

Modèles analytiques électromagnétiques tri dimensionnels des actionneurs disques. Etude théorique et expérimentale des pertes magnétiques dans les matériaux granulaires.

RÉSUMÉ DES TRAVAUX DE THÈSE DE:

O. de la Barrière (actuellement post-doctorant à l'INRIM de Turin)

LABORATOIRE:

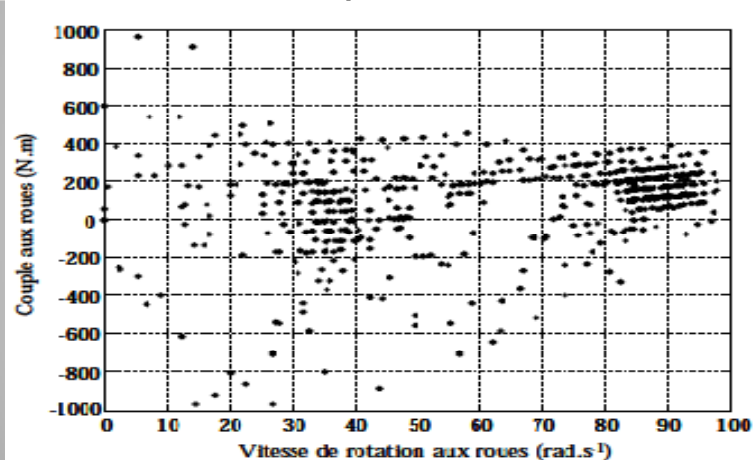
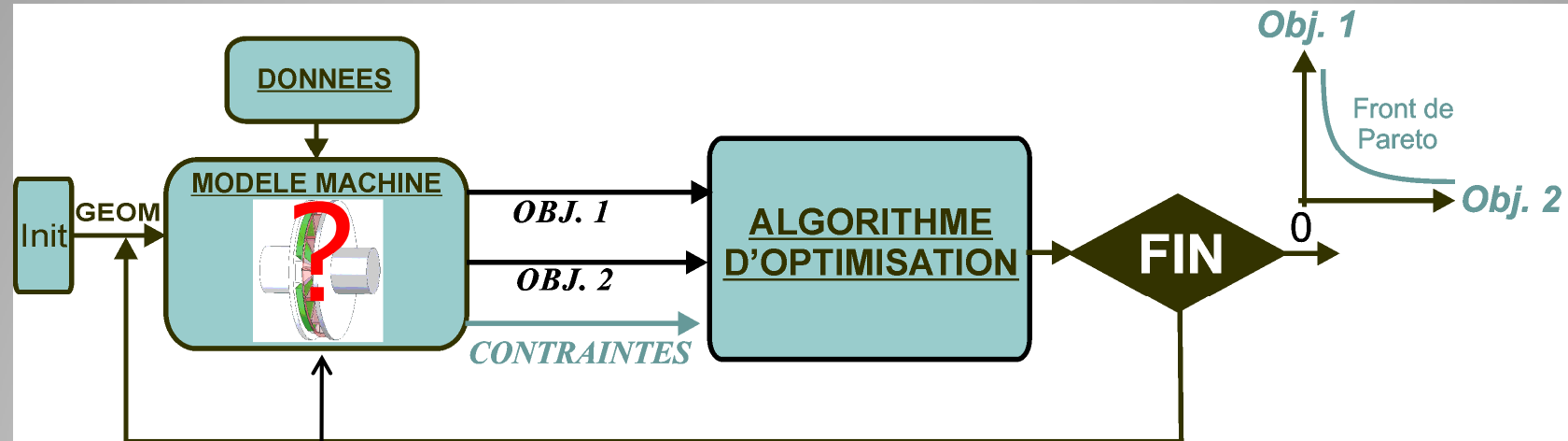
SATIE (équipes SETE et IPEM), collaboration avec l'INRIM

Plan

1. La modélisation analytique électromagnétique 3D des actionneurs disques
2. Etude théorique et expérimentale des pertes magnétiques dans les matériaux granulaires

Introduction: Pourquoi des modèles électromagnétiques en Génie Electrique?

Conception optimale d'un actionneur pour un cahier des charges complexe



Thèse J. Régner (ENSEEIH, 2003)

Nécessite un modèle

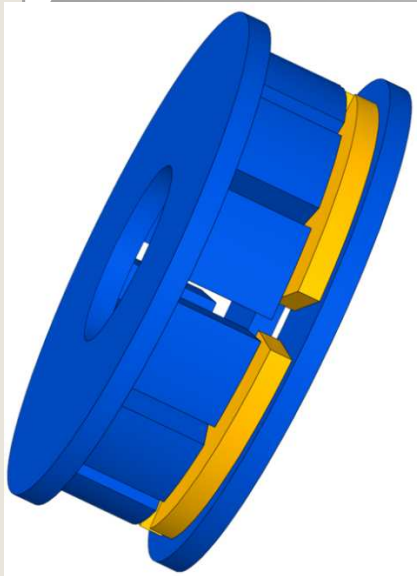
- précis
- rapide



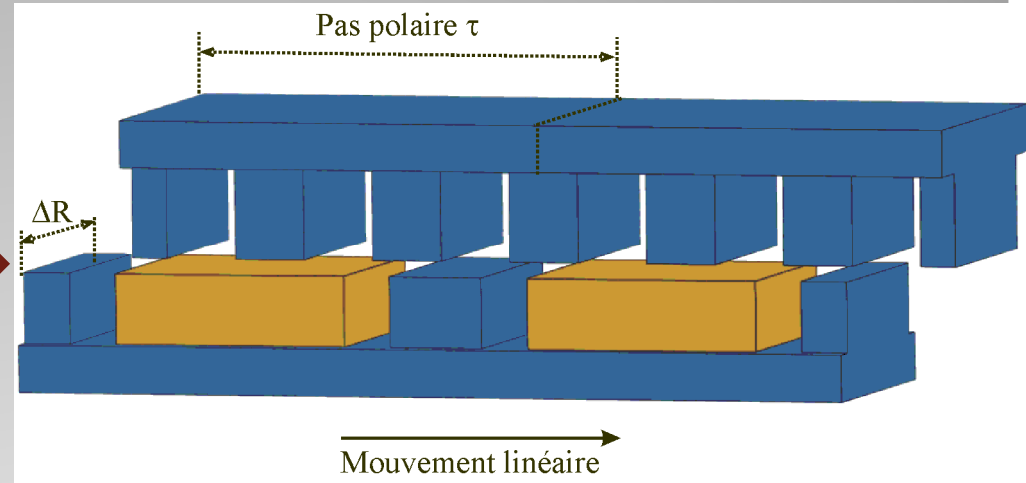
Approfondissement des modèles électromagnétiques analytiques et des modèles de matériaux magnétiques

Les modèles analytiques 3D des actionneurs disques

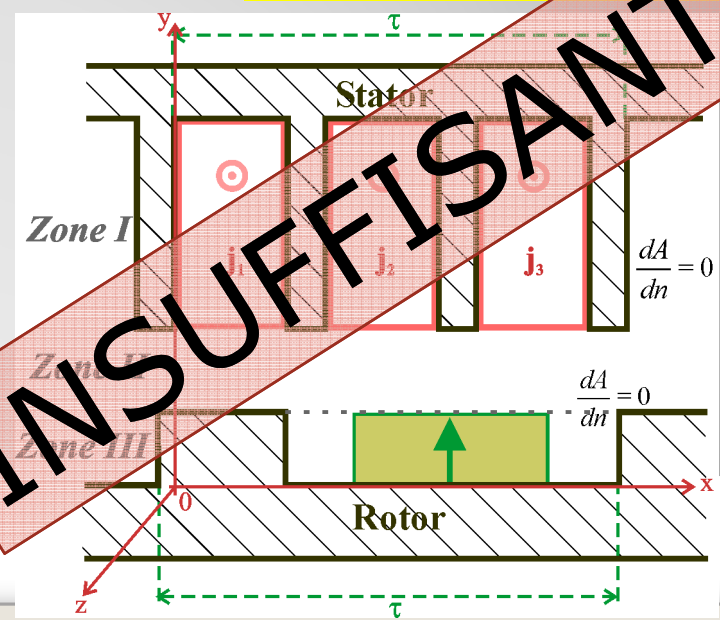
Pourquoi des modèles 3D des actionneurs disques?



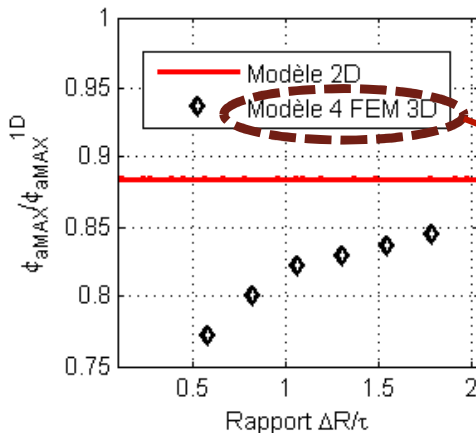
Hyp. 1
Rayon moyen



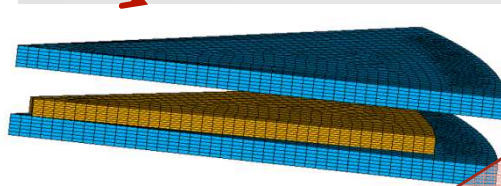
Hyp. 2
Approx. 2D: $\Delta R \gg \tau$



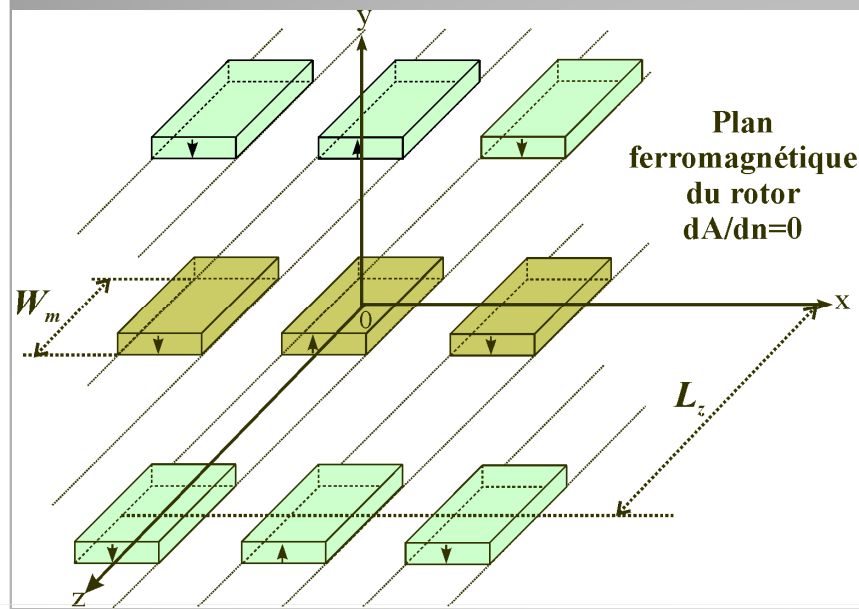
INSUFFISANT



$$\phi_{aMAX}^{1D} = \frac{h_a}{h_a + e_c} B_r \cdot S_a$$



Premier modèle: 3D avec développement au rayon moyen



Périodisation:

$$L_z \gg W_m$$

➔ Utilisation des séries de Fourier suivant (0z)

Résolution potentiel-vecteur

$$\begin{cases} \Delta \vec{A} = \mu_0 \cdot \text{rot } \vec{M} & (\text{aimants}) \\ \Delta \vec{A} = 0 & (\text{entrefer}) \\ \frac{\partial A}{\partial n} = 0 & (\text{plan en fer}) \end{cases}$$

$$\vec{A}(x, y, z) = \begin{pmatrix} A_x(x, y, z) \\ 0 \\ A_z(x, y, z) \end{pmatrix}$$

➔ *Jauge de Coulomb: détermination de A_x*

↓ Séparation des variables

$$A_x(x, y, z) = \sum_{k, q \geq 1} a_{x_{k, q}}(y) \sin\left(\left(2k - 1\right) \frac{\pi}{\tau} x\right) \cos\left(\left(2q - 1\right) \frac{\pi}{L_z} z\right)$$

Exemple: Zone d'aimants

$$\Delta A_x = -\mu_0 \frac{\partial M_y}{\partial z}$$

$$\frac{\partial^2 a_{x_{k, q}}}{\partial y^2} - \lambda_{k, q}^2 a_{x_{k, q}} = -\left(2q - 1\right) \frac{\pi}{L_z} \mu_0 M_{y_{k, q}}$$

↓ **Solution**

Raccords H_t/B_n
=> **Constantes**

$$a_{x_{k, q}}(y) = a_{x_{k, q}}^{(0)} \cdot \cosh(\lambda_{k, q} y) + \left(2q - 1\right) \frac{\pi}{L_z \lambda_{k, q}^2} \mu_0 M_{y_{k, q}}$$

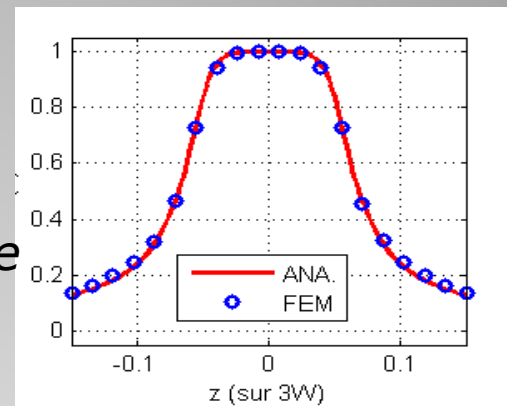
Problème de la largeur finie du fer

Inductions:

$$\begin{cases} B_x &= \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ B_y &= \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ B_z &= -\frac{\partial A_x}{\partial y} \end{cases}$$

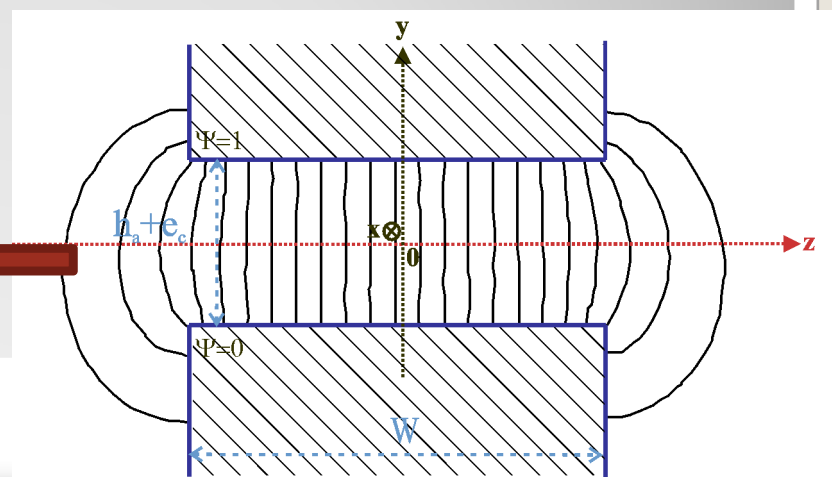
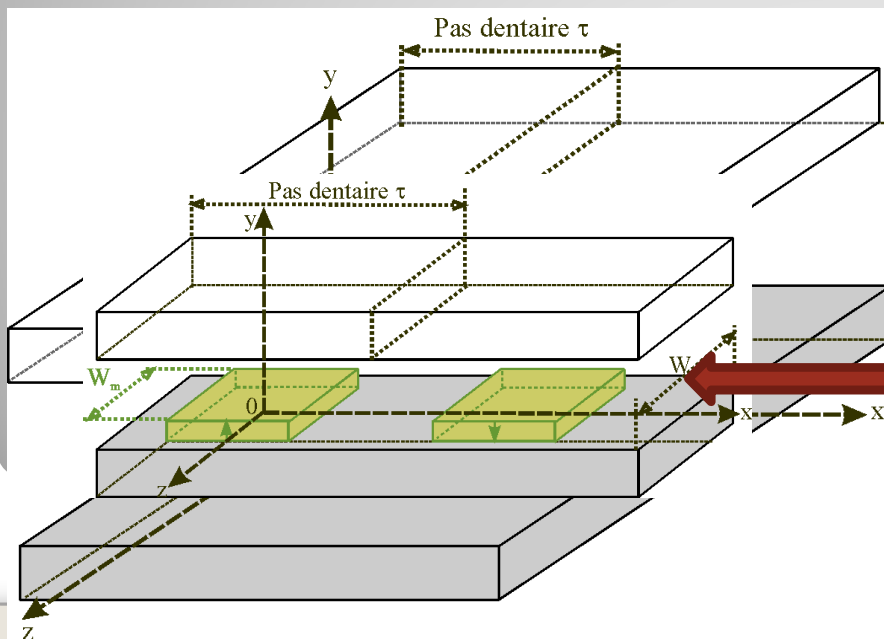
$B_y^{3D}(x,y,z)$

$m(z)$
Fonction perméance relative



Problème: •Aimant de largeur finie W_m
•MAIS fer de largeur infinie

•Calcul analytique de H_y sur $(0z)$
•Normalisation



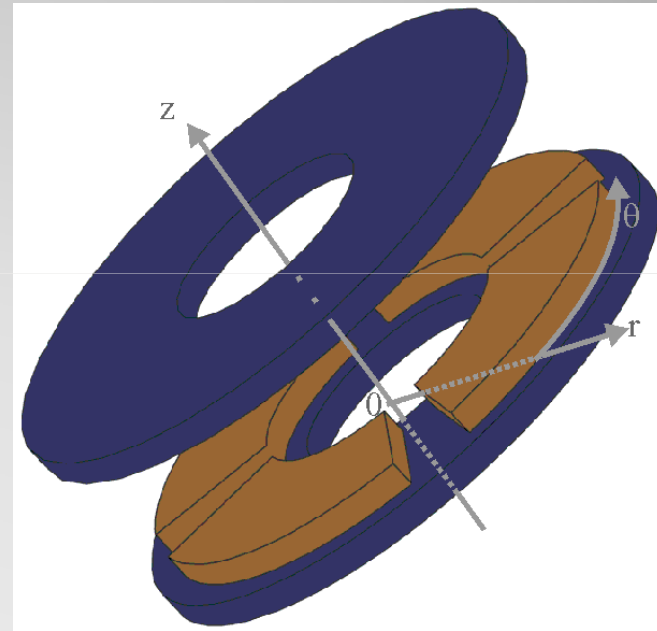
Second modèle: 3D sans développement au rayon moyen

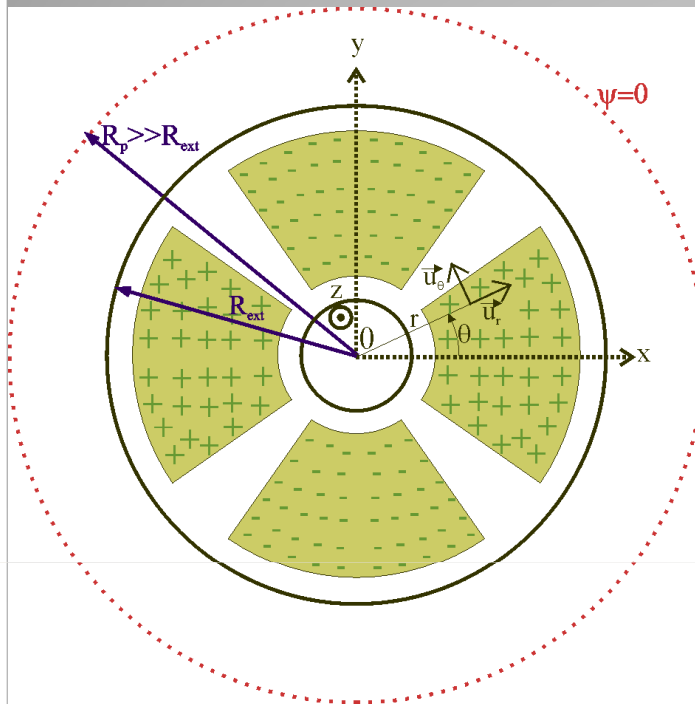
But: Prendre en compte à la fois:

- Les effets de bords radiaux
- L'effet de courbure



Lissage du stator





•Modélisation en potentiel magnétique scalaire Ψ

➔ *Aimants* \Leftrightarrow *densité surfacique de charge (modèle coulombien)*

•Equation de Laplace en coord. cylindriques:

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial\theta^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} = 0$$

•Conditions aux limites:

$$\begin{cases} H_t=0 \text{ (air/fer)} \\ \Psi=0 \text{ si } r \rightarrow \infty \\ H_{t2}-H_{t1}=\sigma^* \text{ et } B_{n2}=B_{n1} \end{cases}$$

➔ *Solution*

$$\psi(r, \theta, z) = \sum_{k,m \geq 1} [\xi_{k,m} \cosh(K_{k,m}z) + \zeta_{k,m} \sinh(K_{k,m}z)] J_{(2k-1)p}(K_{k,m}r) \cos[(2k-1)p\theta]$$

➔ Constantes données par les limites

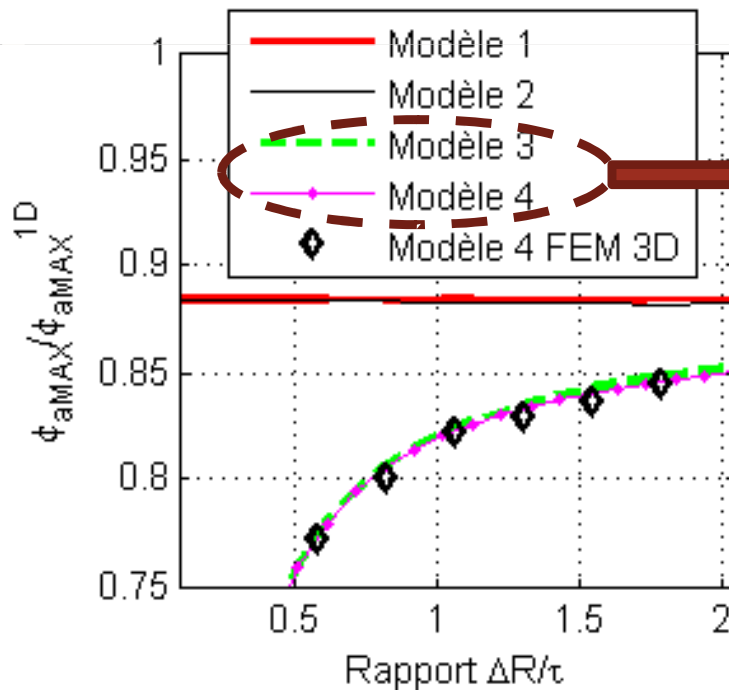
•Utilisation de la fonction de modulation pour prendre en compte les bords du fer

Résultats

Modèle	Effet de bords	Effet de courbure
Modèle 1	Non	Non
Modèle 2	Non	Oui
Modèle 3	Oui	Non
Modèle 4	Oui	Oui

modèles 2D

modèles 3D

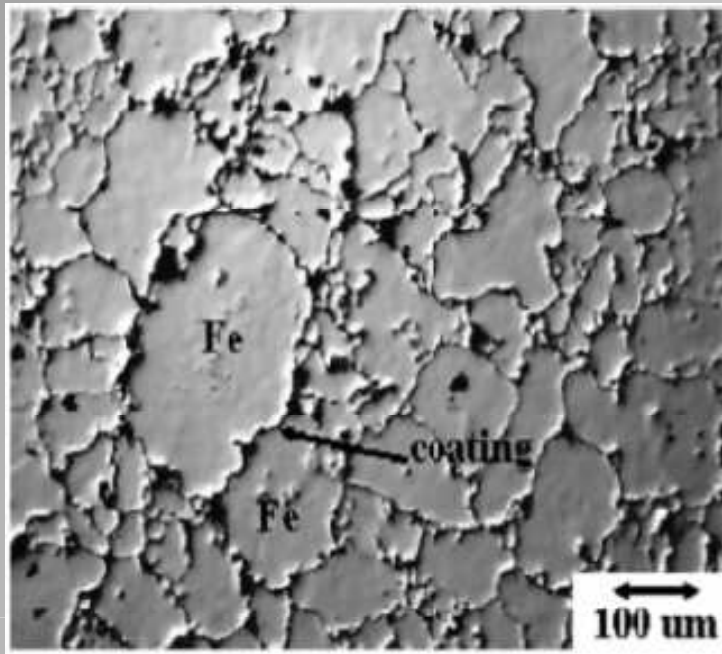


$$\varphi_{aMAX}^{1D} = \frac{h_a}{h_a + e_c} B_r \cdot S_a$$

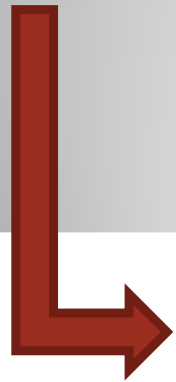
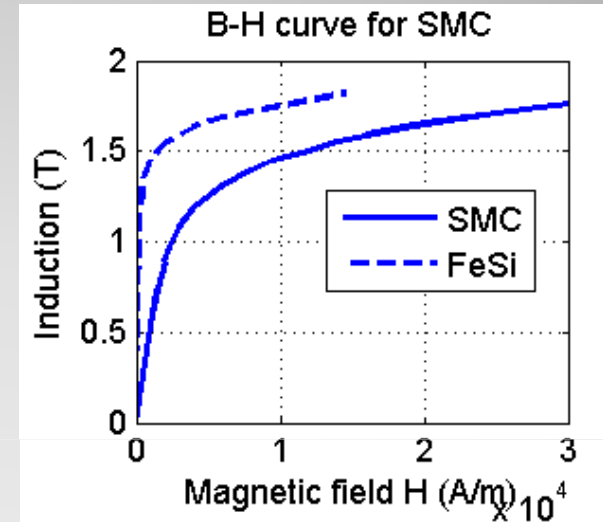
- Conclusions:
- *Modèles 3D (effet de bords): IMPORTANT*
 - *Effet de courbure: NEGLIGEABLE*

Les modèles de pertes dans les matériaux magnétiques granulaires

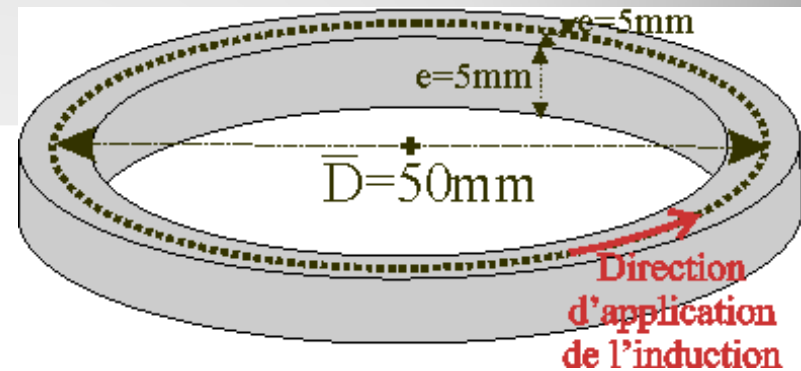
Présentation des matériaux magnétiques composites



Grains de fer isolés et compactés (Isotropie)



Caractérisation des pertes dans des tores de matériaux

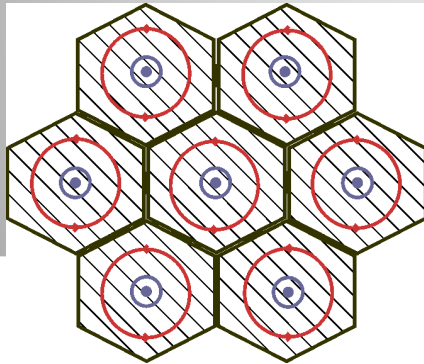


Procédure de séparation des pertes matériaux magnétiques composites

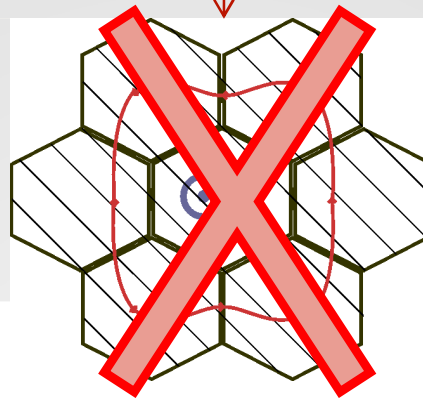
$$W_{tot}(J_p, f) = W_{clasMIC}(J_p, f) + W_{clasMAC}(J_p, f) + W_{hyst}(J_p) + W_{exc}(J_p, f)$$

Deux termes de courants induits

- à l'échelle du grain (« MICrososcopique »)
- à l'échelle de l'échantillon, à cause de l'isolation imparfaite des grains entre eux (« MACrososcopique »)



Pertes locales

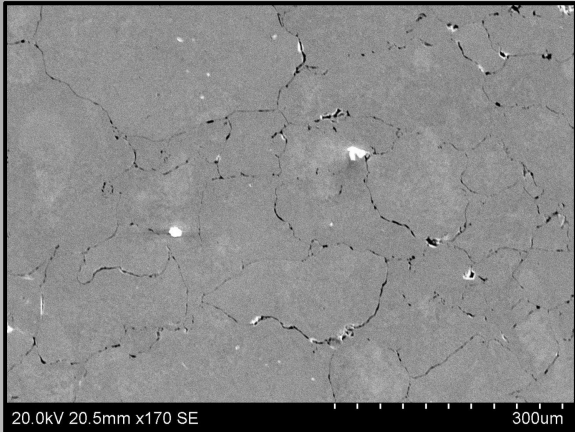


Pertes globales

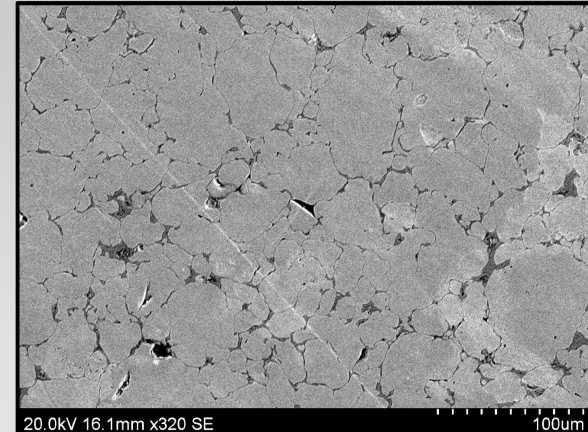
*Négligé dans ce travail
en prenant un échantillon
assez petit*

Pertes classiques (locales)

- Analyse statistique des micrographies (taille et forme des grains)



Matériau A à gros grains (machines électriques)



Matériau B à petits grains (Electronique de puissance)

- Calcul analytique des courants de Foucault dans des rectangles équivalents



$$W_{\text{clas}} = \cancel{K \left(\frac{l}{L} \right)} \sigma \frac{1}{f} \left\langle \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \right\rangle S_{\text{rect}}$$

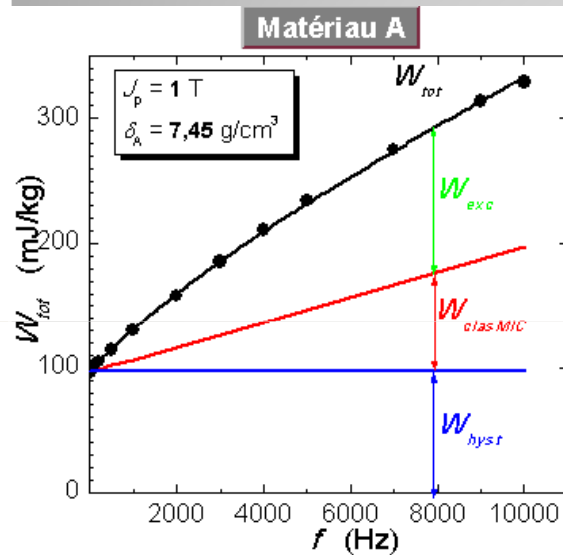
Calculé analytiquement sous forme de série

Séparation des pertes

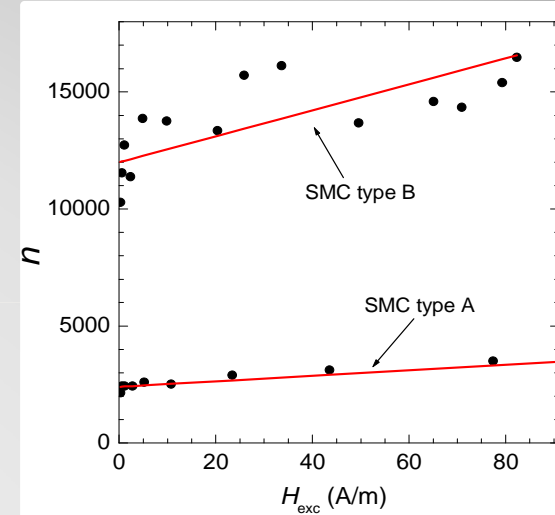
Calcul du terme de pertes par hystérésis: $W_{hyst}(J_p) = \lim_{f \rightarrow 0} W_{tot}(J_p, f)$

Calcul des pertes excédentaires:

$$W_{exc}(J_p, f) = W_{tot}(J_p, f) - W_{hyst}(J_p) - W_{clas}(J_p, f)$$



Analyse des pertes excédentaires par la théorie de Bertotti

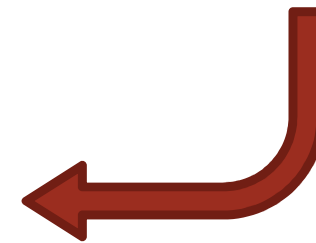


$$n(H_{exc}) \approx n_o$$

Tôles
 $W_{exc} \propto \sqrt{f}$



Poudres
 $W_{exc} \propto f$

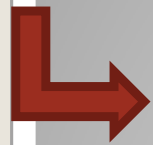


Conclusions

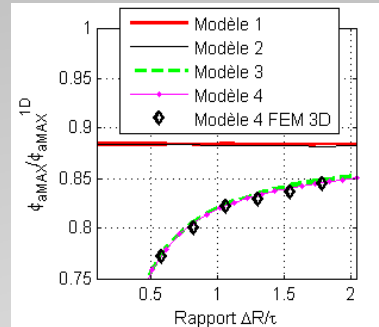
Pour les modèles 3D des machines disques:

- Prise en compte des effets de bords radiaux (avec ou sans courbure)

FONDAMENTAL



Intérêt des modèles analytiques 3D



- Gain en temps de calcul analytique/EF

2D	3D
40%	95%

- Effet de courbure

SECONDAIRE



Validité du développement au rayon moyen POUR LE FLUX A VIDE

Pour les pertes magnétiques dans les poudres:

- Modèle de pertes classiques microscopiques
- Pertes excédentaires $\propto f$