

Activités de l'équipe IMH

a - Modélisation de l'interaction ondes/matière

Nos travaux dans ce domaine d'étude s'étendent de la modélisation des ferrites polycristallins jusqu'à celle des composites magnétoélectriques granulaires, constitués de particules ferromagnétiques et ferroélectriques, ou lamellaire, alternances de couches minces conductrices et isolantes. Le point commun à ces différents milieux est la complexité de leur microstructure, qui associe une forte hétérogénéité à des anisotropies de différentes natures (Fig. M1) : cristallographique, de forme ou encore induite par des contraintes extérieures (champ de polarisation, contrainte mécanique). Après avoir étudié ces dernières années des composites constitués de particules de taille micrométrique, nous focalisons nos travaux sur des matériaux structurés à une échelle de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres. Ces nanophases magnétoélectriques ont, de par leur structure, des propriétés parfois très supérieures à celles des ferrites. A ces échelles, du domaine des nanotechnologies, des phénomènes physiques inhabituels, liés à la prédominance des effets de surface sur les effets de volume, apparaissent. Notre objectif est de mieux les comprendre, de les modéliser et les mettre à profit pour la réalisation de fonctions hyperfréquences.

b - Caractérisation EM des matériaux

Le contrôle des performances des matériaux rentrant dans la fabrication d'un dispositif hyperfréquence (substrats diélectriques transparents, pastilles de ferrites aimantés, couches absorbantes,...), tout comme la validation des modèles physiques développés pour prédire l'interaction onde/matière, requiert inéluctablement la conception et la mise en oeuvre de procédures de caractérisation expérimentale. De nouvelles techniques ont d'abord été appliquées aux matériaux étudiés par l'équipe IDH (ferrites, ferrocomposites, encres magnétiques, ...). Un effort tout particulier a été porté sur la **caractérisation de matériaux magnétiques aimantés**, siège d'une anisotropie induite et dont le comportement dynamique doit être représenté par une grandeur tensorielle (tenseur de perméabilité). Nous avons également souhaité étendre les compétences acquises sur cette thématique au-delà de notre secteur d'applications habituel, celui des télécommunications, pour répondre aux besoins de laboratoires appartenant à d'autres champs disciplinaires comme le génie civil ou la biologie. Par exemple, l'étude des effets sanitaires des rayonnements micro-ondes est une voie de recherche en pleine expansion, où sont sous-jacents des **problèmes de détection et d'auscultation de milieux très divers**. Ce type d'étude pluridisciplinaire constitue également pour le LEST une opportunité d'établir des liens étroits entre les chercheurs spécialisés en Traitement du signal et ceux travaillant dans le domaine de l'électromagnétisme.

c –Elaboration des matériaux

A l'heure actuelle, la réalisation de films minces ferromagnétiques ou ferroélectriques pour la microélectronique se fait essentiellement à partir de processus physiques : ablation laser, dépôt par pulvérisation cathodique, dépôt plasma. Ces méthodes permettent de réaliser des couches d'épaisseurs submicroniques, mais l'équipement associé est très onéreux. C'est la raison pour laquelle ces processus technologiques sont rarement utilisés par les fabricants de ferrites. A l'inverse, les **approches physico-chimiques (pressage ou dépôt d'encre)**, que nous nous proposons d'étudier, ne requièrent aucun investissement lourd et, à l'exemple de la sérigraphie, sont couramment utilisés dans les processus de fabrication industriels des céramiques. A ce titre, les méthodes de synthèse développées au LEST sont parfaitement compatibles avec les techniques d'intégration des circuits imprimés de l'électronique haute fréquence, offrant ainsi la possibilité d'étudier au laboratoire une nouvelle génération de dispositifs micro-ondes faibles coûts.

d – Application et transfert des matériaux

✓ **Agilité en fréquence des fonctions micro-ondes** - Aujourd'hui, la multiplication des normes de télécommunications, notamment sur le marché de la téléphonie mobile, implique l'intégration, dans un même système, de différents circuits réalisant la même fonction de traitement du signal, mais fonctionnant à différentes fréquences. Pour éviter cette contrainte, qui rend difficile la miniaturisation et

la réduction des coûts de fabrication des dispositifs hyperfréquences, une solution consiste à réaliser des circuits accordables. On peut, par exemple, mettre à profit les propriétés d'agilité en fréquence de certains matériaux, qui sont alors utilisés comme substrats des circuits imprimés hautes fréquences. Cette solution permet d'éviter l'intégration délicate sur le plan technique et souvent onéreuse d'éléments extérieurs tels que les composants électroniques actifs ou les MEMS.

Or, les matériaux conventionnels, i.e. les ferrites, et les méthodes courantes d'assemblage des différents éléments des dispositifs ont atteint leurs limites. La solution alternative que nous étudions est l'**approche multifonctionnelle** à partir de la synergie de deux ou plusieurs propriétés mises en interaction dans la fabrication de nanocomposites permettant un couplage des propriétés d'aimantation à celles de polarisation. Un exemple particulièrement pertinent concerne l'effet magnéto-électrique, pour lequel un champ électrique peut agir sur l'aimantation, et/ou un champ magnétique peut commander la polarisation électrique. Les nanophases piézoélectrique (ferroélectrique) et magnétostrictive sont alors couplées électromagnétiquement par l'intermédiaire des contraintes mécaniques locales dans le composite. De tels matériaux multiferroïques suscitent un grand intérêt pour la réalisation de fonctions micro-ondes (filtres accordables, circulateurs, etc) à taille et coût réduits.

✓ **Conception et réalisation de fonctions non-réciproques** - Actuellement dans le domaine des télécommunications, la gamme de fréquences qui se développe le plus rapidement, en termes d'applications nouvelles, est celle qui correspond aux ondes millimétriques. Or, à ce jour aucun circulateur (fonction de duplexage ou d'isolation, cf. figure M.15.a) ne répond aux cahiers des charges fixés par les industriels du secteur dans cette gamme de fréquences. La raison principale est d'abord liée à l'absence de matériaux présentant des caractéristiques magnétiques (niveau de perméabilité, pertes,...) acceptables à ces fréquences. Une autre explication provient du fait qu'aucune modélisation assistée par ordinateur n'est vraiment adaptée à l'étude de tels dispositifs. La démarche suivie jusqu'ici par les fabricants consiste à vérifier expérimentalement les performances du dispositif après l'intégration d'un nouveau composé (ferrite ou aimant permanent), à défaut d'approche théorique rigoureuse. La conception d'une nouvelle classe de circulateurs/isolateurs millimétriques, si possible auto-polarisés pour accroître leur compacité, devra s'appuyer sur des méthodes de conception assistée par ordinateur réalistes et prédictives. C'est tout l'enjeu de nos travaux dans ce domaine d'étude.