

NON PROTEGE



LES MATERIAUX MAGNÉTIQUES POUR LES MICRO-ONDES : DES ABSORBANTS PASSIFS À LA MAGNONIQUE

Nicolas Vukadinovic, Dassault Aviation

JOURNÉES NATIONALES MICRO-ONDES, ANTIBES JUAN LES PINS, 4-7 JUIN 2024

SOMMAIRE

➤ Introduction

➤ Matériaux magnétiques pour l'absorption micro-onde

- Contexte
- Composite élastomère/pétales ferromagnétiques orientés
- Composite élastomère/poudre d'hexaferrite dopé
- Quelques perspectives

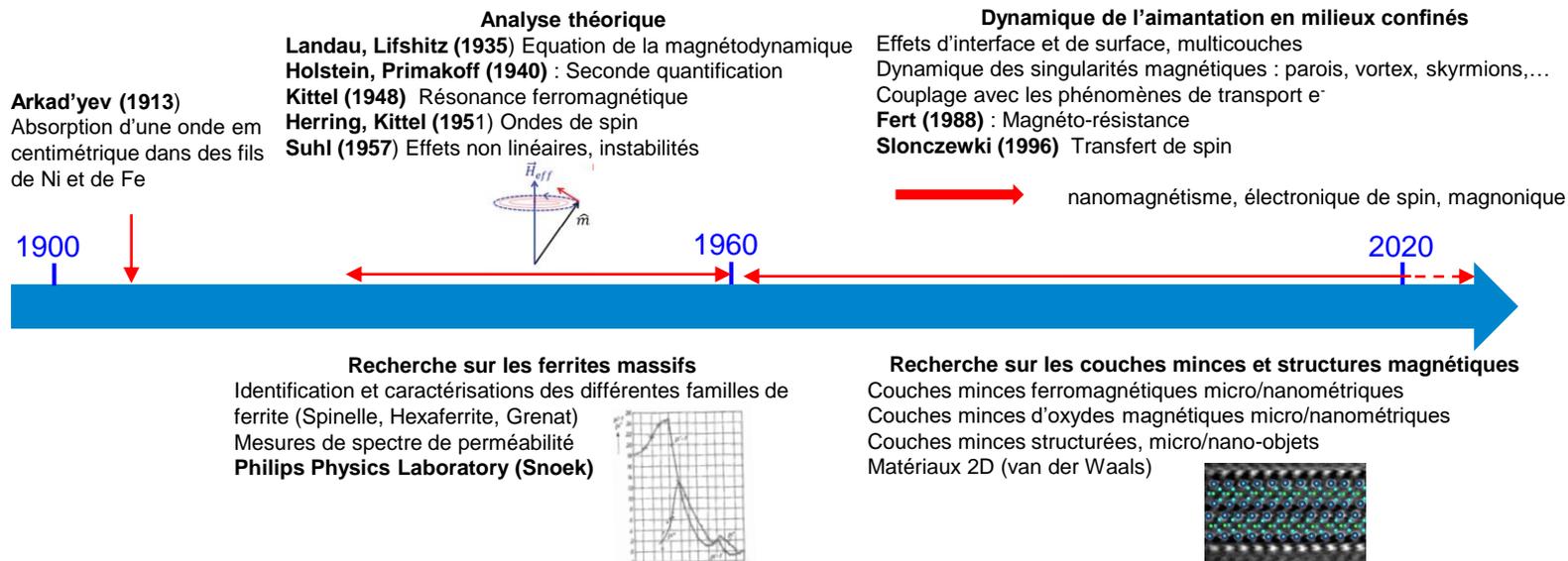
➤ Magnonique

- Contexte
- Le grenat d'yttrium fer (YIG)
- « Ingrédients » de base pour la conception de composants fonctionnels
- Principaux axes de recherches et perspectives

➤ Conclusion

INTRODUCTION

- Matériaux magnétiques – rayonnement micro-onde : une idylle centenaire...
- Quelques repères chronologiques



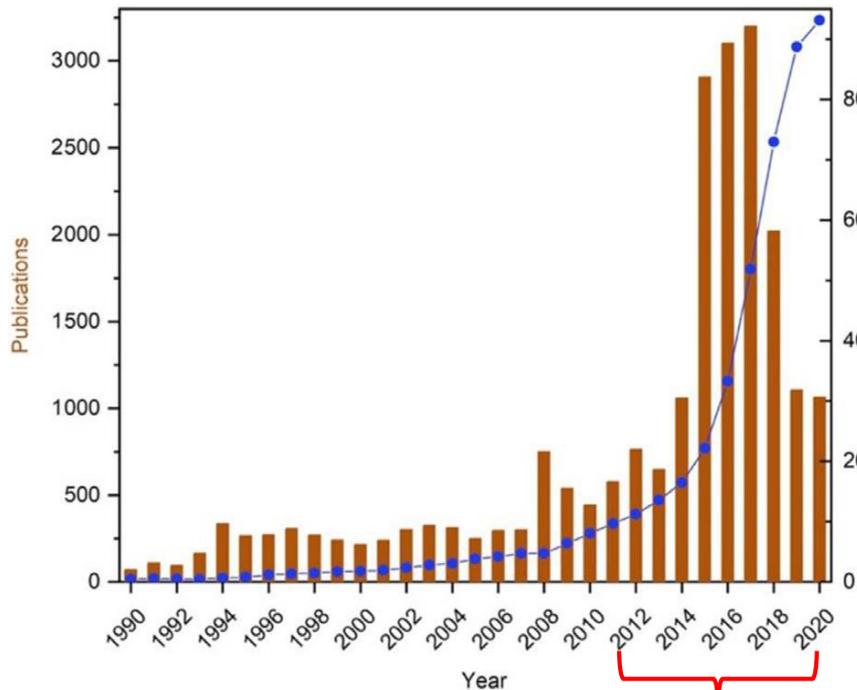
- Premiers absorbants magnétiques dans le domaine micro-onde : composites à base de particules de Fer carbonyle (seconde guerre mondiale)

MATÉRIAUX POUR L'ABSORPTION MICRO-ONDE : CONTEXTE

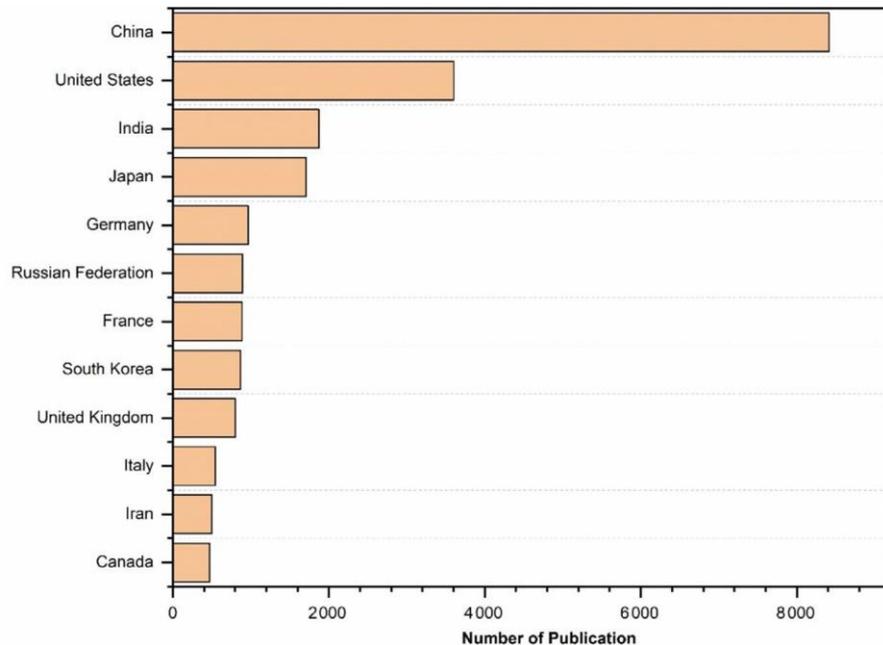
- Prolifération de sources électromagnétiques
 - ➔ besoin d'absorbants dans le domaine des microondes pour protéger les équipements et les personnes
- Domaine militaire : multitude de menaces RADAR de quelques centaines de MHz jusqu'à quelques dizaines de GHz*
- Forte activité de recherche pour améliorer les performances EM des absorbants, réduire leur masse, diminuer leur coût, faciliter leur maintenance,...
- Activité multi-disciplinaire (matériaux, physique, chimie, électronique, ingénierie, mathématiques appliquées,...)

* A. de Lustrac, 'Matériaux composites en électromagnétisme - Matériaux absorbants radar', Techniques de l'ingénieur (2018)

MATÉRIAUX POUR L'ABSORPTION MICRO-ONDE : INDICATEURS BIBLIOMÉTRIQUES



Apport des nano-matériaux



Prédominance asiatique essentiellement chinoise

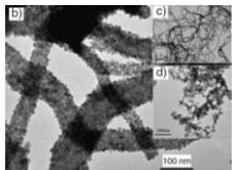
Y. Akinay et al., *ChemPhysMater* 2, 197 (2023)

MATÉRIAUX POUR L'ABSORPTION MICRO-ONDE : CONTEXTE

- Différentes mises en forme des matériaux selon les contraintes d'utilisation : matériaux massifs mono ou polycristallins, **des matériaux composites à base de micro ou nanoparticules**, des couches minces continues ou structurées
- Grande diversité de matériaux naturels :

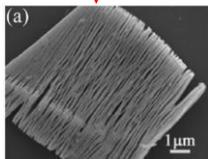
Charges carbonées :

- Noirs de carbone
- Graphite
- Nanotubes de carbone (NTC)
- Graphène (oxyde de graphène, oxyde de graphène réduit)
- MXènes



J. Sui et al., Mat. Lett. 75, 158 (2012)

B. Anasori et al., Nature Rev. Mat. 2, 16098 (2017)



X. Zeng et al., Carbon 168, 606 (2020)

Charges semi-conductrices :

- SiC
- ZnO
- Pérovskites hybrides halogénées

Charges magnétiques :

- ferromagnétiques
- ferrimagnétiques

Polymères conducteurs :

- Polyaniline
- Polypyrrole

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES POUR L'ABSORPTION MICRO-ONDE

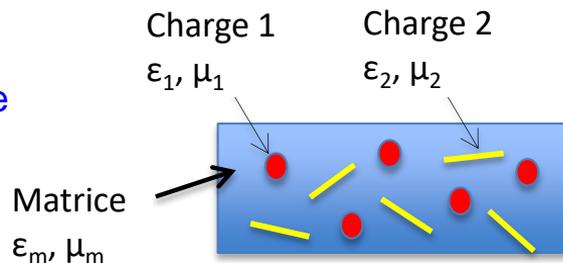
- **Intérêt des matériaux ferro ou ferrimagnétiques :**

- Possibilité d'absorber le rayonnement électromagnétique par le biais de résonances magnétiques intrinsèques (notamment le mécanisme de gyrorésonance)
- Ajustement de la fréquence centrale d'absorption en fonction de la composition du matériau

- **Grande diversité des matériaux magnétiques :**

- Métaux purs ou alliages ferromagnétiques (FeSi, FeSiAl, FeNi, FeCo,...)
- Ferrites : spinelles, grenats, hexaferrites (types M, U, W, Y, Z)

Utilisation sous forme de matériaux composites (peintures ou élastomères chargés)



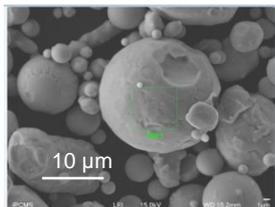
Degrés de liberté à l'échelle de la charge :

- Composition → paramètres magnétiques (aimantation, anisotropie,..)
- Morphologie des charges (sphéroïdes, plaquettes, aiguilles,...)
- Effet d'une texture magnétique (apparition de nouveaux modes d'absorption)
- Effet de surface ou d'interface (charge « cœur-coquille »)
- Effet de couplage (dipolaire) entre charges

COMPOSITES ÉLASTOMÈRE/PÉTALES FERROMAGNÉTIQUES ORIENTÉS

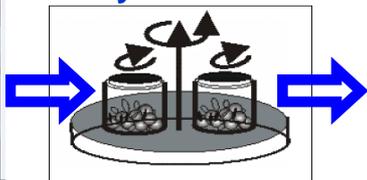
- Quelques références-clés : *G. Sandoz, NRL Report (1949)*
R. M. Walser et al., IEEE Trans. Magn.34, 1390 (1998)
Y. Yoshida et al., J. Appl. Phys. 85, 4636 (1999)
- Synthèse des pétales ferromagnétiques et mise en œuvre dans un élastomère

Elaboration des pétales par mécano-synthèse

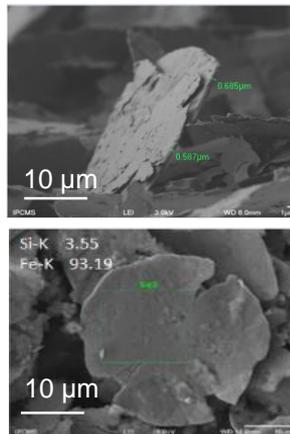


Poudre de FeSi

Broyeur Planétaire



Pétales de FeSi



Elastomère chargé (Cv=40%)

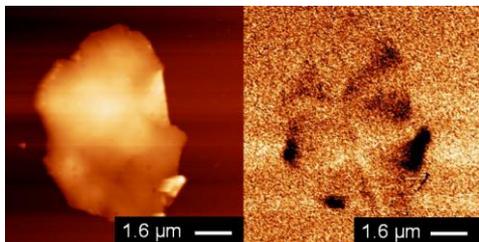


ANR ASTRID CARPE DIEM



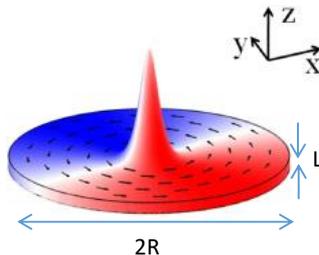
PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES COMPOSITES À BASE DE PÉTALES : RÉSONANCE « BASSE » FRÉQUENCE

MFM (Lab. Physique des Solides, Orsay)

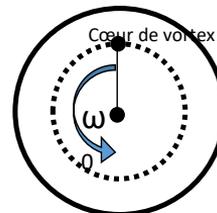


J. Neige et al., Appl. Phys. Lett., vol. 102, 242401, 2013

Etat vortex



Mode gyrotropique de vortex



	$F_{r_{exp}}$ (MHz)	$F_{r_{theo}}$ (MHz)
FeNiMo	75	83
FeSiAl	144	140
FeSi	278	286
Fe	320	343

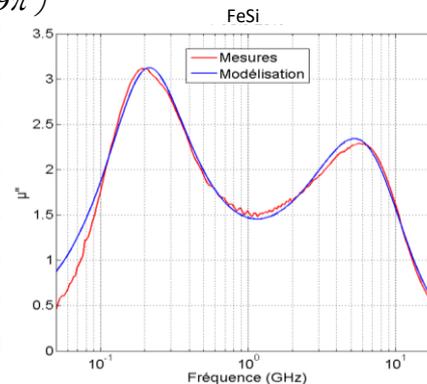
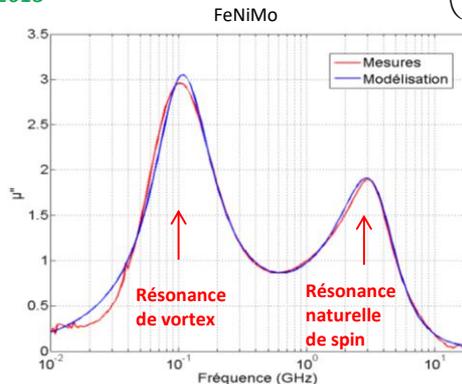
$$\omega_0 = \left(\frac{5}{9\pi} \right) \times 4\pi\gamma Ms \beta$$

Modélisation analytique à deux échelles

Échelle du pétale : dynamique de spin (somme de deux oscillateurs de Lorentz)

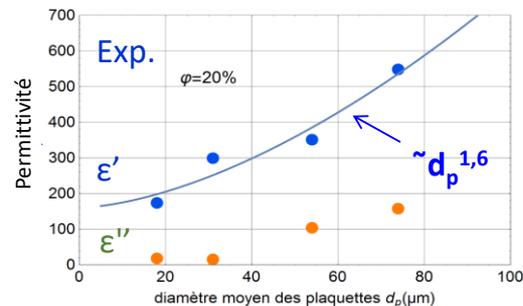
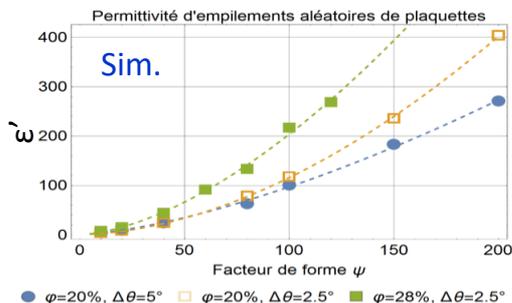
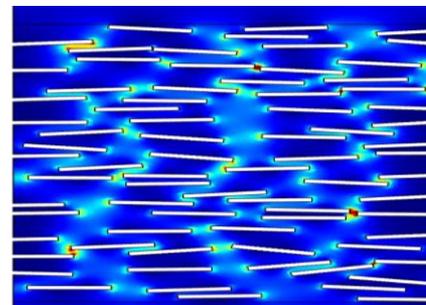
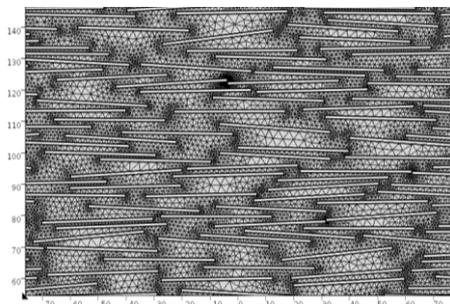
Échelle du composite : loi de mélange de type Maxwell-Garnett anisotrope

Z. Raolison et al., IEEE Trans. Magn. 53, 2801704, 2017



PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DES COMPOSITES À BASE DE PÉTALES

- Résolution numérique des équations de Maxwell par éléments finis

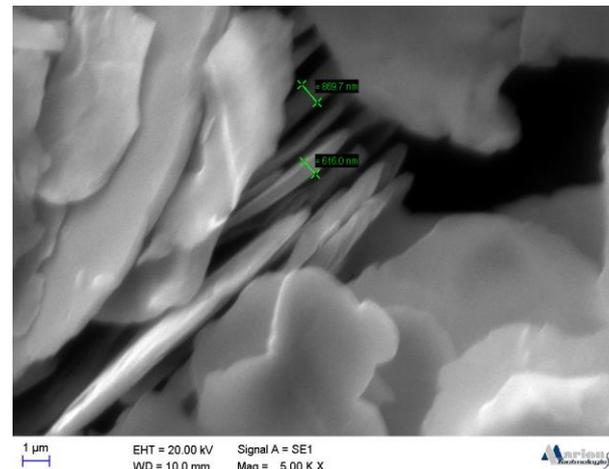
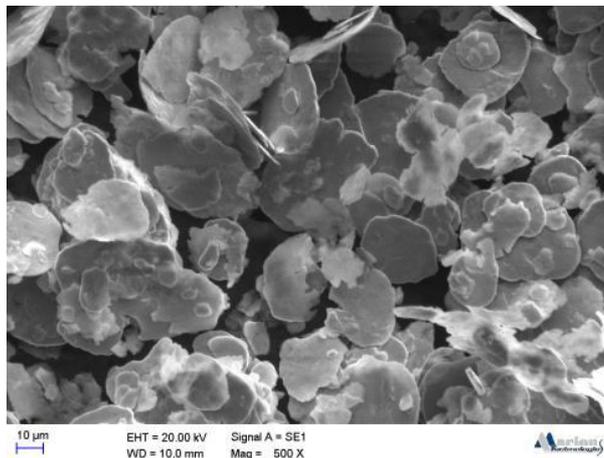


Premier dimensionnement des composites pour limiter le niveau de permittivité

PASSAGE À L'ÉCHELLE SEMI-INDUSTRIELLE

Broyeur à billes Marion Technologies
Quantité : 15 kg

Pétales d'alliage FeSi à morphologie contrôlée



ANR ASTRID Maturation CARPE DIEM MAGIS

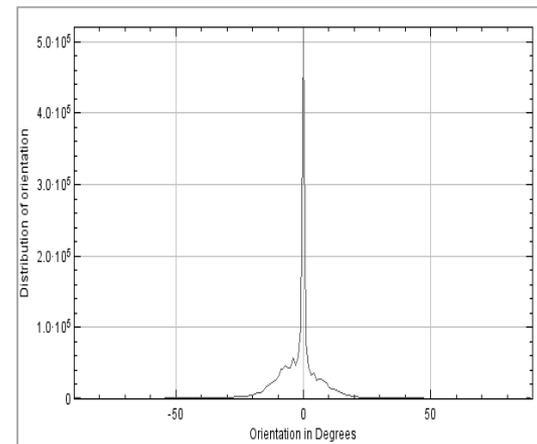
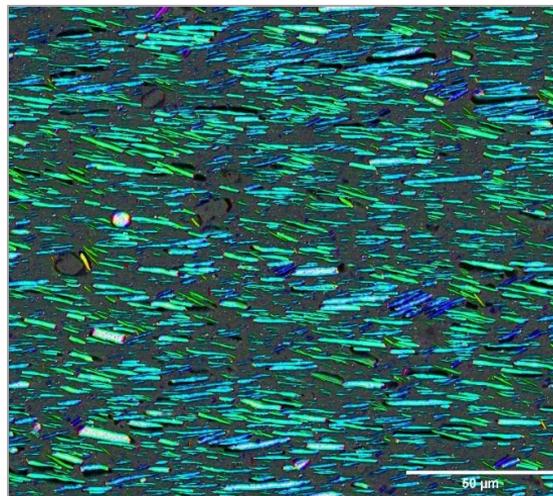


PASSAGE À L'ÉCHELLE SEMI-INDUSTRIELLE

Procédé de calandrage (Hutchinson PAULSTRA)
Plaques 30 cm x 30 cm d'épaisseur
millimétrique

MEB + traitement d'images

Distribution angulaire des pétales

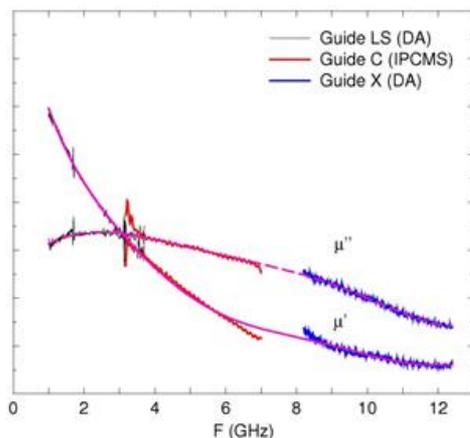
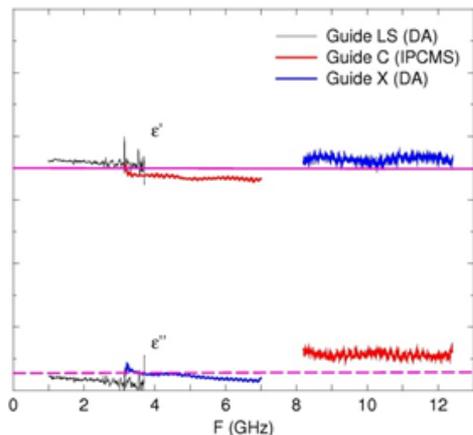


ANR ASTRID Maturation CARPE DIEM MAGIS



CARACTÉRISATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

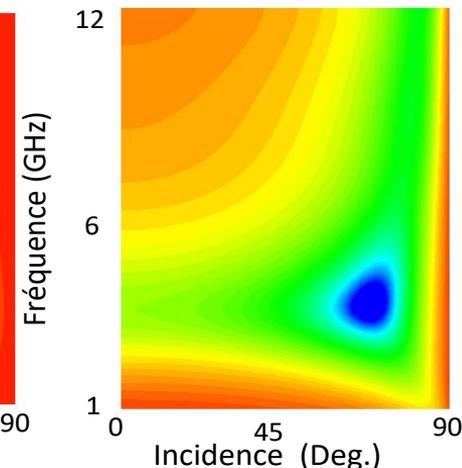
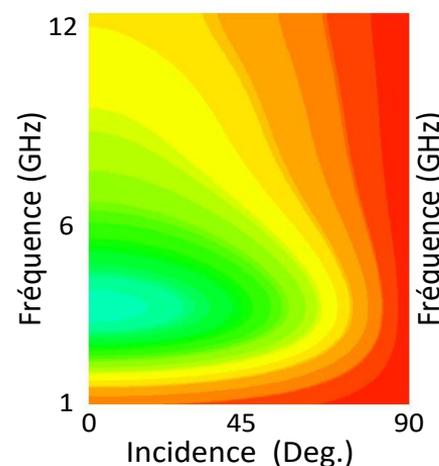
Mesures en guides d'ondes rectangulaires,
Composite chargé à 25% en volume en pétales FeSi



Calcul de $|R|$ (incidence, fréquence)
Monocouche d'1 mm sur plan réflecteur

Polarisation HH

Polarisation VV



Absorption significative dans la bande de fréquences 1- 6 GHz pour une épaisseur millimétrique



ANR ASTRID Maturation CARPE DIEM MAGIS



COMPOSITES À BASE D'HEXAFERRITE DE BARYUM POUR L'ABSORPTION EN BANDES Ku (12 – 18 GHz), K (18 – 27 GHz) ET Ka (27 – 40 GHz)

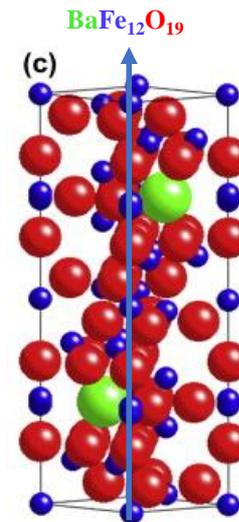
Hexaferrite de type M générique: $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$,
 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

Découverte : Philips Physics Laboratory (1950)

Applications :

- Les aimants permanents sans terres rares
- L'enregistrement magnétique haute densité
- Les composants électroniques (circulateurs)
- Les absorbants radar à hautes fréquences
- La communication 5G (antennes réseau en bande Ka, couches minces d'hexaferrite sur substrat semi-conducteur)

R. C. Pullar, Prog. Mater. Sci. 57, 1191 (2012)



Forte anisotropie magnétique suivant l'axe c

Fréquence centrale d'absorption $f_r = 48$ GHz

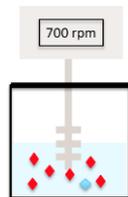
$\text{BaTi}_x\text{Mn}_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$; x f_r

Thèse de doctorat de Maria Vasquez Bernardez (octobre 2022 – septembre 2025)

SYNTHÈSE PAR VOIE CÉRAMIQUE DES POUDRES D'HEXAFERRITE DE COMPOSITION : $BaMn_xTi_xFe_{12-2x}O_{19}$



Calcination



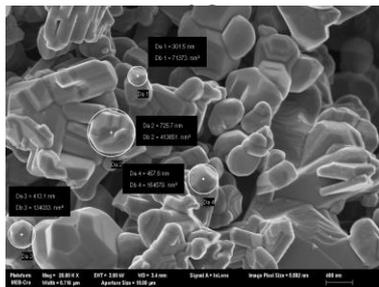
Broyage 30 min



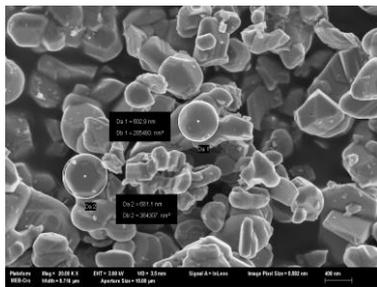
Frittage 1300°C, 16h



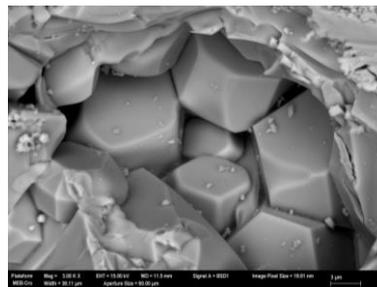
Broyage du matériau massif



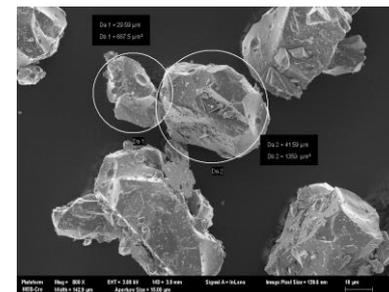
Plaquettes
400 – 700 nm



Particules arrondies
400 – 700 nm



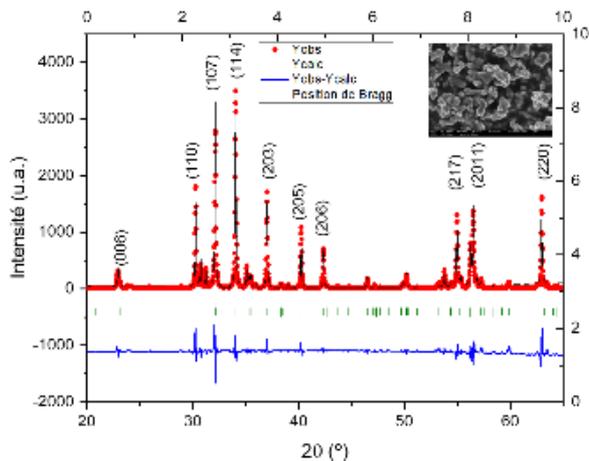
Particules hexagonales
accollées
> 10 μm



Particules facettées
> 1 μm

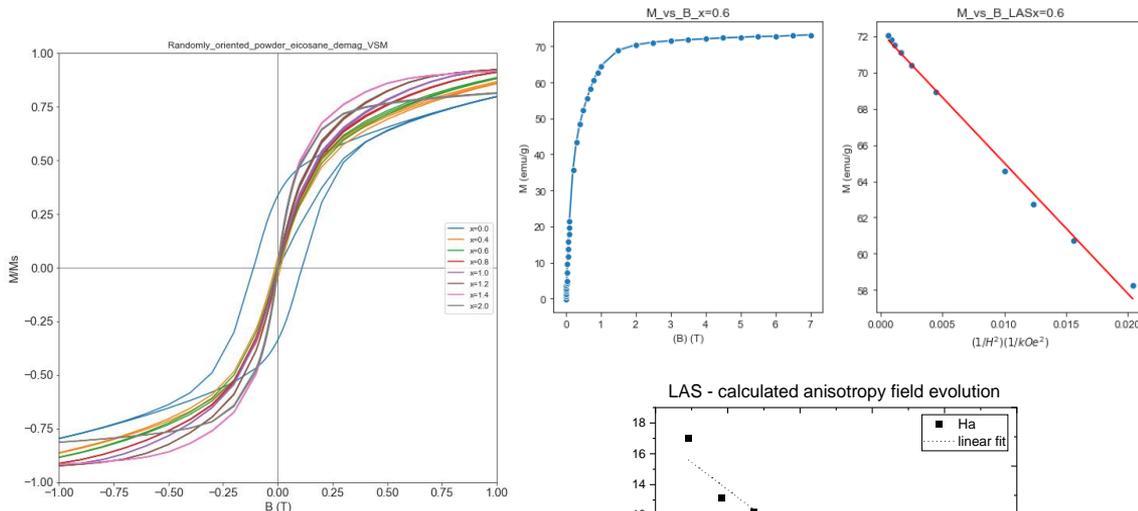
CARACTÉRISATIONS ÉLÉMENTAIRES DES POUDRES D'HEXAFERRITE DOPÉ

Analyse cristallographique



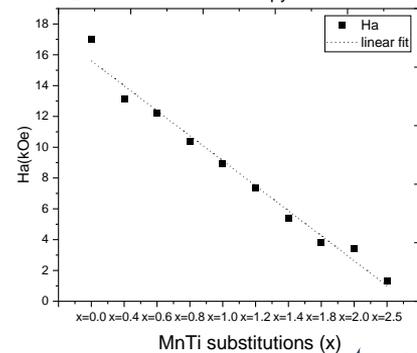
Vérification de la stœchiométrie :
paramètres de maille, composition locale
(Diffraction des RX, MEB + EDX)

Mesures magnétiques statiques : cycles d'hystérésis



Détermination $M_s(x)$, $H_a(x)$

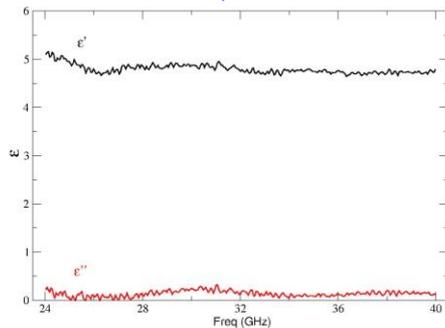
LAS - calculated anisotropy field evolution



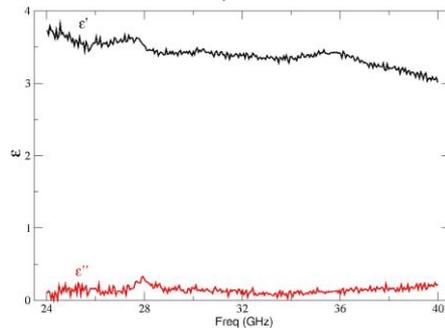
CARACTÉRISATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : GUIDE D'ONDES EN BANDE Ka

Composites élastomère/poudres d'hexaferrite dopé

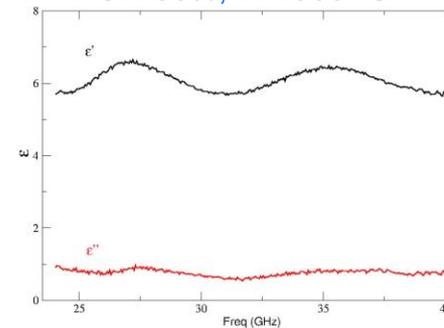
Cv=30%, T=1268 °C



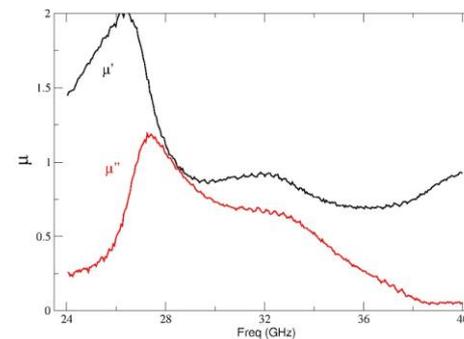
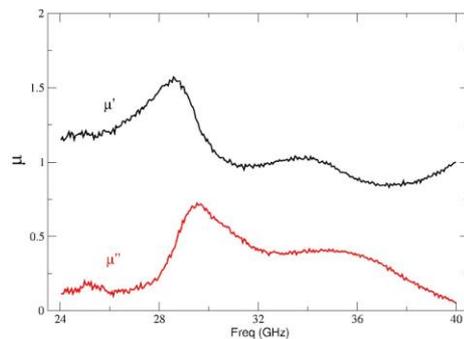
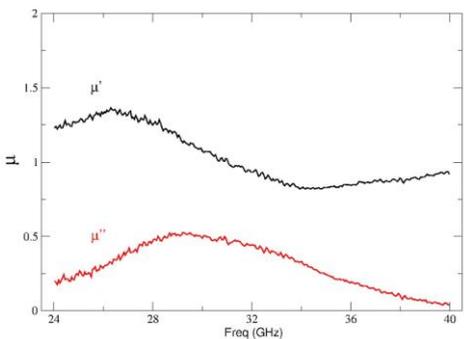
Cv=30%, T=1300 °C



Cv=50%, T=1300 °C



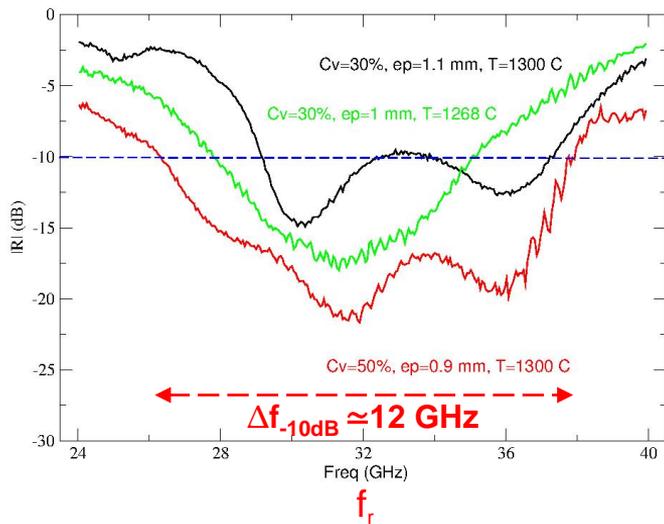
Spectres de permittivité



Spectres de perméabilité

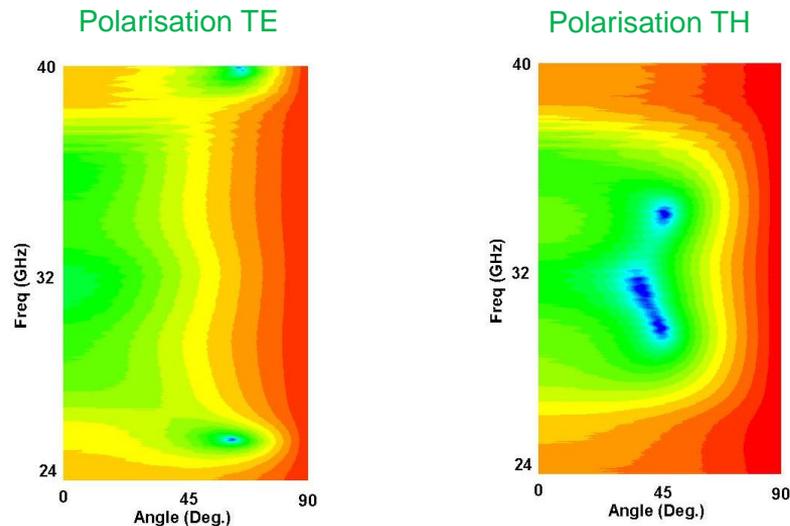
PERFORMANCES D'ABSORPTION EN BANDE Ka de composites élastomère/hexaferrite dopé

Spectres de réflexion sur substrat métallique
en incidence normale



$$\Delta f_{-10dB} / f_r \approx 35 \%$$

Dépendance angulaire du spectre de réflexion sur substrat métallique
Cas $Cv=50\%$, $ep=0.9$ mm, $T=1300$ °C



Environ 10 GHz de largeur de bande à -10 dB (27 GHz – 37 GHz)
sur un secteur angulaire [0 – 50 Deg.] pour les deux polarisations

MODÉLISATION NUMÉRIQUE : THÉORIE DU MICROMAGNÉTISME

W. F. J. Brown, « *Micromagnetics* » Wiley (1963)

Milieu continu de densité d'aimantation :

$$|\vec{m}(\vec{r})| = \frac{|\vec{M}(\vec{r})|}{M_S(T)} = 1$$

Etat d'équilibre

$$\vec{m}(\vec{r}) \times \vec{B}_{eff}(\vec{r}) = \vec{0}$$

$$\vec{B}_{eff}(\vec{r}) = \frac{2A_{ex}}{M_S} \Delta \vec{m}(\vec{r}) - \frac{K}{M_S} \vec{V}_{\vec{m}} G(\vec{m}(\vec{r})) + \vec{B}_0 + \vec{B}_D(\vec{r})$$

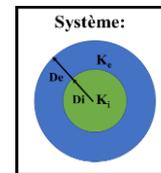
Etats dynamiques

$$(1 + \alpha^2) \frac{\partial}{\partial t} \vec{m}(\vec{r}, t) = -\gamma (\vec{m}(\vec{r}, t) \times \vec{B}_{eff}(\vec{r}, t)) - \alpha \gamma \left[\vec{m}(\vec{r}, t) \times (\vec{m}(\vec{r}, t) \times \vec{B}_{eff}(\vec{r}, t)) \right]$$

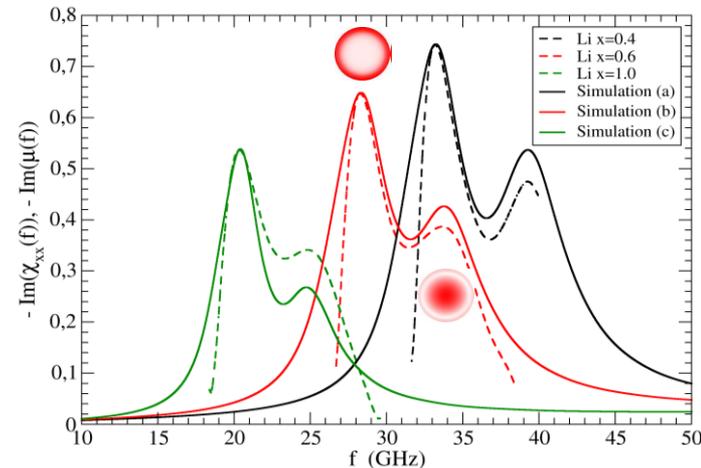
Tenseur de susceptibilité dynamique après moyenne spatiale

$$-\text{Im}(\chi_{\alpha\beta}(f)) = \mu_0 M_S \left(\frac{2\pi f}{\tilde{b}_\beta} \right) \int_0^{+\infty} \delta \bar{m}_\alpha(t) \cos(2\pi f t) dt$$

Exemple de simulation micromagnétique
Code open source MuMax3



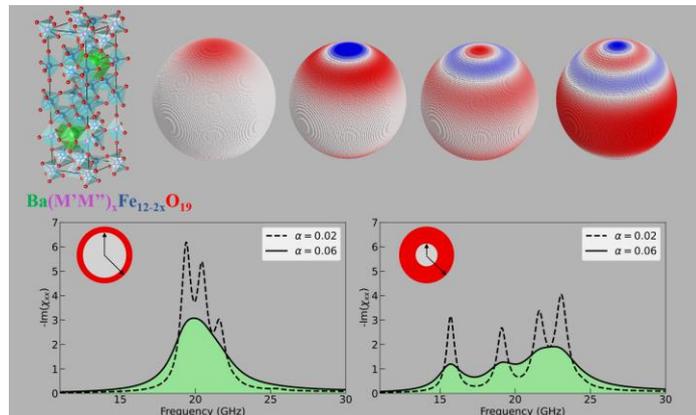
K_i/K_e de 1.4 à 1.5 → 2 pics



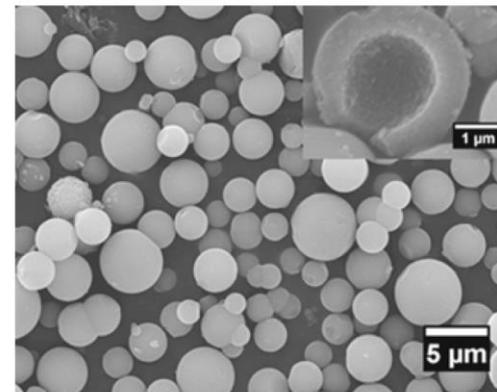
QUELQUES PERSPECTIVES

➤ Particules creuses

Condensation de modes magnétiques dans des sphères creuses



M. Vasquez-Bernardez et al., ACS Applied Electronic Materials, 2024

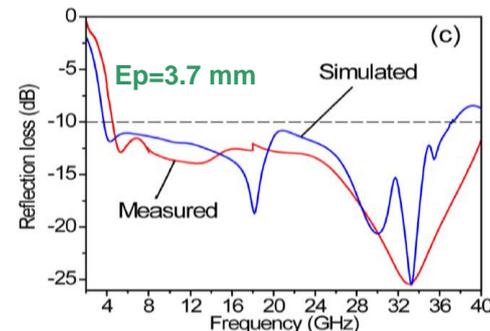
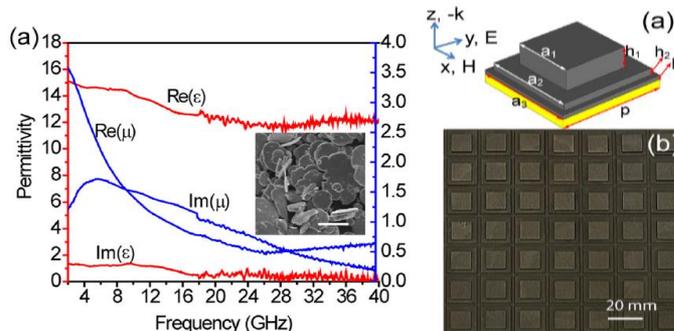


S. Zhang et al., Materials Research Express 6. 09505 . 2019

➤ Structuration 3D de composites magnétiques

W. Li et al., J. Appl. Phys. 116, 044110 (2014)

Apport de la fabrication additive



QUELQUES PERSPECTIVES

➤ Apport des charges nanométriques

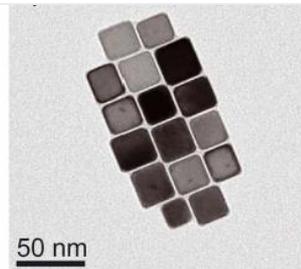
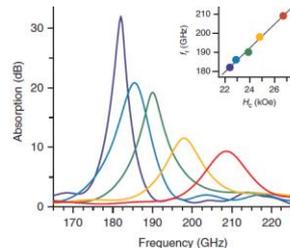
- Modification du spectre de perméabilité (effets de confinement, interface, nouvelles textures,...)
- Morphologies non triviales →
- Charges « cœur-coquille » ↘
- Multi-charges et multi-couches

Limitations : problème de dispersion homogène, interaction entre nanoparticules, formation d'agrégats,...

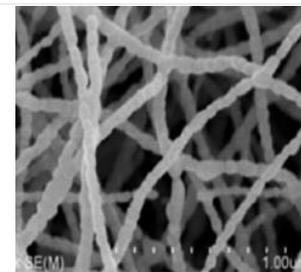
➤ Absorbants au-delà de la bande Ka

- Hexaferriite de strontium dopé
- Orthoferriite
- Hématite dopé →

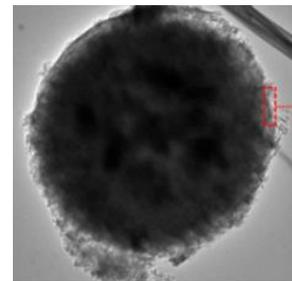
A. Namai et al., Nat. Commun. 3, 1035 (2012)



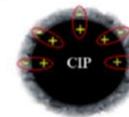
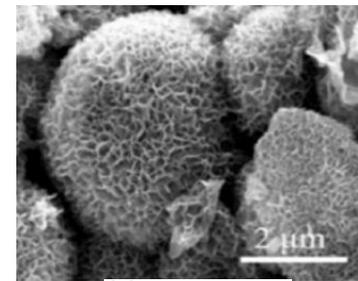
C. Gatel et al., Nanolett. 15, 6952 (2015)



X. Huang et al., J. Mat. Sci. Mater. Electron. 26, 3474 (2015)



C. Li et al., Ceram. Int. 44, 19171 (2018)



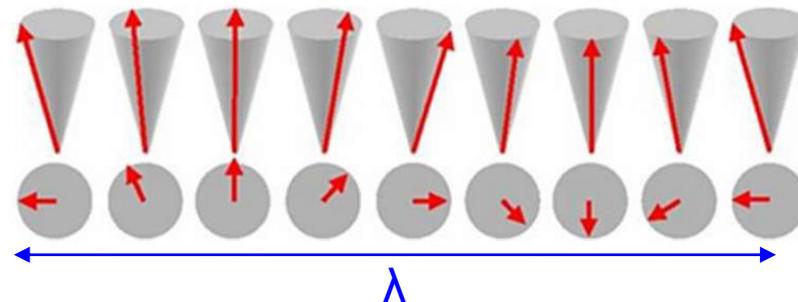
Z. Qu, Molecules 27, 135 (2022)

MAGNONIQUE : CONTEXTE

- Magnonique : domaine de recherche en nanomagnétisme qui traite de l'excitation, la propagation, le contrôle et la détection des ondes de spins dans des milieux magnétiques ordonnés (ferromagnétiques, anti-ferromagnétiques, ferrimagnétiques,...)

- Ondes de spin : excitations collectives élémentaires d'un ensemble de spins électroniques

F. Bloch, Z. Phys. 74, 295 (1932)



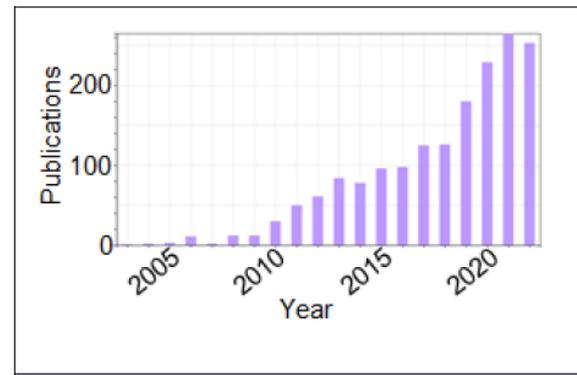
- Objectifs : exploiter les propriétés des ondes de spin pour traiter l'information en remplacement de l'électronique classique. Encoder l'information en modulant la phase, l'amplitude et la fréquences des ondes de spin.
- Intérêt : propagation par transfert de moment angulaire en remplacement du transport d'électrons → pas de dissipation par effet Joule → faible consommation énergétique

MAGNONIQUE : HISTORIQUE

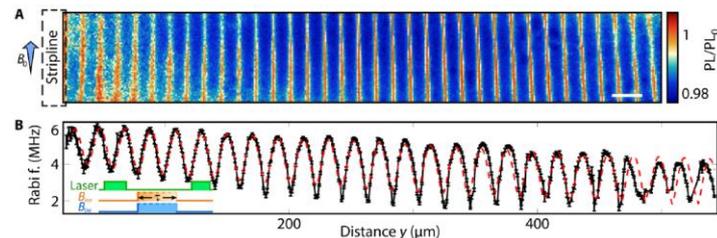
- Etudes fondamentales sur les ondes de spin (OS) en milieux continus (depuis 1940)
- Cristaux magnoniques : OS dans des structures spatialement périodiques
 - S. A. Nikitov et al., J. Magn. Magn. Mater. 236, 320 (2001)*
 - H. Puzskarski et al., Solid State Phenom. 94, 125 (2003)*
- Mise en évidence de propriétés physiques des OS :
 - Excitation et propagation
 - Phénomènes de réflexion, réfraction
 - Interférence et diffraction
 - Focalisation
 - Effet Tunnel
 - Effet Doppler
 - Quantification des OS par confinement géométrique

F. Bloch, Z. Phys. 74, 295 (1932)

- Sondes expérimentales :
 - Spectroscopie par diffusion Brillouin
 - Imagerie par microscopie à centres NV



B. Flebus et al., « The 2024 Magnonics Roadmap, J. Phys.: Condens. Matter. Phys. 74, 295 (2024)



I. Bertelli et al., Sci. Adv. 6, eabd3556 (2020).

MAGNONIQUE : LE GRENAT D'YTTRIUM FER (YIG) COMME MATÉRIAU DE CHOIX

➤ Oxyde ferrimagnétique de formule chimique : $Y_3Fe_5O_{12}$

E.F. Bertaut and F. Forrat, C.R. Acad. Sci 242, 382 (1956)

- Structure cubique (80 atomes dans la maille unitaire)
- Possibilité de multiples substitutions des ions Fe et Y
- Aimantation à saturation modérée ($M_s=1,4 \cdot 10^5$ A/m)
- Matériau présentant les plus faibles pertes magnétiques ($\alpha \sim 3 \cdot 10^{-5}$)
- Isolant électrique

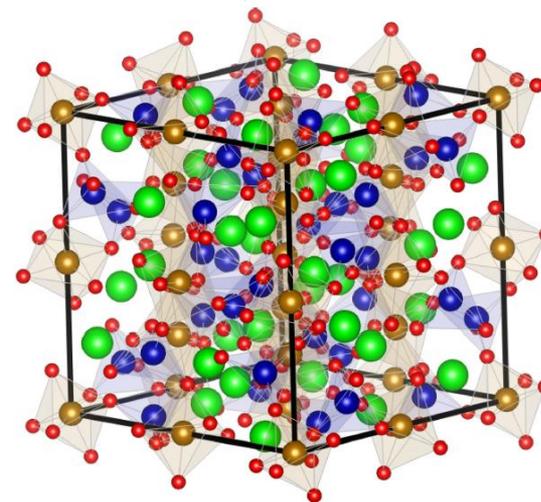
➤ Multiples applications dans le domaine micro-onde:

- **Régime linéaire** : lignes à retard, filtres, résonateurs, générateurs, Y-circulateurs, isolateurs, coupleurs directionnels
- **Régime non-linéaire** : limiteurs de puissance sélectifs en fréquence, amplificateurs paramétriques, convertisseurs

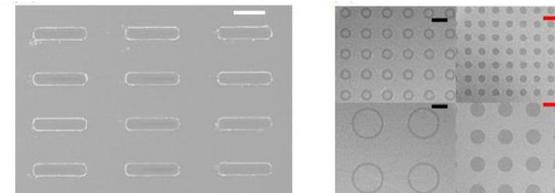
J. D. Adam, Proc. IEEE 76, 159 (1988)

➤ Avantages dans le contexte magnonique :

- Distances macroscopiques pour la propagation des OS (très faibles pertes)
- Elaboration de couche d'épaisseur nanométrique (LPE, PLD, « off-axis » sputtering)
- Fabrication de micro-structures (lithographie e^- , attaque chimique)



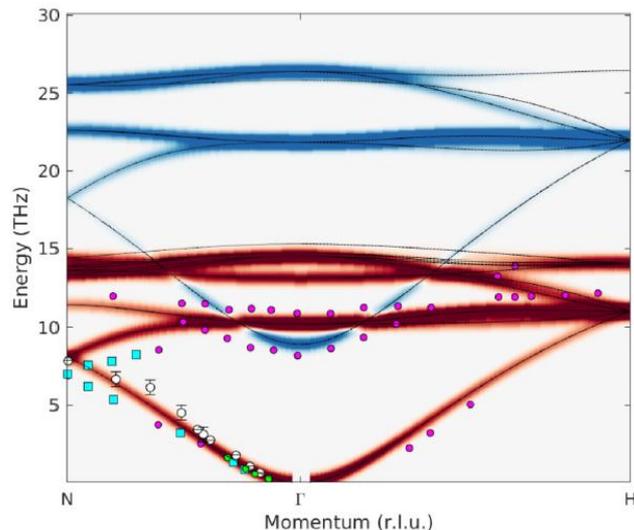
YIG micro-structuré



N. Zhu, Appl. Phys. Lett. 110, 252401 (2017)

MAGNONIQUE : COURBES DE DISPERSION

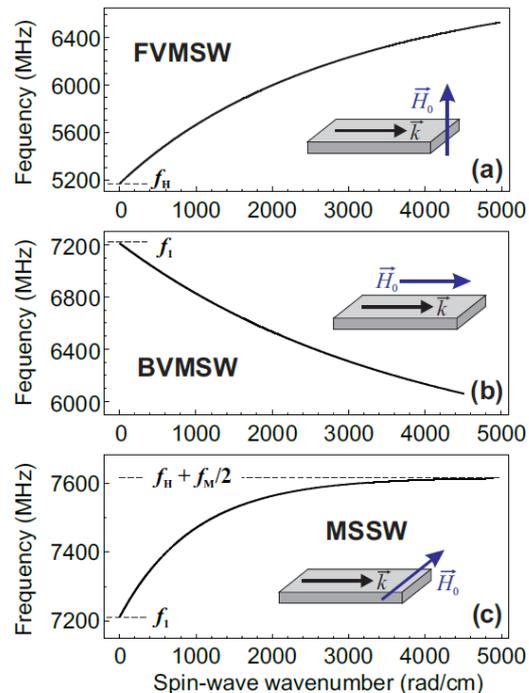
Courbes de dispersion des OS dans le YIG massif



20 branches couvrant la gamme des GHz et THz

O. I. Gorbатов et al., Phys. Rev. B 104, 174401 (2021)

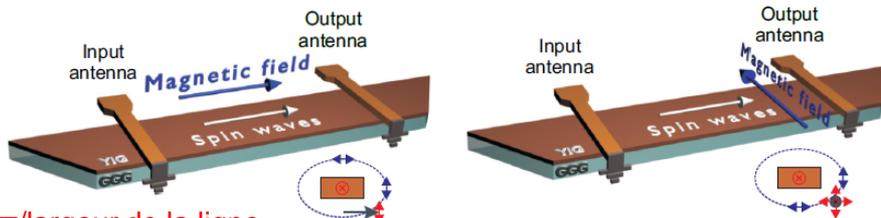
Courbes de dispersion des OS dans des couches minces de YIG

*A. A. Serga et al., J. Phys. D.: Appl. Phys. 43, 264002 (2010)*

MAGNONIQUE : QUELQUES POINTS CRITIQUES

➤ Excitation par méthode inductive

Antennes microstrip + guide d'ondes en YIG



$k < \pi / \text{largeur de la ligne}$

A. A. Serga et al., *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 43, 264002 (2010)

➔ Excitation par méthode optique (impulsion laser fs)

➤ Contrôle de la propagation :

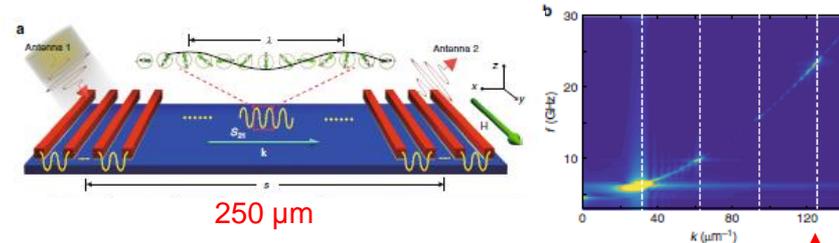
- Modification de la structure de bande par une action extérieure (couplage spin-orbite, couplage magnétoélectrique, magnétoélastique,...)

➤ Amplification :

- Effets non linéaires (instabilité paramétrique)
- Compensation des pertes magnétiques (couple de transfert de spin)

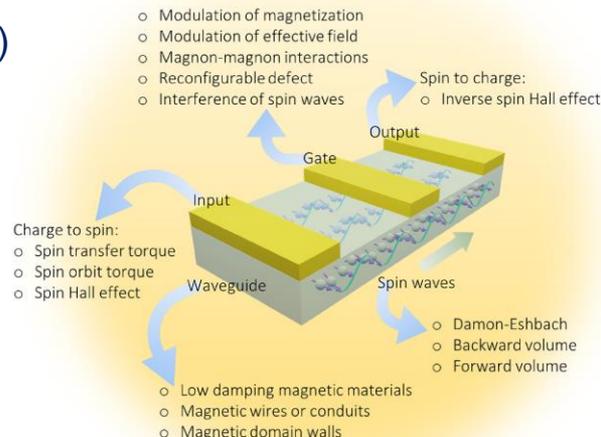
H. Merbouche et al., *Nat. Commun.* 15, 1560 (2024)

Vers les longueurs d'OS nanométriques...



C. Liu et al., *Nat. Commun.* 9, 738 (2018)

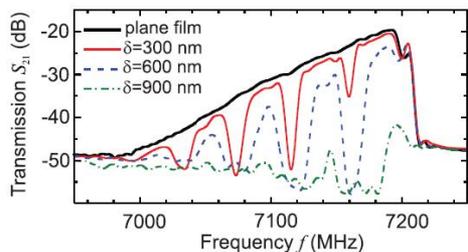
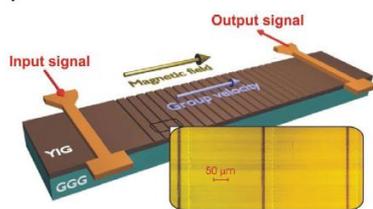
$\lambda = 50 \text{ nm}$,
 $V_g = 2600 \text{ m.s}^{-1}$



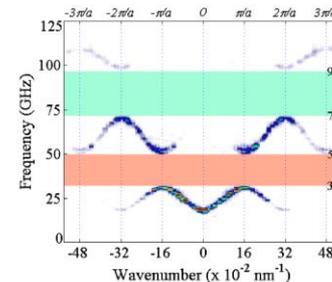
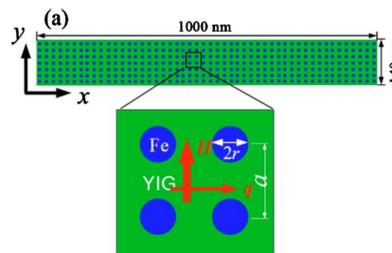
A. Haldar et al.,
Appl. Phys. Lett. 119, 060501, (2021)

LES CRISTAUX MAGNONIQUES

- Définition : matériaux magnétiques artificiels présentant une modulation spatiale périodique → apparition de bandes interdites pour les OS

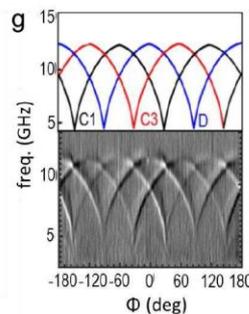
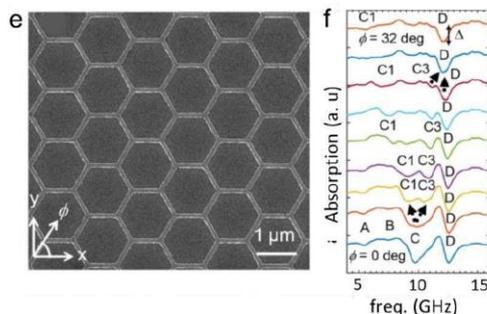
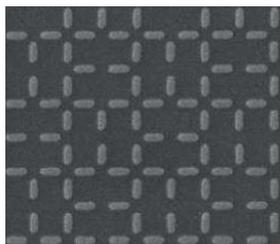


A. Chumak et al., *Appl. Phys. Lett.* 93, 022508 (2008)



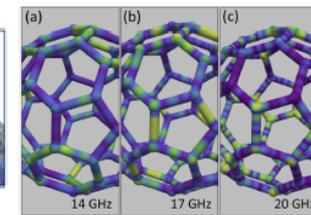
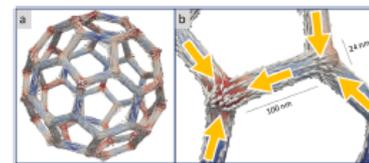
F. Ma et al., *Appl. Phys. Lett.* 98, 153107 (2011)

- Les glaces de spin



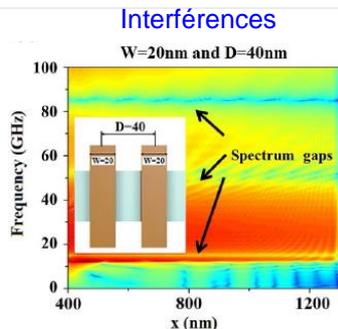
S. H. Skjaervo et al., *Nat. Rev. Phys.* 2, 13 (2020)

- Vers des cristaux magnoniques 3D



R. Cheenikundil et al., *Appl. Phys. Mat.* 10, 081106 (2022)

COMPOSANTS FONCTIONNELLS



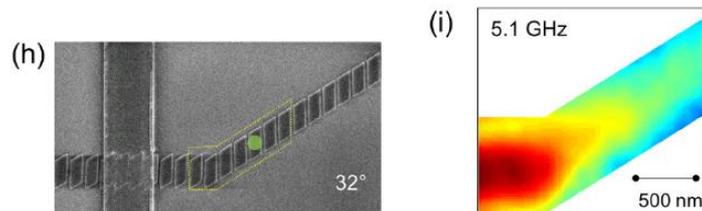
A. Chumak et al., *Appl. Phys. Lett.* 93, 022508 (2008)

➤ Preuves de concept de dispositifs micro-ondes

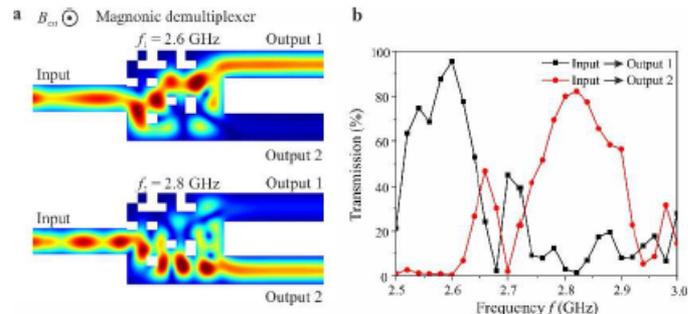
- Filtres reconfigurables
- Lignes à retard
- Déphaseurs
- Y-Circulateurs
- Multiplexeurs et démultiplexeurs
- Coupleurs directionnels
- Portes logiques
- Diodes, transistors
- Calculateurs neuromorphiques

A. Barman et al., « *The 2021 Magnonics Roadmap*, *J. Phys.: Condens. Matter.* Phys. 33, 413001 (2021)

Directionnalité

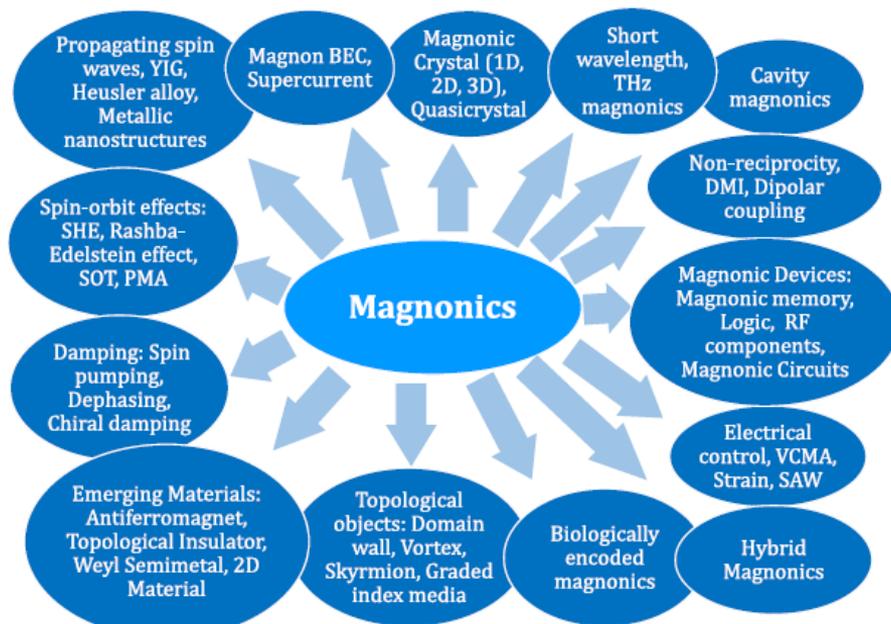


A. Haldar et al., *Appl. Phys. Lett.* 119, 060501 (2021)



Q. Wang et al., *Nat. Commun.* 12, 2636 (2021)

MAGNONIQUE : PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE ET PERSPECTIVES



➤ Quelques perspectives matériaux :

- Nano-YIG, YIGGa, YIGBi
- Hexaferrites dopés
- Alliages d'Heusler (Co_2MnSi ,...)
- Multiferroïques (BiFeO_3)
- Antiferromagnétiques (NiO , Orthoferrites RFeO_3 avec R=terre rare)
- Matériaux 2D (van der Waals : CrI_3 ,...)
- Hétéro-structures (SAF,...)

A. Barman et al., « The 2021 Magnonics Roadmap, J. Phys.: Condens. Matter. Phys. 33, 413001 (2021) »

INFORMATIONS

➤ Magnonique

- Communautés française et européenne très dynamiques
- Etudes européennes (ERC), projets ANR
- Axe majeur du PEPR SPIN
- Mise à jour de feuilles de route « Magnonics » (dernière édition 2024, à paraître dans J. Phys. Condens. Matter)
- Conférence bisannuelle MAGNONICS (MAGNONICS 2025, Majorque 28 juillet – 1^{er} Août 2025)



The goal of the Magnonics conferences is to bring together researchers from academia, industry and national laboratories working in the fields of magnetic materials, classical and quantum magnonic devices, nanomagnetism and spintronics in order to exchange ideas and forge collaborations in the field of magnonics.

Quelques ouvrages : *Magnonics : From Fundamentals to Applications*, S. Demokritov and A. Slavin, Springer 2013
Fundamentals of Magnonics, S. M. Rezende, Lecture Notes in Physics, Springer (2020)
Three-Dimensional Magnonics, G. Gubbiotti, Jenny Stanford Publishing (2019)

CONCLUSION

- Très grande variété de matériaux magnétiques pour les applications dans le domaine des micro-ondes
- Grande diversité de structures et d'échelles
- Apport des nouveaux procédés de fabrication compatibles avec le passage à l'échelle
- Apport des nanotechnologies
- Extension des sondes expérimentales (montée en fréquence, résolution spatiale)
- Besoin de modèles multi-échelles (ab initio, dynamique moléculaire, théorie du micromagnétisme) et multi-physiques (couplage du magnétisme avec d'autres degrés de libertés)
- Vigilance sur la capacité à produire les matériaux magnétiques critiques (absorbants)
- Maintenir une attractivité sur ces sujets pour la jeune génération

REMERCIEMENTS

➤ Matériaux absorbants

– Composites à base de pétales ferromagnétiques

[Doctorants](#)

[Onera](#)

[CEA-DAM/Le Ripault](#)

[Hutchinson PAULSTRA](#)

[Marion Technologies](#)

[IPCMS](#)

J. Neige
Z. Raolison

F. Boust
T. Lepetit

A. –L. Adenot-Engelvin
N. Malléjac

F. Duvergent
L. Flauder

J. Audoit
D. Maury

Ch. Lefevre
G. Pourroy

– Composites à base de poudre d'hexaferrite

[IPCMS](#)

[LabSTICC](#)

Maria José Vazquez Bernardez
Ch. Lefevre
D. Stoeffler

Antoine Hoetz
Jean-Luc Mattei
Vincent Laur

Remerciements à mes collègues de Dassault Aviation : Benoit Berton, Benjamin Dulucq, Yohann Duval et Pierre - Marie Jacquart

Remerciements à la DGA/AID pour le soutien financier et le suivi constructif des différents projets : thèses DGA, ANR ASTRID, ANR ASTRID Maturation, RAPID et Laboratoire Commun de Recherche MOLIERE