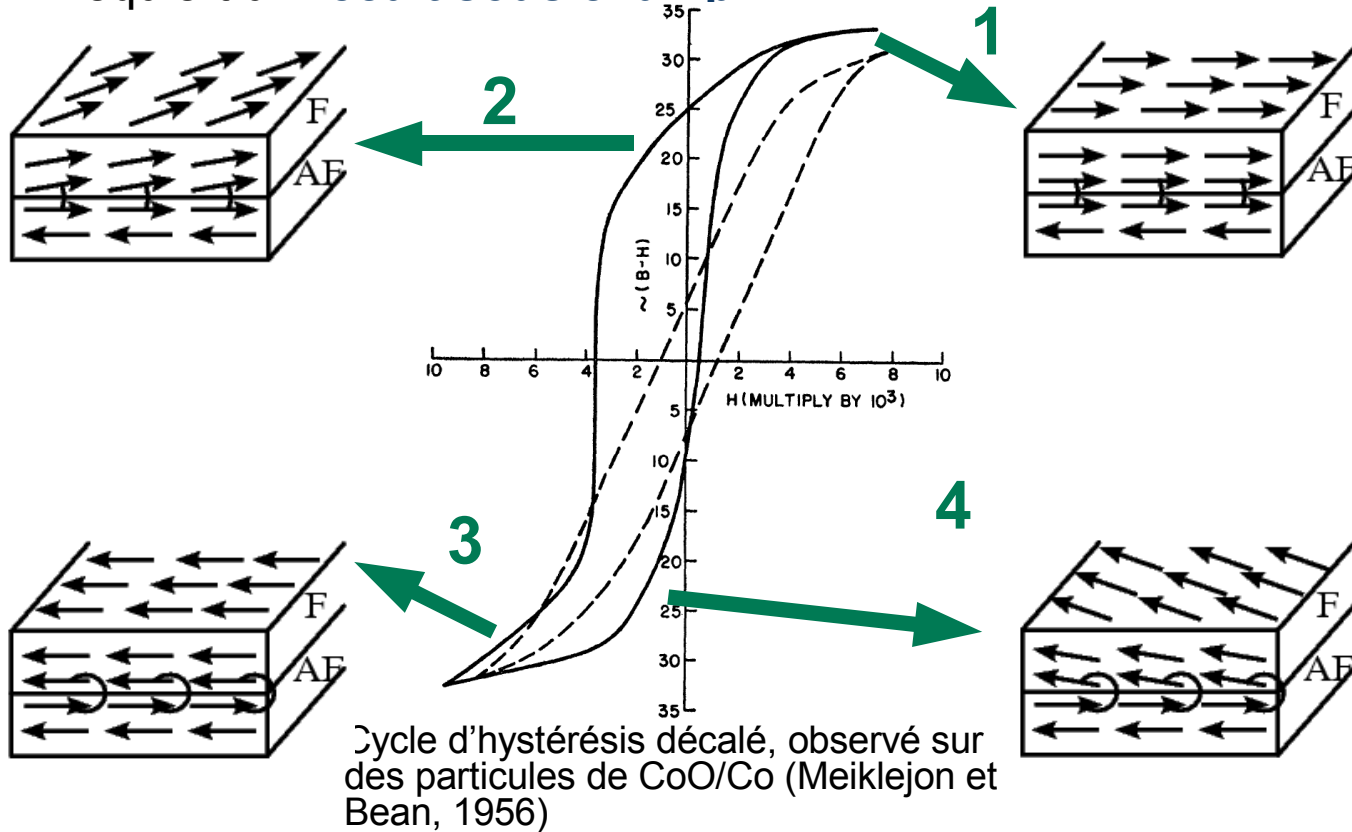


Alliage antiferromagnétique MnPt : croissance, propriétés magnétiques et structurales

Jérôme Borme

Introduction > Contexte > Couplage d'échange

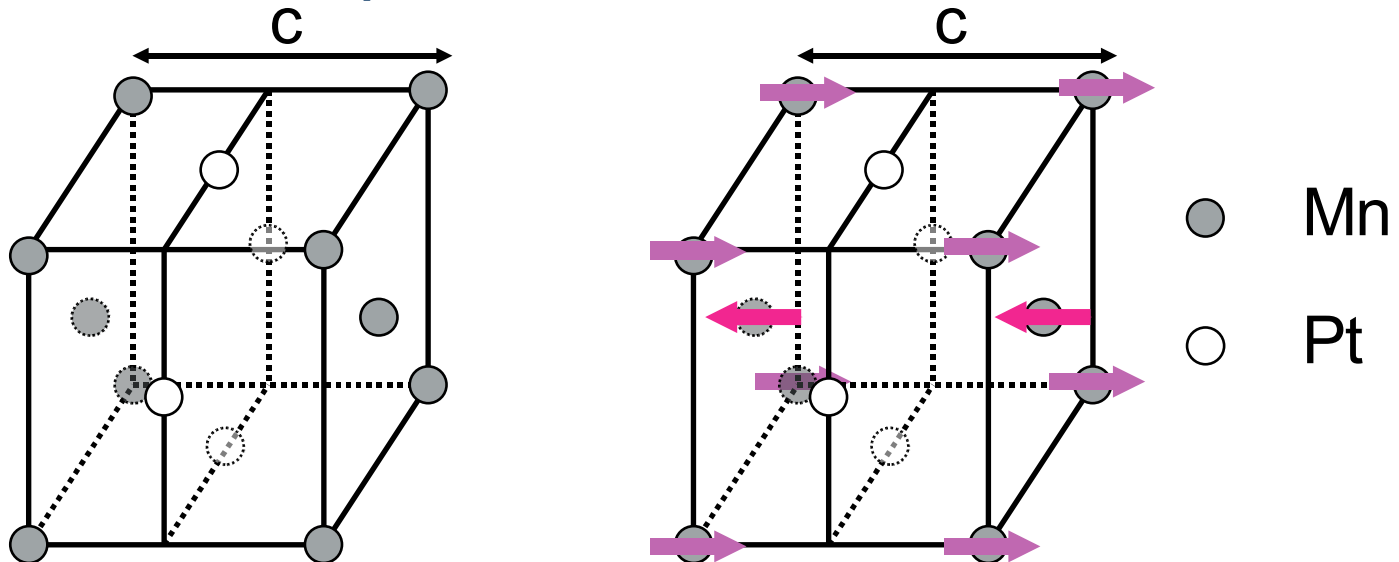
- Une **interaction d'interface** entre une couche ferromagnétique et une couche antiferromagnétique
- Se manifeste notamment par un **décalage du cycle d'hystérésis**
- Requiert un **recuit sous champ**



- **A trouvé d'importantes applications**

Introduction > Choix du système

- Couplage d'échange **mal compris**
- Choix d'un **système modèle**
 - couches épitaxiées, structuralement bien définie
 - alliage bimétallique
 - caractérisations avancées du système
- Propriétés de MnPt (massif)
 - structure **L1₀** (tétragonal, axe *c* non équivalent)
 - **antiferromagnétique** ($T_N \approx 970$ K) lorsque chimiquement ordonné
 - **forte anisotropie**



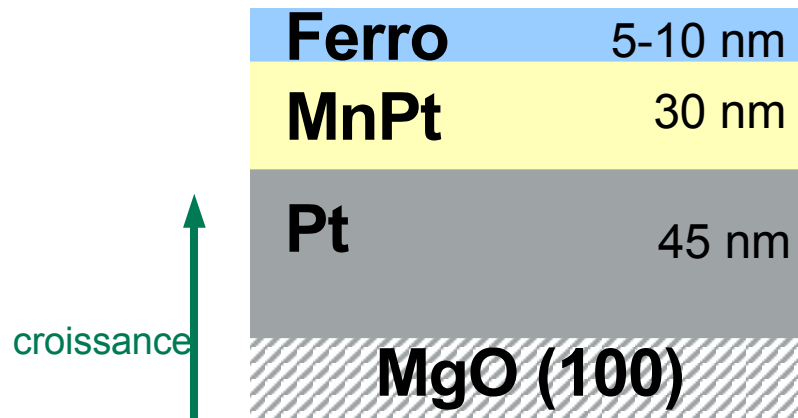
Plan

- Contexte
 - couplage d'échange
 - choix du système
 - propriétés de MnPt massif
- **Le système MnPt bivariant**
 - **croissance**
 - **ordre chimique**
 - **le couplage d'échange de bicouches Fe/MnPt**
- Modélisation
 - le modèle
 - la méthode
 - comparaison aux mesures
- Écarts aux hypothèses
 - fluctuations d'aimantation
 - parois magnétiques
- Conclusion

MnPt bivariant > dépôts

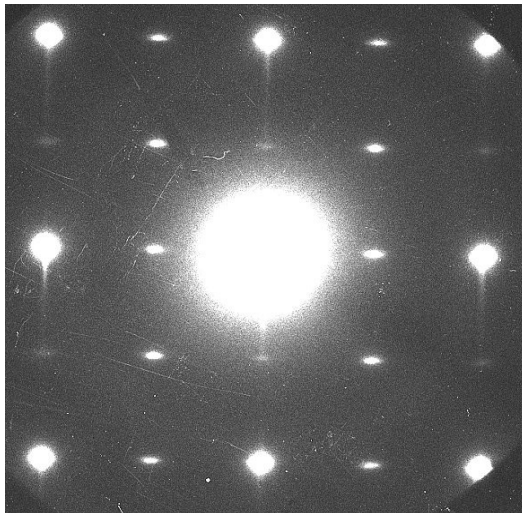
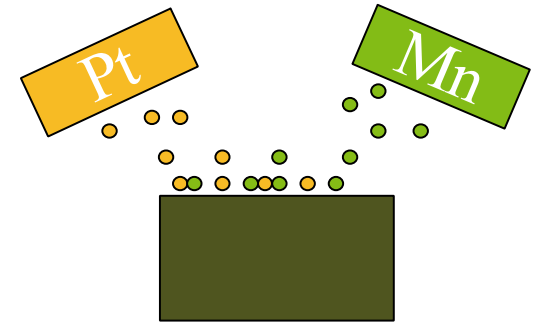
— Croissance

- **Épitaxie** par jets atomiques
- Sur MgO (100)
- Dépôt MnPt dans diverses conditions (codépôt, couche par couche, température ambiante ou plus élevée)

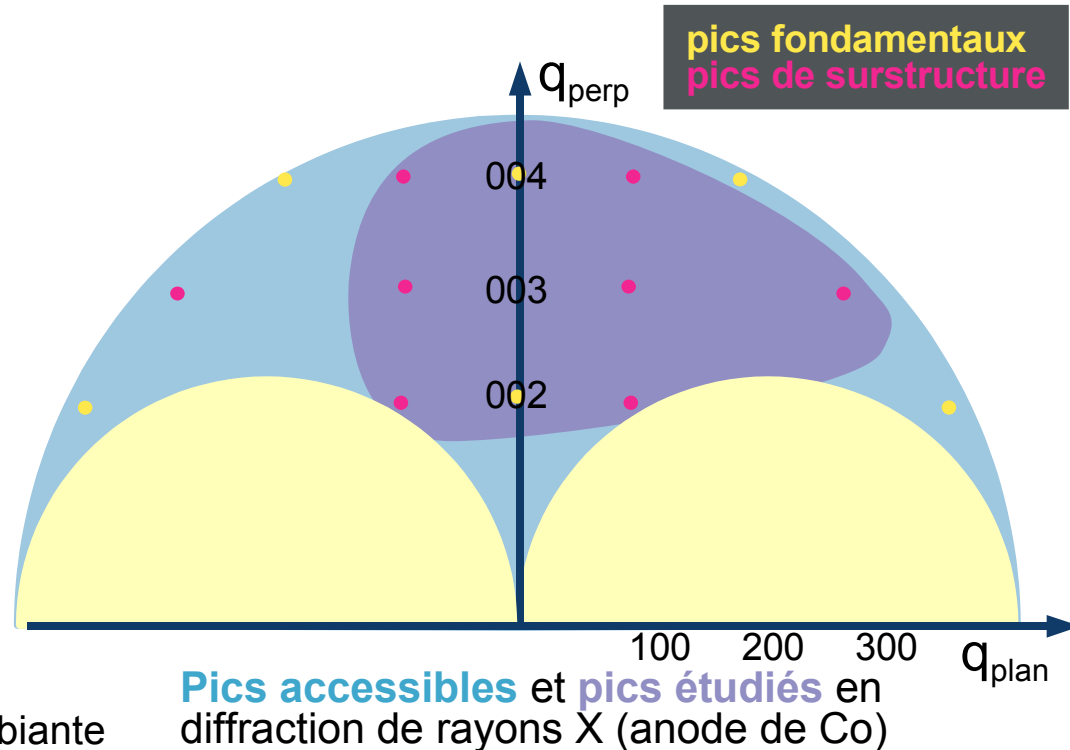


MnPt bivariant > croissance

- Une structure originale
 - **bivariée**, axe c dans le plan (deux orientations)
 - Observation en diffraction d'électrons
 - Quantification par diffraction de rayons x
- Comportement différent des autres alliages binaires étudiés au laboratoire

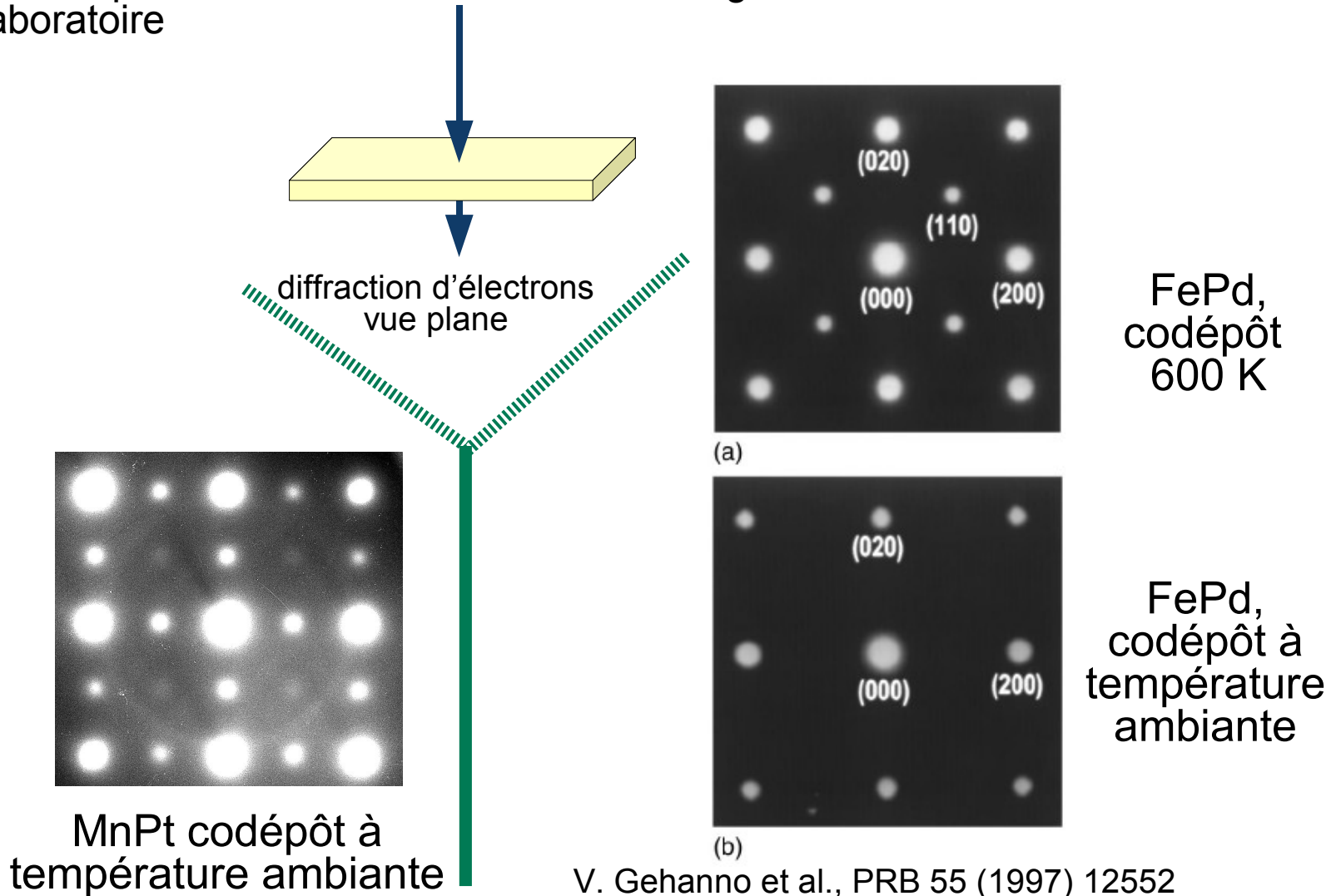


Cliché de diffraction d'électrons
(coupe transverse)
MnPt codéposé à température ambiante



MnPt bivariant > croissance

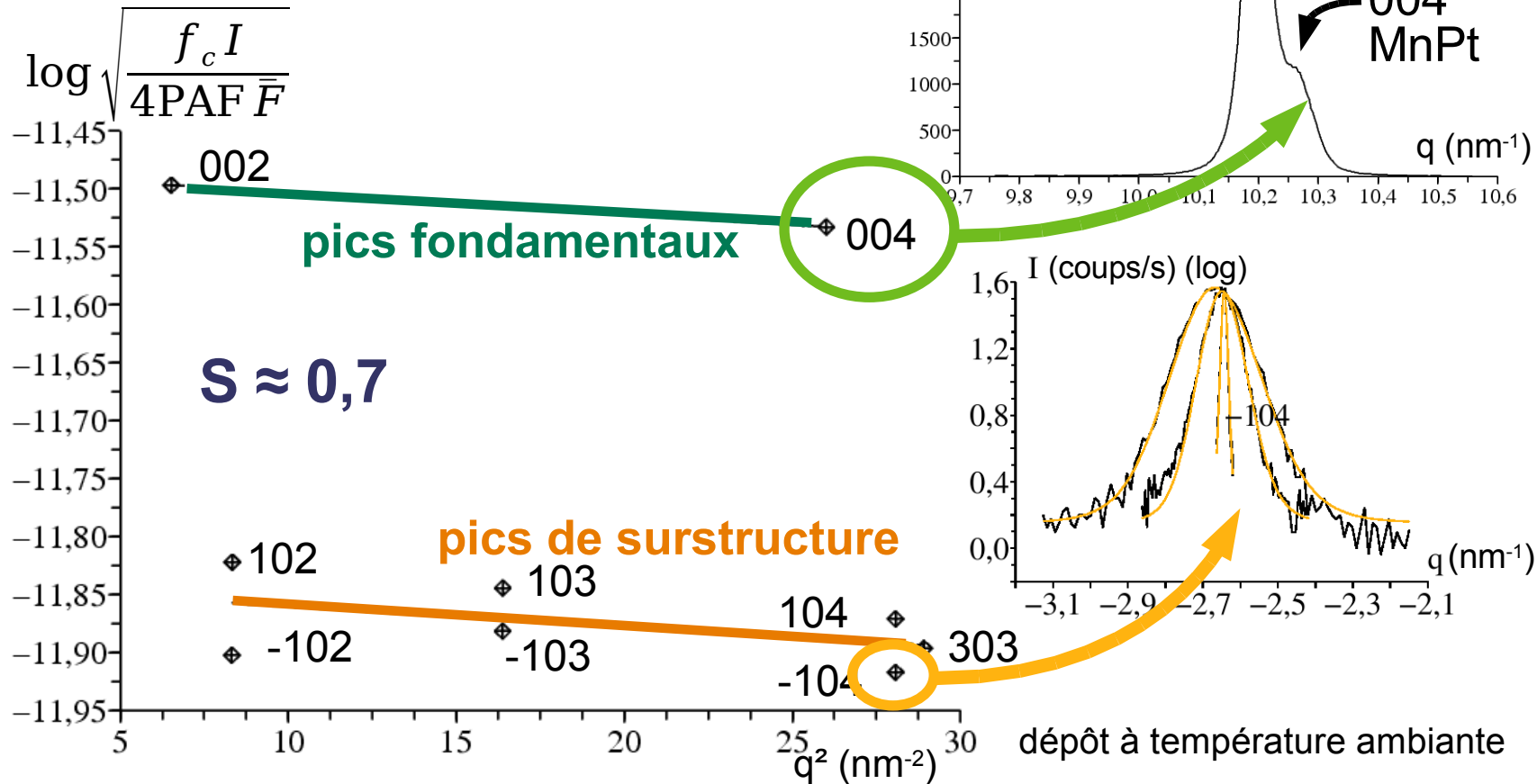
— Comportement différent des autres alliages binaires étudiés au laboratoire



MnPt bivariant > ordre chimique

— Quantification de l'ordre chimique

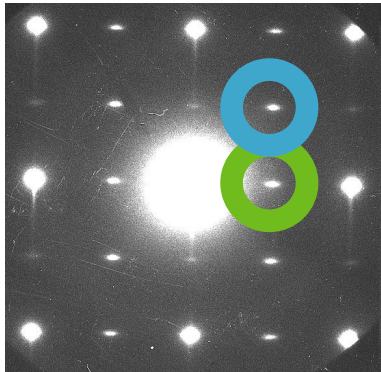
- séparation des pics
- comparaison des intensités des pics fondamentaux et de surstructure



MnPt bivariant > microscopie

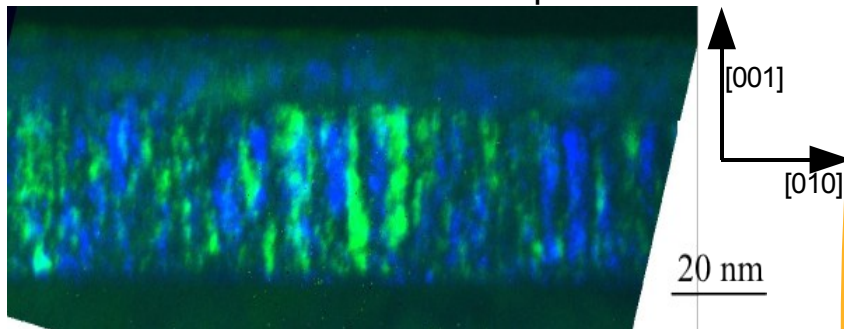
- Deux **variants**
 - 5 – 8 nm de large
 - **allongés** dans la direction [110]
- Croissance **colonnaire**

diffraction d'électrons

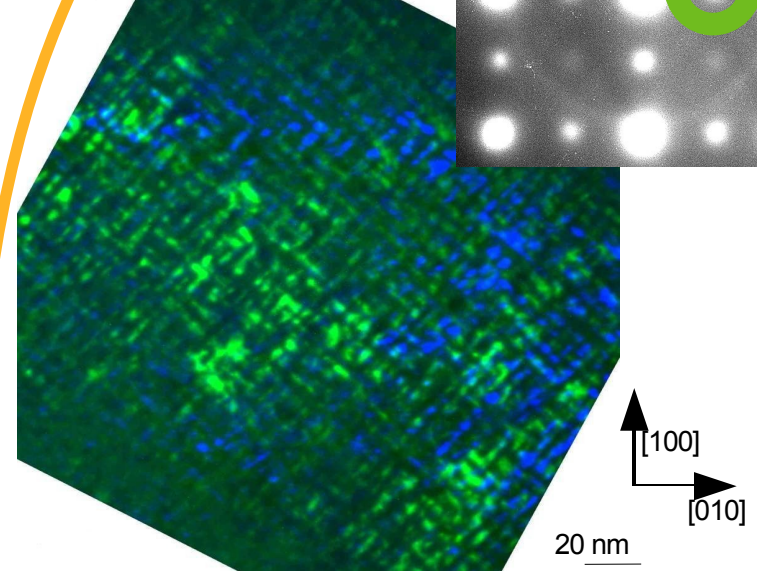


coupe transverse

champ sombre

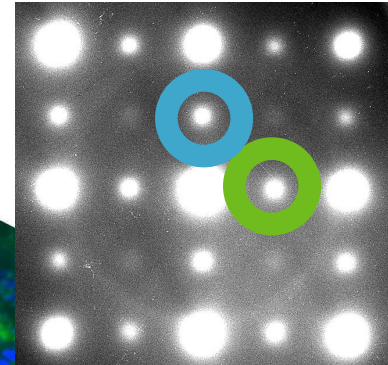


champ sombre



vue plane

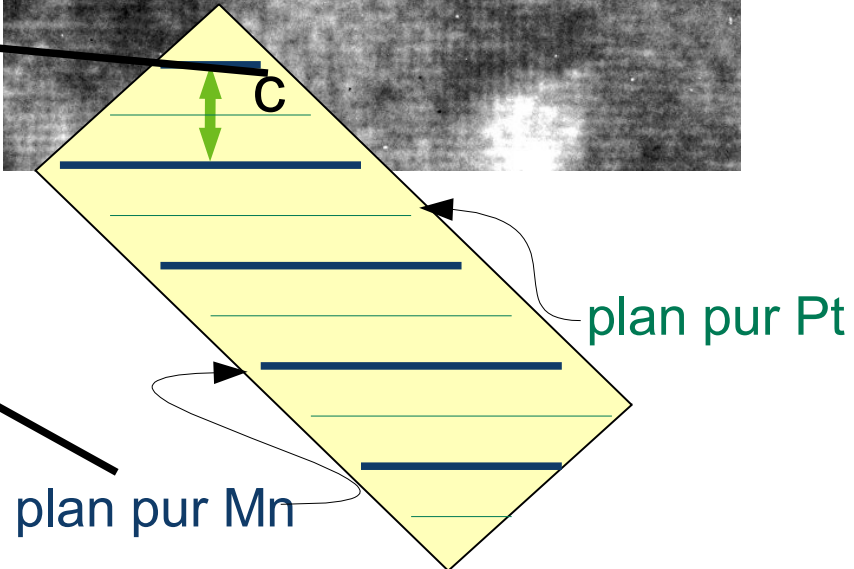
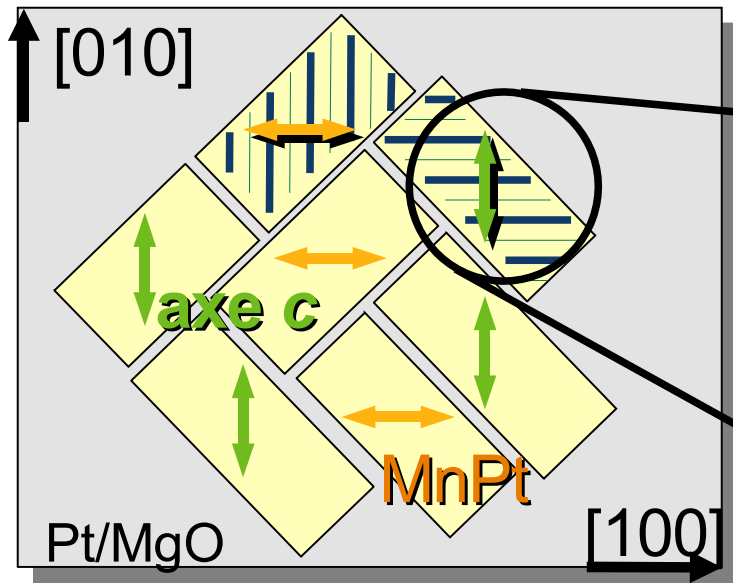
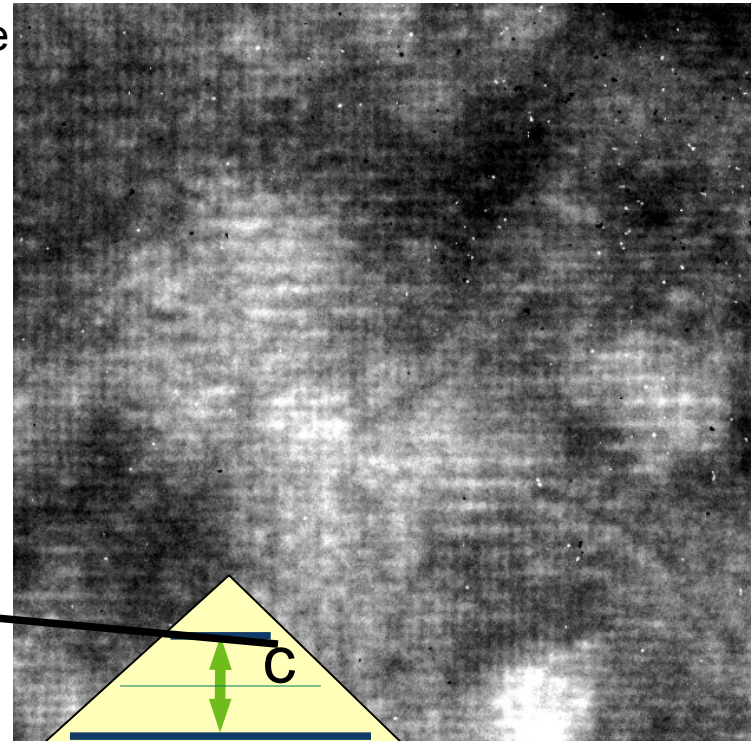
diffraction d'électrons



MnPt bivariant > variants

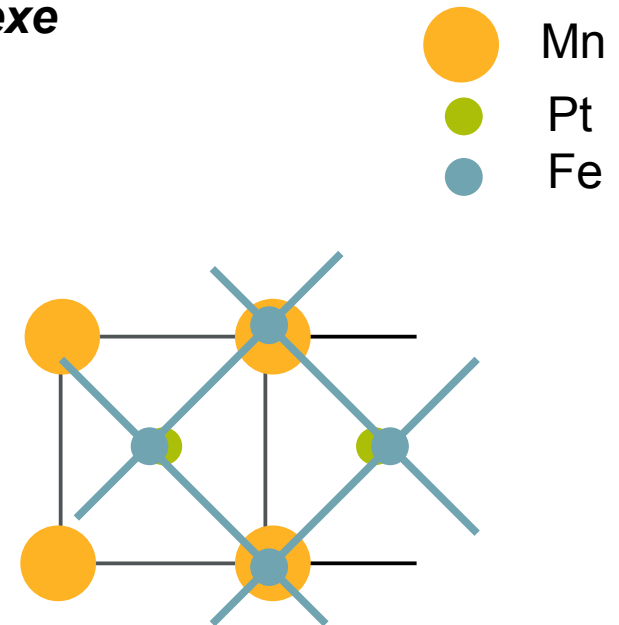
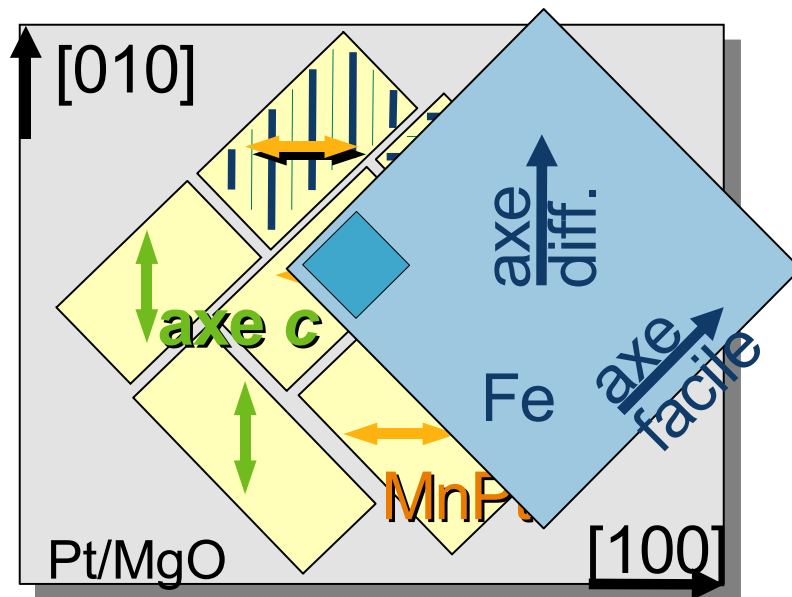


vue plane
MEHR
2 nm



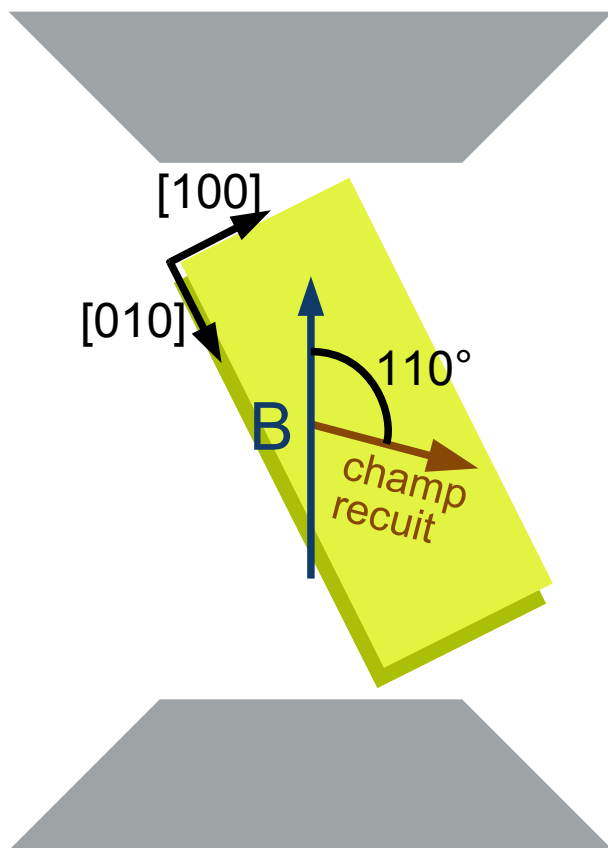
MnPt bivariant > création d'échange

- **Création d'échange** dans les bicouches Fe (10 nm)/MnPt (30 nm)
 - recuit sous champ
 - Compétition entre **anisotropies**
 - anisotropies **uniaxiales** de chacun des variants PtMn
 - anisotropie **quadratique** du ferromagnétique (Fe)
 - anisotropie **unidirectionnelle** due au recuit sous champ
- **comportement angulaire complexe**

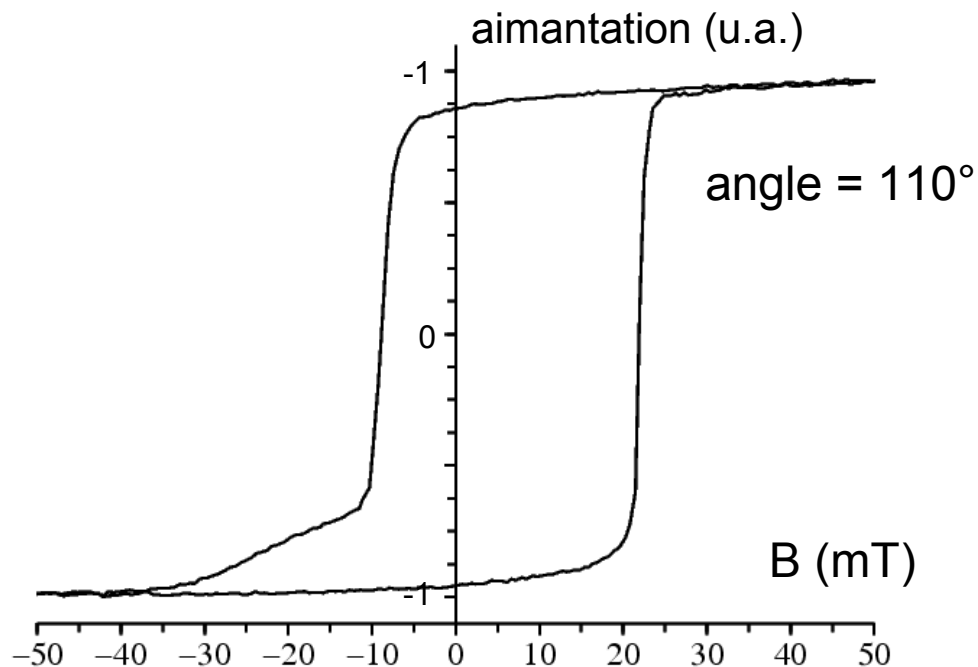


MnPt bivariant > création d'échange

- Compétition entre **anisotropies**
 - existence d'échange
 - cycles asymétriques



Fe (10 nm)/MnPt (30 nm)/Pt



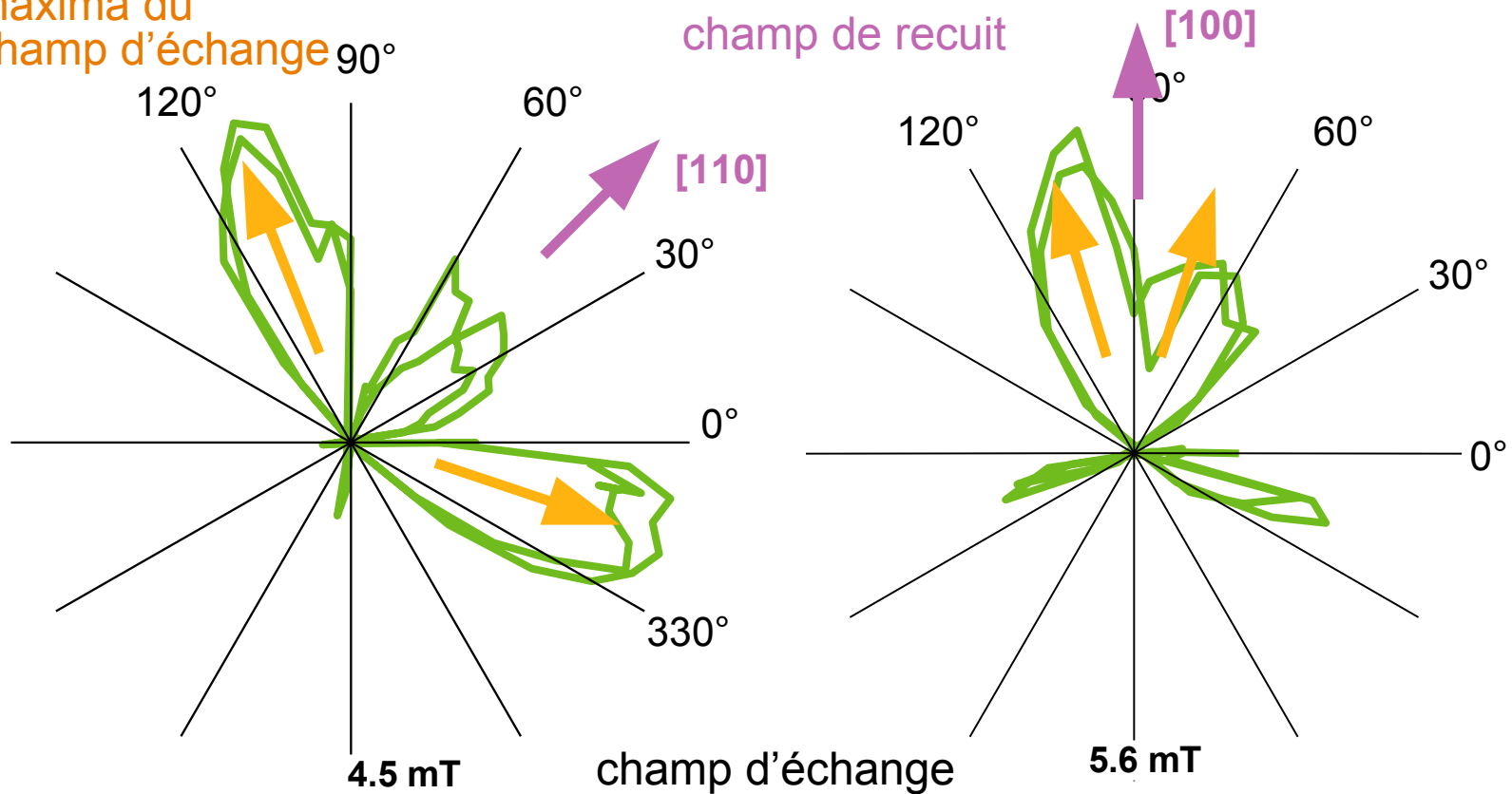
MnPt bivariant > évolution angulaire

— Mesure du cycle d'hystérésis en fonction de l'angle du champ appliqué

- Le **maximum du champ d'échange** n'est pas dirigé selon la direction de recuit sous champ

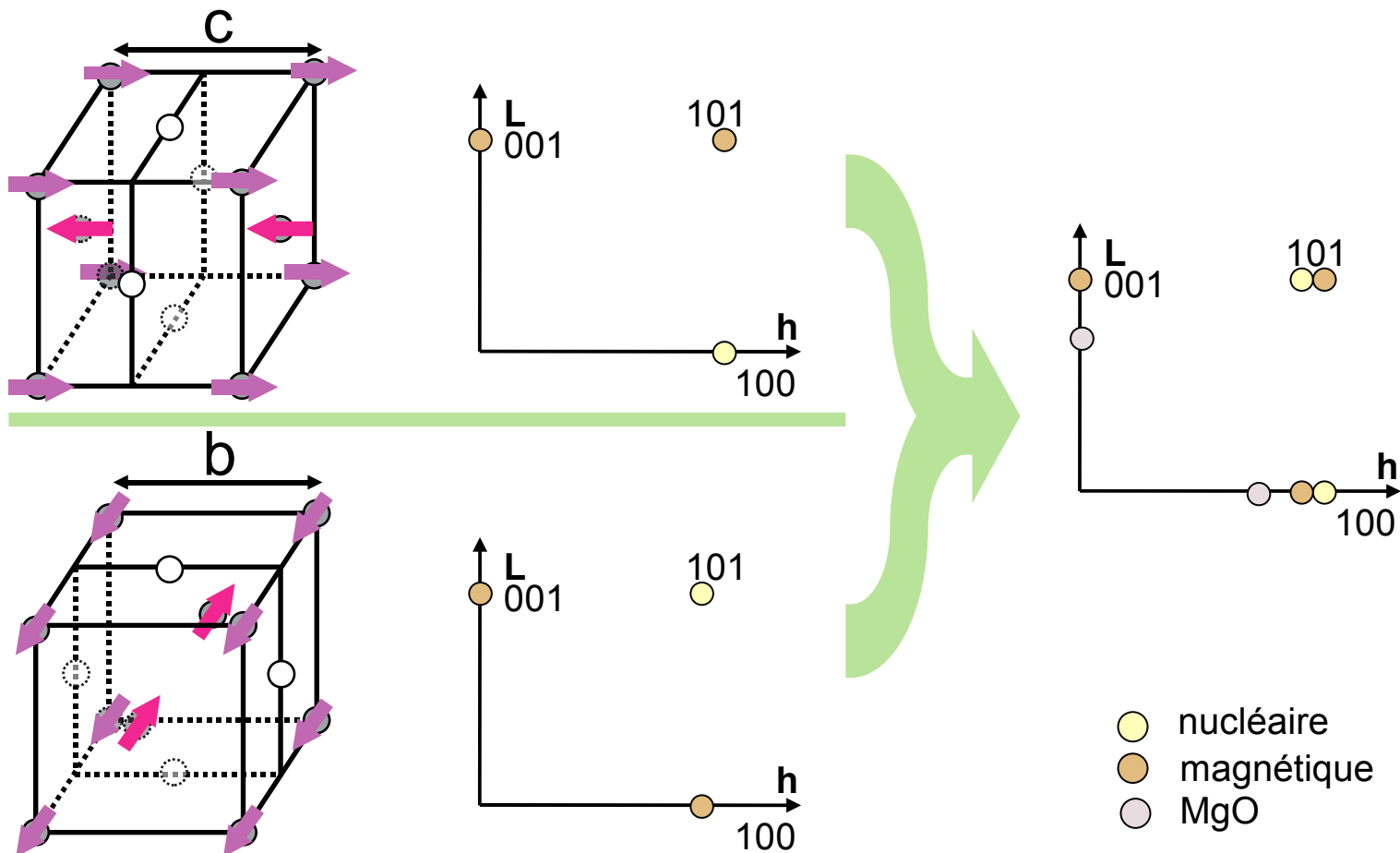


maxima du champ d'échange 90°

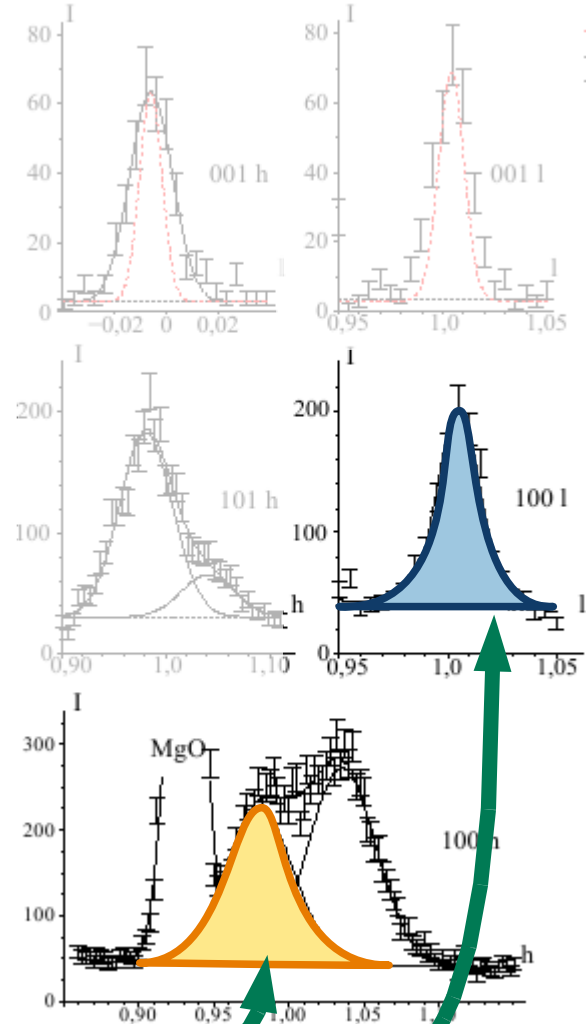
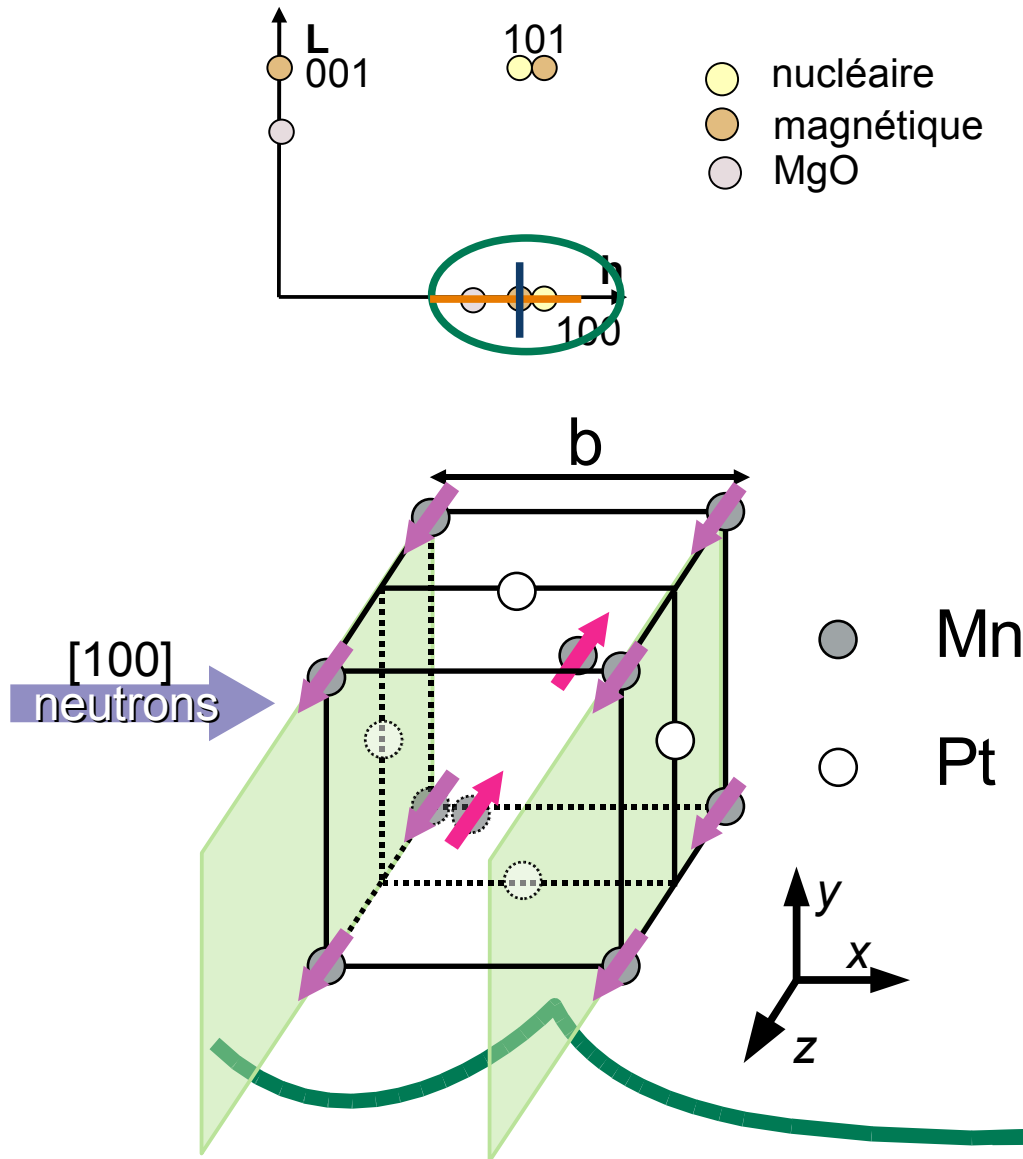


MnPt bivariant > structure magnétique

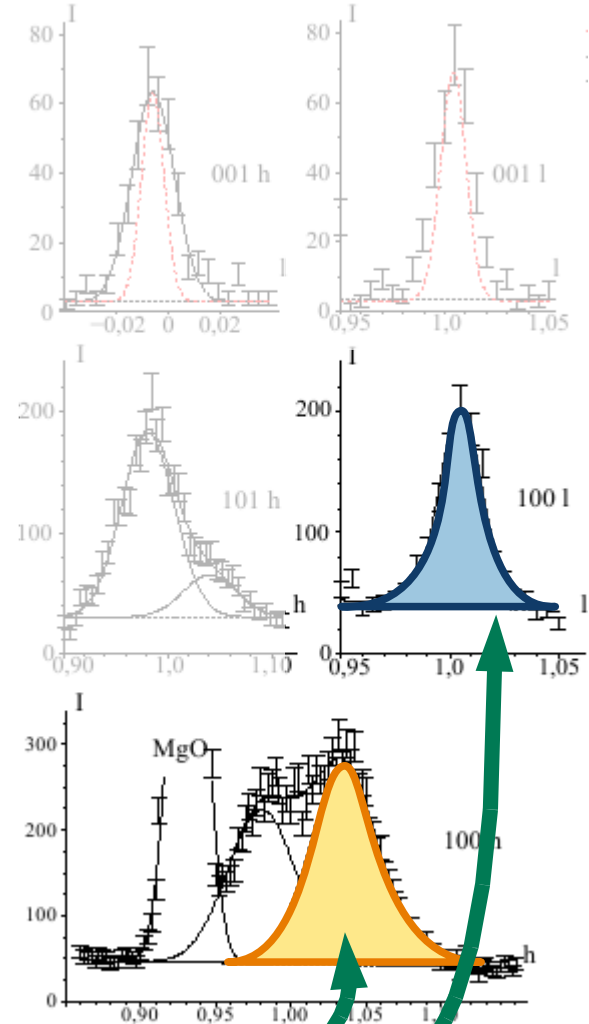
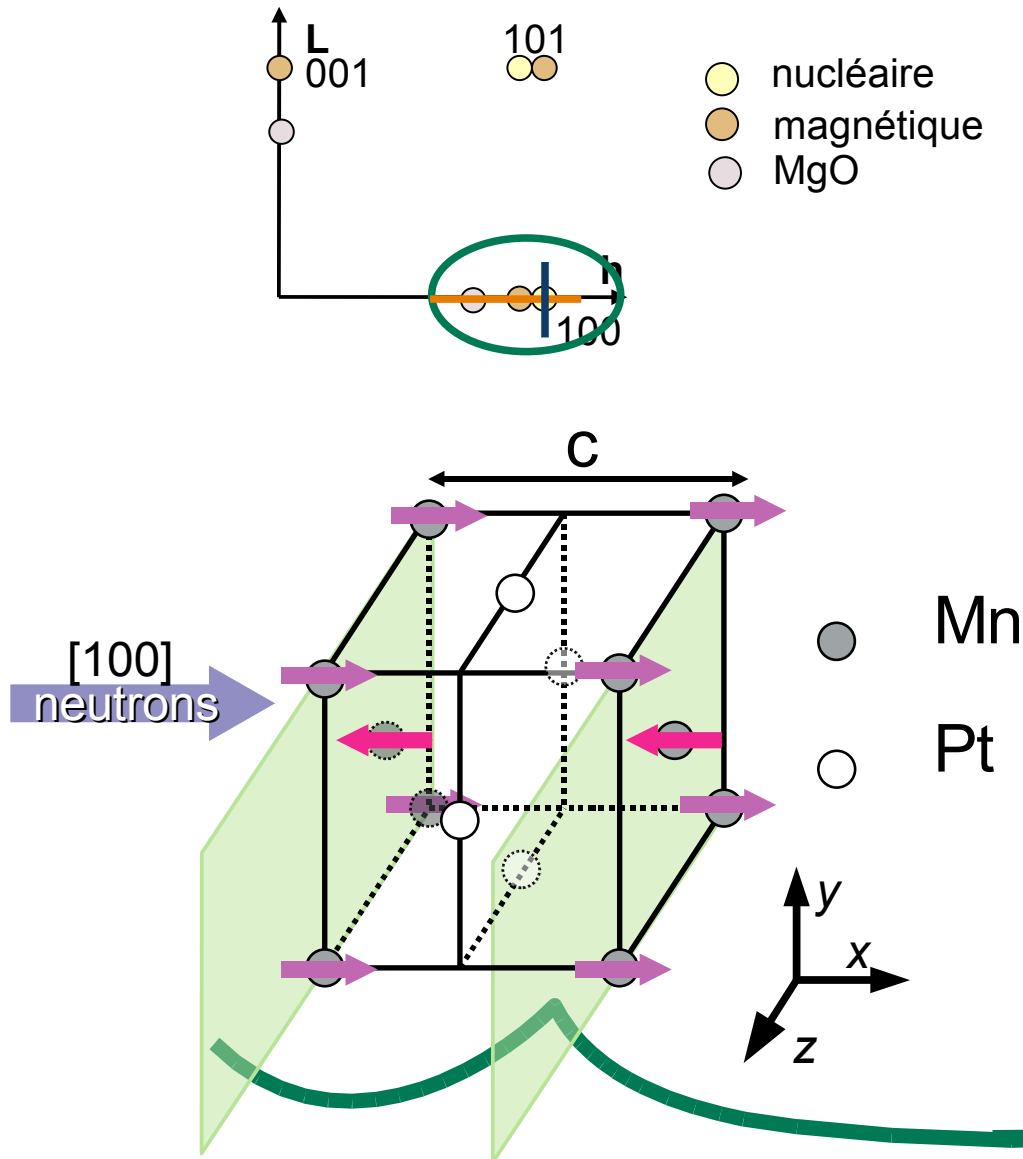
- Interaction neutron/matière **sensible au magnétisme**
- La structure bivariée entraîne une plus grande complexité



MnPt bivariant > structure magnétique

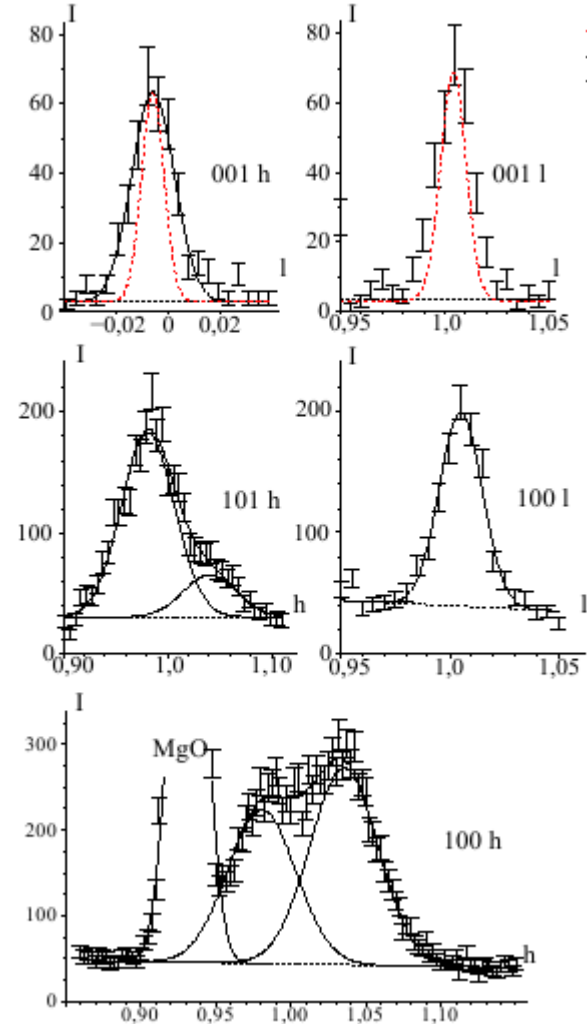
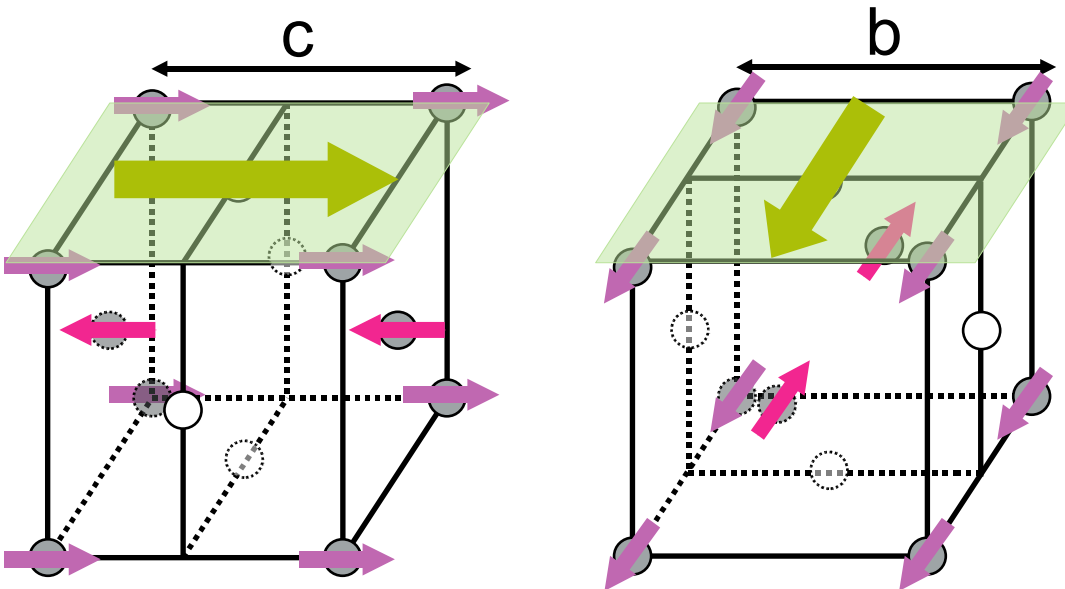


MnPt bivariant > structure magnétique



MnPt bivariant > structure magnétique

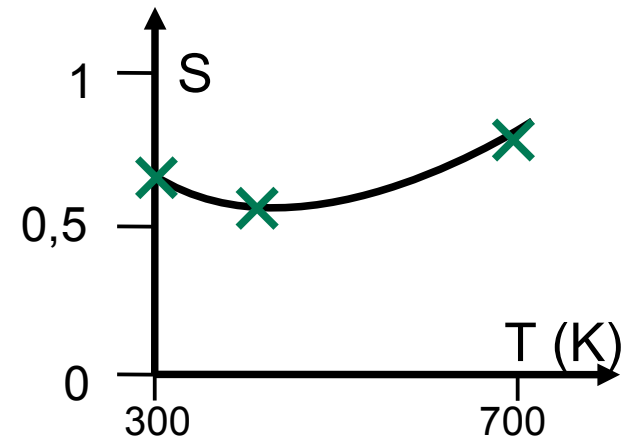
- confirmation de la **structure magnétique** (moments // axe c)
- **largeurs magnétique** comparable à la largeur structurale
- cristallites **monodomaines magnétiquement**
- les variants portent à leur surface une **aimantation non compensée**



Systeme MnPt bivariant > résumé

— Structure

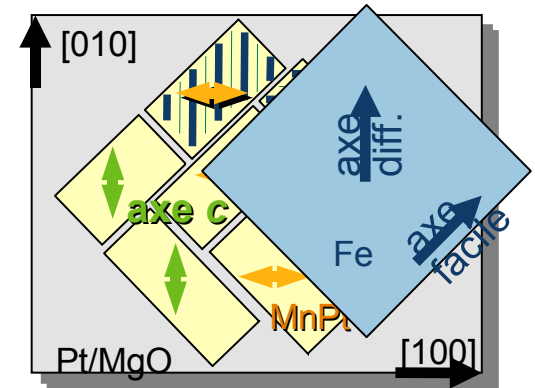
- Un alliage **chimiquement ordonné**
 - **ordre élevé** obtenu pour des dépôts à température ambiante
 - l'ordre évolue légèrement avec la **température de dépôt**



Système MnPt bivariant > résumé

— Structure

- Un alliage **chimiquement ordonné**
 - **ordre élevé** obtenu pour des dépôts à température ambiante
 - l'ordre évolue légèrement avec la **température de dépôt**
- Présence de deux variants
 - les dépôts sont **bicristallins** (deux directions perpendiculaires)
 - axe *c* dans le plan
 - cristallites de 5 nm, allongés
- Les variants portent une aimantation de surface non compensée



— Propriétés magnétiques

- Complexes
- renversements d'aimantation **asymétriques**
- **maximum de champ** d'échange selon une direction différente de celle du champ lors du recuit

Plan

- Contexte
 - couplage d'échange
 - choix du système
 - propriétés de MnPt massif
- Le système MnPt bivariant
 - croissance
 - ordre chimique
 - le couplage d'échange de bicouches Fe/MnPt
- **Modélisation**
 - **le modèle**
 - **la méthode**
 - **comparaison aux mesures**
- Écarts aux hypothèses
 - fluctuations d'aimantation
 - parois magnétiques
- Conclusion

Modélisation > présentation

— Le modèle tient compte de l'**anisotropie uniaxiale des deux variants**, de l'**anisotropie du fer**, du **couplage d'interface entre F et AF** et du **couplage entre les moments piégés de l'AF et le F**

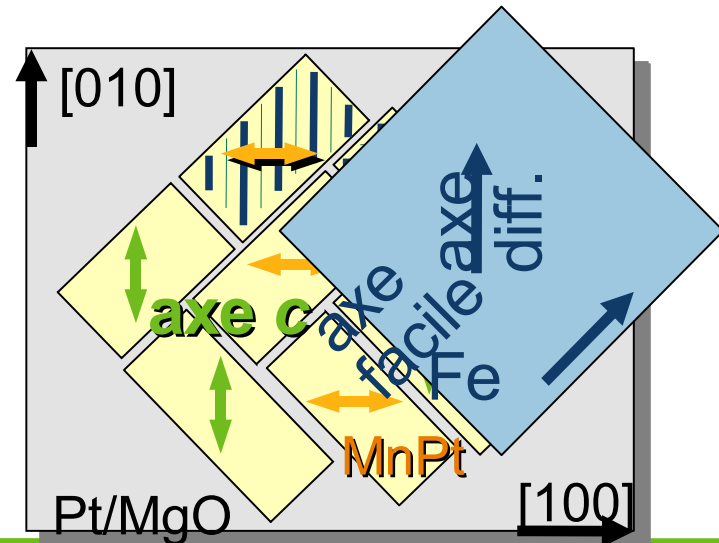
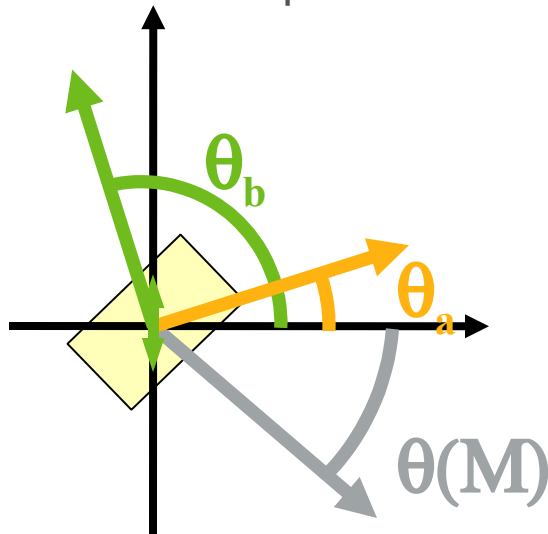


$$E = -\vec{M}^F \vec{H} - \frac{J \vec{M}^F}{M^F} \left(\frac{\vec{M}^{AF_2} + \vec{M}^{AF_2}}{M^{AF}} \right) \quad \leftarrow \text{couplage F/AF}$$

anisotropie des variants $\rightarrow -K_2^{AF} (\cos^2 \theta_a + \sin^2 \theta_b)$

terme dépendant du recuit $\rightarrow -\vec{M}^F \vec{h}$

anisotropies du fer $\rightarrow +K_4^F (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2 - K_2^F \cos^2 \theta$



Modélisation > méthode

— Obtention des paramètres

1. Les paramètres des **variants a et b** sont supposés **égaux**

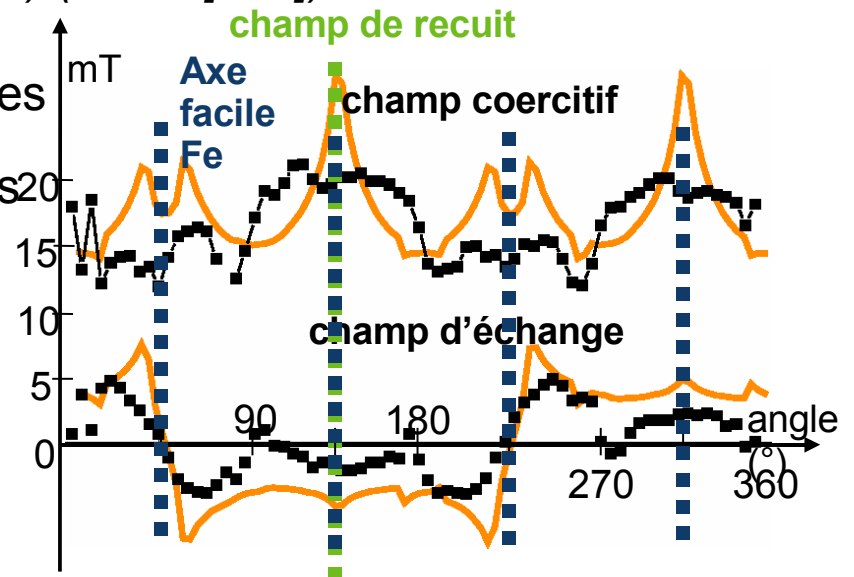
2. Obtention des paramètres par **ajustement du champ coercitif** produit par le modèle aux mesures effectuées sur le non recuit
 $K_F/M_F = 70$, $K_{AF}/M_F = 30$, $J/M = 200$

3. Utilisation des **mêmes paramètres** pour simuler les deux recuits sous champ, avec

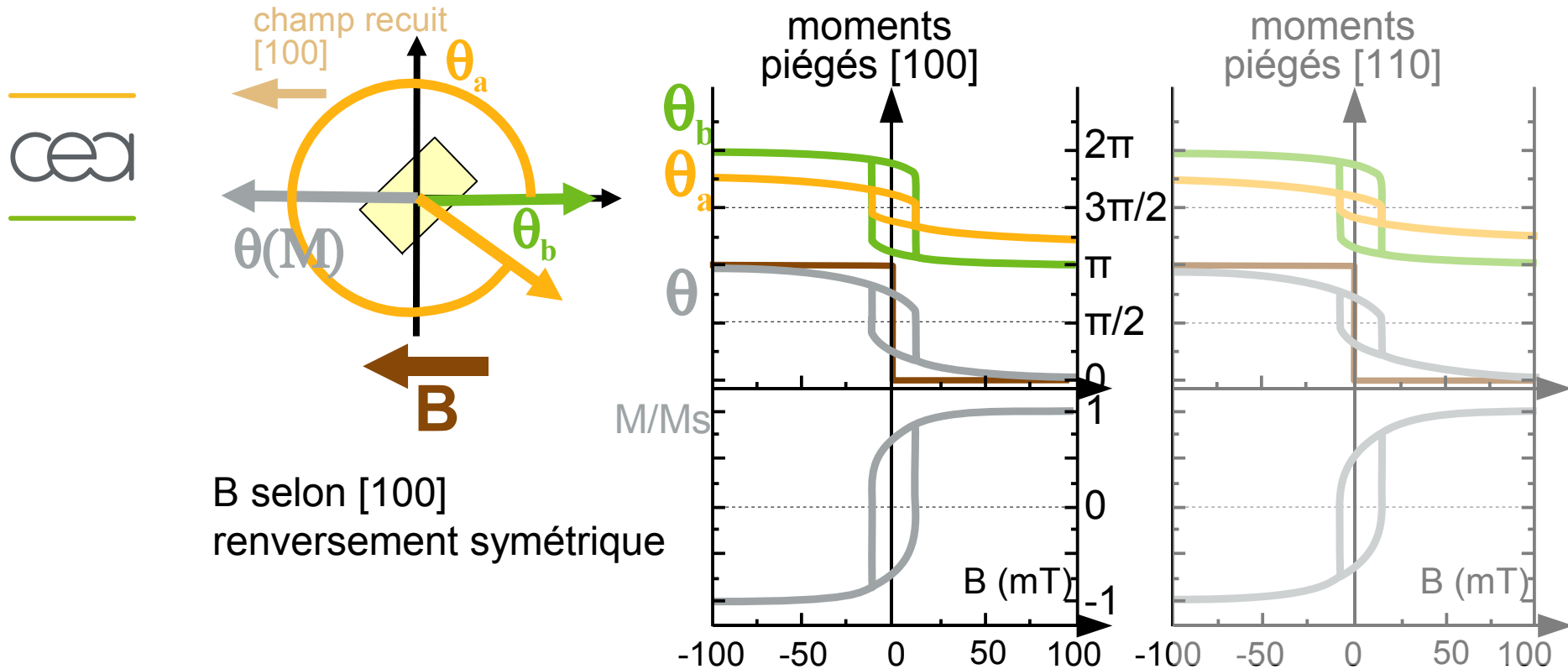
$$(M_{AF-a\text{-piégé}}, M_{AF-b\text{-piégé}}) = (40, 0) \text{ (recuit [110])}$$

$$(M_{AF-a\text{-piégé}}, M_{AF-b\text{-piégé}}) = (30, 30) \text{ (recuit [100])}$$

— Évolutions principales et symétries **reproduites**, mais désaccord du champ coercitif selon les directions de facile aimantation du fer.



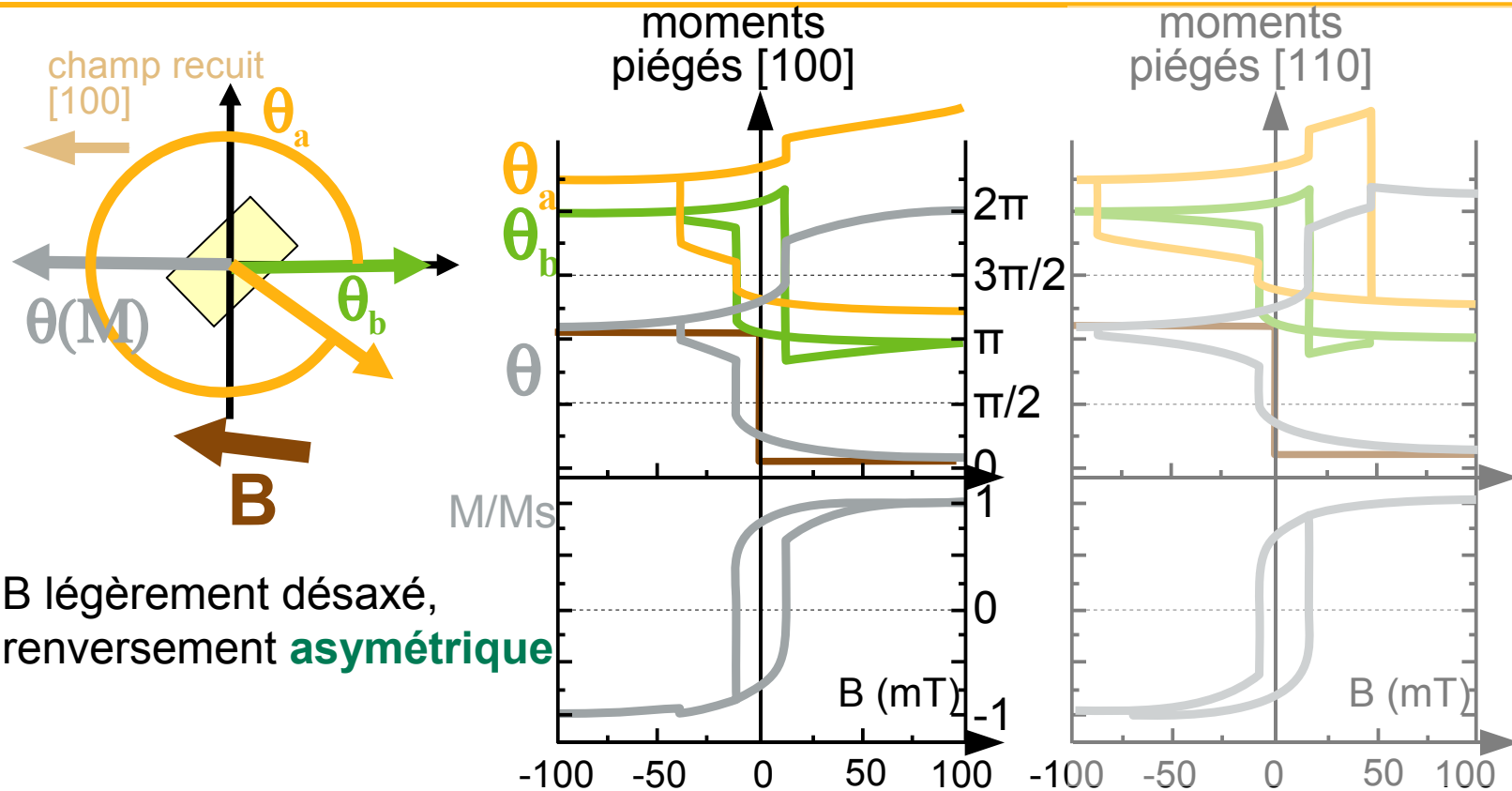
Modélisation > résultats



— B selon [100], renversement symétrique

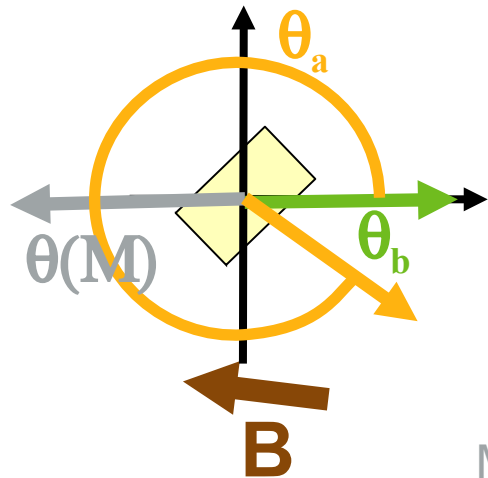
- L'**angle** entre les deux aimantations des variants **change très peu**
- Le **variant b bascule** entre ses deux sens (sur le même axe : π , 2π)
- Le **variant a** est amené loin de son axe d'anisotropie

Modélisation > résultats

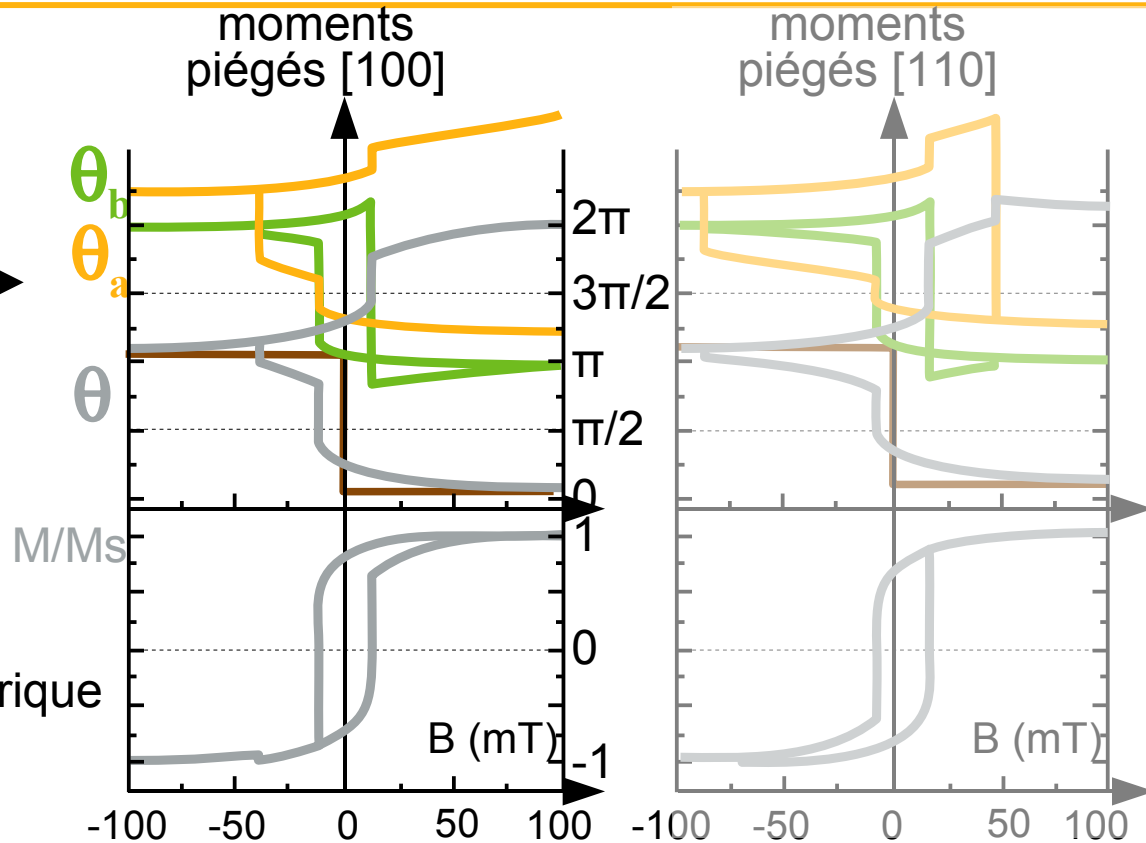


1. Alors que l'aimantation du fer tourne progressivement
 - Le **variant b** est éloigné progressivement de son axe
 - Le **variant a** tourne progressivement
2. Au champ coercitif
 - le **variant a** bascule vers un nouvel angle puis évolue progressivement
 - Le **variant b se renverse brutalement**

Modélisation > résultats

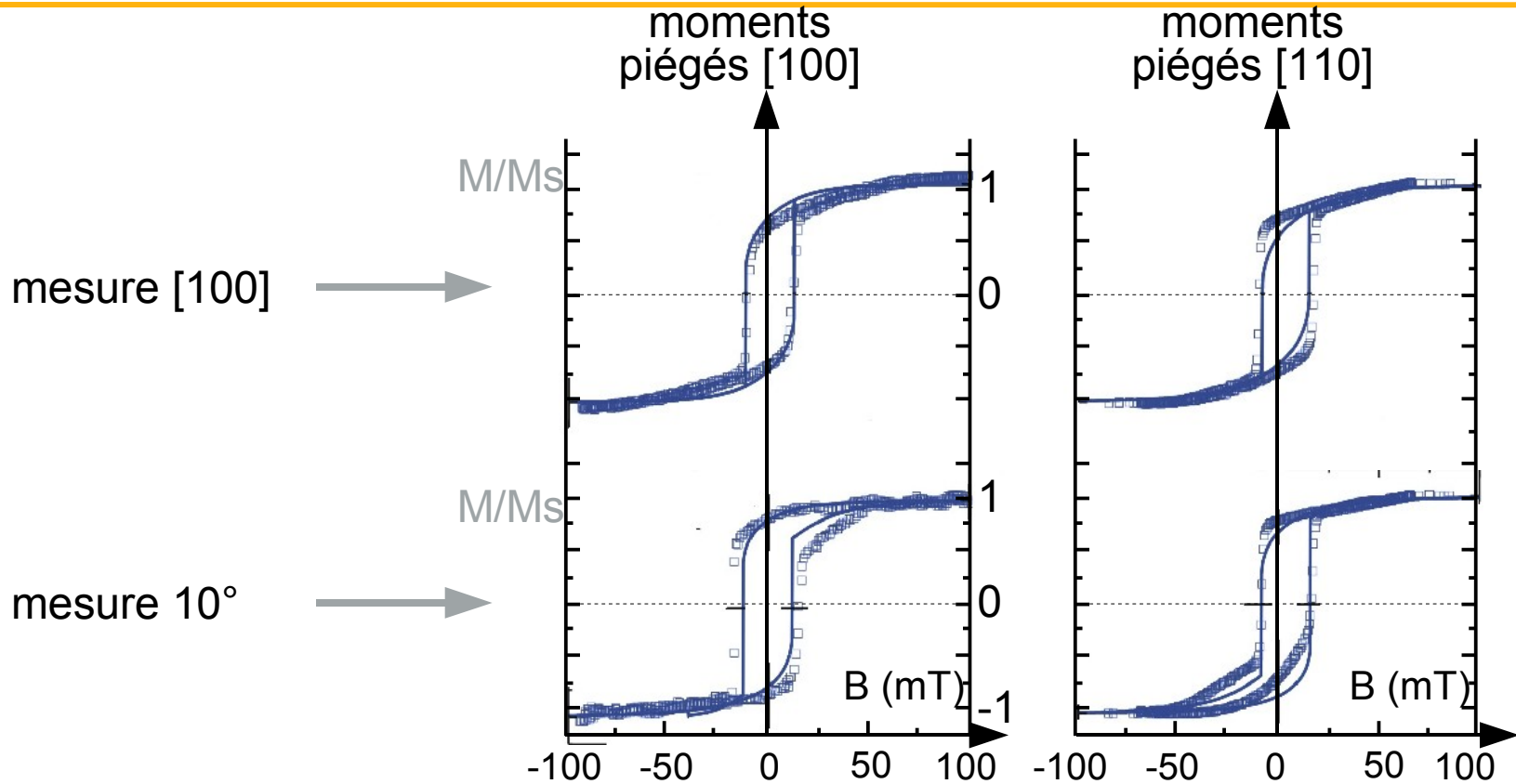


B légèrement désaxé,
renversement asymétrique



3. Dans la branche ascendante, le **variant b** tourne lentement depuis son axe d'anisotropie
4. Au champ coercitif, le **variant a** bascule de l'un à l'autre de ses axes d'anisotropie (pour suivre le fer)
5. Pour terminer le renversement, le **variant a** doit être amené en dehors de son axe d'anisotropie. C'est cela qui crée l'**ouverture du cycle**

Modélisation > Accord aux mesures



Reproduction de la **forme des cycles**



Illustration vidéo

Modélisation > résumé

— Réalisation d'une modélisation de type Stoner-Wohlfarth qui prend seulement en compte

- l'**échange interfacial**
- les **anisotropies**

— La modélisation permet

- d'**interpréter** les formes des cycles expérimentaux
- de **comprendre** le rôle de l'aimantation de surface de l'antiferromagnétique (accommodation angulaire de l'aimantation de surface).

— Ces résultats montrent qu'il est possible de rendre compte de **renversements d'aimantation asymétriques** sans avoir recours à des **parois planaires partielles**



Plan

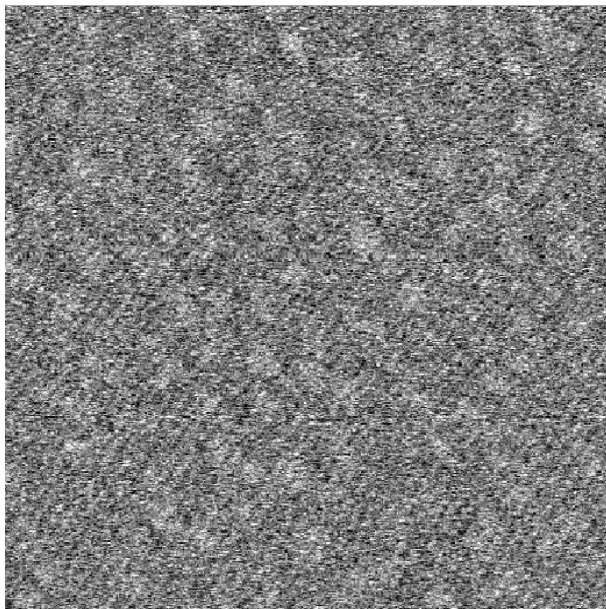
- Contexte
 - couplage d'échange
 - choix du système
 - propriétés de MnPt massif
- Le système MnPt bivariant
 - croissance
 - ordre chimique
 - le couplage d'échange de bicouches Fe/MnPt
- Modélisation
 - le modèle
 - la méthode
 - comparaison aux mesures
- **Écarts aux hypothèses**
 - **fluctuations d'aimantation**
 - **parois magnétiques**
- Conclusion

Codépôt > magnétisme > fluctuations

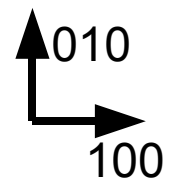
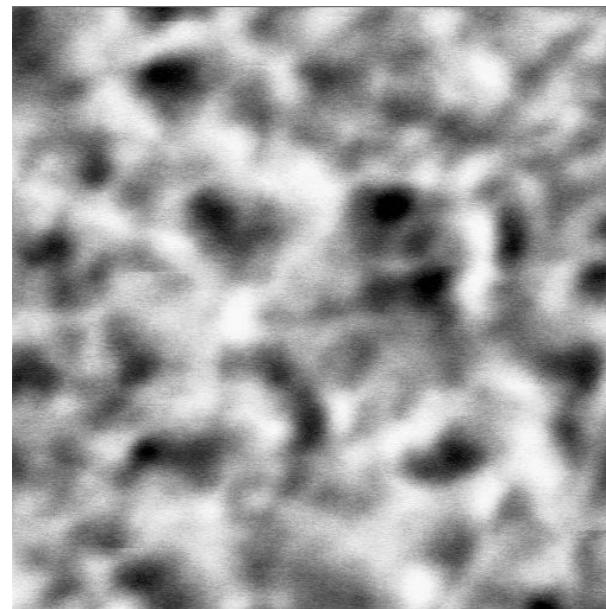
— L'observation en MFM révèle une **fluctuation de l'aimantation** de la couche ferromagnétique

- présente dans les systèmes Fe/MnPt/Pt et FeNi/MnPt/Pt
- absente dans le cas FeNi/Pt
- ordre de grandeur 200 nm >> taille des variants (8 nm)

FeNi/Pt



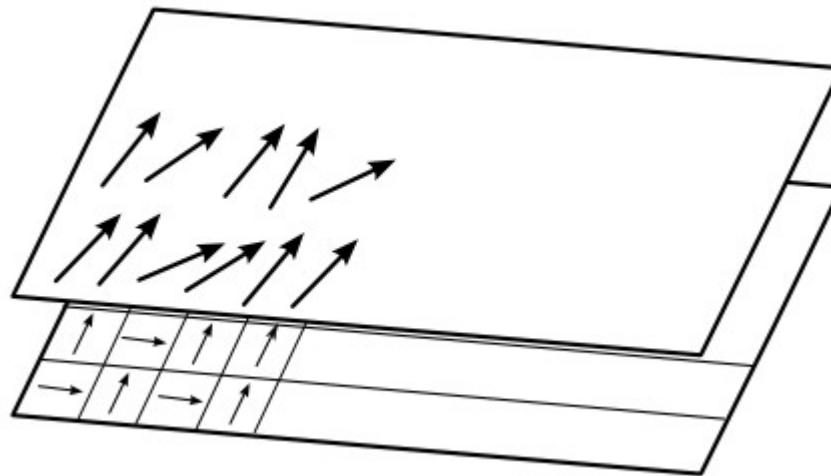
FeNi/MnPt



Images MFM 3 μm (signal magnétique)

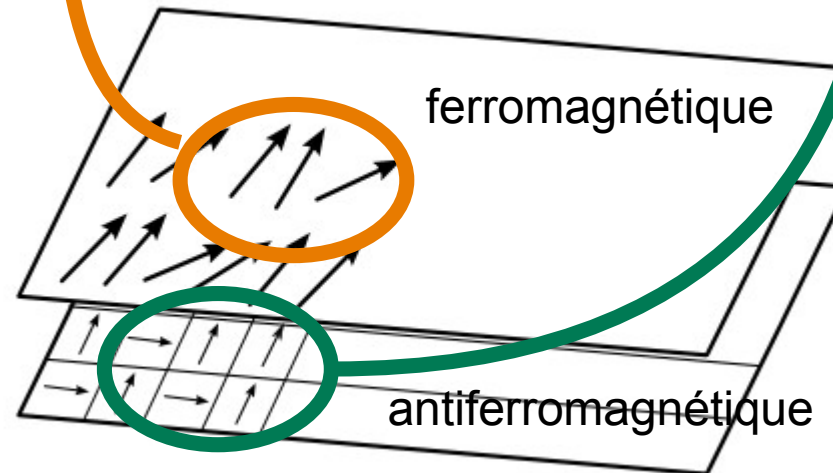
Codépôt > magnétisme > fluctuations

- Fluctuations reliées à la **frustration magnétique** du fer
 - **distribution de variants** sous-jacente
 - compétition entre
 - **échange** dans le fer
 - **anisotropies**
 - échange avec le ferromagnétique




Codépôt > magnétisme > fluctuations

- La répartition de variants constitue une **excitation** (bruit blanc)
- Une **dimension caractéristique** traduit la compétition entre
 - le **couplage** F/AF
 - le **coût en échange** dans le ferromagnétique



Codépôt > magnétisme > fluctuations

— **Modélisation numérique** analytique

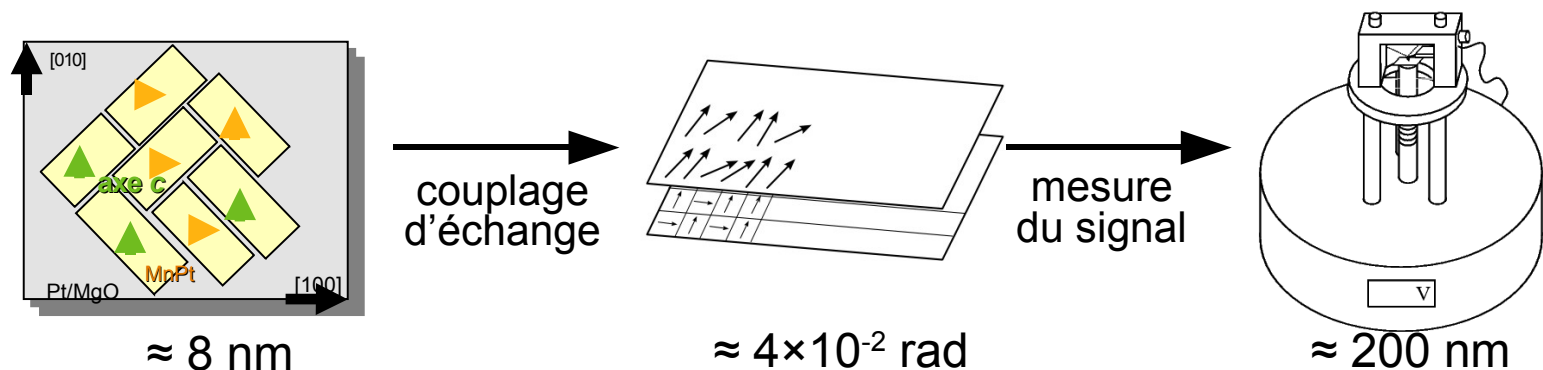

$$E_v = A \underbrace{\left(\text{grad } \vec{m}_F \right)^2}_{\text{échange}} + k \underbrace{(\vec{m}_F \cdot \vec{e}_1)^2 (\vec{m}_F \cdot \vec{e}_2)^2}_{\text{anisotropie}} - \underbrace{\mu_0 h_e M_s \vec{m}_{AF}(x, y) \vec{m}_F}_{\text{échange F/AF}}$$

— Le système **répond** à

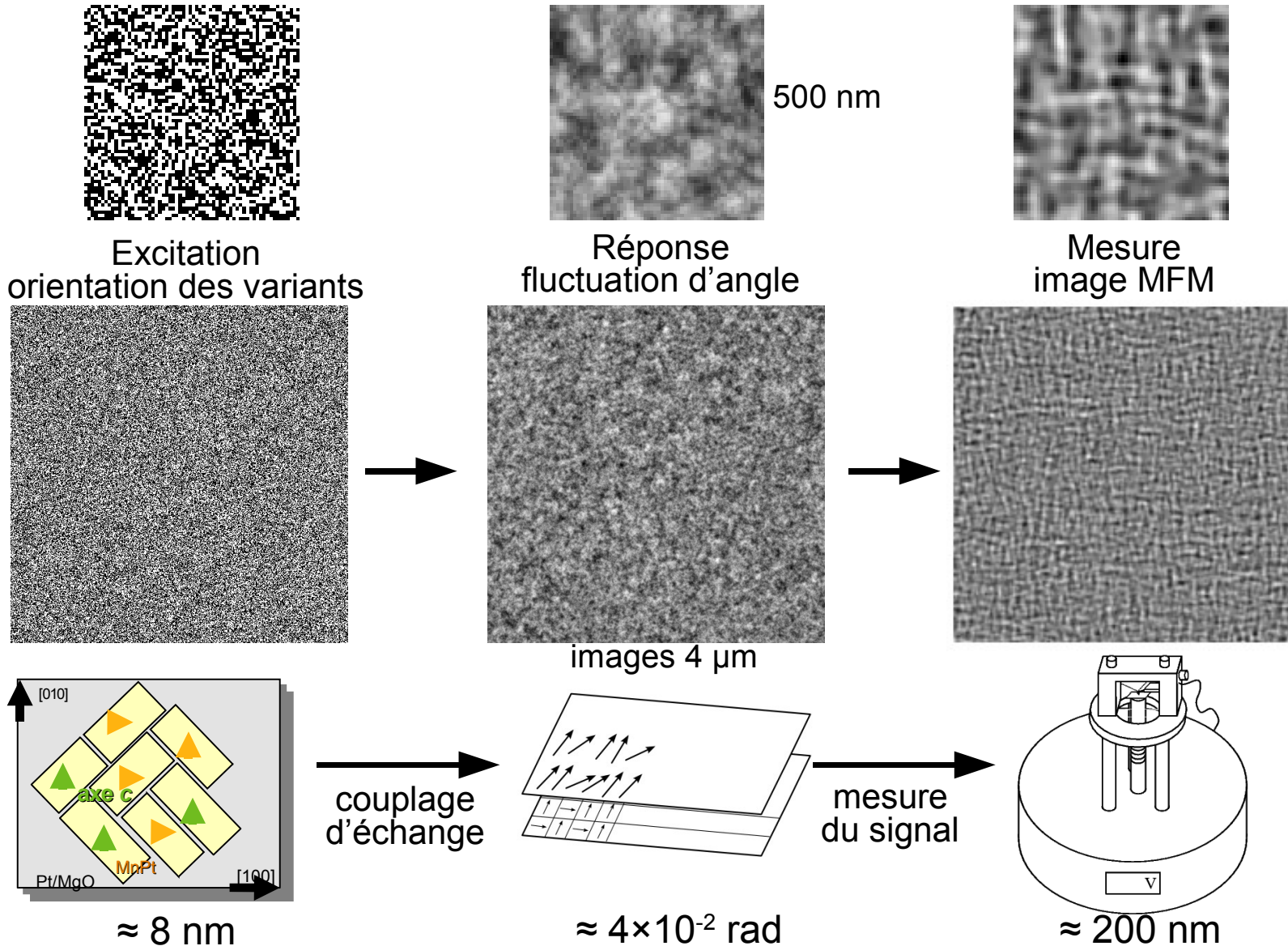
- **excitation** par d'un bruit blanc

→ apparition d'une **dimension caractéristique**

- valeurs comparables aux mesures

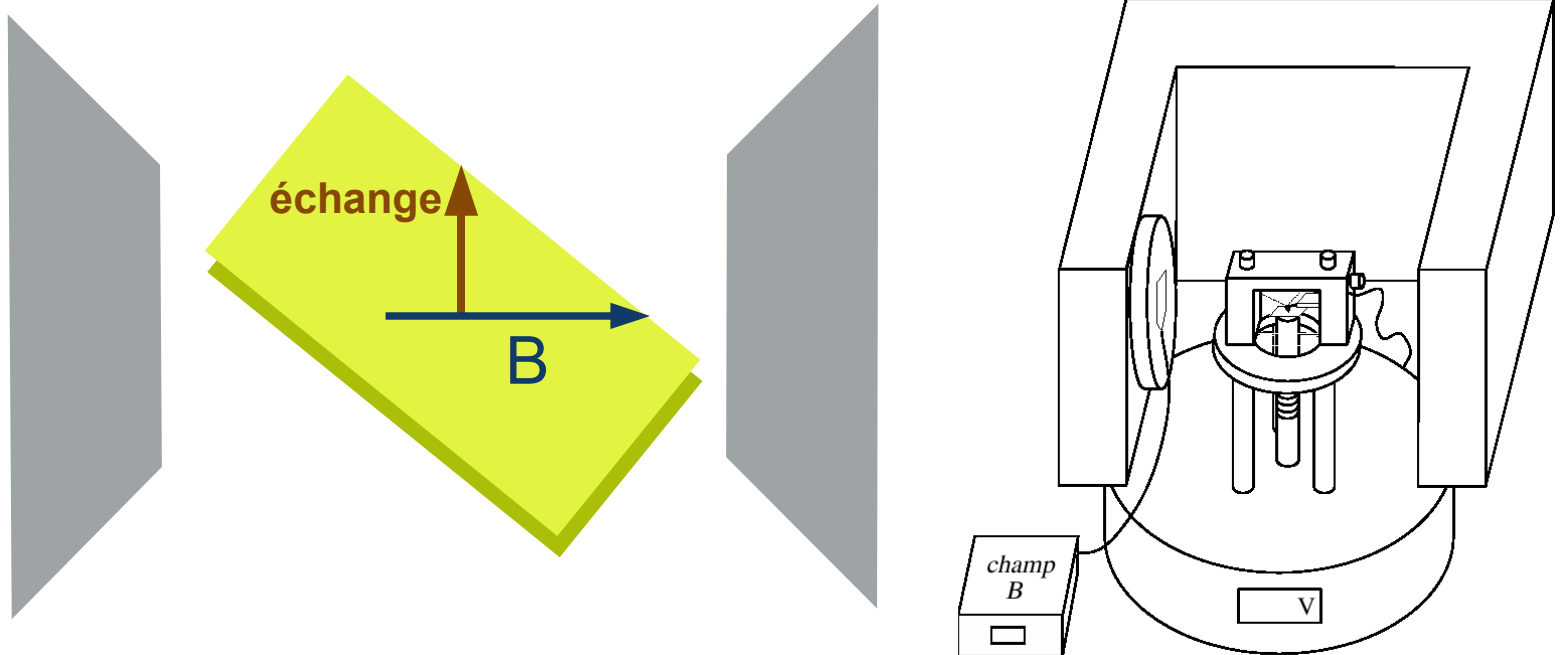


Codépôt > magnétisme > fluctuations



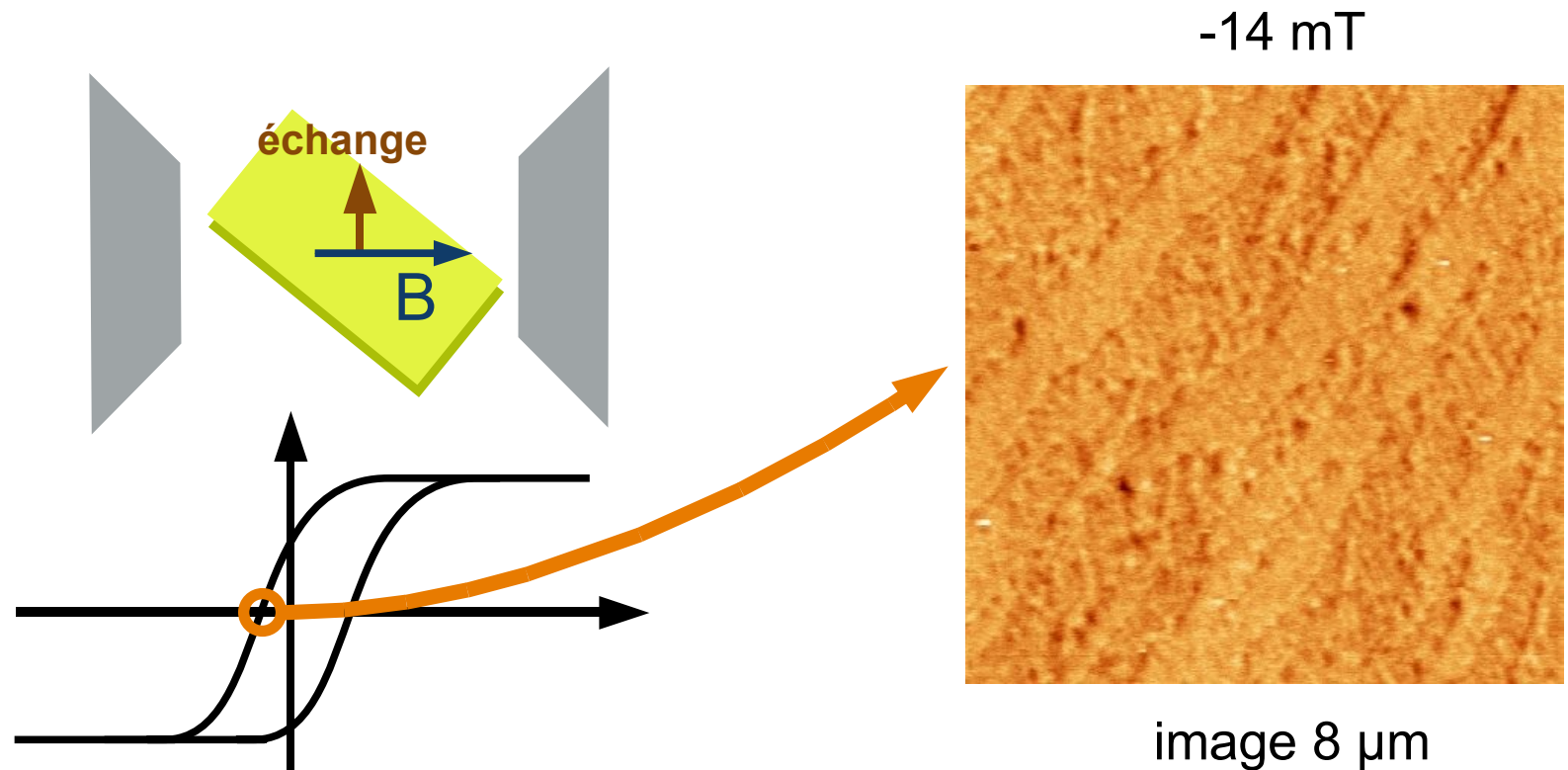
Codépôt > magnétisme > renversement

- Système Fe/MnPt couplé
- Mesures de **MFM sous champ**



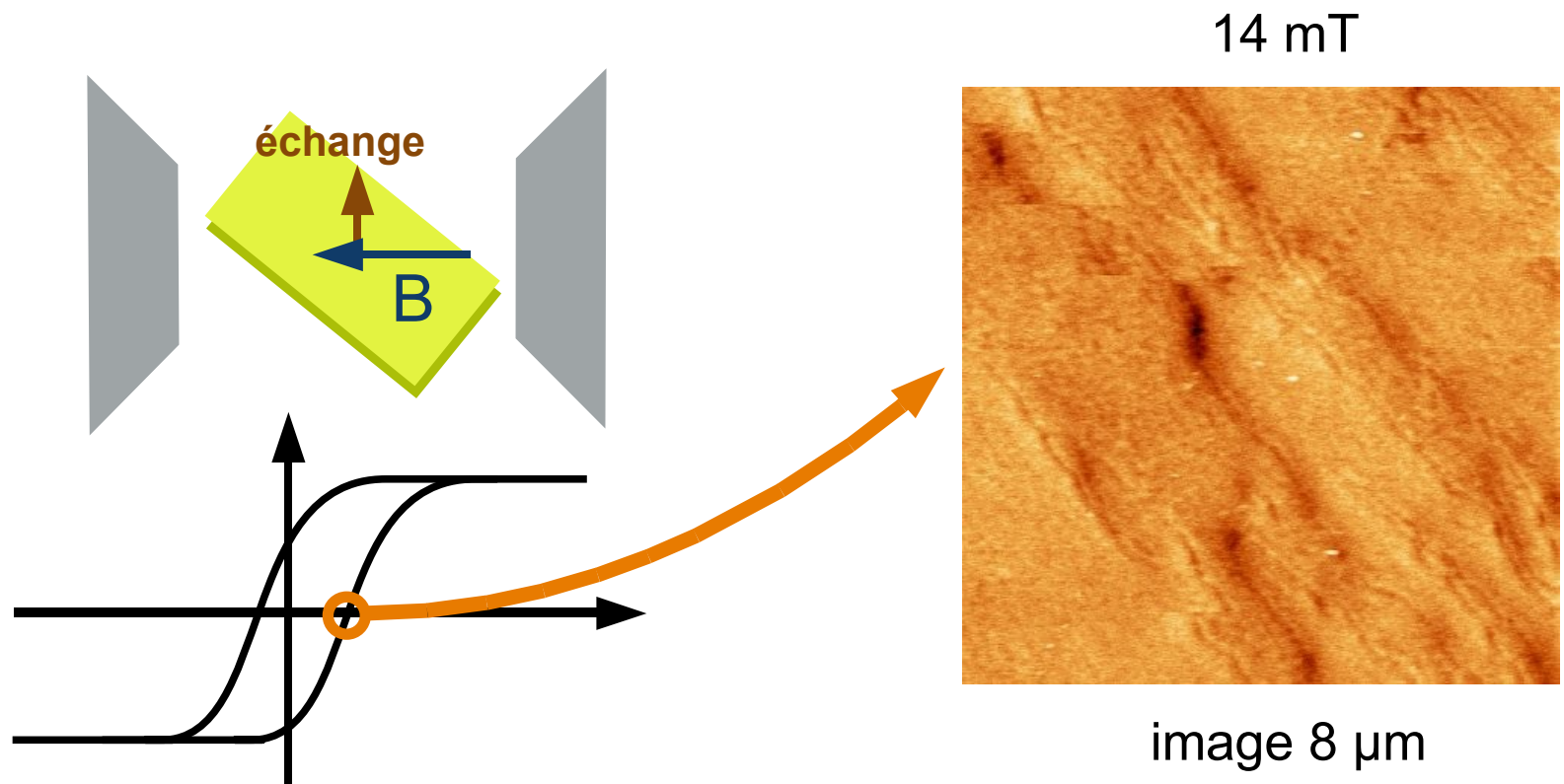
Codépôt > magnétisme > renversement

- Système Fe/MnPt couplé
- Mesures de **MFM sous champ**
 - Renversement d'aimantation par **propagation de parois**



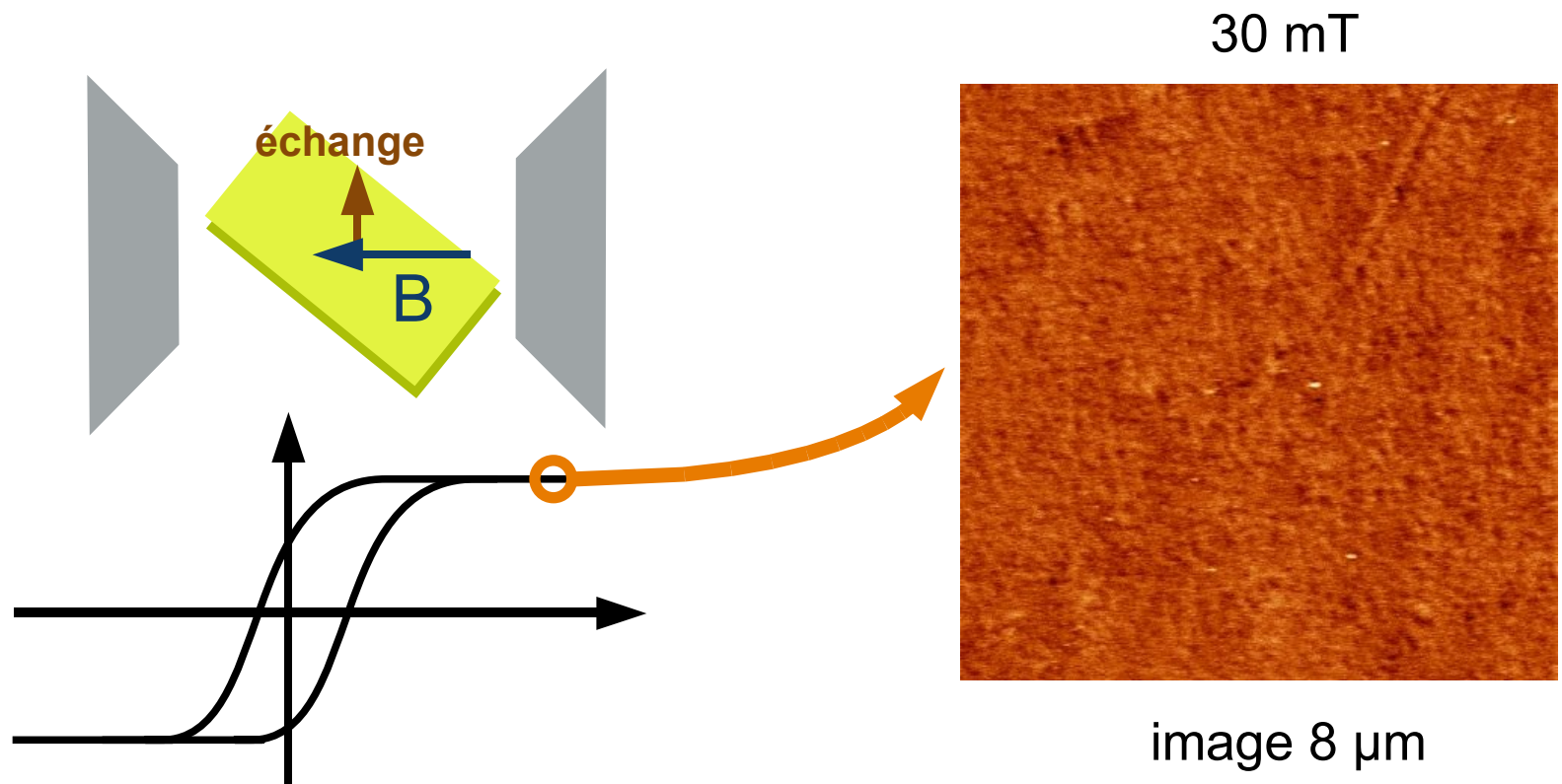
Codépôt > magnétisme > renversement

- Système Fe/MnPt couplé
- Mesures de **MFM sous champ**
 - Renversement d'aimantation par **propagation de parois**
 - **Symétrie** vis-à-vis du champ appliqué



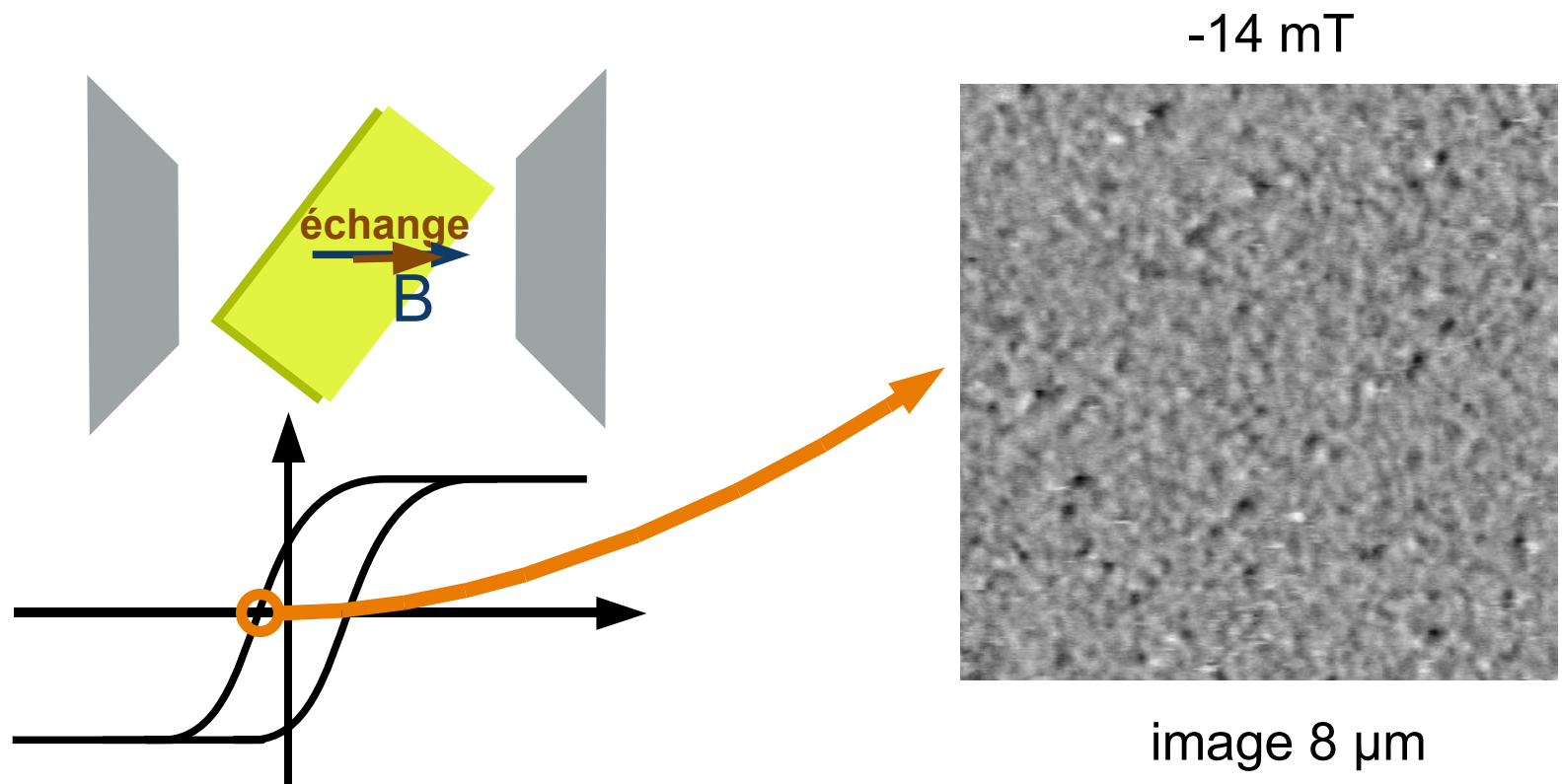
Codépôt > magnétisme > renversement

- Système Fe/MnPt couplé
- Mesures de **MFM sous champ**
 - Renversement d'aimantation par **propagation de parois**
 - **Symétrie** vis-à-vis du champ appliqué
 - **Disparition des parois** à fort champ



Codépôt > magnétisme > renversement

- Système Fe/MnPt couplé
- Mesures de **MFM sous champ**
 - Renversement d'aimantation par **propagation de parois**
 - Renversement par **rotation cohérente**



Limitations au modèle > résumé

- Des **fluctuations d'aimantation** (200 nm) sont observées
 - elles correspondent à la réponse du système couplé
 - à l'excitation liée à la **distribution de variants**

- Le processus de renversement d'aimantation
 - dépend de l'orientation du champ appliqué et du champ de recuit
 - par **propagations de parois**
 - par rotation uniforme
 - explique une des limitations du modèle



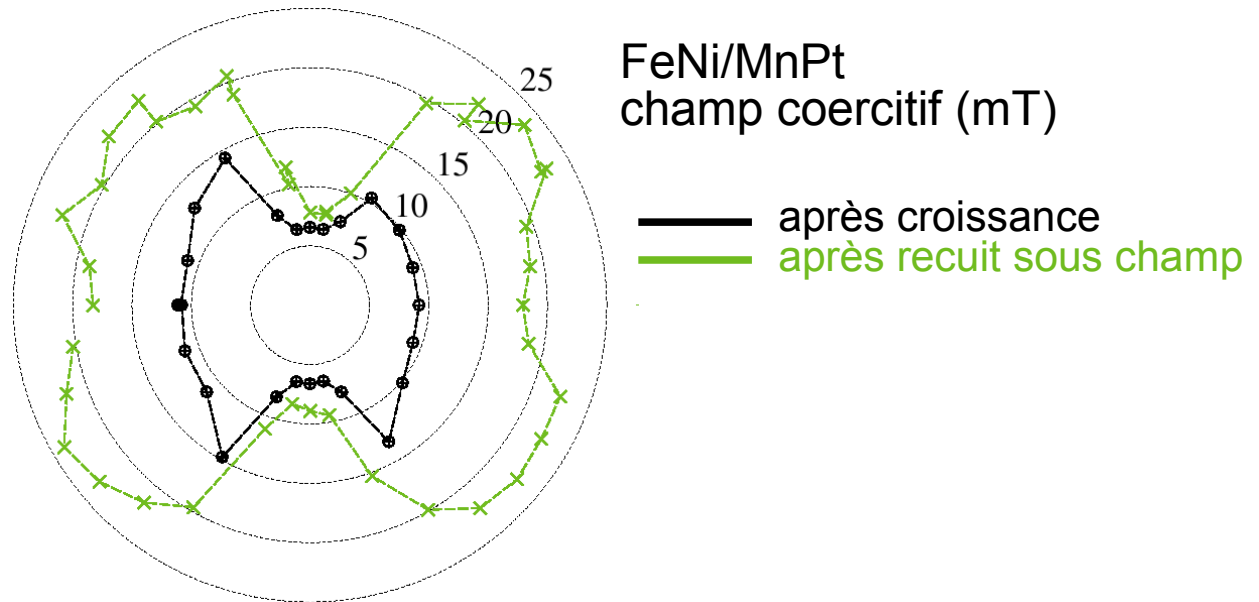
Conclusion

- Nous avons élaboré un **système**
 - **MnPt** antiferromagnétique
 - structurellement **bivariant**
 - portant une **aimantation de surface** non compensé
- Les **bicouches Fe/MnPt** présentent
 - des cycles d'hystérésis **asymétriques**
 - des **propriétés angulaires** complexes (maximum du champ d'échange selon une direction différente du champ de recuit)
- Ces propriétés ont été interprétées à l'aide d'un **modèle**
 - qui prend en compte les **anisotropies**
 - qui permet de reproduire les caractéristique des cycles
 - montre le rôle joué par la rotation des spins de l'antiferromagnétique
- Cette modélisation montre ses limites dans certaines de ses hypothèses
 - **fluctuations** de l'aimantation à petite échelle pour lesquelles nous proposons une interprétation
 - renversement par **propagation de parois** observé par MFM sous champ

Extension à un ferromagnétique sans anisotropie

Le modèle montre comment la structure en deux variants induit une **anisotropie d'ordre 4** dans la réponse de l'antiferromagnétique, superposée à l'anisotropie naturelle du Fe, de même symétrie

→ étude sur un ferromagnétique sans anisotropie intrinsèque (FeNi)



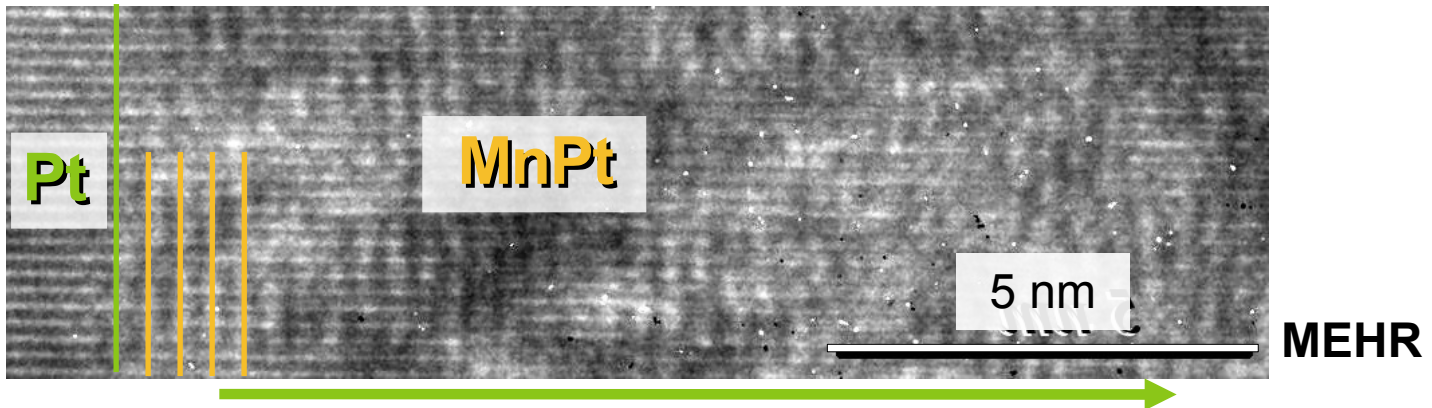
— L'**anisotropie induite** apparait nettement

— Un champ de décalage n'est observé que pour un recuit sous champ suivant l'axe [100], et reste nul après recuit [110]

Perspectives

— Le système étudié présente une complexité intrinsèque (deux directions de spin liées à la présence des deux variants)

→ mise en ordre uniaxiale dans le seul variant d'axe c perpendiculaire obtenue en induisant la symétrie recherchée par dépôt couche par couche ($T \approx 500 \text{ }^\circ\text{C}$, $S \approx 1$)



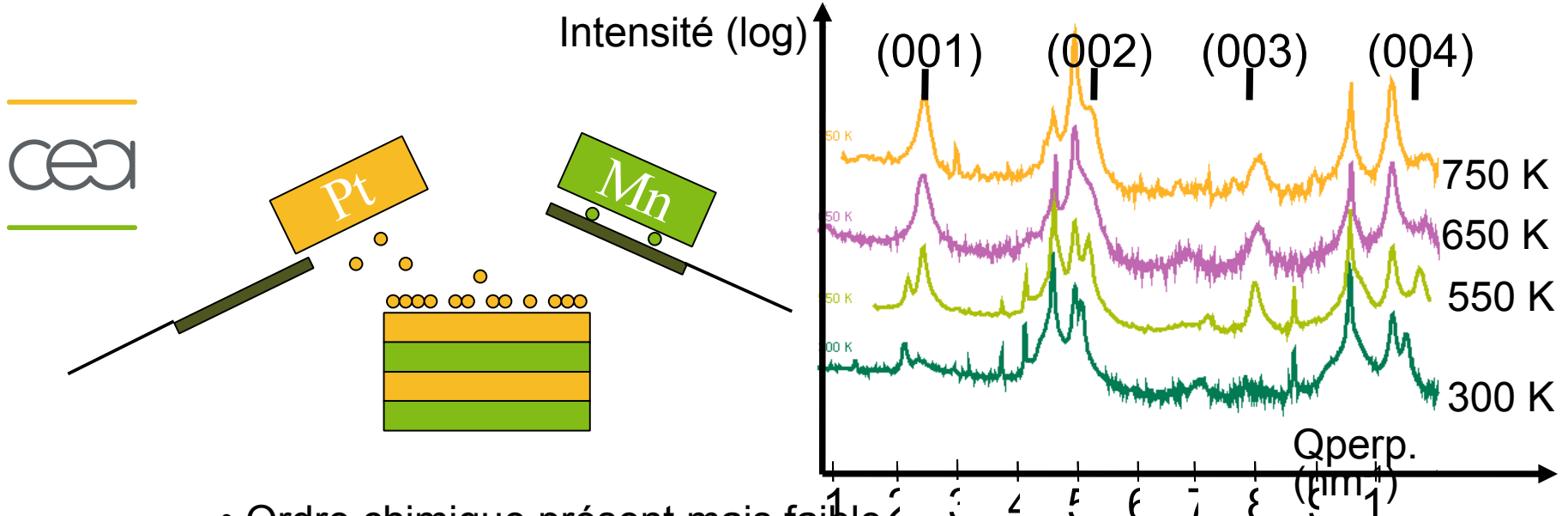
Systeme modèle avec alignement des spins uniaxial et compensés



Plan

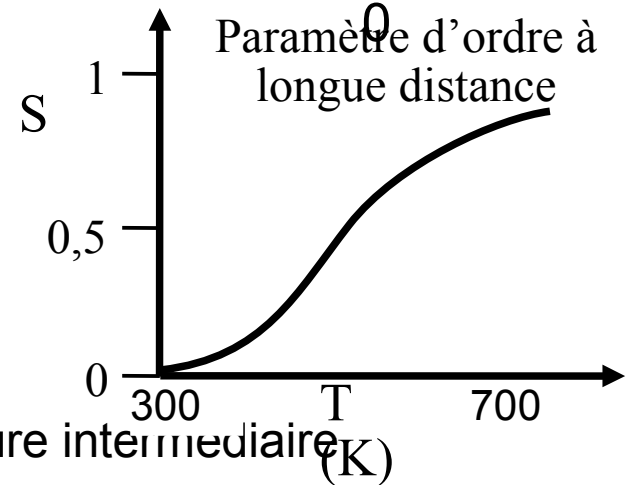
- Contexte
 - couplage d'échange
 - choix du système
 - propriétés de MnPt massif
- Le système MnPt bivariant
 - croissance
 - ordre chimique
 - le couplage d'échange de bicouches Fe/MnPt
- Modélisation
 - le modèle
 - la méthode
 - comparaison aux mesures
- Écarts aux hypothèses
 - fluctuations d'aimantation
 - parois magnétiques
- Conclusion
- **Système à anisotropie perpendiculaire**

Couche par couche > croissance

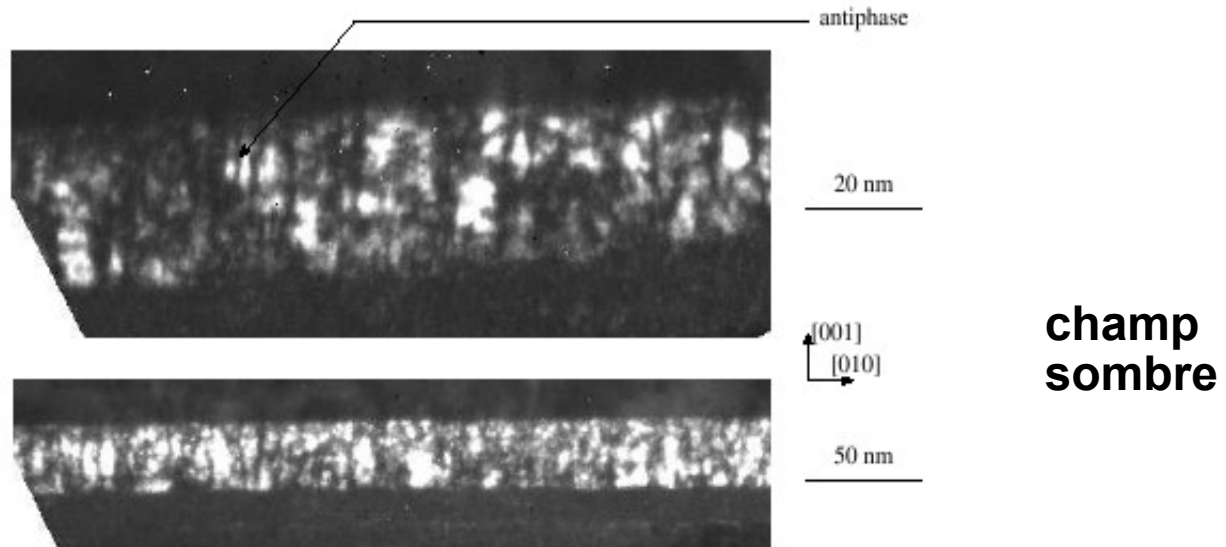
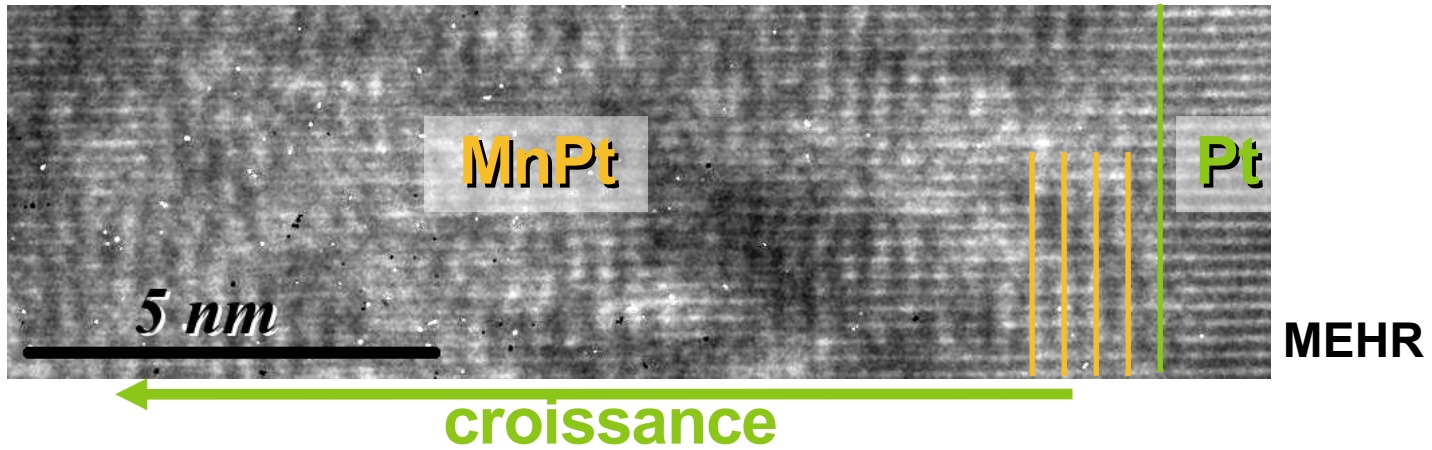


- Ordre chimique présent mais faible à température ambiante
 - variant perpendiculaire détecté (pas de variant dans le plan)

- Ordre chimique fort à hautes températures de dépôt mais présence des deux variants planaires pour une température intermédiaire

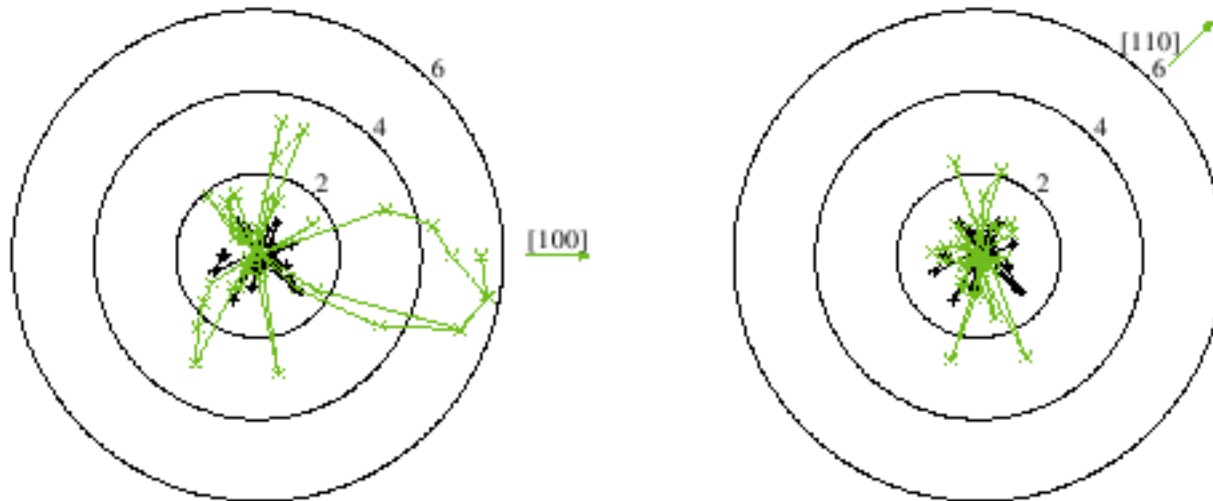


Couche par couche > structure



Codépôt > magnétisme > résultats

- Système FeNi/MnPt
- Malgré l'absence d'anisotropie de FeNi, l'existence du champ d'échange dépend de la direction du champ lors du recuit
 - rôle de l'aimantation



L'équipe



Yves Samson
Pascale Bayle-Guillemaud
Alain Marty
Cyrille Beigné
Jean-Christophe Pillet

Les doctorants, stagiaires