

# Renversement d'aimantation dans des nanostructures par propagation de parois de domaines sous champ magnétique et courant électrique

Mathieu CORMIER

Thèse de Doctorat préparée sous la direction de  
Jacques FERRÉ et Alexandra MOUGIN

Laboratoire de Physique des Solides – Univ. Paris-Sud, CNRS, UMR 8502 – Orsay  
ALTIS Semiconductor – Corbeil-Essonnes

- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- **Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique**
- **Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM**
- **Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées**
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique
- Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM
- Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

# Mémoires magnétiques à accès aléatoire : les MRAM

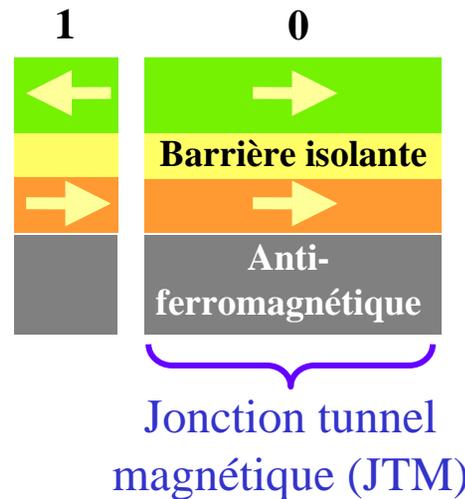
---

**1 bit = 1 cellule magnétique, aimantée suivant une direction bien définie**

Ne nécessite pas d'alimentation  
électrique permanente

Densité élevée

Vitesse d'accès élevée

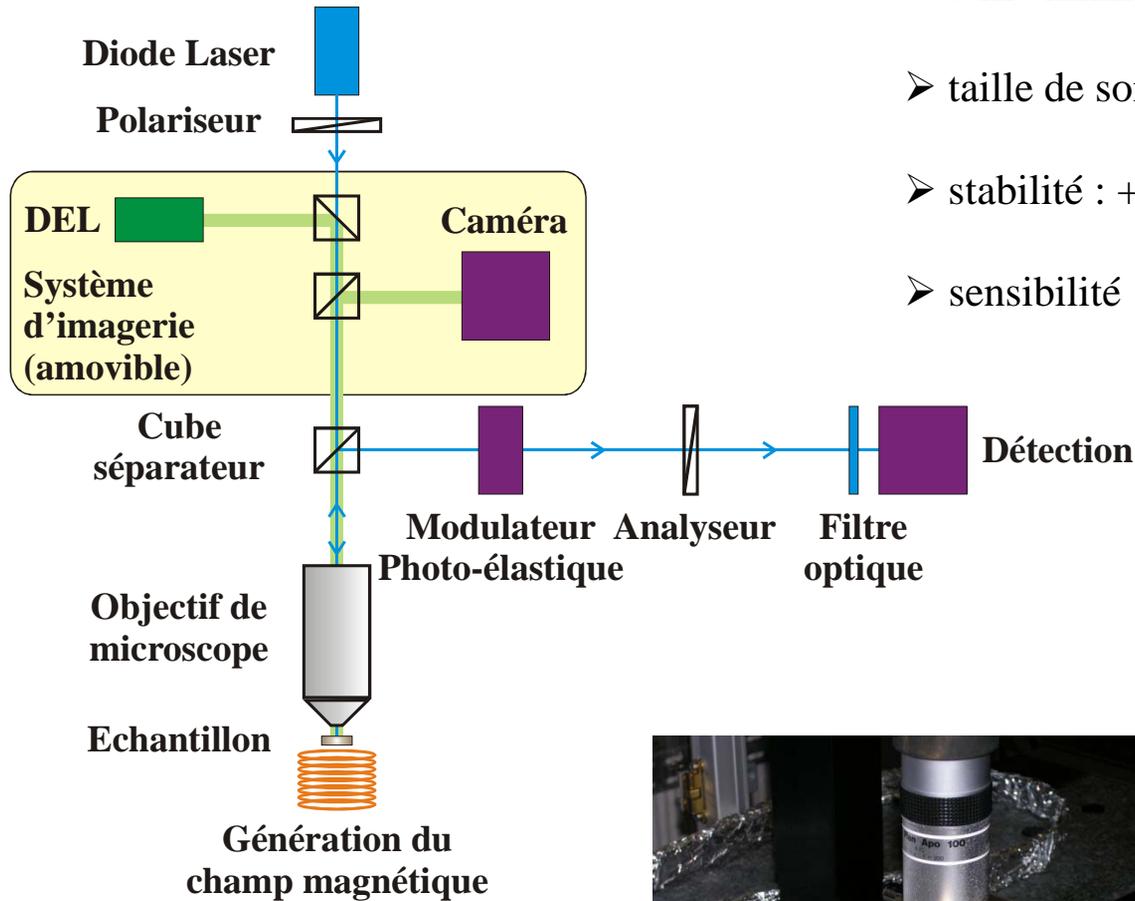


Couche magnétique  
douce de stockage

Couche magnétique dure  
de référence (piégée par  
couplage avec un anti-  
ferromagnétique)

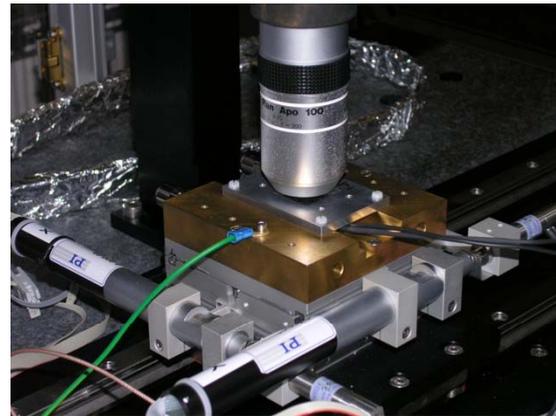
- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- **Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique**
- **Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM**
- **Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées**
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

# Magnétomètre Kerr pour des mesures à l'échelle nanométrique



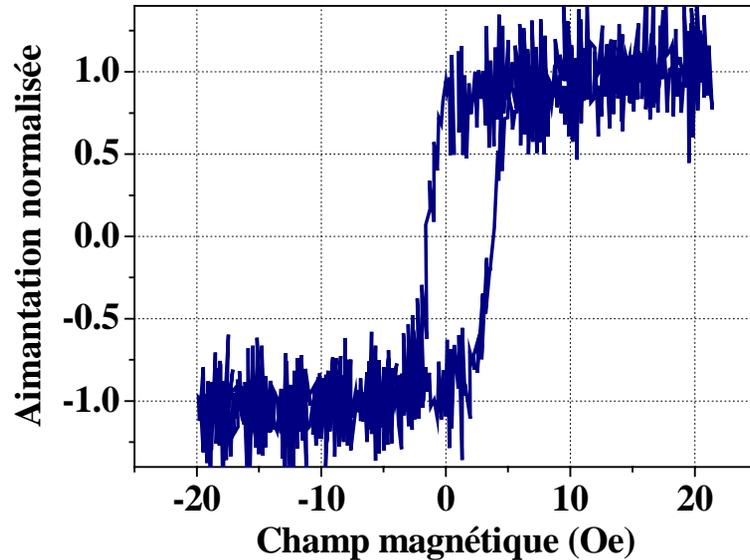
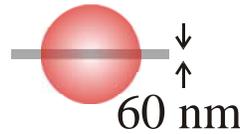
- taille minimale du spot optique : 470 nm
- taille de sonde minimale effective : 650 nm
- stabilité : +/- 35 nm sur 3h
- sensibilité :  $1,2 \cdot 10^{-15}$  emu

Modulation à 50 kHz + détection synchrone pour sensibilité élevée et faible niveau de bruit



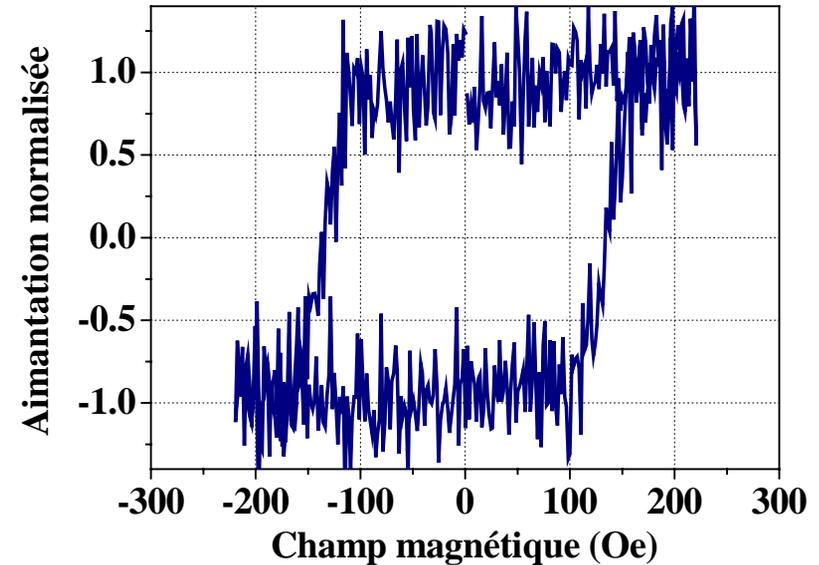
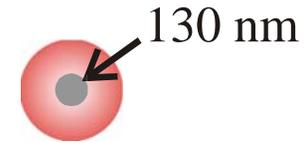
# Aux limites de l'optique en champ lointain...

Nanostructures magnétiques uniques dans un film de 0,5 nm de Co irradié He<sup>+</sup>



Piste de 60 nm de large  
moyenne sur 192 cycles  
mesuré en moins de 20 min

dans la zone sondée :  $\approx 2 \cdot 10^{-14}$  emu



Plot de 130 nm de diamètre  
moyenne sur 121 cycles  
mesuré en moins de 15 min

dans la zone sondée :  $\approx 6 \cdot 10^{-15}$  emu

Déplacement pas à pas de l'échantillon sous le spot laser

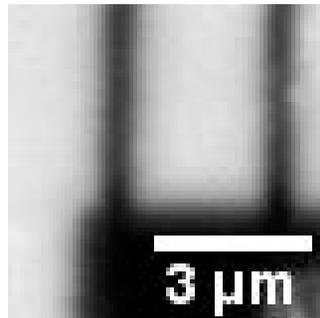


Image  
optique

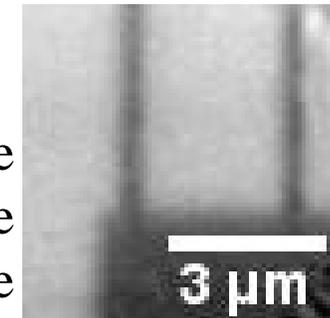
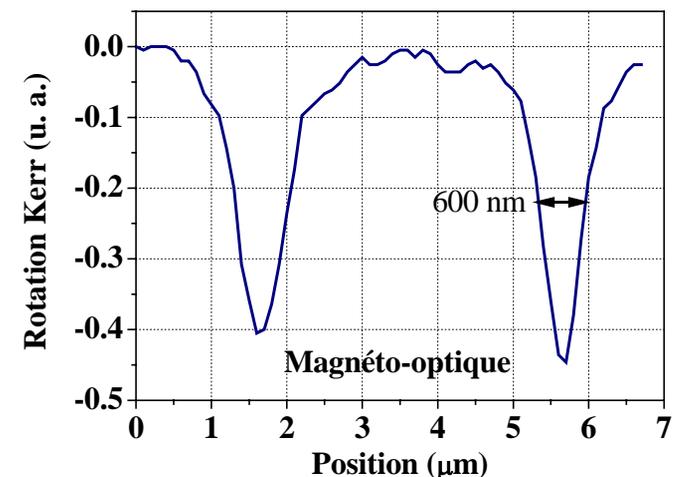
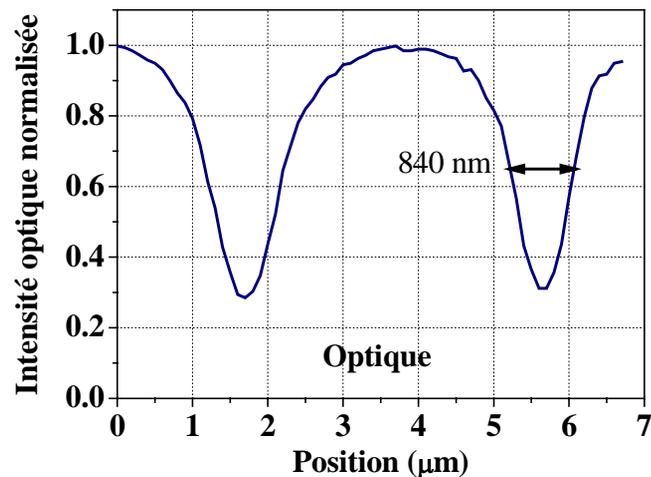


Image  
magnétique  
par différence



Largeur des pistes magnétiques : 470 nm

images de  $6 \times 6 \mu\text{m}^2$  ; taille des pixels  $100 \times 100 \text{ nm}^2$  ; 0,1 s par pixel

# Quelques perspectives pour l'avenir...

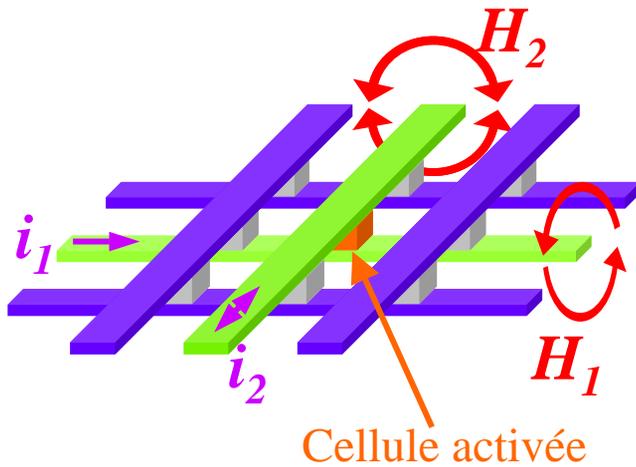
---

- **Transformation afin de réaliser des mesures sur des échantillons à anisotropie planaire**
- **Adaptation d'un cryostat optique**
- **Mesure optique de l'oscillation d'une paroi de domaine piégée...**

# Pour écrire un bit MRAM : deux stratégies

---

- **Champ magnétique**

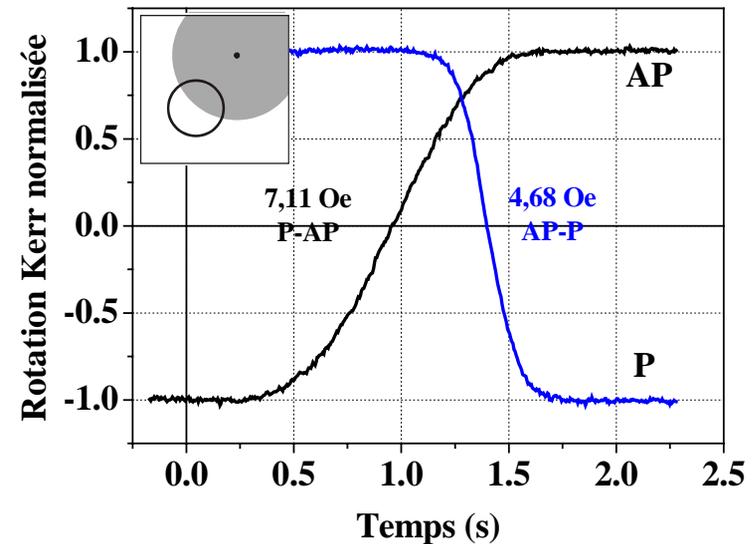
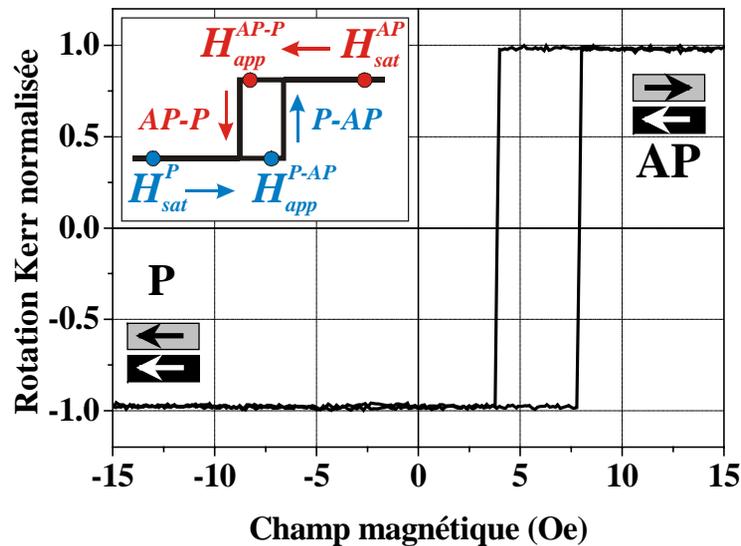


- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- **Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique**
- **Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM**
- **Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées**
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

# Asymétrie du renversement sous champ d'un système MRAM

(coll. K. March)

Mesures de relaxation MOKE sur la couche douce couplée dipolairement d'un empilement de type jonction tunnel magnétique



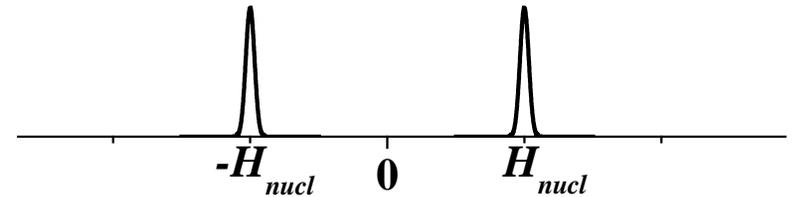
- Asymétrie entre les renversements P-AP et AP-P, malgré la forme très carrée du cycle
- Explication par la fluctuation spatiale du couplage dipolaire sur la surface de l'échantillon

# Asymétrie du renversement sous champ d'un système MRAM

(coll. K. March)

Dans la couche douce isolée (non couplée) :

distribution des champs de nucléation /  
propagation



# Asymétrie du renversement sous champ d'un système MRAM

(coll. K. March)

Dans la JTM, couplage hautement non linéaire :

$$H_{coupl} \sim e^{-d/\lambda}$$

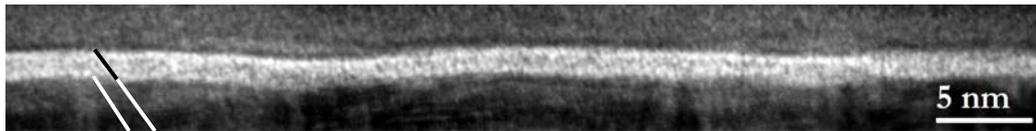
( $d$  épaisseur de la barrière tunnel  
 $\lambda$  longueur d'onde de la rugosité d'interface)



distribution de  $d$  sur l'échantillon

⇒ distribution asymétrique de  $H_{coupl}$

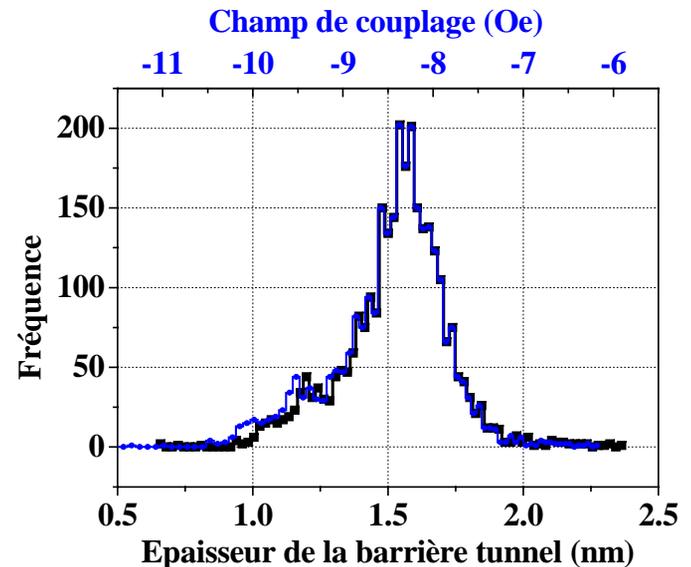
Coupe MET :



Couche douce

Barrière tunnel

Couche dure



# Asymétrie du renversement sous champ d'un système MRAM

(coll. K. March)

Dans la couche douce couplée, distribution des champs de nucléation / propagation modifiée par le couplage dipolaire :

$$H_{nucl / prop}^{couplée} = H_{nucl / prop}^{non couplée} - H_{coupl}$$

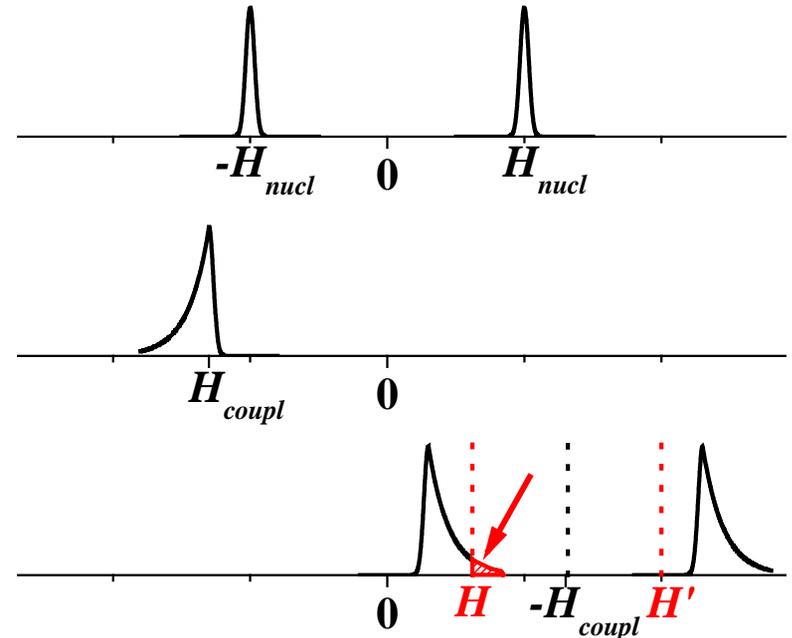


Transfert aux processus magnétiques de l'asymétrie de la distribution du champ de couplage :

Sites actifs pour la nucléation / propagation différents entre les renversements AP-P et P-AP

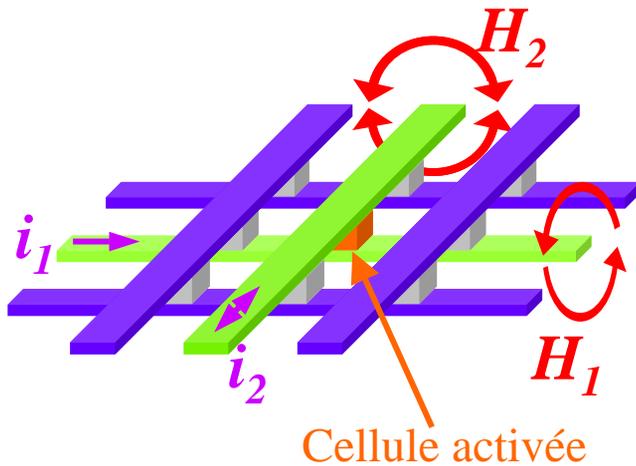


**Asymétrie de renversement observée**



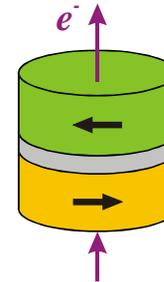
# Pour écrire un bit MRAM : deux stratégies

- **Champ magnétique**



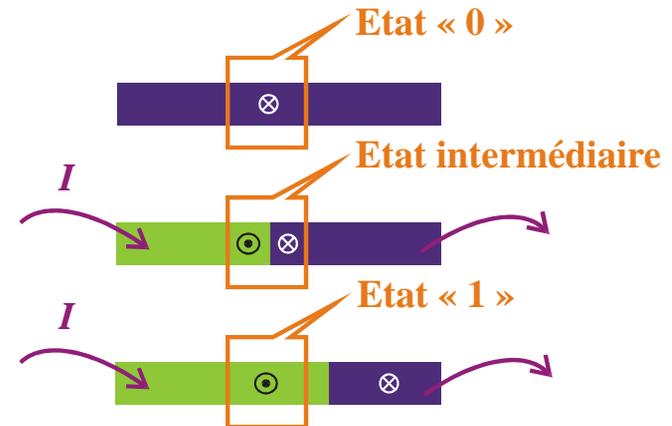
- **Courant électrique**

- perpendiculairement au plan du film : nano-piliers



- dans le plan du film : nano-pistes

Bit MRAM :

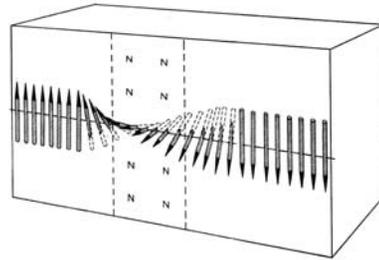


propagation de parois de domaine induite par courant

- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- **Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique**
- **Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM**
- **Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées**
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

# Dynamique d'une paroi de domaine sous champ

Paroi de domaine magnétique (Bloch) à  $180^\circ$  :



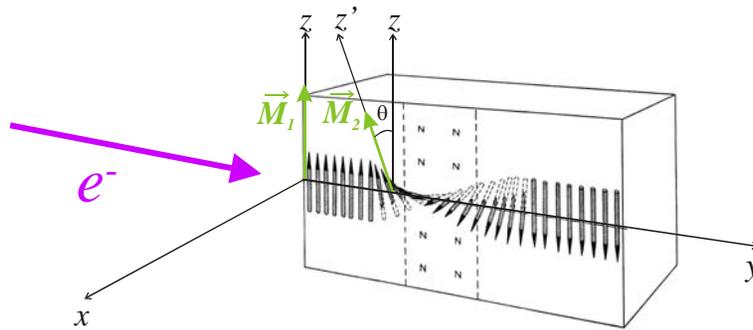
Kittel, *Rev. Mod. Phys.* **21**, 541 (1949)

Équation de Landau-Lifshitz-Gilbert pour chaque spin dans la paroi :

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \underbrace{\gamma \vec{H}_{eff} \wedge \vec{M}}_{\text{Champ}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}}_{\text{Amortissement}}$$

# Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et courant

## Paroi de domaine magnétique (Bloch) à 180° :



Kittel, *Rev. Mod. Phys.* **21**, 541 (1949)

## Équation de Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski pour chaque spin :

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \underbrace{\gamma \vec{H}_{eff} \wedge \vec{M}}_{\text{Champ}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}}_{\text{Amortissement}} - \underbrace{u \frac{\partial \vec{M}}{\partial y} + \frac{\beta u}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial y}}_{\text{Courant}} \quad u = \frac{gJ\mu_B P}{2eM_s}$$

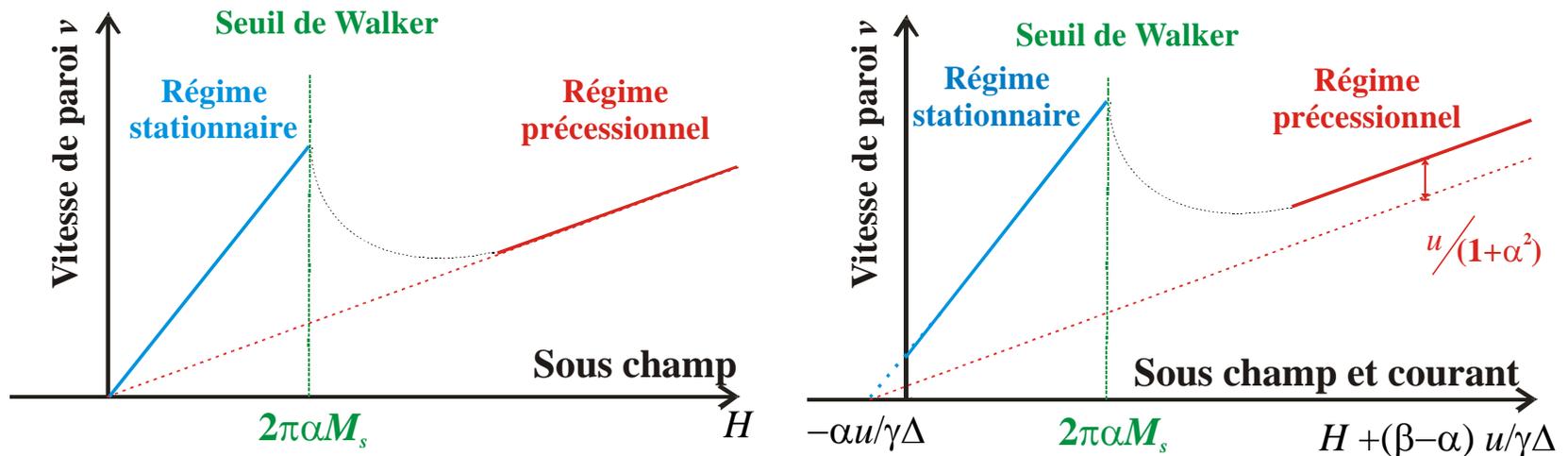
Transfert de spin adiabatique  
(calculé analytiquement)

Transfert de spin non adiabatique  
(phénoménologique)

$J$  = densité de courant ;  $P$  = polarisation en spin

# Propagation de paroi sous champ et courant en milieu infini

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \underbrace{\gamma \vec{H}_{eff} \wedge \vec{M}}_{\text{Champ}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}}_{\text{Amortissement}} - \underbrace{u \frac{\partial \vec{M}}{\partial y} + \frac{\beta u}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial y}}_{\text{Courant}}$$



# Transfert de spin adiabatique et non adiabatique

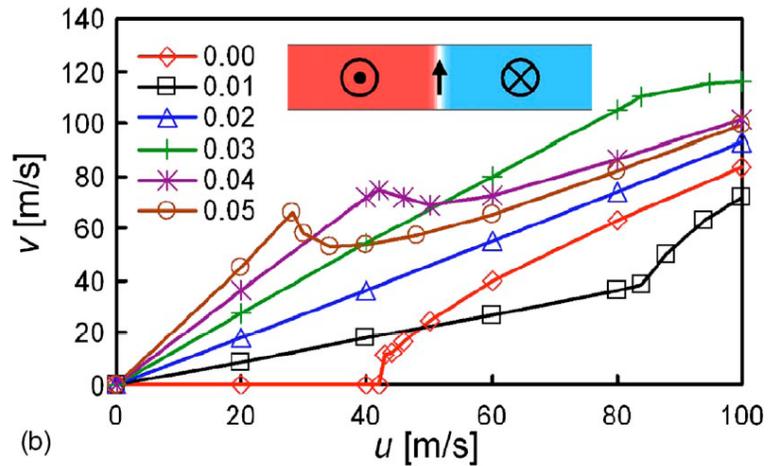
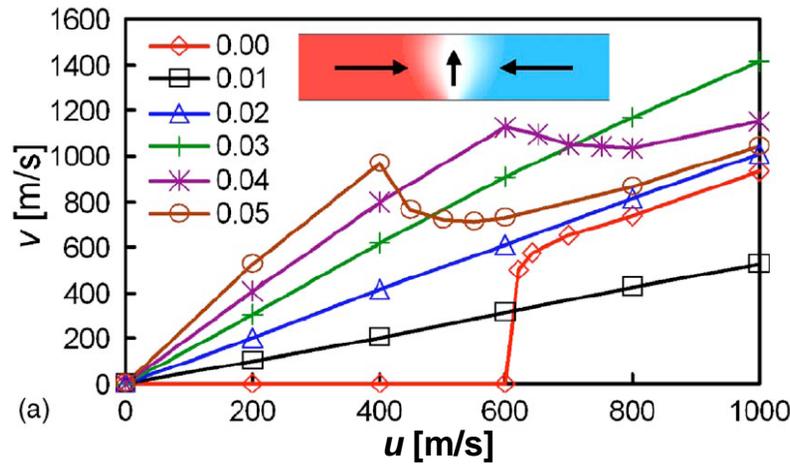
$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \underbrace{\gamma \vec{H}_{eff} \wedge \vec{M}}_{\text{Champ}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}}_{\text{Amortissement}} - \underbrace{u \frac{\partial \vec{M}}{\partial y} + \frac{\beta u}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial y}}_{\text{Courant}}$$

$$u = \frac{gJ\mu_B P}{2eM_s}$$

Transfert de spin adiabatique  
modifie la structure de la paroi  
couple dominant si paroi épaisse

Transfert de spin non adiabatique  
pousse la paroi  
 $\beta$  maximal attendu pour paroi fine

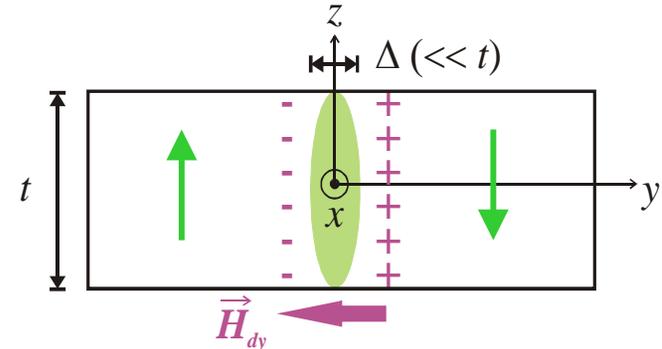
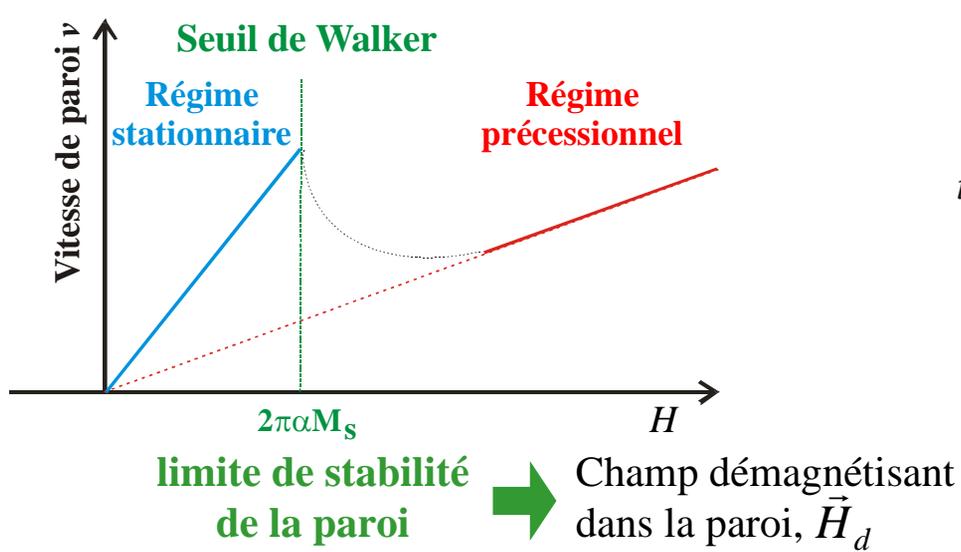
$\beta$  nécessaire pour reproduire les résultats expérimentaux  
(vitesse  $v$  non nulle pour faible valeur de  $u$  dans les systèmes planaires)



(Thiaville et al., *Europhys. Lett.* **69**, 990 (2005) ; Fukami et al., *J. Appl. Phys.* **103**, 07E718 (2008))

# Propagation de parois : film épais vs nanostructures

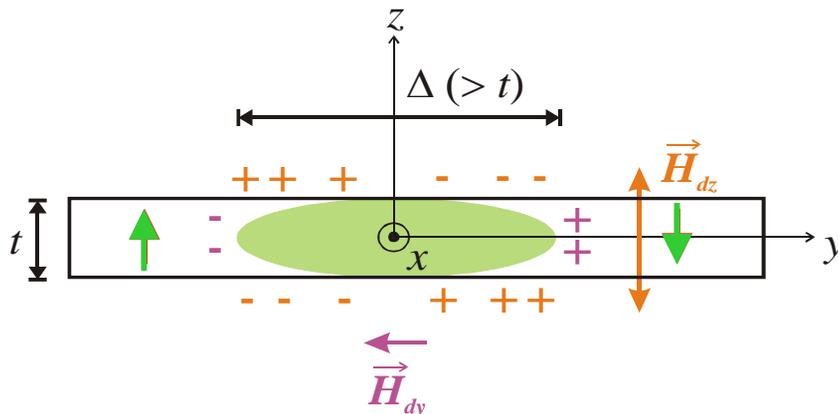
## ➤ Théorie standard de Walker : film épais infini sous champ magnétique



Hypothèse : paroi fine

⇒  $\vec{H}_d$  normal au plan de la paroi

## ➤ Films ultraminces / Nanostructures

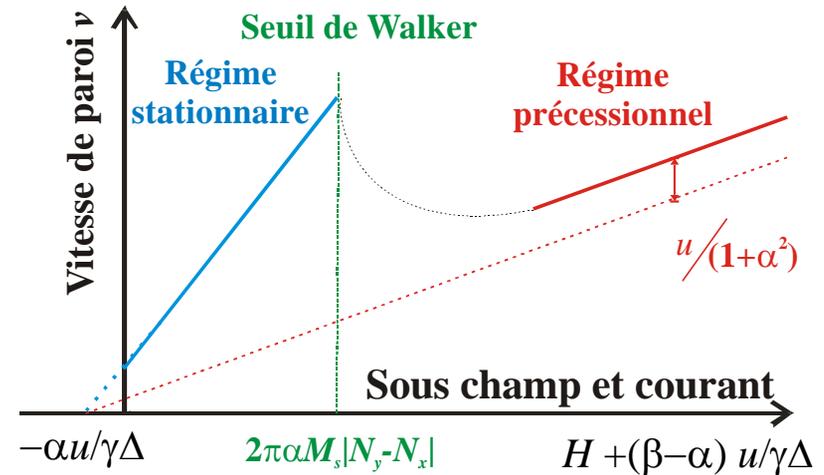
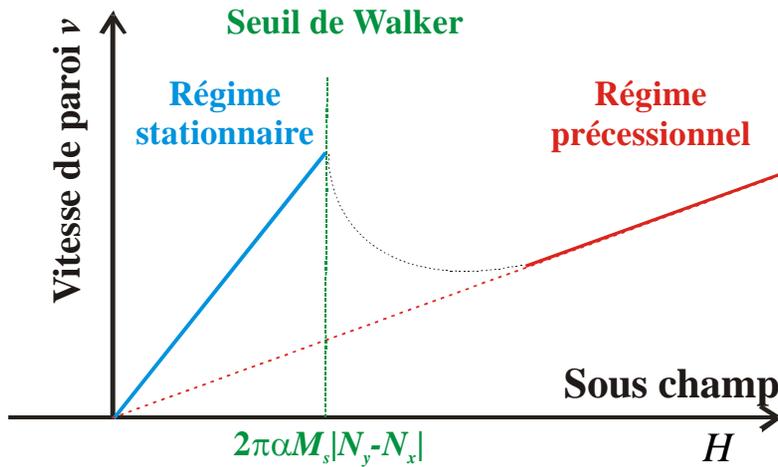
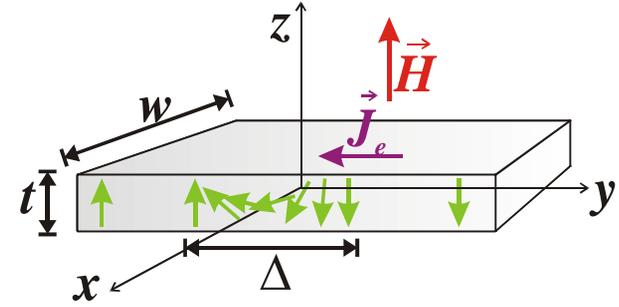


$$\vec{H}_d = -4\pi \begin{pmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{pmatrix} \vec{M}$$

Toutes les composantes de  $\vec{H}_d$  doivent être prises en compte

# Propagation de paroi dans une nano-piste magnétique

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \underbrace{\gamma \vec{H}_{eff} \wedge \vec{M}}_{\text{Champ}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}}_{\text{Amortissement}} - \underbrace{u \frac{\partial \vec{M}}{\partial y} + \frac{\beta u}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial y}}_{\text{Courant}}$$

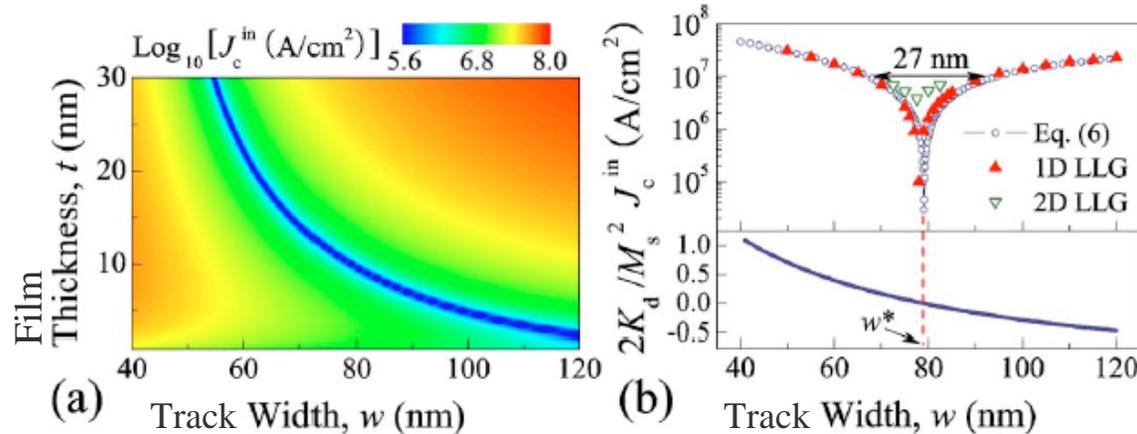


⇒ Le seuil de Walker dépend de la géométrie

$$H_W = 2\pi\alpha M_s |N_y - N_x|$$

# Conséquences et prolongements

## ➤ Optimisation possible en réduisant géométriquement $H_W$



(Jung et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 202508 (2008))

## ➤ Régime précessionnel accessible plus facilement en milieu confiné

- piégeage moins efficace (cohérent avec le lissage de paroi observé sous fort champ)
- régime dans lequel les **deux** termes de transfert de spin sont efficaces pour la propagation

# Systeme « idéal » pour la propagation sous courant

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \underbrace{\gamma \vec{H}_{eff} \wedge \vec{M}}_{\text{Champ}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}}_{\text{Amortissement}} - \underbrace{u \frac{\partial \vec{M}}{\partial y} + \frac{\beta u}{M_s} \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial y}}_{\text{Courant}}$$

$$u = \frac{gJ\mu_B P}{2eM_s}$$

Transfert de spin adiabatique  
modifie la structure de la paroi  
couple dominant si paroi épaisse

Transfert de spin non adiabatique  
pousse la paroi  
 $\beta$  maximal attendu pour paroi fine

## Pour optimiser la propagation sous courant, il faut :

- Faible largeur de paroi  $\Delta$  }  $\beta$  et  $\partial M / \partial y$  maximaux
- Faible aimantation à saturation  $M_s$  }  $u$  maximal
- Forte polarisation  $P$

## ... et comme sous champ magnétique :

- Faible piégeage de la paroi } paroi mobile

- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- **Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique**
- **Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM**
- **Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées**
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

# Un système prometteur : Pt/Co (0,5 nm)/Pt irradié He<sup>+</sup>

(Coll. SPINTEC + Forschungszentrum Dresden-Rossendorf)

## ➤ Si / SiO<sub>2</sub> (500 nm) / Pt (4,5 nm) / Co (0,5 nm) / Pt (3,5 nm) déposé par pulvérisation cathodique

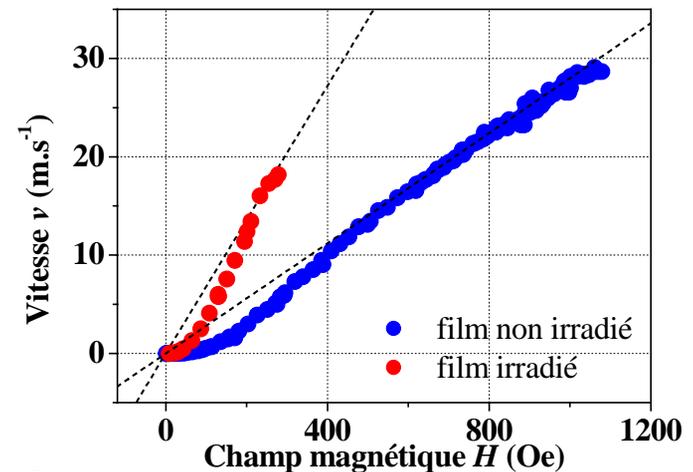
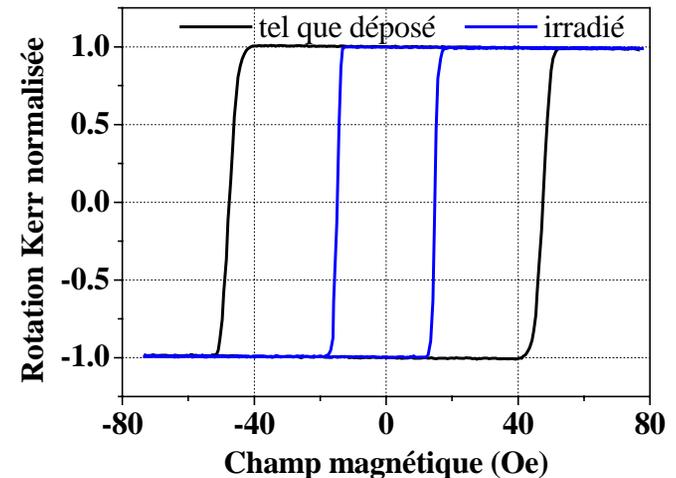
- Anisotropie perpendiculaire ( $H_K \approx 7$  kOe)
- Parois fines ( $\Delta \approx 6$  nm), faiblement piégées
- $M_s \approx 900$  erg.Oe<sup>-1</sup>.cm<sup>-3</sup>

## ➤ Irradiation sous $5 \times 10^{15}$ He<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup> avec une énergie de 30 keV

Mélange aux interfaces Co / Pt

- $H_K$  réduit ( $\approx 1$  kOe)
- $\Delta$  reste faible ( $\approx 19$  nm)
- $M_s$  réduite ( $\approx 700$  erg.Oe<sup>-1</sup>.cm<sup>-3</sup>)

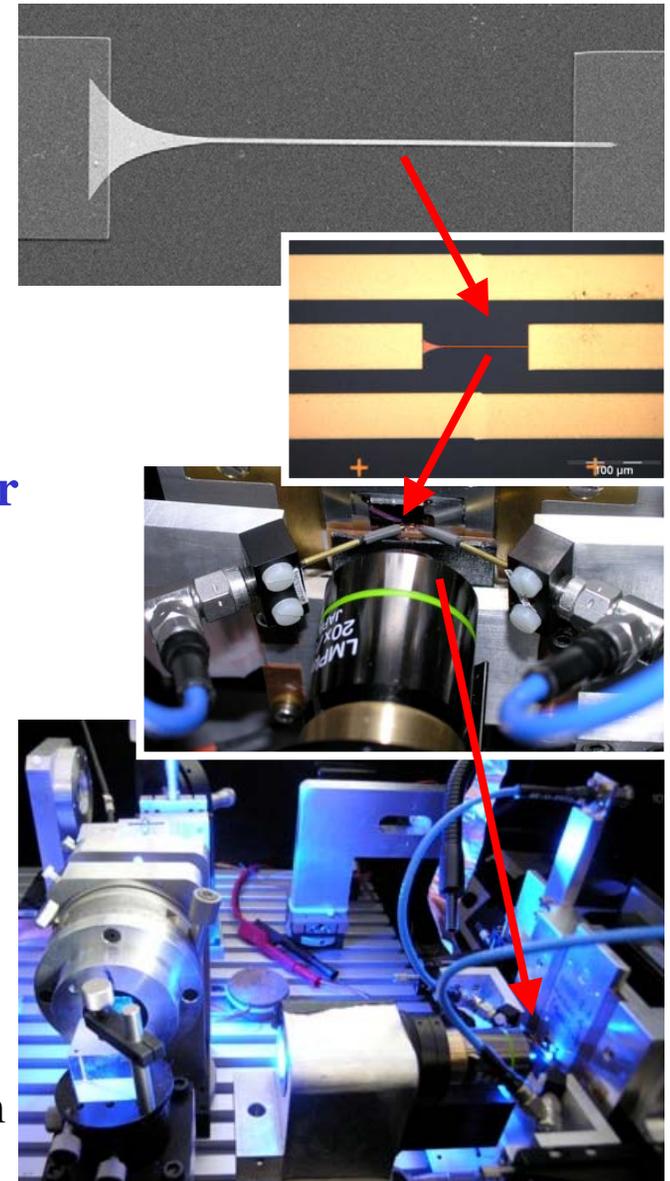
## ➤ Système optimisé pour la propagation sous champ



- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- **Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique**
- **Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM**
- **Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées**
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

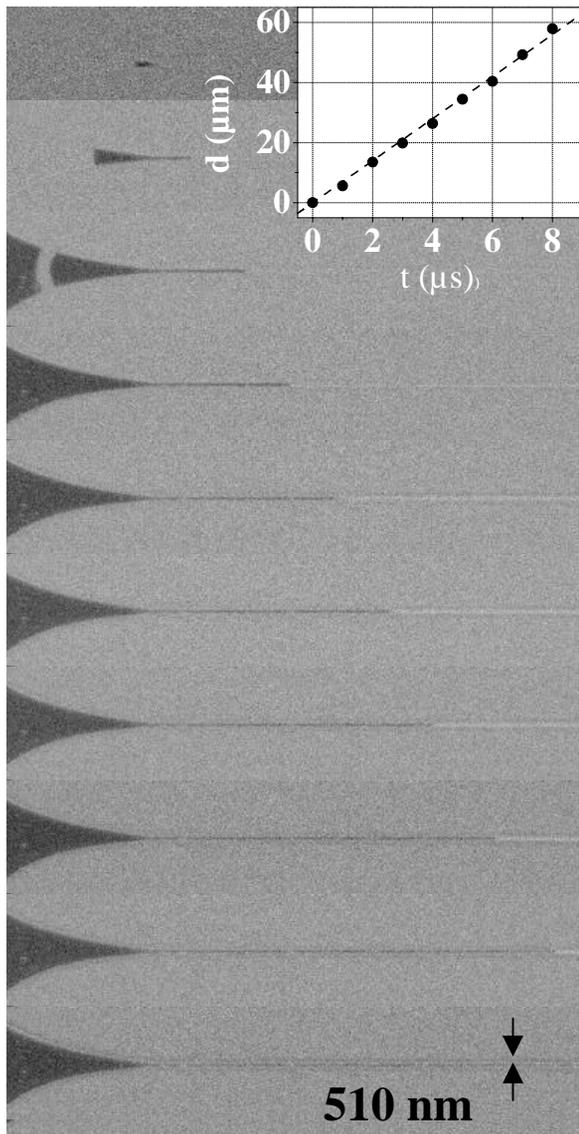
# Microscopie Kerr polaire sur une nano-piste lithographiée

- **Nano-piste définie par lithographie électronique et gravure ionique**
  - Largeur  $\approx 750$  nm ; Longueur  $\approx 130$   $\mu$ m
  - Élargissement = « réservoir de nucléation »
- **Contacts électriques par lignes coplanaires lithographiées, adaptées  $50 \Omega$ , connectées par Picoprobes®**
  - Résistance de la piste  $\approx 600 \Omega$
  - Désadaptation d'impédance très locale ( $\approx 130$   $\mu$ m), convient pour des impulsions ultra-brèves
- **Mesures par microscopie Kerr polaire**
  - Mesure quasi-statique « avant / après » à  $T_{amb}$
  - Sensible à un déplacement de paroi d'environ  $1 \mu$ m



# Propagation sous champ dans une nano-piste

Impulsions  $\approx 150$  Oe,  $1 \mu\text{s}$



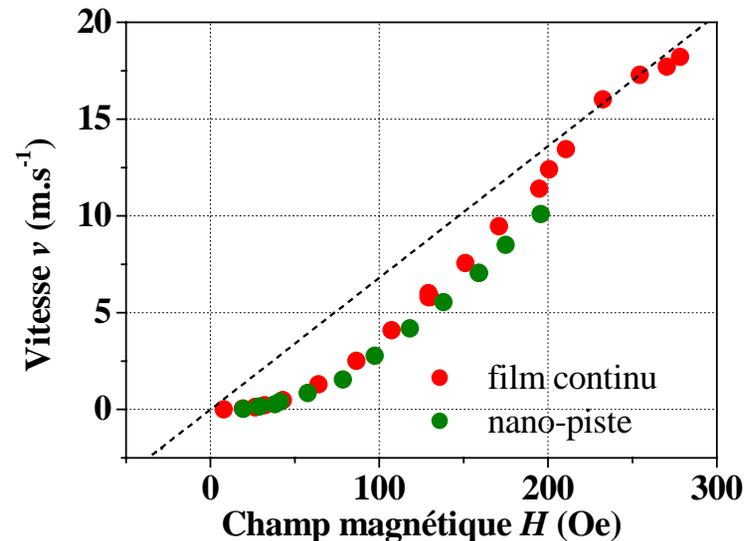
## ➤ Nano-piste optimisée pour la propagation sous champ

Propagation facile et rapide dans la piste ( $H_{prop} \approx 1$  Oe)

Comportement de la paroi similaire dans la piste et dans le film

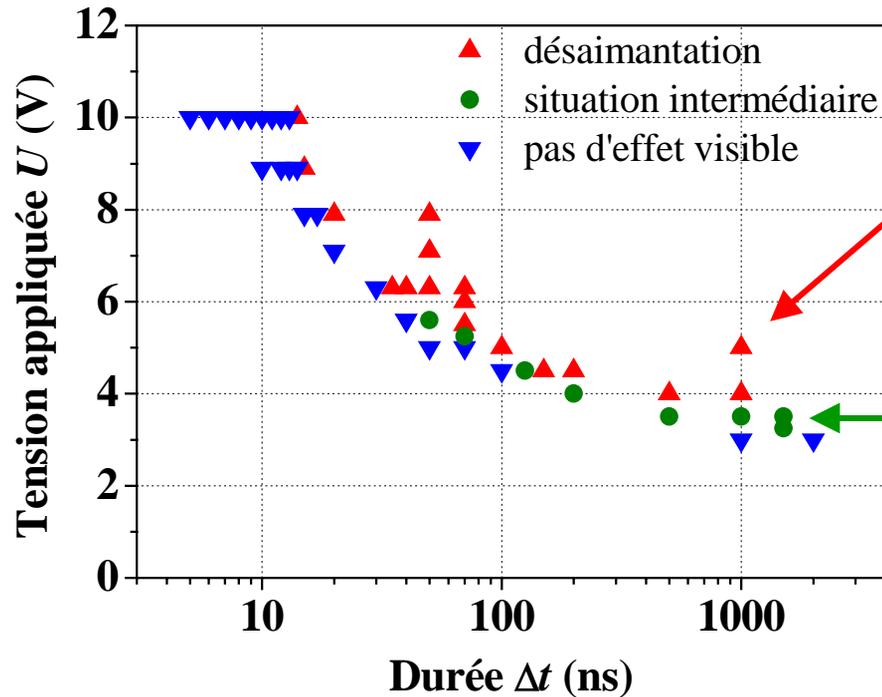
➤ Pas de dommages additionnels dus à la gravure

➤ Pas de piégeage sur les bords de piste



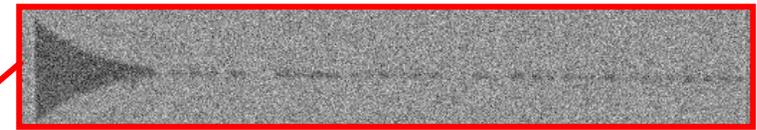
# Effet d'une impulsion de courant sur une paroi de domaine

## ➤ Trois situations

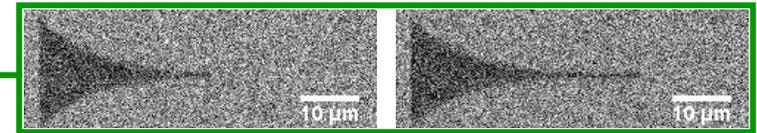


$$J \approx 1,6 \times 10^{11} \text{ A.m}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$$

$$J_{Co} \approx 1,2 \times 10^{11} \text{ A.m}^{-2} \cdot \text{V}^{-1} \text{ (estimée)}$$



État désaimanté



Propagation,  
indépendante de la polarité du courant

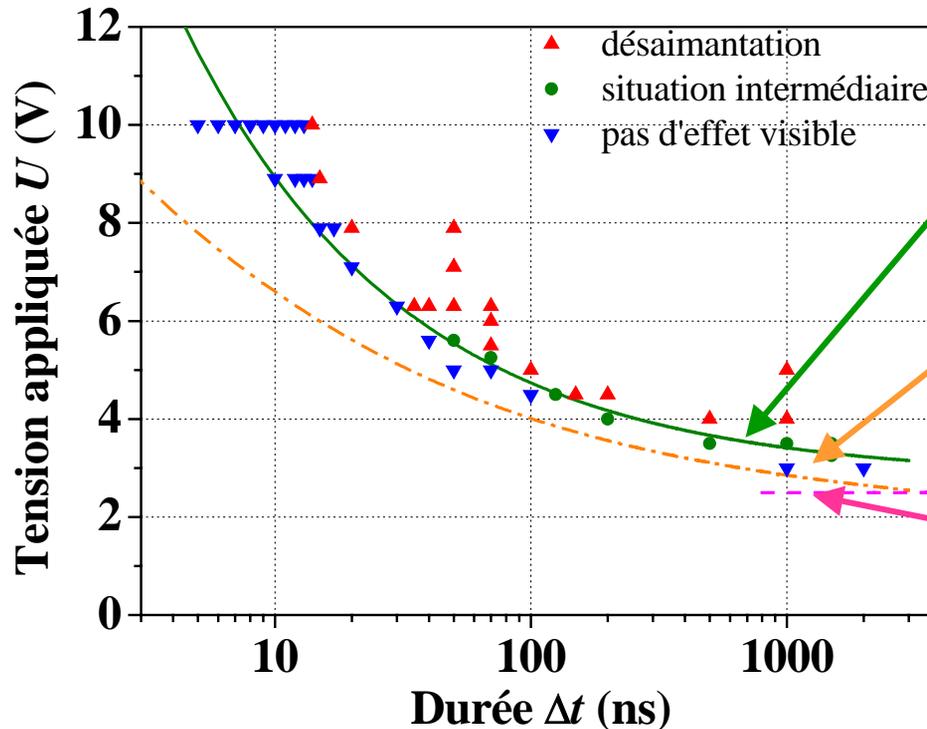
## ➤ Aucun signe d'un possible effet de transfert de spin

- Probablement masqué par l'échauffement par effet Joule ( $T_C = 365 \text{ K}$ )...
- ... à moins que  $J_{Co}$  et/ou  $P$  soient plus faibles que prévu

# Échauffement de la piste pendant une impulsion de courant

## ➤ Limite de désaimantation : courbe isotherme $T = T_C$ ?

- Énergie dissipée pendant l'impulsion :  $U^2 \Delta t / R$
- Dissipation par les contacts (bons conducteurs) et le substrat (500 nm d'isolant)



**Meilleur ajustement du type**  
 $(U - U_0)^2 \Delta t = \text{constante}$

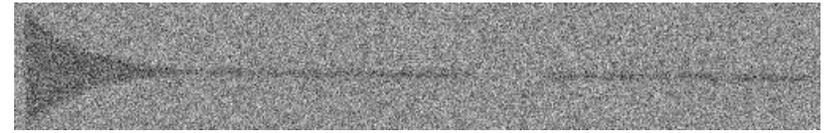
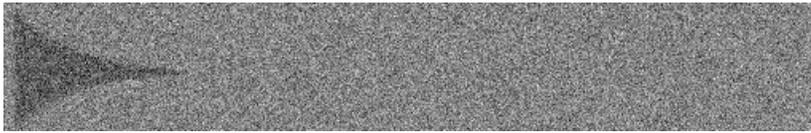
**Isotherme  $T = T_C$  calculée pour un substrat de SiO<sub>2</sub> d'épaisseur infinie**  
(You et al., *APL* **89**, 222513 (2006))

**Isotherme  $T = T_C$  estimée pour notre substrat Si / SiO<sub>2</sub> (seulement aux temps longs)**  
(You et al., *APL* **91**, 022507 (2007))

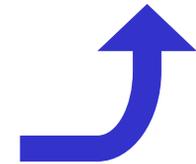
## ➤ Confirme l'hypothèse d'effets majoritairement thermiques

# Propagation sous champ assistée par courant

---



Impulsion de champ magnétique : 190 Oe, 1  $\mu$ s  
+ simultanément  
impulsion électrique : 2 V, 500 ns



- Sous champ seul, déplacement attendu  $\approx 10 \mu\text{m}$
- Ici, sous champ et courant, propagation d 'environ  $45 \mu\text{m}$  !
- Mais toujours pas d'effet de la polarité du courant

➤ **Vitesse de propagation augmentée par le courant**

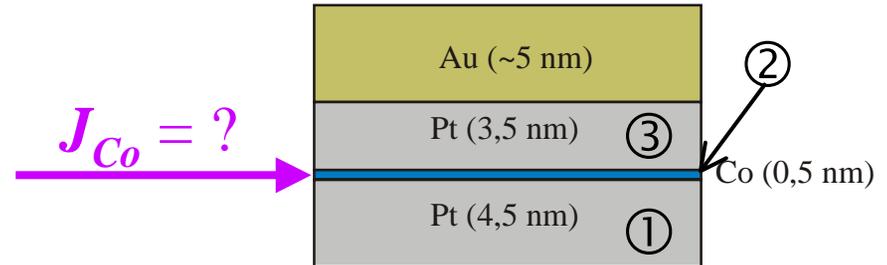
➤ **Propagation sous champ thermiquement activée**

- **Motivations – Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)**
- **Magnétomètre Kerr polaire pour des mesures à l'échelle nanométrique**
- **Renversement sous champ d'un empilement magnétique MRAM**
- **Propagation de parois sous champ et courant dans des nano-pistes lithographiées**
  - Dynamique d'une paroi de domaine sous champ et/ou courant
  - Pt / Co (0,5 nm) / Pt à anisotropie perpendiculaire irradié He<sup>+</sup>
  - Parois de domaines dans des pistes lithographiées de Pt/Co/Pt
  - Courant polarisé en spin dans le cobalt : pourquoi pas de transfert de spin ?

# Courant polarisé en spin dans le cobalt

## ➤ Seulement 0,5 nm de Co pour une épaisseur totale de métal de 13,5 nm

- Effets d'interfaces prédominants sur la résistivité  $\rho$  du massif
- Peu de matière magnétique, donc quelle polarisation du courant ?



## ➤ Calcul statistique (Boltzmann) basé sur le modèle de Fuchs-Sondheimer

- Chaque interface modélisée par un coefficient effectif de réflexion spéculaire
- Calcul pour chaque couche avec des conditions aux limites coordonnées aux interfaces 12 et 23
- 2 canaux de spin traités en parallèle (modèle à 2 courants ( $\uparrow$  et  $\downarrow$ ))
- Films minces par rapport au libre-parcours moyen électronique  $l \Rightarrow$  spin-flip négligé

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{Pt}, \rho_{Co}, \alpha = \rho_{Co\downarrow} / \rho_{Co\uparrow} \\ \rho l = \text{constante} \\ \tau_{12\uparrow}, \tau_{23\uparrow}, \tau_{12\downarrow}, \tau_{23\downarrow} \\ p_1, p_3 \end{array} \right.$$

(Sondheimer, *Adv. Phys.* **1**, 1 (1952))

# Courant polarisé en spin dans le cobalt

---

## ➤ Résultat du calcul :

$$\bullet I_{Co} \approx 0,03 I_{Pt/Co/Pt} \quad \Rightarrow \quad J_{Co} \approx 3,7 \times 10^{10} \text{ A.m}^{-2}.\text{V}^{-1}$$

$$\bullet PI_{Co} \approx 0,006 I_{Pt/Co/Pt} \quad \Rightarrow \quad PJ_{Co} \approx 7,4 \times 10^9 \text{ A.m}^{-2}.\text{V}^{-1}$$

(Valeurs relativement stables dans la gamme de paramètres pertinente)

- **100 % des électrons participent à l'échauffement par effet Joule**
- **Seulement 6 électrons sur 1000 peuvent participer au transfert de spin**
- **Compte-tenu de la faible valeur de  $T_C$ , il est impossible d'atteindre une densité de courant polarisé en spin suffisante pour faire propager une paroi (typiquement  $10^{12} \text{ A.m}^{-2}$ )**

# Conclusion et perspectives

---

- **Il n'a pas été possible d'observer la propagation de parois par transfert de spin dans des pistes de Pt/Co/Pt irradié**
  - Malgré une optimisation extrême du point de vue de la mobilité des parois
  - Dû au rapport défavorable entre effet Joule et transfert de spin
- **Approche néanmoins bien en phase avec des résultats positifs très récents**
  - Démonstration des avantages d'une anisotropie perpendiculaire et d'une géométrie optimisée
  - Résultats encourageants dans des systèmes à anisotropie perpendiculaire très proches du nôtre :
    - films plus épais (multicouches Co/Ni, CoCrPt)
    - système Pt/Co/AlO<sub>x</sub>, par ailleurs parfaitement adapté à la réalisation de jonctions tunnel magnétiques

# Mercis...

---

- **Aux chercheurs, doctorants et postdocs du LPS, en particulier :**  
J. Ferré, A. Mougin, J.-P. Jamet, A. Thiaville, S. Rohart, J. Miltat, N. Vernier, J.-P. Adam, P. J. Metaxas, K. March...
- **À ALTIS Semiconductor :**  
S. Bournat, W. Raberg, R. Dittrich.
- **À nos partenaires d'autres laboratoires :**  
B. Rodmacq, V. Baltz (SPINTEC) ;  
J. Fassbender (Forschungszentrum Dresden-Rossendorf) ;  
J. Gierak, E. Bourhis, G. Faini (LPN) ; ...
- **Aux personnels des services techniques et administratifs du LPS :**  
R. Weil, « Monsieur Nanofabrication »  
V. Klein, J.-P. Cromières, et le service soutien aux expériences ;  
G. Guillier, et le service mécanique ;  
le service informatique, l'administration, le service patrimoine-logistique ; ...
- **À l'A.N.R.T. pour le financement CIFRE.**

*Merci pour votre attention...*