

Contribution à la modélisation des pertes dans les matériaux magnétiques de dispositifs électromécaniques. Extension vectorielle du Modèle LS et intégration en résolution éléments finis

Léopold Mikula^{1,2}

Co-directeur de thèse: Afef Lebouc¹, Gérard Meunier¹

Co-encadrants: Brahim Ramdane¹, Carlos Valdivieso², Lucas Blatner Martino²

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

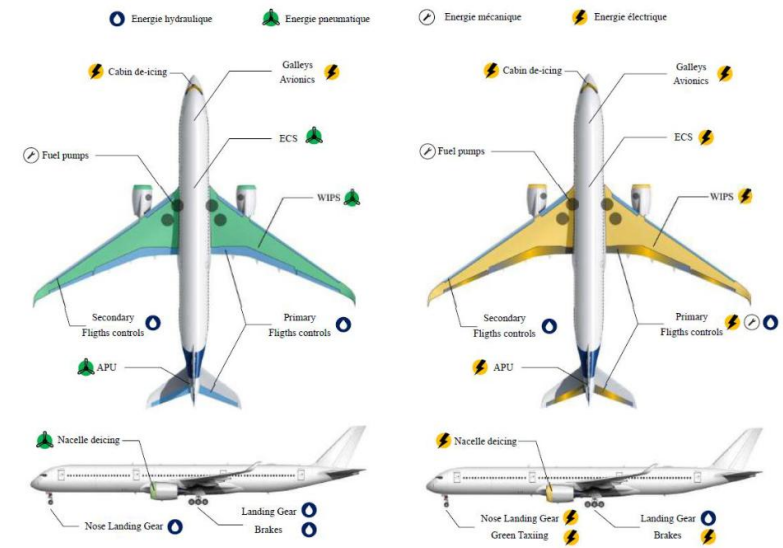
²Altair Engineering France, 38240 Meylan, France



Contexte général

La transition énergétique vise à une forte réduction des GES :

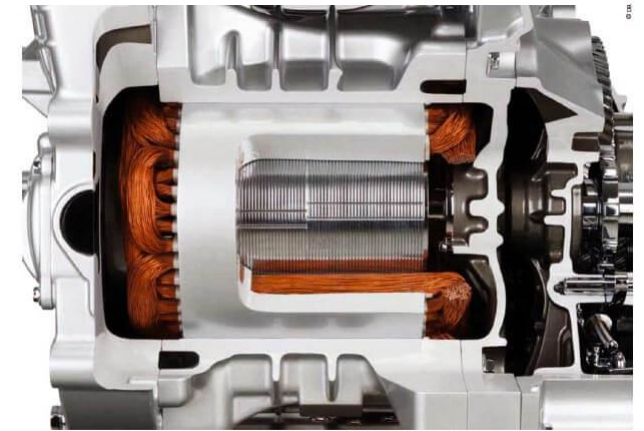
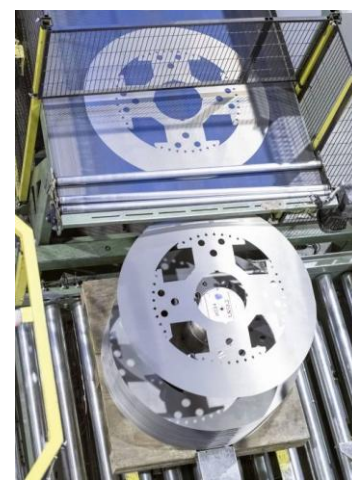
- Électrification massive des transports et des procédés industriels
 - Remplacement des moteurs à combustion par des systèmes électriques plus efficaces
- Amélioration de l'efficacité des dispositifs électriques (50 % de la consommation électrique)
 - Diminution de la consommation électrique globale



Dispositifs électromécaniques

Structure des dispositifs étudiés

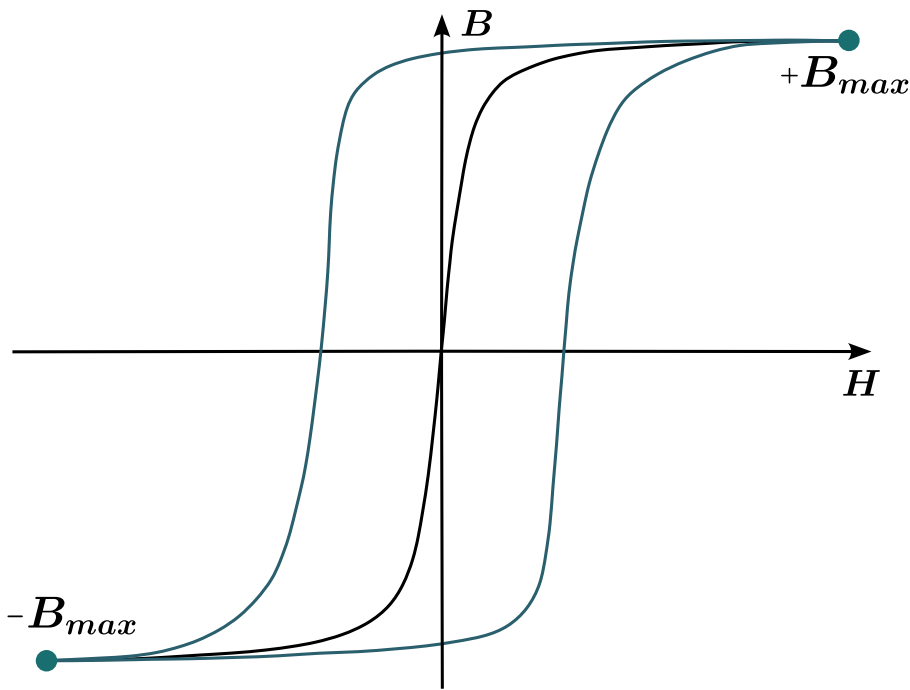
- Sources de champ: bobinages, aimants permanents
- Circuit magnétique feuilleté : Assemblage de tôles minces magnétiques et conductrices
 - Matériaux ferromagnétiques doux s'aimantant facilement en présence de champ magnétique H



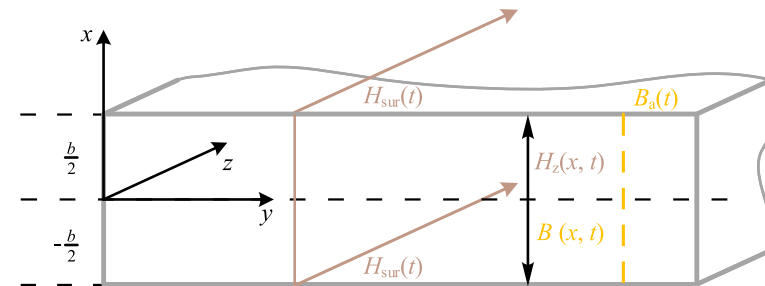
Le moteur de la Nissan Leaf, la voiture électrique la plus vendue au monde.

- $\mu_r \geq 10^3$

- J_{sat} compris entre 1.5 T et 2.4 T



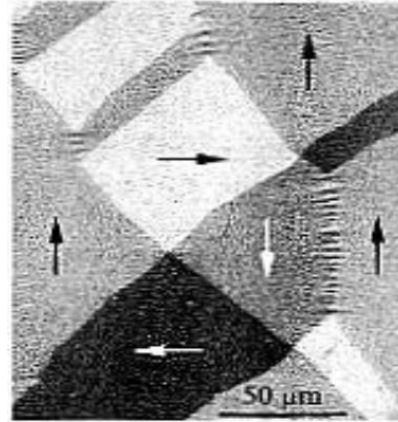
$$W = f \oint (H \cdot \delta B + E \cdot J) = f \oint H_{surf} \cdot \delta B_{moy} \quad (W \cdot m^{-3})$$



Origines des pertes fer

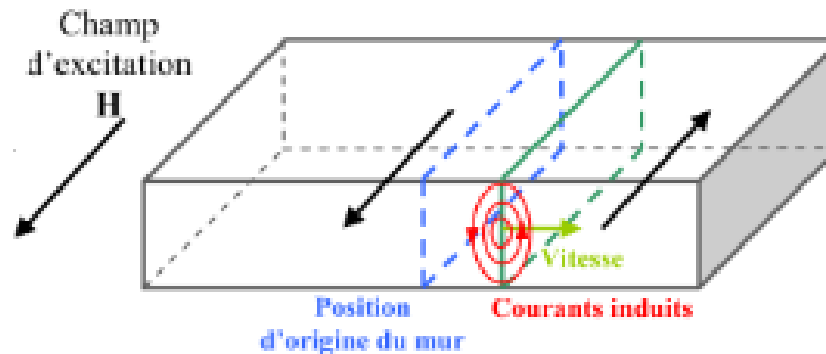
Structure en domaines magnétiques

- A l'échelle mesoscopique le matériau est structuré en domaine magnétique
 - En l'absence de champ magnétique H l'aimantation globale est nulle
 - L'application du champ H va modifier la structure



Processus d'aimantation (statique)

- Déplacement de parois de Bloch
 - Déformation élastique
 - Saut irréversible de parois
- Rotation cohérente des moments



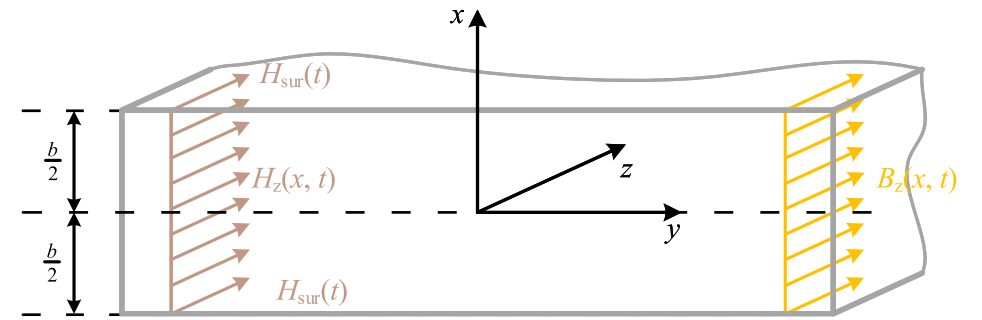
Cycles d'hystérésis

- La dissipation d'énergie liée au déplacement des parois se traduit à l'échelle macroscopique par un retard entre l'induction B et le champ H

Influence de la fréquence

A faible fréquence :

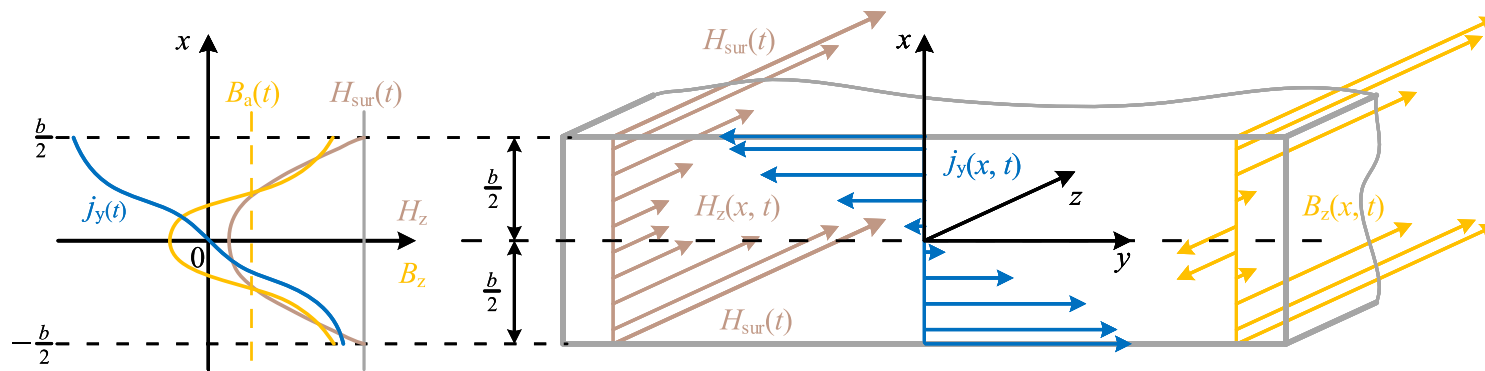
- Peu de courants induits
- H et B sont homogènes dans l'épaisseur de la tôle



Influence de la fréquence

A plus haute fréquence :

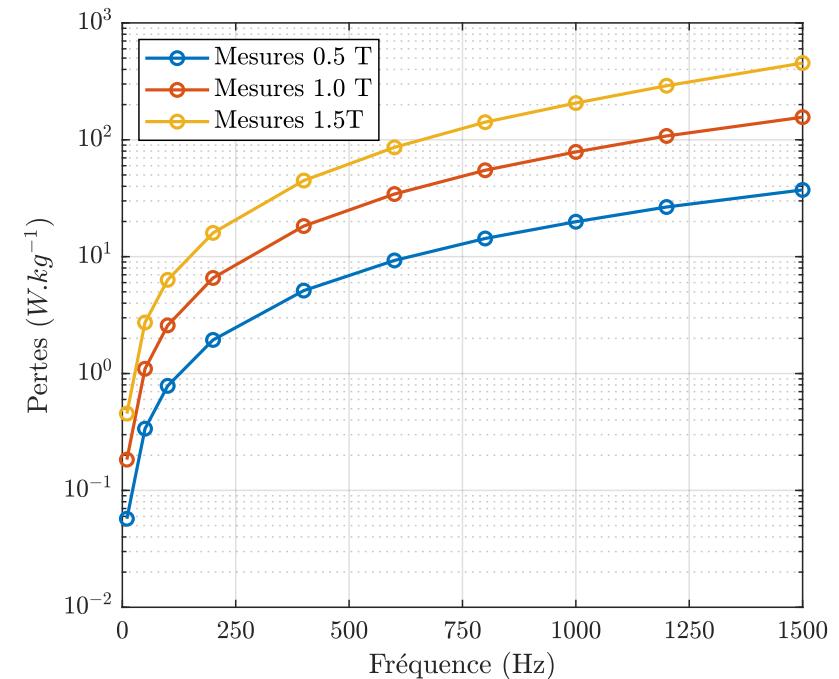
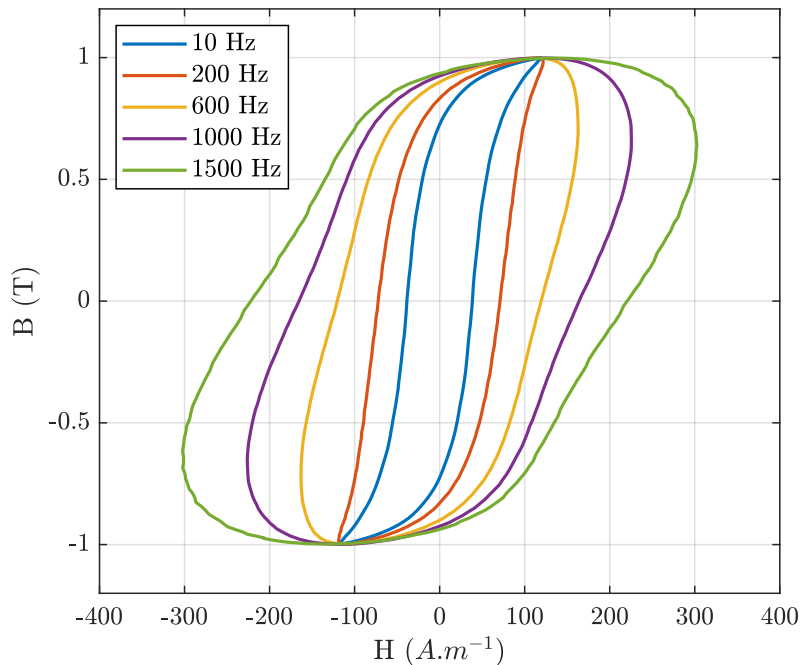
- Développement de courants induits macroscopiques
- Création d'un champ qui s'oppose au champ d'excitation
- H et B ne sont plus homogènes dans l'épaisseur de la tôle
- Elargissement du cycle d'hystérésis $H_{surf}(B_{moy})$



Influence de la fréquence

A plus haute fréquence :

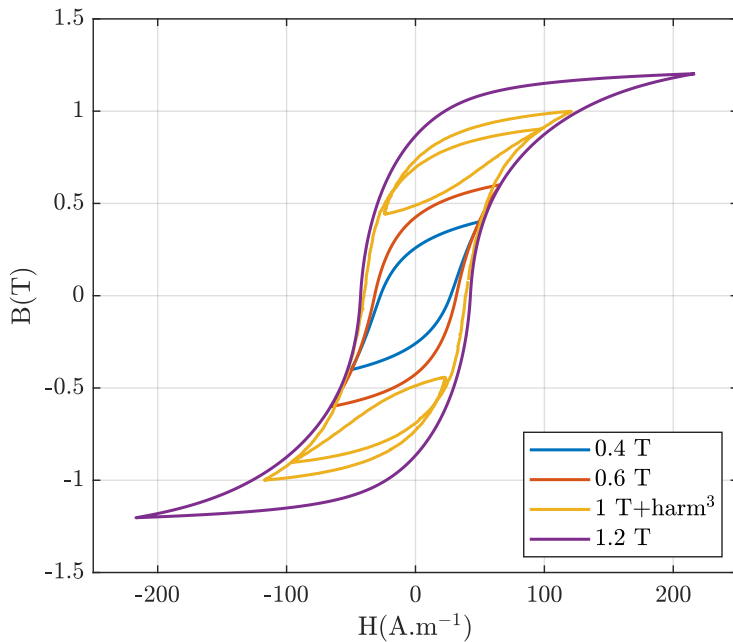
- Développement de courants induits macroscopiques
- Création d'un champ qui s'oppose au champ d'excitation
- H et B ne sont plus homogènes dans l'épaisseur de la tôle
- Elargissement du cycle d'hystérésis $H_{surf}(B_{moy})$



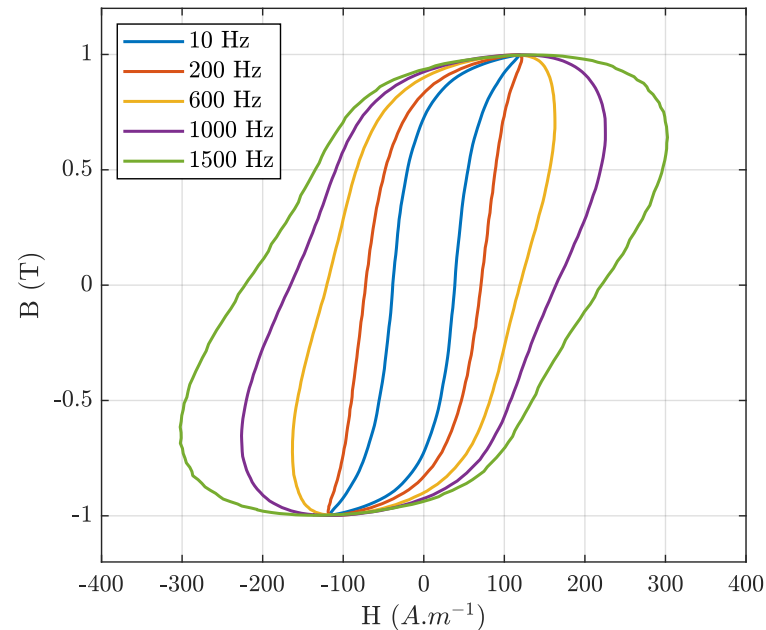
Dépendance du cycle d'hystérésis

Le cycle d'hystérésis ne peut être considéré comme une loi intrinsèque car la réponse du matériau est dépendante de la nature du champ d'excitation

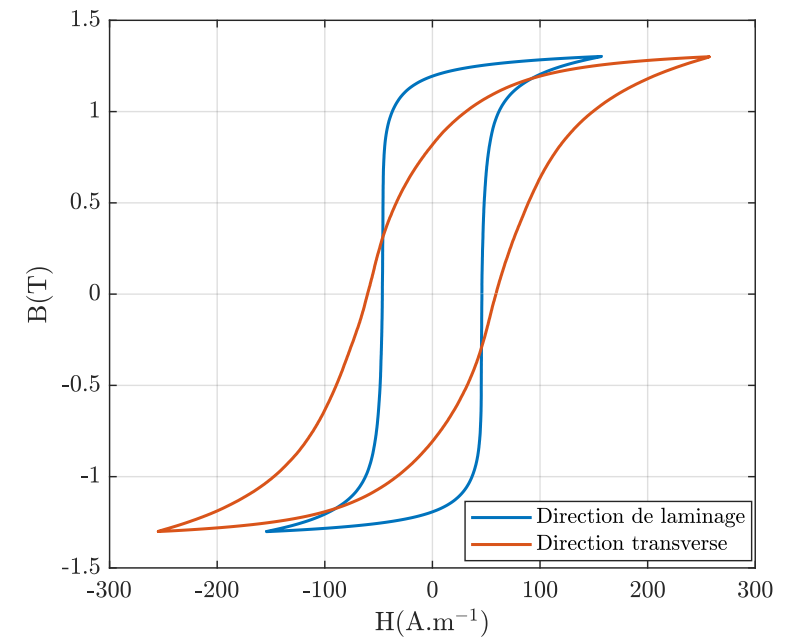
➤ Formes d'ondes



➤ Fréquence



➤ Direction



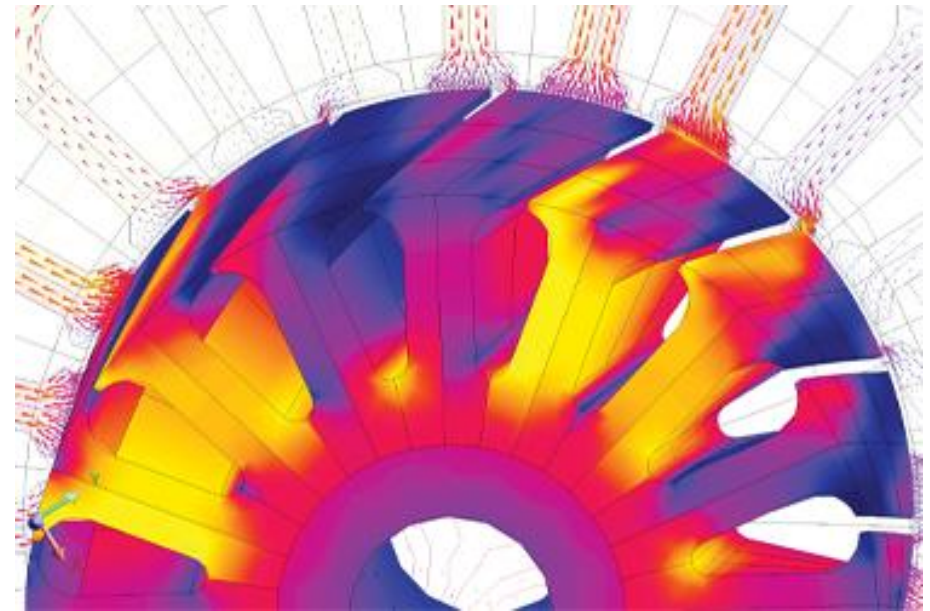
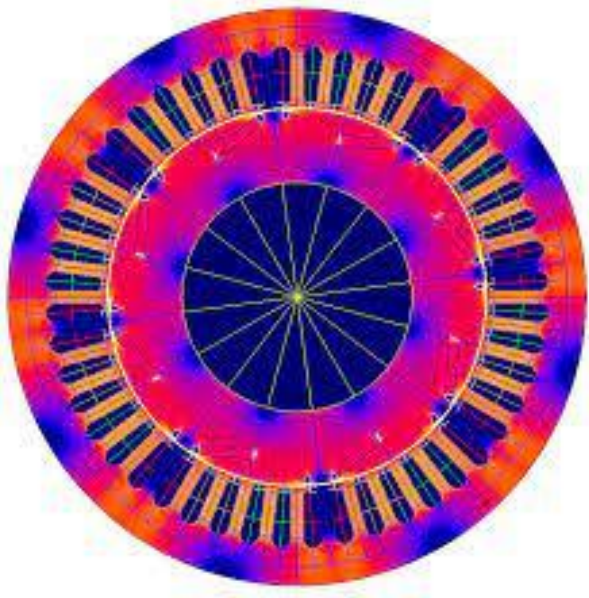
Conception des dispositifs électromécaniques

La conception et l'analyse de performance des dispositifs électromécaniques

- Calcul de champ via la méthode des éléments finis: **Altair Flux**
- Les grandeurs magnétiques et électriques sont connues en tout point du domaine d'étude

Permettre une évaluation précise des pertes en phase de conception pour permettre leur diminution

- Nécessite des modèles de matériau précis et robustes



Estimation des pertes fer dans le cadre des éléments finis

Modèles de Pertes

- $B(H)$: loi non linéaire univoque
- Estimation des pertes à partir de $B(t)$

$$W_{Fer} = W_{Hyst} + W_{Foucault} + W_{excès}$$
$$W_{Fer} = k_h \cdot f \cdot B_{crête}^2 + \frac{k_f}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 dt + \frac{k_e}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1.5} dt$$

hystérésis statique+courants induits

- hystérésis statique locale
- Résolution de l'équation de diffusion

$$W_{Fer} = f \oint (\mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J})$$

hystérésis dynamique global

- Description locale avec un modèle hystérésis globale

$$W_{Fer} = f \oint H_{surf} \cdot \delta B_{moy}$$

- ***A posteriori (post traitement)***

- Rapide (problème non linéaire classique)
- Suppose que l'hystérésis n'a pas d'impact sur la répartition locale de H et B

Estimation des pertes fer dans le cadre des éléments finis

Modèles de Pertes

- $B(H)$: loi non linéaire univoque
- Estimation des pertes à partir de $B(t)$

$$W_{Fer} = W_{Hyst} + W_{Foucault} + W_{excès}$$

hystérésis statique+courants induits

- hystérésis statique locale
- Résolution de l'équation de diffusion

$$W_{Fer} = f \oint (\mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J})$$

hystérésis dynamique global

- Description locale avec un modèle hystérésis globale

$$W_{Fer} = f \oint H_{surf} \cdot \delta B_{moy}$$

- ***A posteriori (post traitement)***

- Rapide (problème non linéaire classique)
- Suppose que l'hystérésis n'a pas d'impact sur la répartition locale de H et B

- ***A priori (en résolution)***

- Plus précis
- Plus couteux numériquement

Estimation des pertes fer dans le cadre des éléments finis

Modèles de Pertes

- $B(H)$: loi non linéaire univoque
- Estimation des pertes à partir de $B(t)$

$$W_{Fer} = W_{Hyst} + W_{Foucault} + W_{excès}$$

hystérésis statique+courants induits

- hystérésis statique locale
- Résolution de l'équation de diffusion

$$W_{Fer} = f \oint (\mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J})$$

hystérésis dynamique global

- Description locale avec un modèle hystérésis globale

$$W_{Fer} = f \oint H_{surf} \cdot \delta B_{moy}$$

- **A posteriori (post traitement)**

- Rapide (problème non linéaire classique)
- Suppose que l'hystérésis n'a pas d'impact sur la répartition locale de H et B

- **A priori (en résolution)**

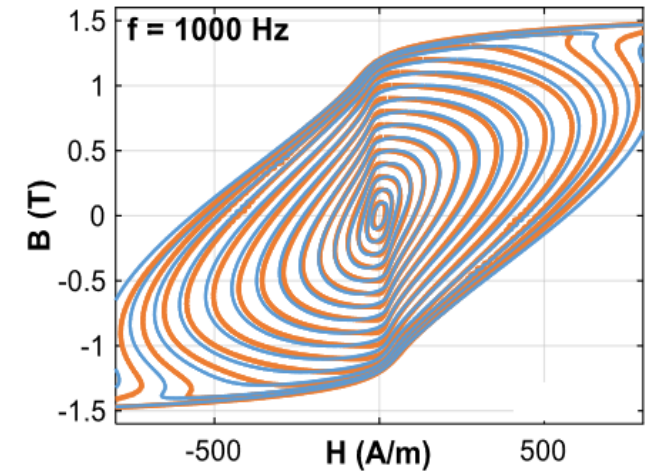
- Plus précis
- Plus couteux numériquement

Objectifs de la thèse

Permettre une évaluation précise des pertes fer en considérant *A priori* un modèle d'hystérésis global

➤ Modèle Loss Surface

- Bonne performances
- Appliqué et vérifié en post calcul sur de nombreuses machines électriques
- Précision améliorée
- Extension du domaine de validité (haute fréquence et haute induction)



NiFe, $B(t)$ sinusoidal, dP average: 3.9%.

➤ Modèle LS vectoriel isotrope

➤ Implémentation en résolution éléments finis (*a priori*)

SOMMAIRE

1. Contexte et objectif
2. Modèle Loss Surface(LS) scalaire
3. Extension vectorielle
4. Implémentation en résolution éléments finis
5. Conclusion et perspectives

SOMMAIRE

1. Contexte et objectif

2. Modèle Loss Surface(LS) scalaire

3. Extension vectorielle

4. Implémentation en résolution éléments finis

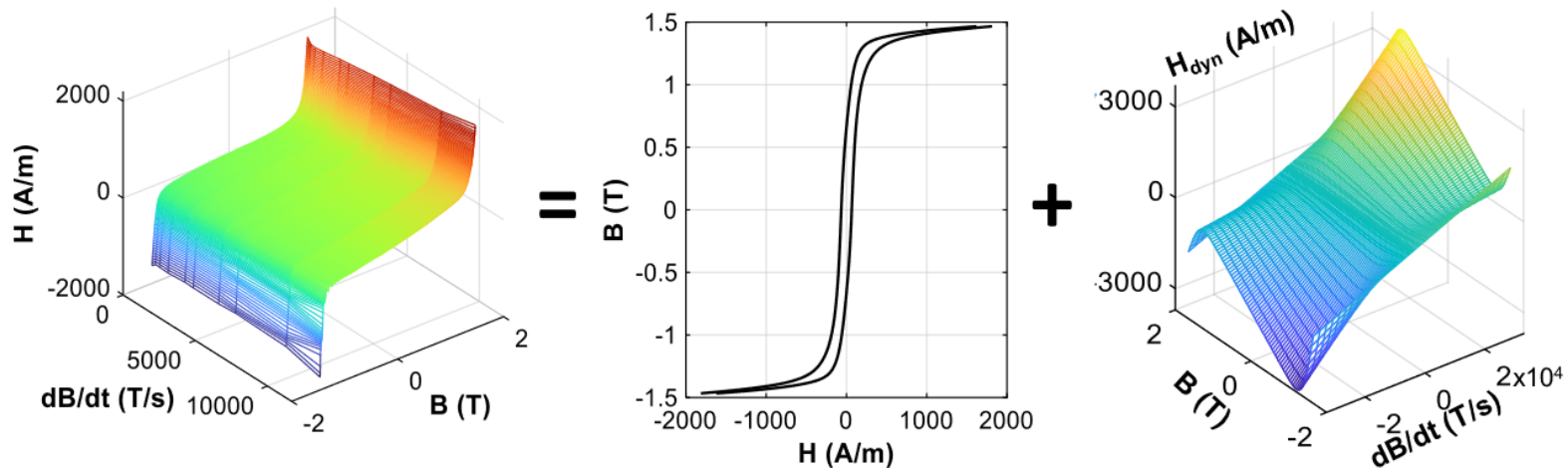
5. Conclusion et perspectives

Modèle Loss Surface scalaire

Propriétés

- Description de l'hystérésis statique et dynamique dans un seul opérateur
- Exploite uniquement des fonctions analytiques (rapide et facilement dérivable)
- Modèle $H(B)$ adapté à la formulation potentiel vecteur magnétique

$$H\left(B, \frac{dB}{dt}\right) = H_{stat}(B, \text{histoire}) + H_{dyn}\left(B, \frac{dB}{dt}\right)$$



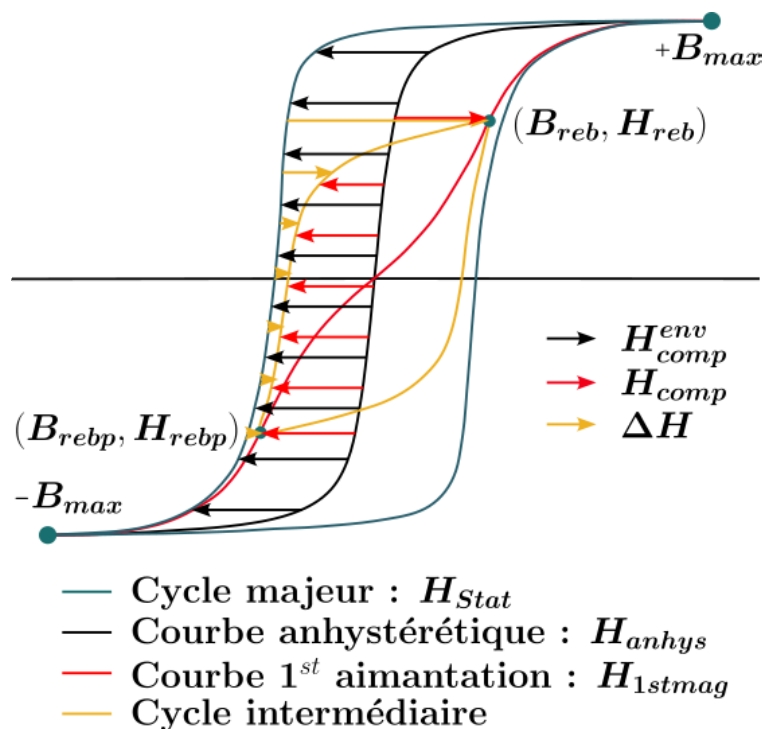
Modèle Loss Surface statique

Modèle statique

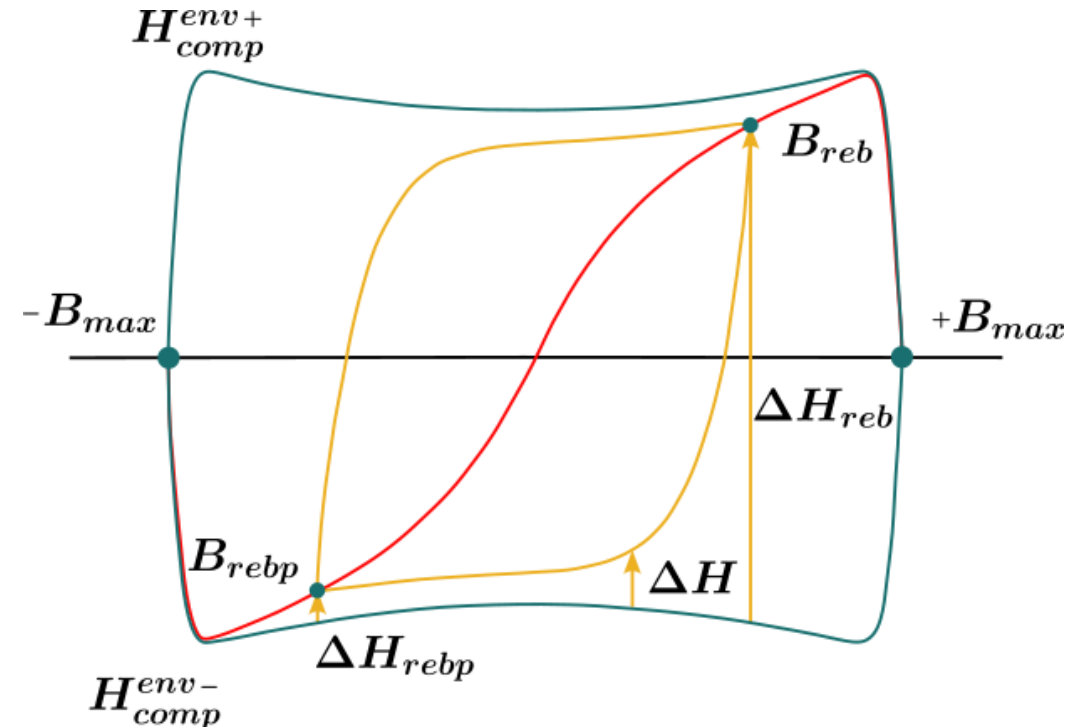
Propose une interprétation géométrique des cycles d'hystérésis

1. Les cycles mineurs centrés sont tous inclus dans le cycle majeur
2. Les cycles mineurs centrés se rebouclent sur la courbe de 1^{ère} aimantation

3. $H_{stat} = H_{anhys} + H_{Comp}$

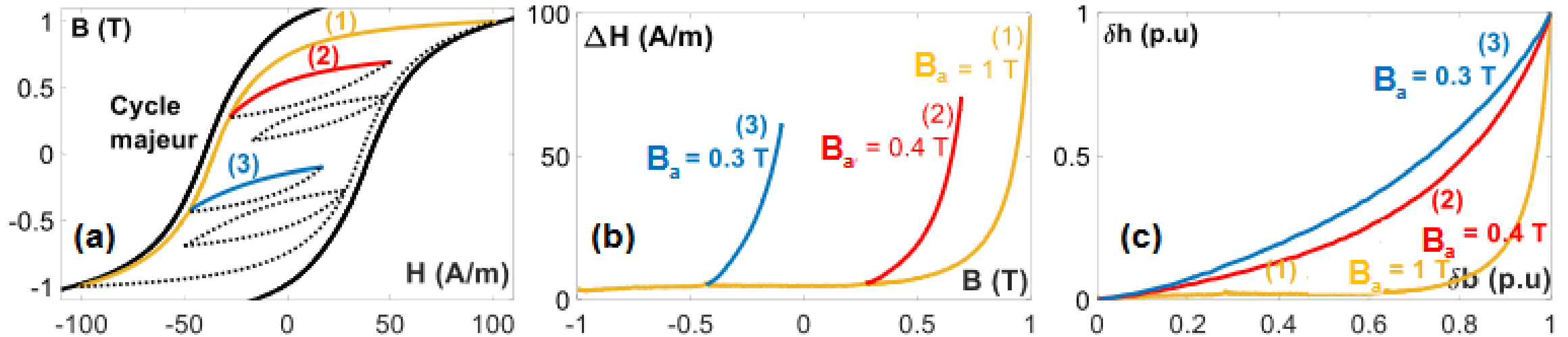


$$H_{Comp} = \text{sign}(dB) * (H_{Comp}^{env} - \Delta H)$$



Modèle Loss Surface statique

Courbe de renversement différentielle unitaire (uDRC)



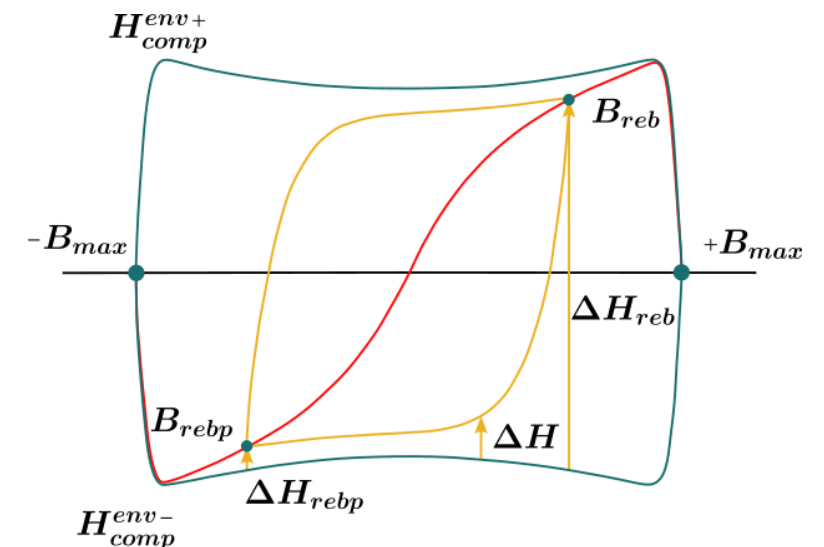
$$B_a = \frac{B_{reb} - B_{rebp}}{2}$$

$$\delta b = \frac{B - B_{rebp}}{B_{reb} - B_{rebp}}$$

$$\delta h = f(\delta b, B_a)$$

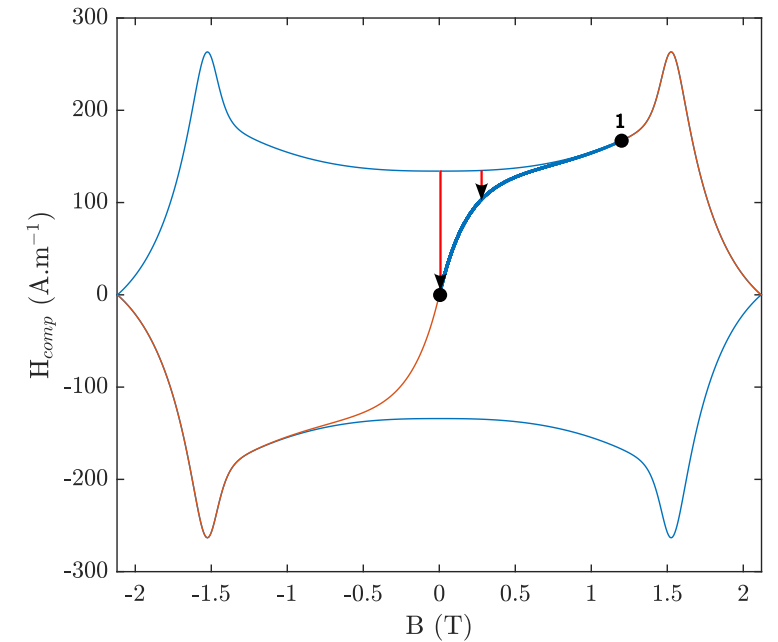
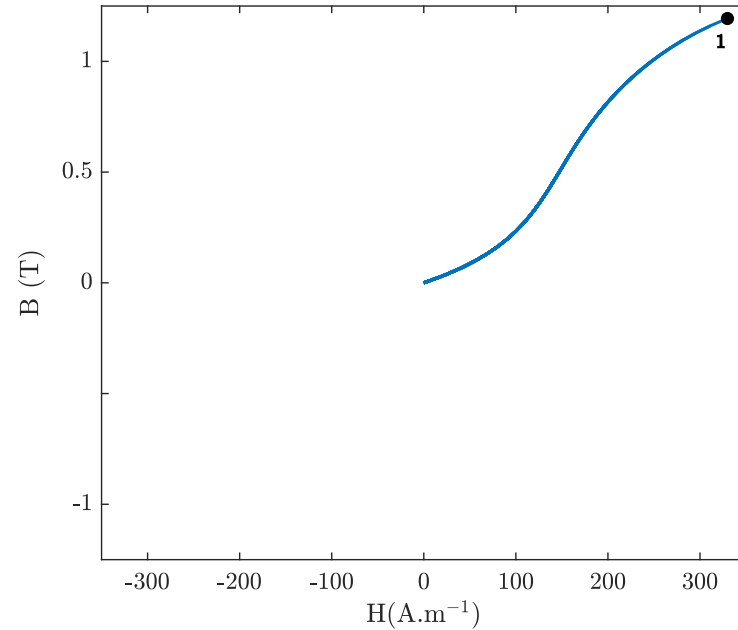
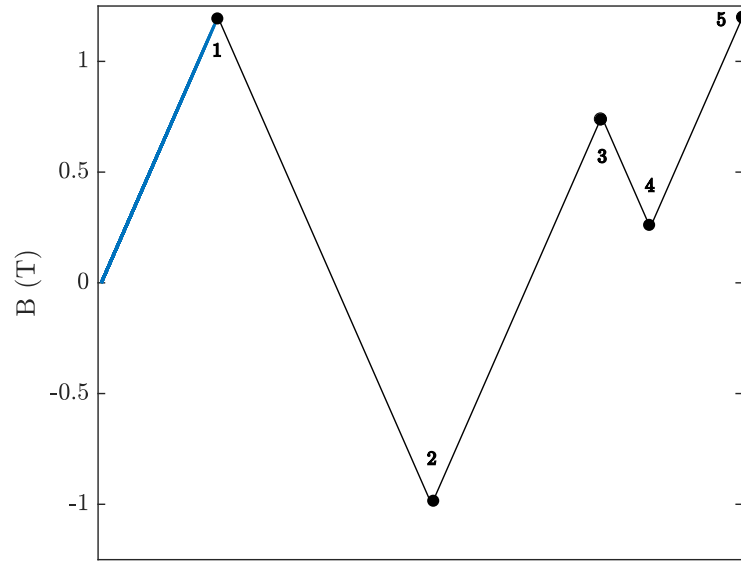
$$\delta h = \frac{\Delta H - \Delta H_{rebp}}{\Delta H_{reb} - \Delta H_{rebp}}$$

$$\Delta H = (\Delta H_{reb} - \Delta H_{rebp}) \cdot \delta h + \Delta H_{rebp}$$



Modèle Loss Surface statique

Principe de fonctionnement

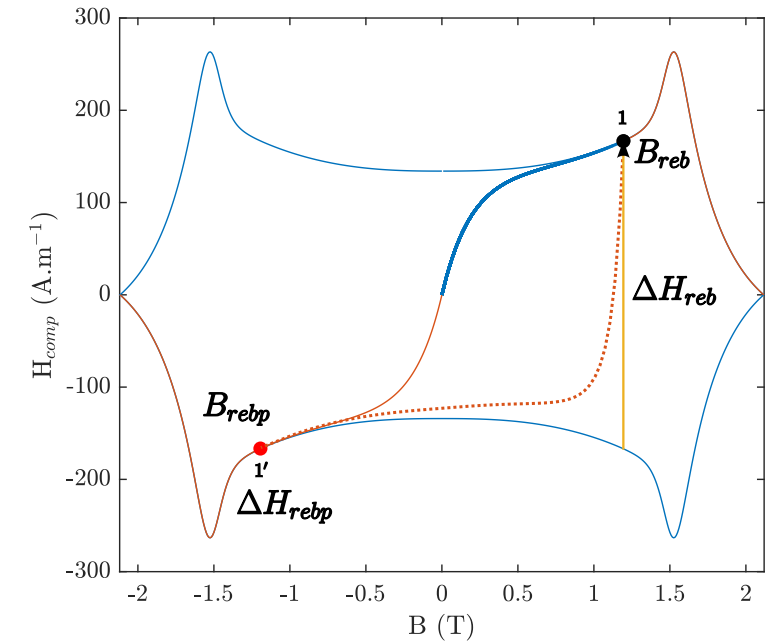
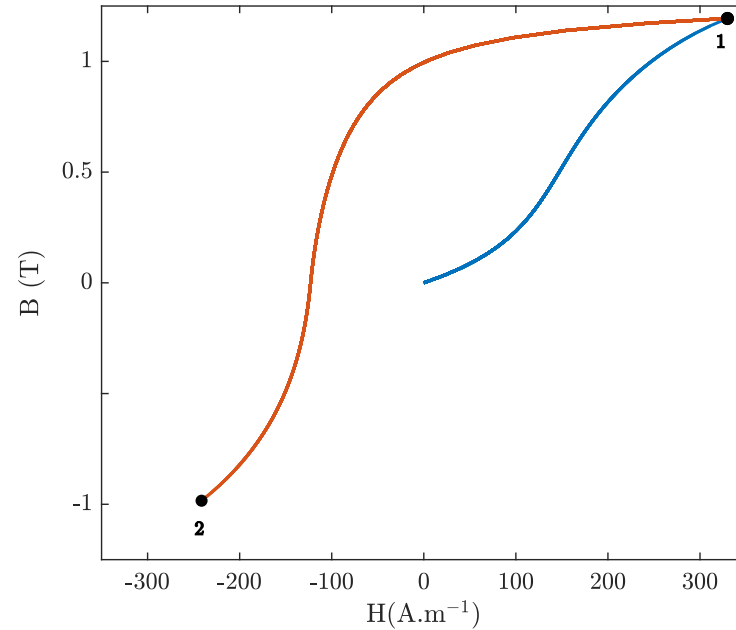
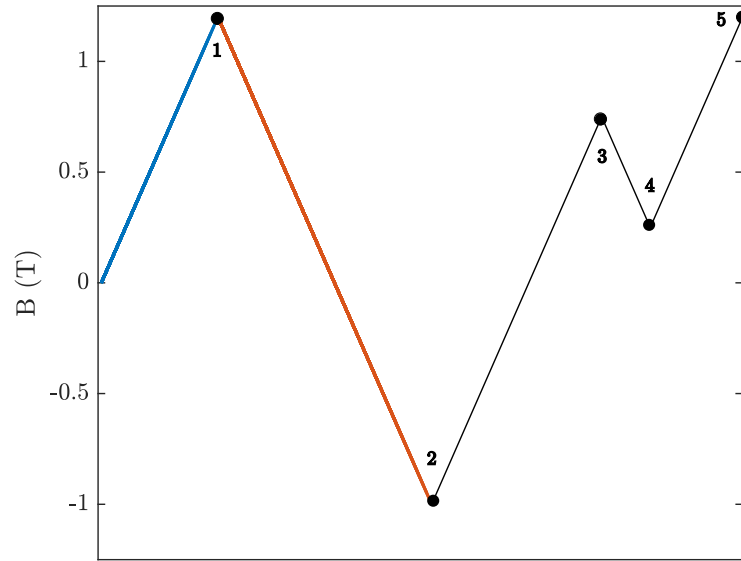


Maxima	Minima

$$H_{Comp} = \text{sign}(B) * (H_{Comp}^{env} - \Delta H_{mag}^{1st})$$

Modèle Loss Surface statique

Principe de fonctionnement

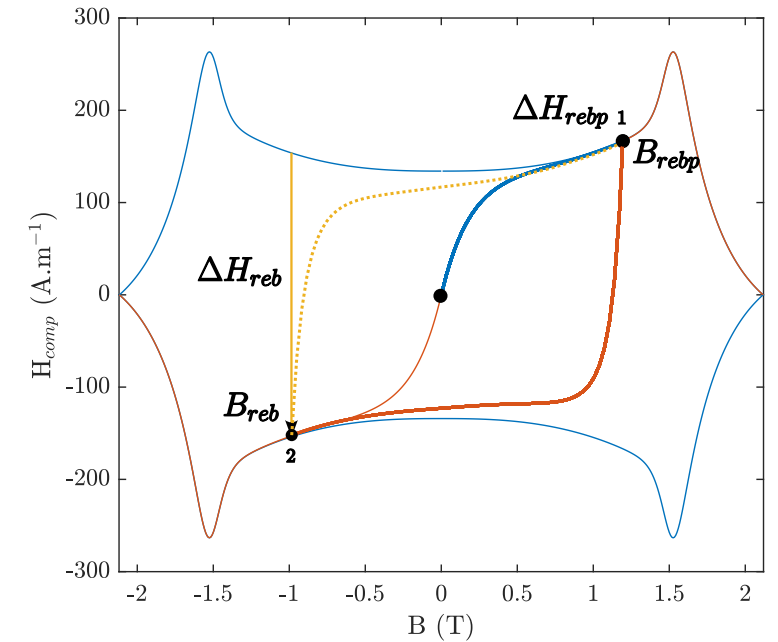
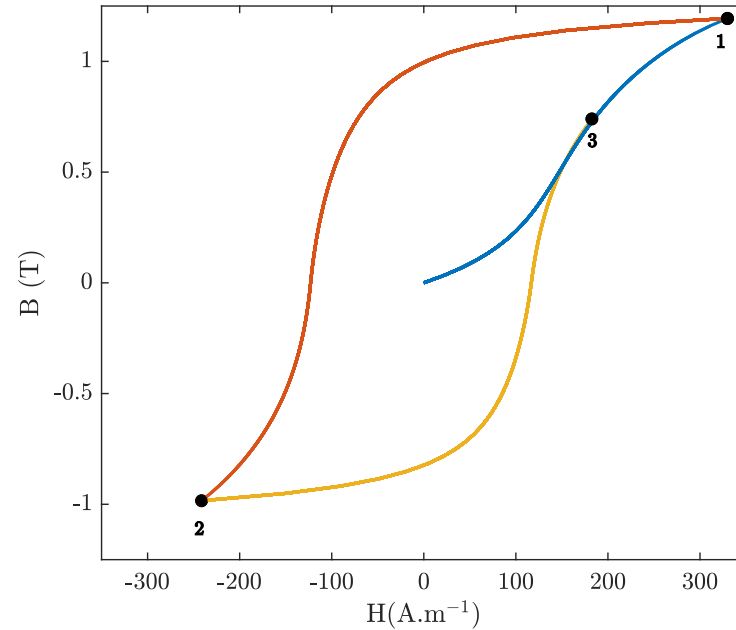
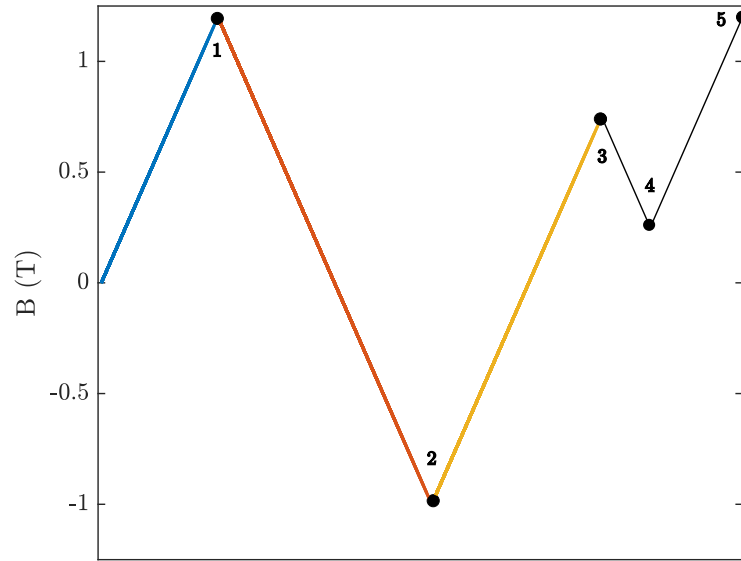


Maxima	Minima
1	1'

$$H_{Comp} = \text{sign}(dB) * (H_{Comp}^{env} - \Delta H)$$

Modèle Loss Surface statique

Principe de fonctionnement

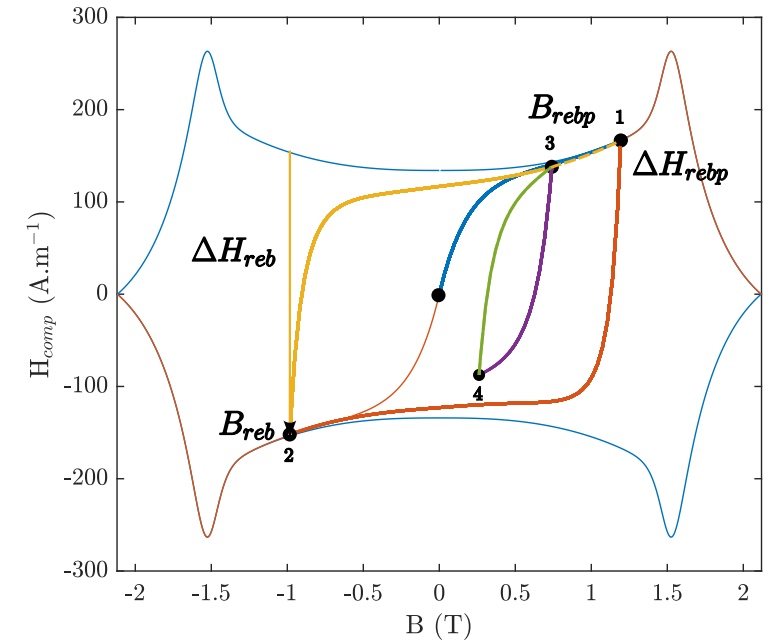
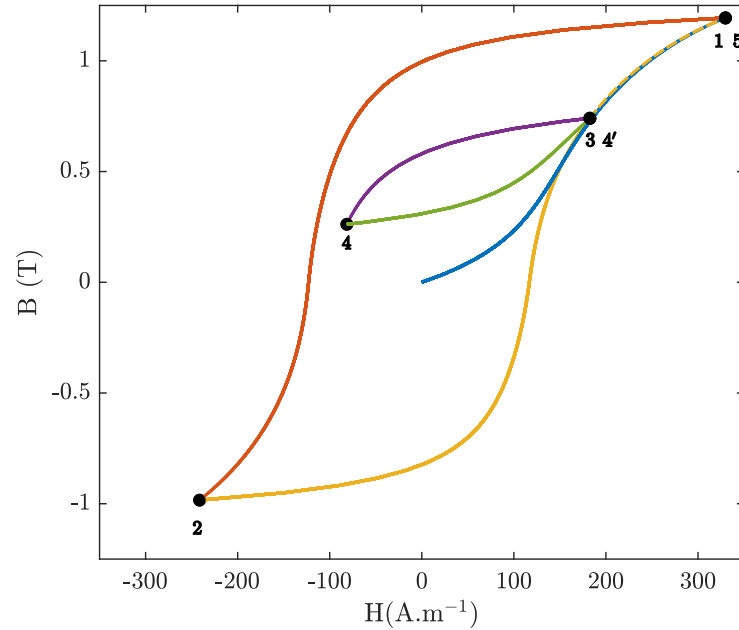
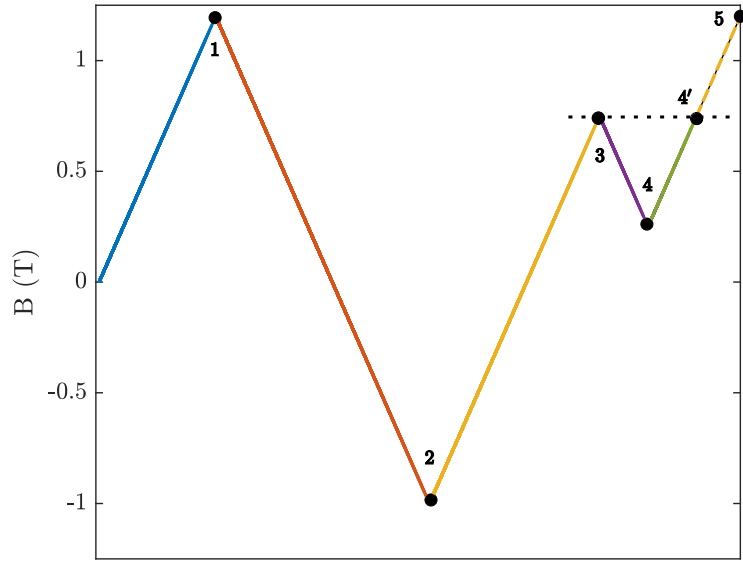


Maxima	Minima
1	2

$$H_{Comp} = \text{sign}(dB) * (H_{Comp}^{env} - \Delta H)$$

Modèle Loss Surface statique

Principe de fonctionnement

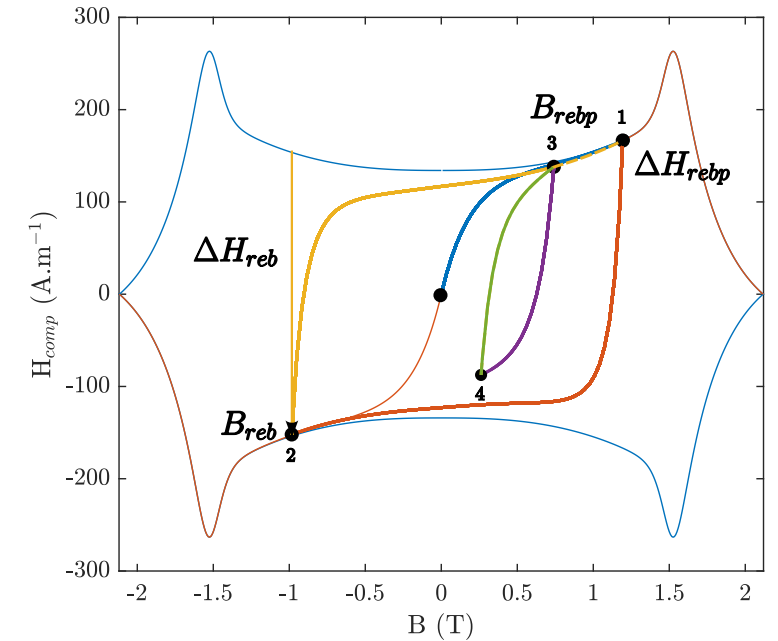
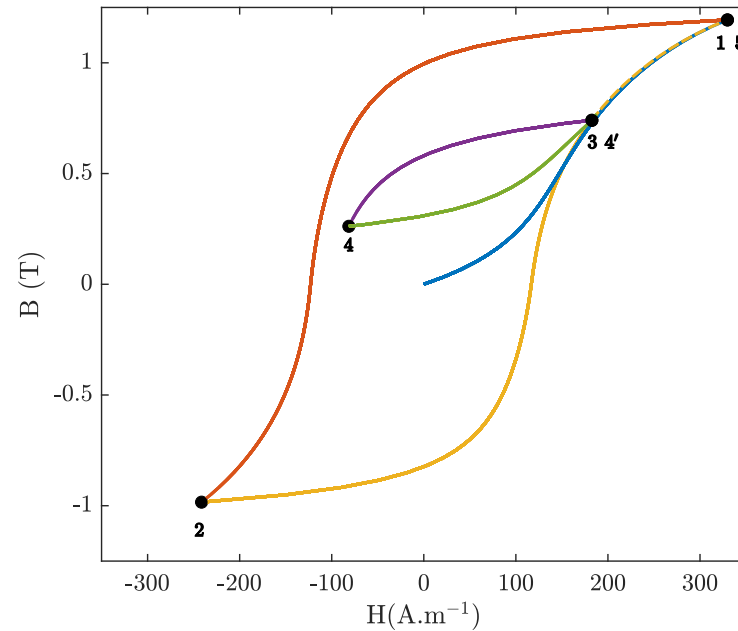
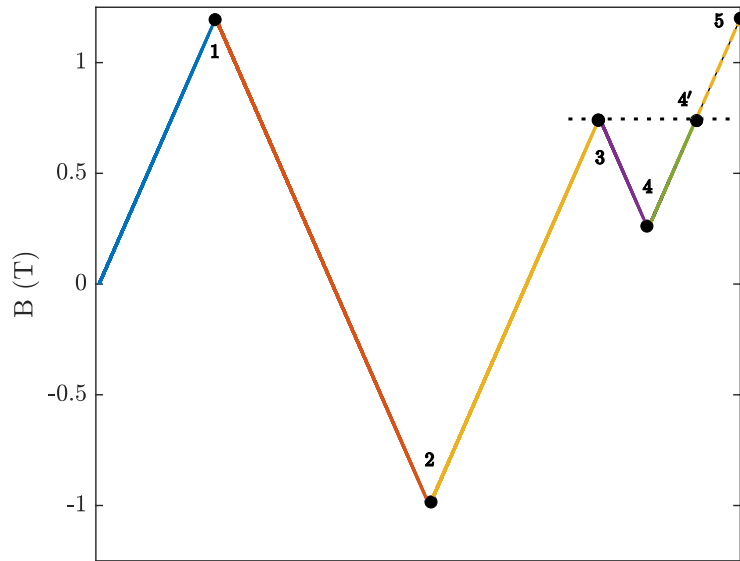


Maxima	Minima
1	2
3	4

$$H_{comp} = \text{sign}(B) * (H_{comp}^{env} - \Delta H_{mag})$$

Modèle Loss Surface statique

Principe de fonctionnement



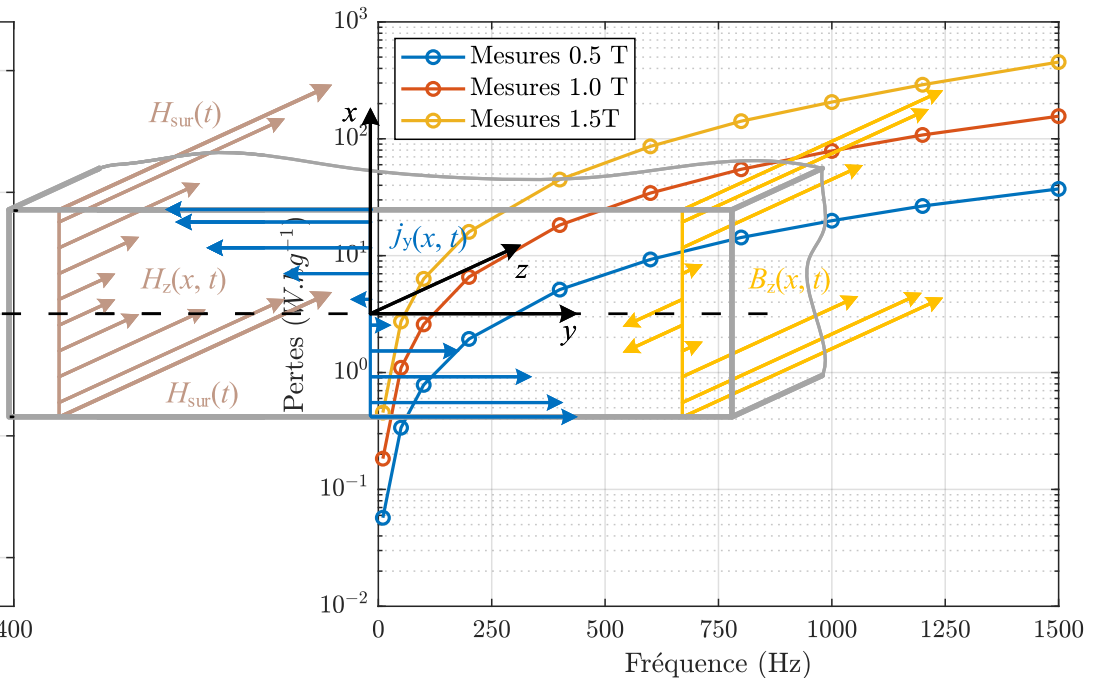
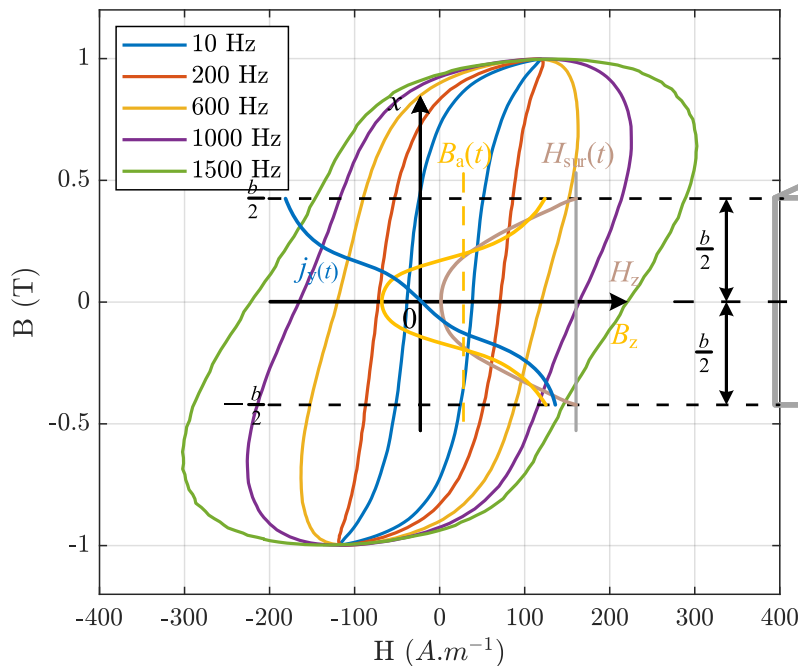
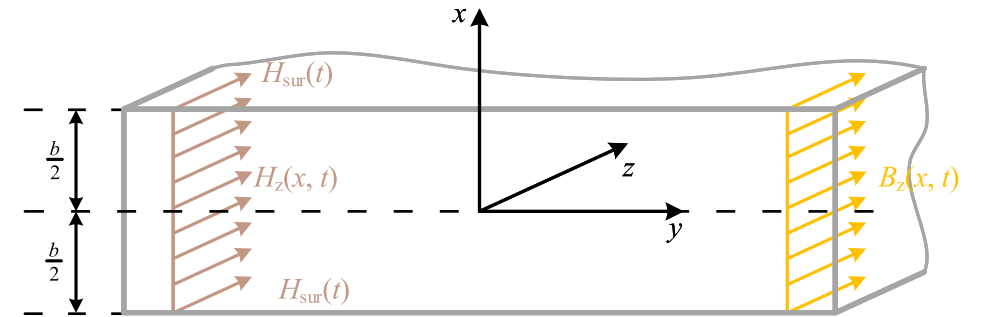
Maxima	Minima
1	2
3	4

$$H_{comp} = \text{sign}(B) \cdot (H_{comp}^{max} - \Delta H_{reb})$$

Influence de la fréquence

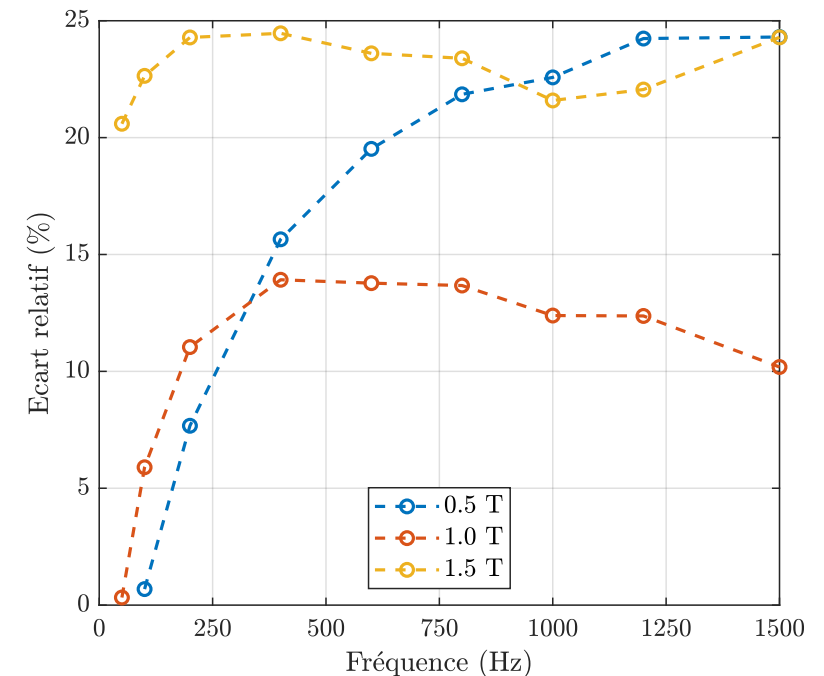
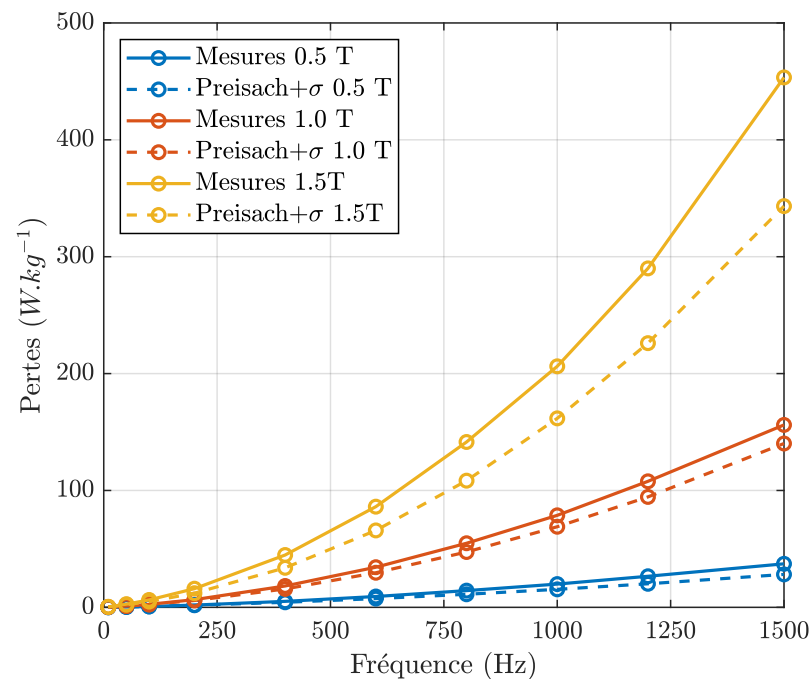
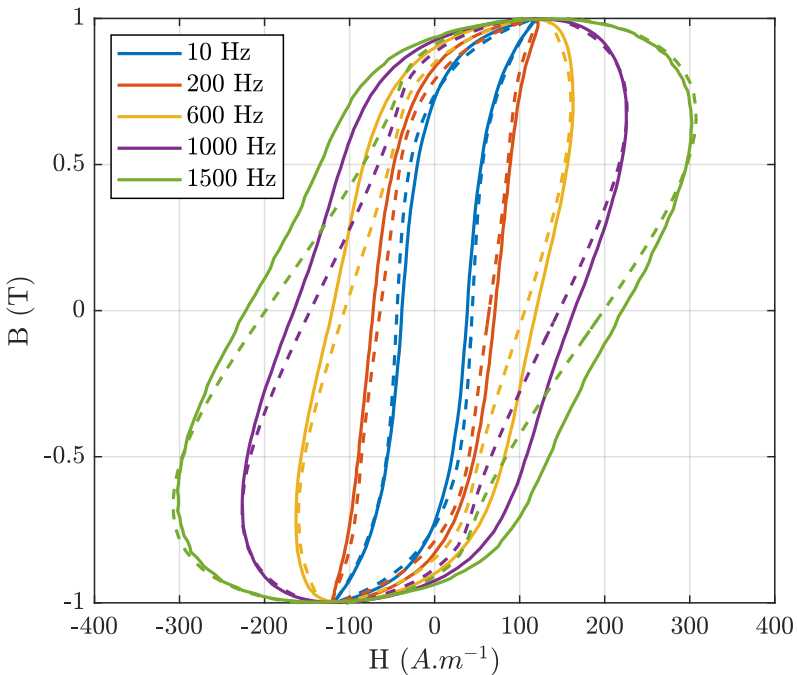
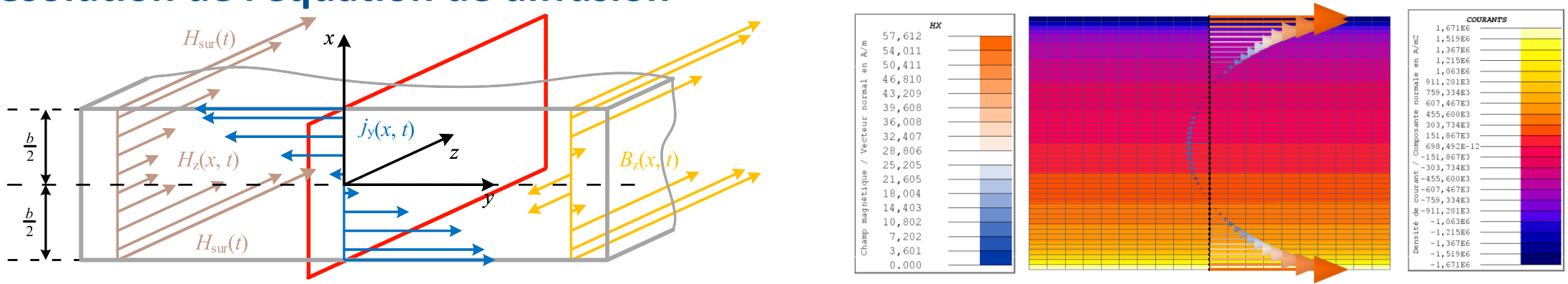
A plus haute fréquence :

- Développement de courants induits macroscopiques
- Création d'un champ qui s'oppose au champ d'excitation
- H et B ne sont plus homogènes dans l'épaisseur de la tôle
- Elargissement du cycle d'hystérésis $H_{surf}(B_{moy})$



Approche couplage hystérésis statique local et courants induits

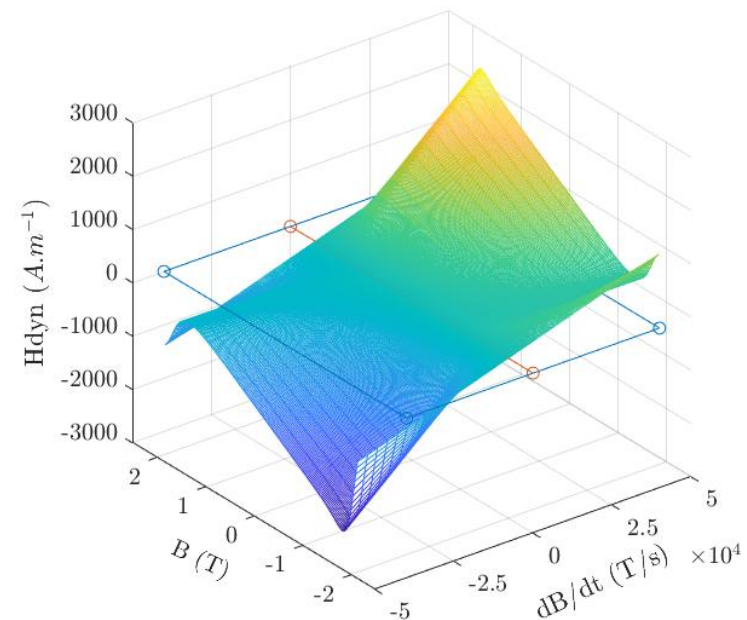
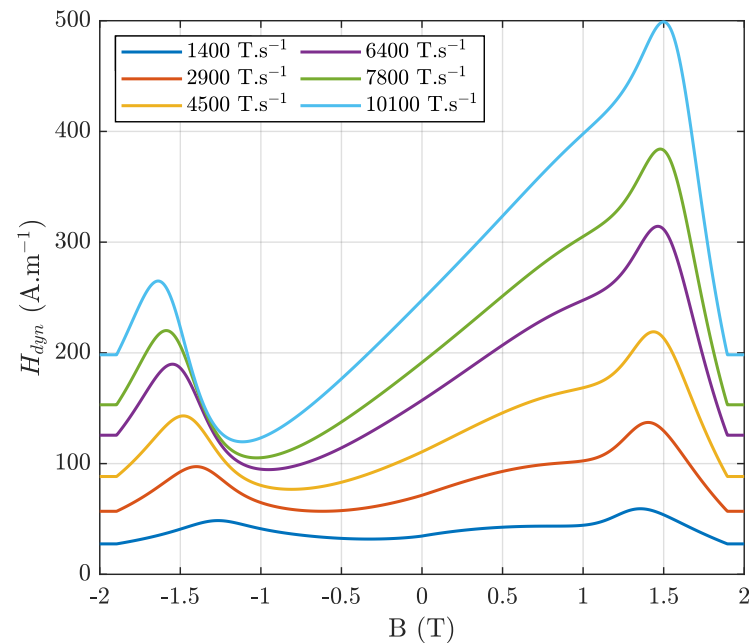
Résolution de l'équation de diffusion



Modèle Loss Surface

Modèle dynamique: Surface unique $H_{dyn} \left(B, \frac{dB}{dt} \right)$ à $B_{id,max}$ donné

- La contribution H_{dyn} est obtenue expérimentalement sur cadre Epstein à B triangulaire et fréquence variable
 - Ensemble des phénomènes dynamiques sont pris en compte
- Construction analytique de la surface $H_{dyn} \left(B, \frac{dB}{dt} \right)$

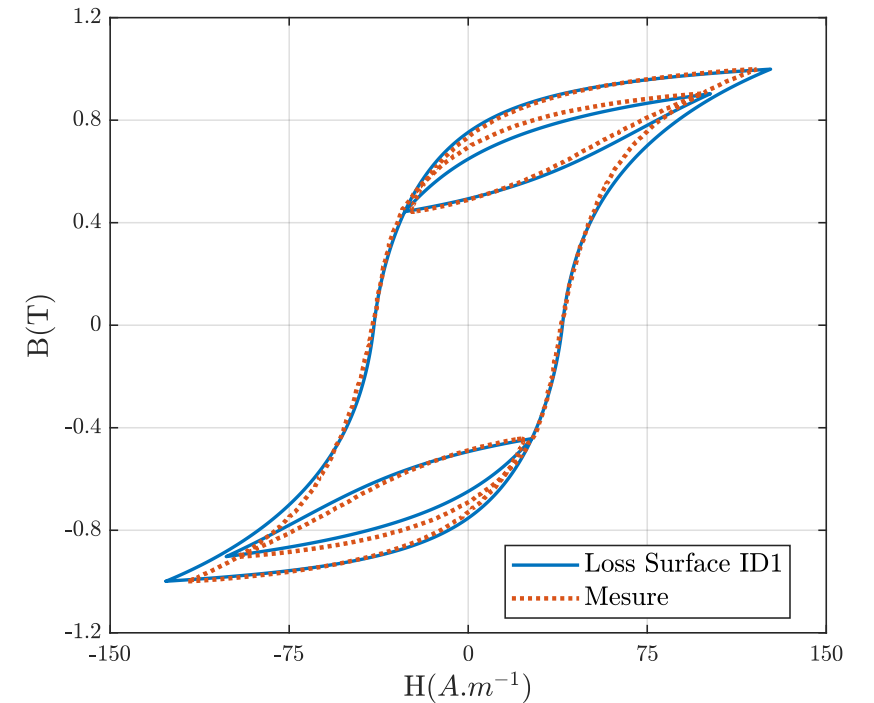
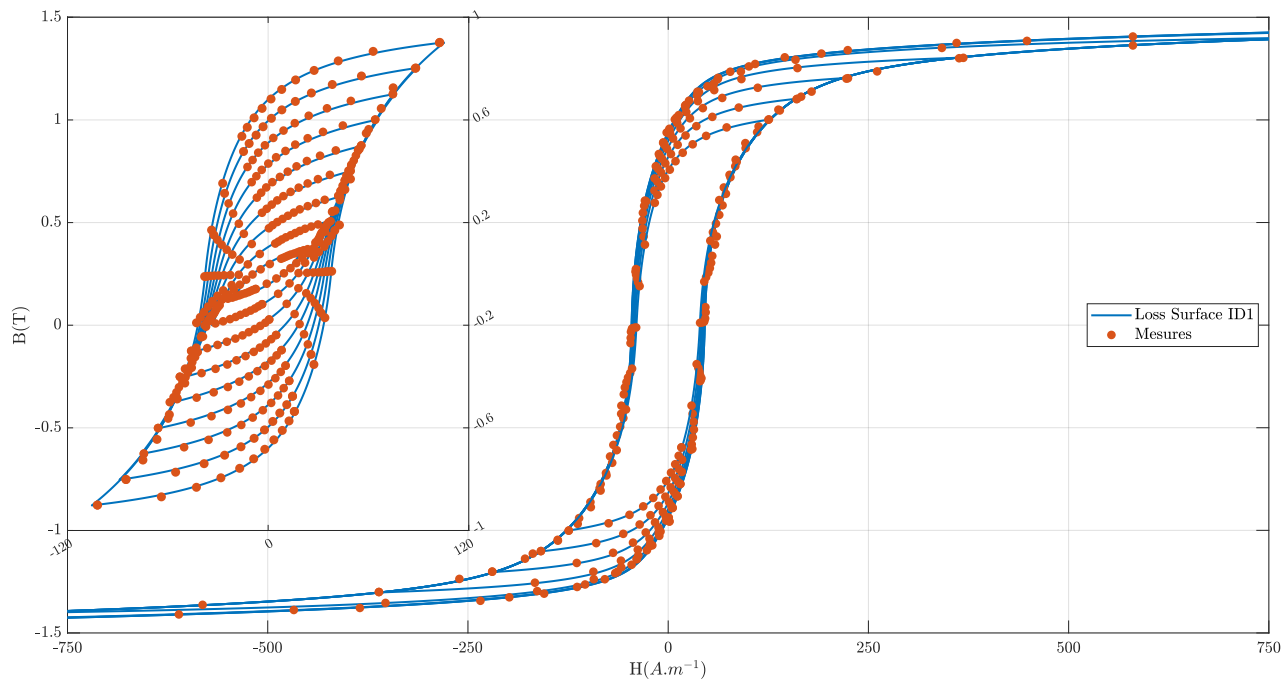


Performances du modèle LS scalaire

Identification Modèle Statique:

- 23 paramètres
- 1 Cycle majeur + 5 cycles intermédiaires

Résultats



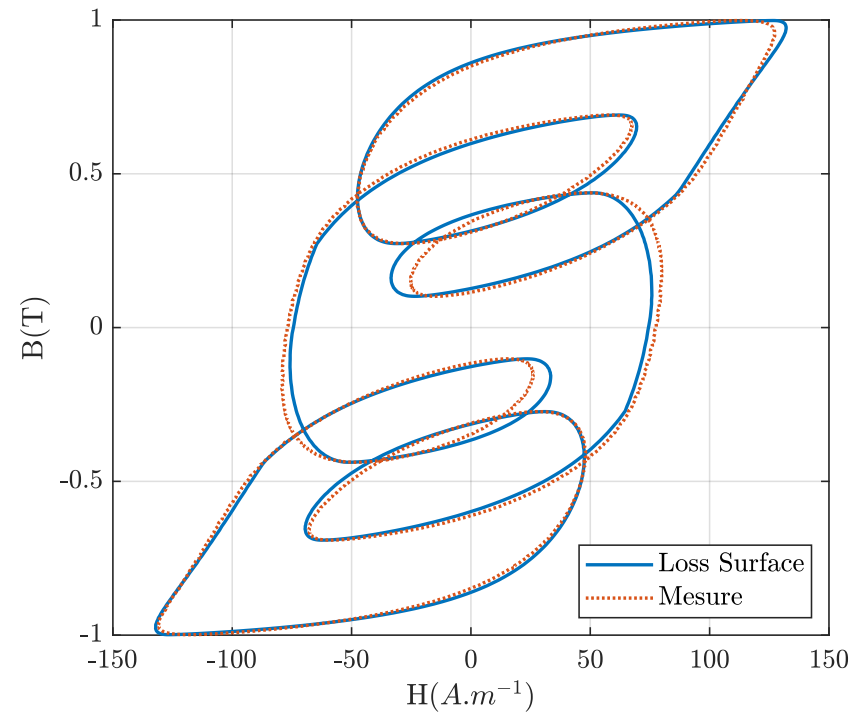
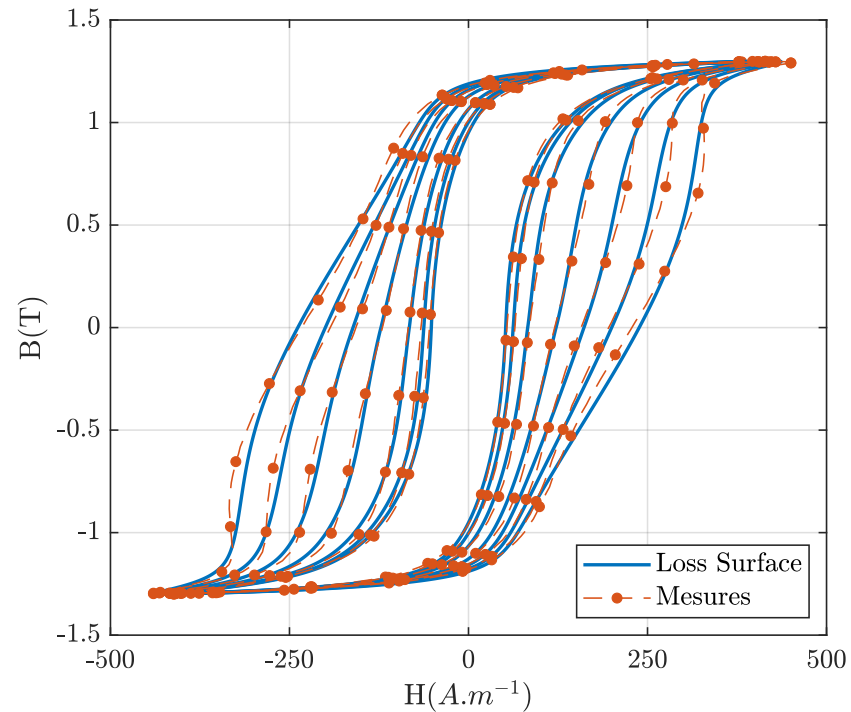
➤ Ecart relatif entre P_{mes} et $P_{sim} \leq 2\%$

Performances du modèle LS scalaire

Identification modèle dynamique :

- 14 paramètres
- 6 à 8 cycles obtenus entre 1.5 et 1.7 T et fréquence entre 10 Hz et 1 kHz

Résultats



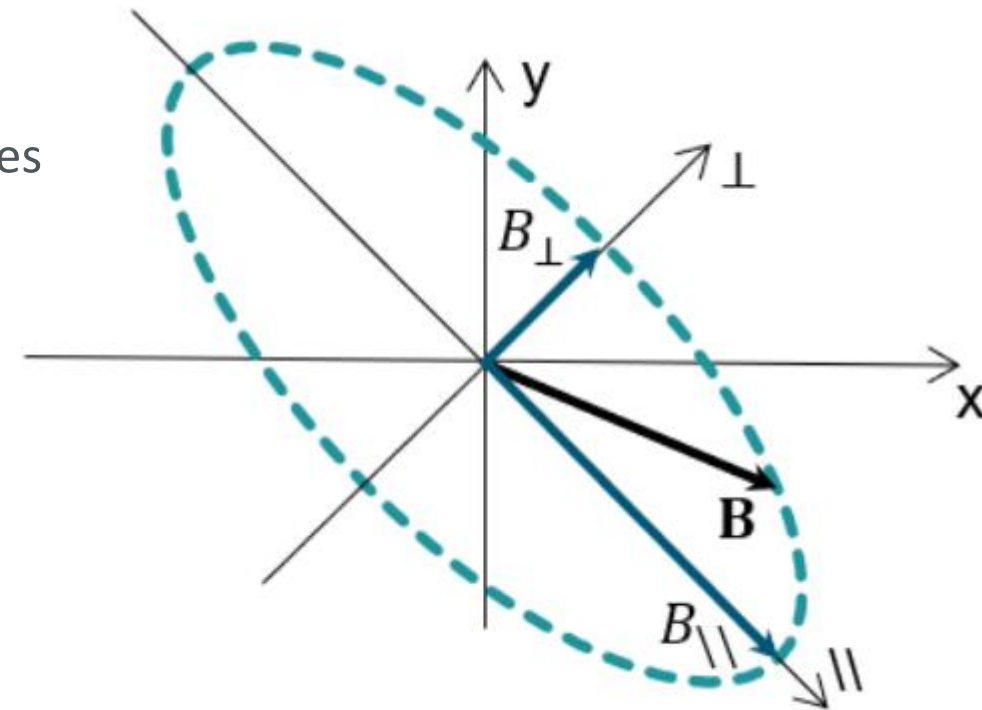
Modèle Loss Surface

Avantages :

- Très bons résultats même avec des formes d'ondes complexes
- Utilisation de formules analytiques pour décrire les différentes courbes (cycles mineurs centrés)
- Modèle $H(B)$ bien adapté à la formulation en potentiel vecteur (pas besoin d'inverser le modèle)

Limitations :

- Non prise en compte de l'histoire dans la contribution dynamiques
- Modèle Scalaire *a posteriori*:
 - Induction de $B(t)$ calculée peut être erronée
 - Décomposition *a posteriori* sur 2 axes n'est pas satisfaisante



SOMMAIRE

1. Contexte et objectif
2. Modèle Loss Surface(LS) scalaire
3. Extension vectorielle
4. Implémentation en résolution éléments finis
5. Conclusion et perspectives

Développement d'un modèle vectoriel isotrope

Propriétés vectorielles dans l'hypothèse isotrope

1. Induction uniaxiale

- Equivalence entre le modèle scalaire et vectoriel dans toutes les directions

2. Induction tournante

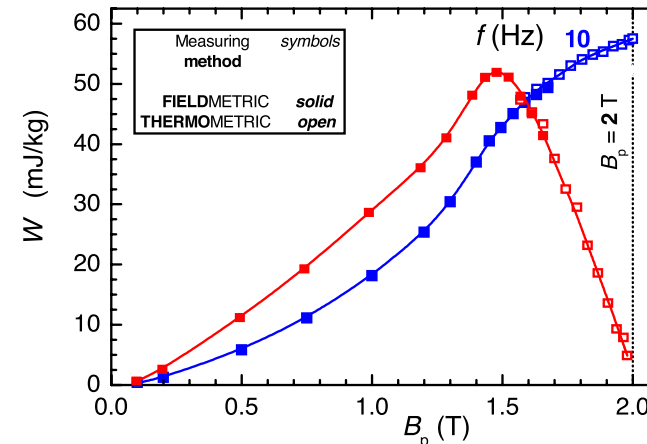
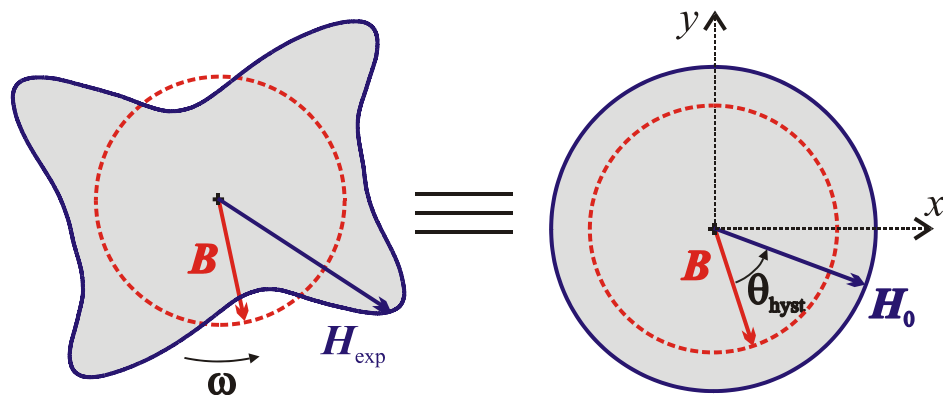
- Le modèle doit décrire un déphasage spatial entre le champ \vec{H} et l'induction \vec{B}

- \vec{H} en avance par rapport à \vec{B}

- Le déphasage dépend de la saturation : tend vers une constante à saturation (nul en statique)

- A faible induction : $P_{rot} = 2P_{uni}$

- A saturation : $P_{rot} = 0$ en statique et $P_{rot} = P_{ci}$ en dynamique



Méthode de Mayergoyz

Principe:

- Construction d'un modèle vectoriel en projetant le modèle scalaire dans toutes les directions du plan

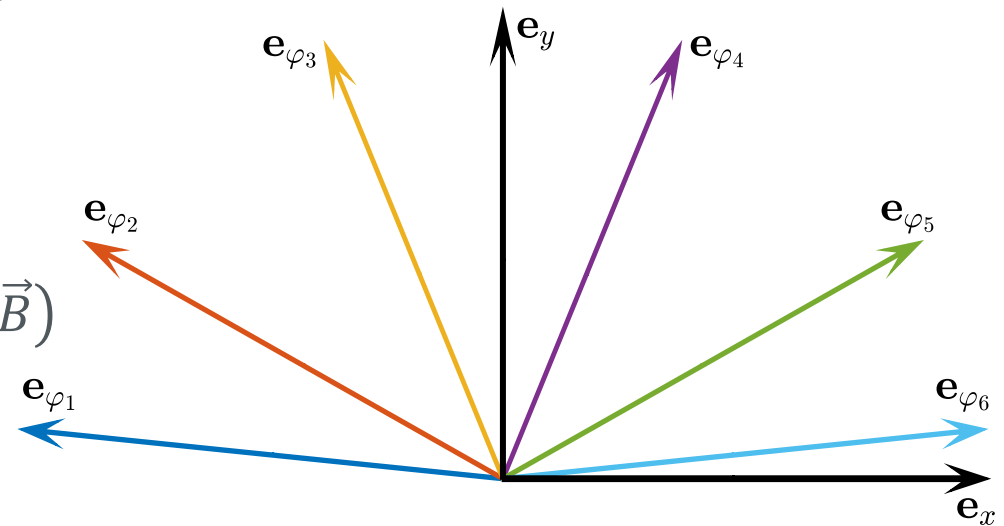
$$\vec{H}_{Stat}(\vec{B}) = \int_0^\pi \vec{e}_\varphi \cdot H_{Stat}(\vec{e}_\varphi \cdot \vec{B}) \cdot d\varphi$$

- \vec{H}_{anhys} représente les processus réversibles, on le suppose colinéaire à \vec{B}

$$\vec{H}_{Stat}(\vec{B}) = \vec{H}_{anhys}(\|\vec{B}\|) \frac{\vec{B}}{\|\vec{B}\|} + \int_0^\pi \vec{e}_\varphi \cdot H_{comp}(\vec{e}_\varphi \cdot \vec{B}) \cdot d\varphi$$

- Intégration numérique par la quadrature de Gauss-Legendre

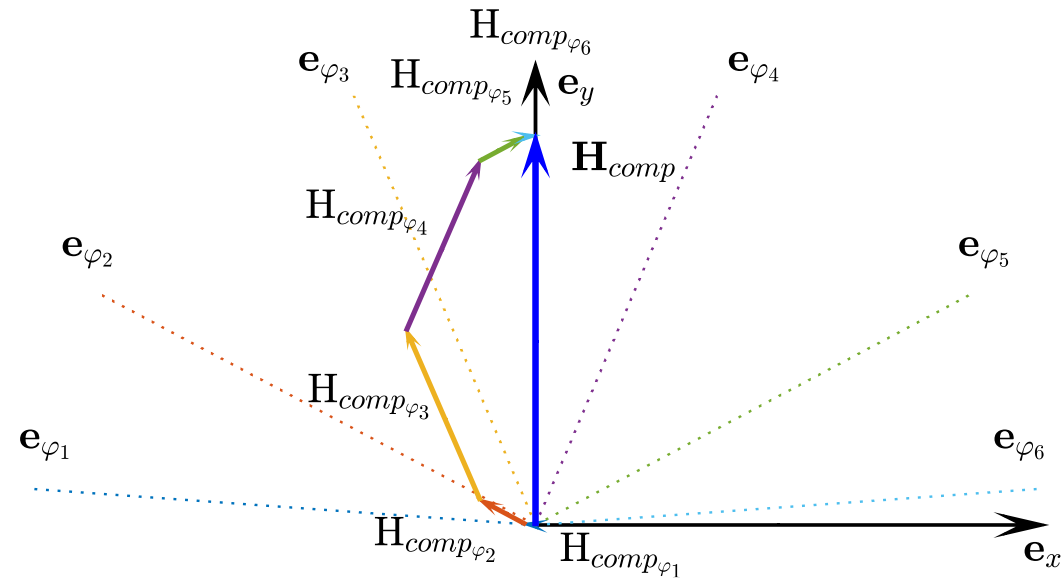
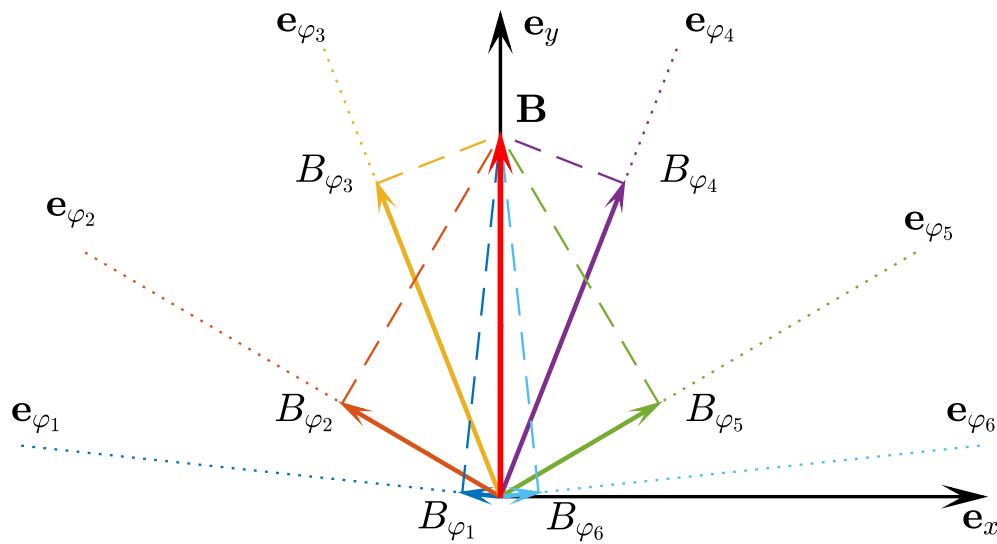
$$\vec{H}_{Stat}(\vec{B}) = \vec{H}_{anhys}(\|\vec{B}\|) \frac{\vec{B}}{\|\vec{B}\|} + \sum_{i=1}^n w_i \cdot \vec{e}_{\varphi_i} \cdot H_{comp}(\vec{e}_{\varphi_i} \cdot \vec{B})$$



Méthode de Mayergoyz

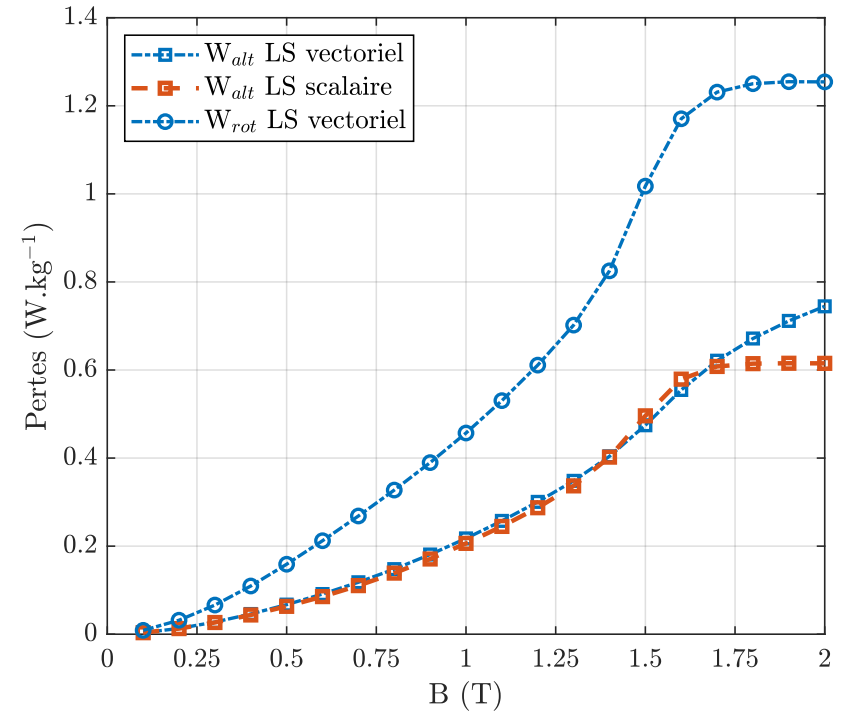
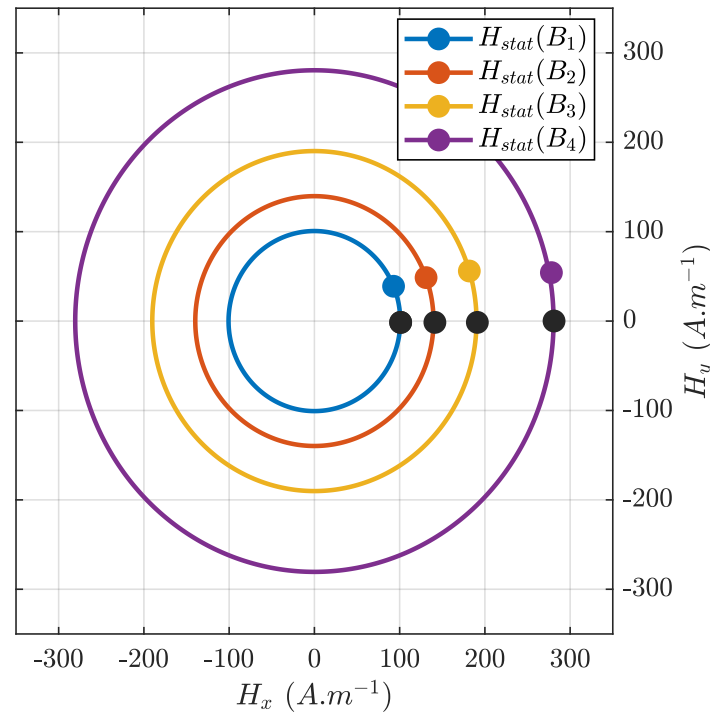
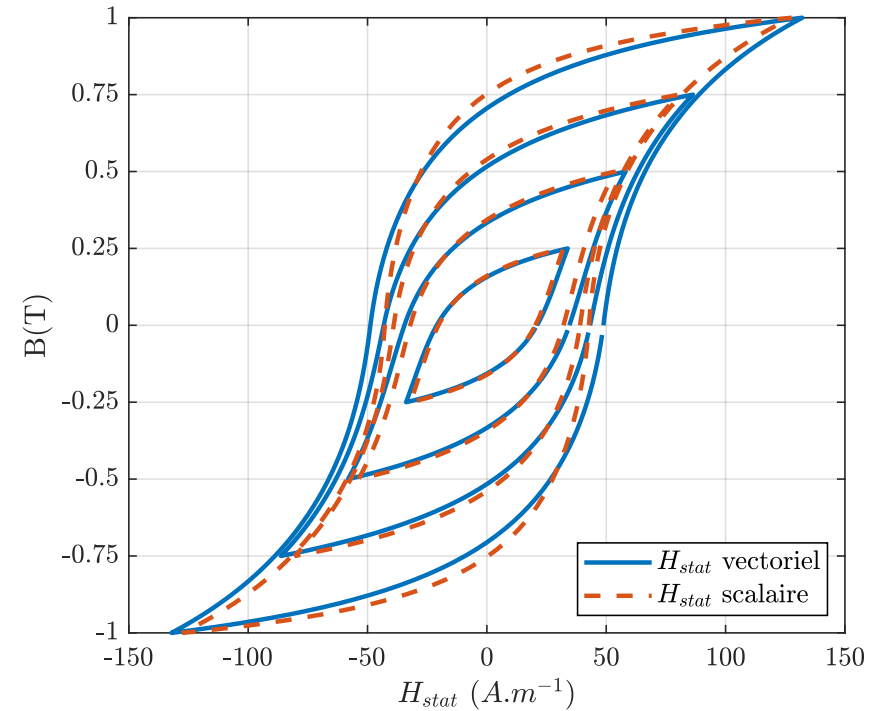
Application directe:

- Les projections B_{φ_i} de \vec{B} sur \vec{e}_{φ} sont utilisées pour évaluer H_{comp} sur chaque direction
- Les directions sont indépendantes et possèdent leur propre historique



Méthode de Mayergoyz

Application directe :

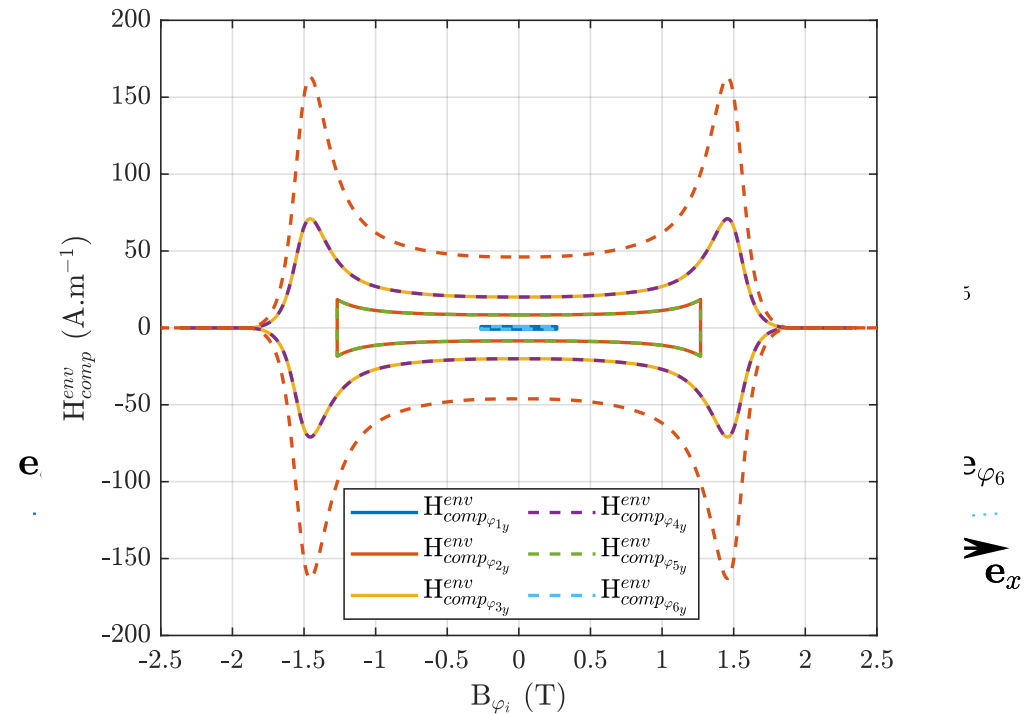
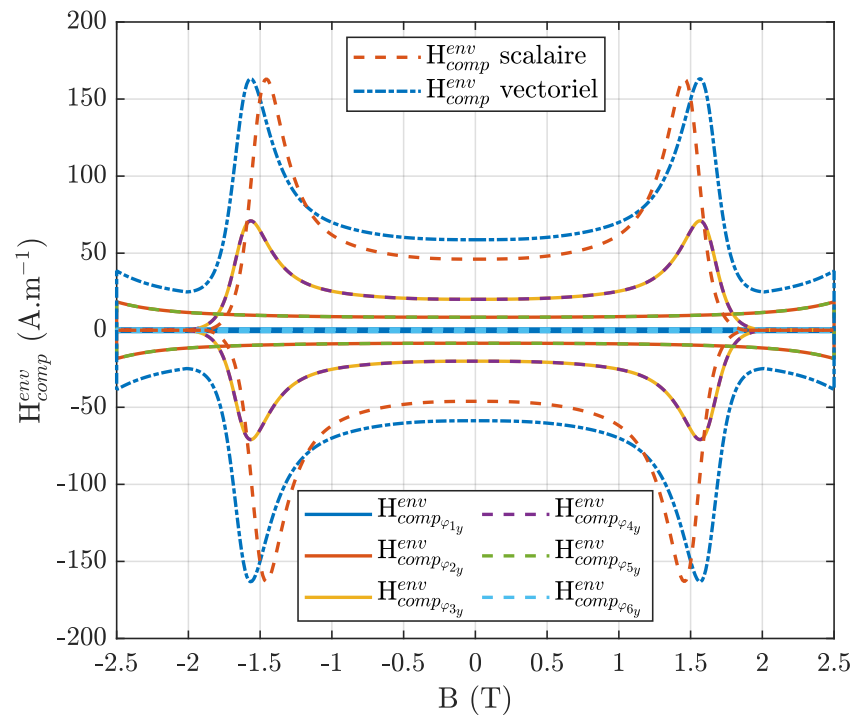


- Les deux modèles ne sont pas strictement équivalents
- Le modèle décrit un déphasage qui évolue avec le niveau de saturation
- Les pertes obtenues ne sont pas satisfaisantes

Adaptation de la méthode de Mayergoyz

Courbe enveloppe

- Signal $B_{max} = 2.5 T$ selon e_y



- Les directions 2 et 5 sont à l'origine du défaut $H_{Comp}^{env} \neq 0$ à saturation

➤ Les directions n'ont pas le même niveau de saturation

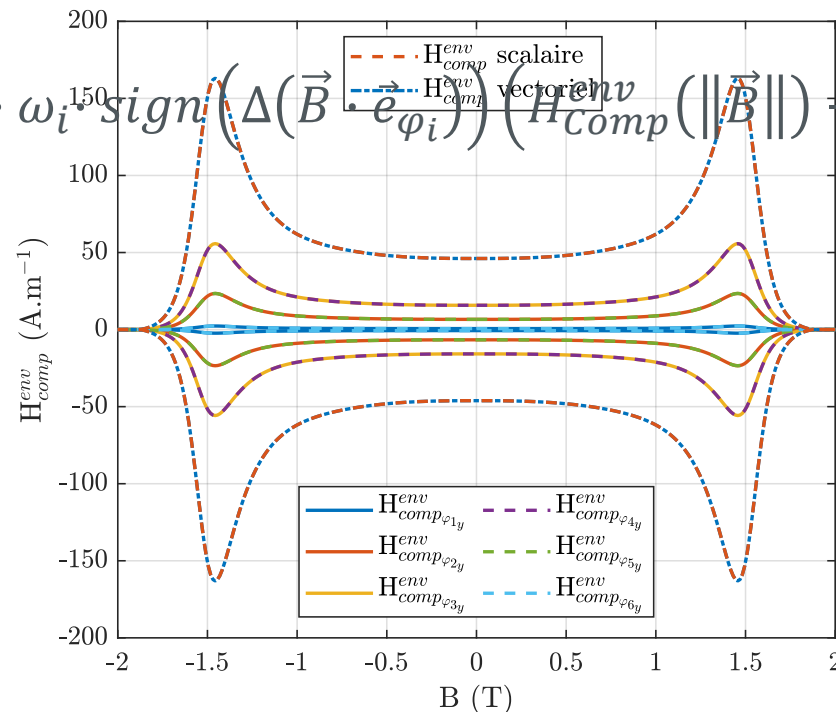
Adaptation de la méthode de Mayergoyz

Courbe enveloppe: Correction

- On exprime $H_{Comp}^{env}(\|B\|)$ sur chaque direction pour avoir la même allure sur chaque direction
- On conserve la mécanique de projection pour la gestion des signes de chaque direction

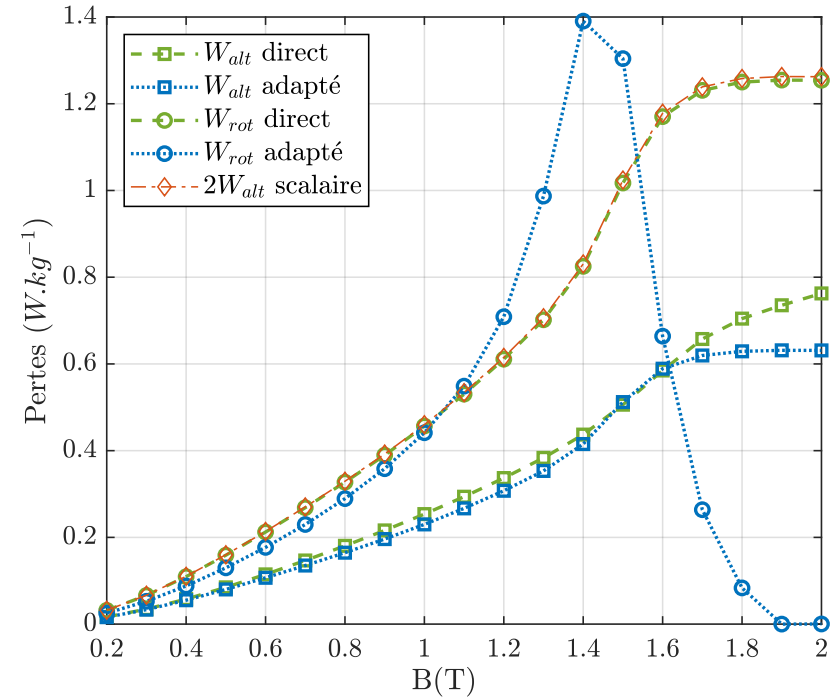
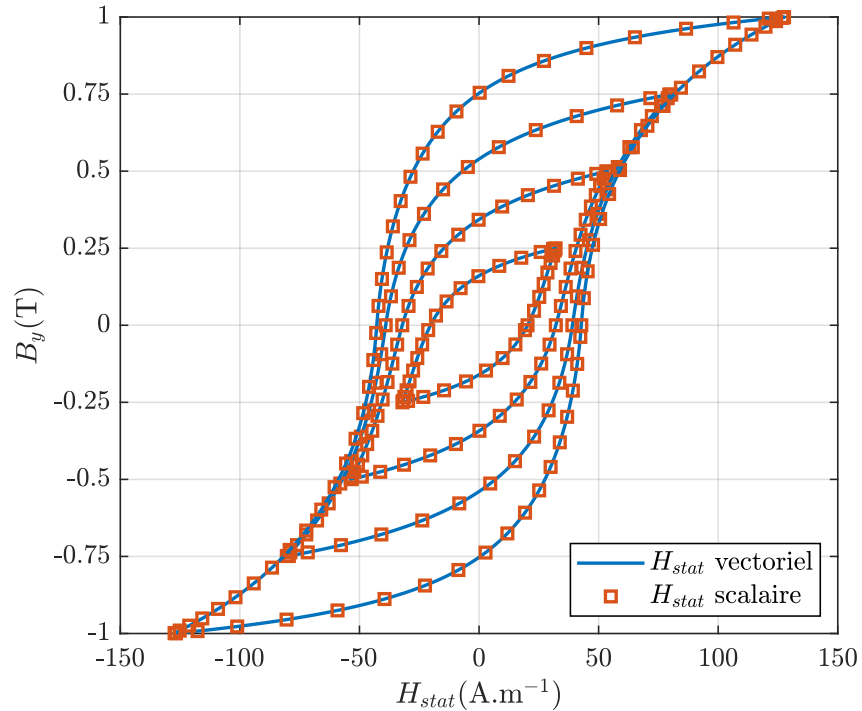
$$\vec{H}_{Comp}^{env} = \frac{1}{2} \sum \left(\vec{e}_{\varphi_i} \cdot \omega_i \cdot \text{sign}(\vec{B} \cdot \vec{e}_{\varphi_i}) H_{Comp}^{env}(\|\vec{B}\|) \right)$$

$$\vec{H}_{comp} = \frac{1}{2} \sum \vec{e}_{\varphi_i} \cdot \omega_i \cdot \text{sign}(\Delta(\vec{B} \cdot \vec{e}_{\varphi_i})) \left(H_{comp}^{env}(\|\vec{B}\|) - \Delta H(\delta h_i, \delta b_i, \|\vec{B}_a\|) \right)$$



Adaptation de la méthode de Mayergoyz

Résultats



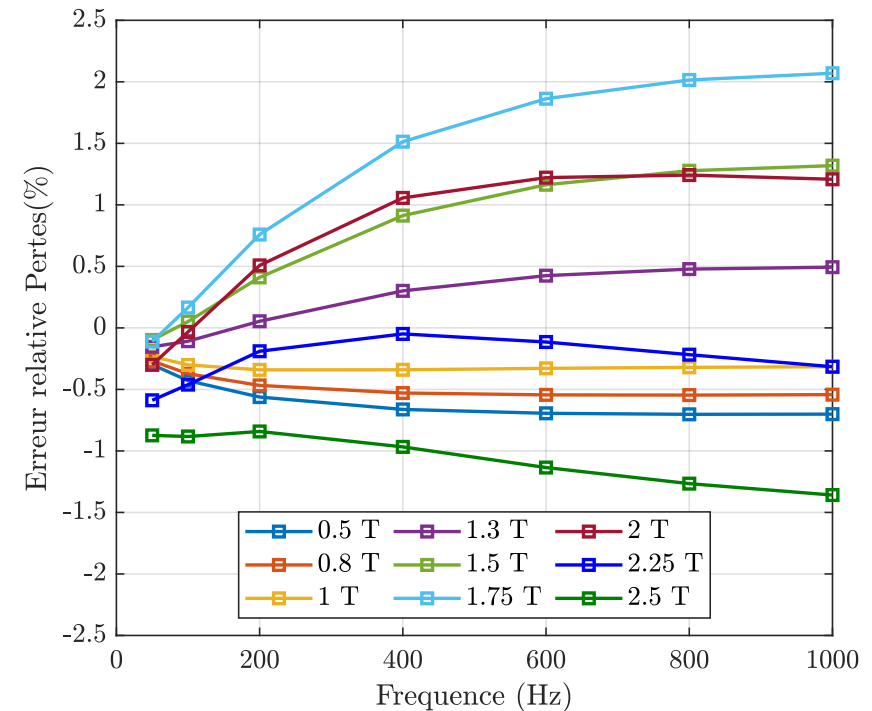
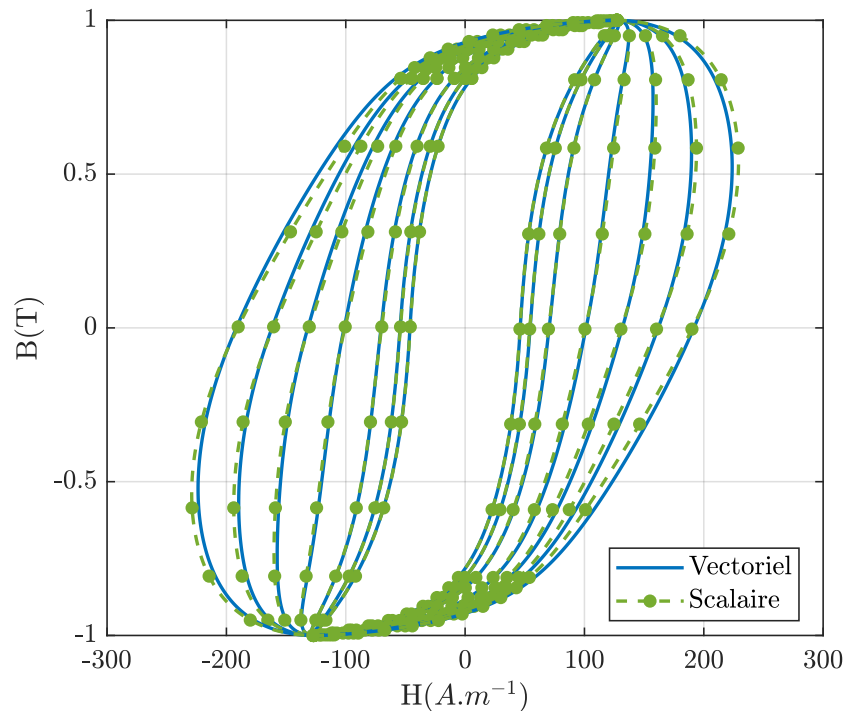
- Pertes identiques au modèle scalaire en uniaxial
- Bonne allure des pertes en champ tournant

Vectorisation de la contribution dynamique

Application de Mayergoyz à H_{dyn}

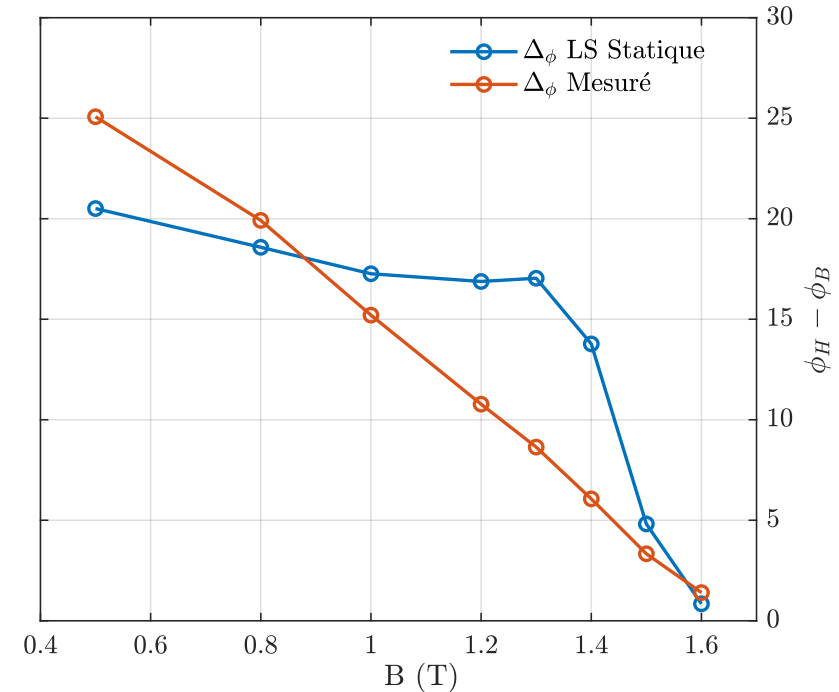
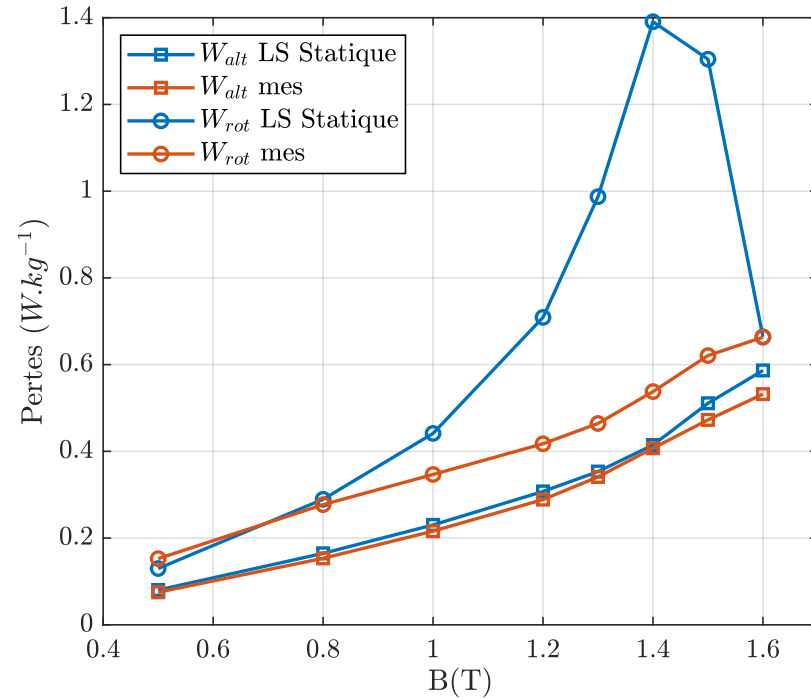
- Utilisation de la méthode directe

$$H_{dyn} \left(\vec{B}, \frac{d\vec{B}}{dt} \right) = \int_0^\pi w_i \cdot \vec{e}_{\varphi i} \cdot H_{dyn} \left(\vec{e}_{\varphi i} \cdot \vec{B}, \vec{e}_{\varphi i} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} \right)$$



Validation expérimentale : Modèle statique

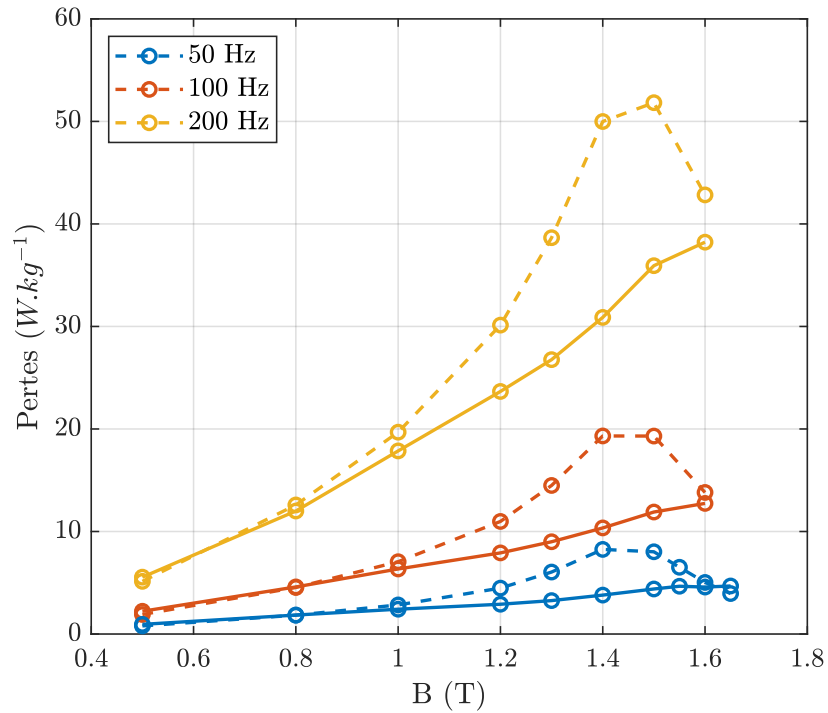
Mesure sur RSST: Comportement en champ tournant



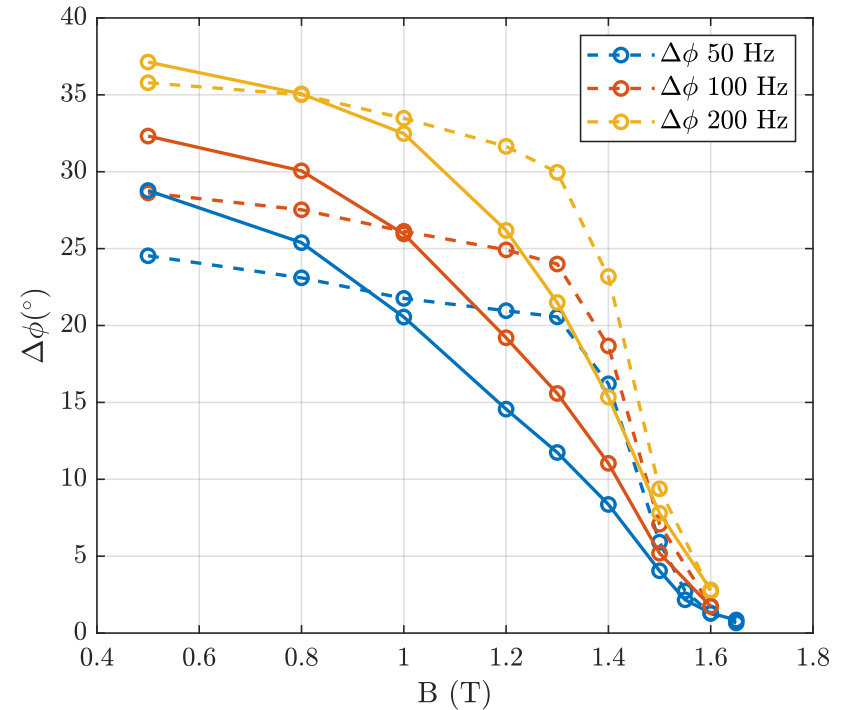
- Formes d'onde obtenues en accord avec les mesures jusqu'à 1.3 T
 - Au-delà l'hypothèse isotrope n'est plus valide

Validation expérimentale : Modèle dynamique

Mesure sur RSST



1.3 T, f variant de 50 à 400 Hz



200 Hz, B variant de 0.5 à 1.3 T

➤ Même constante $P_{RES} \leq P_{statique} \leq 5\%$ défaut est cependant atténué

SOMMAIRE

1. Contexte et objectif
2. Modèle Loss Surface(LS) scalaire
3. Extension vectorielle
4. Implémentation en résolution éléments finis
5. Conclusion et perspectives

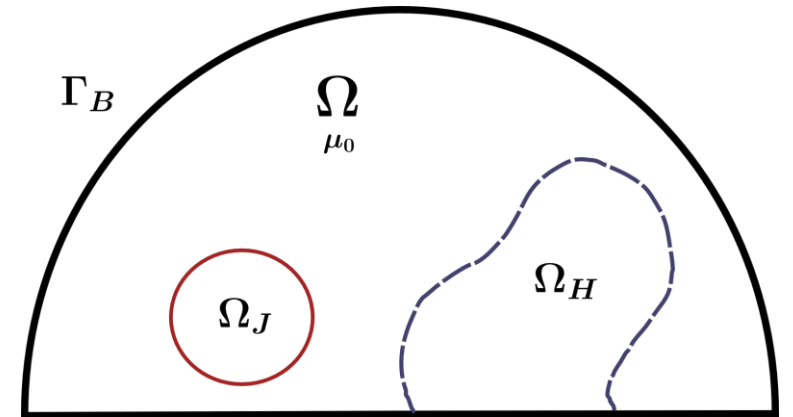
Formulation 2D en potentiel vecteur magnétique A

Formulation forte

$$\begin{cases} \mathbf{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J}_S \\ \mathbf{div}(\mathbf{B}) = 0 \end{cases}$$

Loi constitutive

$$\mathbf{H} = \mathbf{LS} \left(\mathbf{B}, \frac{d\mathbf{B}}{dt} \right)$$



➤ Le problème transitoire à résoudre est décrit par :

$$\mathbf{rot} \left(\mathbf{H} \left(\mathbf{B}, \frac{d\mathbf{B}}{dt} \right) \right) = \mathbf{J}_S \quad \text{avec } \mathbf{B} = \mathbf{rot}(\mathbf{A})$$

Formulation faible

Discrétisation de l'espace d'étude et application de la méthode de Galerkin

$$\text{Res}(\mathbf{A}) = \int_{\Omega} w_i [\mathbf{rot}(\mathbf{H})] d\Omega - \int_{\Omega} w_i \mathbf{J}_S d\Omega = 0$$

$$\mathbf{B} = \sum w_i \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{rot}(\alpha_i)$$

$$w_i = \alpha_i$$

Problème non linéaire

Newton Raphson

Développement de Taylor au premier ordre $\left[\frac{dRes(\mathbf{A}_k)}{d\mathbf{A}_k^t} \right] \Delta \mathbf{A} = -Res(\mathbf{A}_k)$

$$\left[\frac{dRes(\mathbf{A}_k)}{d\mathbf{A}_k^t} \right] = \int_{\Omega} \left\{ \mathbf{rot}_{2D}(\alpha_i) \left[\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{B}^t} \right] \mathbf{rot}_{2D}(\alpha_j) \right\} d\Omega \quad \left[\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{B}^t} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_x}{\partial B_x} & \frac{\partial H_x}{\partial B_y} \\ \frac{\partial H_y}{\partial B_x} & \frac{\partial H_y}{\partial B_y} \end{bmatrix}$$

La bonne convergence de l'algorithme est fortement dépendante de l'estimation du terme $\left[\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{B}^t} \right]$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{B}^t} \right] = \left[\frac{\partial \mathbf{H}_{stat}}{\partial \mathbf{B}^t} \right] + \left[\frac{\partial \mathbf{H}_{dyn}}{\partial \mathbf{B}^t} \right]$$

- Calcul de $\left[\frac{\partial \mathbf{H}_{stat}}{\partial \mathbf{B}^t} \right]$ par dérivation analytique du modèle LS
- Calcul de $\left[\frac{\partial \mathbf{H}_{dyn}}{\partial \mathbf{B}^t} \right]$ par dérivation numérique \mathbf{H}_{dyn}

Problème TEAM Workshop 32

- Circuit magnétique d'un transformateur triphasé
- 5 tôles de 0.48 mm à grain non orientés
- Assemblage RD et TD
- 2 enroulements de 90 tours alimentés en courant

Cas test n°1:

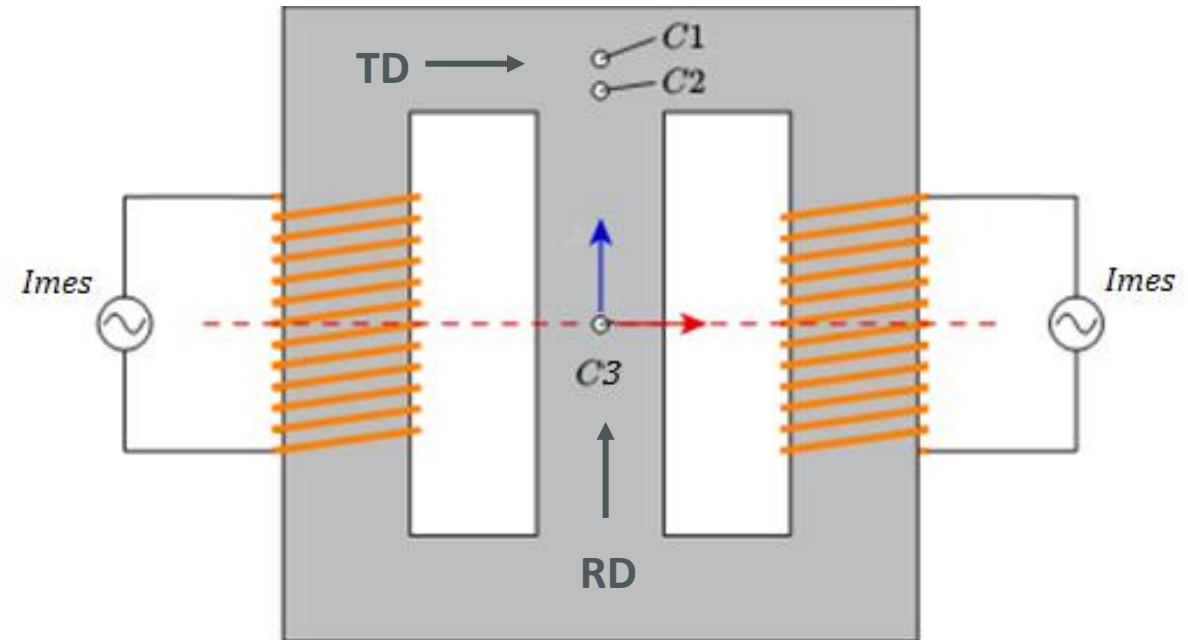
- Courant sinusoïdal à 10 Hz

Cas test n°2:

- Courant sinusoïdal avec harmonique de rang 5

Cas test n°3:

- Bobines alimentées par 2 sources de courant sinusoïdal déphasé de 90°



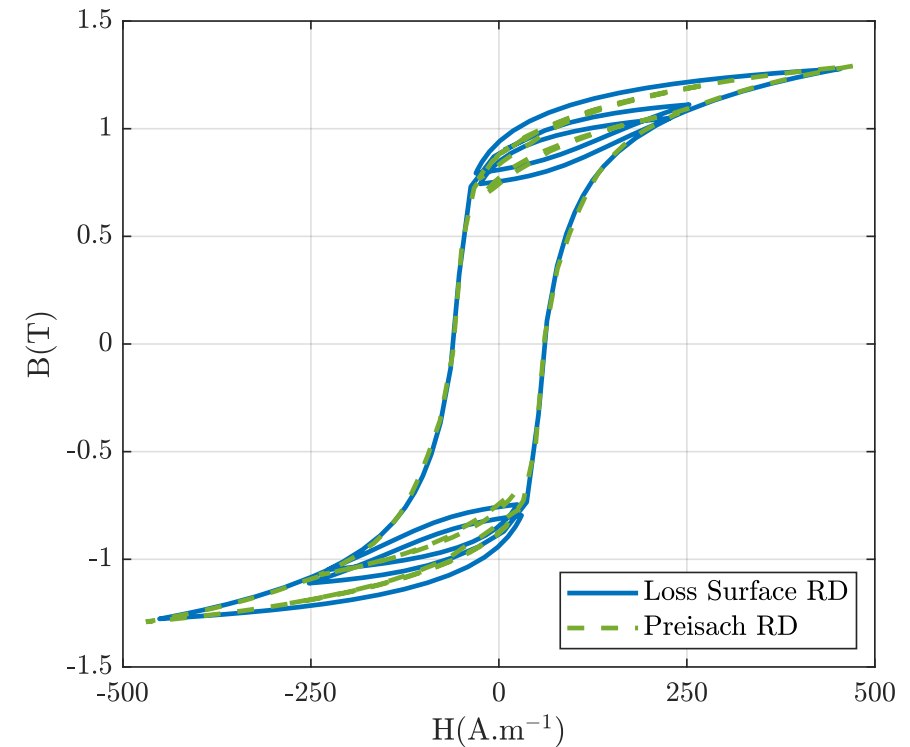
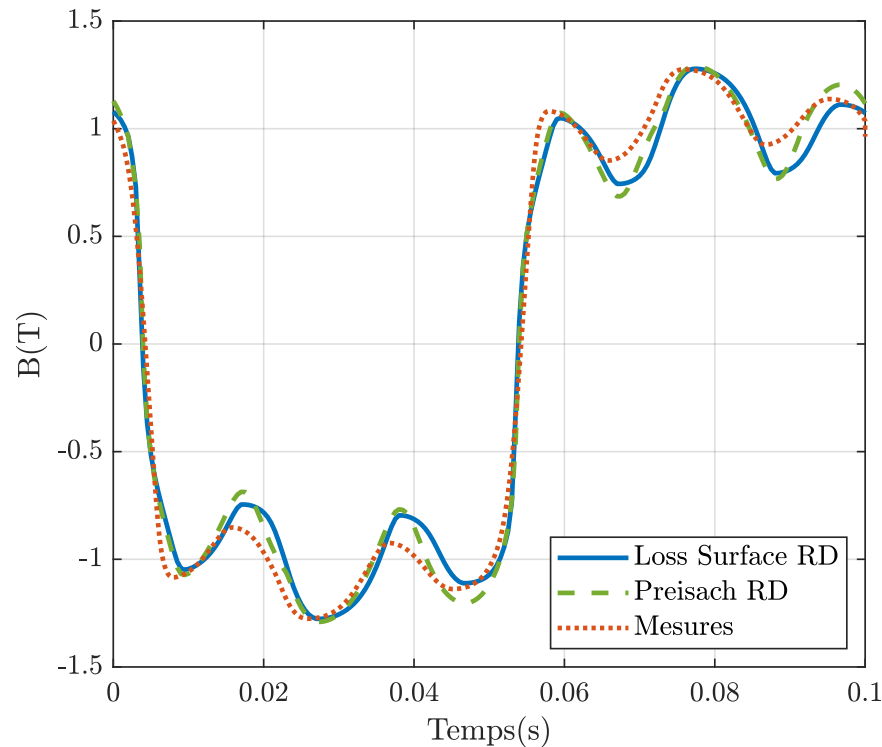
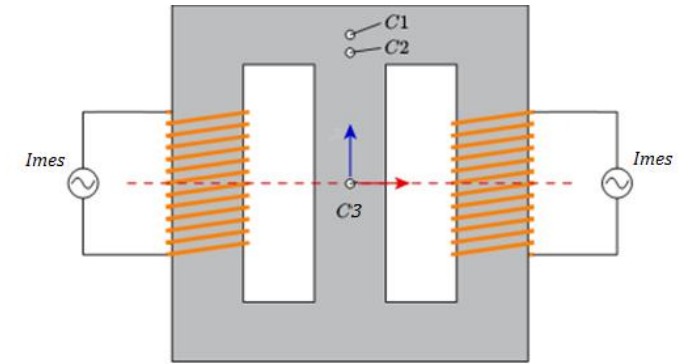
Objectifs:

- Résoudre le cas test avec le modèle LS vectoriel
- Comparaison avec les mesures statiques
- Comparaison avec le modèle de Preisach

Problème TEAM Workshop 32

Résultats

Cas test n°2 : Capteur C3

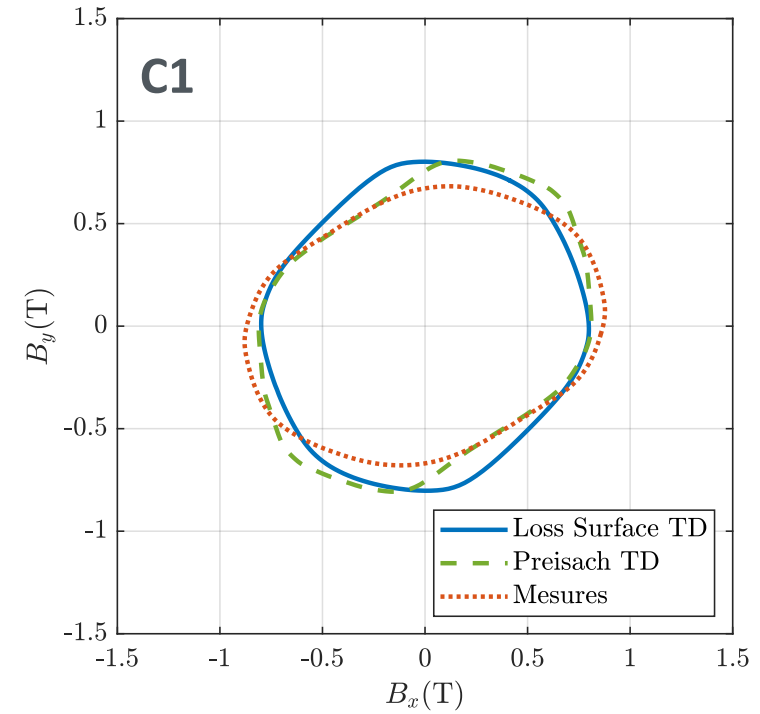
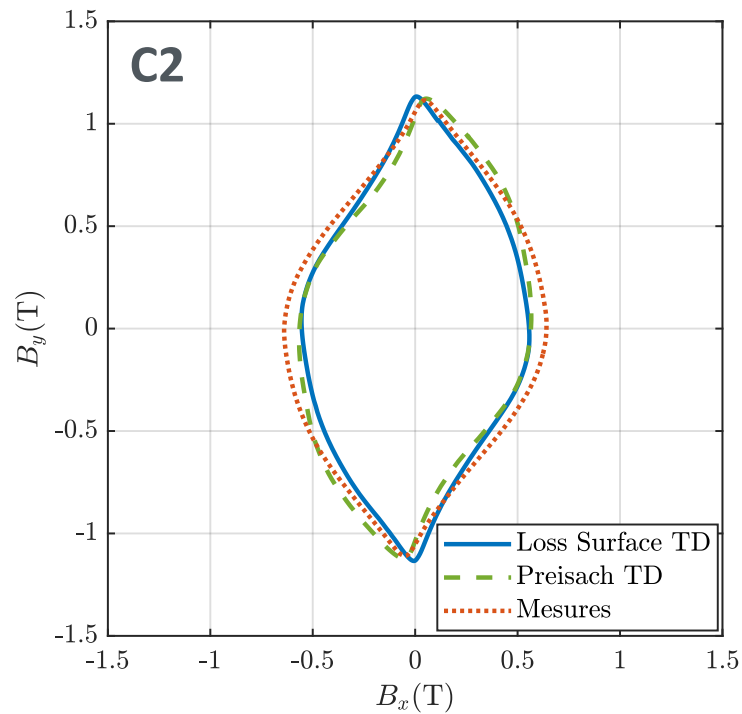
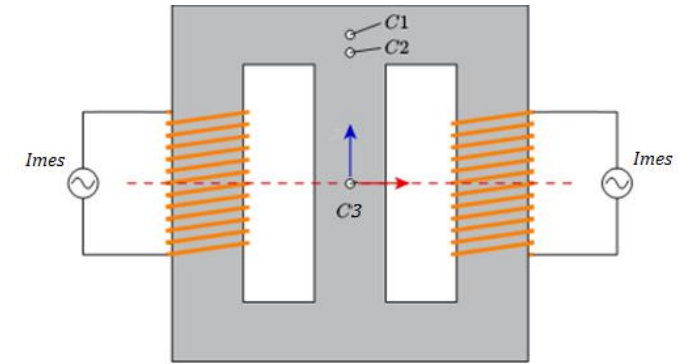


- On retrouve les formes d'onde mesurées avec un léger décalage
- Cycles mineurs ne sont pas bien décrits par le modèle de Preisach

Problème TEAM Workshop 32

Résultats :

Cas test n°3 : Capteurs C1 et C2



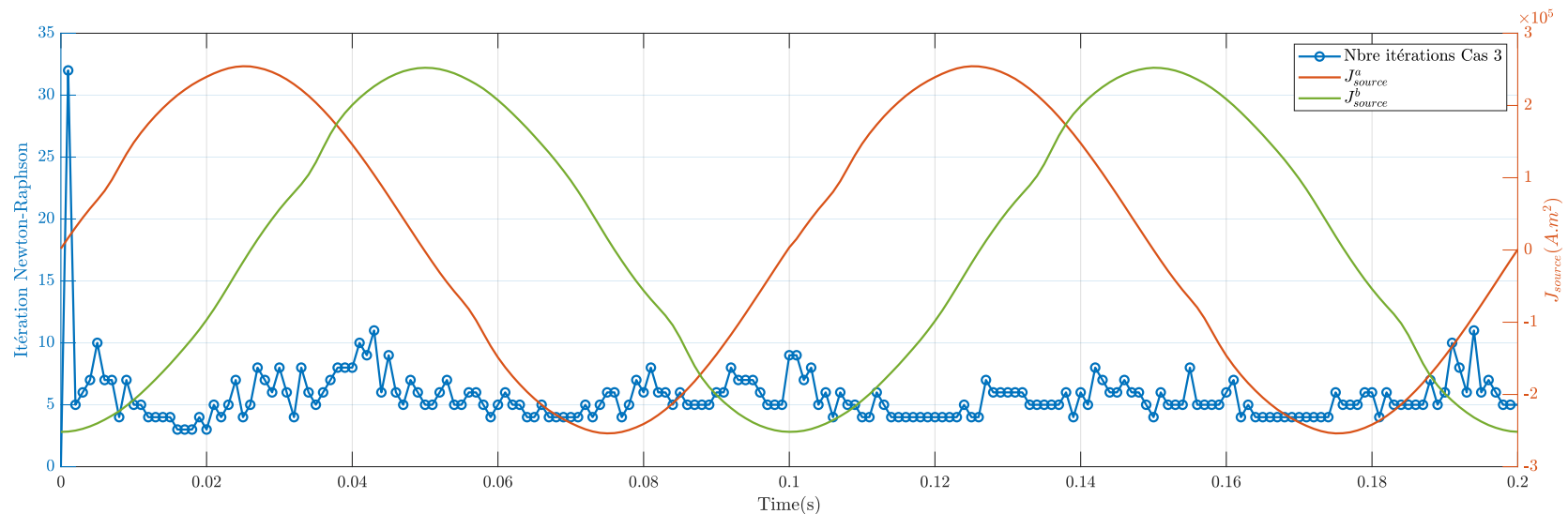
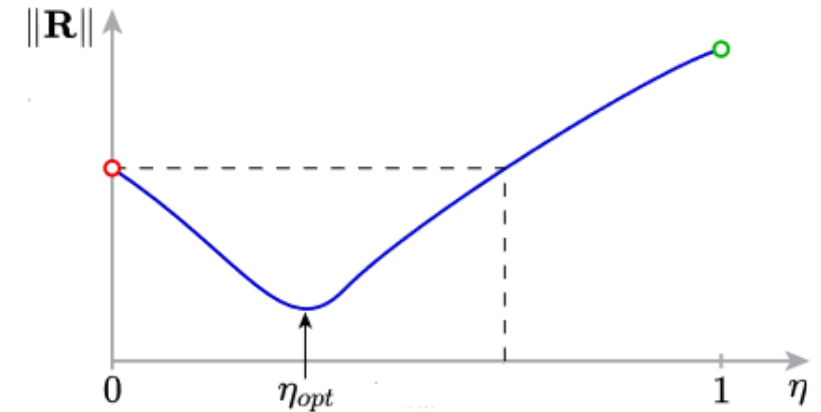
- B-loci bien décrit pour le capteur C2
- Décalage pour le capteur C1

Considérations numériques

- Sans relaxation l'algorithme de NR divergence

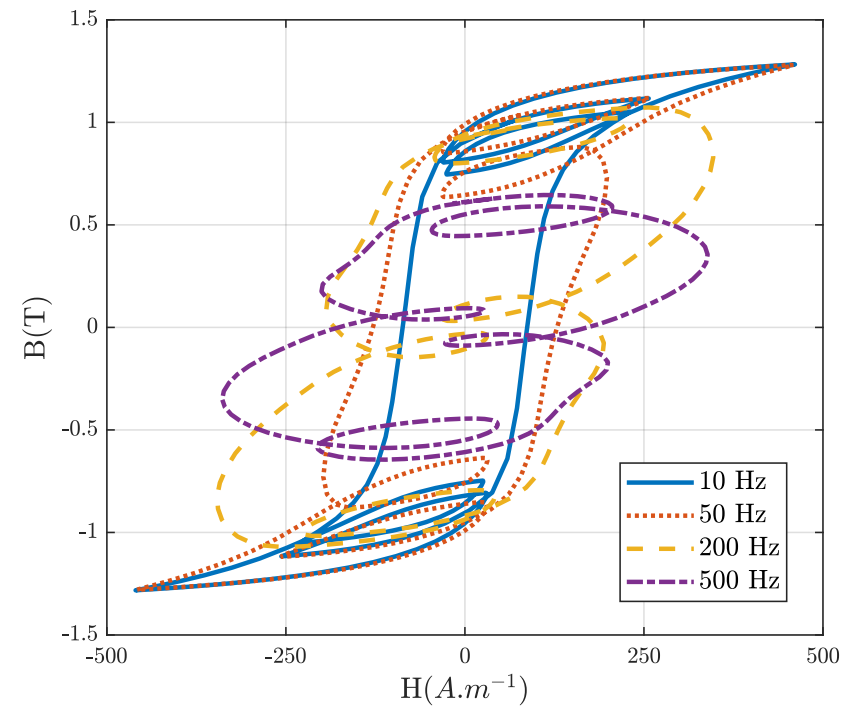
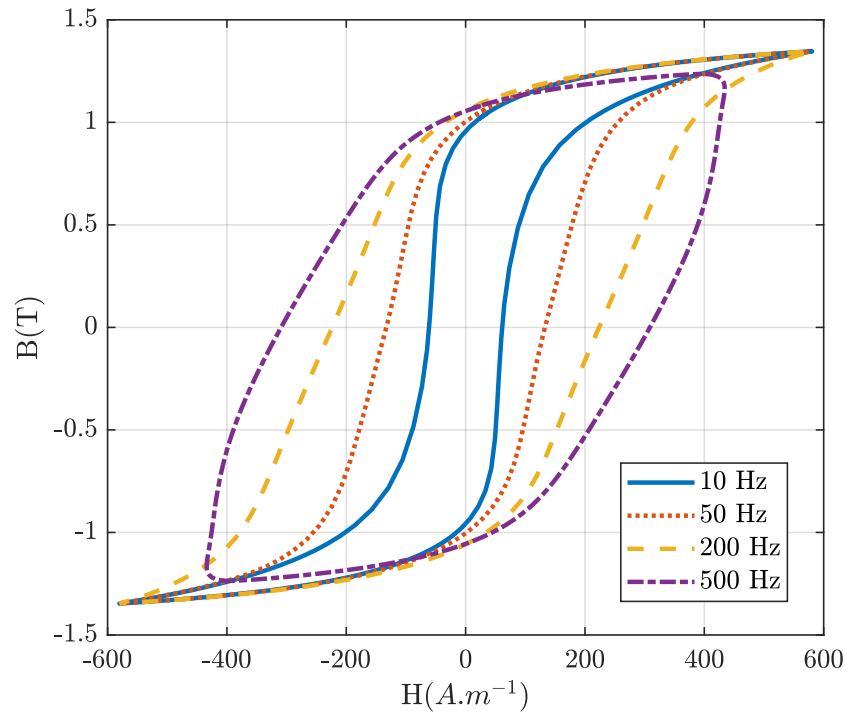
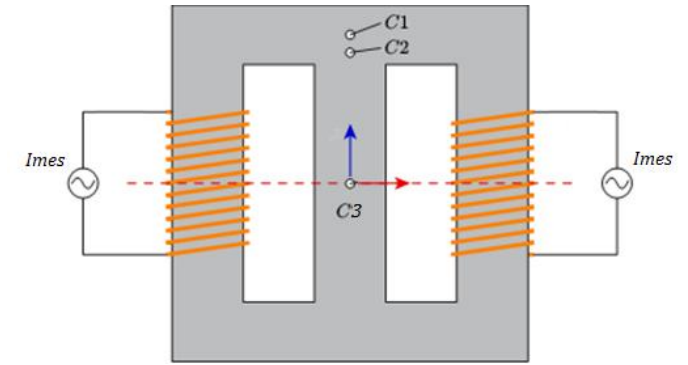
Méthode de relaxation

- Un facteur $\eta \in [0; 1]$ est appliqué à ΔA $A_{k+1} = A_k + \eta \Delta A$
- Une recherche de $\eta_{optimal}$ par dichotomie



Prise en compte de la contribution dynamique

Cas test n°1 et n°2 : Capteur C3

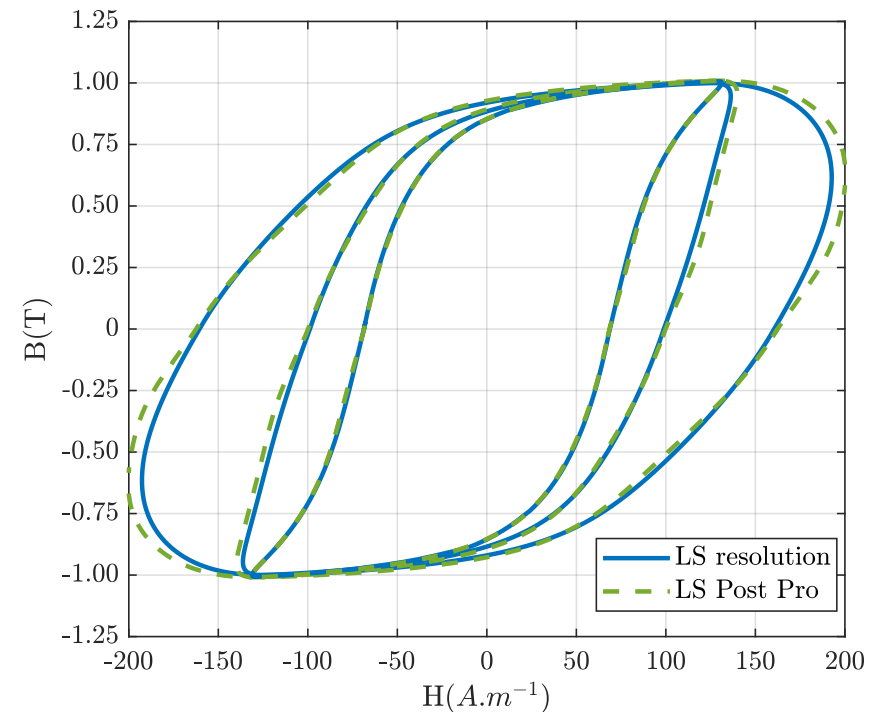
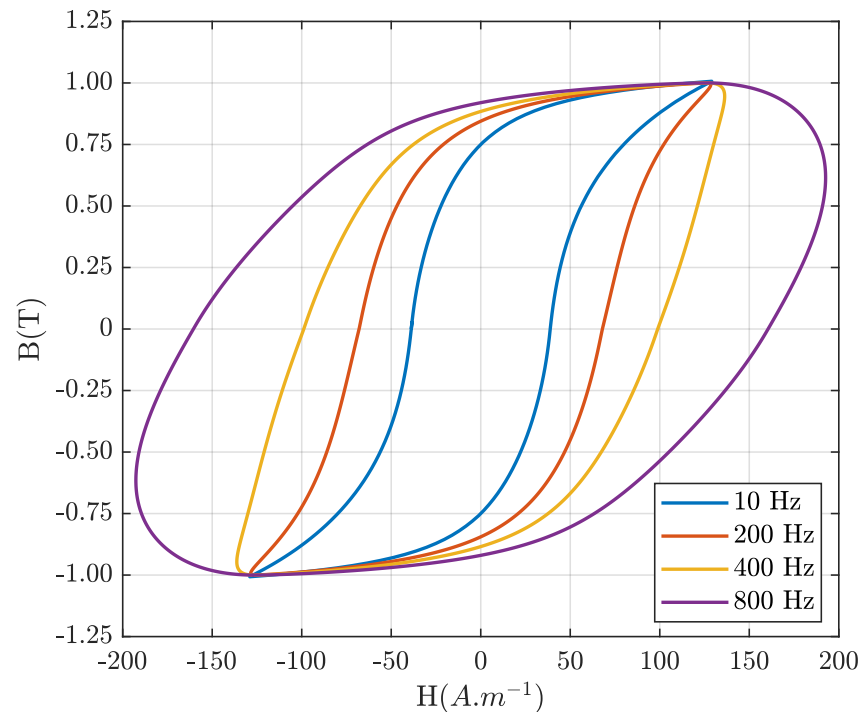
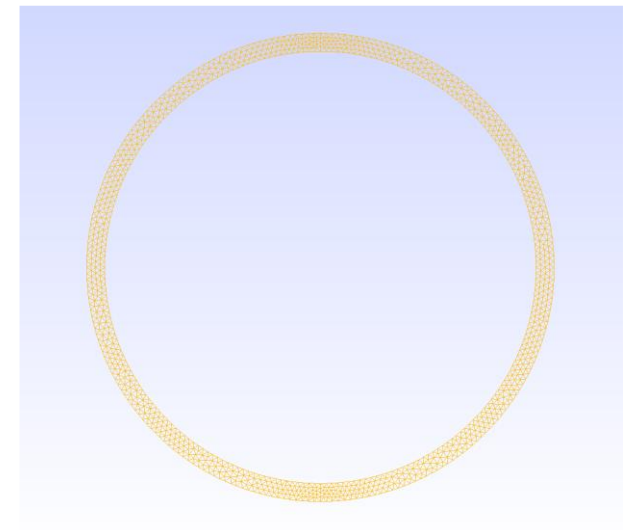


- Comportement cohérent des cycles obtenus en fonction de la fréquence et de la forme de l'excitation

Comparaison avec l'approche a posteriori

Tore: Induction Imposée

- H et B sont uniaxiaux (selon e_θ) et homogènes dans le circuit magnétique
- B est imposé via les conditions limites sur les frontières extérieures



➤ Les deux approches sont équivalentes dans ces conditions

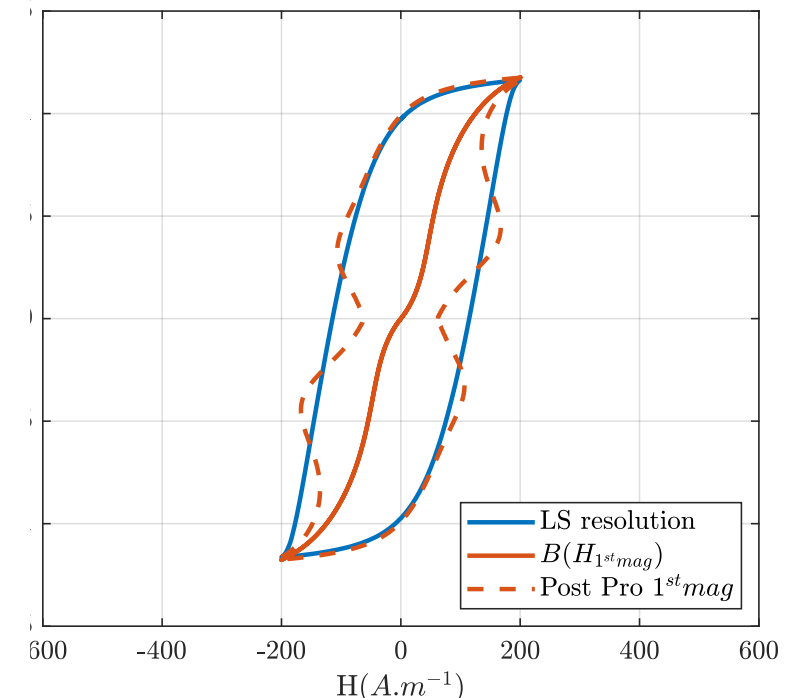
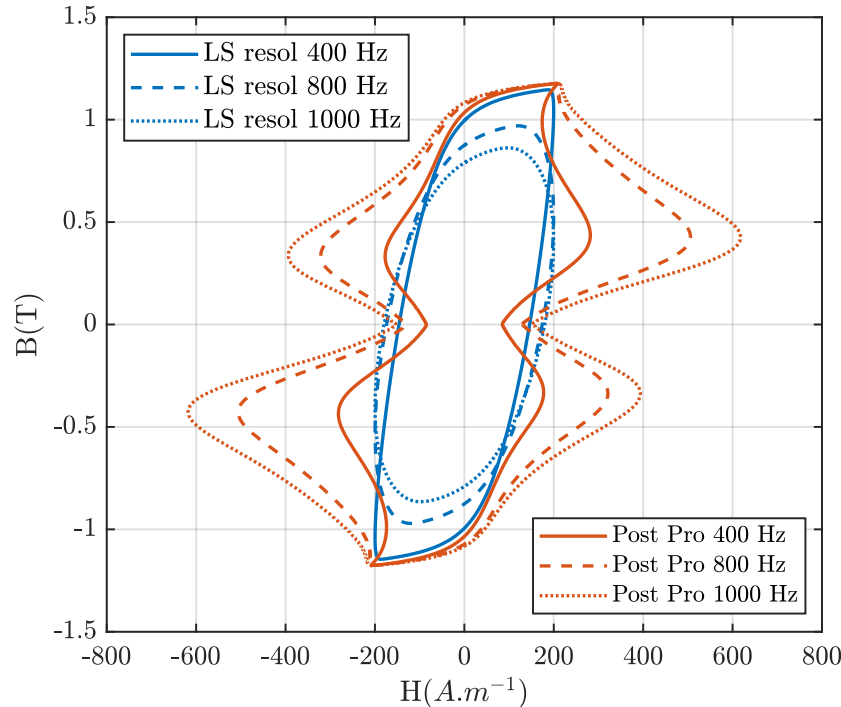
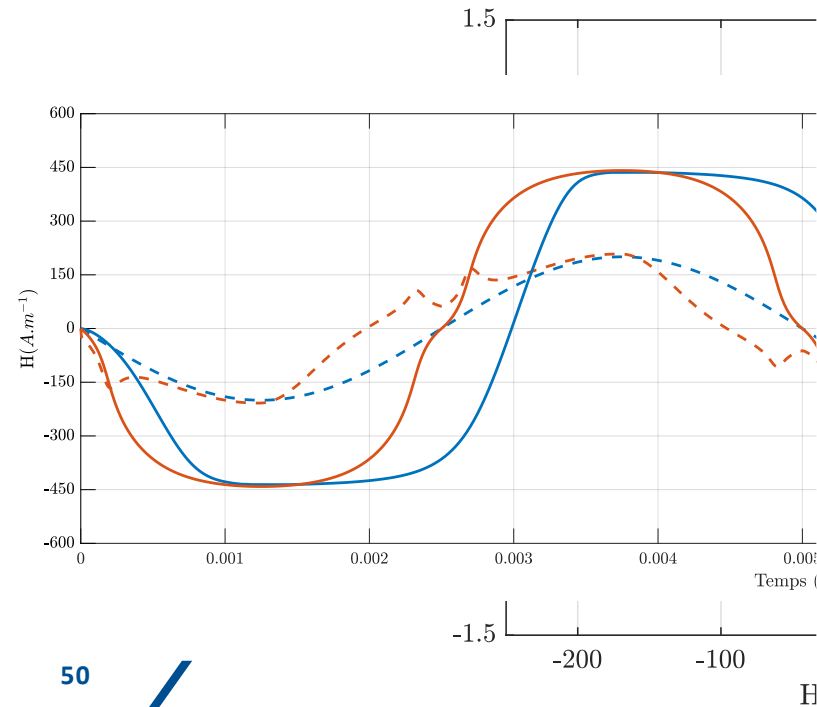
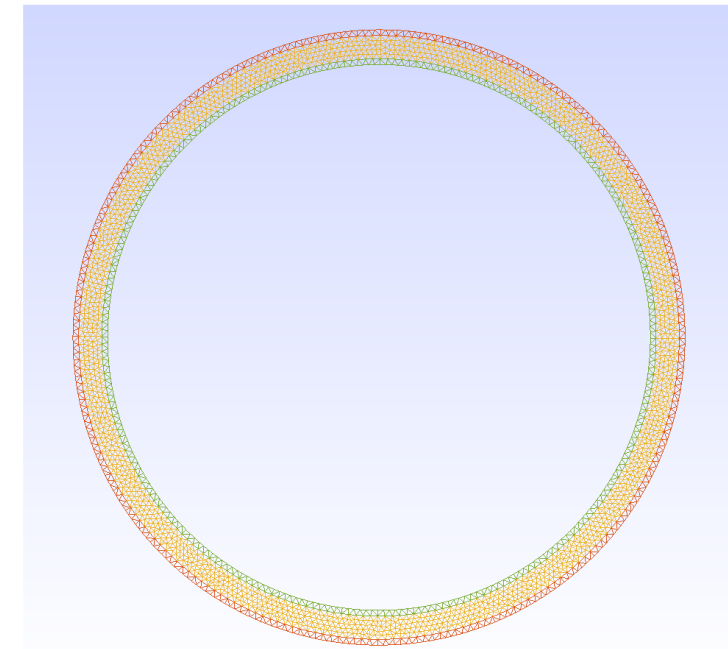
Comparaison avec l'approche a posteriori

Tore: Champ imposé

- H est imposé par les courants circulant dans le bobinage

➤ H uniforme Th. Ampère

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$



SOMMAIRE

1. Contexte et objectif
2. Modèle Loss Surface(LS) scalaire
3. Extension vectorielle
4. Implémentation en résolution éléments finis
5. Conclusion et perspectives

Conclusion

- Les phénomènes à l'origine des pertes fer et les méthodes d'évaluation ont été présentées
 - Modèle hystérésis globale *a priori* Modèle Loss Surface
- Le fonctionnement du modèle Loss Surface et ses bonnes performances ont été détaillés
- Une adaptation de la méthode de Mayergoyz a été proposée pour vectoriser le modèle scalaire
 - Comparaison avec des mesures en champ tournant
- Implémentation en résolution éléments finis
 - Validation sur des cas tests académiques (TEAM 32, ...)
 - Mise en évidence de la limitation de l'approche *a posteriori*

Perspectives

1. Implémentation dans **Altair FluxTM** pour exploiter le modèle sur de machines tournantes
2. Mise en place d'une maquette expérimentale similaire au TEAM 32 dédiée à l'hystérésis dynamique
3. Une étude plus approfondie de l'influence de la mécanique de projection sur déphasage final entre \vec{H} et \vec{B}
4. Prise en compte de l'anisotropie
5. Prise en compte de la température

Merci pour
votre
attention

