

Synthèse d'activité – Pôle MatRF

Ferrites pour applications hyperfréquences : de la recherche vers l'entrepreneuriat

1. Positionnement scientifique et expertise

Le Lab-STICC dispose d'une expertise historique dans l'élaboration, la caractérisation et l'intégration de céramiques polycristallines magnétiques, ou ferrites, destinées aux applications hyperfréquences. Cette expertise positionne le laboratoire comme un acteur reconnu au niveau national et international dans un domaine stratégique pour les technologies radiofréquences.

Les ferrites constituent des matériaux essentiels pour plusieurs composants des chaînes RF, notamment les circulateurs, les isolateurs et certains composants capables de supporter de fortes puissances, tels que les déphaseurs et les commutateurs. Ils offrent également une solution particulièrement efficace pour la miniaturisation des antennes aux basses fréquences. Ces fonctions sont essentielles dans de nombreux systèmes de télécommunications militaires et spatiaux ainsi que dans les systèmes radar.

Au sein de l'équipe SMART, les recherches portent à la fois sur les ferrites doux, principalement de type spinelle, et sur les ferrites durs, ou hexaferrites. Les formulations et les procédés de fabrication sont étudiés et optimisés afin d'améliorer les propriétés des matériaux et, par conséquent, les performances des composants hyperfréquences associés.

2. Développement des ferrites doux et intégration LTCC

Sur la période 2021-2025, les travaux ont poursuivi deux objectifs complémentaires : développer des procédés technologiques facilitant la production des composants et optimiser les formulations ainsi que les conditions de synthèse des ferrites pour répondre aux besoins des applications hyperfréquences.

À la suite de deux projets ANR menés entre 2019 et 2024, un projet RAPID consacré à la miniaturisation d'antennes UHF pour l'aéronautique et l'Internet des objets se poursuit sur la période 2022-2027. Ce projet associe notamment l'équipe SMART, le CEA LETI, Thales et EXXELIA et exploite les propriétés des ferrites doux.

En parallèle, avec le soutien de Thales Research and Technology, le Lab-STICC a travaillé au développement de ferrites doux compatibles avec la technologie LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics). L'objectif est de permettre la réalisation, en une seule étape de frittage, de circulateurs fonctionnant dans les bandes X et Ku. Les démonstrateurs obtenus, intégrant notamment une connectique CMS, ont montré des performances à l'état de l'art.

Ces résultats ouvrent des perspectives importantes en matière d'intégration. La technologie LTCC, naturellement multicouche, permet en effet d'exploiter la troisième dimension pour faciliter l'intégration des composants et réduire leur encombrement.

3. Ferrites durs et composants auto-polarisés

Le second axe majeur concerne le développement de ferrites durs, ou hexaferrites, et leur intégration dans des composants hyperfréquences tels que les antennes et les circulateurs. Leur principale caractéristique est de conserver une aimantation forte en l'absence de champ appliqué. Ils peuvent ainsi fonctionner sans aimant permanent externe pour assurer leur polarisation.

Cette propriété constitue un avantage déterminant pour la miniaturisation des composants. À titre d'illustration, dans un circulateur à ferrite doux fonctionnant en bande Ka, entre 36 et 38 GHz, l'aimant permanent peut représenter jusqu'à 90 % de l'épaisseur totale du composant. Le recours à un ferrite dur auto-polarisé permet donc d'envisager une réduction importante du volume et une intégration plus simple dans les systèmes.

Les recherches menées sur la période ont porté à la fois sur l'utilisation d'hexaferrites commerciaux pour réaliser des circulateurs ultra-compacts et sur la synthèse de matériaux spécifiquement adaptés aux applications hyperfréquences. Les hexaferrites disponibles commercialement sont en effet principalement développés pour les applications d'aimants et leurs propriétés ne sont pas nécessairement optimisées pour les dispositifs RF. Leur fabrication industrielle peut par ailleurs nécessiter des moyens lourds pour orienter les particules lors du pressage.

4. Une méthode originale et la création de HITMag

Le Lab-STICC a développé une méthode originale d'élaboration d'hexaferrites pré-orientés, compatible avec des procédés classiques de fabrication des céramiques. Cette approche permet d'ajuster les propriétés des ferrites afin de répondre plus directement aux besoins des concepteurs de dispositifs radiofréquences.

Ces travaux ont conduit au dépôt d'une déclaration d'invention et à la création de la start-up HITMag, illustrant le potentiel de valorisation et de transfert technologique de cette activité. Le lien entre recherche académique et entrepreneuriat constitue ainsi un résultat majeur de cette thématique.

La création de HITMag s'appuie directement sur les compétences développées au Lab-STICC. Un post-doctorant issu du laboratoire figure parmi les quatre membres fondateurs et un doctorant du laboratoire a rejoint la société lors de sa création. Deux maîtres de conférences de l'UBO rattachés à l'équipe SMART du Lab-STICC participent également à la création et assurent un rôle de conseil scientifique.

5. Dynamique de recherche et partenariats

L'activité est soutenue par plusieurs thèses portant sur la conception de circulateurs multicouches, les ferrites hyperfréquences pour dispositifs commandables, les composants ultra-compacts en bande E, les ferrites LTCC haute performance et l'utilisation de l'apprentissage automatique pour la conception et l'optimisation des dispositifs hyperfréquences.

Le portefeuille de projets témoigne d'une forte dynamique partenariale. Il comprend notamment des collaborations avec l'ESA, Thales Research and Technology, Thales Alenia Space, Thales LAS, le CNES, le CEA, XLIM, CISTEME, INOVEOS, IETR et EXXELIA. Les travaux couvrent des problématiques variées : commutation haute puissance en bande Ka, circulateurs compacts en bande Ku, antennes miniatures multibandes, dispositifs auto-polarisés, isolateurs intégrés, intégration monolithique et matériaux magnétodiélectriques accordables.

Plusieurs projets se poursuivent jusqu'à 2027, notamment YACARI dans le cadre du PEPR 5G et Réseaux du Futur, CAFE dans le cadre de l'ANR, ainsi que RAPID FAMTOMAS consacré à la fabrication de matériaux magnétodiélectriques pour les antennes VUHF.

6. Valorisation scientifique et perspectives

L'activité a donné également lieu à une valorisation par le dépôt de plusieurs brevets et déclarations d'invention portant sur les circulateurs hyperfréquences, les hexaferrites auto-polarisés, les ferrites spinelles et les antennes reconfigurables en fréquence. Cette production traduit la capacité du

laboratoire à transformer ses travaux fondamentaux et technologiques en solutions susceptibles d'être valorisées.

La visibilité scientifique est renforcée par plusieurs conférences invitées consacrées au développement des ferrites et à leurs applications hyperfréquences, à la caractérisation multiphysique des matériaux, aux hexaferrites auto-polarisés et aux relations entre états d'aimantation et applications.

Dans son ensemble, cette activité présente un positionnement allant de la science des matériaux à la conception de composants RF et à leur intégration dans des systèmes. Les résultats obtenus sur les ferrites doux et durs, en particulier les approches LTCC et auto-polarisées, constituent des leviers importants pour répondre aux enjeux de miniaturisation, de performances et d'intégration des systèmes hyperfréquences. La création de HITMag illustre en outre une perspective concrète de transfert technologique et d'entrepreneuriat issue des recherches menées au Lab-STICC.

Synthèse en quelques points

- Expertise historique du Lab-STICC dans les ferrites pour applications hyperfréquences.
- Développement de ferrites doux et de technologies LTCC pour des composants RF compacts et performants.
- Développement d'hexaferrites auto-polarisés permettant de supprimer l'aimant permanent et de réduire l'encombrement.
- Portefeuille de projets associant partenaires académiques, industriels, ESA et CNES.
- Production de plusieurs brevets et déclarations d'invention.
- Valorisation particulièrement marquée avec la création de la start-up HITMag.

Eléments quantitatifs liés à cette activité

Thèses :

Norbert Parker-Soues, "Conception et réalisation de circulateurs par technologie multicouche collective", DGA (50%) / Région Bretagne (50%), soutenue en avril 2022

Jaafar Saied, "Etude de ferrites hyperfréquences pour dispositifs commandables", CIFRE Thales Research & Technology, soutenue en avril 2023

Evan Roue, "Conception de circulateurs et isolateurs ultra-compacts en bandes E pour les systèmes de communication à très haut débit", DGA (50%) / Thales Alenia Space (50%), soutenue en décembre 2023

Mathis Legay, "Elaboration et caractérisation de ferrites LTCC haute performance pour circulateurs hyperfréquences", CIFRE Thales DMS, en cours

Marco Atlante, "Machine learning et outils statistiques pour la conception et l'optimisation des dispositifs hyperfréquences", co-tutelle Université de Brest – Politecnico di Torino, en cours

Projets :

2019-2023 High Power Ka-band Ferrite Switch - ESA AO/1-9434 – Partenariat HARP Technologies (Finlande), Lab-STICC, TRT

2018-2021 ANR ASTRID CIRCKU (Circulateur compact fonctionnant en bande Ku) – Partenariat TRT, TAS, Thales LAS, Lab-STICC

2020-2022 ANR CONTACT (Nouveaux concepts d'antennes miniatures multi-bandes à polarisation circulaire à base de matériaux ferrites auto-aimantés) – Partenariat XLIM, Lab-STICC, CISTEME, INOVEOS

2021-2024 RAPID DEMETER (DEMonstrateurs isolTeurs et circulaTeurs auto-polarisés) – Partenariat Thales LAS, Inoveos, Thales Research and Technology, Lab-STICC

2022-2023 Contrat R&T CNES – Isolateurs intégrés pour Front-End Ka Tx – Partenariat Thales Alenia Space, Thales Research & Technology, Lab-STICC

2023-2027 PEPR 5G et Réseaux du Futur – YACARI – Intégration de circulateur en technologie monolithique – Partenariat CEA, Lab-STICC

2025-2026 Contrat R&T CNES – Réalisation de circulateurs/isolateurs auto-polarisés ferrite-diélectrique en bande Ka – Partenariat Thales Alenia Space, Thales Research & Technology, Lab-STICC

2024-2027 ANR CAFE (Co-intégration d'un isolateur et d'une Antenne compact et performant par le développement d'un substrat de FErrite auto-polarisé dédié) - Partenariat XLIM, Lab-STICC, CISTEME

2022-2024 ANR TOCCATA (Développement de matériaux magnéTOdielectriques agiles en fréquence pour l'aCCordabilité d'AnTennes VHF par un chAmp magnétique de faible intensité) -Partenariat Lab-STICC, TRT, IETR

2022-2027 RAPID FAMTOMAS (Fabrication de Matériaux Magnétodiélectriques pour la fabrication d'Antennes VUHF) – Partenariat EXXELIA, Thalés, CEA, Lab-STICC.

Brevets :

E. Roue, V. Laur, R. Lebourgeois, O. Vendier, A. Chevalier, G. Tanné, "Circulateurs hyperfréquences à plan de masse structuré", Brevet FR2405097, mai 2024.

A. Hoëz, J.L. Mattei, déclaration d'invention, référencée DV5167 et intitulée « Nouveau procédé permettant d'obtenir des hexaferrites auto-polarisés sous forme massive à haute performance par simple pressage à froid des précurseurs suivis d'un traitement thermique. », Septembre 2023

J.-L. Mattei, D. Souriou, brevet DV4257 – « Procédé d'obtention d'un ferrite spinelle de nickel zinc cobalt sous forme céramique », Janvier 2022

L. Batel (CEA), Ch. Delaveaud (CEA), JF Pintos (CEA), JL Mattei (Lab-STICC), V. Laur (Lab-STICC), A. Chevalier (LAB-STICC), Brevet FR 2002363 « Antenne fil-plaque monopolaire reconfigurable en fréquence », mars 2020.

Conférences invitées :

V. Laur, J.L. Mattei, J. Saied, N. Parker-Soues, "Développement de ferrites et applications hyperfréquences au Lab-STICC", Webinaire GT4 GDR Ondes, en distanciel, septembre 2021

V. Laur, A. Chevalier, J.L. Mattei, R. Lebourgeois, "Multispectral and Multiphysics characterization of ferrites for microwave applications", Microwave Materials and their Applications, Saint-Brieuc, Sept. 2025

A.Hoëz, A. Chevalier, N. Parker-Soues, E. Roué, V. Muzzupapa, J.-L. Mattei, « Development of New Self-Polarized Critical Materials Free Hexaferrites for Microwave Devices Innovations (10-72GHz) », CAMA 2025, Antibes-Juan les Pins, Novembre 2025

V. Laur, A. Chevalier, J.L. Mattei, "Ferrite-based microwave components: relationship between magnetization states and applications", Workshop SWING, PEPR Spintronique, Plouzané, Mai 2026