

Synthèse d'activité – Pôle MatRF

Matériaux et structures pour l'absorption électromagnétique

1. Positionnement et évolution de l'activité

Le Lab-STICC dispose depuis une dizaine d'années d'une expertise dans le développement de matériaux composites techniques et dans l'optimisation de structures dédiées à l'absorption électromagnétique (EM). Cette activité s'est notamment appuyée sur la maîtrise de la fabrication additive, développée depuis 2012, initialement pour la réalisation d'absorbants électromagnétiques.

Au cours de la période 2021-2025, le périmètre scientifique s'est progressivement élargi. Aux problématiques de mise en forme par impression 3D se sont ajoutées l'étude de nouvelles charges, notamment les MXènes, le graphène et les pétales ferromagnétiques, la caractérisation des matériaux, la modélisation des composites ainsi que l'optimisation de structures absorbantes, en particulier multicouches. L'équipe dispose ainsi aujourd'hui de compétences couvrant l'ensemble de la chaîne, de l'élaboration du composite jusqu'à la réponse à des cahiers des charges applicatifs complexes.

Cette montée en compétences s'est accompagnée d'un développement de l'activité partenariale, à travers des projets de recherche, des contrats industriels et des thèses CIFRE, ainsi que d'une visibilité scientifique renforcée par plusieurs conférences invitées.

2. Fabrication additive et applications spatiales

Un premier axe concerne l'utilisation de l'impression 3D pour la fabrication d'absorbants en ligne de transmission, notamment sous forme de charges pour guides d'onde. Cette approche a été développée dans le cadre de deux R&T successives du CNES pour des applications spatiales.

Les travaux ont permis de démontrer la compatibilité de charges imprimées en 3D avec un environnement spatial caractérisé notamment par de faibles pressions et une large plage de températures, allant de -150 °C à +150 °C. Les composants développés au Lab-STICC présentent, par rapport à des solutions classiques, des avantages en termes de masse et de coût. Les résultats obtenus ouvrent ainsi une perspective de transfert vers le milieu industriel.

Cette activité constitue un exemple de valorisation des compétences développées en fabrication additive, en associant formulation des matériaux, procédé d'impression, caractérisation électromagnétique et prise en compte des contraintes applicatives.

3. Nouveaux matériaux pour l'absorption en espace libre

Les recherches se sont orientées vers l'absorption en espace libre, avec des applications principalement liées à la furtivité, à l'intégration d'antennes sur leurs structures porteuses et à la compatibilité électromagnétique. Dans ce domaine, la nature et la formulation de la charge incorporée au composite jouent un rôle déterminant dans la réponse électromagnétique et doivent être adaptées à la bande de fréquence ciblée.

En collaboration avec l'UMI CINTRA à Singapour, l'équipe étudie notamment les propriétés des MXènes, matériaux 2D constitués de feuillets d'épaisseur nanométrique. Selon leurs conditions de synthèse, leurs propriétés de conductivité et de permittivité peuvent être modulées sur une large gamme de valeurs.

Dans le cadre du projet ANR META, ces propriétés ont été exploitées pour démontrer qu'une réduction de l'épaisseur des absorbants pouvait être obtenue simultanément avec une augmentation de leur

bande passante grâce à l'intégration de composites à base de MXènes dans des structures multicouches. Ces travaux font l'objet d'un dépôt de brevet et se poursuivent au travers d'une thèse CIFRE financée par Thales LAS.

Parallèlement, le projet RAPID HYPEG et une thèse CIFRE portent sur l'exploitation de structures multi-échelles polymère/graphène afin de concevoir des absorbants ultralégers destinés notamment à des applications aéronautiques, pour avions et drones.

4. Contrôle des propriétés par la géométrie

Un autre axe de recherche porte sur le contrôle des propriétés électromagnétiques par la géométrie. La fabrication additive permet en effet d'explorer des architectures difficilement accessibles par les procédés conventionnels d'usinage ou de moulage.

L'équipe étudie notamment les structures TPMS (Triply Periodic Minimum Surface), dont la géométrie permet de contrôler la porosité et, par conséquent, de moduler les propriétés diélectriques des matériaux absorbants. Cette possibilité de contrôler les propriétés effectives par la forme constitue un levier supplémentaire d'optimisation de la fonction d'absorption.

Dans le cadre du projet CHORUS, ces structures sont également associées à des métasurfaces à codage de phase. L'objectif est de combiner les phénomènes d'absorption et de rétrodiffusions spatiales multiples afin de réduire la surface équivalente radar de porteurs tels que les aéronefs et les navires.

5. Composites magnétiques et anisotropie

Les travaux menés sur les formulations de matériaux imprimables ont également conduit, dans le cadre de la thèse d'Arnaud Le Saos-Kauten, au développement d'un composite magnétique imprimable présentant des propriétés particulières. Sa formulation possède un caractère à seuil d'écoulement qui permet l'impression de structures suspendues sans recours à un matériau support.

Le procédé d'impression entraîne par ailleurs un alignement des pétales ferromagnétiques, ce qui induit une anisotropie des propriétés électromagnétiques. Durant la thèse, il a été montré que cette anisotropie pouvait être exploitée pour améliorer la robustesse angulaire des absorbants électromagnétiques.

Ces travaux se poursuivent actuellement dans le cadre du projet ASTRID Maturation FAMTASTIC, coordonné par le Lab-STICC, avec l'objectif de poursuivre la maturation de cette approche.

6. Dynamique scientifique, partenariale et perspectives

Le développement de cette activité s'appuie sur un portefeuille de thèses couvrant l'imprimabilité des composites, les métasurfaces absorbantes et codées, les matériaux 2D, les structures diélectriques et les composites à base de graphène. Plusieurs thèses sont réalisées en partenariat avec des industriels ou dans le cadre de projets financés par l'ANR, l'AID/DGA ou le dispositif CIFRE.

Le portefeuille de projets associe notamment le Lab-STICC à Thales Alenia Space, Thales Research & Technology, Thales DMS, Thales SIX, BlackLeaf, le CNES, l'IETR, l'IMN, l'IRDL, CANOE et d'autres partenaires académiques. Les projets couvrent des thématiques allant des applications spatiales aux radômes fonctionnels, à la furtivité, aux matériaux graphène et aux composites à charges anisotropes.

La visibilité scientifique de l'activité est également attestée par un brevet et par plusieurs conférences invitées entre 2021 et 2024, consacrées notamment à la fabrication additive pour les applications hyperfréquences, aux matériaux polymères techniques, aux procédés multi-matériaux et aux absorbants électromagnétiques.

Dans son ensemble, l'activité présente aujourd'hui un positionnement cohérent associant matériaux, procédés, caractérisation, modélisation et optimisation des structures. L'enjeu principal est désormais de consolider cette chaîne de compétences et de poursuivre la maturation des solutions les plus prometteuses, notamment pour les applications spatiales et aéronautiques, tout en renforçant les possibilités de transfert industriel.

Synthèse en quelques points

- Expertise développée depuis plus de dix ans sur les composites et structures pour l'absorption électromagnétique.
- Maîtrise de la fabrication additive appliquée aux matériaux et composants hyperfréquences.
- Diversification vers les MXènes, le graphène et les charges ferromagnétiques.
- Développement de structures multicouches, TPMS et métasurfaces pour optimiser l'absorption.
- Portefeuille actif de projets, contrats et thèses associant partenaires académiques et industriels.
- Perspectives de transfert industriel particulièrement identifiées pour certaines applications spatiales et aéronautiques.

Éléments quantitatifs liés à cette activité

Thèses :

Christophe Vong, " Etude de l'imprimabilité de matériaux composites souples et application à la réalisation de d'absorbants hyperfréquences", CIFRE Siepel, soutenue en juin 2022

Arnaud Le Saos—Kauten, "Elaboration par impression 3D de composites à performances électromagnétiques contrôlées : étude des relations matériaux-procédés-propriétés", Contrat d'établissement ED SPI (50%) / ED 3M (50%), soutenue en octobre 2024

Téo Nespoulet, "Métasurfaces absorbantes et à codage spatiotemporel pour la réduction de la surface équivalente RADAR des satellites", Co-direction Université de Rennes - Université de Brest, ANR ASTRID CHORUS, en cours

Yohan Bouyer, "Métasurfaces codées et absorbantes pour la réduction de la surface équivalente radar (SER)", Co-direction Université de Lille - Université de Brest, ANR ASTRID CHORUS, en cours

Anthony Auge, "Etude de surfaces absorbantes à base de matériaux 2D", CIFRE Thales LAS, en cours

Jérémy Mancassola, "Influence de la périodicité de réseaux tout diélectrique sur le compromis diffusion/absorption dans un contexte de menaces

multistatistiques", AID DGA (50%) / Contrat d'établissement ED S3M (50%), en cours

Pierric Buirey, "Matériaux composites absorbants électromagnétiques à base de graphène", CIFRE BlackLeaf, en cours

Projets :

2018-2023 Array Antenna Generating Multiple Fixed Wide Beams for LEO Applications – ESA ARTES AT AO9209 – Partenariat Thales Alenia Space, IETR, MIP, Lab-STICC

2022-2025 ANR META (MXene-Enabled ultra-Thin microwave Absorbers) – Partenariat Thales Research and Technology, CINTRA-Singapour, Lab-STICC

2021 PRI RADABS 3D (Radôme absorbant par impression 3D) – Partenariat Thales DMS, Elliptika, Lab-STICC

2022 GIS CORMORANT Radômes fonctionnels – Partenariat Thales DMS, Lab-STICC

2022-2024 Contrat R&T CNES – Optimisation, réalisation et évaluation de la spatialisation de charges compactes par impression de thermoplastiques hautes températures – Partenariat Thales Alenia Space, IRDL, Lab-STICC

2022-2024 Contrat R&T CNES – Absorbants en bande UHF élargie pour la caractérisation RF sous vide des propulseurs électriques – Partenariat IRDL, Lab-STICC

2023-2026 ANR ASTRID CHORUS – Codage de phase pour la furtivité spatiale – Partenariat IETR, IEMN, Lab-STICC

2025 Contrat Thales RT – Etude de composites imprimables à charges anisotropes – Partenariat Thales Research & Technology, Lab-STICC

2025-2028 RAPID HYPEG – Composite graphène pour absorption hyperfréquence et écrantage électromagnétique – Partenariat BlackLeaf, Thales SIX, Thales RT, Lab-STICC

2026-2028 ASTRID MATURATION FANTASTIC – Partenariat Thales RT, CANOE, IRDL, ICMCB, Lab-STICC

Brevets :

[B.3] A. Roy, S. Mallegol, C. Renard, C. Quendo, N. Martin, K.J. Vinoy, V. Laur, "Partial electromagnetic absorbing material for beam tilt of broadband wire antennas", Brevet FR2109426, septembre 2021

Conférences invitées :

V. Laur, "Activités en technologies additives pour applications hyperfréquences", Workshop CARPE DIEM MAGIS, Saint-Cloud, juillet 2021

V. Laur, A. Chevalier, A. Maalouf, J. Benedicto, P. Laurent, J. Ville, P. Roquefort, E. Roue, A. Le Saos—Kauten, L. Martinez-Cano, L. Damaj, C. Vong, P. Agaciak, G. Zinkiewicz, "Fabrication additive pour la conception d'absorbants électromagnétiques", Journée thématique COMET ECM / GdR Ondes, Développements récents autour de la fabrication additive pour les radiofréquences, Paris, décembre 2022

V. Laur, A. Chevalier, A. Maalouf, J. Ville, "Application of additive technologies to the design of microwave absorbers", Microwave Materials and their Applications, Mainz, September 2023

V.Laur, A. Chevalier, A. Maalouf, J. Ville, "Multi-materials Fused Deposition Modeling for Microwave Applications", 9th World Congress of Advanced Materials, Tokyo, May 2023

V. Laur, A. Chevalier, A. Maalouf, L. Damaj, "Control of microwave effective properties of 3D printed materials and applications to microwave absorption", IEEE Conf. Ant. Meas. And Appl., Genoa, November 2023

V. Laur, A. Chevalier, A. Maalouf, L. Damaj, J. Ville, "Study of resonant and broadband microwave absorbers based on multi-materials 3D printing", Int. Workshop on Microwave Research and Applications, Keynote Speech, Coma Ruga, July 2024

A. Maalouf, webinaire, invité par le Réseau des Mécaniciens du CNRS en Fabrication Additive (RDM FA), "Exemples des dernières avancées en impression 3D SLA et FDM", 14 février 2023.

A. Maalouf, "Matériaux polymères techniques", Action Nationale de Formation (ANF) mise en place par le Réseau des Mécaniciens du CNRS en Fabrication Additive (RDM FA), Limoges, 12 – 16 juin 2023.

A. Maalouf, "Fabrication additif complexe : hybride / multimatériaux", Action Régionale de Formation du RDM IdF, Fabrications : Additive – Soustractive – Hybride, Eléments de comparaison, Saint-Malo, 15-17 octobre 2024

A. Maalouf, "Electromagnetic absorbers by 3D printed technical polymer materials ", ICAMSEE'23, Meknès, Maroc, 27-29 Nov. 2023.

A. Maalouf, "Additive manufacturing / Overview and some process examples", Ecole de printemps sur la Microscopie Electronique, Spectroscopies Raman et Infrarouge, et la Fabrication Additive, Meknes, Maroc, 28-29 Mai 2024.

A. Maalouf, " Some examples of how 3D printing is used at SMART team in Lab-STICC", ICAMME24, Meknes, Maroc, 30-31 Mai 2024.