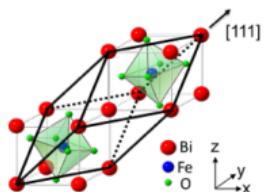


Étude des propriétés du couplage d'échange dans des nano-structures de type ferromagnétique/multiferroïque

Soutenance de Thèse

LABORATOIRE DE MAGNÉTISME DE BRETAGNE

Jérôme RICHY



29 novembre 2016

PLAN

INTRODUCTION : IMPORTANCE DU RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

MODÉLISATION DU RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE D'UNE ASSEMBLÉE DE NANOParticules

RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE DE $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

TRAÎNAGE ANGULAIRE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

CONCLUSION

Introduction

INTRODUCTION : IMPORTANCE DU RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

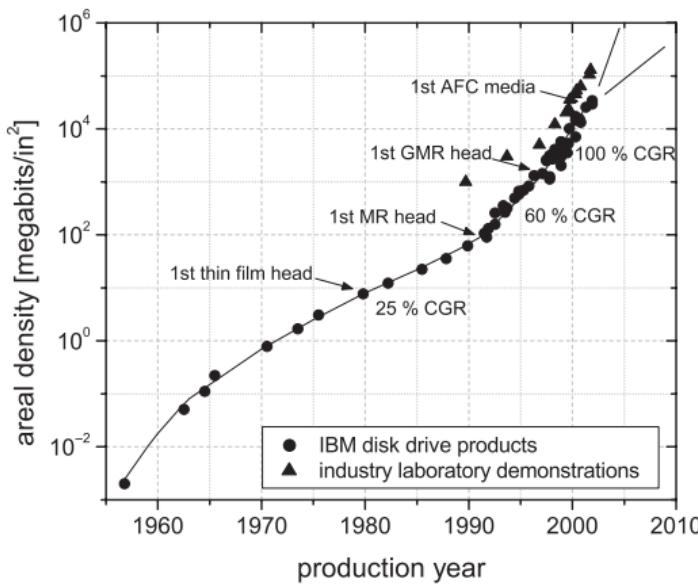
MODÉLISATION DU RENVERSEMENT EN
TEMPÉRATURE D'UNE ASSEMBLÉE DE
NANOPARTICULES

RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE DE
 $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

TRAÎNAGE ANGULAIRE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

CONCLUSION

IMPORTANCE DU RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE STOCKAGE MAGNÉTIQUE



Densité de stockage des disques durs [1].

Évolution rapide de la densité de stockage :

- ▶ meilleure sensibilité de la tête de lecture
- ▶ diminution de la taille des grains

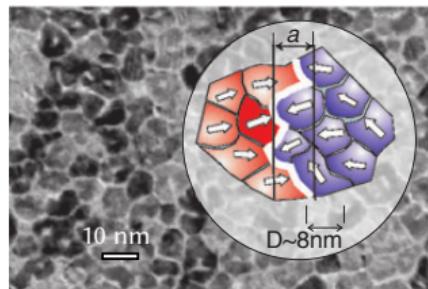


Image TEM des grains d'un disque dur magnétique [1].

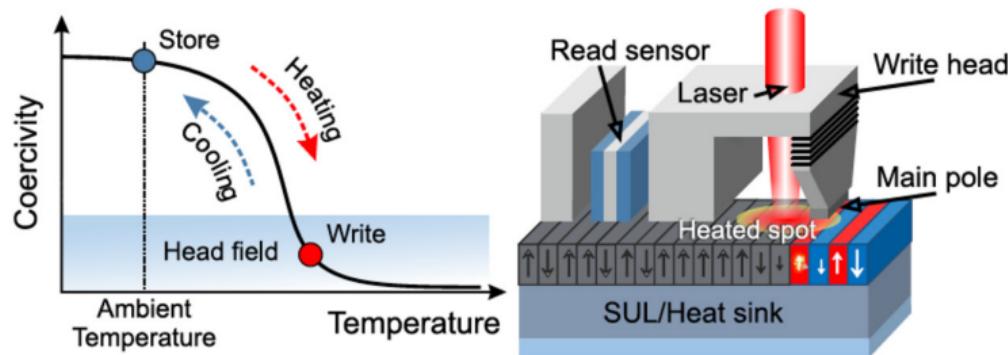
[1] MOSER et al. *J. Phys. D : Appl. Phys.* **35** R157–R167 (2002).

Limitations

- destabilisation magnétique par l'agitation thermique

Solutions possibles :

- augmenter la résistance au renversement \Rightarrow difficulté d'écriture
- assister thermiquement le renversement des bits



Écriture thermiquement assistée par laser [2].

Nécessité de contrôler la stabilité/renversement des grains.

IMPORTANCE DU RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

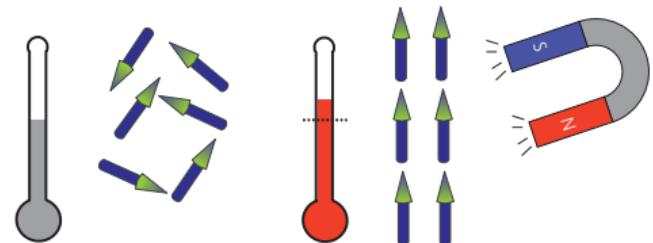
L'EFFET MAGNÉTOCALORIQUE

Principe [3]

Augmentation de la température lors de l'application d'un champ magnétique.

Application principale : systèmes de refroidissement.

- ▶ augmentation du rendement par rapport aux systèmes classiques (20% à 30%)
- ▶ sans fluide réfrigérant et compresseur



Principe de l'effet magnétocalorique [4].



Réfrigération magnétique écologique [5].

[3] FRANCO et al. *Ann. Rev. Mater. Res.* **42** p. 305–342 (2012).

[4] LIU et al. *Nat. Mater.* **11** p. 620–6 (2012).

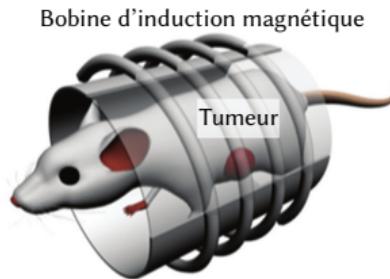
[5] ANTHONY (, 2014).

IMPORTANCE DU RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

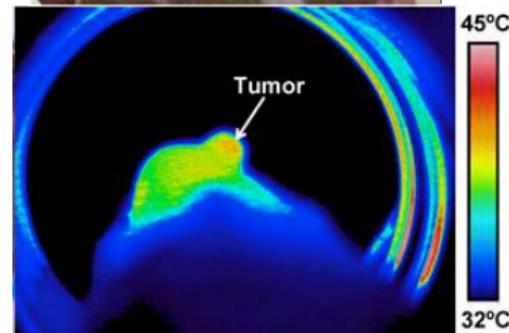
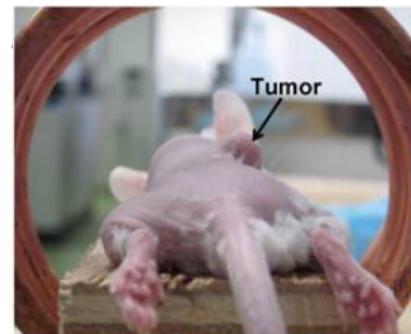
HYPERTHERMIE MAGNÉTIQUE

Application médicale

TraITEMENT local du cancer par échauffement de nanoparticules magnétiques soumises à un champ alternatif.



TraITEMENT par hyperthermie magnétique [6].



Échauffement local d'une tumeur [7].

[6] LEE et al. *Nat. Nanotech.* **6** p. 418–22 (2011).

[7] HAYASHI et al. *Theranostics* **3** p. 366–76 (2013).

MODÉLISATION

INTRODUCTION : IMPORTANCE DU
RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

MODÉLISATION DU RENVERSEMENT EN
TEMPÉRATURE D'UNE ASSEMBLÉE DE
NANOPARTICULES

Les nanoparticules magnétiques
Les modèles de renversement
Modélisation pour une assemblée
Résultats

RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE DE
 $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

TRAÎNAGE ANGULAIRE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

CONCLUSION

LES NANOPARTICULES MAGNÉTIQUES

PARTICULES FERROMAGNÉTIQUES (F)

Système magnétique fortement étudié :

- ▶ effet important des interfaces
- ▶ contrôle de l'interaction inter-particule par dilution

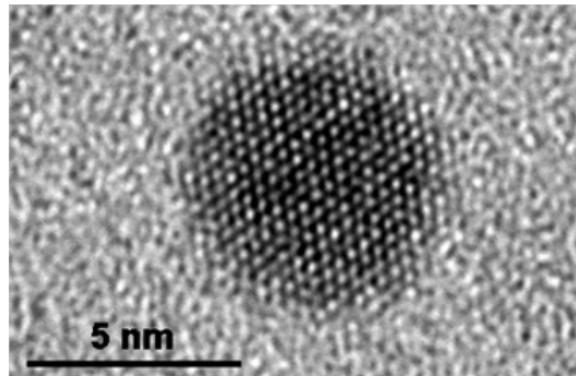


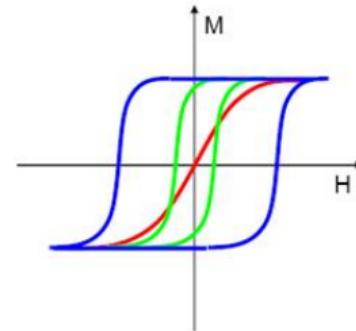
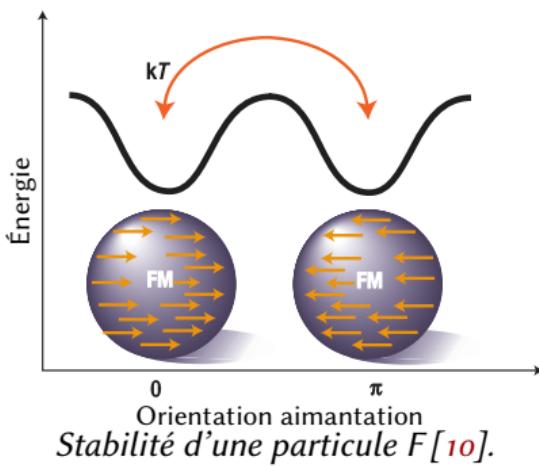
Image TEM, particule FeMn (6 nm) [8].

Nombreuses applications possibles [9] :

- ▶ stockage de données
- ▶ hyperthermie magnétique
- ▶ imagerie médicale (agent de contraste)
- ▶ administration locale de médicaments
- ▶ encre magnétique
- ▶ etc.

[8] DORN (. 2012).

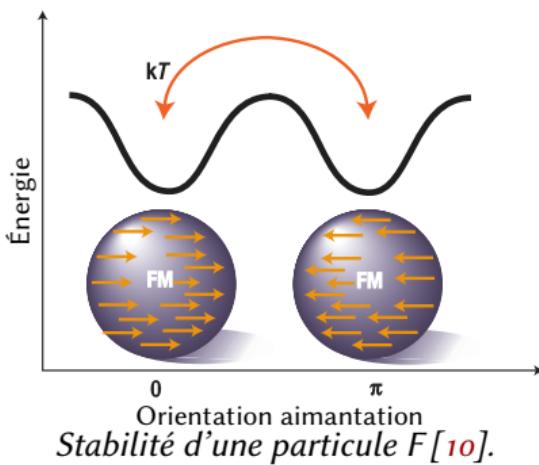
[9] REISS et HÜTTEN. *Nat. Mater.* **4** p. 725–6 (2005).



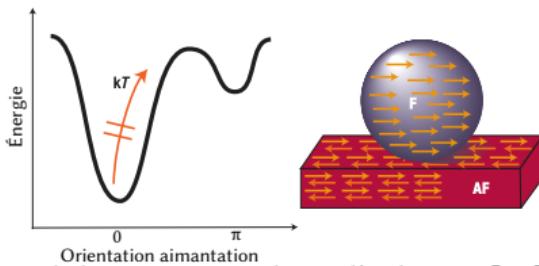
Renversement ferromagnétique selon la température (—blue— < —green— < —red—).

[10] EISENMENGER et SCHULLER. *Nat. Mater.* **2** p. 437–8 (2003).

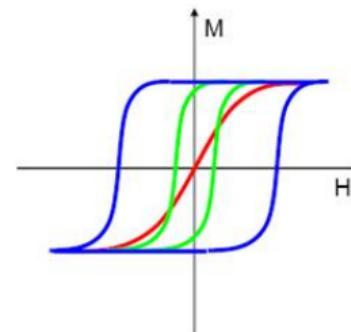
[11] NOGUÉS et SCHULLER. *J. Magn. Magn. Mater.* **192** p. 203–232 (1999).



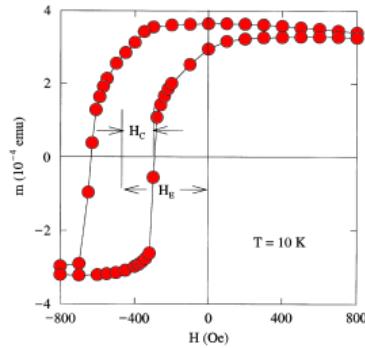
Stabilité d'une particule F [10].



Stabilité avec couplage d'échange [10].



Renversement ferromagnétique selon la température (— < — < —).



Cycle d'hystéroséris caractéristique de l'échange [11].

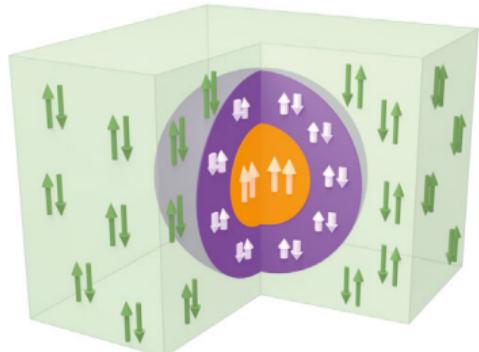
[10] EISENMAYER et SCHULLER. *Nat. Mater.* **2** p. 437–8 (2003).

[11] NOGUÉS et SCHULLER. *J. Magn. Magn. Mater.* **192** p. 203–232 (1999).

LES NANOParticules magnétiques

PARTICULES CŒUR-COQUILLE F-AF

Cœur *ferromagnétique* (F), entouré par une coquille *antiferromagnétique* (AF).



Particule de type cœur-coquille [12].

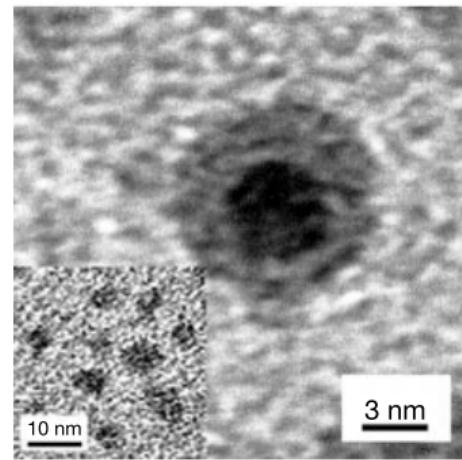
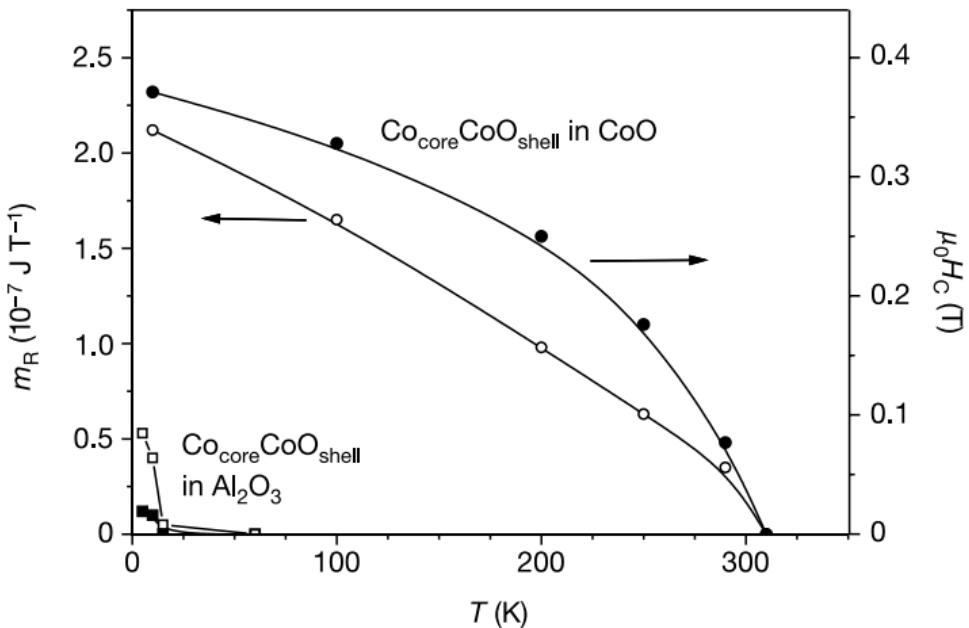


Image TEM d'une particule F-AF (Co-CoO) [13].

[12] DE TORO et al. *Physical review letters* **115** p. 057201 (2015).

[13] SKUMRYEV et al. *Nature* **423** p. 850–853 (2003).



Comportement en température de particules avec et sans couplage. [13].

⇒ Démonstration de la stabilisation de particules F-AF.

[13] SKUMRYEV et al. *Nature* **423** p. 850–853 (2003).

LES MODÈLES DE RENVERSEMENT PARTICULES FERROMAGNÉTIQUES

Modèle à $T = 0\text{ K}$:

- ▶ STONER et WOHLFARTH [14] : modèle macrospin de renversement

Modèles dérivés en température :

- ▶ GARCÍA-OTERO et al. [15] : critère de transition
- ▶ FRANCO et CONDE [16] : critère de transition et fluctuations thermiques
- ▶ CARREY et al. [17] : calculs semi-analytiques, avec vitesse de transition et fluctuations
- ▶ TROHIDOU et VASILAKAKI [18], LEDUE et al. [19], ... : simulation de MONTE CARLO (algorithme de Metropolis)

[15] GARCÍA-OTERO et al. *J. Magn. Magn. Mater.* **189** p. 377–383 (1998).

[16] FRANCO et CONDE. *J. Magn. Magn. Mater.* **278** p. 28–38 (2004).

[17] CARREY et al. *J. Appl. Phys.* **109** p. 083921 (2011).

[18] TROHIDOU et VASILAKAKI. *Applications of Monte Carlo Method in Science and Engineering* **t. 20** p. 513 (2011).

[19] LEDUE et al. *Physica B : Physics of Condensed Matter* **348** p. 410–419 (2004).

LES MODÈLES DE RENVERSEMENT

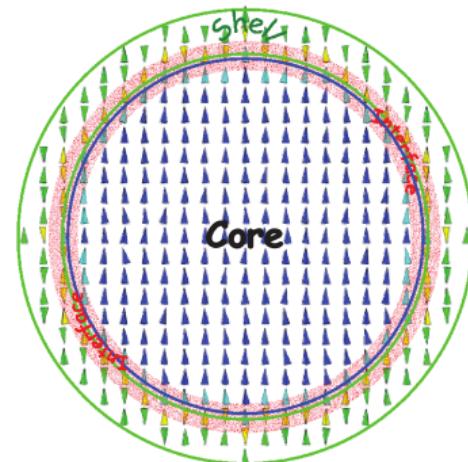
PARTICULES CŒUR-COQUILLE F-AF

Modèle à $T = 0\text{ K}$:

- MEIKLEJOHN et BEAN [20, 21] : modèle macrospin de renversement

Modèles en température dérivés :

- IGLESIAS et al. [22] : simulation micromagnétique d'une particule
- VASILAKAKI et TROHIDOU [23] : simulations MONTE CARLO de particules cœur-coquille avec coquille ferrimagnétique



Simulation micromagnétique d'une particule F-AF [22].

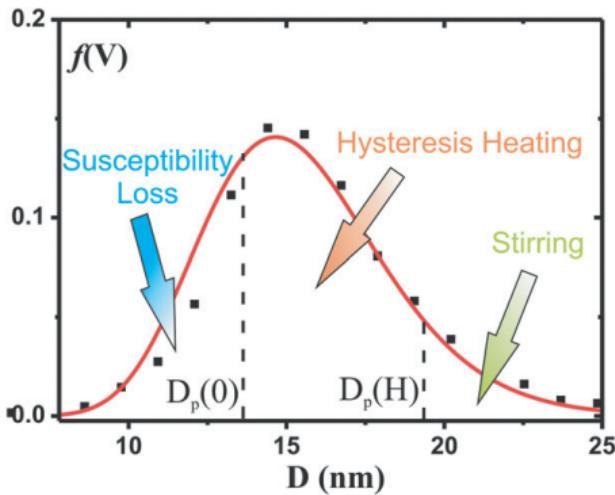
[20] MEIKLEJOHN et BEAN. *Phys. Rev.* **102** p. 1413–1414 (1956); [21] MEIKLEJOHN et BEAN. *Phys. Rev.* **105** p. 904–913 (1957).

[22] IGLESIAS et al. *Phys. Rev. B* **72** (2005).

[23] VASILAKAKI et TROHIDOU. *Phys. Rev. B* **79** p. 144402 (2009).

Limitations des modèles

- Absence d'une distribution réaliste de taille de particule.



Comportement d'une distribution de particules [24].

[24] VALLEJO-FERNANDEZ et al. *J. Phys. D : Appl. Phys.* **46** p. 312001 (2013).

MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE

PRÉSENTATION

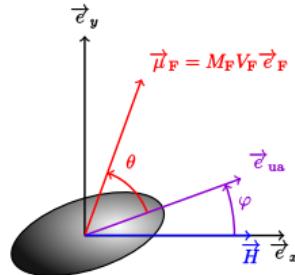
- ▶ Programmation en language Python (numpy, matplotlib, scipy)
- ▶ 31 fichiers pour 5000 lignes de code
- ▶ Projet librement accessible (licence GPLv3) DOI [10.5281/zenodo.58957](https://doi.org/10.5281/zenodo.58957)



MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE

CAS D'UNE PARTICULE F : STONER & WOHLFARTH

Modèle macroscopique du renversement de l'aimantation de type macro-spin pour une nanoparticule ferromagnétique [14].



Moment magnétique $\vec{\mu}_F$, axe d'anisotropie \vec{e}_{ua} et champ appliqué \vec{H} .

Énergie ZEEMAN

Interaction ZEEMAN des moments magnétiques \vec{m} avec le champ environnant \vec{H} .

$$\mathcal{F} \propto -\vec{H} \cdot \vec{m}$$

Énergie d'anisotropie

Anisotropie uniaxiale du monodomaine.

$$\mathcal{F} \propto -K_F V_F (\vec{e}_F \cdot \vec{e}_{ua})^2$$

[14] STONER et WOHLFARTH. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **240** p. 599–642 (1948).

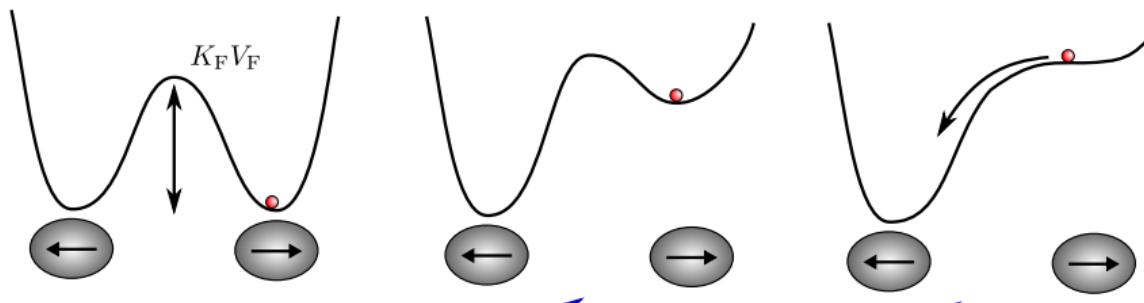
Expression de l'énergie libre \mathcal{F} :

$$\mathcal{F}(\theta) = -\mu_0 H \times M_F V_F \cos(\theta + \varphi)$$

Énergie ZEEMAN

Anisotropie uniaxiale F

$$+ K_F V_F \sin^2 \theta \quad (1)$$

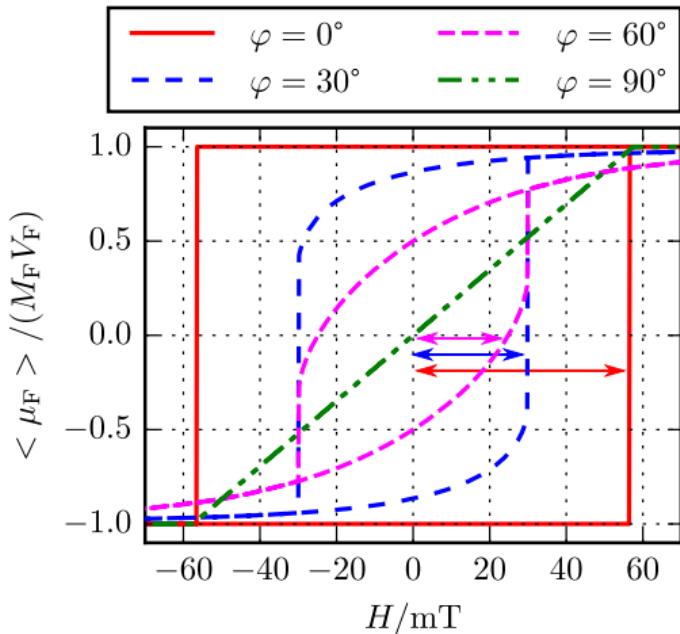


$$H = 0$$

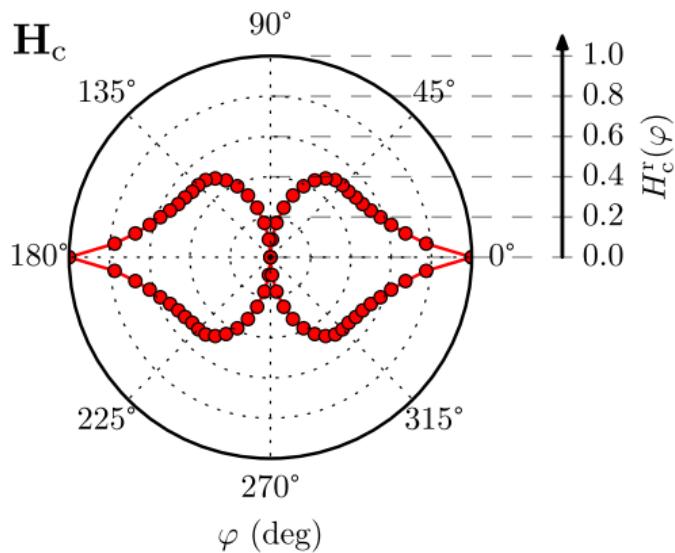
$$|H| < H_k$$

$$|H| \geq H_k$$

Principe de renversement de l'aimantation, avec H_k le champ critique.



Cycles d'hystérésis pour une particule ferromagnétique, avec H_c le champ coercitif.

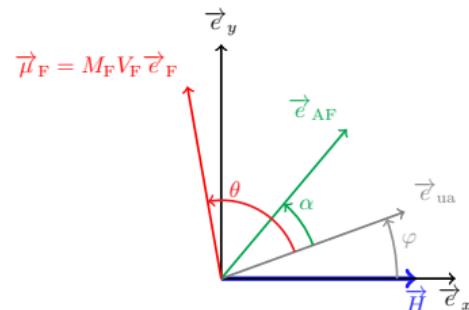


Évolution angulaire correspondante de H_c .

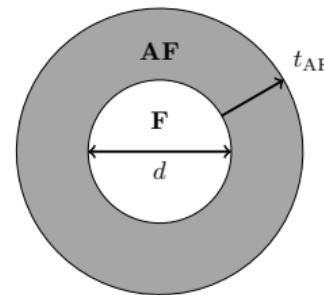
MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE

CAS D'UNE PARTICULE F-AF : MEIKLEJOHN & BEAN ÉTENDU

Modèle macroscopique du renversement de l'aimantation d'un système couplé par échange [20, 21].



Paramètres du modèle.



Géométrie de la particule F-AF.

Énergie de couplage d'échange F-AF :

$$\mathcal{F} \propto -J_{\text{éch}} \vec{S}_F \cdot \vec{S}_{AF}$$

Énergie d'anisotropie AF :

$$\mathcal{F} \propto K_{AF} V_{AF} \sin^2 \alpha$$

[20] MEIKLEJOHN et BEAN. *Phys. Rev.* **102** p. 1413–1414 (1956); [21] MEIKLEJOHN et BEAN. *Phys. Rev.* **105** p. 904–913 (1957).

MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE EXPRESSION FINALE DE L'ÉNERGIE LIBRE

$$\mathcal{F}(\theta, \alpha) = -\mu_0 H \times M_F V_F \cos(\theta + \varphi) + K_F V_F \sin^2 \theta + K_{AF} V_{AF} \sin^2 \alpha - J_{F-AF} S_{F/AF} \cos(\theta - \alpha) \quad (2)$$

The diagram illustrates the components of the free energy expression:

- Anisotropie uniaxiale F** (Uniaxial anisotropy F) is represented by the red box containing $\mu_0 H \times M_F V_F \cos(\theta + \varphi)$.
- Couplage d'échange** (Exchange coupling) is represented by the blue box containing $J_{F-AF} S_{F/AF} \cos(\theta - \alpha)$.
- Énergie ZEEMAN** (Zeeman energy) is represented by the grey box containing $K_F V_F \sin^2 \theta$.
- Anisotropie uniaxiale AF** (Uniaxial anisotropy AF) is represented by the light blue box containing $K_{AF} V_{AF} \sin^2 \alpha$.

Red arrows point from the labels to their corresponding terms in the equation.

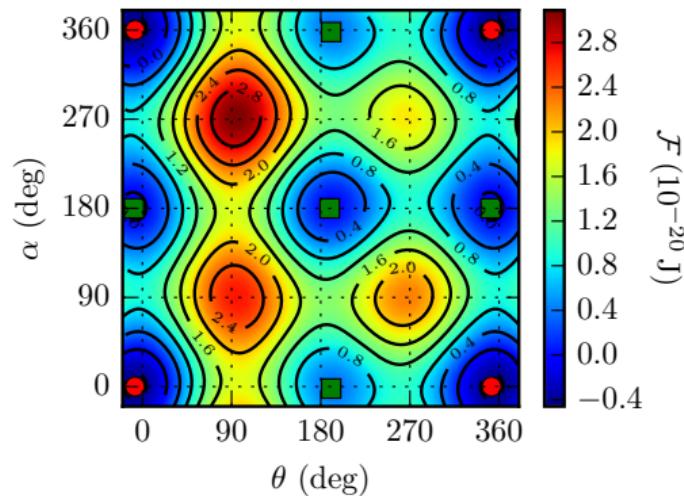
MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE PAYSAGE ÉNERGÉTIQUE

Paramètres physiques

- ▶ cœurs F : valeur du Fe
- ▶ coquilles AF : ordre de grandeur des oxydes AF

Constantes physiques des particules F et F-AF.

Cœur F	Coquille AF		
$< d >$	8 nm	t_{AF}	0,5 nm
M_F	1740 kA/m	\mathcal{J}_{F-AF}	75 $\mu\text{J}/\text{m}^2$
K_F	50 kJ/m^3	K_{AF}	200 kJ/m^3



Exemple de paysage énergétique \mathcal{F} .

MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE

IMPLÉMENTATION DE LA TEMPÉRATURE : LE CRITÈRE DE TRANSITION

Théorie de relaxation de NÉEL-BROWN

Relie le temps de relaxation τ_r à la barrière énergétique ΔE et l'énergie thermique $k_B T$ [26, 27].

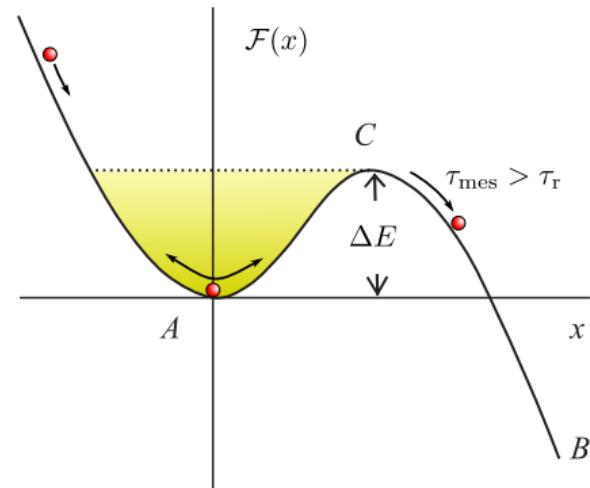
$$\tau_r = f_0^{-1} \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (3)$$

Critère de franchissement :

$$\tau_{\text{meas}} > \tau_r \implies \Delta E \lesssim 25k_B T \quad (4)$$

pour

$$\begin{cases} \tau_{\text{mes}} &= 10-100 \text{ s} \\ f_0 &= 10^9-10^{10} \text{ Hz.} \end{cases} \quad (5)$$



Puits de potentiel unique, avec une barrière ΔE [26].

[26] COFFEY et KALMYKOV. *J. Appl. Phys.* **112** p. 121301 (2012).

[27] NÉEL. *Annales de Géophysique* **5** p. 99–136 (1949).

MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE

IMPLÉMENTATION DE LA TEMPÉRATURE : FLUCTUATIONS THERMIQUES

Statistique de MAXWELL-BOLTZMANN

Définie la probabilité d'être dans un état d'énergie E_i

$$P \propto \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)$$

Pour \mathcal{S} l'ensemble des états accessibles d'énergie $(E_i - E_{\min}) < 25 k_B T$, et Z la fonction de partition du système :

$$P_i = \begin{cases} \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right), & \text{si } i \in \mathcal{S} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (6)$$

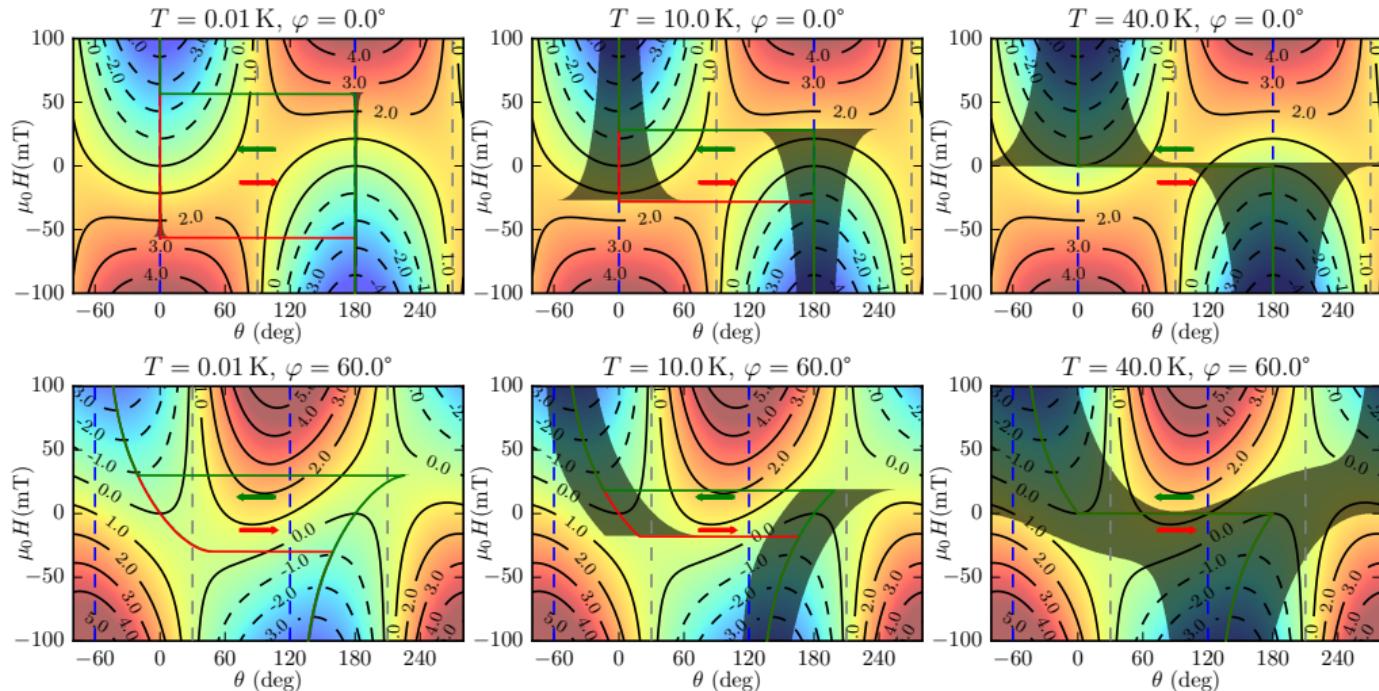
$$Z = \int_{j \in \mathcal{S}} \exp\left(-\frac{E_j}{k_B T}\right). \quad (7)$$

Puis détermination du moment moyen :

$$\langle \vec{\mu} \rangle_{\mathcal{S}} = \sum_{j \in \mathcal{S}} P_j \vec{\mu}_j \quad (8)$$

MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE

IMPLÉMENTATION DE LA TEMPÉRATURE : EXEMPLE

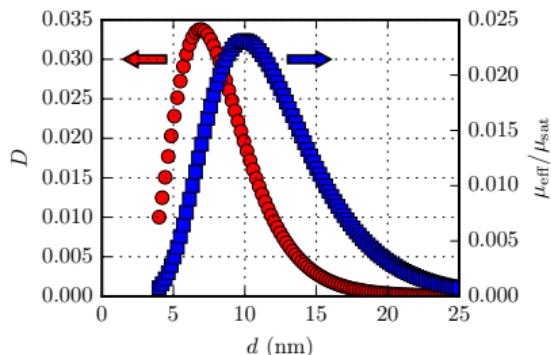


Évolution de \mathcal{F} pour une particule F selon φ et T .

MODÉLISATION POUR UNE ASSEMBLÉE DISTRIBUTION DES PARTICULES

Assemblée de nanoparticules :

- ▶ dispersion en taille de loi log-normale
- ▶ axes d'anisotropie alignés
- ▶ discréétisation sur 100 diamètres différents ($< d > = 8 \text{ nm}$)



Distribution lognormale des diamètres (●) et moments magnétiques (■) correspondant.

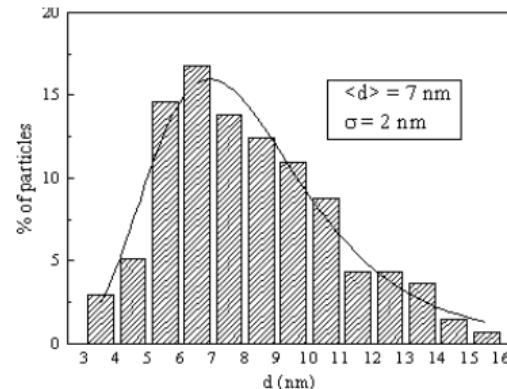
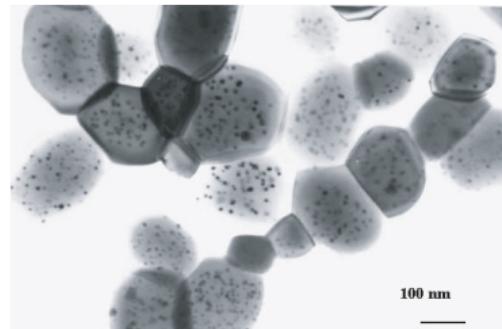
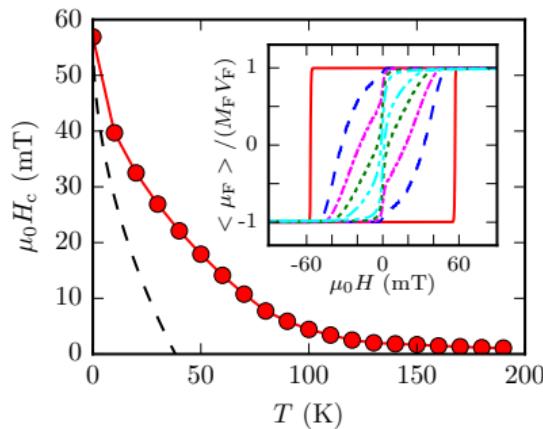


Image TEM et distribution de particules Fe dans une matrice Cr₂O₃ [28].

RÉSULTATS DES SIMULATIONS EN TEMPÉRATURE

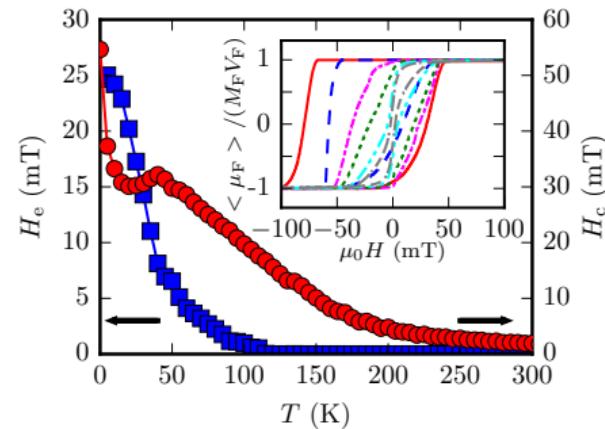
ÉVOLUTION DE $H_c(T)$ ET $H_e(T)$ SELON L'AXE D'ANISOTROPIE

Particules F



$H_c(T)$ pour particule unique de 8 nm (—) et
assemblée distribuée en taille (●)

Particules F-AF



Champs H_c (●) et H_e (■) pour des particules F-AF
distribuées.

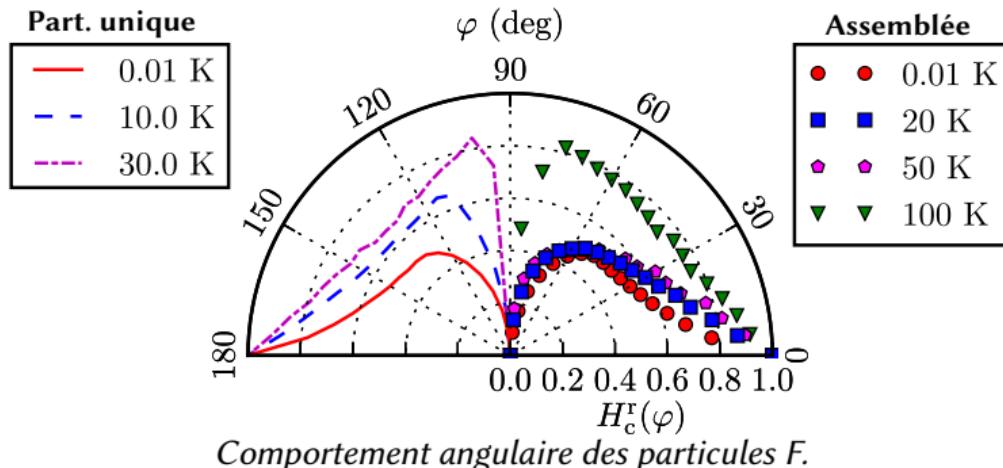
⇒ Première modélisation en température de particules cœur-coquille distribuées [25].

[25] RICHEY et al. *J. Appl. Phys.* **120** p. 083905 (2016).

RÉSULTATS DES SIMULATIONS EN TEMPÉRATURE

COMPORTEMENT ANGULAIRE DE $H_c(\varphi)$ ET $H_e(\varphi)$

Particules F :

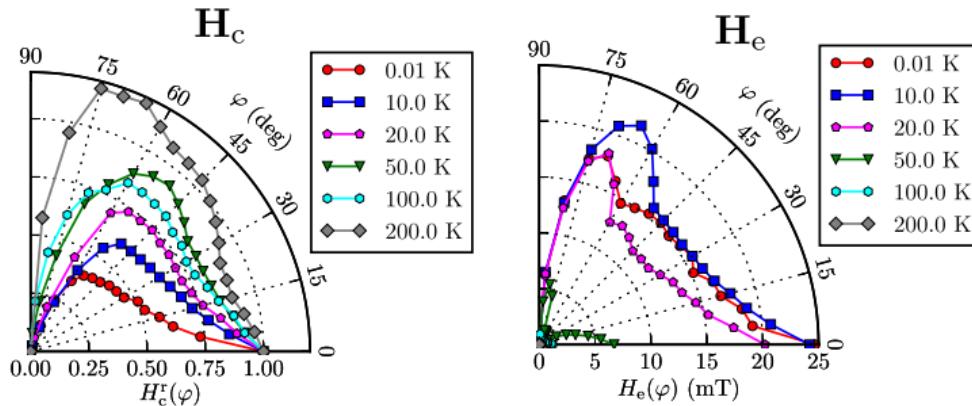


- ▶ Présence d'apexes en température pour une particule unique.
- ▶ Comportement similaire pour une assemblée distribuée.

RÉSULTATS DES SIMULATIONS EN TEMPÉRATURE

COMPORTEMENT ANGULAIRE DE $H_c(\varphi)$ ET $H_e(\varphi)$

Particules F-AF distribuée :



Comportement angulaire pour l'assemblée F-AF distribuée.

- ▶ Présence d'apexes, d'évolution complexe avec T.
- ▶ Dépendance du comportement angulaire aux paramètres physiques.

Outil de simulation efficace pour déterminer précisément les constantes magnétiques des systèmes de nanoparticules F-AF distribuées en taille.

CONCLUSION

- ▶ Implémentation d'un modèle de renversement en température pour une assemblée de nanoparticules cœur–coquille.
- ▶ Calcul de températures de blocage pour des nanoparticules dispersées.
- ▶ Outil pratique pour les ingénieurs/physiciens.
- ▶ Programme mis à disposition de la communauté.

Perspectives :

- ▶ Ajout d'anisotropies différentes (ordre supérieur, anisotropie de surface, etc.).
- ▶ Dispersion d'axe d'anisotropie.
- ▶ Dépendance en température des constantes.

RENVERSEMENT

INTRODUCTION : IMPORTANCE DU RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

MODÉLISATION DU RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE D'UNE ASSEMBLÉE DE NANOPARTICULES

RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE DE $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

Le composé BiFeO_3

Croissance des couches $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

Dépendance en température

Conclusion

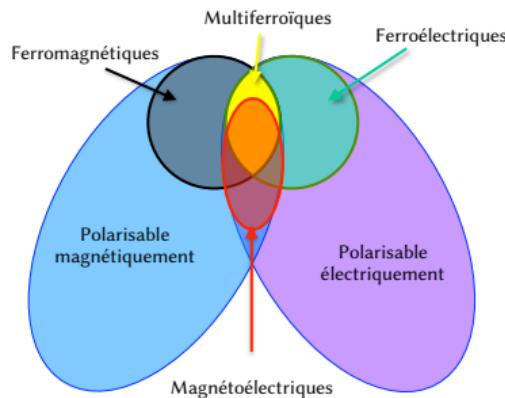
TRAÎNAGE ANGULAIRE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

CONCLUSION

LE COMPOSÉ BiFeO₃

UN MULTIFERROÏQUE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

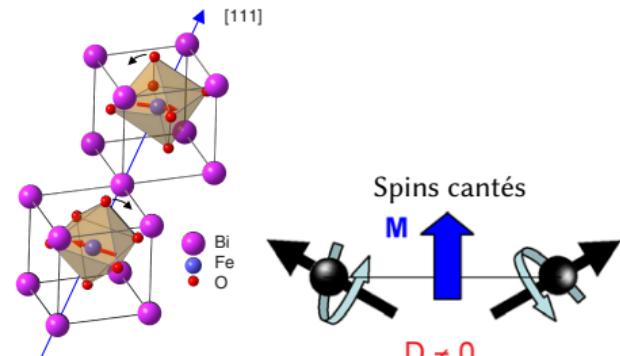
La famille des multiferroïques :



Regroupement des différentes familles de matériaux électriques/magnétiques. [29, 30]

La ferrite de bismuth BiFeO₃[31, 32] :

- ▶ ferroélectrique $T_C = 1103\text{ K}$
- ▶ antiferromagnétique canté $T_N = 643\text{ K}$



Structure du BFO [33] et représentation des spins cantés avec ferromagnétisme faible [34].

[29] EERENSTEIN et al. *Nature* **442** p. 759–65 (2006); [30] MARTIN et RAMESH. *Acta Materialia* **60** p. 2449–2470 (2012).

[31] KISELEV et al. *Soviet Physics Doklady* **7** p. 742 (1963); [32] TEAGUE et al. *Solid State Communications* **8** p. 1073–1074 (1970).

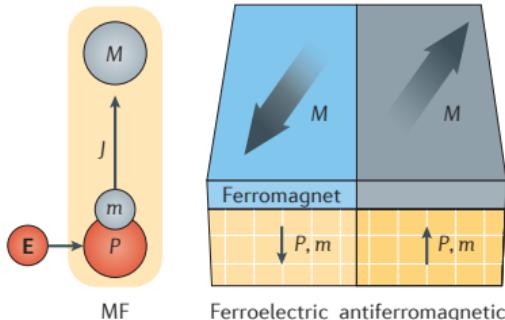
[33] LUBK et al. *Phys. Rev. B* **80** p. 104110 (2009); [34] EDERER et FENNIE. *J. Phys. : Cond. Mat.* **20** p. 434219 (2008).

LE COMPOSÉ BiFeO₃(BFO)

APPLICATION : CONTRÔLE ÉLECTRIQUE DE L'AIMANTATION

Effet magnétoélectrique

Couplage entre l'ordre électrique et l'ordre magnétique.



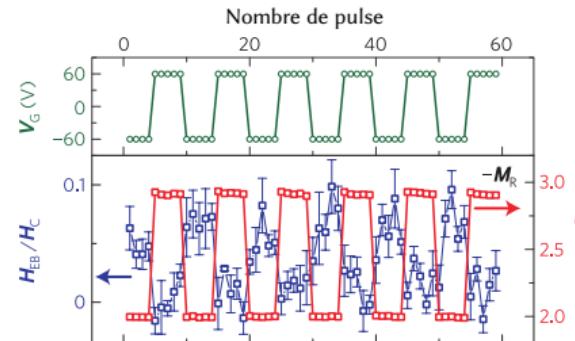
Contrôle électrique via couplage magnétoélectrique et d'échange [35].

[35] FIEBIG et al. *Nature Reviews Materials* 1 p. 16046 (2016).

[36] Wu et al. *Nat. Mater.* 9 p. 756–761 (2010).

Contrôle électrique direct :

- ▶ efficacité énergétique
- ▶ rapidité
- ▶ gain de place



Contrôle électrique des propriétés magnétiques avec BiFeO₃ [36].

CROISSANCE DES COUCHES $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

Élaboration par pulvérisation cathodique radiofréquence [37, 38] :

- ▶ sous champ $\approx 30 \text{ mT}$
- ▶ recuit cristallisant le BFO dans la phase multiferroïque

Réalisation de plusieurs épaisseurs t_{BFO} , dont 0 nm, 29 nm et 177 nm.

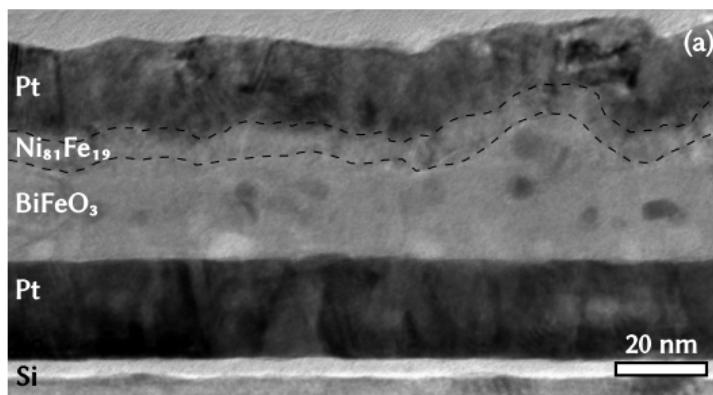
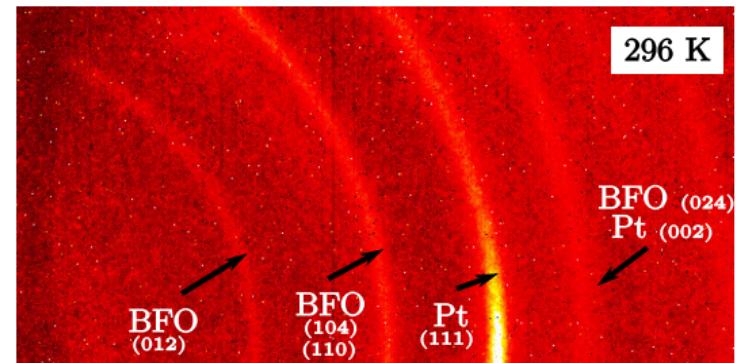


Image TEM en coupe pour $t_{\text{BFO}} = 29 \text{ nm}$.



Diffraction 2D indiquant la polycristallinité du BFO.

[37] HAUGUEL et al. *J. Appl. Phys.* **110** p. 073906 (2011).

[38] HAUGUEL et al. *J. Appl. Phys.* **112** p. 093904 (2012).

DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE

PROTOCOLE STANDARD

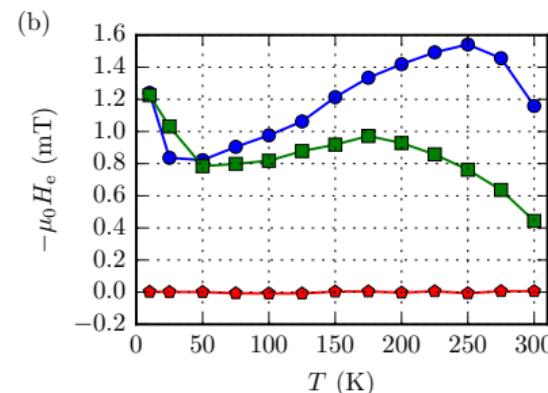
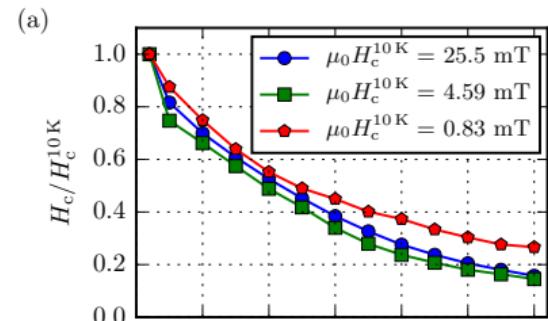
Protocole conventionnel de refroidissement,
ou *field-cooled protocol* :

- ▶ refroidissement jusqu'à 10 K sous un champ ~ 200 mT
- ▶ mesure de cycles à différentes températures

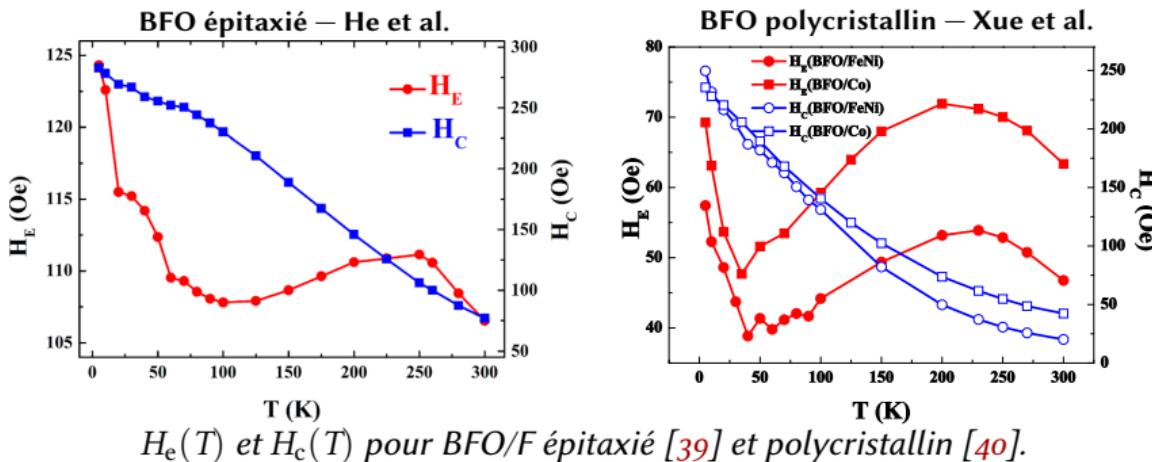
Résultats :

- ▶ décroissance monotone de H_c
- ▶ **maximum intermédiaire de H_e**

Origine de ce maximum local ?



$H_c(T)$ et $H_e(T)$ pour $t_{BFO} = 0$ nm (♦), 29 nm (■) et 177 nm (●).



$H_e(T)$ et $H_c(T)$ pour BFO/F épitaxié [39] et polycristallin [40].

Évolution particulière de H_e :

- ▶ indépendamment de la couche F
- ▶ indépendamment de l'ordre cristallographique

Hypothèse proposée [39–41]

Effet de la dépendance en température des domaines ferroélectriques (FE) à travers le couplage magnétoélectrique.

[39] HE et al. *J. Appl. Phys.* **117** p. 17C745 (2015).

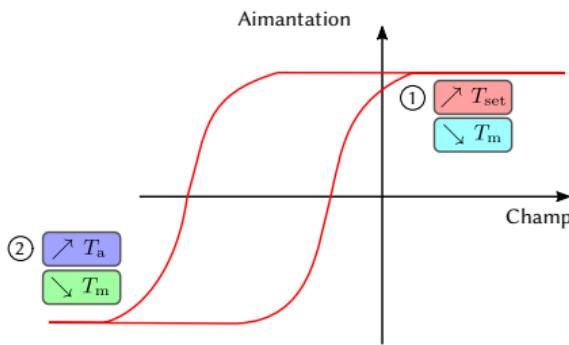
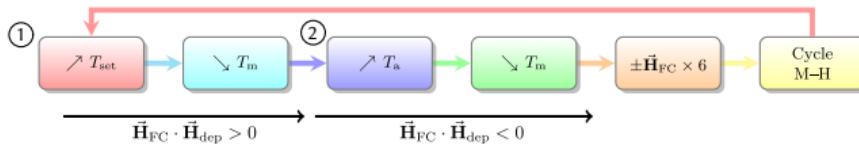
[40] XUE et al. *Eur. Phys. J. B* **86** p. 121 (2013).

[41] NAGANUMA et al. *J. Appl. Phys.* **109** (2011).

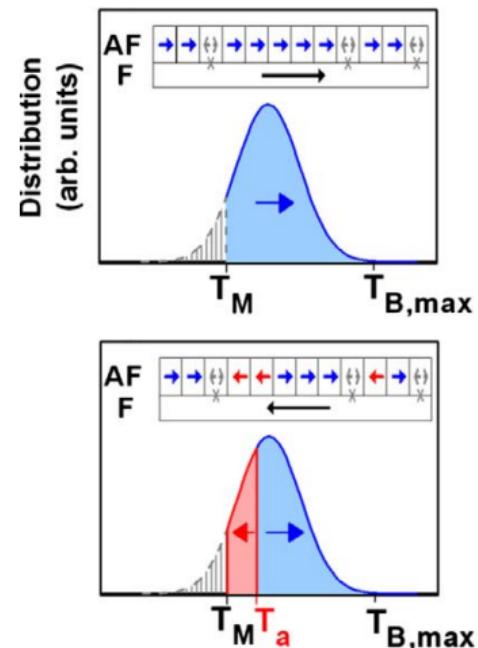
DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE

PROTOCOLE DE SOEYA

Protocole permettant de sonder les énergies d'activation au sein de l'AF.



Protocole de SOEYA [42, 43].



Phénoménologie du protocole de SOEYA [44].

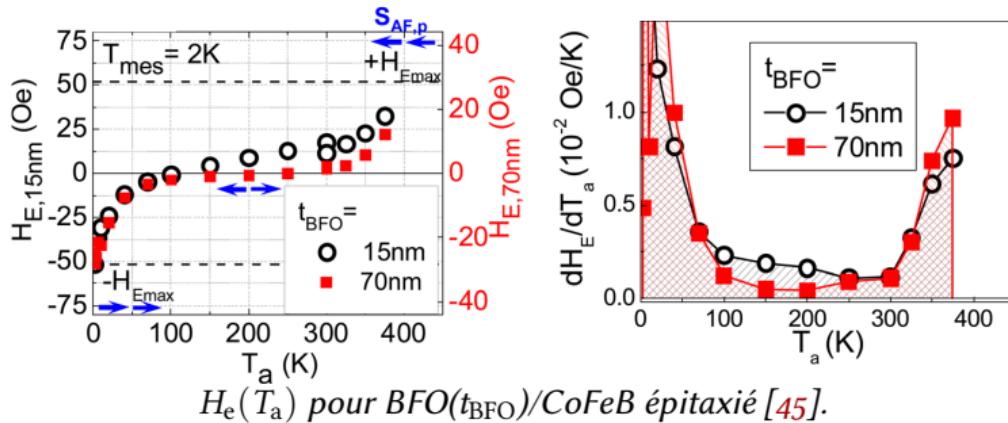
[42] SOEYA et al. *J. Appl. Phys.* **76** p. 5356 (1994).

[43] O'GRADY et al. *J. Magn. Magn. Mater.* **322** p. 883–899 (2010).

[44] BALTZ et al. *Phys. Rev. B* **81** p. 52404 (2010).

DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE

PROTOCOLE DE SOEYA : CAS DE BFO ÉPITAXIÉ

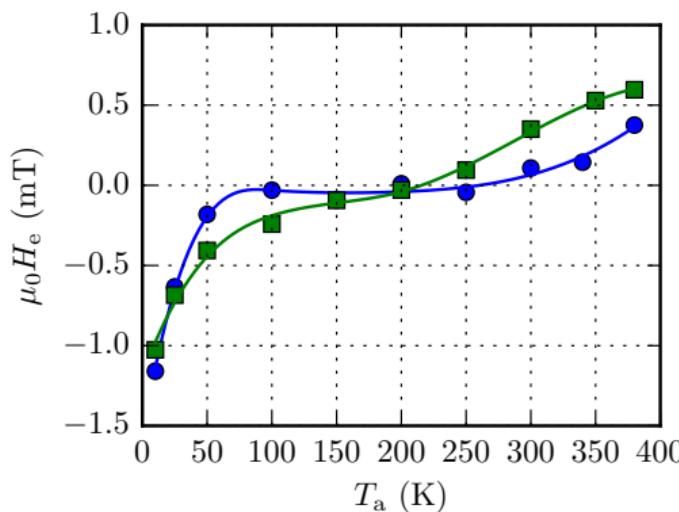


Interprétation

- basse température : entités AF de faible énergie
- haute température : décrochage de parois de domaine AF

DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE

PROTOCOLE DE SOEYA : APPLICATION SUR BFO POLYCRYSTALLIN



$H_e(T_a)$ pour $t_{BFO} = 29\text{ nm}$ (■) et 177 nm (●).

Observations des évolutions :

- ▶ pas d'effet apparent de l'épaisseur
- ▶ similitude des résultats avec le BFO épitaxié

Question

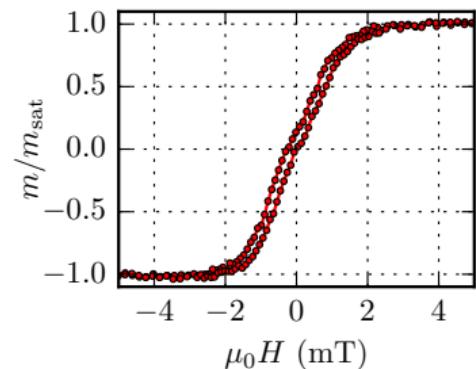
Indépendance des domaines à la microstructure ?

⇒ Nécessité d'imager les domaines du BFO polycristallin.

DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE

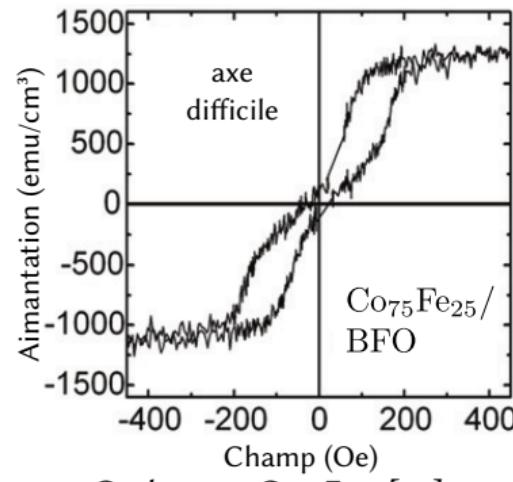
HYPOTHÈSE D'UNE CONTRIBUTION INTRINSÈQUE

Observation d'une double pente selon l'axe difficile :



Cycle obtenu sur BFO(29 nm)/Py.

⇒ présence d'un minimum énergétique à 90°

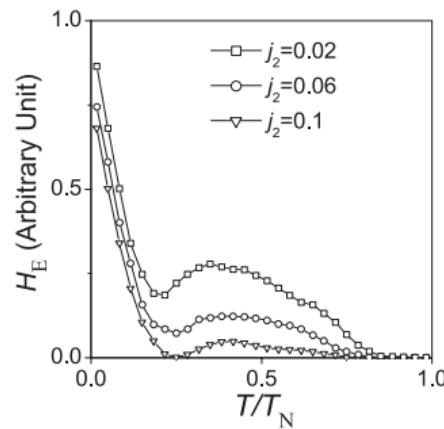


Cycle pour Co₇₅Fe₂₅ [41].

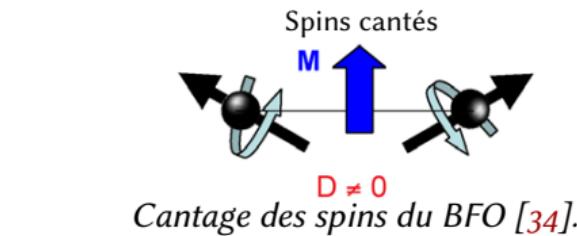
DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE

HYPOTHÈSE D'UNE CONTRIBUTION INTRINSÈQUE

Simulation avec présence d'un couplage d'échange biquADRATIQUE (2nd ordre) :



Simulation de $H_e(T)$ avec couplage d'échange biquADRATIQUE [46].



⇒ obtention d'une évolution non-monotone de $H_e(T)$

Proposition

Présence d'un couplage d'échange biquADRATIQUE, pouvant résulter du cantage des spins du BFO.

[34] EDERER et FENNIE. *J. Phys. : Cond. Mat.* **20** p. 434219 (2008).

[46] Hu et al. *Eur. Phys. J. B* **40** p. 265 (2004).

DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE

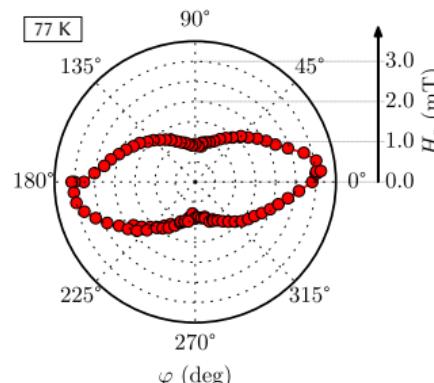
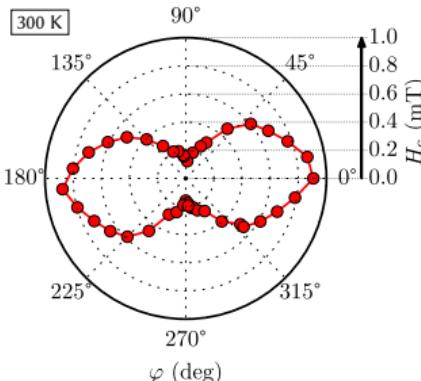
COMPORTEMENT ANGULAIRE

Mesures angulaires à 300 K et 77 K
(réalisation d'un cryostat à immersion).

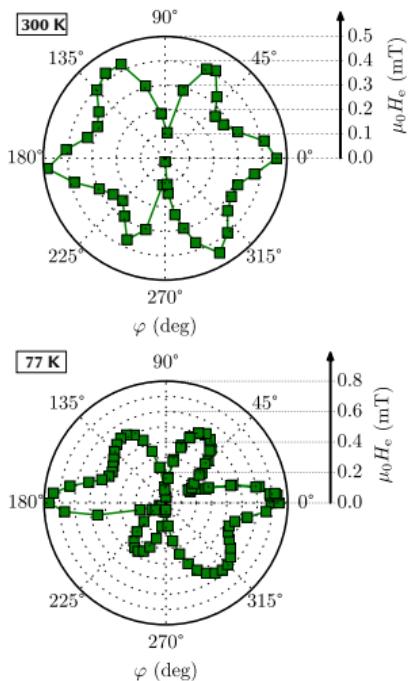


Cryostat à immersion.

- ▶ Comportement typique d'une anisotropie uniaxiale dominante ($K_1 > K_2$)
- ▶ Présence d'un désalignement



Évolution angulaire de H_c à 300 K et 77 K pour $t_{BFO} = 29 \text{ nm}$.



*Évolution angulaire de H_e à 300 K et 77 K pour
 $t_{BFO} = 29 \text{ nm}$.*

Résultats :

- ▶ Dépendance complexe de H_e
- ▶ Disymétrie accentuée en température
- ▶ Asymétrie du comportement : présence de désalignement ?
- ▶ Modification des rapports d'anisotropie avec la température
- ▶ Nécessité de comparer les résultats à une modélisation.

CONCLUSION

- ▶ Protocole standard
 - ▶ évolution en température indépendante de l'ordre cristallographique
 - ▶ proposition d'une contribution intrinsèque, le cantage des spins du BFO générant un couplage d'échange biquADRATIQUE
- ▶ Protocole de SOEYA
 - ▶ 1^{res} mesures sur BFO polycristallin
 - ▶ évolution de $H_e(T_a)$ indépendante de la microstructure

Perspectives :

- ▶ Observation des domaines FE du BFO polycristallin.
- ▶ Modélisation du comportement angulaire des couches avec des anisotropies d'ordre supérieur.
- ▶ Modélisation du protocole de SOEYA.
- ▶ Réalisation de mesures angulaires sur du BFO épitaxié.

TRAÎNAGE

INTRODUCTION : IMPORTANCE DU RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

MODÉLISATION DU RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE D'UNE ASSEMBLÉE DE NANOPARTICULES

RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE DE $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

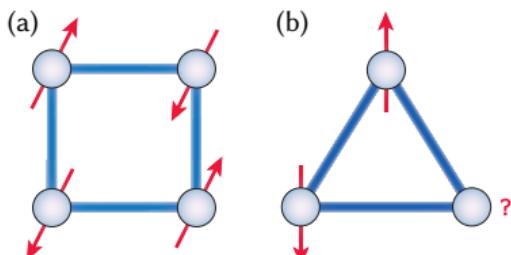
TRAÎNAGE ANGULAIRE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

- Traînage dans les structures F-AF
- Démonstration du traînage angulaire
- Traînage basse température dans $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$
- Conclusion

CONCLUSION

TRAÎNAGE DANS LES STRUCTURES F-AF

FRUSTRATION & DÉSORDRE



Principe d'un système AF frustré [47].

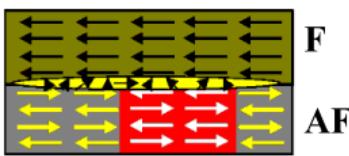


Schéma de l'interface F-AF désordonnée [48].

Frustration magnétique

Présence d'états d'énergie proche, conduisant au désordre magnétique des spins.

La dégénérescence des niveaux d'énergie conduit à un état désordonné de l'AF à l'interface.

Sources de frustration dans une interface F-AF :

- ▶ rugosité
- ▶ dilution
- ▶ défauts

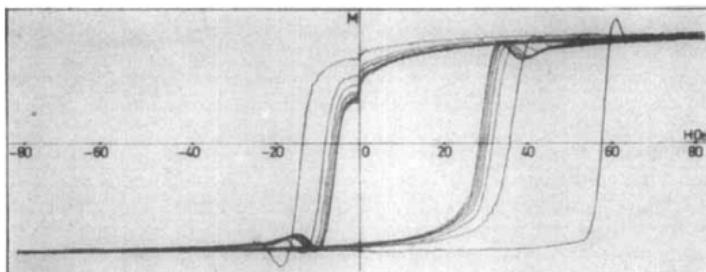
[47] HARRIS. *Nature* **456** p. 886–887 (2008).

[48] RADU et ZABEL. *Magnetic Heterostructures* **227** p. 97–184 (2008).

Traînage magnétique

Modification du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycle à partir d'un état biaisé.

⇒ Évolution de H_c et H_e en fonction du nombre de cycles et de T .



Découverte du traînage sur NiFe–NiFeMn [49].

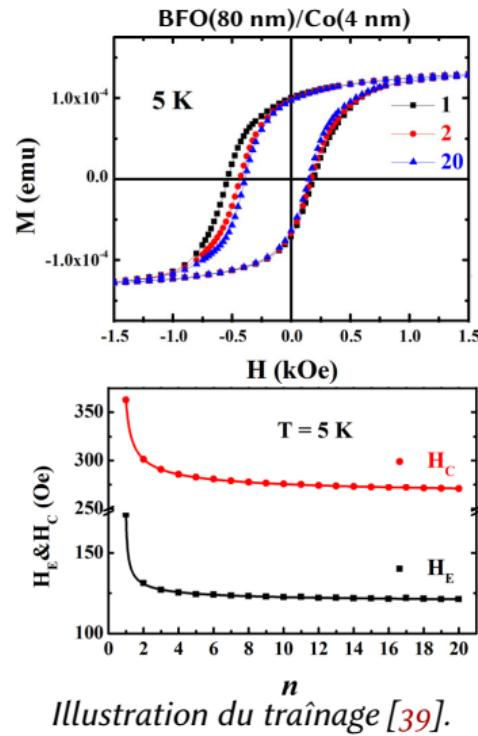


Illustration du traînage [39].

[49] PACCARD et al. *physica status solidi (b)* **16** p. 301–311 (1970).

[39] HE et al. *J. Appl. Phys.* **117** p. 17C745 (2015).

DÉMONSTRATION DU TRAÎNAGE ANGULAIRE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

Protocole

Mesures angulaires après dépôt (jour J) :

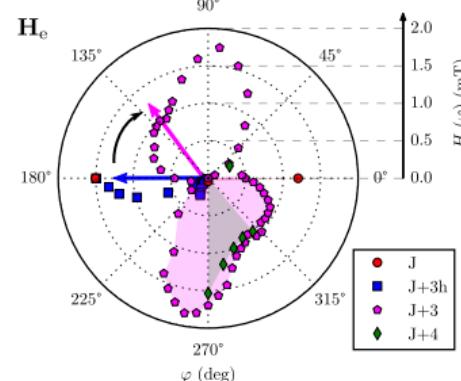
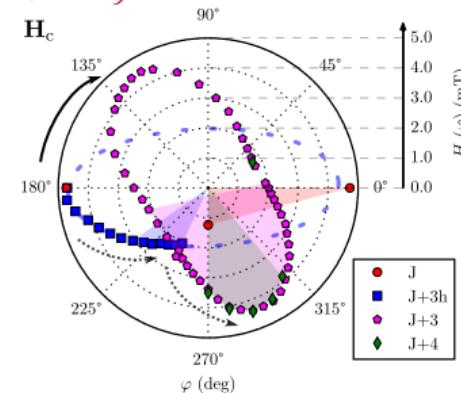
1. après le dépôt : $\varphi = 0^\circ, 180^\circ$ et 270°
2. 3 heures : $\varphi = 180^\circ \rightarrow 245^\circ$
3. 3 jours : rotation complète
4. 4 jours : vérification

Modification de l'orientation de l'axe d'anisotropie :

⇒ Mise en évidence d'un traînage angulaire.

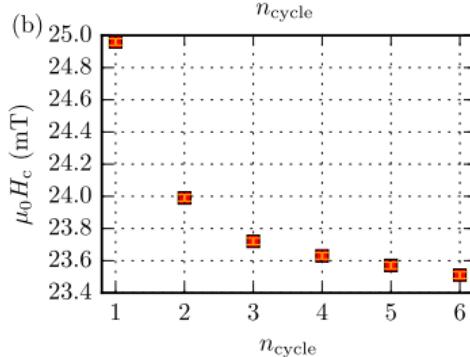
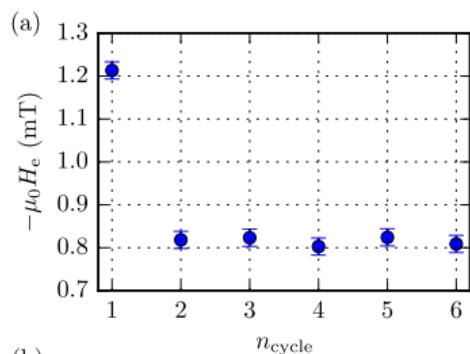
Perspectives de mesure

- ▶ dépendance temporelle du traînage ou en fonction du nombre de cycle
- ▶ effet de la température



*Mesures angulaires pour $\text{BFO}(85 \text{ nm})/\text{Py}$
(zones colorées : $H_e < 0$).*

TRAÎNAGE BASSE TEMPÉRATURE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$



Traînage de H_c et H_e pour $\text{BFO}(177\text{ nm})/\text{Py}$.

Mesure de cycles successifs à 10 K par magnétométrie SQUID, selon la direction du champ de dépôt.

Résultats correspondant à un comportement classique du traînage :

- ▶ forte variation de H_e entre $n = 1$ et $n = 2$
- ▶ diminution progressive de H_c

Question

Possibilité d'un traînage angulaire à basse température ?

CONCLUSION

- ▶ 1^{re} mise en évidence d'un traînage angulaire.

Perspectives :

- ▶ Traînage en température selon différentes directions par rapport à l'axe d'anisotropie.
- ▶ Mesure de la dépendance angulaire
 - ▶ au nombre de cycle
 - ▶ temporelle

CONCLUSION

INTRODUCTION : IMPORTANCE DU
RENVERSEMENT MAGNÉTIQUE EN TEMPÉRATURE

MODÉLISATION DU RENVERSEMENT EN
TEMPÉRATURE D'UNE ASSEMBLÉE DE
NANOPARTICULES

RENVERSEMENT EN TEMPÉRATURE DE
 $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

TRAÎNAGE ANGULAIRE DANS $\text{BiFeO}_3/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

CONCLUSION

CONCLUSION

- ▶ Réalisation d'un modèle de renversement en température avec distribution de taille
 - ▶ première modélisation avec distribution de taille et comportement angulaire
 - ▶ mise en évidence d'apexes sur le comportement angulaire
 - ▶ programme mis à disposition de la communauté
- ▶ Comportement en température, selon trois approches (standard, SOEYA, angulaire)
 - ▶ indépendance du comportement à l'ordre cristallographique
 - ▶ proposition d'une contribution intrinsèque au comportement en température
 - ▶ premières mesures angulaires basse température
- ▶ Mise en évidence d'un traînage angulaire des axes d'anisotropie

PERSPECTIVES

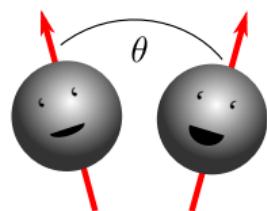
Modélisation

- ▶ Simulation avec des anisotropies d'ordre supérieur
- ▶ Dispersion d'axe d'anisotropie
- ▶ Couplage entre les particules

Mesures expérimentales

- ▶ Mesures piezoélectriques
- ▶ Réalisation de structures Pt/BiFeO₃/Ni₈₁Fe₁₉/Pt pour application d'un champ électrique
- ▶ Étude comparative du traînage magnétique : nombre de cycles, effet de l'histoire magnétique, etc.

Merci



REMERCIEMENTS

David SPENATO, David DEKADJEVI, Jamal BEN YOUSSEF, Jean-Philippe JAY, Souren POGOSSIAN, Gaël LE Roux, Grégory MIGNOT et Jacqueline LE BARS.

Aletta PRINSLOO, Charles SHEPPARD, Jasper SNYMAN, André STRYDOM et Bénédicte WAROT-FONROSE.

François MICHAUD, Claude CALVARIN, Bernard CALVEZ, Karine PERRON, Philippe ELIÈS et Alain FESSANT.

Amel, Terry, Nathan, Romain, ma famille et tous ceux que j'ai pu rencontrer.

BIBLIOGRAPHY I

- [1] Andreas MOSER, Kentaro TAKANO, David T. MARGULIES, Manfred ALBRECHT, Yoshiaki SONOBE, Yoshihiro IKEDA, Shouheng SUN et Eric E. FULLERTON. "TOPICAL REVIEW: Magnetic recording : advancing into the future". *Journal of Physics D : Applied Physics* 35 (2002), R157–R167. DOI : [10.1088/0022-3727/35/19/201](https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/19/201) (cf. p. 4).
- [2] Dieter WELLER, Gregory PARKER, Oleksandr MOSENDZ, Andreas LYBERATOS, Dmitriy MITIN, Natalia Y. SAFONOVA et Manfred ALBRECHT. "Review Article : FePt heat assisted magnetic recording media". *Journal of Vacuum Science & Technology B* 34.6 (2016), p. 060801. DOI : [10.1116/1.4965980](https://doi.org/10.1116/1.4965980) (cf. p. 5).
- [3] V. FRANCO, J. S. BLÁZQUEZ, B. INGALE et A. CONDE. "The Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration Near Room Temperature : Materials and Models". *Annual Review of Materials Research* 42 (2012), p. 305–342. DOI : [10.1146/annurev-matsci-062910-100356](https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-100356) (cf. p. 6).
- [4] Jian LIU, Tino GOTTSCHALL, Konstantin P Skokov, James D MOORE et Oliver GUTFLEISCH. "Giant magnetocaloric effect driven by structural transitions." *Nature materials* 11.7 (2012), p. 620–6. DOI : [10.1038/nmat3334](https://doi.org/10.1038/nmat3334) (cf. p. 6).
- [5] Sebastian ANTHONY. *GE develops high-tech fridge magnets that could save the world billions of dollars in energy costs.* 2014. URL : <https://www.extremetech.com/extreme/176393-ge-develops-high-tech-fridge-magnets-that-could-save-the-world-billions-of-dollars-in-energy-costs> (cf. p. 6).
- [6] Jae-Hyun LEE, Jung-Tak JANG, Jin-Sil Choi, Seung Ho Moon, Seung-Hyun Noh, Ji-Wook Kim, Jin-Gyu Kim, Il-Sun Kim, Kook In Park et Jinwoo CHEON. "Exchange-coupled magnetic nanoparticles for efficient heat induction." *Nature nanotechnology* 6.7 (2011), p. 418–22. DOI : [10.1038/nnano.2011.95](https://doi.org/10.1038/nnano.2011.95) (cf. p. 7).

BIBLIOGRAPHY II

- [7] Koichiro HAYASHI, Michihiro NAKAMURA, Wataru SAKAMOTO, Toshinobu Yogo, Hirokazu Miki, Shuji Ozaki, Masahiro ABE, Toshio MATSUMOTO et Kazunori ISHIMURA. “Superparamagnetic nanoparticle clusters for cancer theranostics combining magnetic resonance imaging and hyperthermia treatment.” *Theranostics* 3.6 (2013), p. 366–76. DOI : [10.7150/thno.5860](https://doi.org/10.7150/thno.5860) (cf. p. 7).
- [8] F. DORN. *Magnetic Nanoparticle Synthesis*. 2012. URL :
http://www.fz-juelich.de/pgi/pgi-8/EN/Research/02-MagneticFieldSensor/02-3-MagneticNanoparticleSensing/01-MagneticNanoparticleSynthesis_artikel.html?nn=784132 (cf. p. 9).
- [9] Günter REISS et Andreas HÜTTEN. “Magnetic nanoparticles : applications beyond data storage.” *Nature materials* 4.10 (2005), p. 725–6. DOI : [10.1038/nmat1494](https://doi.org/10.1038/nmat1494) (cf. p. 9).
- [10] Johannes EISENMAYER et Ivan K SCHULLER. “Magnetic nanostructures : Overcoming thermal fluctuations.” *Nature materials* 2.7 (2003), p. 437–8. DOI : [10.1038/nmat934](https://doi.org/10.1038/nmat934) (cf. p. 10, 11).
- [11] J. Nogués et Ivan K. SCHULLER. “Exchange bias”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 192 (1999), p. 203–232. DOI : [10.1016/S0304-8853\(98\)00266-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00266-2) (cf. p. 10, 11).
- [12] José A DE TORO, Daniel P MARQUES, Pablo MUÑIZ, Vassil SKUMRYEV, Jordi SORT, Dominique GIVORD et Josep Nogués. “High Temperature Magnetic Stabilization of Cobalt Nanoparticles by an Antiferromagnetic Proximity Effect.” *Physical review letters* 115.5 (2015), p. 057201. DOI : [10.1103/PhysRevLett.115.057201](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.057201) (cf. p. 12).

BIBLIOGRAPHY III

- [13] Vassil SKUMRYEV, Stoyan STOYANOV, Yong ZHANG, George HADJIPANAYIS, Dominique GIVORD et Josep NOGUÉS. “Beating the superparamagnetic limit with exchange bias”. *Nature* 423.6942 (2003), p. 850–853. DOI : [10.1038/nature01687](https://doi.org/10.1038/nature01687) (cf. p. 12, 13).
- [14] E. C. STONER et E. P. WOHLFARTH. “A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 240.826 (1948), p. 599–642. DOI : [10.1098/rsta.1948.0007](https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0007) (cf. p. 14, 18).
- [15] J. GARCÍA-OTERO, A. J. GARCÍA-BASTIDA et J. RIVAS. “Influence of temperature on the coercive field of non-interacting fine magnetic particles”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 189.3 (1998), p. 377–383. DOI : [10.1016/S0304-8853\(98\)00243-1](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00243-1) (cf. p. 14).
- [16] V. FRANCO et A. CONDE. “Thermal effects in a Stoner–Wohlfarth model and their influence on magnetic anisotropy determination”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 278.1-2 (2004), p. 28–38. DOI : [10.1016/j.jmmm.2003.11.370](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.11.370) (cf. p. 14).
- [17] J. CARREY, B. MEHDAOUI et M. RESPAUD. “Simple models for dynamic hysteresis loop calculations of magnetic single-domain nanoparticles : Application to magnetic hyperthermia optimization”. *Journal of Applied Physics* 109.8 (2011), p. 083921. DOI : [10.1063/1.3551582](https://doi.org/10.1063/1.3551582) (cf. p. 14).
- [18] K. TROHIDOU et M. VASILAKAKI. “Monte Carlo Studies of Magnetic Nanoparticles”. T. 20. 2011, p. 513. DOI : [10.5772/15930](https://doi.org/10.5772/15930) (cf. p. 14).

BIBLIOGRAPHY IV

- [19] D. LEDUE, P. E. BERCHE et R. PATTE. “Magnetisation switching in a ferromagnetic Heisenberg nanoparticle with uniaxial anisotropy : a Monte Carlo investigation”. *Physica B : Physics of Condensed Matter* 348 (2004), p. 410–419. DOI : [10.1016/j.physb.2004.01.005](https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.01.005) (cf. p. 14).
- [20] W. H. MEIKLEJOHN et C. P. BEAN. “New Magnetic Anisotropy”. *Physical Review* 102.5 (1956), p. 1413–1414. DOI : [10.1103/PhysRev.102.1413](https://doi.org/10.1103/PhysRev.102.1413) (cf. p. 15, 21).
- [21] W. H. MEIKLEJOHN et C. P. BEAN. “New Magnetic Anisotropy”. *Physical Review* 105.3 (1957), p. 904–913. DOI : [10.1103/PhysRev.105.904](https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.904) (cf. p. 15, 21).
- [22] Òscar IGLESIAS, Xavier BATLLE et Amílcar LABARTA. “Microscopic origin of exchange bias in core/shell nanoparticles”. *Physical Review B* 72.21 (2005). DOI : [10.1103/PhysRevB.72.212401](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.212401) (cf. p. 15).
- [23] M. VASILAKAKI et K. N. TROHIDOU. “Numerical study of the exchange-bias effect in nanoparticles with ferromagnetic core/ferrimagnetic disordered shell morphology”. *Physical Review B* 79 (2009), p. 144402. DOI : [10.1103/PhysRevB.79.144402](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.144402) (cf. p. 15).
- [24] G. VALLEJO-FERNANDEZ, O. WHEAR, A. G. ROCA, S. HUSSAIN, J. TIMMIS, V. PATEL et K. O'GRADY. “Mechanisms of hyperthermia in magnetic nanoparticles”. *Journal of Physics D : Applied Physics* 46.31 (2013), p. 312001. DOI : [10.1088/0022-3727/46/31/312001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/31/312001) (cf. p. 16).

BIBLIOGRAPHY V

- [25] J. RICHY, J.-Ph. JAY, S. P. POGOSSIAN, J. BEN YOUSSEF, C. J. SHEPPARD, A. R. E. PRINSLOO, D. SPENATO et D. T. DEKADJEVI. "Thermal simulation of magnetization reversals for size-distributed assemblies of core-shell exchange biased nanoparticles". *Journal of Applied Physics* 120.8 (2016), p. 083905. DOI : [10.1063/1.4961324](https://doi.org/10.1063/1.4961324) (cf. p. [17](#), [28](#)).
- [26] William T. COFFEY et Yuri P. KALMYKOV. "Thermal fluctuations of magnetic nanoparticles : Fifty years after Brown". *Journal of Applied Physics* 112.12 (2012), p. 121301. DOI : [10.1063/1.4754272](https://doi.org/10.1063/1.4754272) (cf. p. [24](#)).
- [27] Louis NÉEL. "Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques au grains fin avec applications aux terres cuites". *Annales de Géophysique* 5 (1949), p. 99–136 (cf. p. [24](#)).
- [28] J. SORT, V. LANGLAIS, S. DOPPIU, B. DIENY, S. SURIÑACH, J. S. MUÑOZ, M. D. BARÓ, Ch. LAURENT et J. NOGUÉS. "Exchange bias effects in Fe nanoparticles embedded in an antiferromagnetic Cr₂O₃ matrix". *Nanotechnology* 15.4 (2004), S211–S214. DOI : [10.1088/0957-4484/15/4/017](https://doi.org/10.1088/0957-4484/15/4/017) (cf. p. [27](#)).
- [29] W EERENSTEIN, N D MATHUR et J F SCOTT. "Multiferroic and magnetoelectric materials." *Nature* 442.7104 (2006), p. 759–65. DOI : [10.1038/nature05023](https://doi.org/10.1038/nature05023) (cf. p. [33](#)).
- [30] L. W. MARTIN et R. RAMESH. "Multiferroic and magnetoelectric heterostructures". *Acta Materialia* 60.6-7 (2012), p. 2449–2470. DOI : [10.1016/j.actamat.2011.12.024](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.024) (cf. p. [33](#)).
- [31] S. V. KISELEV, R. P. OZEROV et G. S. ZHADANOV. "Detection of Magnetic Order in Ferroelectric BiFeO₃ by Neutron Diffraction". *Soviet Physics Doklady* 7 (1963), p. 742 (cf. p. [33](#)).

BIBLIOGRAPHY VI

- [32] James R. TEAGUE, Robert GERSON et W. J. JAMES. “Dielectric hysteresis in single crystal BiFeO₃”. *Solid State Communications* 8 (1970), p. 1073–1074. DOI : [10.1016/0038-1098\(70\)90262-0](https://doi.org/10.1016/0038-1098(70)90262-0) (cf. p. 33).
- [33] Axel LUBK, S. GEMMING et N. A. SPALDIN. “First-principles study of ferroelectric domain walls in multiferroic bismuth ferrite”. *Physical Review B* 80 (2009), p. 104110. DOI : [10.1103/PhysRevB.80.104110](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.104110) (cf. p. 33).
- [34] Claude EDERER et Craig J. FENNIE. “Electric-field switchable magnetization via the Dzyaloshinskii Moriya interaction : FeTiO₃ versus BiFeO₃”. *Journal of Physics : Condensed Matter* 20 (2008), p. 434219. DOI : [10.1088/0953-8984/20/43/434219](https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/43/434219) (cf. p. 33, 42).
- [35] Manfred FIEBIG, Thomas LOTTERMOSER, Dennis MEIER et Morgan TRASSIN. “The evolution of multiferroics”. *Nature Reviews Materials* 1 (2016), p. 16046. DOI : [10.1038/natrevmats.2016.46](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.46) (cf. p. 34).
- [36] S. M. Wu, Shane A. CYBART, P. Yu, M. D. ROSSELL, J. X. ZHANG, R. RAMESH, R. C. DYNES, Fumihiro MATSUKURA, Yoshinori TOKURA et Hideo OHNO. “Reversible electric control of exchange bias in a multiferroic field-effect device”. *Nature Materials* 9.9 (2010), p. 756–761. DOI : [10.1038/nmat2803](https://doi.org/10.1038/nmat2803) (cf. p. 34).
- [37] Tony HAUGUEL, Souren P. POCOSSIAN, David T. DEKADJEVI, David SPENATO, Jean-Philippe JAY, Mikhail V. INDENBOM et Jamal Ben YOUSSEF. “Experimental evidence for exchange bias in polycrystalline BiFeO₃/Ni₈₁Fe₁₉ thin films”. *Journal of Applied Physics* 110.7 (2011), p. 073906. DOI : [10.1063/1.3636098](https://doi.org/10.1063/1.3636098) (cf. p. 35).
- [38] Tony HAUGUEL, Souren P. POCOSSIAN, David T. DEKADJEVI, David SPENATO, Jean-Philippe JAY et Jamal BEN YOUSSEF. “Driving mechanism of exchange bias and magnetic anisotropy in multiferroic polycrystalline BiFeO₃/permalloy bilayers”. *Journal of Applied Physics* 112.9 (2012), p. 093904. DOI : [10.1063/1.4763480](https://doi.org/10.1063/1.4763480) (cf. p. 35).

BIBLIOGRAPHY VII

- [39] M. C. HE, B. You, H. Q. Tu, Y. SHENG, Q. Y. Xu, W. B. RUI, Y. GAO, Y. Q. ZHANG, Y. B. Xu et J. Du. "Temperature dependent exchange bias training effect in single-crystalline BiFeO₃/Co bilayers". *Journal of Applied Physics* 117.17 (2015), p. 17C745. DOI : [10.1063/1.4917465](https://doi.org/10.1063/1.4917465) (cf. p. 37, 48).
- [40] Xiaobo XUE, Xueyong YUAN, Wenbin RUI, Qingyu Xu, Biao You, Wei ZHANG, Shiming ZHOU et Jun DU. "Temperature dependent exchange bias effect in polycrystalline BiFeO₃/FM (FM = NiFe, Co) bilayers". *The European Physical Journal B* 86 (2013), p. 121. DOI : [10.1140/epjb/e2013-31003-y](https://doi.org/10.1140/epjb/e2013-31003-y) (cf. p. 37).
- [41] Hiroshi NAGANUMA, Mikihiko OOGANE et Yasuo ANDO. "Exchange biases of Co, Py, Co₄₀Fe₄₀B₂₀, Co₇₅Fe₂₅, and Co₅₀Fe₅₀ on epitaxial BiFeO₃ films prepared by chemical solution deposition". *Journal of Applied Physics* 109 (2011). DOI : [10.1063/1.3563061](https://doi.org/10.1063/1.3563061) (cf. p. 37, 41).
- [42] Susumu SOEYA, Takao IMAGAWA, Katsuya MITSUOKA et Shinji NARISHIGE. "Distribution of blocking temperature in bilayered Ni₈₁Fe₁₉/NiO films". *Journal of Applied Physics* 76.9 (1994), p. 5356. DOI : [10.1063/1.358488](https://doi.org/10.1063/1.358488) (cf. p. 38).
- [43] K. O'GRADY, L.E. FERNANDEZ-OUTON et G. VALLEJO-FERNANDEZ. "A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322.8 (2010), p. 883–899. DOI : [10.1016/j.jmmm.2009.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.12.011) (cf. p. 38).
- [44] V. BALTZ, B. RODMACQ, A. ZAREFY, L. LECHEVALLIER et B. DIENY. "Bimodal distribution of blocking temperature in exchange-biased ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers". *Physical Review B* 81 (2010), p. 52404. DOI : [10.1103/PhysRevB.81.052404](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.052404) (cf. p. 38).

BIBLIOGRAPHY VIII

- [45] C. K. SAFEER, M. CHAMFRAULT, J. ALLIBE, C. CARRETERO, C. DERANLOT, E. JACQUET, J.-F. JACQUOT, M. BIBES, A. BARTHÉLÉMY, B. DIENY, H. BÉA et V. BALTZ. “Anisotropic bimodal distribution of blocking temperature with multiferroic BiFeO₃ epitaxial thin films”. *Applied Physics Letters* 100 (2012), p. 2402. DOI : [10.1063/1.3684812](https://doi.org/10.1063/1.3684812) (cf. p. 39).
- [46] Jing-Guo Hu, Guojun JIN, An Hu et Yu-Qiang MA. “Temperature dependence of exchange bias and coercivity in ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers”. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems* 40 (2004), p. 265. DOI : [10.1140/epjb/e2004-00272-0](https://doi.org/10.1140/epjb/e2004-00272-0) (cf. p. 42).
- [47] Mark HARRIS. “Condensed-matter physics : The eternal triangle”. *Nature* 456.7224 (2008), p. 886–887. DOI : [10.1038/456886a](https://doi.org/10.1038/456886a) (cf. p. 47).
- [48] Florin RADU et Hartmut ZABEL. “Exchange Bias Effect of Ferro-/Antiferromagnetic Heterostructures”. *Magnetic Heterostructures*. Springer Tracts in Modern Physics 227 (2008), p. 97–184. DOI : [10.1007/978-3-540-73462-8_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73462-8_3) (cf. p. 47).
- [49] D. PACCARD, C. SCHLENKER, O. MASSENET, R. MONTMORY et A. YELON. “A New Property of Ferromagnetic-Antiferromagnetic Coupling”. *physica status solidi (b)* 16 (1970), p. 301–311. DOI : [10.1002/pssb.19660160131](https://doi.org/10.1002/pssb.19660160131) (cf. p. 48).