

# Etude expérimentale et modélisation des propriétés magnétiques des matériaux nanocristallins FeCuNbSiB industriels

## I CONTEXTE de la thèse

Les matériaux nanocristallins de type Finemet appartiennent à la famille des alliages magnétiques ultradoux, et réalisent de très bas champs coercitifs et de faibles pertes magnétiques jusqu'aux moyennes fréquences (100nes kHz) ce qui les rend – aussi grâce à leur polarisation magnétique à saturation ( $J_s > 1.3$  T) assez élevée - très compétitifs vis à vis des matériaux concurrents haute performance comme les alliages amorphes FeCo ou FeNi Permalloys, ou encore les ferrites  $\cong$ . Ces nouveaux matériaux qui ont déjà 25ans de vie en R&D et dans l'industrie ont bousculé de nombreuses applications (capteur, sécurité électrique, composants passifs en électronique de puissance). Sa production mondiale est de l'ordre du millier de tonne/an, en croissance forte et pourtant des pans importants de compréhension et d'application de ces matériaux restent à investiguer.

Aperam Alloys est un producteur mondial majeur de tores nanocristallins (production en Chine et Europe) et en a acquis un Savoir-Faire important depuis 20ans. Ses développements importants dans divers secteurs d'application des nanocristallin le conduisent à toujours mieux contrôler et comprendre le comportement des nanocristallins, à améliorer leurs performances, à créer de nouveaux produits.

Une 1<sup>ère</sup> thèse très récente a permis de jeter les bases théoriques et quantifiées, validées sur de rares données de la littérature, du comportement magnétique de ces matériaux lors du recuit sous champ magnétique (qui leur donne les performances de perméabilité spécifique à l'application visée), ce qui n'avait jamais été réussi auparavant (phénomènes de super-paramagnétisme et de super-ferromagnétisme dans le cas des nanocristallins, hybrides cristaux FeSi liés par de l'amorphe). Cette avancée majeure doit être encore assise sur des données de composition, de caractéristiques physiques des nanocristaux FeSi et de mesures magnétiques fines.

## II Sujet d'étude proposé (thèse)

L'importance de l'avancée théorique et de ses retombées potentielles (maîtrise des procédés industriels de recuits de nanocristallisation, maîtrise de l'effet des fluctuations de composition sur les performances des produits) poussent à améliorer encore le développement théorique et surtout à mener les caractérisations adéquates pour valider directement la théorie sur les alliages nanocristallins produits industriellement. En particulier la loi centrale de la polarisation magnétique aux température et champ du traitement thermique doit être précisément décrite : cela est obtenu en mesurant la température de transition Super-paramagnétique/super-ferromagnétique en relation avec les fractions volumiques et tailles de nanocristaux. Une partie importante se consacrera ainsi à confronter modèle et expérience.

En particulier et afin de disposer de bases expérimentales précises, sûres et cohérentes, une méthodologie expérimentale basée sur la mesure de la polarisation spontanée en fonction de la température sera développée, permettant d'accéder aux points de Curie des phases amorphe et cristalline FeSi (permettant d'accéder à sa teneur en silicium), mais aussi à la fraction cristalline. Les données structurales serviront alors à simuler les valeurs d'anisotropie induite  $K_u$  obtenues après recuit, confrontées aux mesures expérimentales de  $K_u$  réellement obtenues.

Dans un 2<sup>ème</sup> temps et afin de comprendre la physique qui gouverne les propriétés d'aimantation très intéressantes observées (mais non expliquées) en milieu industriel après application de recuits complexes (variation de la direction du champ en cours de recuit...), la modélisation précédente sera approfondie et généralisée aux cas de ces recuits plus « compliqués ». On s'appuiera là aussi sur des mesures expérimentales et la modélisation, en relation étroite avec l'industriel, et en s'appuyant sur les travaux précédents.

Moyens d'étude durant la thèse : Le G2Elab dispose d'un tout nouveau four de recuit sous hydrogène et sous champ magnétique en vue de développer l'anisotropie induite transverse  $K_u$ . Ce four devra être instrumenté pour permettre la mesure des propriétés magnétiques à haute température et affiner ainsi la compréhension des phénomènes mis en œuvre pour contrôler les propriétés magnétiques. Cette caractérisation magnétique à haute température est un apport important de la thèse et au travers du travail de modélisation, permettra d'optimiser les traitements thermiques industriels. En effet les tores nanocristallins fournis par Aperam couvriront inévitablement un spectre de composition, et cette dernière n'est pas une caractéristique des moins importantes dans le réglage final des propriétés des produits, au travers des recuits sous champ(s) magnétique(s).

La caractérisation des propriétés magnétiques, effectuée sur un banc fluxmétrique du G2Elab, portera sur les cycles d'aimantation statiques ( $f \cong 1$  Hz) et les propriétés dynamiques en petit signaux ( $B_{\max} = 0.1$  T) à savoir la perméabilité et les pertes magnétiques. Ces mesures seront effectuées à l'ambiante ou à la température de recuit.

### III CADRE GENERAL

La thèse s'opérera dans le cadre d'un contrat Cifre cofinancé par la société APERAM (en particulier sa filiale Aperam-Alloys-Amilly, spécialisée notamment dans la production de circuits magnétiques nanocristallins et l'équipe « Alliages Magnétiques » de son centre de Recherche à Imphy) et le **Laboratoire de Génie Electrotechnique de Grenoble (G2Elab)**, équipe **MA**ériaux et **Dis**positifs **Electromagnétiques Avancés (MADEA)**. La thèse se déroulera majoritairement au G2Elab, ponctuée de séjours en entreprise.

### IV QUALITES RECHERCHEES

Le candidat doit avoir le gout de la formalisation (approfondissement des modèles) et du travail expérimental (Instrumentation, mise au point de programmes d'acquisition, réalisation de mesures expérimentales). Une certaine connaissance des matériaux magnétiques est évidemment préférée.

Le thésard occupant une place à l'interface des mondes de la recherche et de l'entreprise, ses qualités de communication sont essentielles, afin de pouvoir faire partager aux différents partenaires les avancées de son travail. Vis à vis de son évolution potentielle dans Aperam, l'autonomie, la prise de responsabilité, l'attention portée à la sécurité, le travail en équipe, la maîtrise de l'anglais seront des caractéristiques très appréciées.

Profil de formation recherché : école d'ingénieur ou Master, en matériaux ou physique du solide

#### Pour en savoir plus :

O. Geoffroy, H. Chazal, Y. Yao, T. Waeckerlé, and J. Roudet, *Modelization of superferro-magnetism in soft nanocrystalline materials based on an accurate description of magnetostatic interactions*, IEEE Trans. on Mag., 2014, vol.50, no.4, pt.1, p. 2001404

#### CONTACTS :

Olivier Geoffroy, équipe MADEA, G2Elab : 04 76 88 79 07 [geoffroy@grenoble.cnrs.fr](mailto:geoffroy@grenoble.cnrs.fr)

Hervé Chazal, équipe MADEA, G2Elab : 04 76 82 71 77 [herve.chazal@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:herve.chazal@g2elab.grenoble-inp.fr)