

**Modélisation et simulation de micro systèmes magnétiques**  
*Application*  
*aux têtes de lecture GMR pour enregistreur sur bande*  
*et aux mémoires magnétiques de type MRAM*

**Thèse CIFRE**

- Laboratoire d'accueil : SPINTEC (CEA/DSM/DRFMC)
- Entreprises partenaires : ALDITECH / CEA-Valorisation
  
- Directeur de Thèse : Jean-Pierre NOZIERES
- Co-directeur : Jean-Christophe TOUSSAINT
- Rapporteurs : Florence OSSART et Claude FERMON
- Examineurs : Gérard MEUNIER et Yves BIGAY

## 1. Problématiques liées à la modélisation d'un micro système magnétique

- § Définition d'un micro système magnétique
- § Echelles des différentes interactions
- § Méthodes de modélisation

## 2. Tête de lecture GMR pour enregistreur sur bande

- § Enregistreur sur bande magnétique
- § Solutions techniques et physiques
- § Modélisation et design du dispositif

## 3. Mémoire magnétique à accès aléatoire (MRAM)

- § Mémoire vive et MRAM
- § Méthodologie de modélisation
- § Modèle Spice pour la conception automatique
- § Diaphonie

## 4. Conclusions et perspectives

## 1. Problématiques liées à la modélisation d'un micro système magnétique

- § Définition d'un micro système magnétique
- § Echelles des différentes interactions
- § Méthodes de modélisation

## 2. Tête de lecture GMR pour enregistreur sur bande

- § Enregistreur sur bande magnétique
- § Solutions techniques et physiques
- § Modélisation et design du dispositif

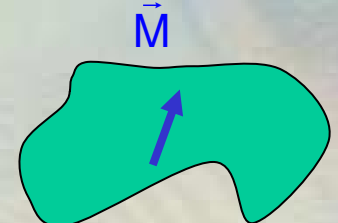
## 3. Mémoire magnétique à accès aléatoire (MRAM)

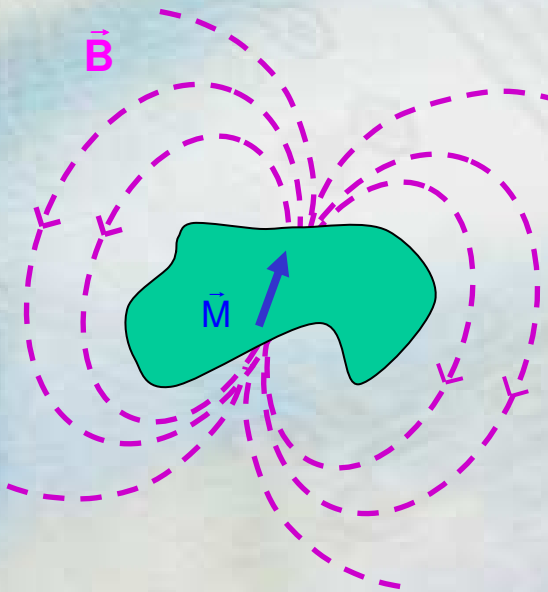
- § Mémoire vive et MRAM
- § Méthodologie de modélisation
- § Modèle Spice pour la conception automatique
- § Diphonie

## 4. Conclusions et perspectives

## Propriétés macroscopiques

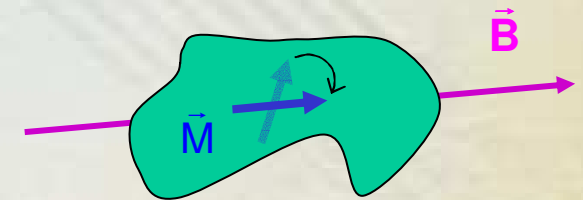
Matériaux **ferromagnétiques** ( $T < T_C$ )  
(Co, Fe, Ni)


$$\vec{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{m}_i$$



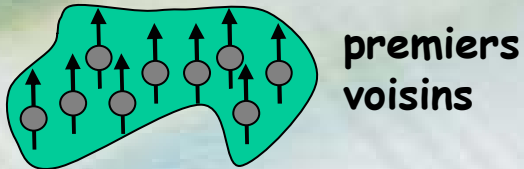
**Génère un champ magnétique** dans l'espace  
(influence sur l'environnement)

**Sensible aux champs magnétiques** extérieurs  
(couplage avec l'environnement)



# Interactions magnétiques

## Interaction d'échange



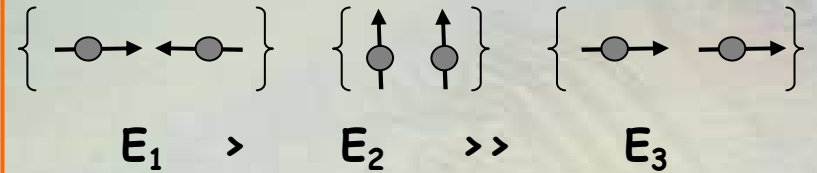
premiers voisins

$$H_{ex} \sim 100 \text{ kOe}$$

$$L_{éch} = \sqrt{\frac{2A_{éch}}{\mu_0 M_s^2}}$$

$$L_{éch} \sim 3 - 7 \text{ nm}$$

## Interaction dipolaire (champ démagnétisant)



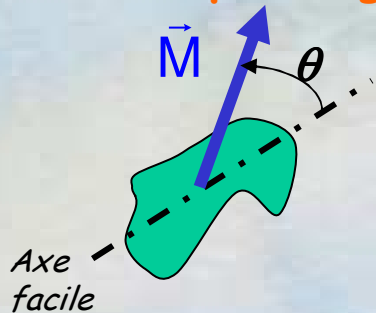
$E_1 > E_2 \gg E_3$

$$H_{dip} \sim 10-20 \text{ kOe}$$

$$D_{pd} = \pi \sqrt{\frac{A_{éch}}{K_u}}$$

$$D_{pd} \sim 6 - 100 \text{ nm}$$

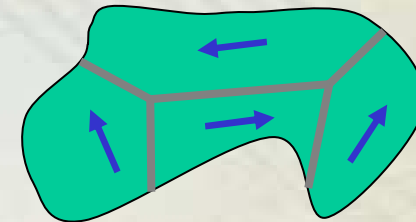
## Anisotropie magnéto-cristalline



grandeur locale

$$H_K \sim 0.1-10 \text{ kOe}$$

Dimensions du système  $\gg D_{pd}$   
création de domaines magnétiques



# Modélisation micromagnétique

Prend en compte les trois interactions

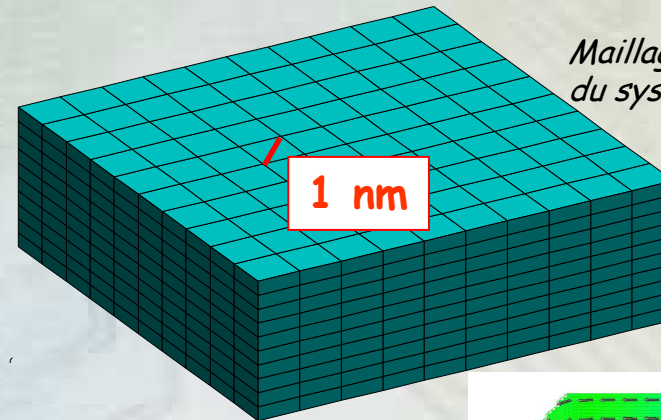
Échange / interactions dipolaires / anisotropie magnétocristalline

Équation de Landau Lifchitz Gilbert

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma (\vec{M} \wedge \vec{H}) + \frac{\alpha}{M_s} \left( \vec{M} \wedge \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \right)$$

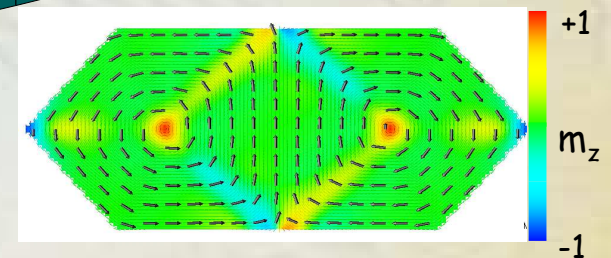
Résolution par la méthode des différences finies (MDF)

Logiciel GLFFT

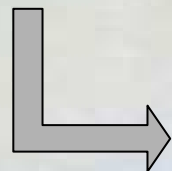


Maillage Parallélépipédique du système

$\vec{M}(\vec{r})$



P.O. Jubert et al. EPL 63, 138 (2003)



Configuration micromagnétique d'un système

Systèmes de petite taille (nanométriques)

## Prend en compte deux interactions

interactions dipolaires / anisotropie magnétocristalline

Équations de **Maxwell**

$$\begin{aligned} \text{Div}(\vec{D}) &= \rho & \text{R}\vec{o}t(\vec{H}) &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{R}\vec{o}t(\vec{E}) &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{Div}(\vec{B}) &= 0 \end{aligned}$$

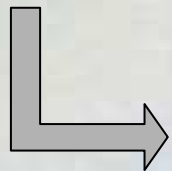
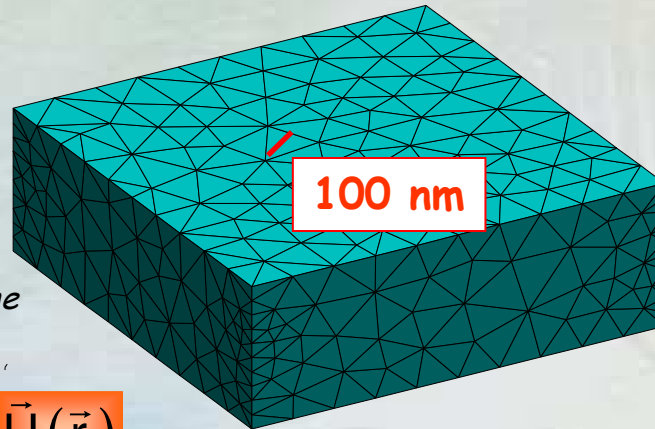
$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = [\mu] \vec{H}$$

## Résolution par la méthode des éléments finis (MEF)

Logiciel Flux3D



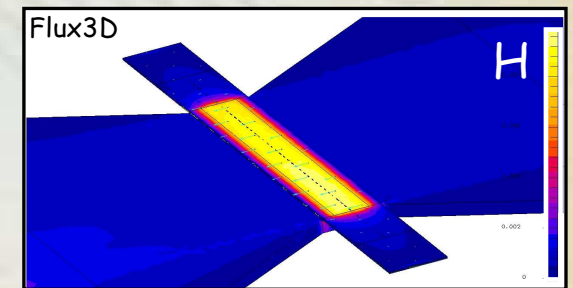
Maillage  
Tétragonal du système



Distribution du  
champ magnétique

$$\vec{H}(\vec{r})$$

Systèmes de **grande taille** (micrométriques)







## 1. Problématiques liées à la modélisation d'un micro système magnétique

- § Définition d'un micro système magnétique
- § Echelles des différentes interactions
- § Méthode de modélisation

## 2. Tête de lecture GMR pour enregistreur sur bande

- § Enregistreur sur bande magnétique
- § Solutions techniques
- § Modélisation et optimisation design du dispositif

## 3. Mémoire magnétique à accès aléatoire (MRAM)

- § Positionnement du produit vis à vis des autres mémoires
- § Méthodologie de modélisation
- § Modèle Spice pour la conception automatique

## 4. Conclusion et perspectives

- § Subtilité de la modélisation de systèmes magnétique complexe
- § Magspice

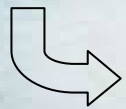
# Enregistrement magnétique

## Enregistreur sur bande

Forte capacité de stockage

Faible coût du dispositif

Temps de vie important  
(20 ans)



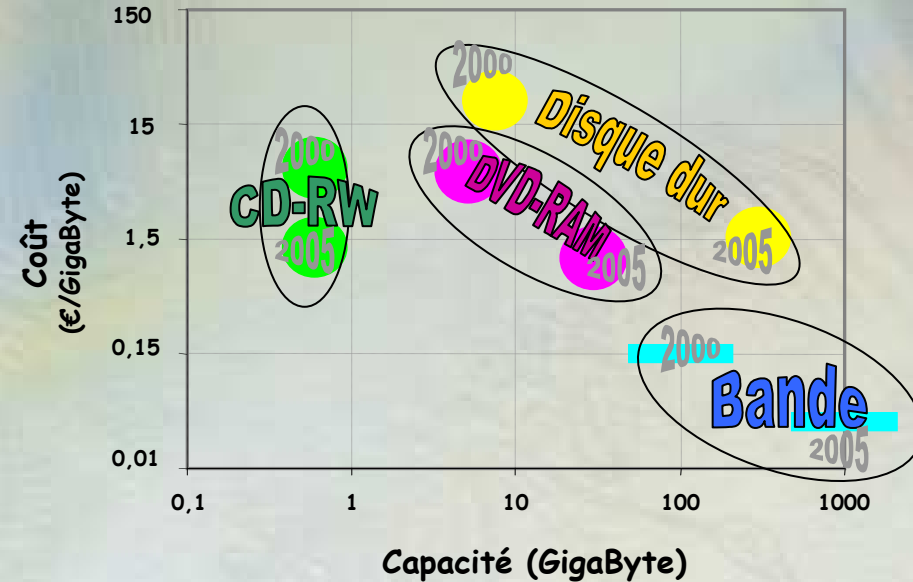
Application à l'archivage de données  
pour les serveurs, bibliothèques, etc....

## Contraintes liées à l'enregistrement sur bande

Mode contact entre la tête et la bande

Usure mécanique

Décharges électrostatiques (ESD)



# Tête de lecture magnétorésistive

## Tête de lecture MR in gap

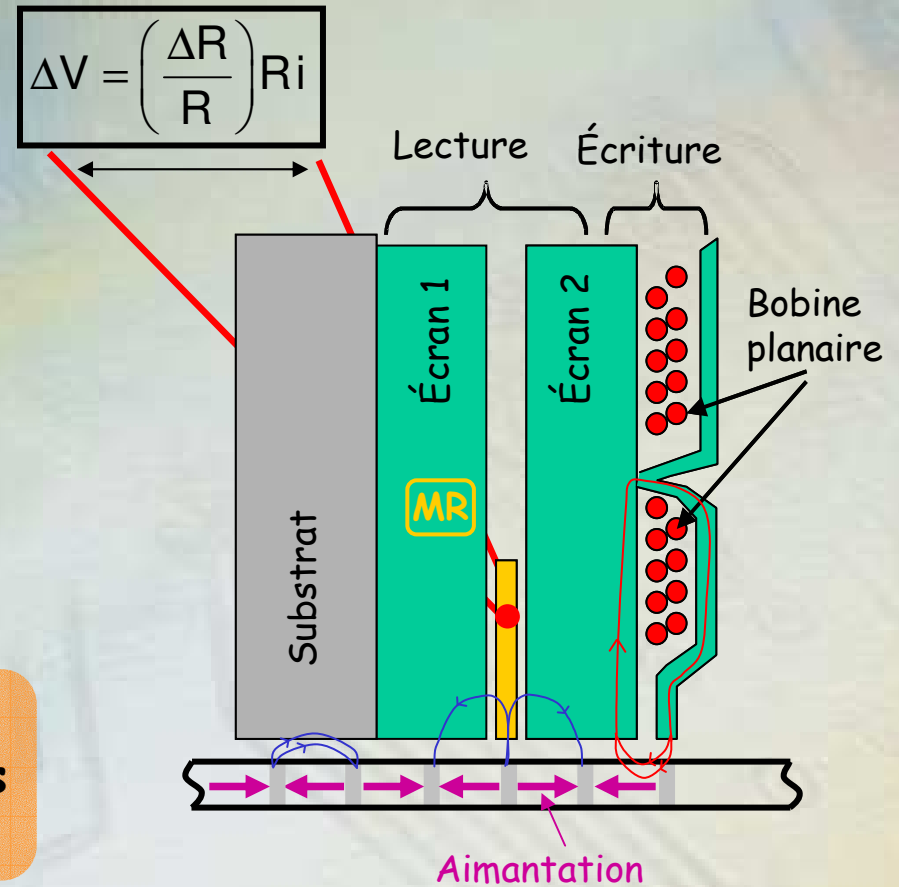
AMR  
(MR anisotrope)

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{AMR} \approx 2\%$$

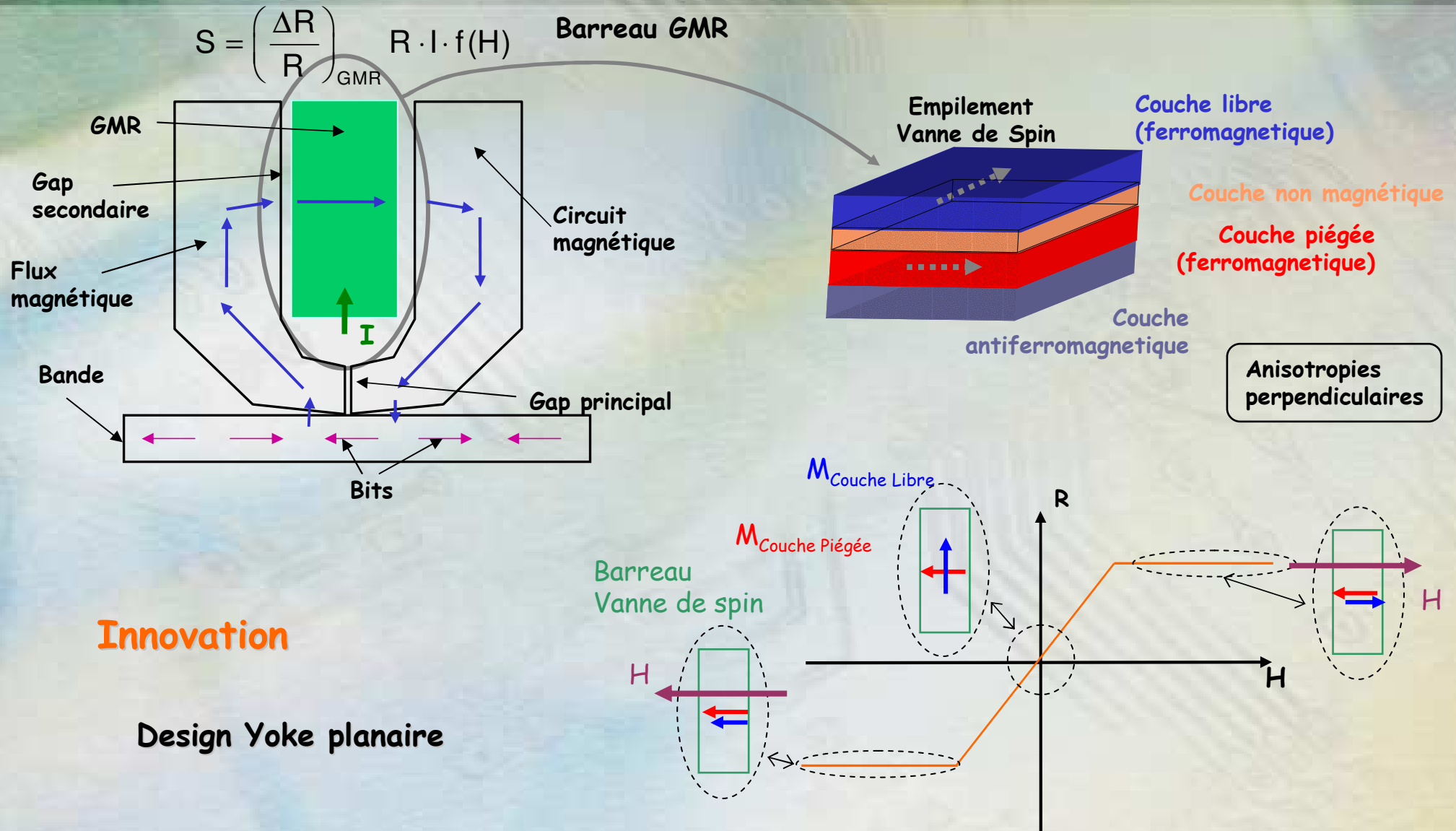
GMR  
(MR géante)

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{GMR} \approx 20\%$$

GMR plus sensible que MR  
à utilisée dans les Disques Durs  
à bande ???

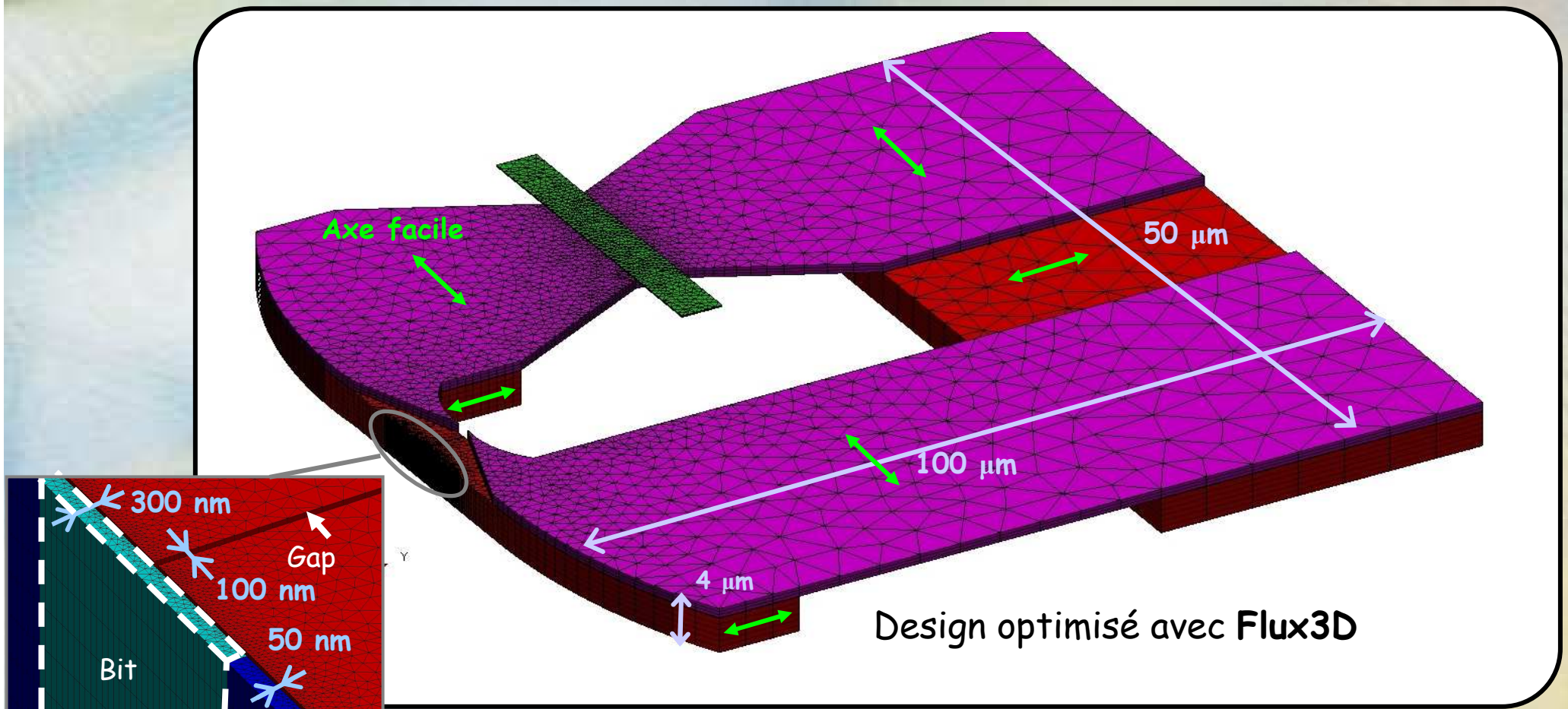
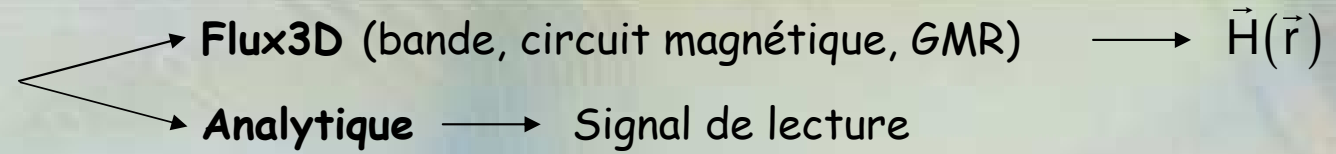


# Têtes de lecture GMR-Yoke pour bande



# Modélisation en mode statique

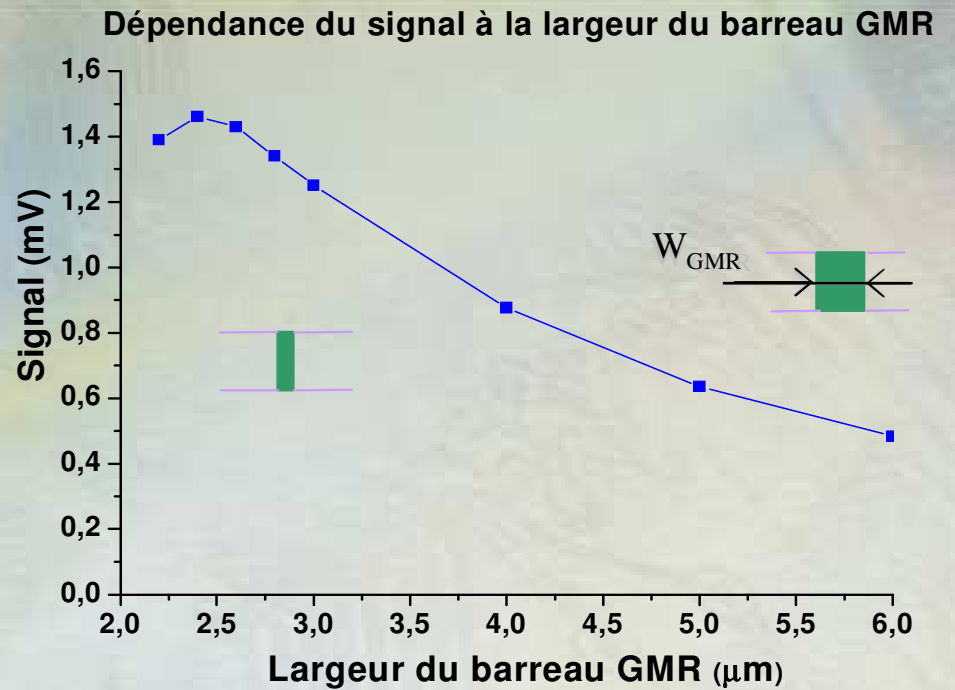
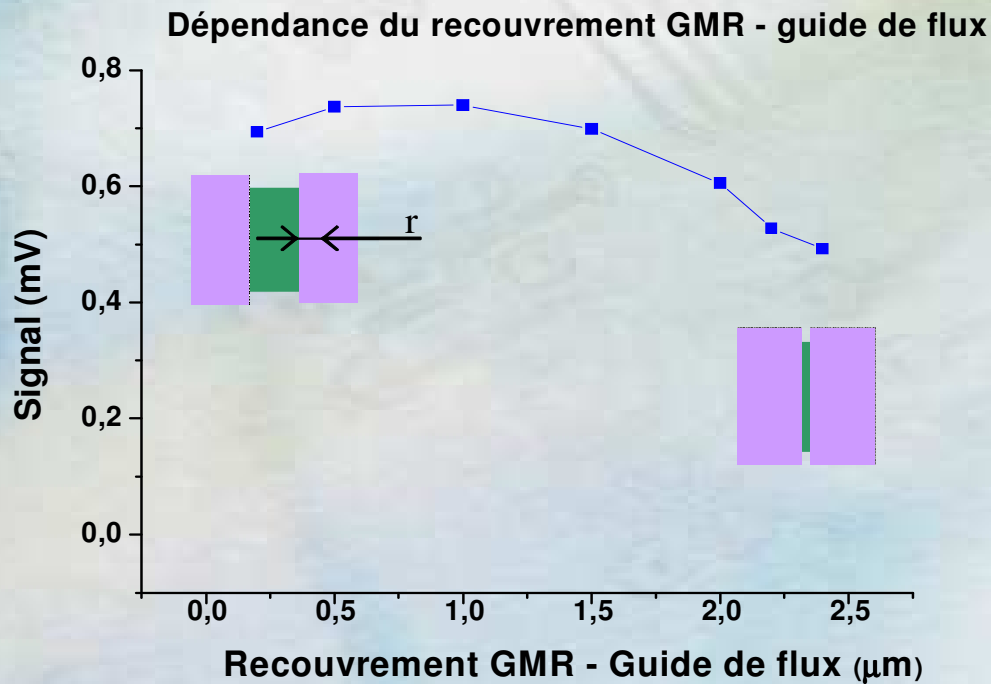
Deux approches



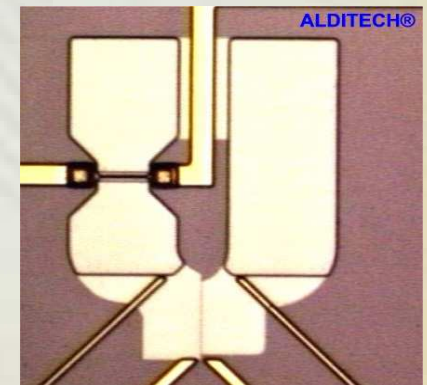
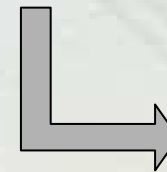
## Etude paramétrique

Paramètres géométriques de la tête

Maximisation du signal



Prototype



# Mise en place du modèle dynamique

## Limite du logiciel Flux3D

**Impossibilité** de prendre en compte le **mouvement de la bande** devant la tête

Ne convient pas pour le **modèle dynamique** du dispositif

### Première étape : analytique statique

Modèle de **réductance équivalente** de la tête

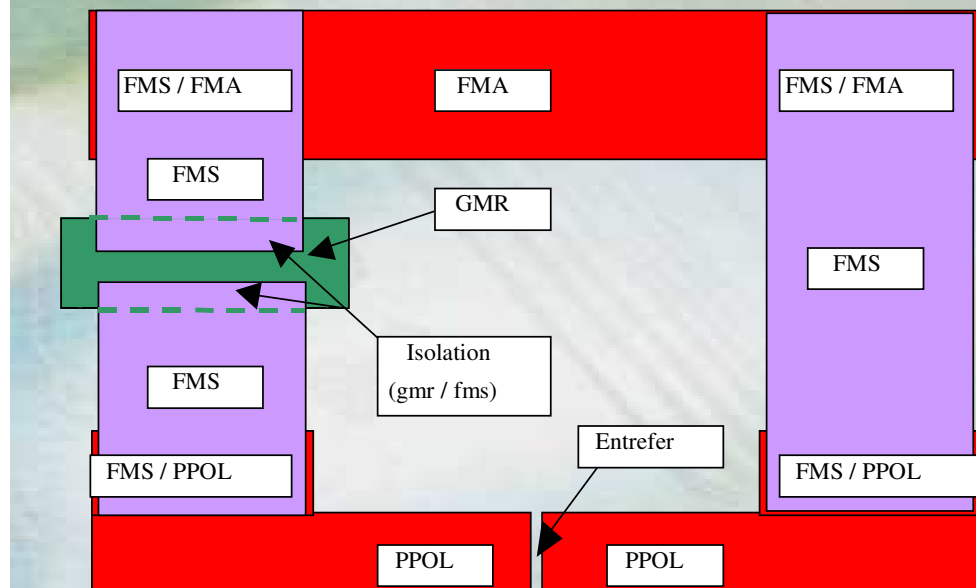
**Comparaison** avec résultats Flux3D

### Deuxième étape : analytique dynamique

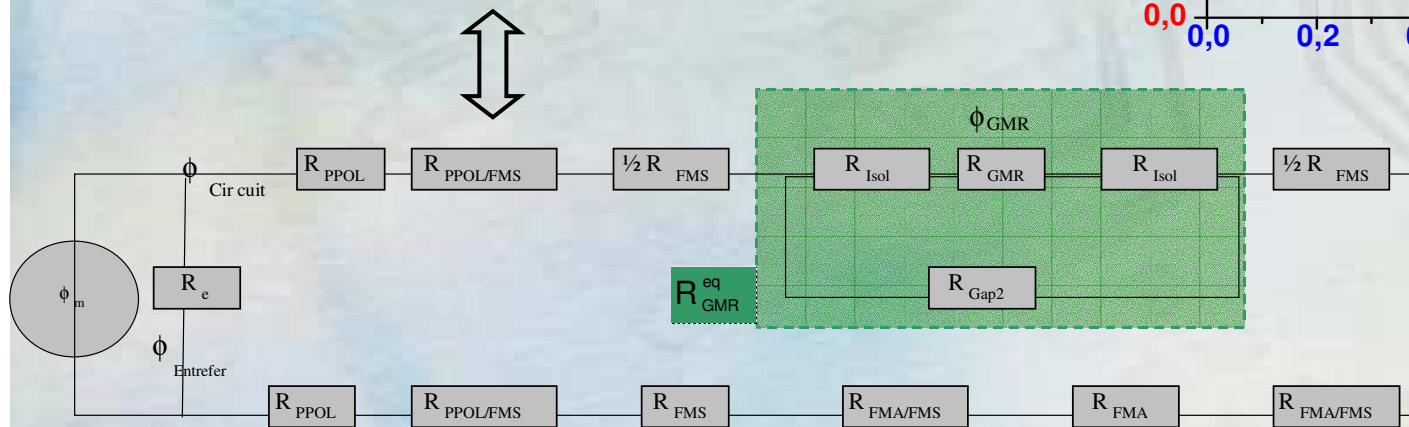
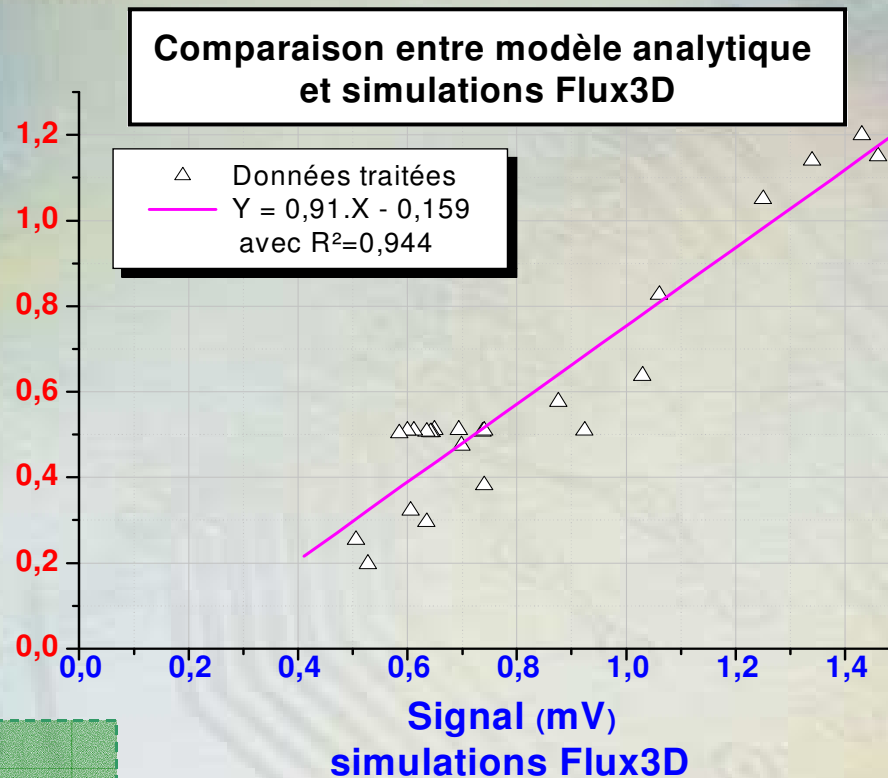
Prise en compte du déplacement de la **bande à haute vitesse**

**Modèle dynamique complet**

## Modèle analytique statique en réluctance équivalente



Signal (mV)  
modèle analytique



Bon accord avec les résultats Flux3D



## Bilan première étape : réponse statique

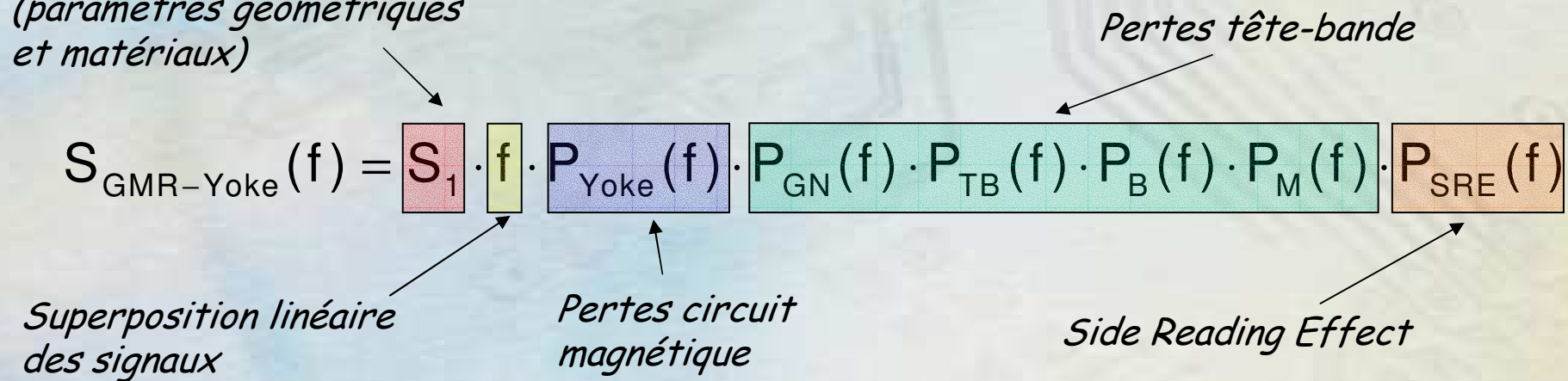
Modèle de réluctance  $\longrightarrow$   $\text{Signal}_{\text{GMR}}(f=0) = F^n(\text{géométrie, matériaux, } \phi_e)$

## Deuxième étape : réponse dynamique

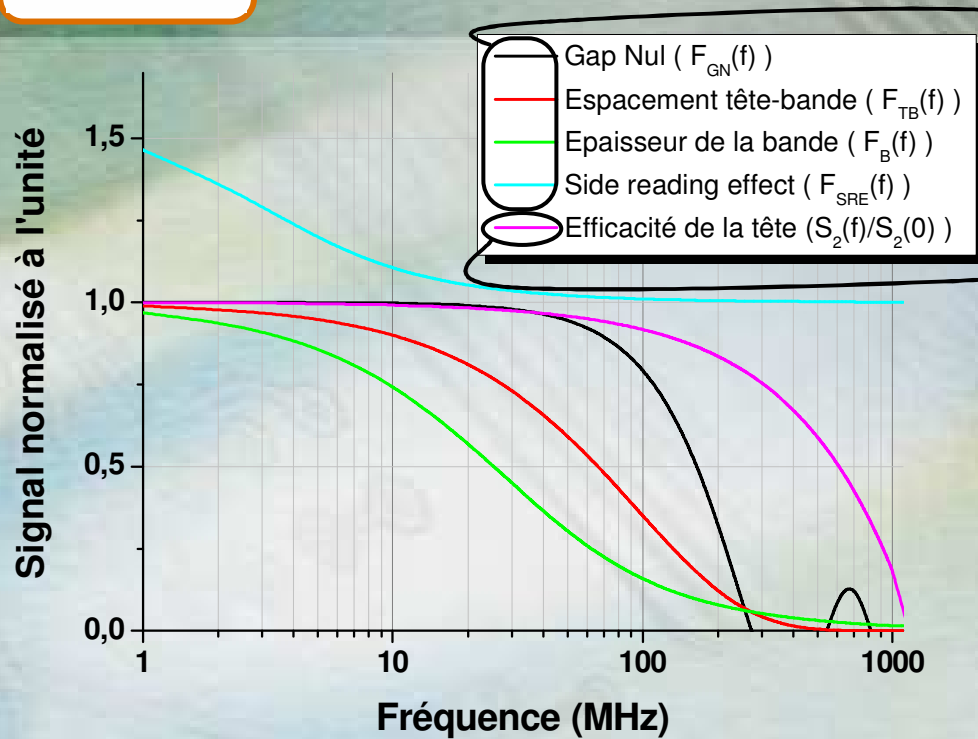
Théorème de réciprocité  
+  
Transformée de Fourier  $\longrightarrow$  Flux entrant dans la tête en fonction de la fréquence  $\phi_e(f)$

## Modèle complet

Constante  
(paramètres géométriques  
et matériaux)



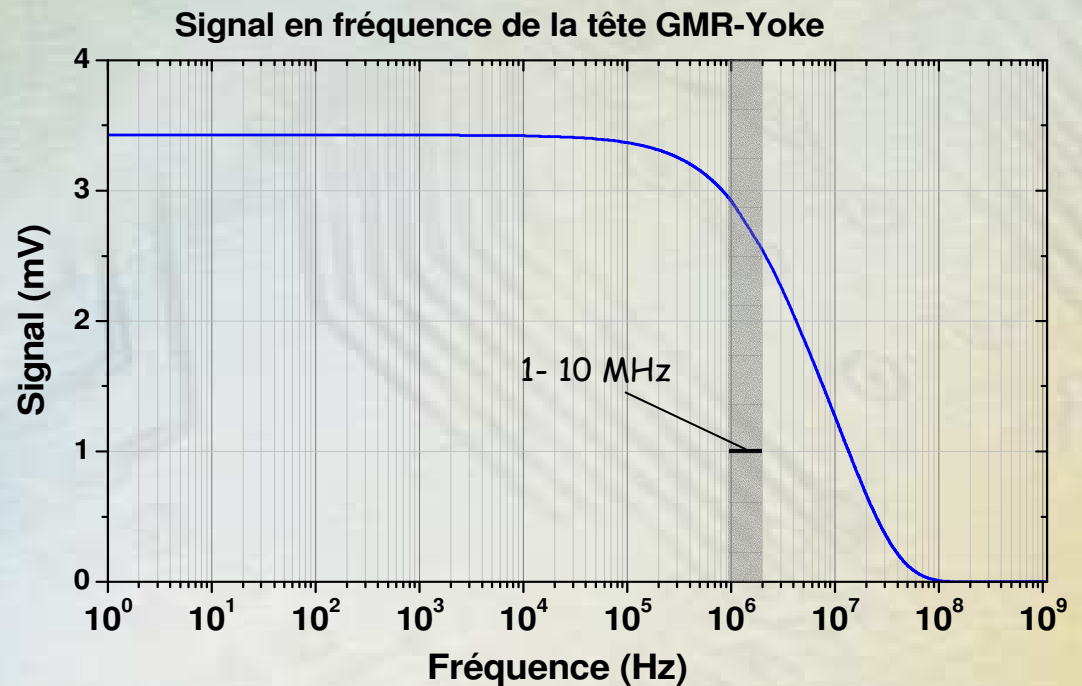
# Signal GMR-Yoke complet



Effets dus à l'interaction tête - bande  
Effet dû au circuit magnétique

## Signal GMR Yoke

Forte chute à quelques dizaines de MHz  
Fort impact des phénomènes dus à l'interaction tête bande



## Tête de lecture GMR-Yoke pour bande

Design ' Yoke ' optimal

Bon comportement à basse fréquence

Forte diminution du signal à haute fréquence

Les têtes **GMR Yoke** pas adaptées avec les bandes actuelles

## 1. Problématiques liées à la modélisation d'un micro système magnétique

- § Définition d'un micro système magnétique
- § Echelles des différentes interactions
- § Méthode de modélisation

## 2. Tête de lecture GMR pour enregistreur sur bande

- § Enregistreur sur bande magnétique
- § Solutions techniques et physiques
- § Modélisation et design du dispositif

## 3. Mémoire magnétique à accès aléatoire (MRAM)

- § Mémoire vive et MRAM
- § Méthodologie de modélisation
- § Modèle Spice pour la conception automatique
- § Diphonie

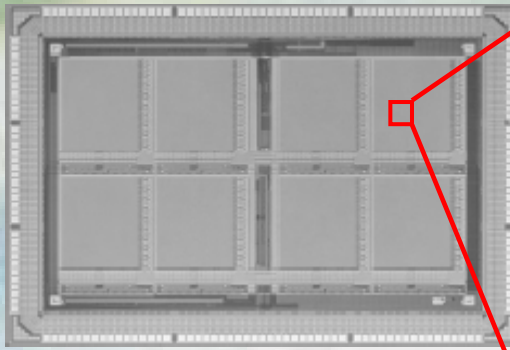
## 4. Conclusions et perspectives

## Mémoires Vives

	Type semiconductrice			Hybride		Magnétique
	DRAM	SRAM	FLASH	FeRAM	PCRAM	MRAM
Vitesse écriture	Modérée ≈ 50 ns	Rapide ≈ 10 ns	Lente ≈ 100 ns	Modérée ≈ 50 ns	Modérée ≈ 50 ns	Rapide ≈ 10 ns
Vitesse lecture	Modérée	Rapide	Rapide	Modérée	Rapide	Rapide
Densité	Haute ≈ 8 F <sup>2</sup>	Faible ≈ 100 F <sup>2</sup>	Haute ≈ 10 F <sup>2</sup>	Modérée ≈ 20 F <sup>2</sup>	Haute ≈ 8 F <sup>2</sup>	Modérée ≈ 20 F <sup>2</sup>
Endurance	Bonne	Bonne	Faible	Faible	Bonne	Bonne
Puissance consommée	Haute	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Rafraîchissement	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Rétention	Non	Non	Oui	Partielle	Oui	Oui
Scalabilité	Mauvaise	Bonne	Bonne	Modérée	Bonne	Bonne

↑  
Optimale

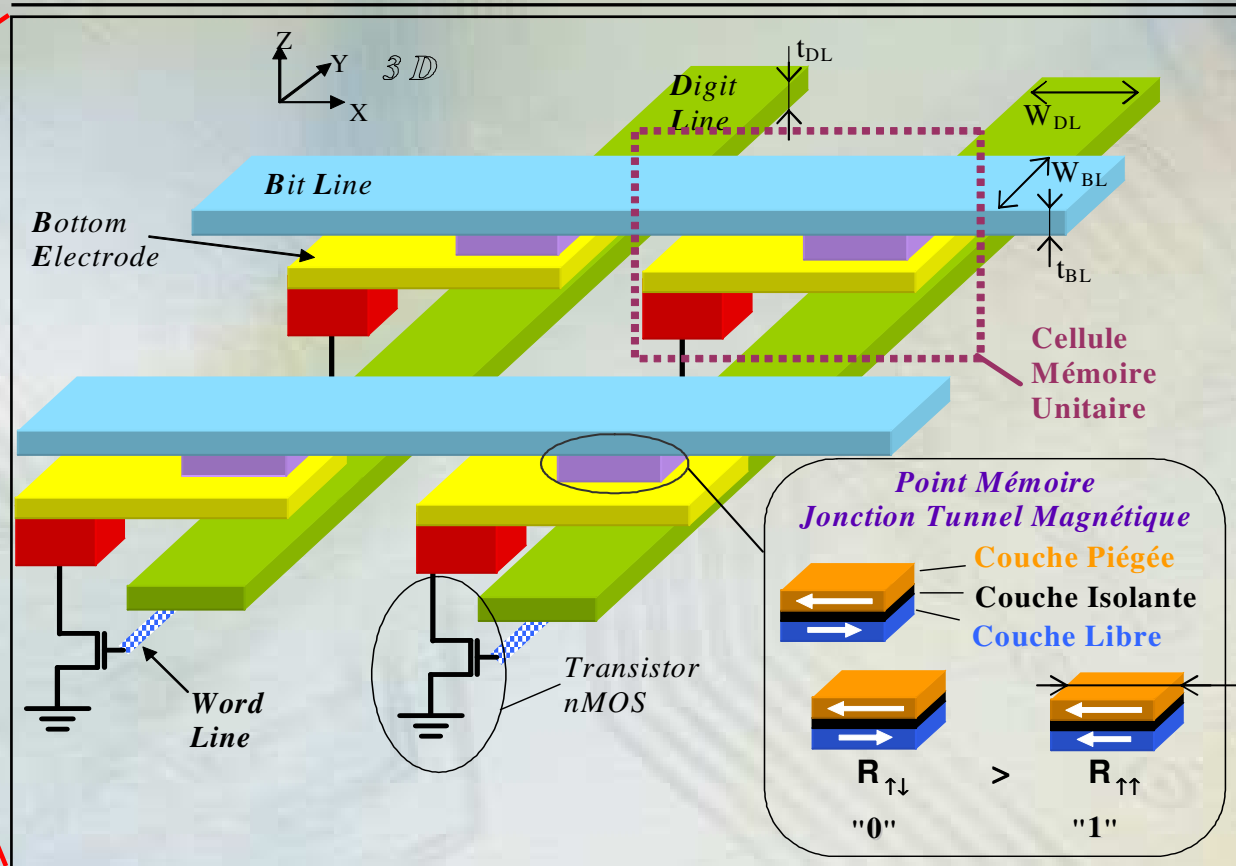
## Architecture



1 mm

Mémoire matricielle

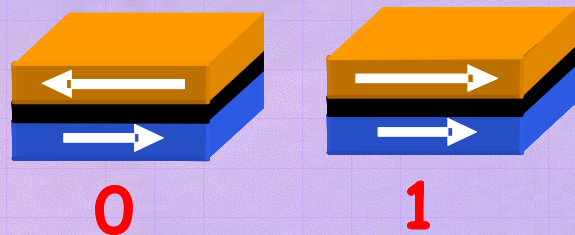
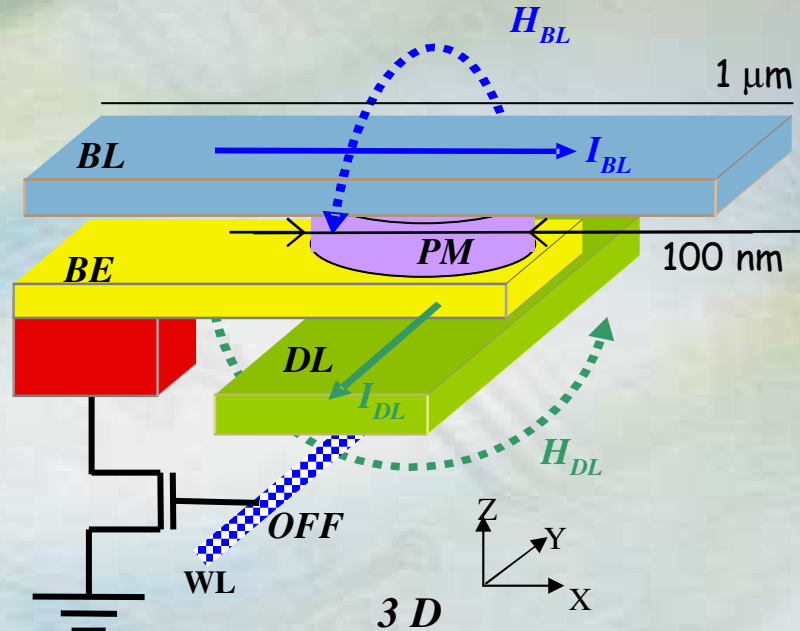
≈ 10 μm



Nécessité d'une modélisation multi-échelles

# Cellule mémoire FIMS

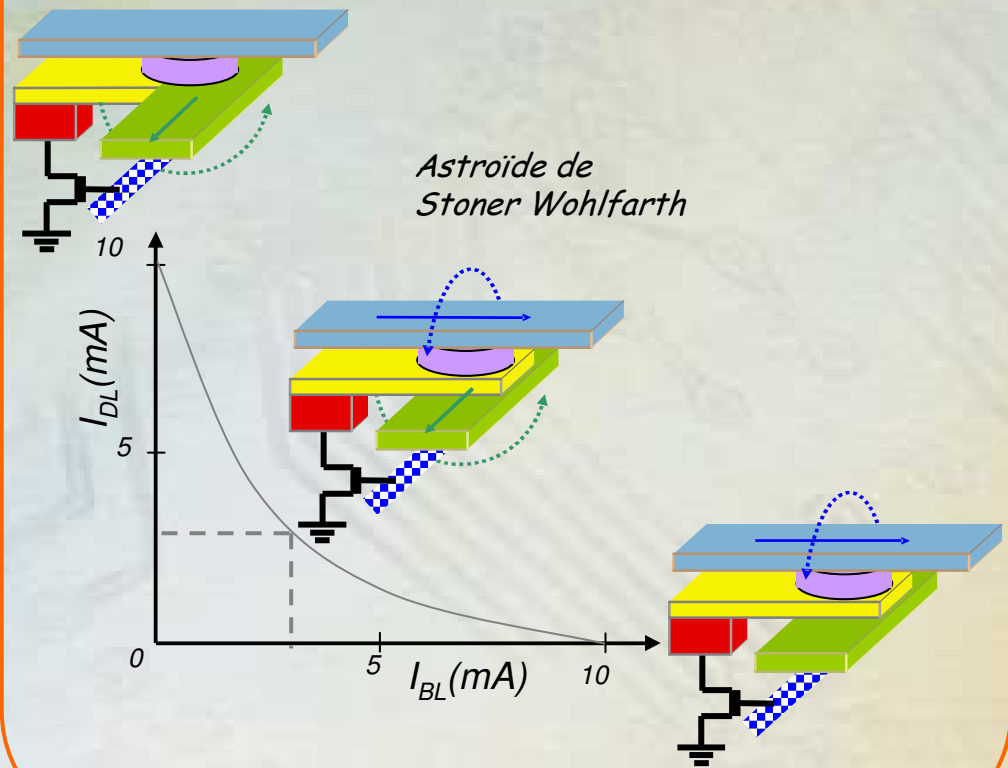
## Processus d'écriture



0                      1  
 Point mémoire  
 =  
 Jonction Tunnel Magnétique

## Mécanisme physique de sélection

$$H_R = \frac{H_K + 0.5(N_{\perp} - N_{\parallel})M_S^2}{(\sin^{2/3}(\theta_H) + \cos^{2/3}(\theta_H))^{3/2}}$$



## Finalités du modèle

Outils pour la conception de mémoire

Évaluer les interactions entre les cellules mémoires

Design du point mémoire

Compréhension physique des processus de retournement de l'aimantation

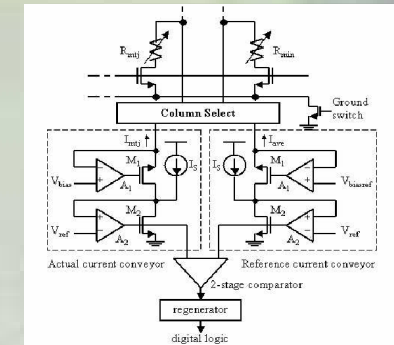
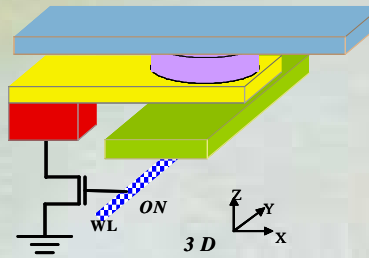
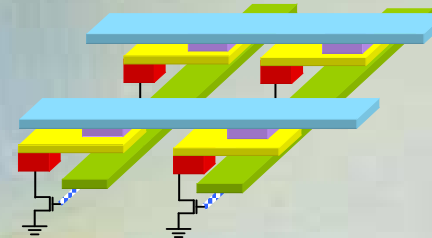
## Contraintes imposées

Intégrable dans une chaîne de conception microélectronique (Cadence®)

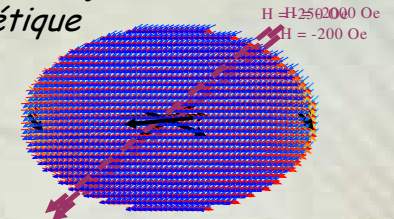
Temps de calcul rapide (10 à quelques milliers de points)

Formulations analytiques

Suffisamment précis



Couche libre de la jonction tunnel magnétique

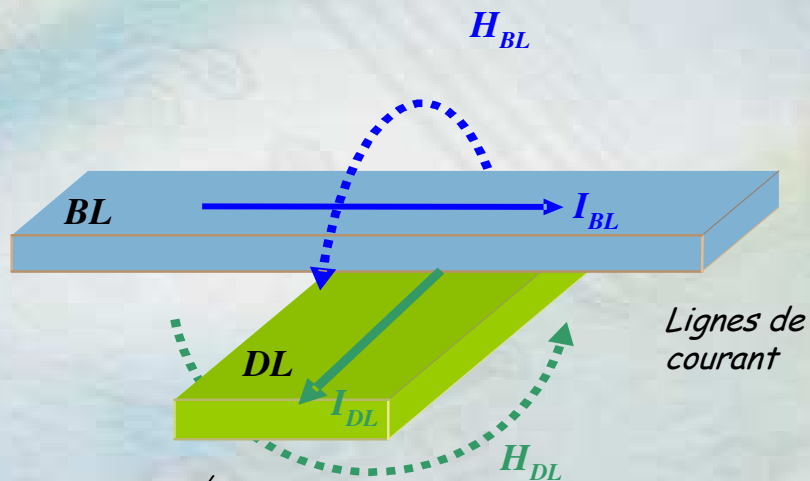




## Stratégie en deux étapes

### Modèle quasi statique

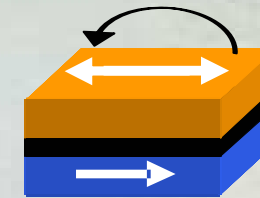
#### Calcul des champs magnétiques



~~Calcul MEF avec Flux3D~~

Modèle analytique de Biot et Savart

#### Changement de résistance de la JTM



Jonction Tunnel Magnétique

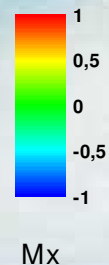
Calcul micromagnétique avec GLFFT

Modèle analytique de Stoner Wohlfarth

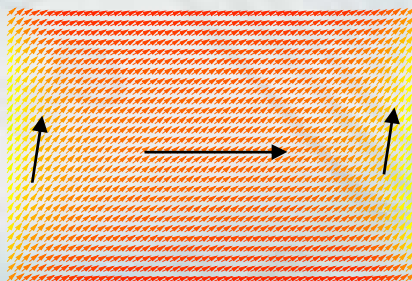
## Comparaison micromagnétique # Stoner Wohlfarth

JTM réduite à couche libre

### Micromagnétisme



Couche libre de la JTM



$$\vec{M}(\vec{r}, t)$$

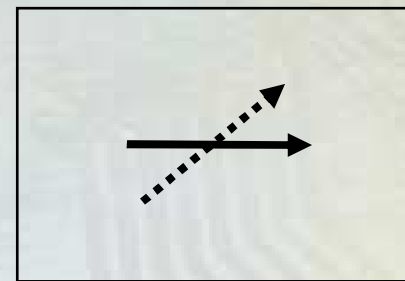
Précis

Coûteux en temps de calcul

### Stoner Wohlfarth

- macro spin
- rotation cohérente
- T = 0 Kelvin

Couche libre de la JTM



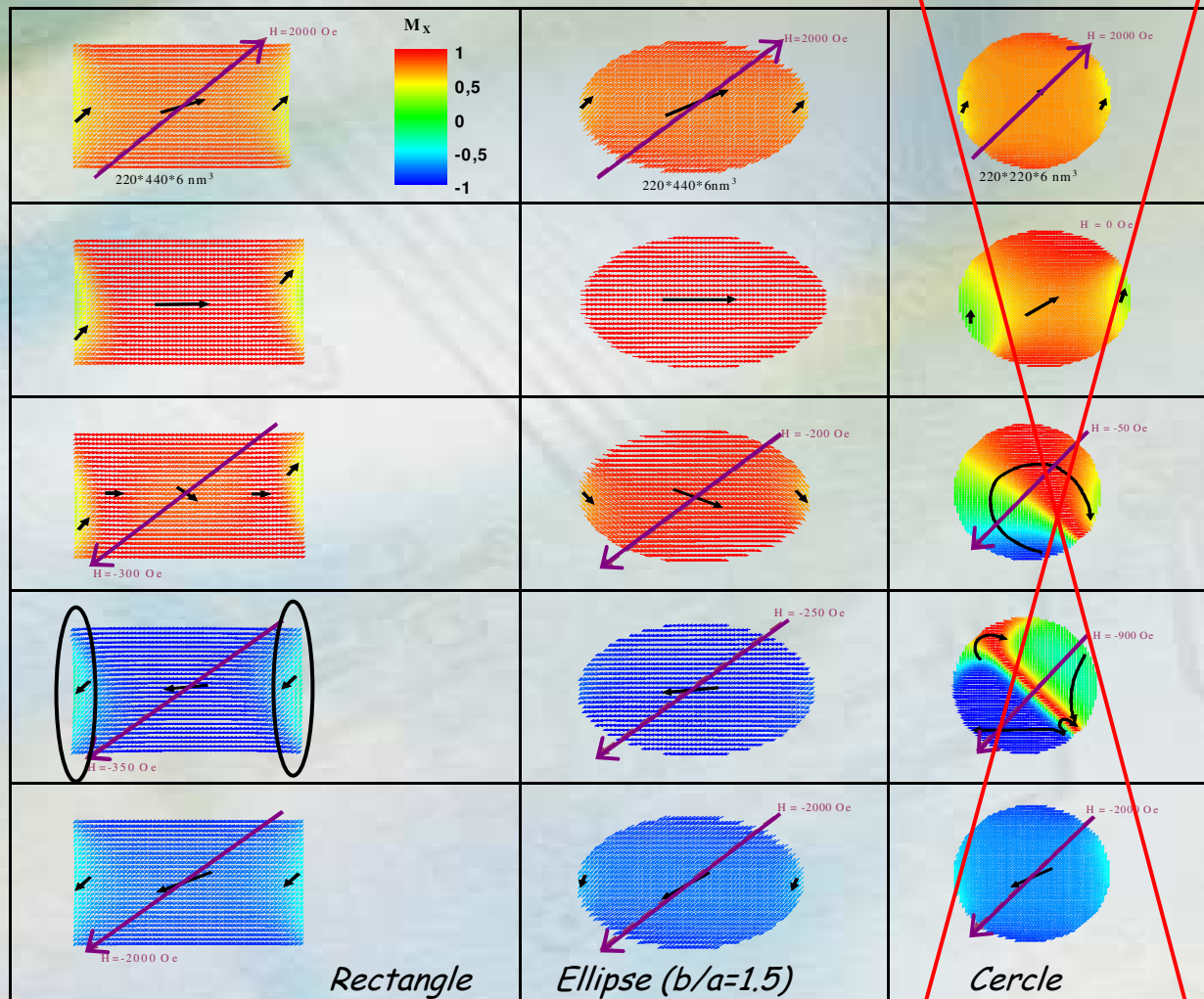
$$\vec{M}$$

Temps de calcul court

Bonne approximation dans certains cas

# Macro spin # micromagnétique (1)

En fonction de la forme

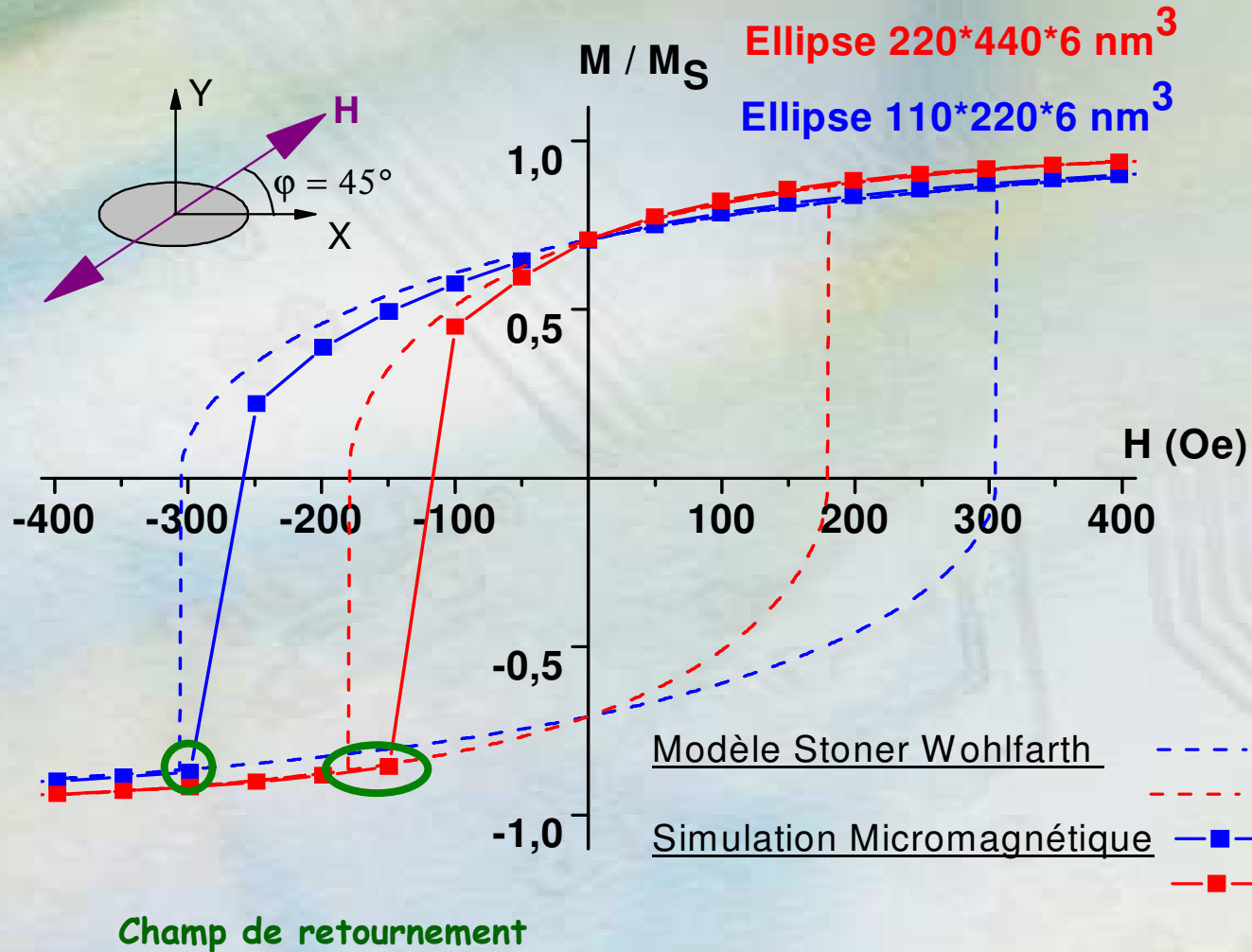


Rotation cohérente limitée au cas de l'ellipse

Travaux réalisés par Liliana Prejbeanu

# Macro spin # micromagnétique (2)

En fonction de la taille



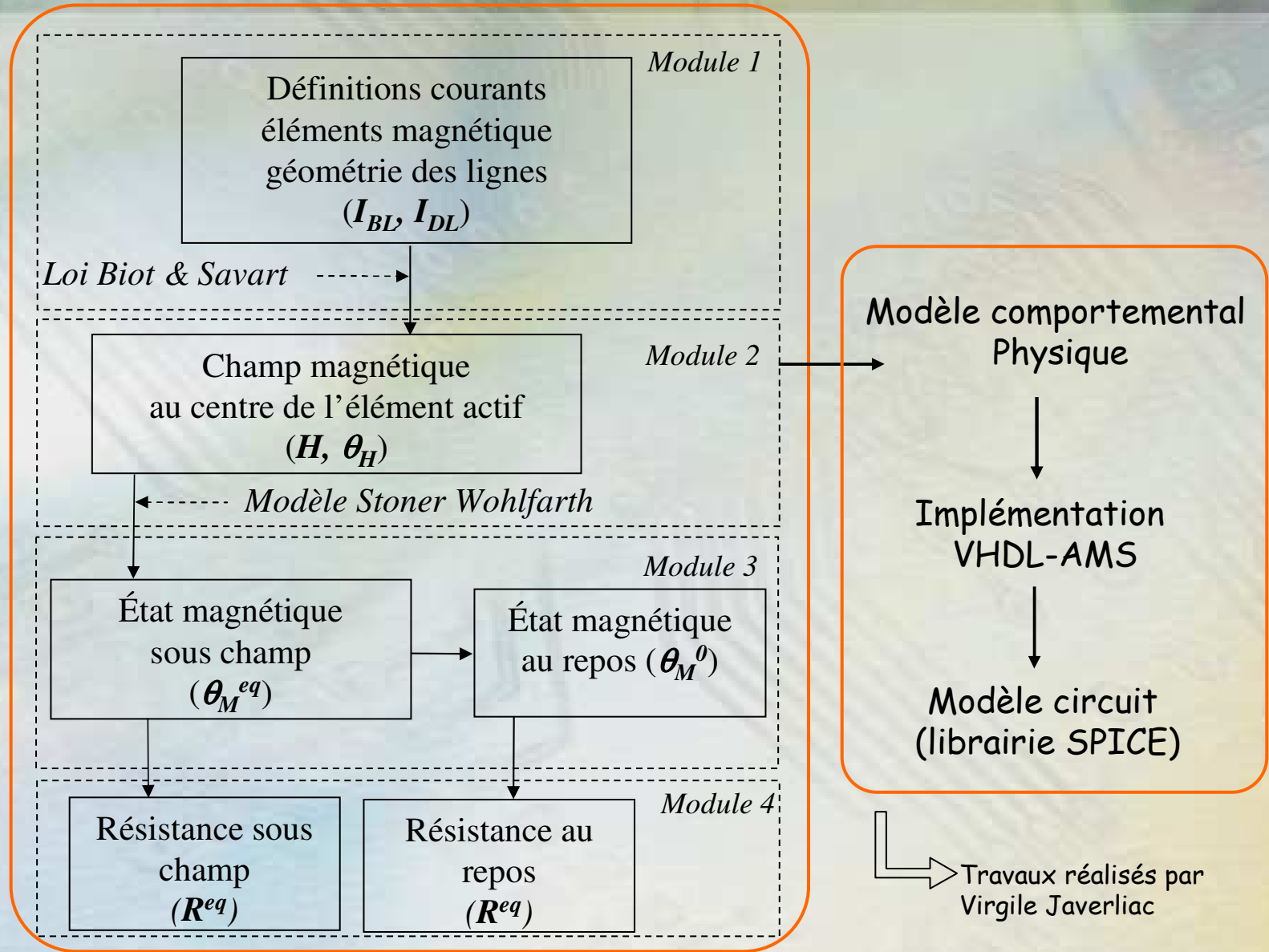
Macro spin  
 =  
 Micromagnétisme

↓

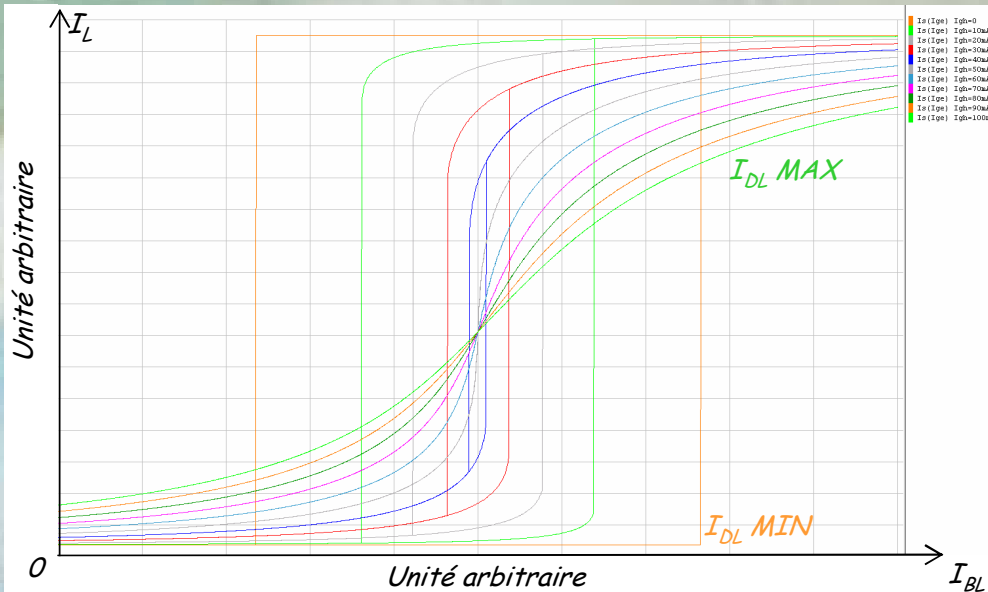
Plaquette elliptique  
 Petite taille  
 (110\*220\*6 nm<sup>3</sup>)

# Bilan modèle

## Modèle physique

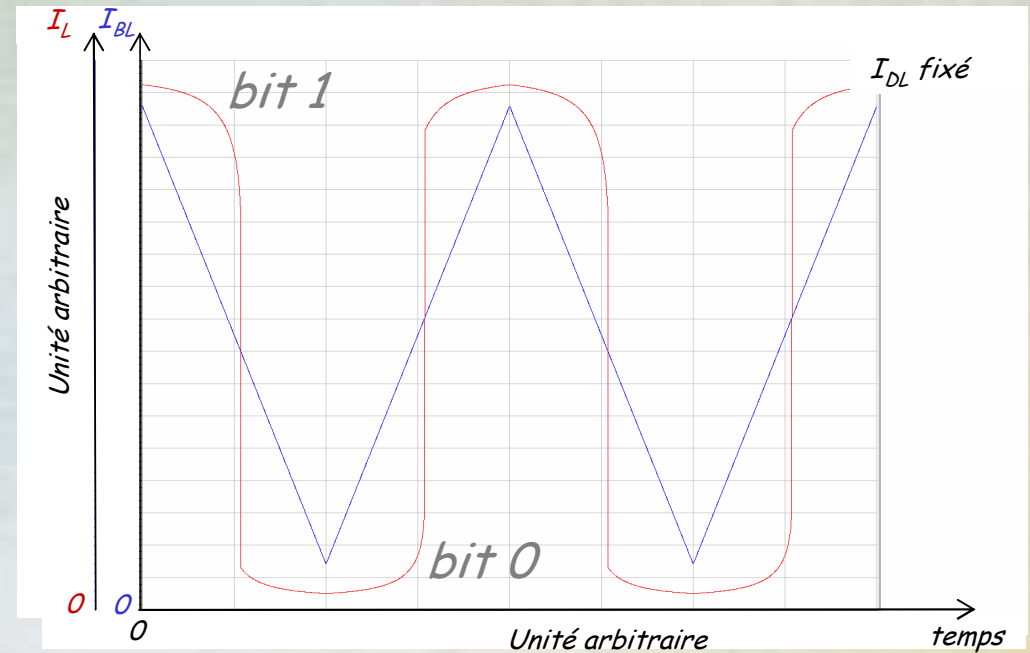
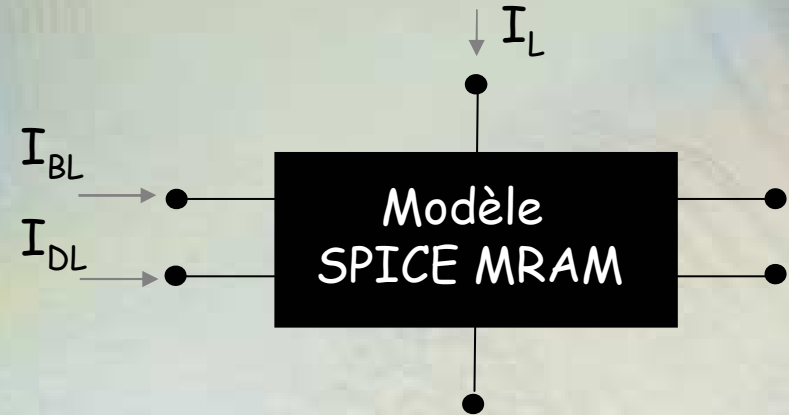


## Premiers résultats

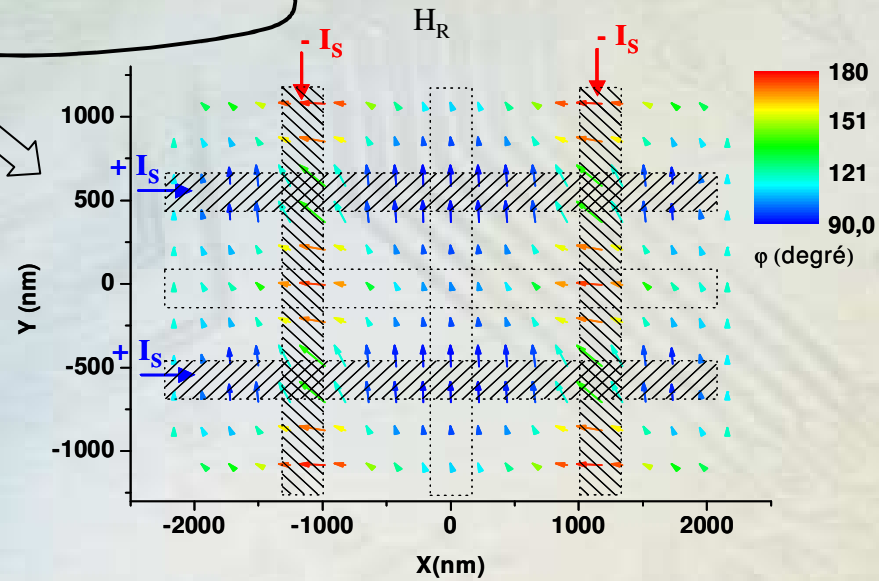
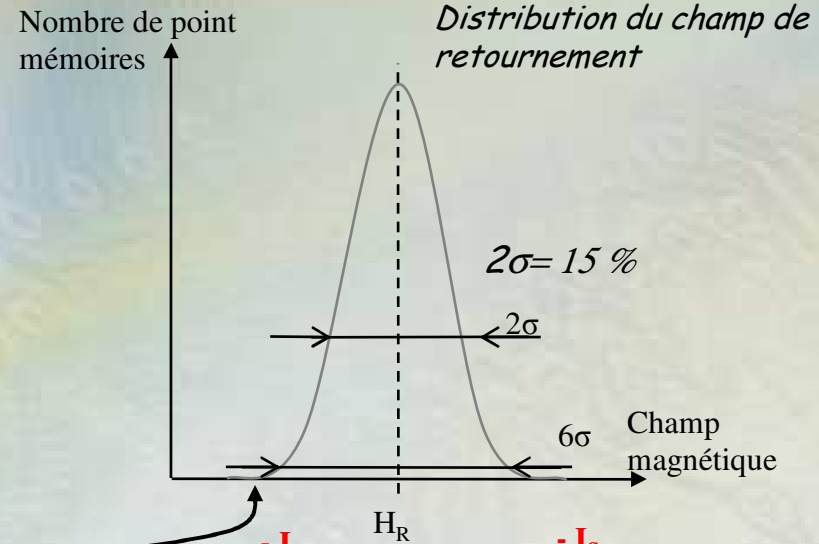
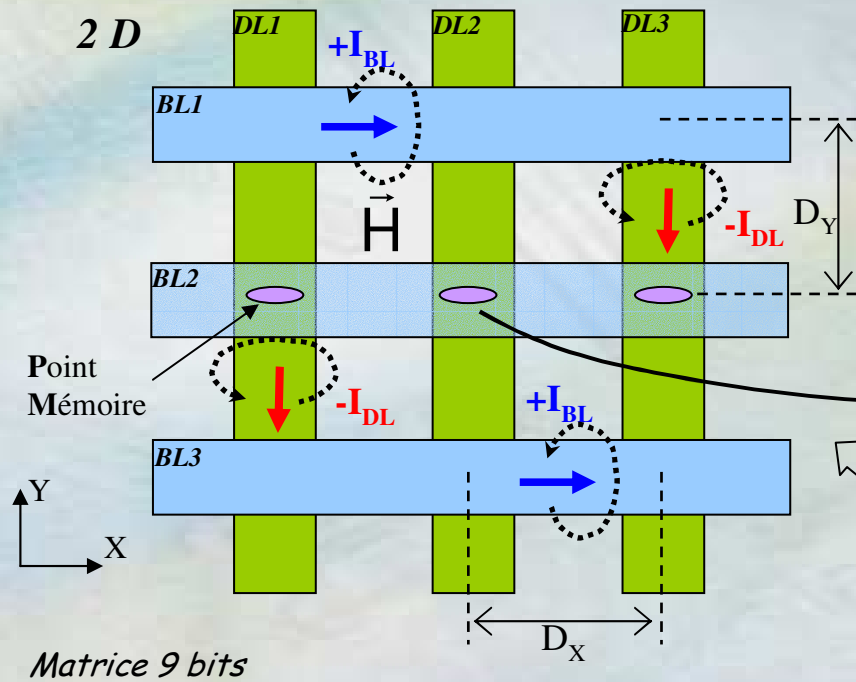


Signature Magnétique

Écriture de la mémoire



## Champs induits par les lignes



## Sélectivité

Configuration la plus défavorable

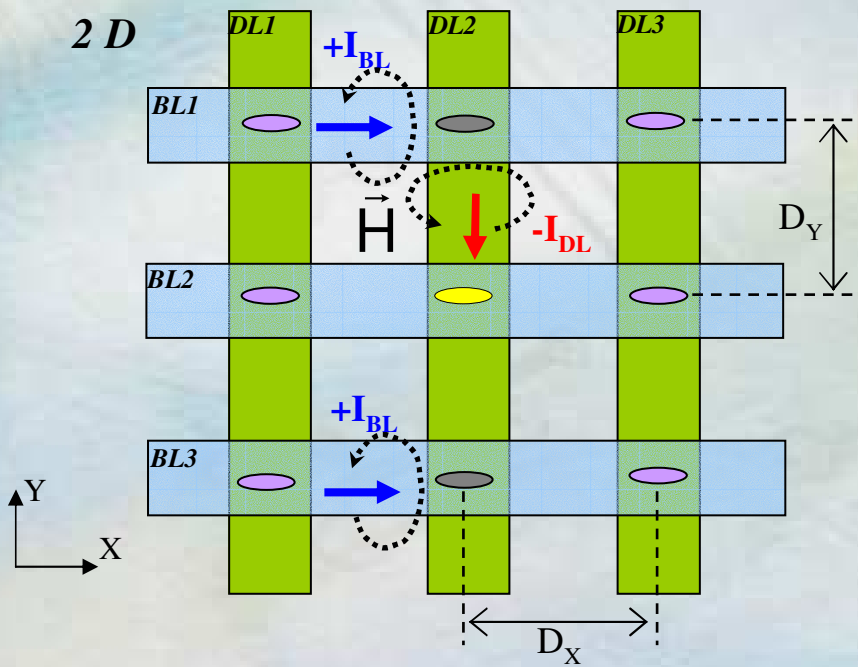
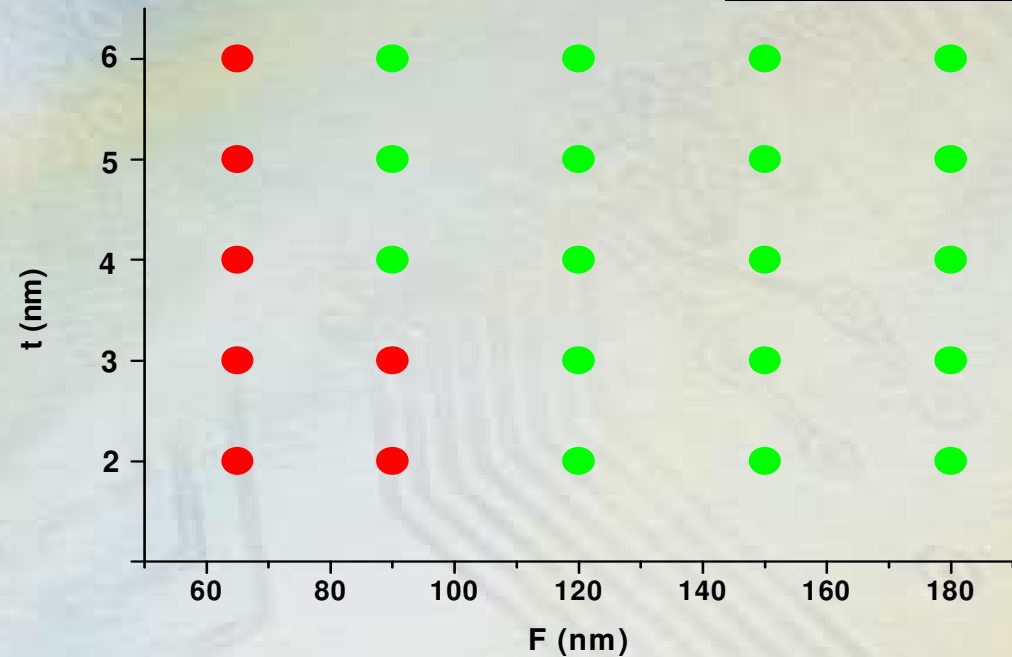


Diagramme de phase

$D_X=6F$   
 $D_Y=3F$

●  $H^{Ind} < H_R^{Min}$   
●  $H^{Ind} > H_R^{Min}$



Problème de sélectivité pour  $F \sim 120 \text{ nm}$  avec une architecture classique



## MRAM

Mise au point d'un **modèle de conception**  
pour une forme elliptique  
à température nulle

**Diaphonie importante**  
pour la technologie actuelle

## 1. Problématiques liées à la modélisation d'un micro système magnétique

- § Définition d'un micro système magnétique
- § Echelles des différentes interactions
- § Méthode de modélisation

## 2. Tête de lecture GMR pour enregistreur sur bande

- § Enregistreur sur bande magnétique
- § Solutions techniques et physiques
- § Modélisation et design du dispositif

## 3. Mémoire magnétique à accès aléatoire (MRAM)

- § Mémoire vive et MRAM
- § Méthodologie de modélisation
- § Modèle Spice pour la conception automatique
- § Diphonie

## 4. Conclusions et perspectives

# Conclusion

## Modélisation

Importance des **stratégies** de modélisation  
dans le cas des microsystemes

Différentes approches selon la **taille**  
**caractéristique**

Modèles analytiques simples et performants

Activité  
**GMR-Yoke suspendue**

**Améliorer le modèle comportemental**  
de la cellule MRAM  
(intégration T, géométries plus complexes,  
dynamique)



leti

Merci à tous



Spintec Team

