

THESE
pour obtenir le titre de
Docteur de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg
Spécialité:
Physique de la Matière Condensée

Ioan – Lucian PREJBEANU

**Configurations de l'aimantation dans des objets magnétiques
à dimensionalité réduite.
Relation entre magnétisme et transport**

Strasbourg, le 12 décembre 2001



Rapporteurs: François GAUTIER
Luc PIRAUX
Jean-Louis PORTESEIL
Examineur: Claude CHAPPERT
Directeur de thèse: Kamel OUNADJELA
Invités: Emil BURZO
Ursula EBELS
Michel VIRET

Plan de l'exposé

1

Résistance de parois de domaines magnétiques

- ▶ Introduction
- ▶ Système modèle
- ▶ Configurations micromagnétiques des nanofils de cobalt
- ▶ Propriétés de magnétotransport

I. DW-MR

2

Magnétisme des réseaux de plots de cobalt

- ▶ Motivation
- ▶ Description du système
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des plots isolés
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des réseaux de plots en interaction

II. Plots

Résistance de parois de domaines magnétiques

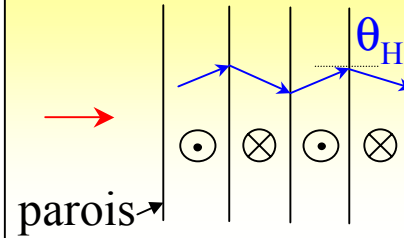
- ▶ Introduction
- ▶ Système modèle
- ▶ Configurations micromagnétiques des nanofils de cobalt
- ▶ Propriétés de magnétotransport

Introduction

① Cabrera et Falicov, PSS B (1974)

Réflexion des électrons sur le potentiel effectif créé par la rotation de l'aimantation à l'intérieur de la paroi

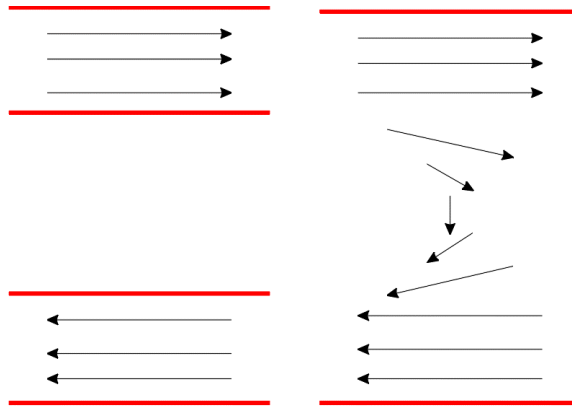
② Berger, JAP 49, 2156 (1978)



Mécanisme basé sur l'effet Hall – angle entre J et E .

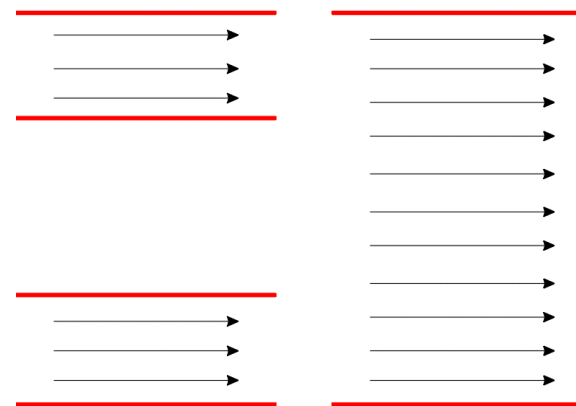
GMR

paroi



GMR

paroi

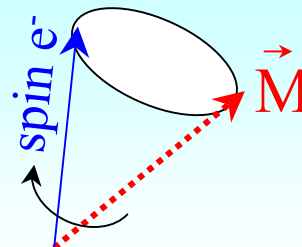


Gregg PRL'96

③ Viret et al, PRB 53, 8464 (1996)

Angle moyen entre $\text{spin } e^-$ et \vec{M} lors de la traversée de la paroi - précession Larmor des électrons de conduction, autour du champ effectif

④ Levy et Zhang, PRL 79, 5110 (1997)



Formalisme quantique - hamiltonien de type GMR

Faible non-adiabaticité du $\text{spin } e^-$ - mélange des états \uparrow et \downarrow - augmentation du signal MR

Effets positifs

$$\Delta R > 0$$

1 Films minces

Gregg, PRL (1996) – **Co** - ne considère pas l'effet AMR des caps de Néel

Viret, PRB (1996) – **Co, Ni** - soustraction de l'AMR des parois

Ravelosona, PRB (1999) – **FePd** – $Q > 1$

Viret, PRL (2000) – **FePd**

2 Nanostructures

Ebels et al, PRL (2000); Wegrowe – effets très importants - nanofils électrodéposés de **Co**

3 Nanocontacts, Nanoconstrictions

Garcia, PRL (1999) – expériences sur des nanocontacts électrodéposés

Bruno, PRL (1999); Tatara, PRL (1999) – parois piégées dans des constrictions à échelle atomique

$$\Delta R < 0$$

Effets négatifs

1 Modèle de la faible localisation:

Tatara et Fukuyama, PRL **78**, 3773 (1997)

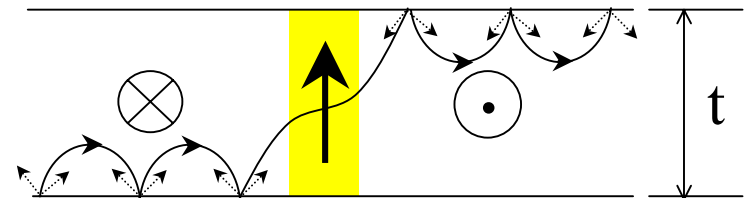
2 Fils microniques et submicroniques

Otani, IEEE (1998) – **Co**

Hong, JMMM (1998) – **Ni**

Kim, JMMM (1998) – **Fe**

Ruediger, PRL (1998) - **Fe**



dans un champ interne alternant au voisinage d'une paroi, les trajectoires des électrons suppriment la diffusion sur la surface

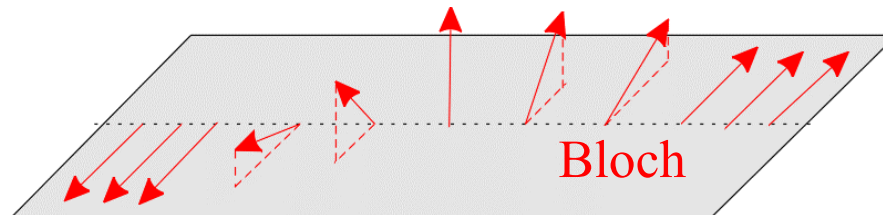
Gorkom et al, PRL **83**, 4401 (1999): modèle semi-classique – signe variable



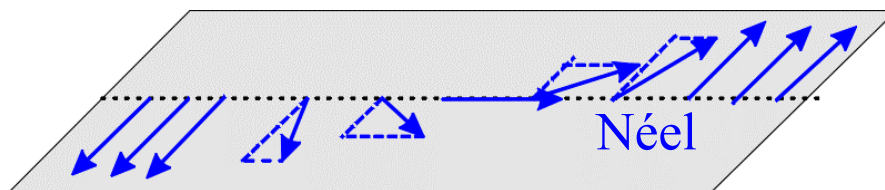
Résistance de parois de domaines magnétiques

- ▶ Introduction
- ▶ Système modèle
- ▶ Configurations micromagnétiques des nanofils de cobalt
- ▶ Propriétés de magnétotransport

Systeme modele

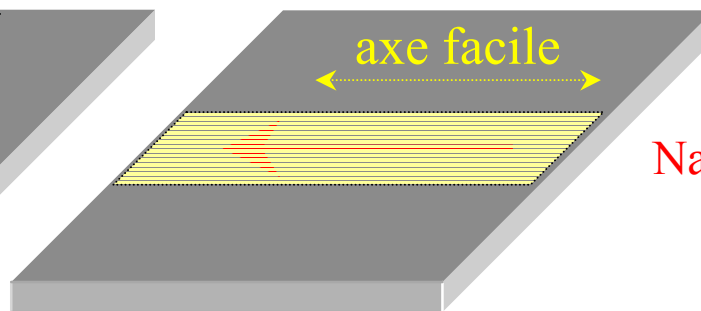
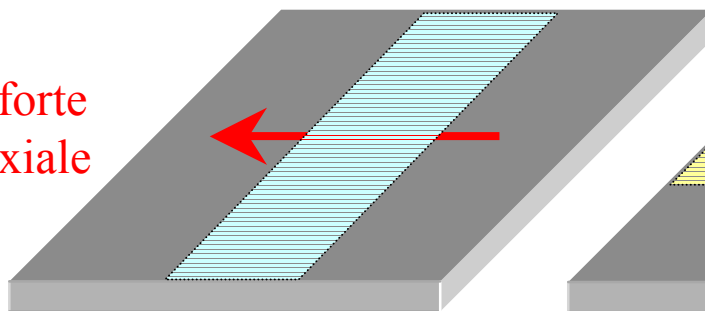


Le type des parois depend du champ demagnetisant, donc de la forme de l'echantillon



$$Q = \frac{K_u}{2\pi M_s^2}$$

Films minces a forte anisotropie uniaxiale

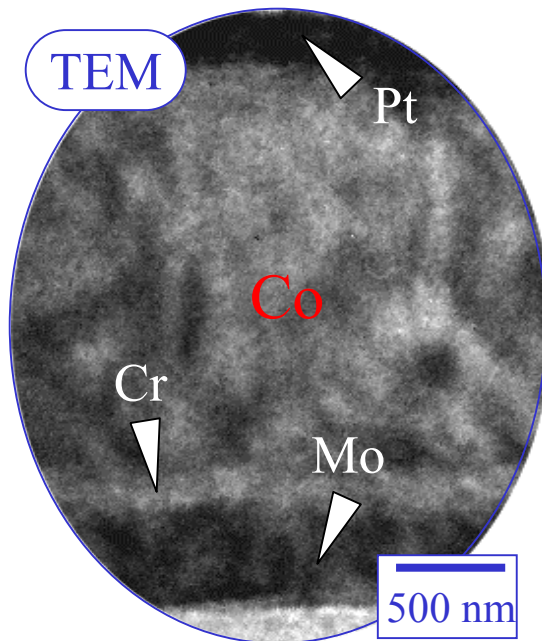
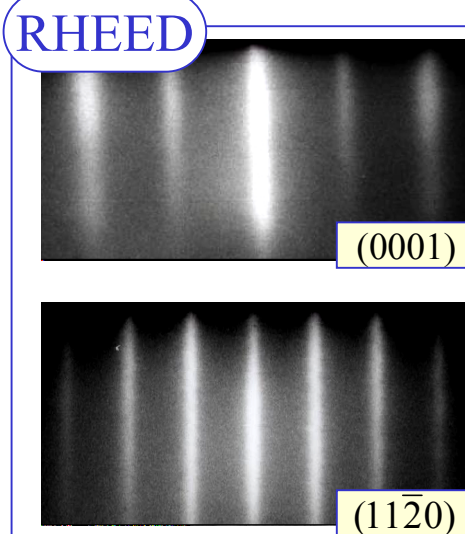


Nanostructuration

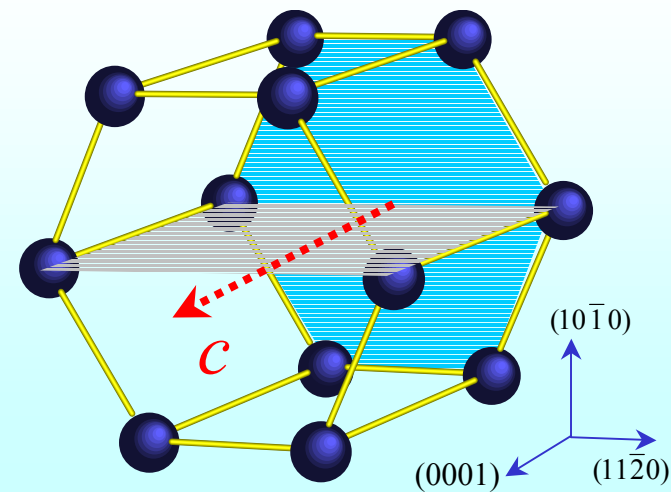
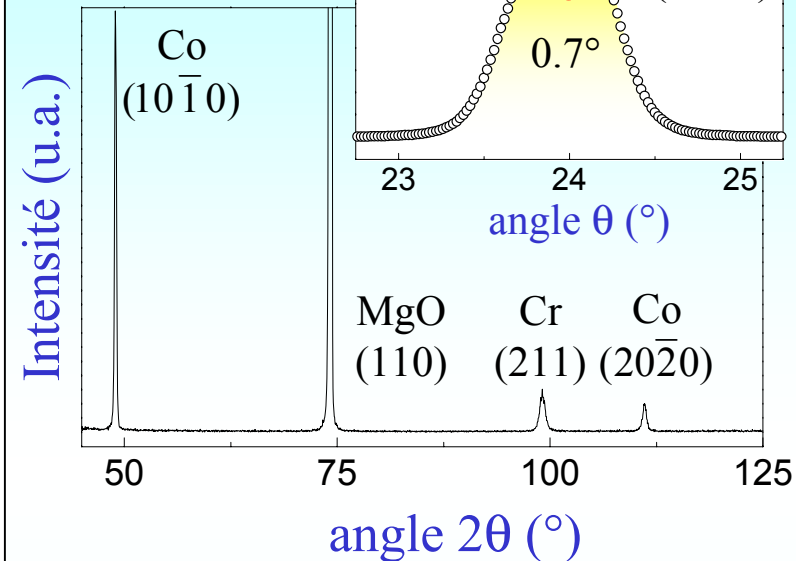
Films minces de cobalt à forte anisotropie uniaxiale planaire

Pt	3 nm
10 – 150 nm	
Co	RMS = 0.7 nm
Cr	5 nm
Mo	5 -10 nm
MgO [110]	

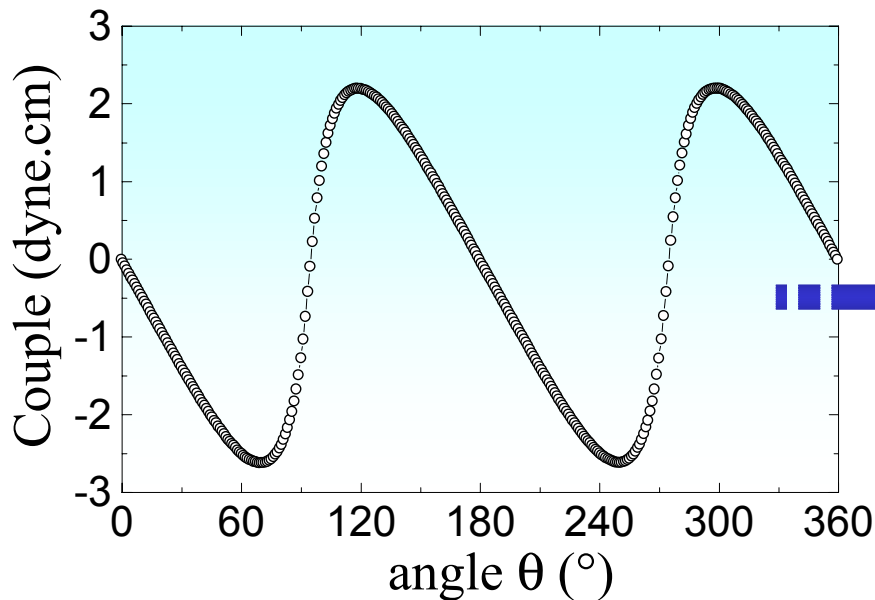
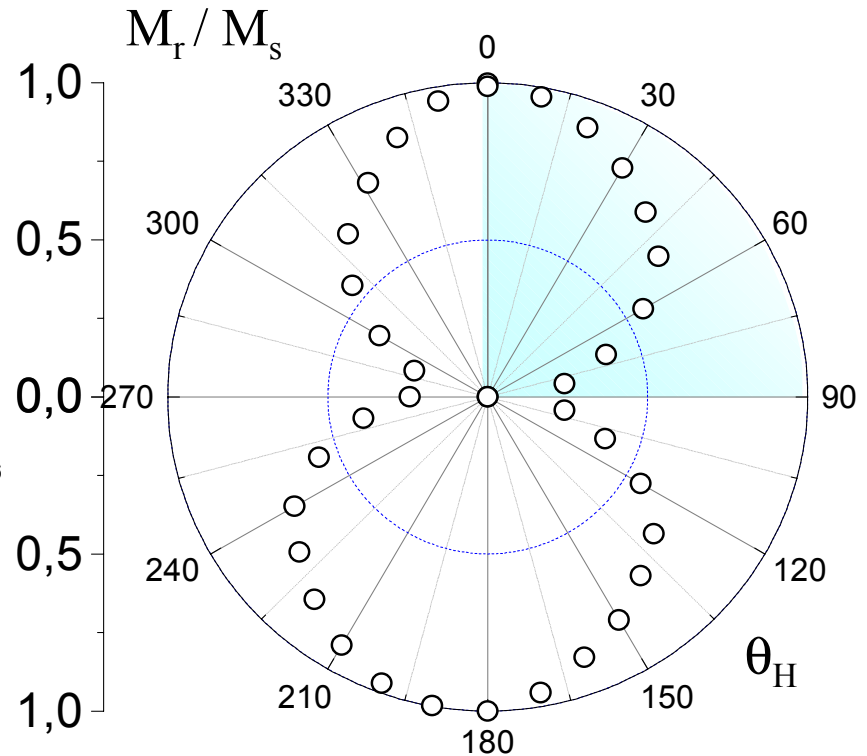
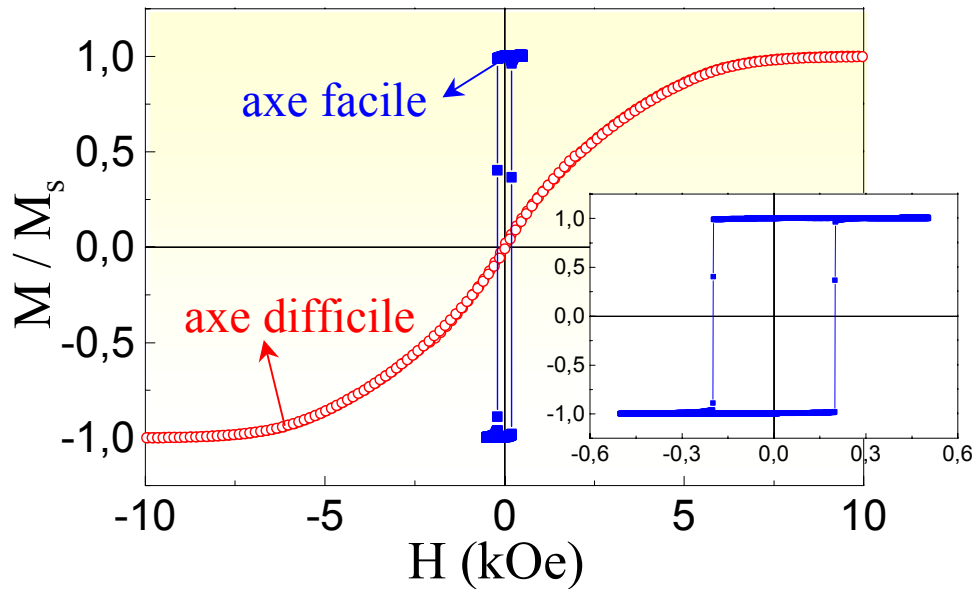
Optimisation des conditions de croissance



Rayons X



Anisotropie magnétocristalline des films minces

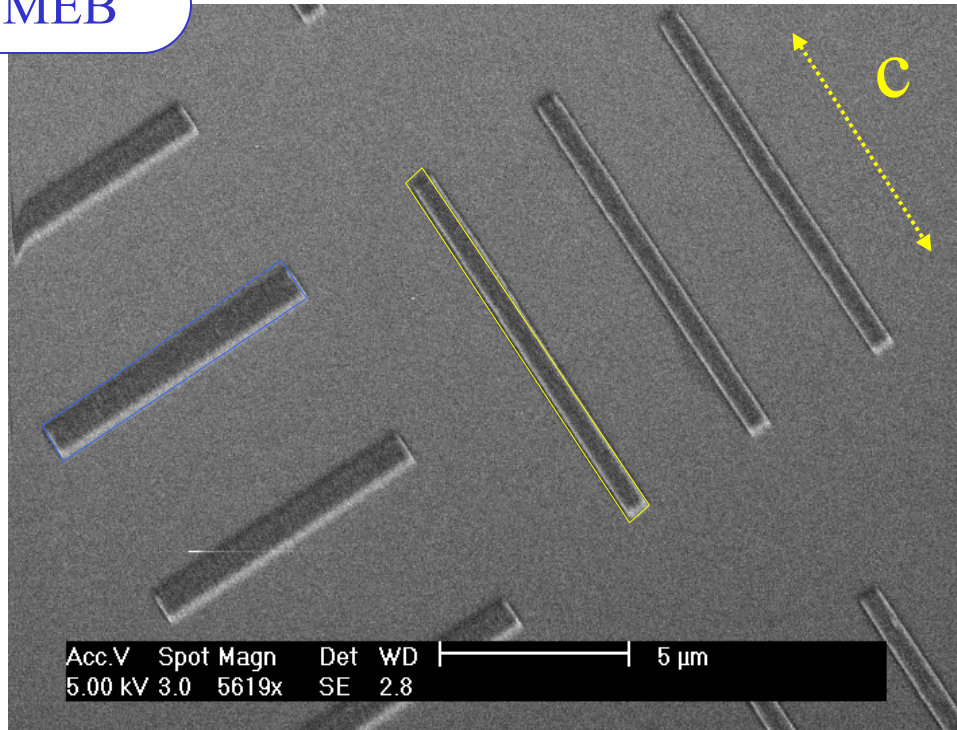


$$K_1 = 3.5 \times 10^6 \text{ erg / cm}^3$$

$$K_2 = 0.8 \times 10^6 \text{ erg / cm}^3$$

$$Q = \frac{K_u}{2\pi M_s^2} = 0.4$$

MEB



dimensions

$t = 10 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$

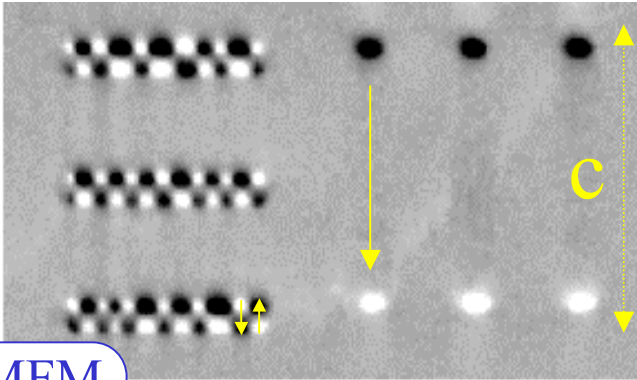
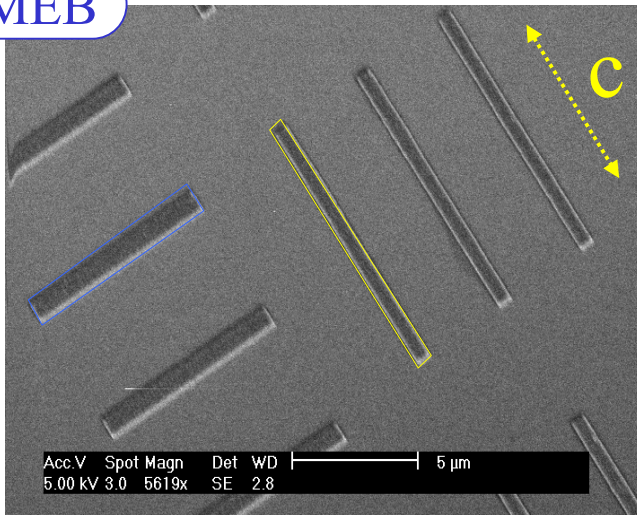
$w = 100 \text{ nm} - 1 \mu\text{m}$

Résistance de parois de domaines magnétiques

- ▶ Introduction
- ▶ Système modèle
- ▶ Configurations micromagnétiques des nanofils de cobalt
- ▶ Propriétés de magnétotransport

Configurations micromagnétiques des nanofils de cobalt

MEB

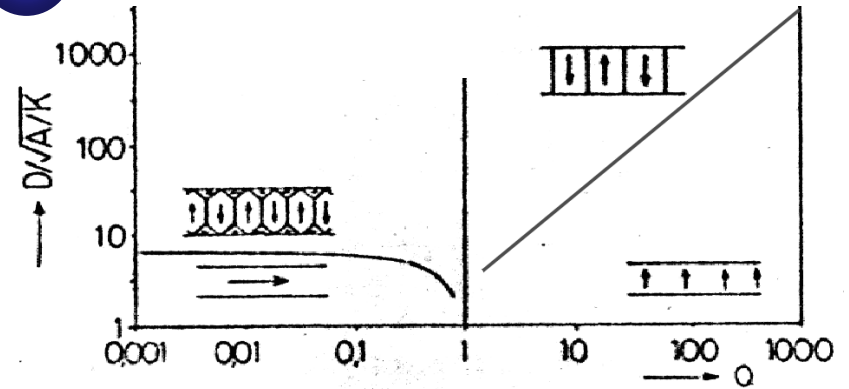
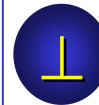


MFM

dimensions

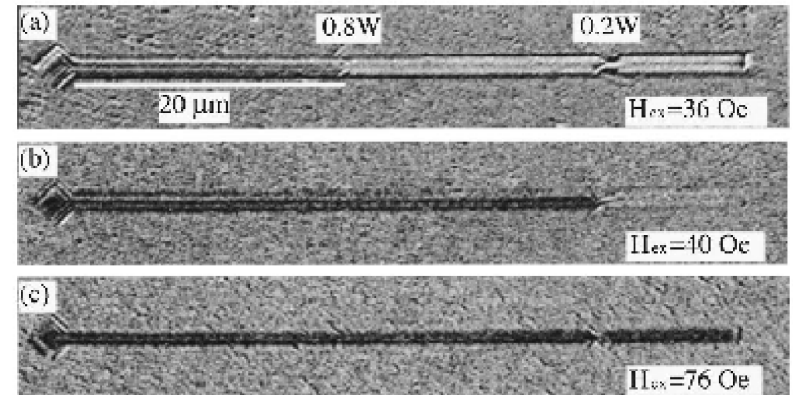
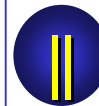
$t = 10 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$

$w = 100 \text{ nm} - 1 \mu\text{m}$



Hubert, IEEE Trans MAG 21, 1604 (1985).

Histoire magnétique + Diagramme de phase



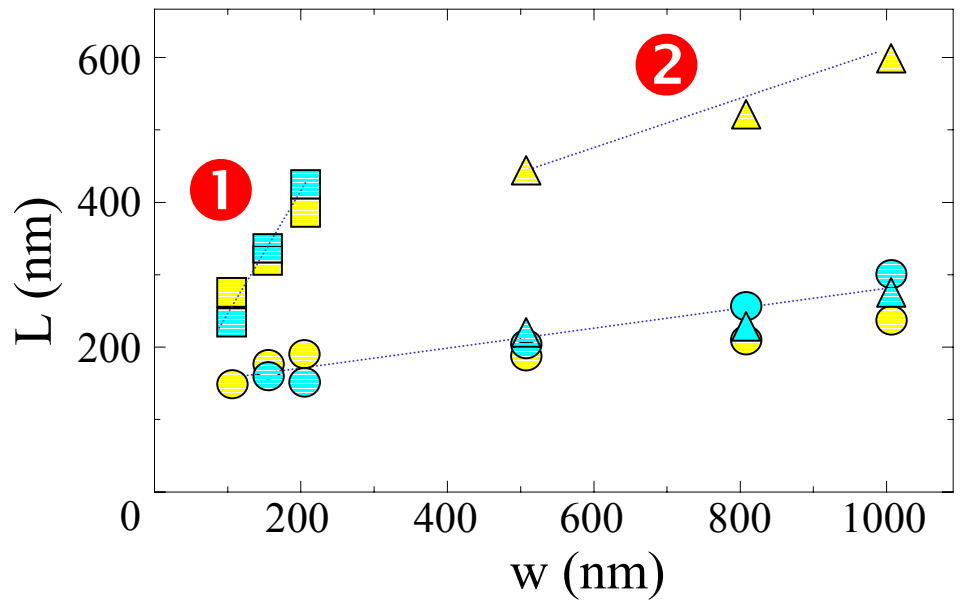
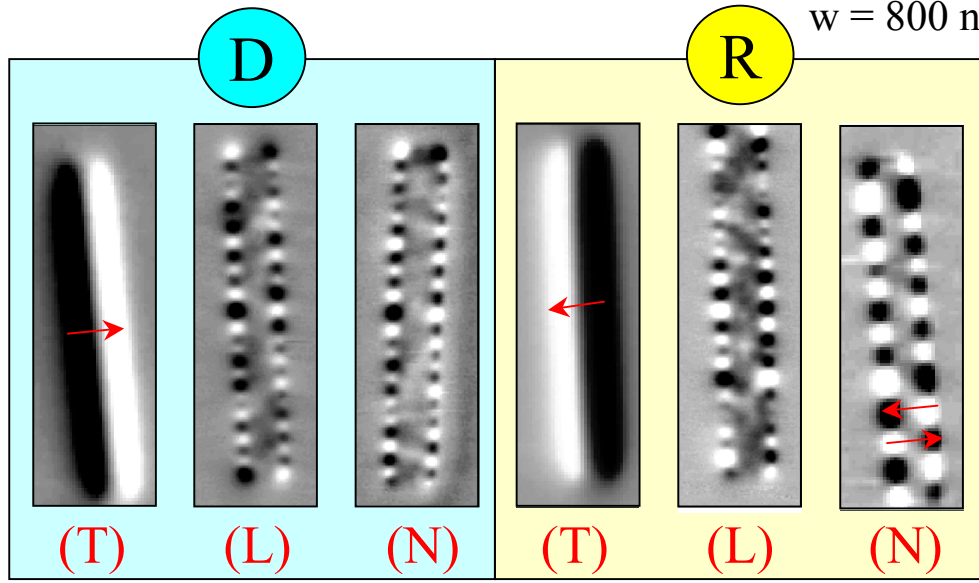
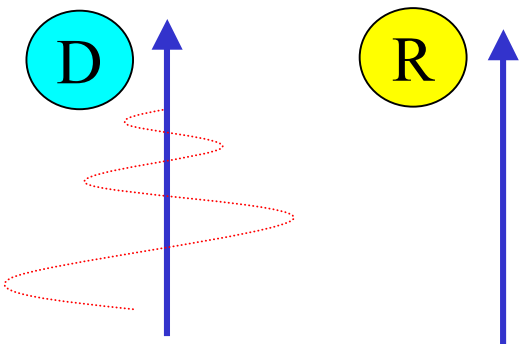
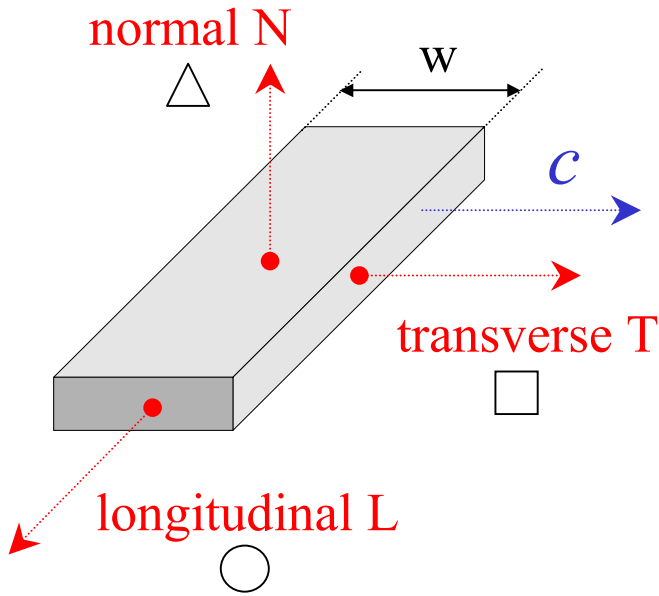
Yokoyama, JAP 87, 5618 (2000).

Retournement + Piégeage de parois



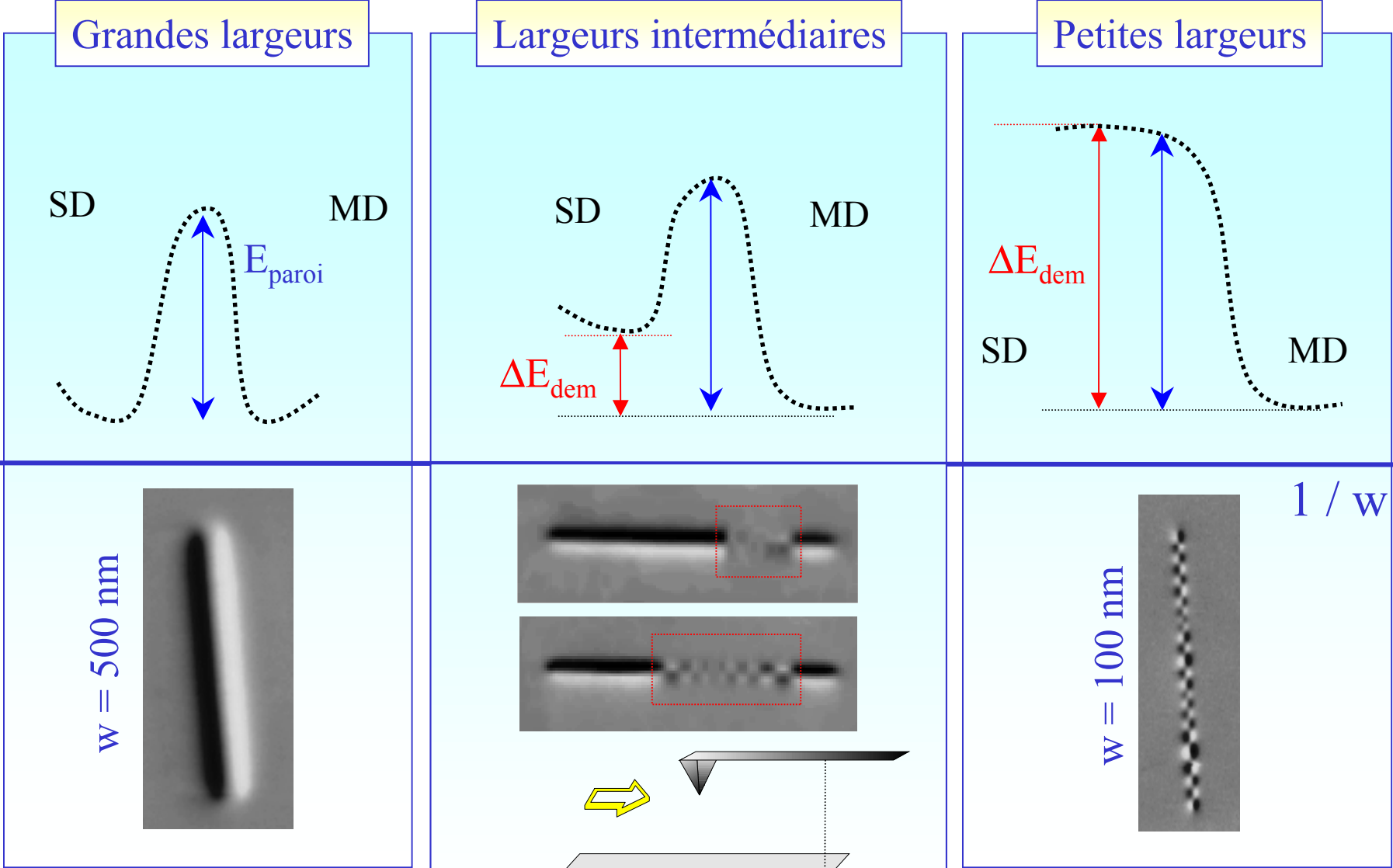
Influence de l'histoire magnétique

$t = 60 \text{ nm}$
 $w = 800 \text{ nm}$



Influence de l'histoire magnétique

1



Influence de l'histoire magnétique

2

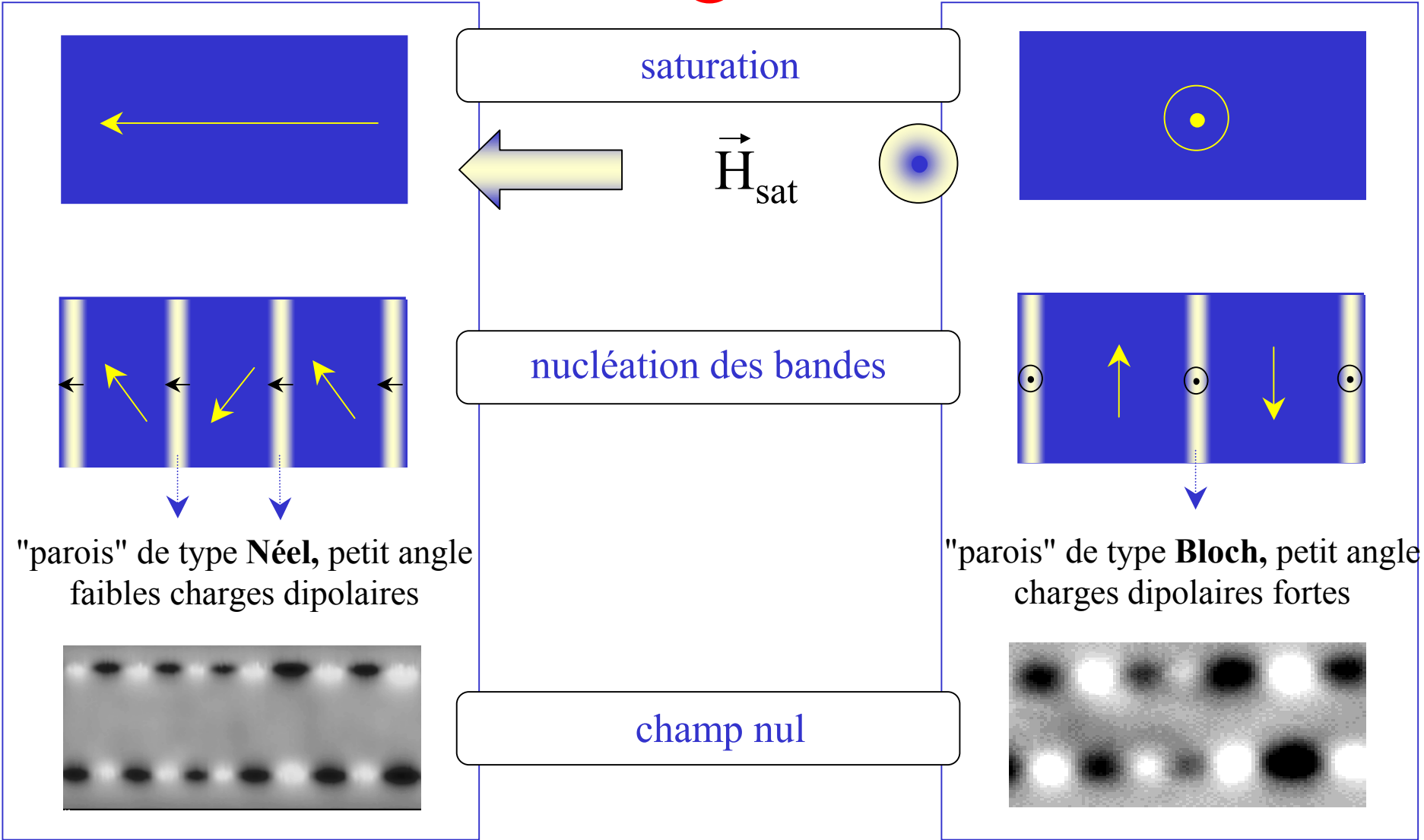
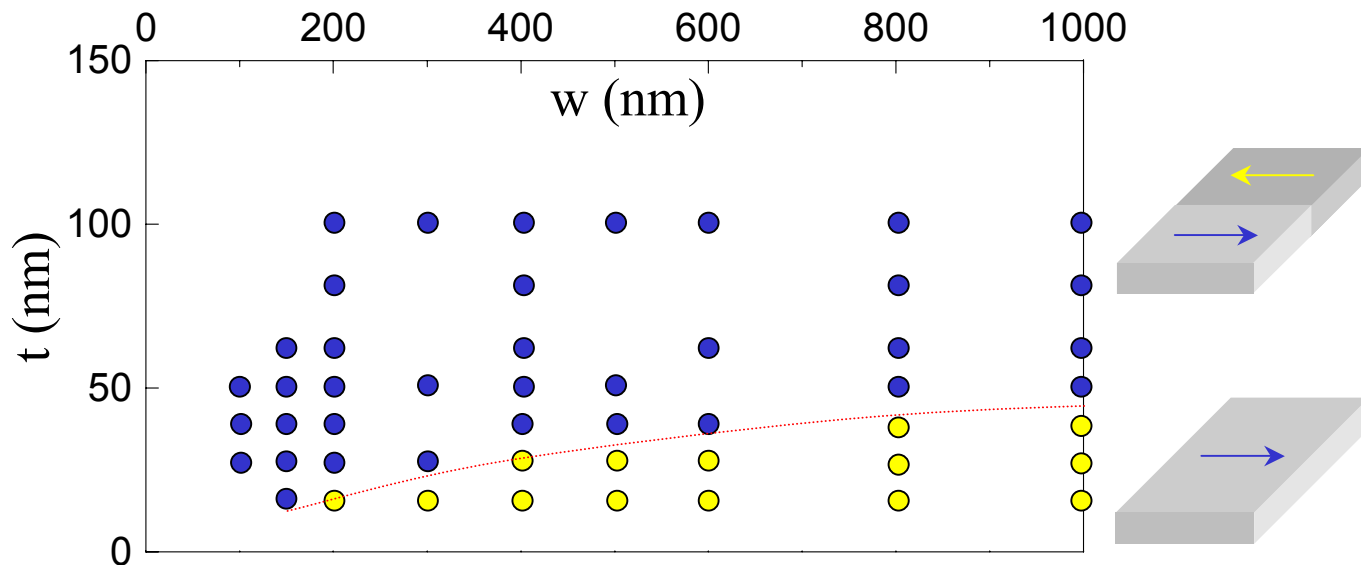
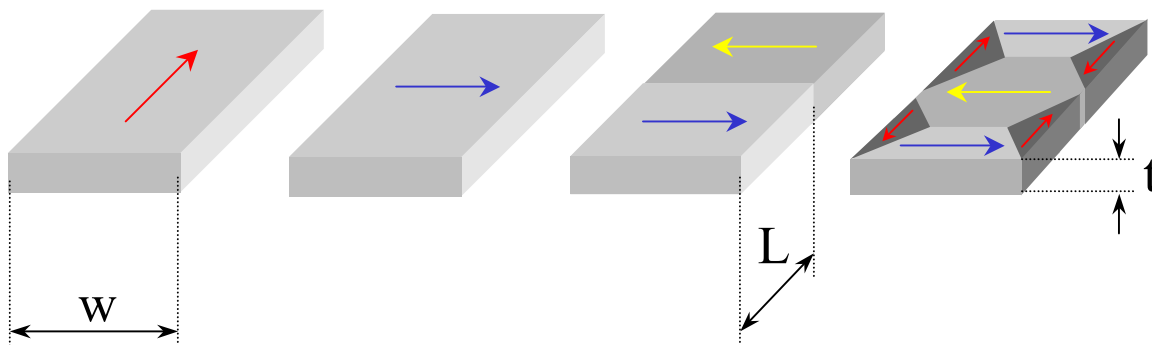


Diagramme de phase



Modèle de Kittel



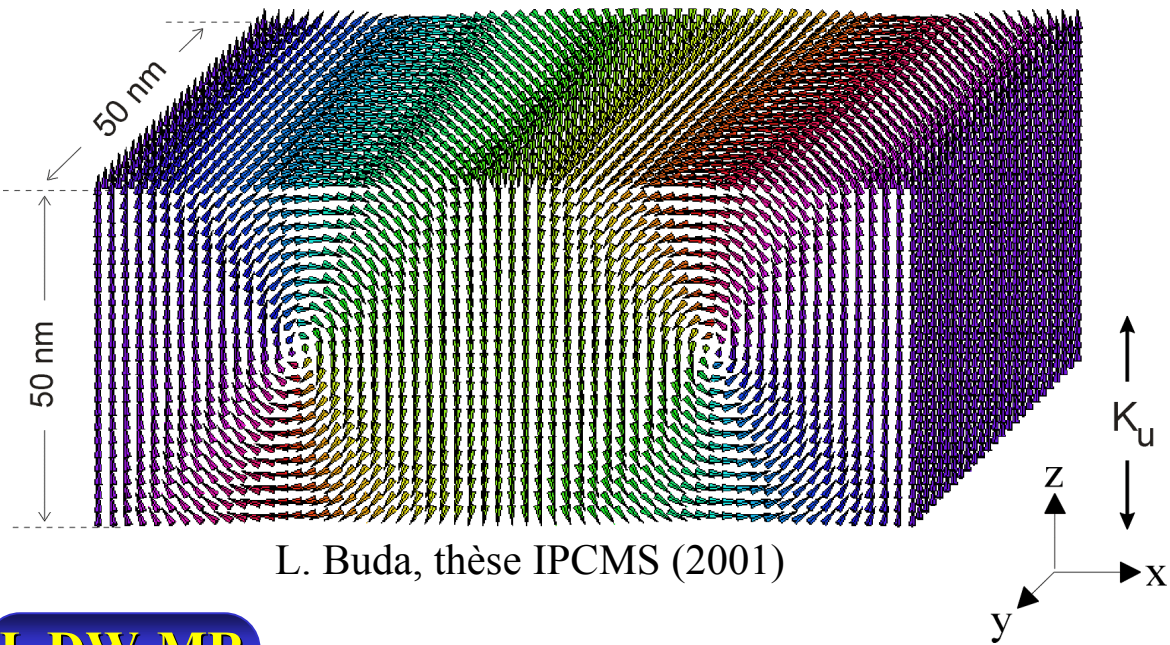
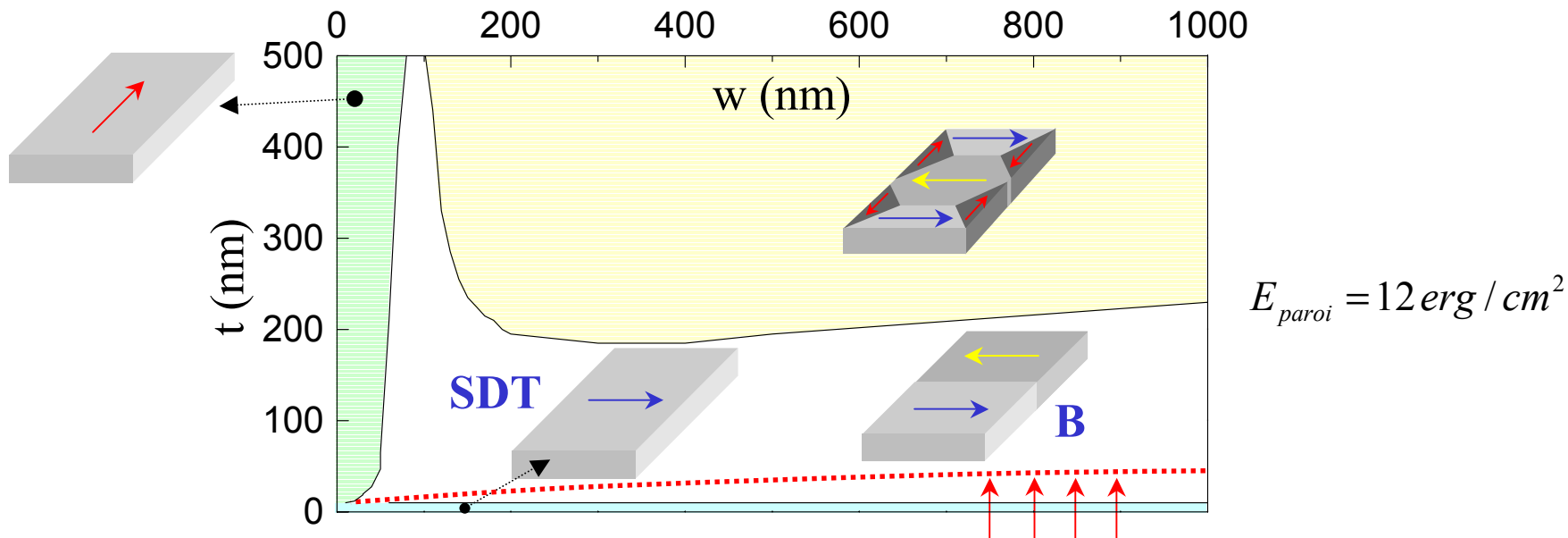
$$E = E_{dem} + E_{paroi} + E_{anis}$$

$$\frac{\partial E}{\partial L} = 0$$

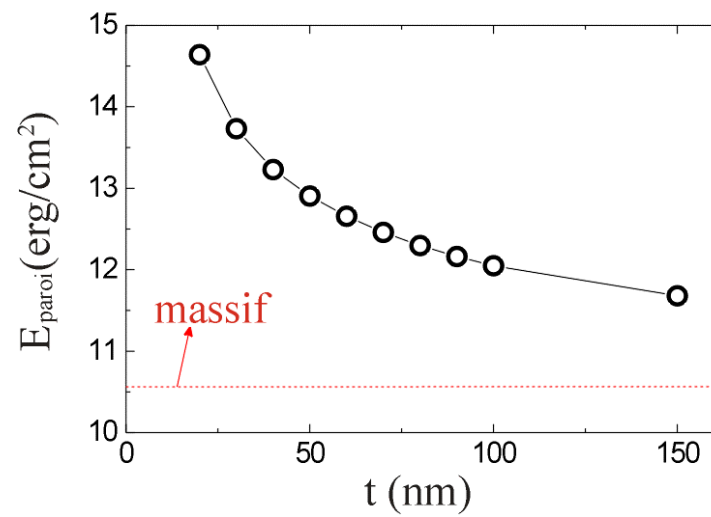
Kittel, Phys. Rev. **70**, 965 (1946)

Prejbeanu et al, IEEE Trans MAG 37, 2108 (2001)

Diagramme de phase

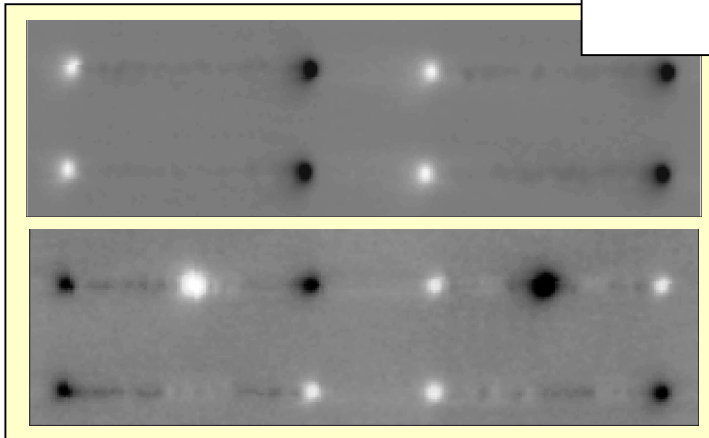


L. Buda, thèse IPCMS (2001)

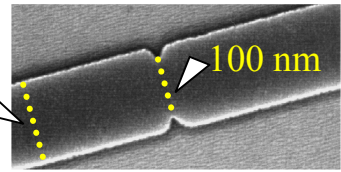


Configurations micromagnétiques des nanofils de cobalt

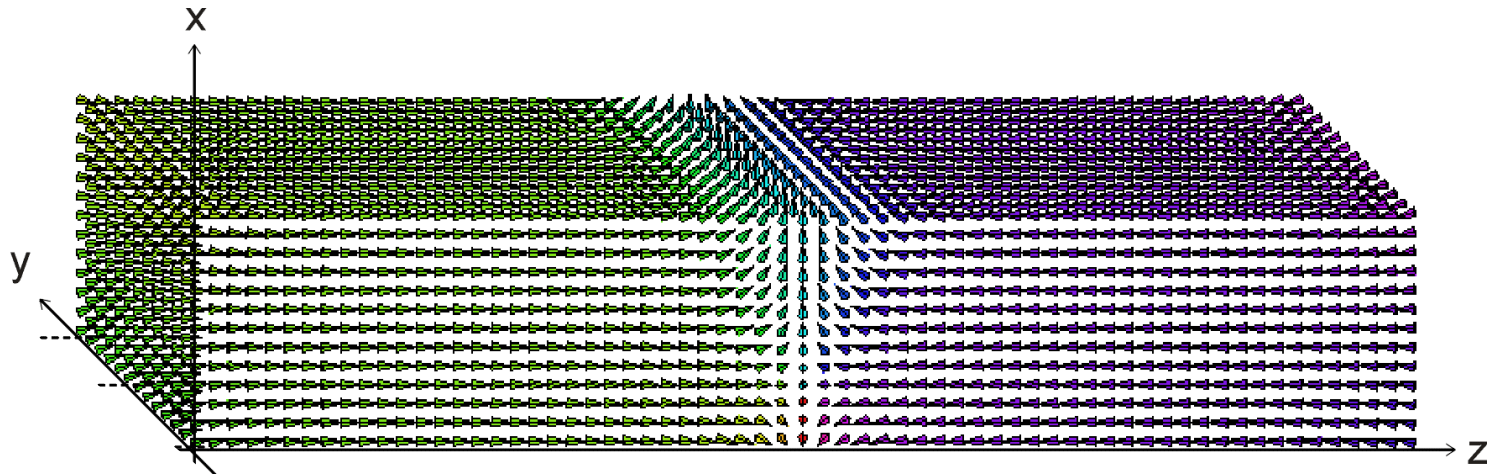
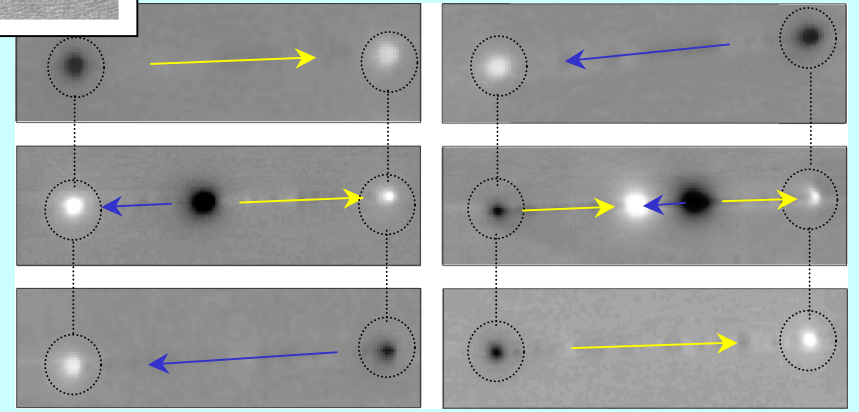
Piégeage



150 nm



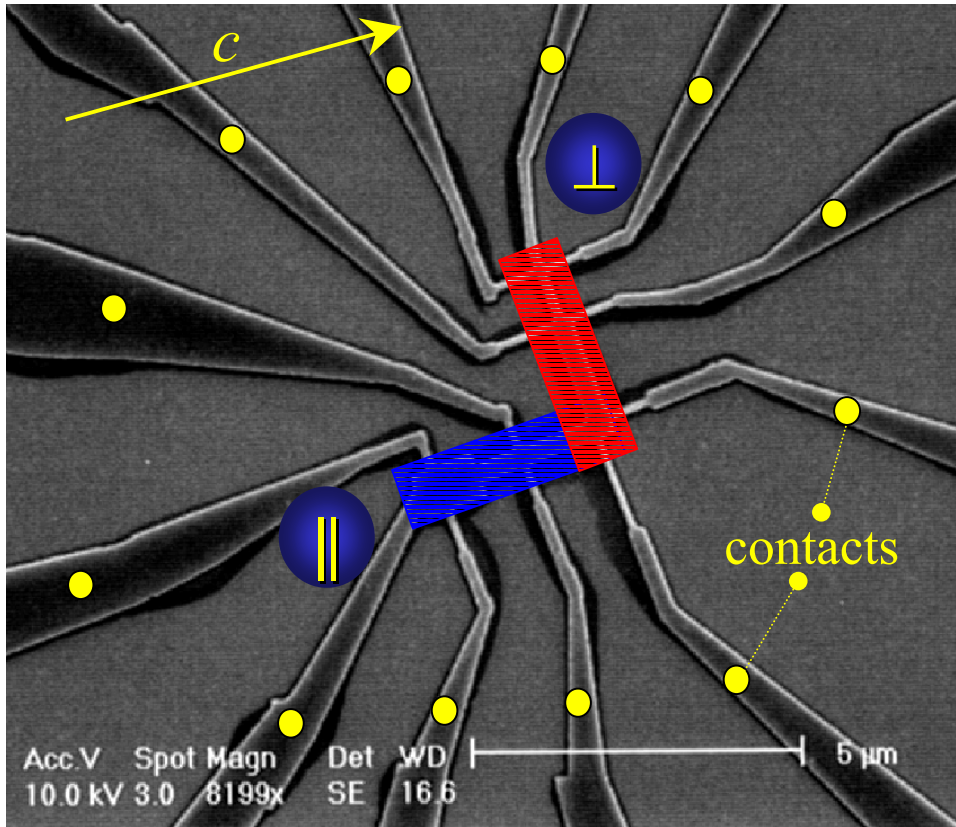
Retournement



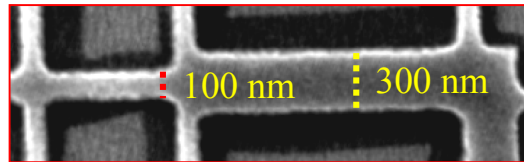
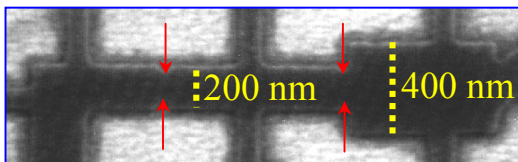
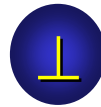
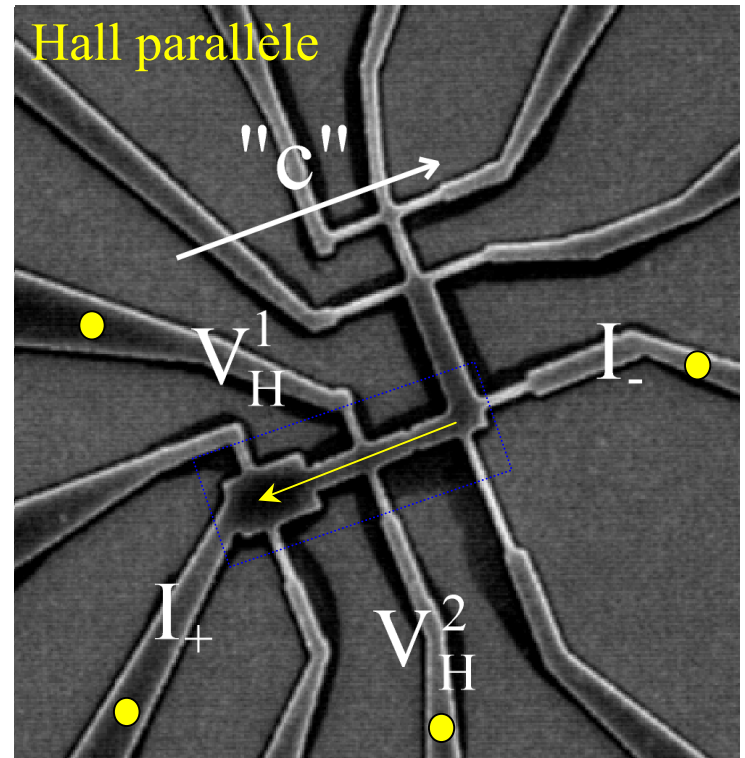
Résistance de parois de domaines magnétiques

- ▶ Introduction
- ▶ Système modèle
- ▶ Configurations micromagnétiques des nanofils de cobalt
- ▶ Propriétés de magnétotransport

Magnétotransport des nanofils de cobalt



Configuration de mesure



Effets galvanomagnétiques

Lorentz

AMR+Hall planaire

effet Hall

DW-MR

$$\vec{E} = \rho_{perp}(B) \vec{j} + [\rho_{para}(B) - \rho_{perp}(B)] (\vec{\alpha} \cdot \vec{j}) \vec{\alpha} + \rho_H(B) \vec{\alpha} \times \vec{j} + \rho_{paroi}(B) \vec{j}$$

Dépend de la fréquence cyclotronique et du libre parcours moyen

MR $\propto B^2$ (basse T)
MR $\propto -B$ (haute T)

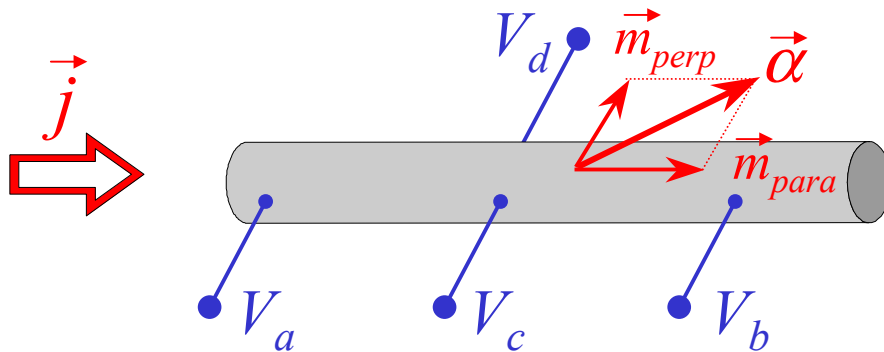
Dépend de l'orientation relative entre l'aimantation et le courant dû au couplage spin orbite

Perpendiculaire au courant et à l'aimantation dû à la force de Lorentz

Effet isotrope ($\parallel \vec{j}$)
Origine de type GMR

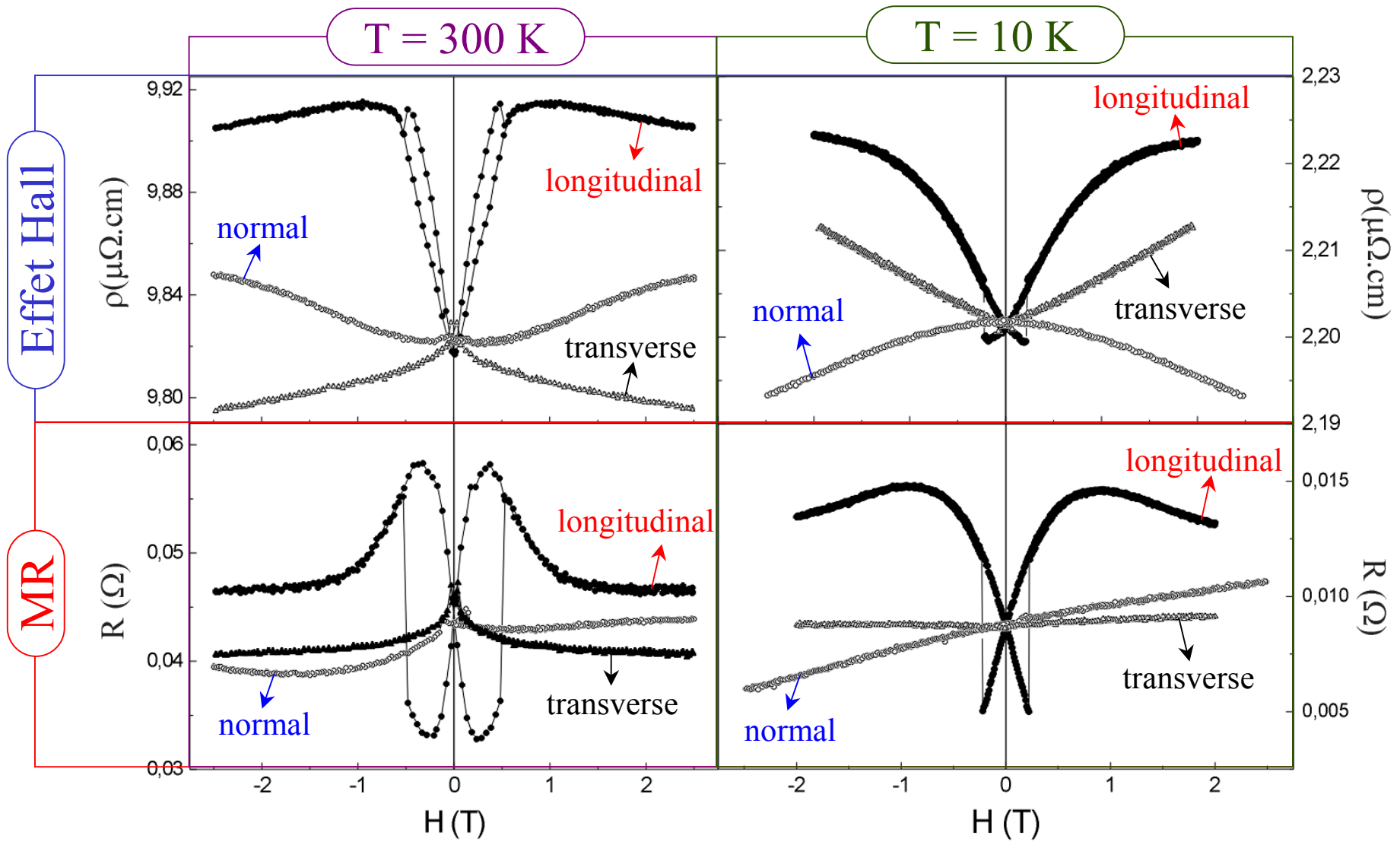
$$\rho_H = \rho_0 B + \rho_{EHE} M$$

ordinaire extraordinaire

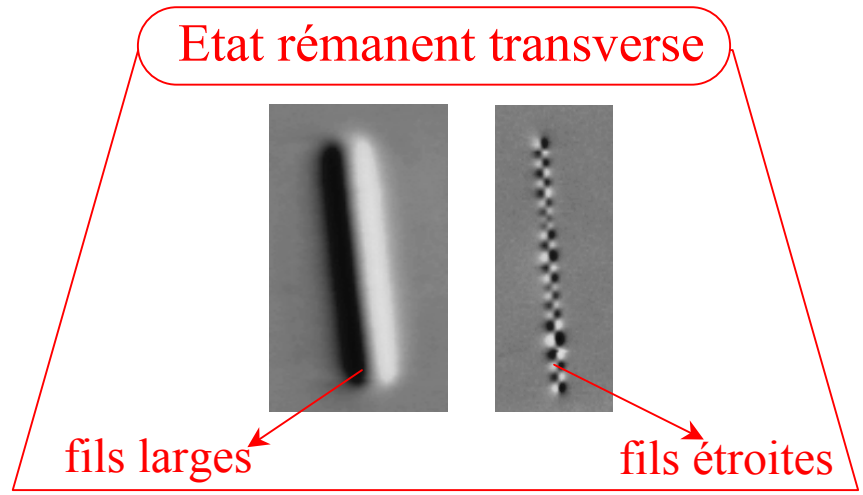
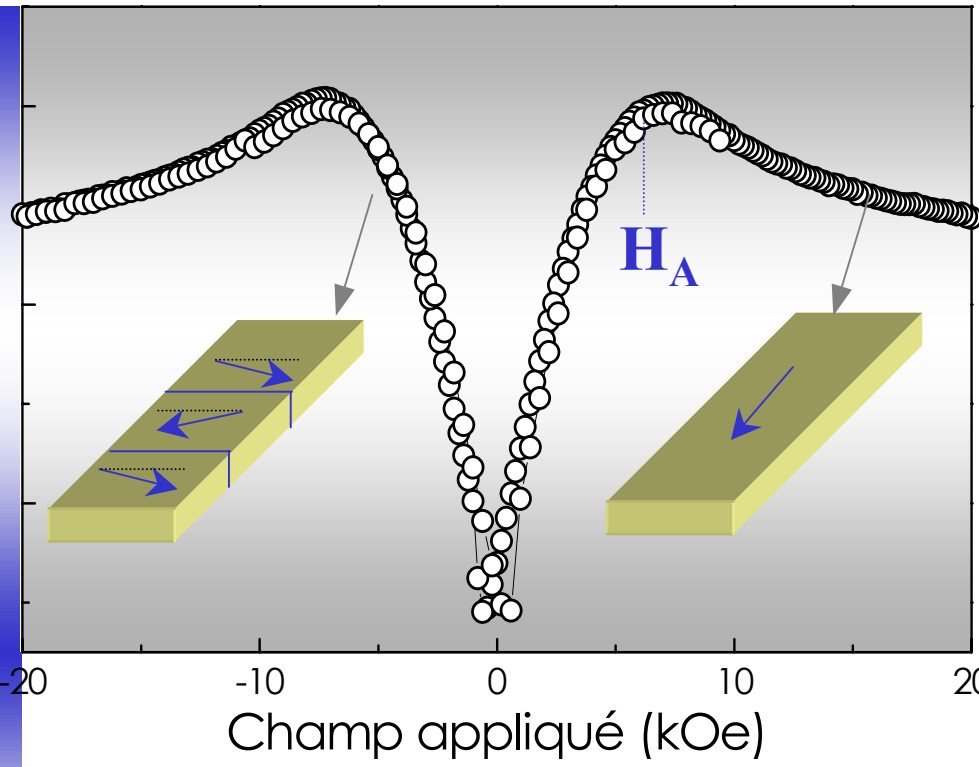
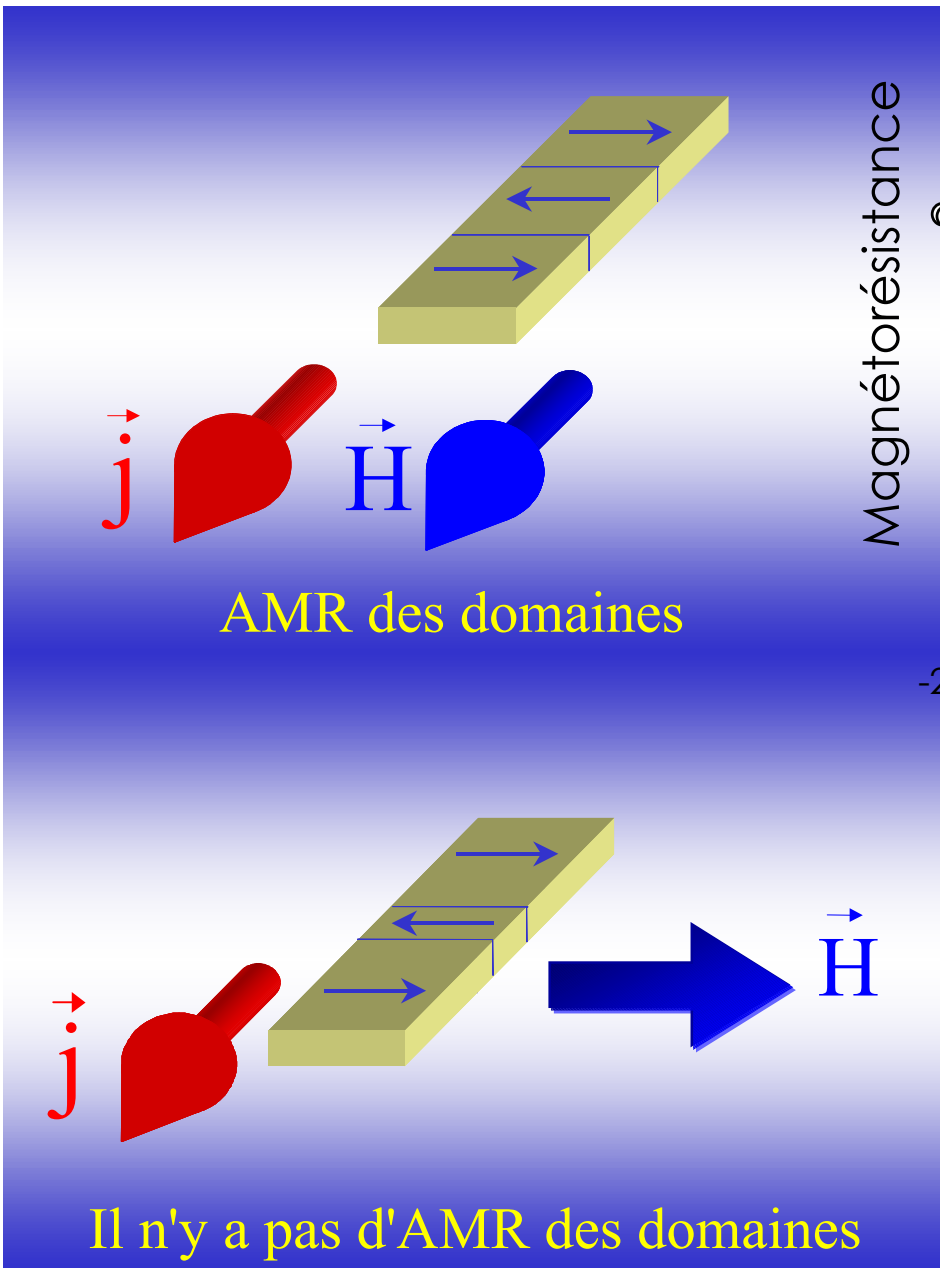


\vec{j} - vecteur densité de courant
 \vec{B} - vecteur induction magnétique
 $\vec{\alpha}$ - vecteur unitaire de l'aimantation

Sommaire des effets galvanomagnétiques

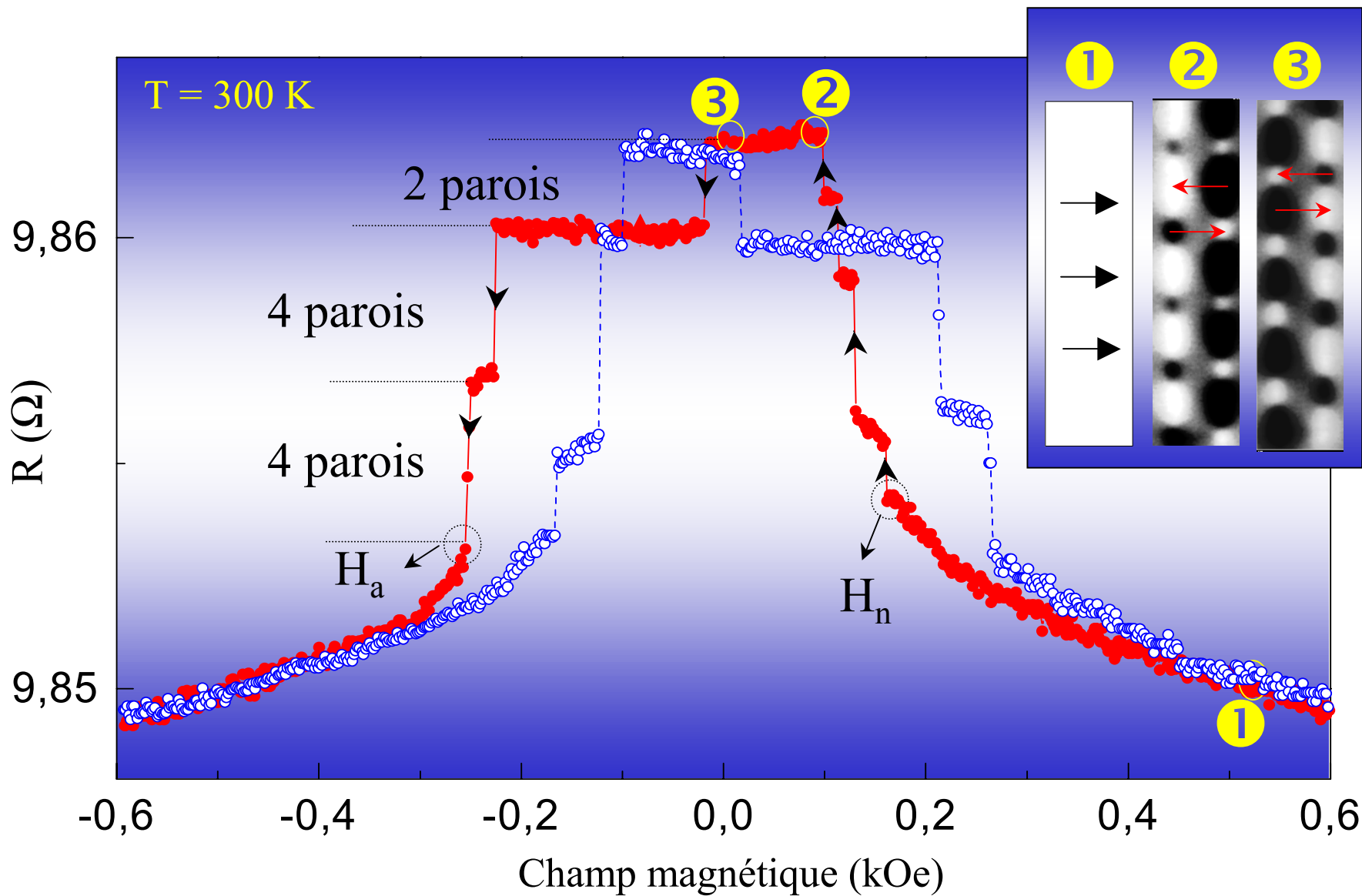


Mesure de la contribution des parois



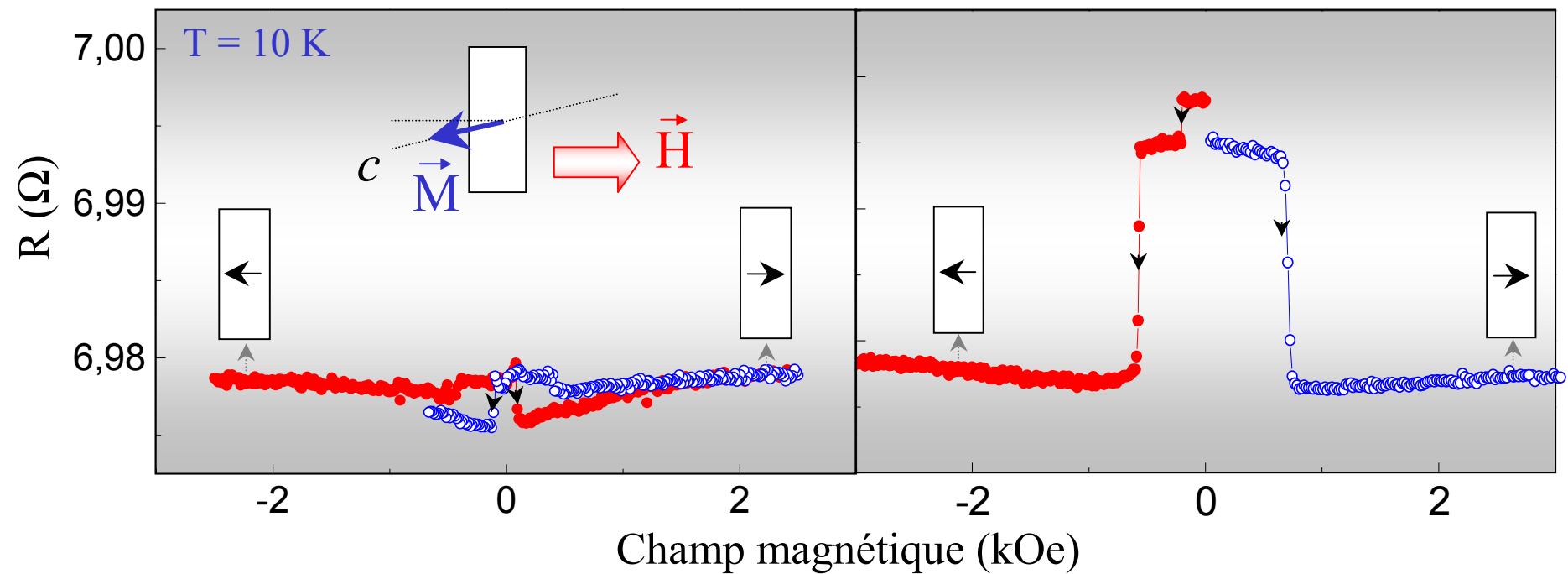
Fils "étroits" et "épais"

$w = 100 \text{ nm}$, $t = 90 \text{ nm}$

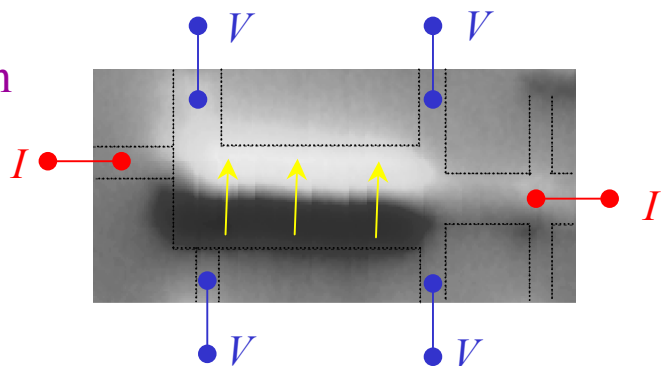


Fils "larges" et "minces"

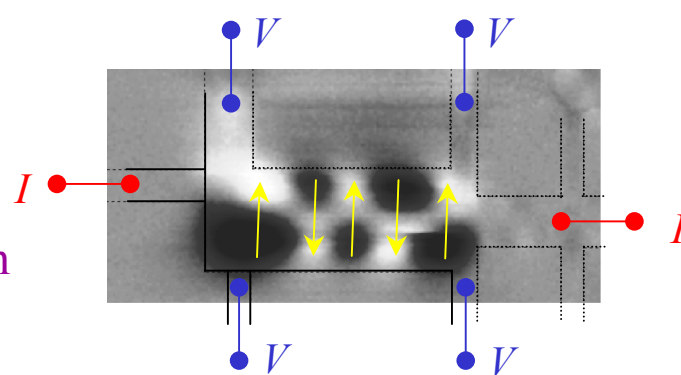
$w = 300 \text{ nm}$, $t = 30 \text{ nm}$



saturation

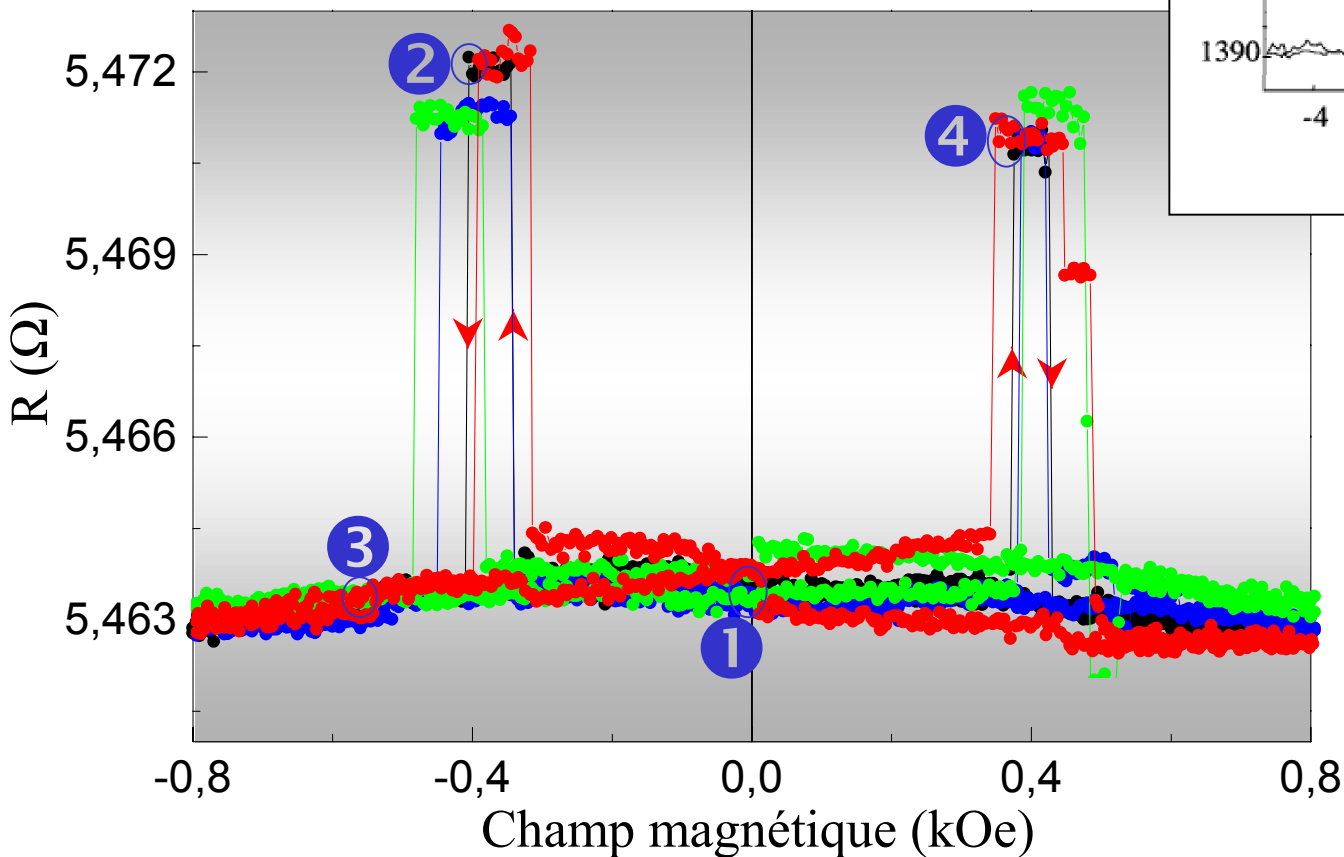
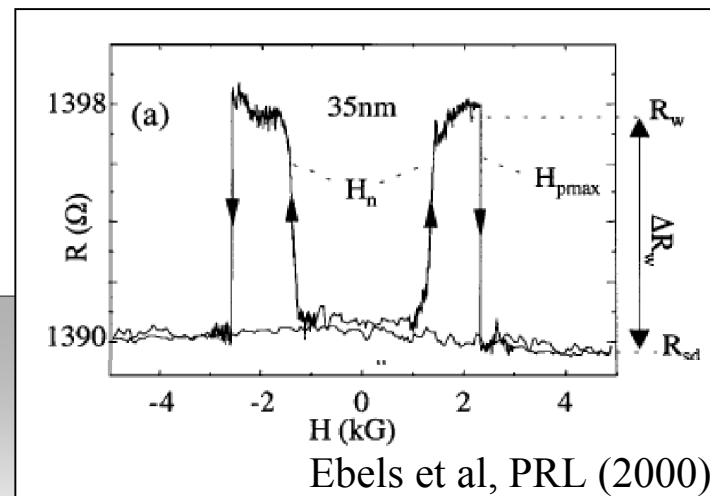
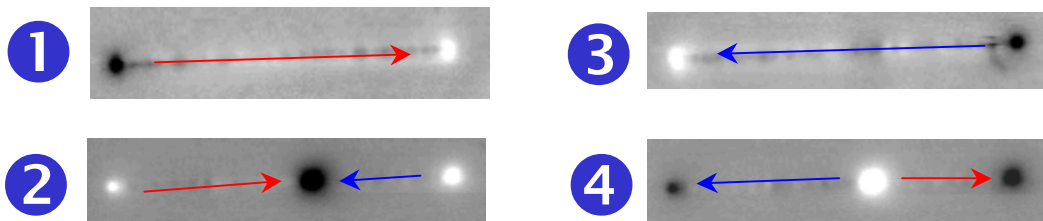


saturation



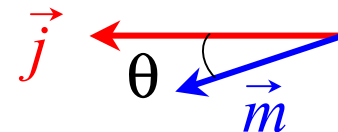
Prejbeanu et al, a paraître JMMM (2002)

Magnétorésistance des parois tête-bêche



Quantification du signal MR des parois

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{paroi} = \frac{\Delta R \cdot t \cdot w}{\rho \delta_{paroi}} = \text{GMR}_{paroi} + \text{AMR}_{paroi}$$



$$\text{AMR}(\%) \times \langle \cos^2 \theta \rangle$$



T (K)	L (μm)	N	ΔR (Ω)	t (nm)	w (nm)	ρ (μΩcm)	δ _p (nm)	ΔR _p (%)	⟨cos ² θ⟩	AMR (%)	ΔAMR _p (%)	ΔGMR _p (%)
300	1.5	10	0.01	90	100	10	30	0.3	0.24	1	0.24	0.1
	15	100	0.15	80	150	10	30	0.5	0.24	1	0.24	0.25
10	1.5	4	0.016	30	300	2	20	6	0.24	0.5	0.12	5.9
	15	50	0.1	80	150	2	20	6	0.24	0.5	0.12	5.9



T (K)	L (μm)	ΔR (Ω)	t (nm)	w (nm)	ρ (μΩcm)	δ _p (nm)	ΔR _p (%)	⟨cos ² θ⟩	AMR (%)	ΔAMR _p (%)	ΔGMR _p (%)
300	1.5	0.01	30	200	10.5	20	4	0.37	-0.5	0.2	3.8
10	1.5	0.001	30	200	2.5	15	1.5	0.37	10	-3.5	5

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_{paroi} = \frac{\xi^2 (\rho_0^\uparrow - \rho_0^\downarrow)^2}{5 \rho_0^\uparrow \rho_0^\downarrow} \left(3 + \frac{10 \sqrt{\rho_0^\uparrow \rho_0^\downarrow}}{\rho_0^\uparrow + \rho_0^\downarrow} \right) \rightarrow 2-11\%$$

Accord avec les modèles de Viret et Levy-Zhang

Conclusions et perspectives

Configurations micromagnétiques



Structure mono- ou multi-domaines, fortement dépendantes de l'histoire magnétique suivie et des dimensions du fil – diagramme de phase des états fondamentaux



Retournement de l'aimantation par nucléation et propagation de parois

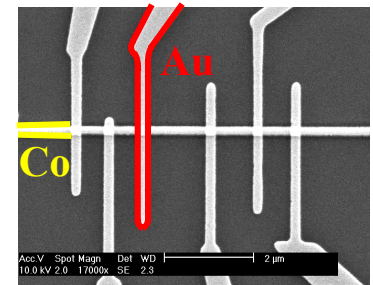
Magnétotransport



Mesures MR - permet de suivre précisément le renversement de l'aimantation des nanostructures: $R \propto 1/d$ (le signal mesuré par les techniques habituelles -SQUID, AGFM- est $\propto d^3$)

Magnétorésistance de parois - positive et augmente à basse température

La chiralité des parois en utilisant l'effet Hall extraordinaire, contacts non-magnétiques, nanoconstrictions (FIB), piégeage et vitesse de propagation des parois, injection de spin ...



Magnétisme des réseaux de plots de cobalt

- ▶ Motivation
- ▶ Description du système
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des plots isolés
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des réseaux de plots en interaction

Interactions magnétostatiques

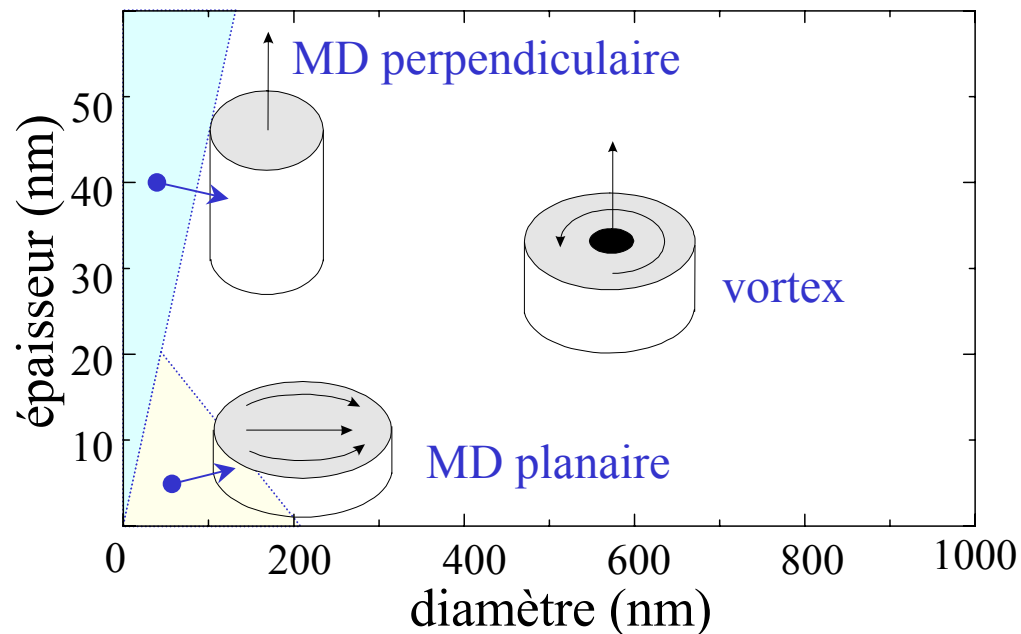
réseaux de plots à aimantation perpendiculaire

T. Aign et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 5656, (1998)

réseaux de plots à aimantation parallèle

C.Mathieu et al., Appl. Phys. Lett. **70**, 2912, (1997)

Plots isolés



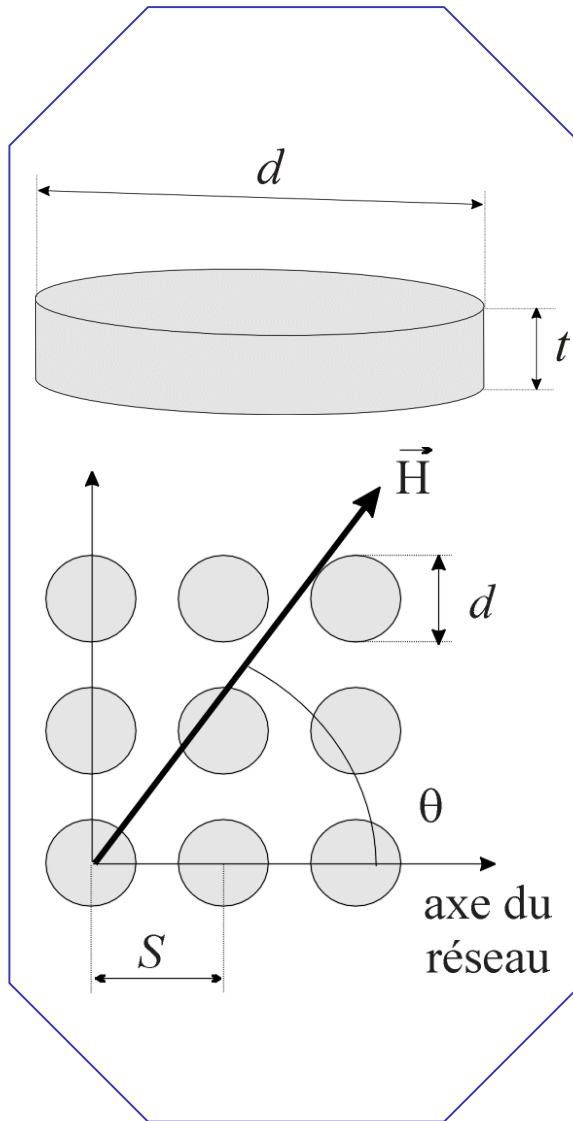
L. D. Buda et al, à paraître, Comp. Mat. Sci. (2002).



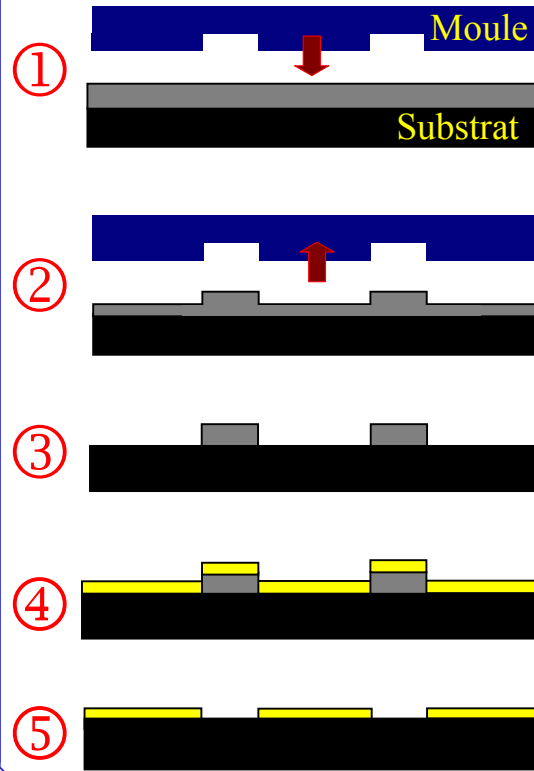
Magnétisme des réseaux de plots de cobalt

- ▶ Motivation
- ▶ Description du système
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des plots isolés
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des réseaux de plots en interaction

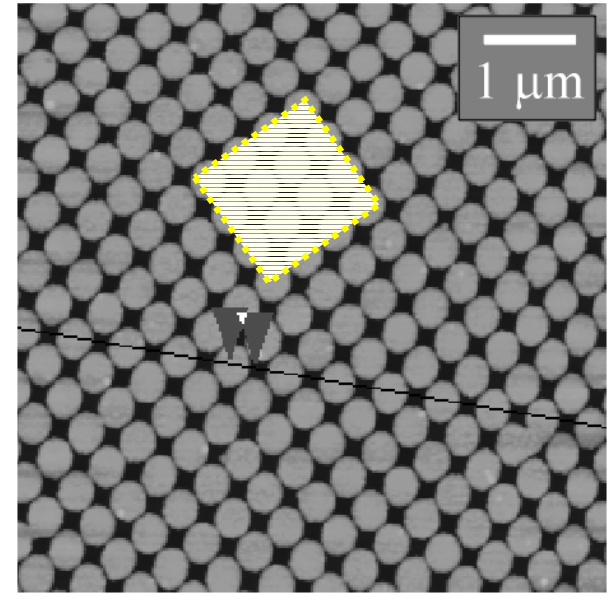
Description du système étudié



« nanoimprint »⁽¹⁾



LPN Bagueux



dimensions

$d = 150 \text{ nm}, 250 \text{ nm}, 550 \text{ nm}, 1000 \text{ nm}$

$d/S = 1:1.1 - 1:1.5 - 1:2 - 1:3$

$t = 10 \text{ nm}, 30 \text{ nm}, 50 \text{ nm}$

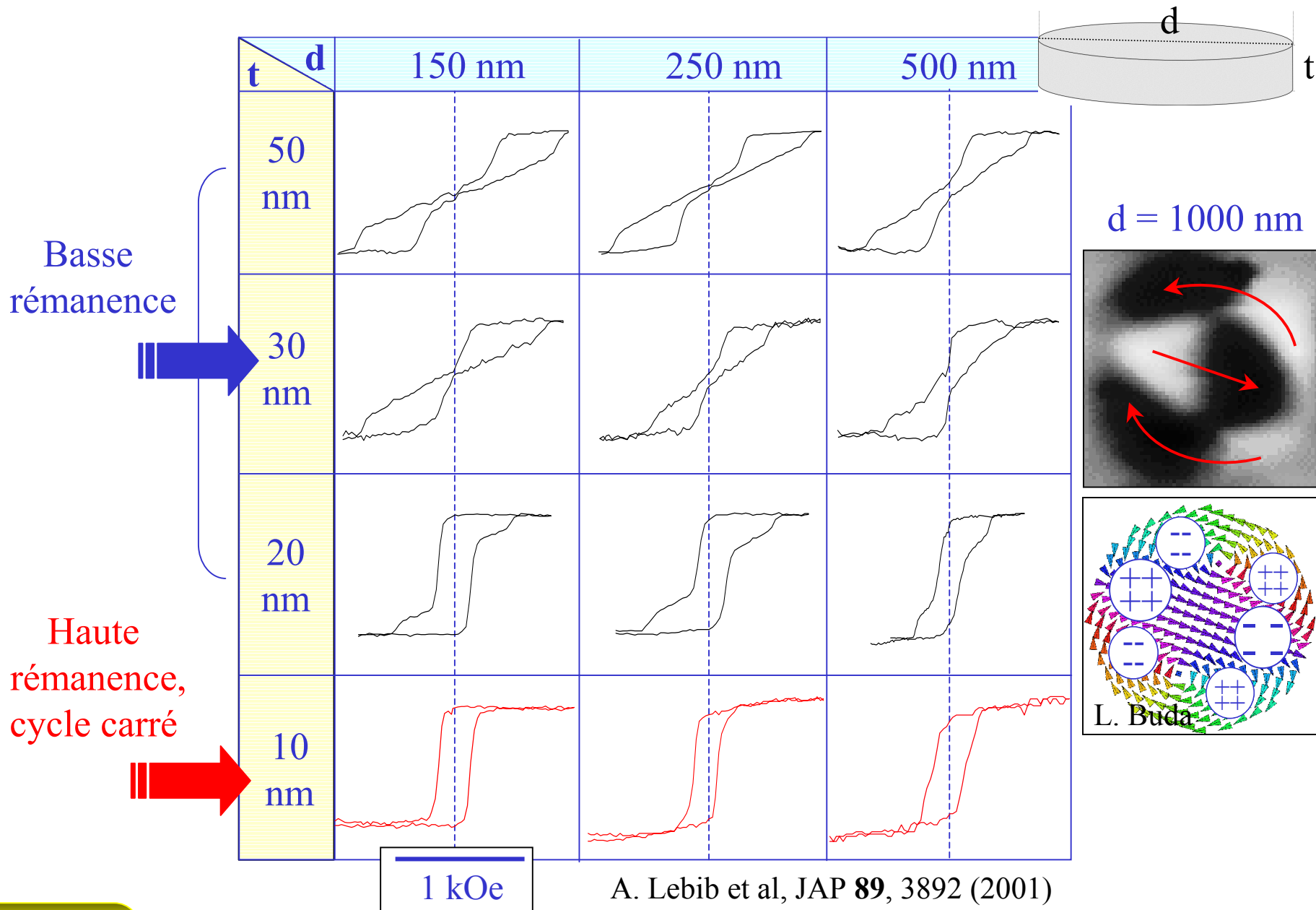
⁽¹⁾ A. Lebib et al, JAP **89**, 3892 (2001)



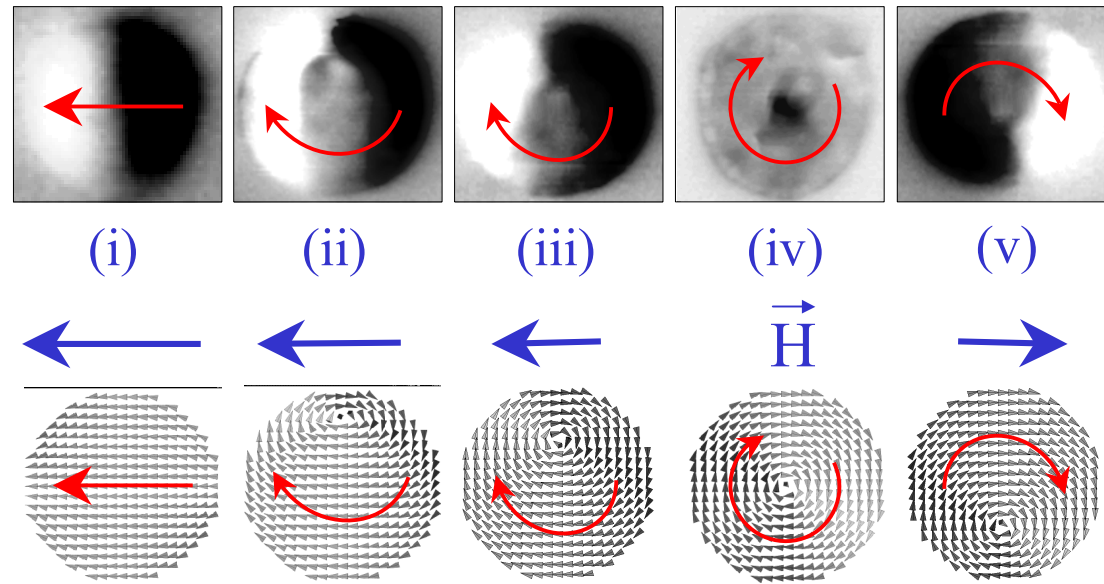
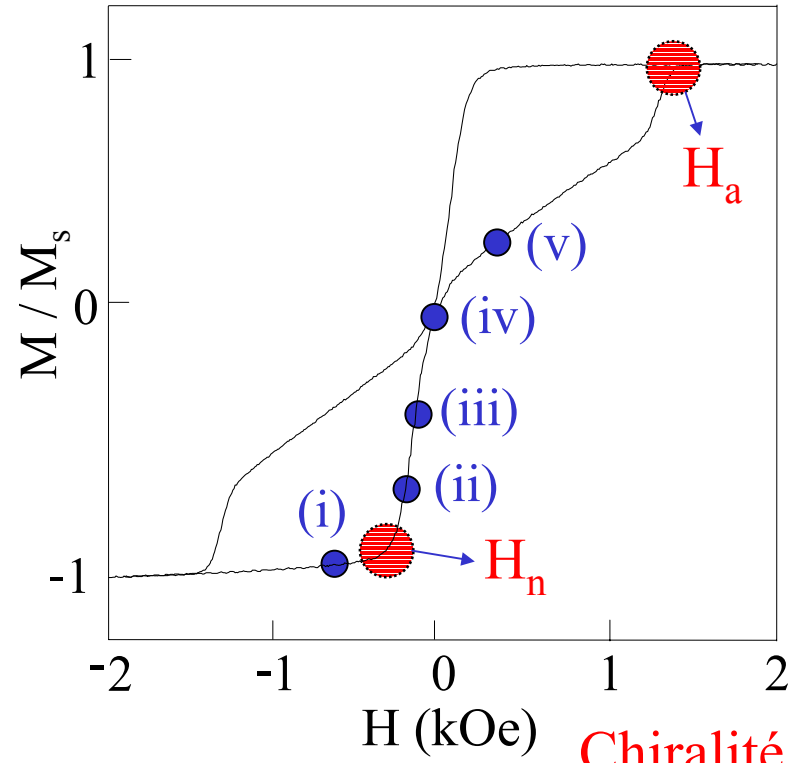
Magnétisme des réseaux de plots de cobalt

- ▶ Motivation
- ▶ Description du système
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des plots isolés
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des réseaux de plots en interaction

Cycles d'aimantation – influence des dimensions



Retournement par un état vortex



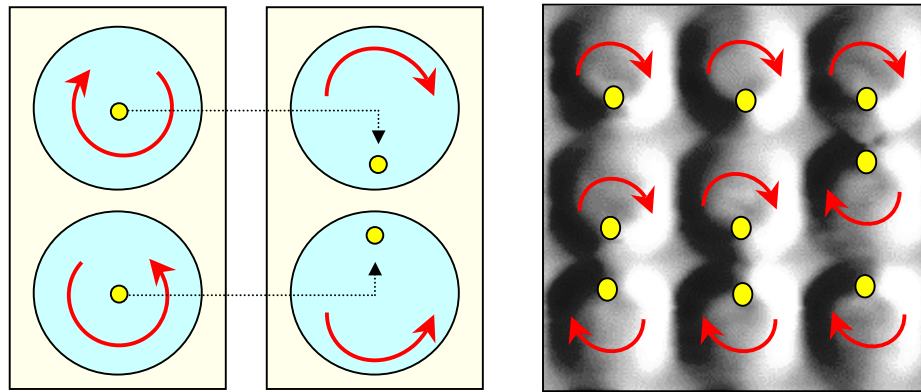
L. Prejbeanu et al, à paraître, JAP (2002).

K.Ounadjela et al, "Spin electronics", Springer Verlag (2001).

Chiralité

$\vec{H} \rightarrow$

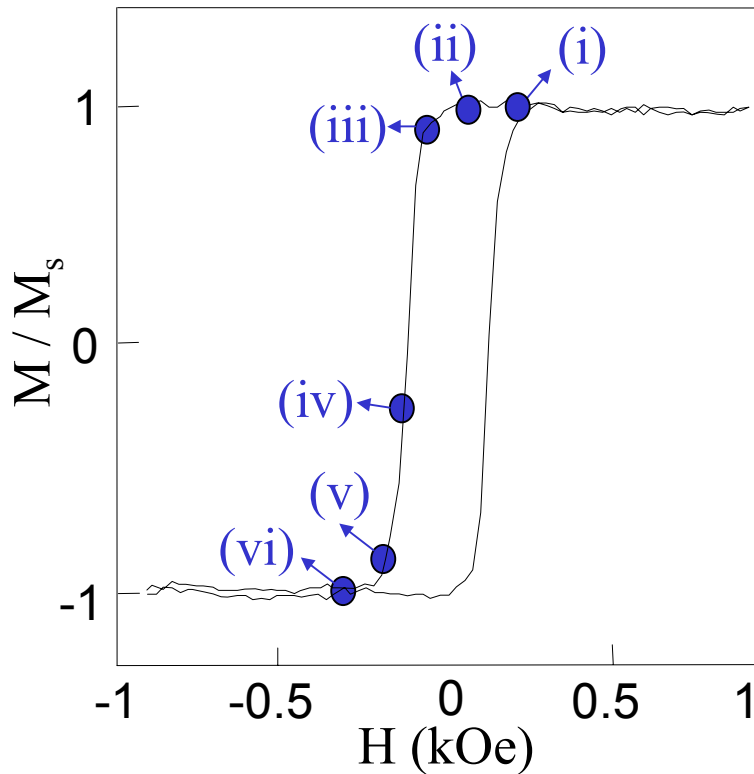
$\vec{H} \rightarrow$



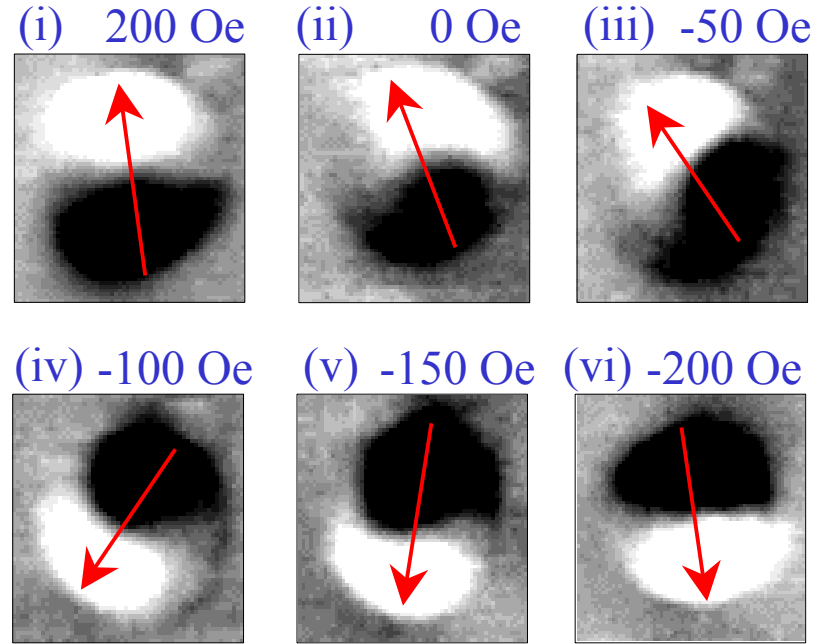
II. Plots

► Isolés ◄

Retournement par rotation cohérente

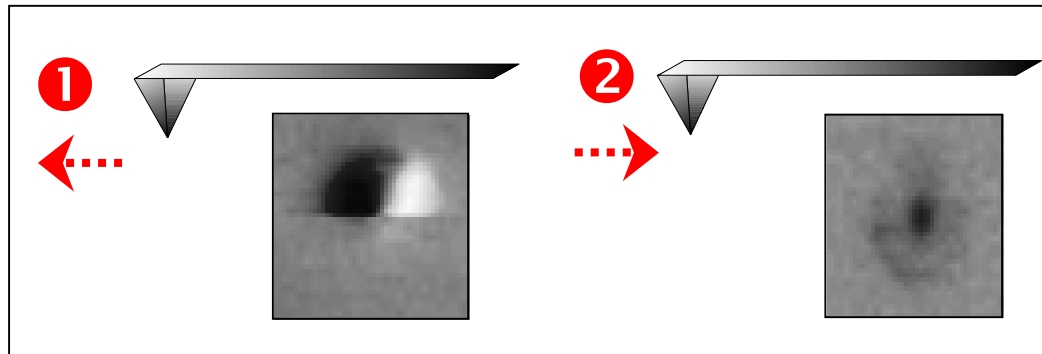


\vec{H}



L. Prejbeanu et al, à paraître, JAP (2002).

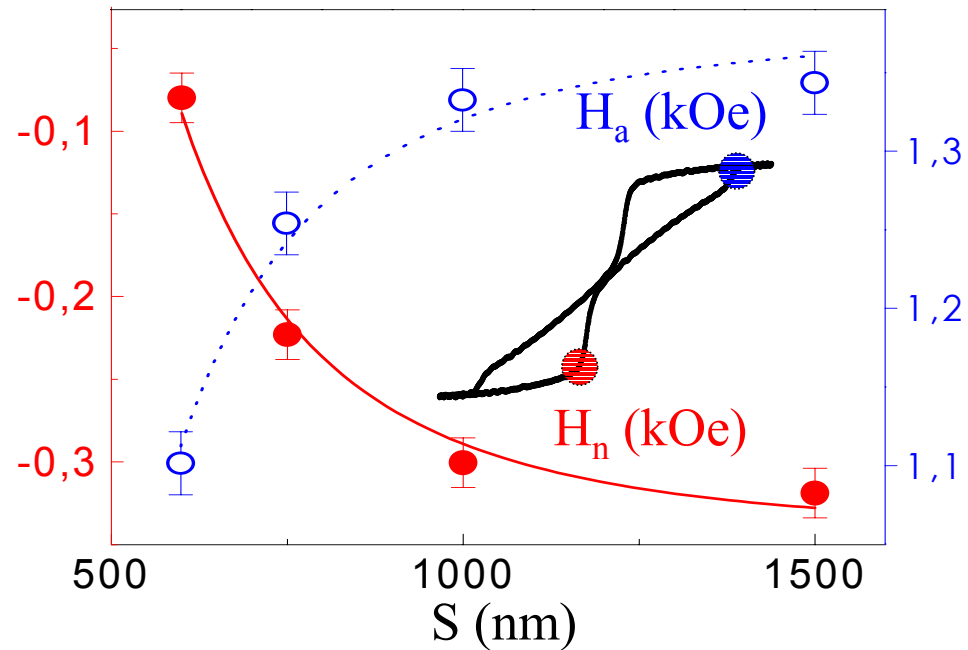
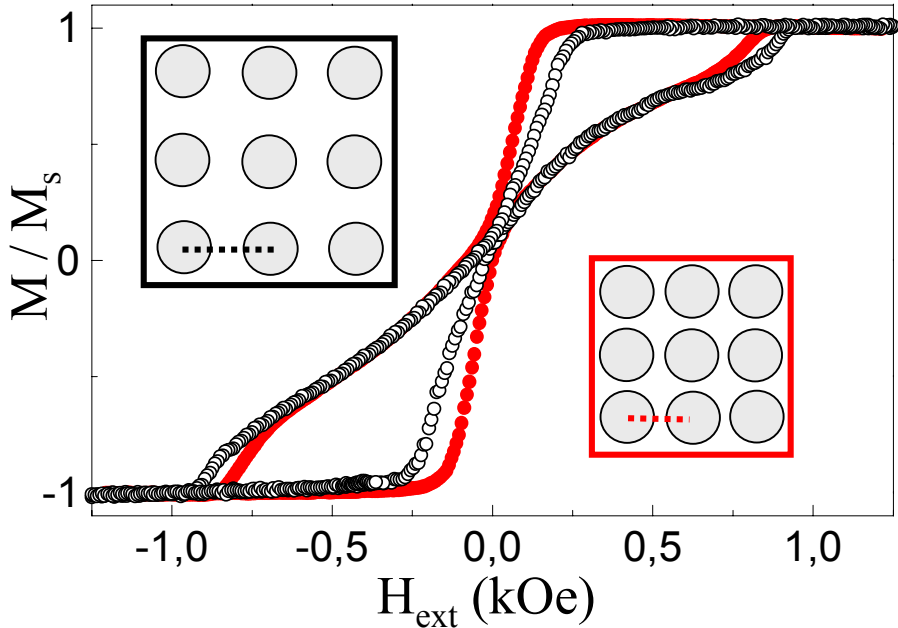
K.Ounadjela et al, "Spin electronics", Springer Verlag (2001).



Magnétisme des réseaux de plots de cobalt

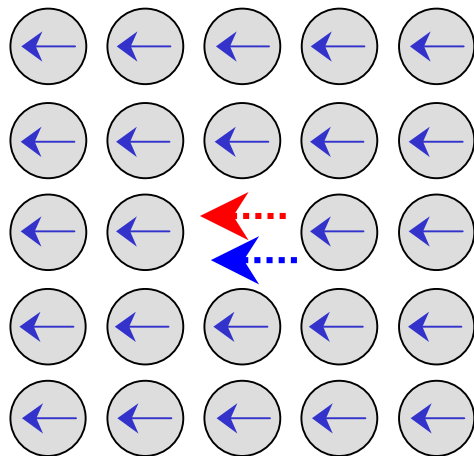
- ▶ Motivation
- ▶ Description du système
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des plots isolés
- ▶ Mécanismes de retournement de l'aimantation des réseaux de plots en interaction

Influence de l'espacement entre les plots



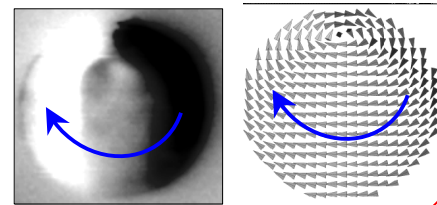
Interactions
dipolaires

$$\vec{H}_{\text{tot}} = \vec{H}_{\text{ext}} + \vec{H}_{\text{dip}}$$



\vec{H}_{ext}

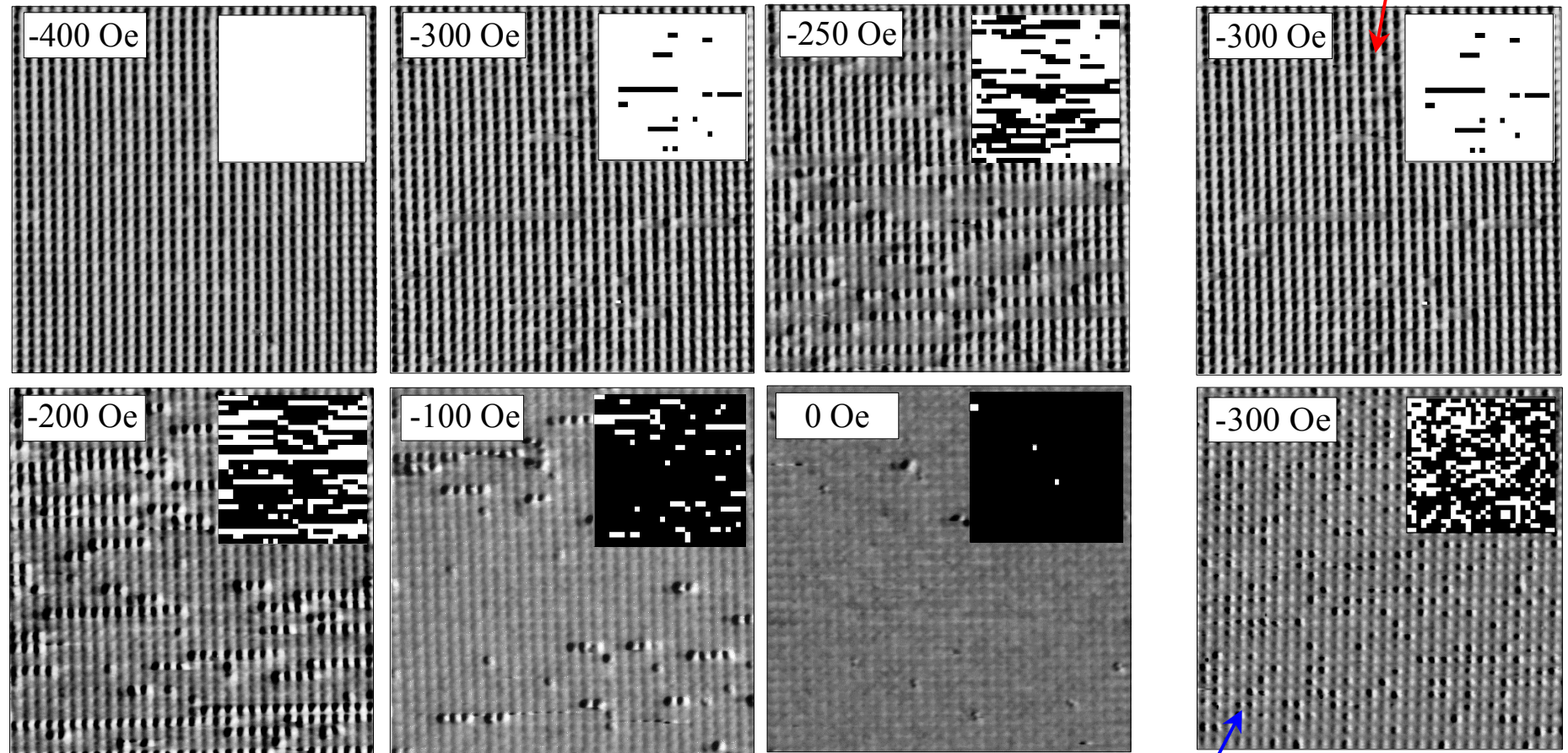
Avant
l'annihilation



Etude microscopique de la nucléation "collective"

Plots serrés

Plots serrés



5 μm

$\overleftarrow{H}_{\text{ext}}$

$\overleftarrow{H}_{\text{ext}}$

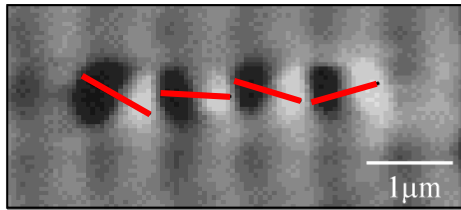
Plots éloignés

II. Plots

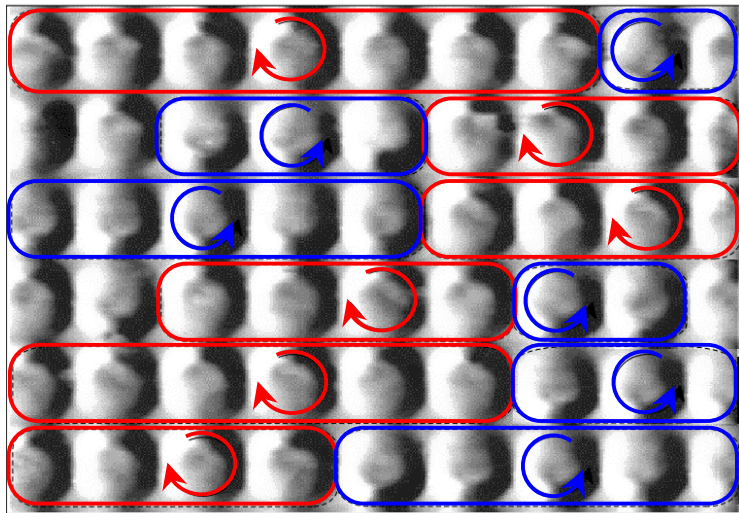
Interaction

Corrélations entre les sens de circulation des vortex

Observations expérimentales



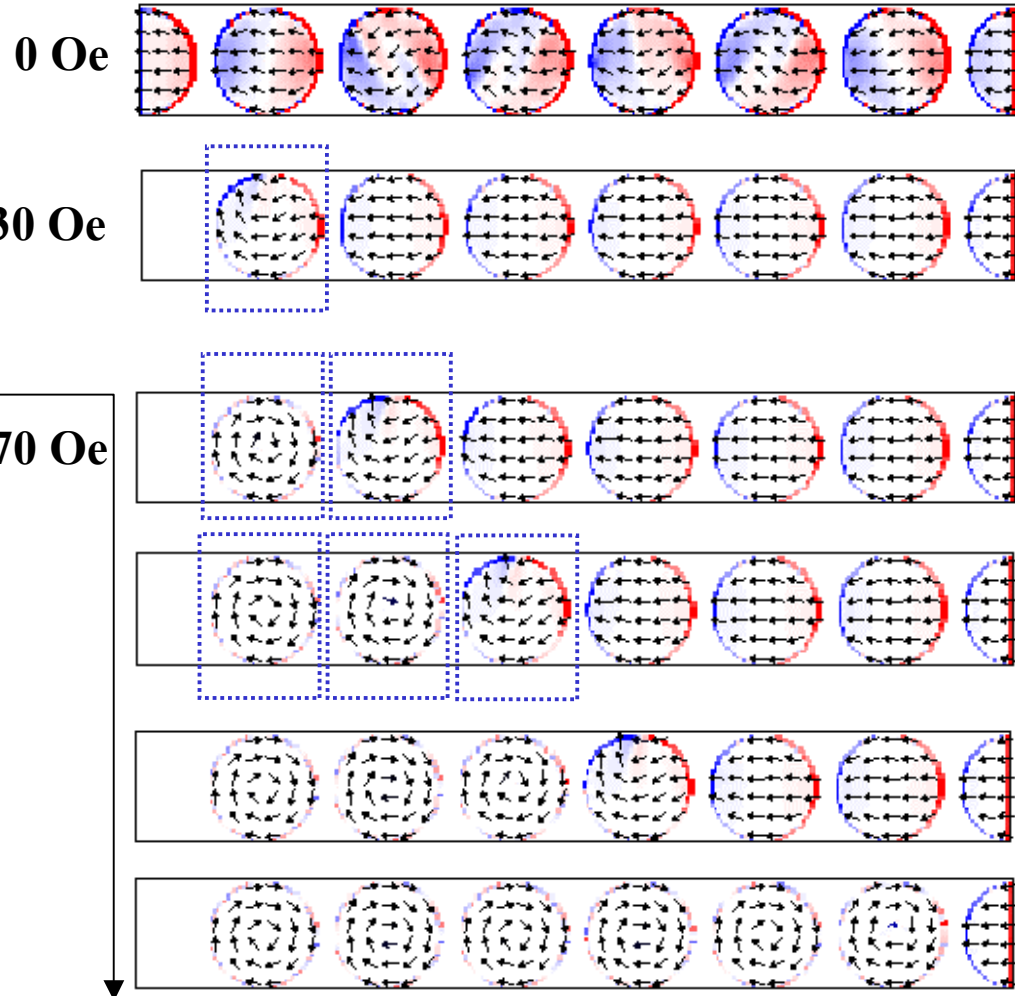
Attraction entre les charges magnétiques des plots voisins



Corrélations entre les sens de rotation des vortex

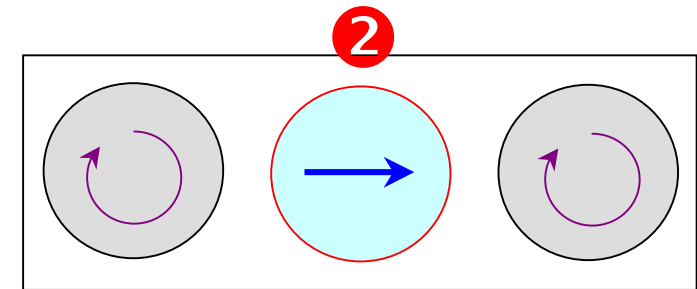
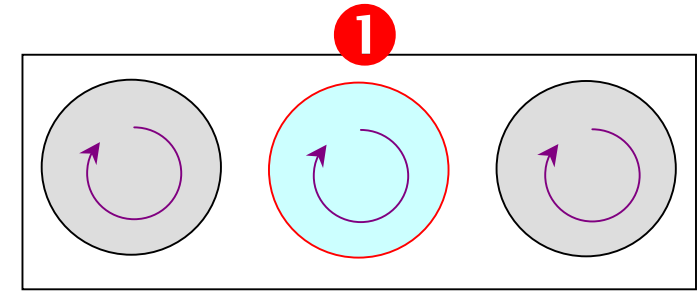
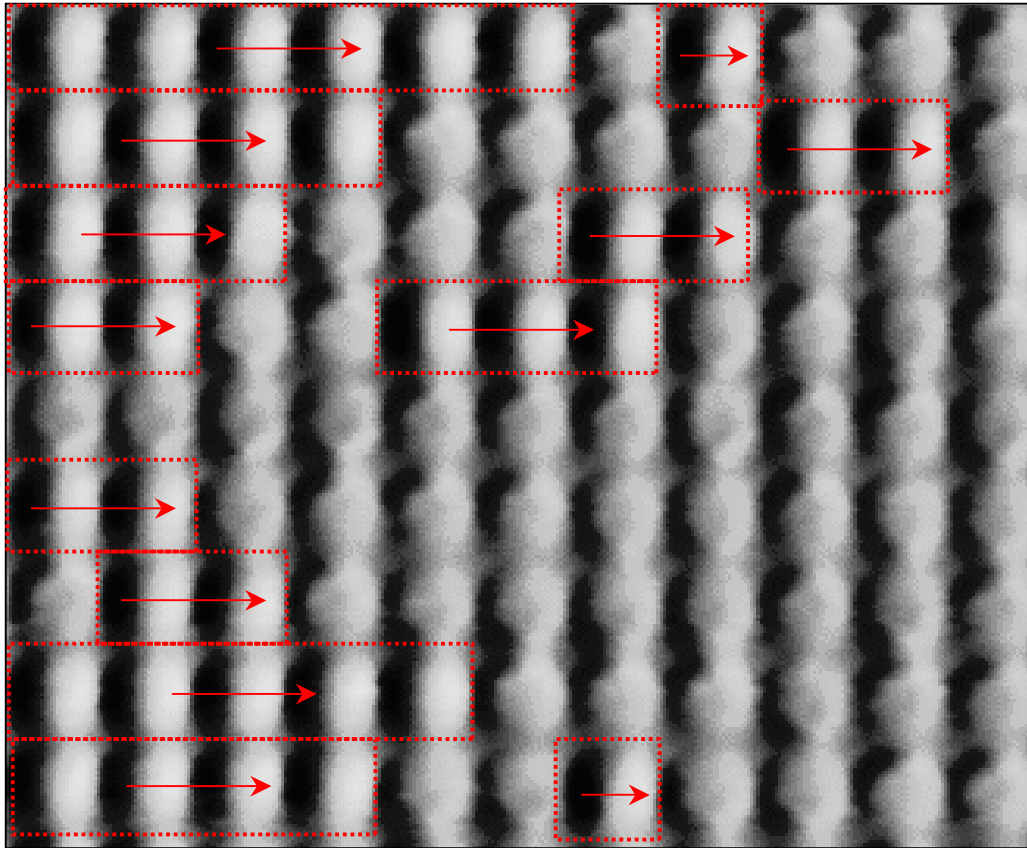
Simulations OOMMF

$d = 170 \text{ nm}$
 $S = 200 \text{ nm}$

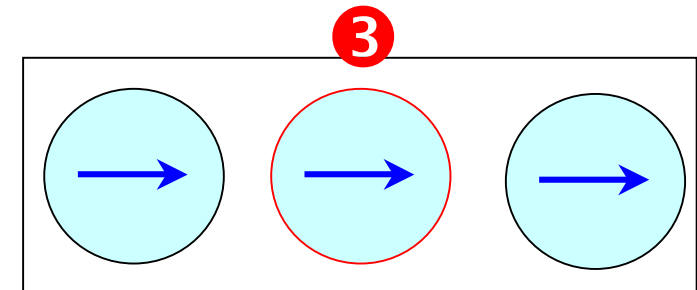


Chaîne de vortex de circulation identique

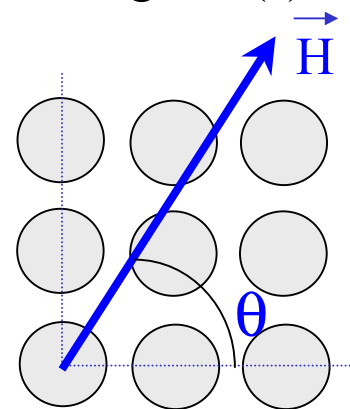
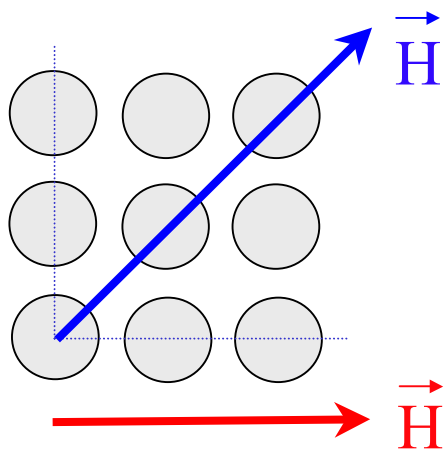
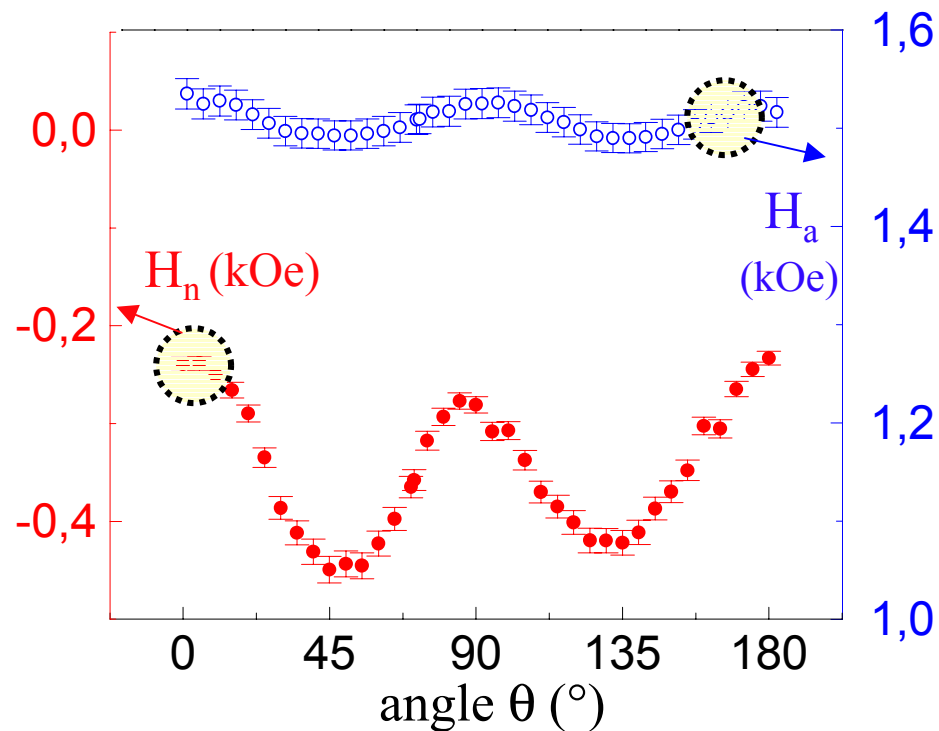
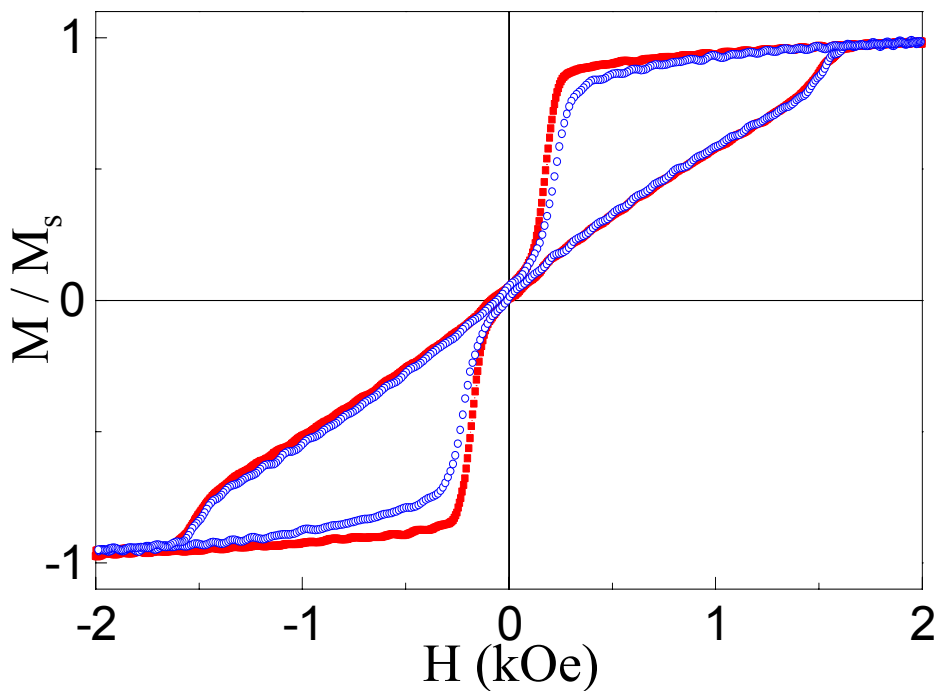
Etude microscopique de l'annihilation "collective"



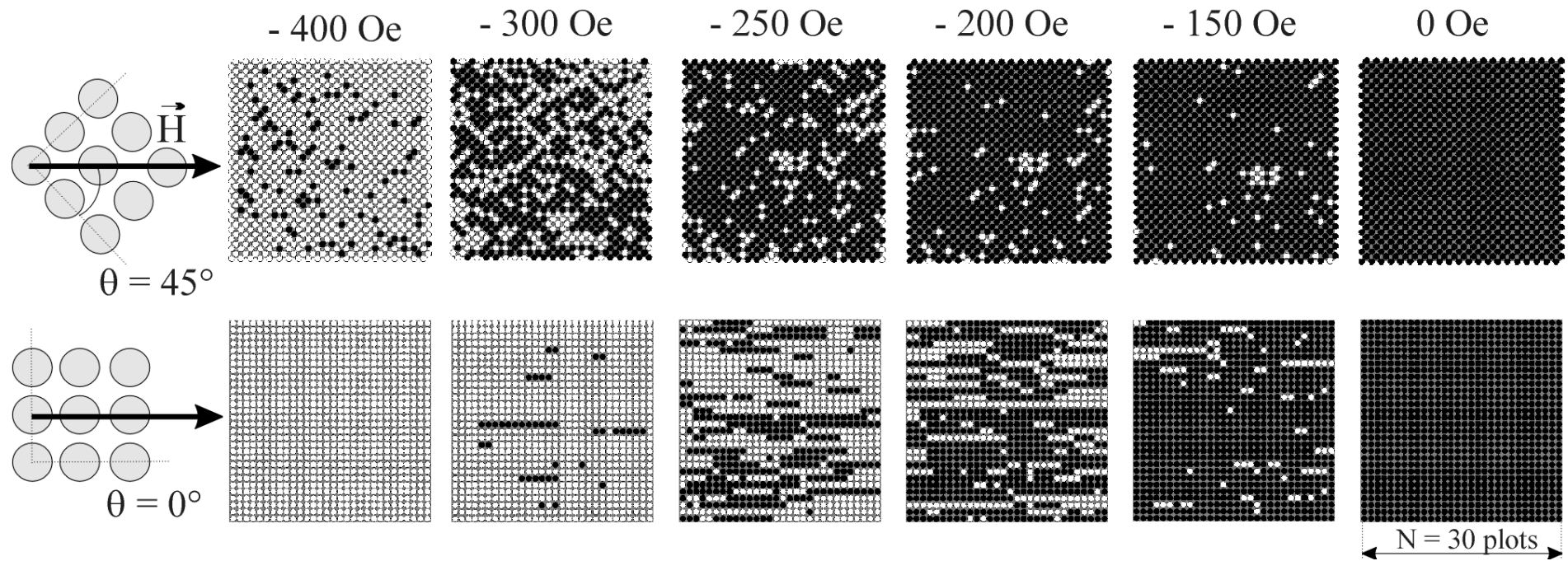
$$\vec{H}_{\text{tot}} = \vec{H}_{\text{ext}} + \vec{H}_{\text{dip}}$$



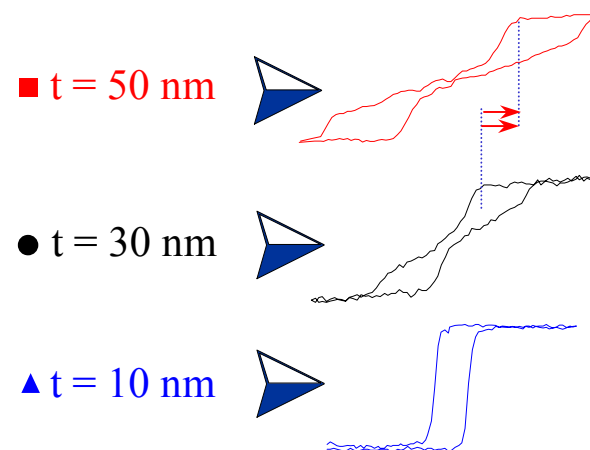
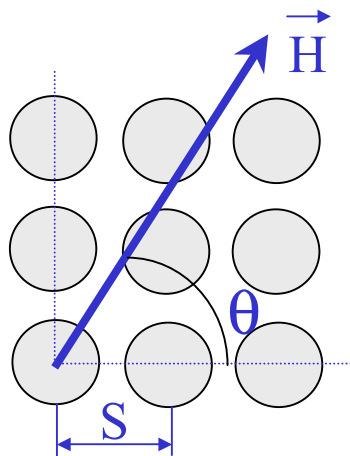
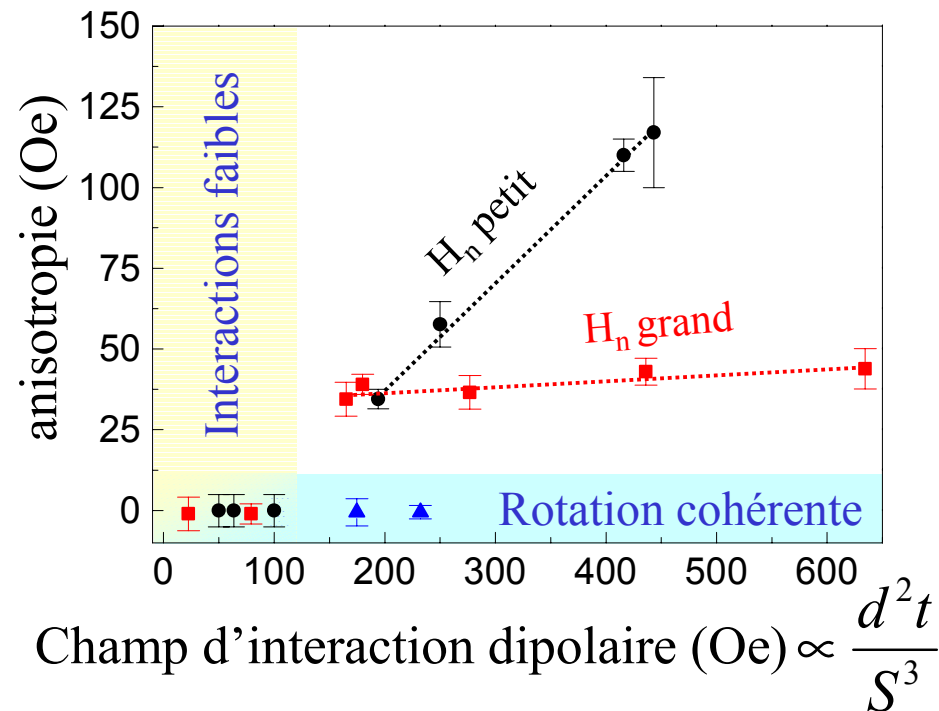
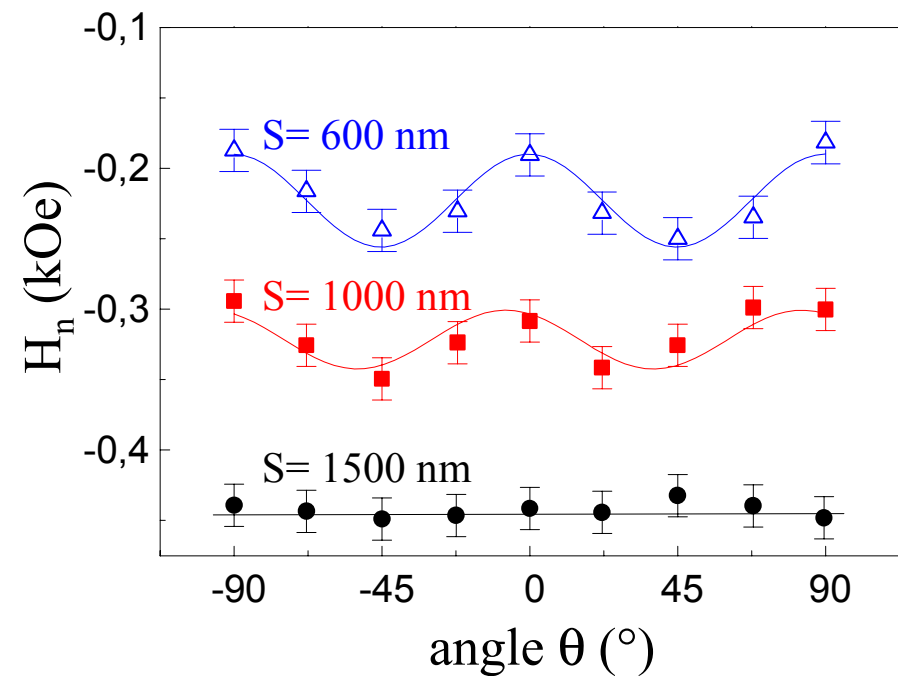
Anisotropie du processus de retournement



Anisotropie du processus de retournement



Origine de l'anisotropie



Conclusions et perspectives

Plots quasi-isolés

- mécanismes de retournement de l'aimantation dépendants des dimensions des plots:
 - rotation cohérente
 - formation d'un vortex
 - formation d'un double-vortex

Plots en interaction magnétostatique

- phénomènes de renversement collectif de l'aimantation.
 - formation de chaînes de vortex de sens de circulation identique.
 - anisotropie du processus de retournement

Réseaux de symétries différentes, lignes de plots, chaînes de plots en zigzag, plots monocristallins d'anisotropie planaire

Remerciements

Financement - Contrats européens

NANOWIRES H-96/928/534: "Nanoporous Particle Etched Membranes and their use as templates for electrodeposited multilayers for giant magnetoresistance applications" BRPR-CT95-0001

MAGNOISE 00/928/03/535 "Noise in Spin Electronic Devices" IST-1999-10849

Collaborations



IPCMS: L. Buda, U. Ebels, Y. Henry, J. Arabski, E. Beaurepaire, A. Popa, M. Demand, R. Poinot, A. Derory, G. Wurtz, G. Ehret, C. Uhlaq, G. Schmerber, P. Panissod, ...



CEA Saclay - SPEC: M. Viret, P. Warin, E. Sondergaard, O. Klein, F. Ott, C. Fermon, ...



LPN Bagneux: M. Natali, Y. Chen, ...



ISIS-ULP Strasbourg: H. Lezec