avec les encadrants du CROMA et du LISTIC, et des points réguliers avec l'encadrant industriel.

Déplacements : un séjour tous les six mois au Bourget-du-Lac, et davantage selon les besoins du projet, pris en charge par Parsewaves, notamment pour les campagnes de mesure sur la plateforme PLATERA.

Rémunération : Salaire correspondant au minimum fixé par l'ANRT pour les contrats CIFRE.

Démarrage : **Dès que possible**. Dans la mesure du possible, le candidat retenu pourra être recruté en CDD chez Parsewaves dès son arrivée, en attendant le démarrage officiel de la thèse à l'issue de l'instruction du dossier par l'ANRT.

Dossier de Candidature

CV + lettre de motivation + relevés de notes (M1 et M2, ou école ingénieur) + éventuellement mémoire/projet de fin d'études + références (maître de stage **et** responsable du master ou école ingénieur). **À envoyer à maxime.bernier@univ-smb.fr**

Contacts

maxime.bernier@univ-smb.fr pour la

References¹:

- [1] Y. H. Tao, A. J. Fitzgerald, and V. P. Wallace, "Non-contact, non-destructive testing in various industrial sectors with terahertz technology," *Sensors*, vol. 20, no. 3, Art. no. 712, 2020, [doi: 10.3390/s20030712](https://doi.org/10.3390/s20030712).
- [2] S. Zhong, "Progress in terahertz nondestructive testing: A review," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 273–281, 2019, [doi: 10.1007/s11465-018-0495-9](https://doi.org/10.1007/s11465-018-0495-9).
- [3] J. W. Jonuscheit *et al.*, "Terahertz quality inspection for automotive and aviation industries," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 41, pp. 470–489, 2020, [doi: 10.1007/s10762-019-00639-4](https://doi.org/10.1007/s10762-019-00639-4).
- [4] L. Afsah-Hejri, P. Hajeb, P. Ara, and R. J. Ehsani, "A comprehensive review on food applications of terahertz spectroscopy and imaging," *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 18, no. 5, pp. 1563–1621, 2019, [doi: 10.1111/1541-4337.12490](https://doi.org/10.1111/1541-4337.12490).
- [5] A. G. Davies, A. D. Burnett, W. Fan, E. H. Linfield, and J. E. Cunningham, "Terahertz spectroscopy of explosives and drugs," *Materials Today*, vol. 11, no. 3, pp. 18–26, 2008, [doi: 10.1016/S1369-7021\(08\)70016-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(08)70016-6).
- [6] P. Sen *et al.*, "Multi-kilometre and multi-gigabit-per-second sub-terahertz communications for wireless backhaul applications," *Nature Electronics*, vol. 6, pp. 164–175, 2023, [doi: 10.1038/s41928-022-00897-6](https://doi.org/10.1038/s41928-022-00897-6).
- [7] L. Afsah-Hejri, E. Akbari, A. Toudeshki, T. Homayouni, A. Alizadeh, and R. Ehsani, "Terahertz spectroscopy and imaging: A review on agricultural applications," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 177, Art. no. 105628, 2020, [doi: 10.1016/j.compag.2020.105628](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105628).
- [8] Y.-C. Shen, "Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: A review," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 417, nos. 1–2, pp. 48–60, 2011, [doi: 10.1016/j.ijpharm.2011.01.012](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2011.01.012).
- [9] X. Yang, X. Zhao, K. Yang, Y. Liu, Y. Liu, W. Fu, and Y. Luo, "Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging," *Trends in Biotechnology*, vol. 34, no. 10, pp. 810–824, 2016, [doi: 10.1016/j.tibtech.2016.04.008](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.04.008).
- [10] F. Hindle, A. Cuisset, R. Bocquet, G. Mouret, "Continuous-wave terahertz by photomixing: applications to gas phase pollutant detection and quantification" *Comptes Rendus Physique*, 9(2), 262-275, 2007, [doi: 10.1016/j.crhy.2007.07.009](https://doi.org/10.1016/j.crhy.2007.07.009).
- [11] M. Raissi, *et al.*, "Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations", *Journal of Computational Physics*, vol. 378, pp. 686-707, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- [12] J. Berg and K. Nyström, "A Unified Deep Artificial Neural Network Approach to Partial Differential Equations in Complex Geometries", *Neurocomputing*, vol. 317, pp. 28-41, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.06.056>
- [13] F. Udrescu *et al.*, "AI Feynman: A Physics-Inspired Method for Symbolic Regression", *Science Advances*, vol. 6, no. 16, eaay2631, 2020. [DOI: 10.1126/sciadv.aay2631](https://doi.org/10.1126/sciadv.aay2631)
- [14] K. Brenden Petersen *et al.*, "Deep symbolic regression: Recovering mathematical expressions from data via risk-seeking policy gradients", *ICLR 2021*. <https://arxiv.org/abs/1912.04871>
- [15] W. Tenachi *et al.*, "Deep symbolic regression for physics guided by units constraints: toward the automated discovery of physical laws", *The Astrophysical Journal* 959.2 (2023): 99. [DOI 10.3847/1538-4357/ad014c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad014c)
- [16] A. Daryakenari *et al.*, "AI-Aristotle: A physics-informed framework for systems biology gray-box identification", *PLoS computational biology*, 20(3), e1011916, 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011916>
- [17] Baptiste Bouvier, Argheesh Bhanot, Yajing Yan & Alexandre Benoit, "La régression symbolique pour la modélisation des volcans", *Rencontre Scientifique Volcanologique 2025*. June 2025, Le Bourget du Lac (France). hal-05154988
- [18] Z. Liu *et al.*, "KAN 2.0: Kolmogorov-Arnold Networks Meet Science", *arXiv preprint* (2024), <https://arxiv.org/abs/2408.10205>

¹ Certaines de ces publications ne sont pas accessibles librement. N'hésitez pas à nous contacter pour les obtenir.