

Développement de méthodes de caractérisation magnétique sous champs tournants et sous contrainte thermique

Clémentine Delaunay

2 mai 2024

Devant le jury composé de :

Benabou Abdelkader	Professeur des Universités, Université de Lille	Rapporteur
Soulard Juliette	Associate Professor, University of Warwick	Rapporteuse
Daniel Laurent	Professeur des Universités, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay	Examineur
Raulet Marie-Ange	Maître de Conférence HDR, Université Claude Bernard Lyon 1	Examinatrice
Sixdenier Fabien	Maître de Conférence HDR, Université Claude Bernard Lyon 1	Directeur de thèse
Joubert Charles	Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1	Co-directeur de thèse



Partie I

Introduction et contexte

Objectifs de la thèse

- Développement de méthodes de caractérisation magnétique

sous champs tournants

et sous contrainte thermique

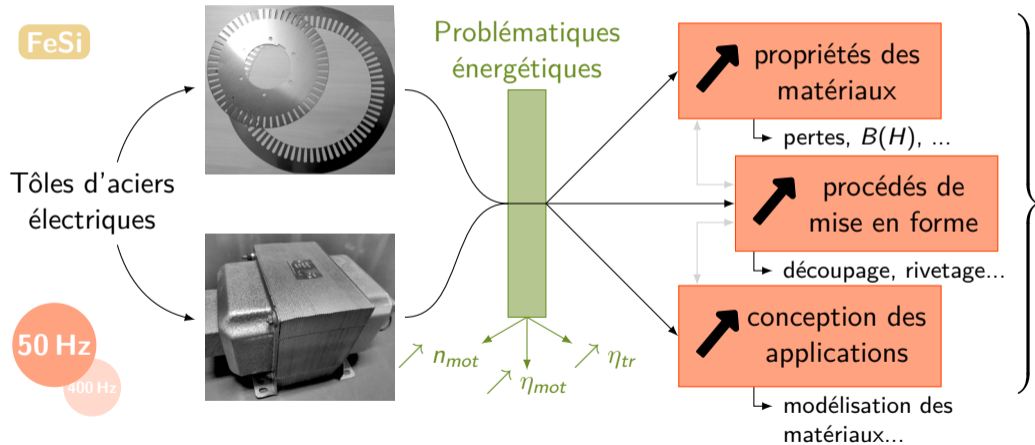
Objectifs de la thèse

- Développement de méthodes de caractérisation de matériaux magnétiques

sous champs tournants


et sous contrainte thermique

Applications des aciers électriques



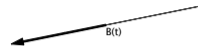
Objectifs de la thèse

Développement de méthodes de caractérisation magnétique

 sous champs tournants

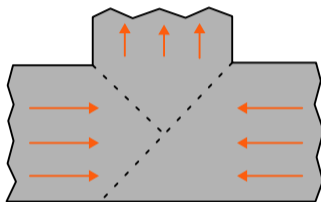
et sous contrainte thermique

Champs tournants dans les applications

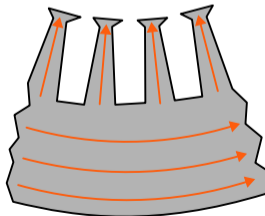


1D

Transformateurs

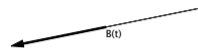
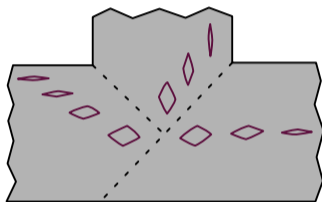


Moteurs

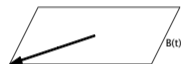


Champs tournants dans les applications

Transformateurs

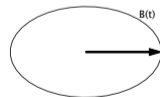
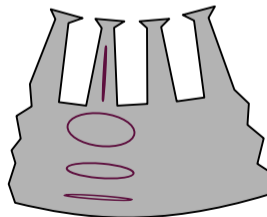


1D



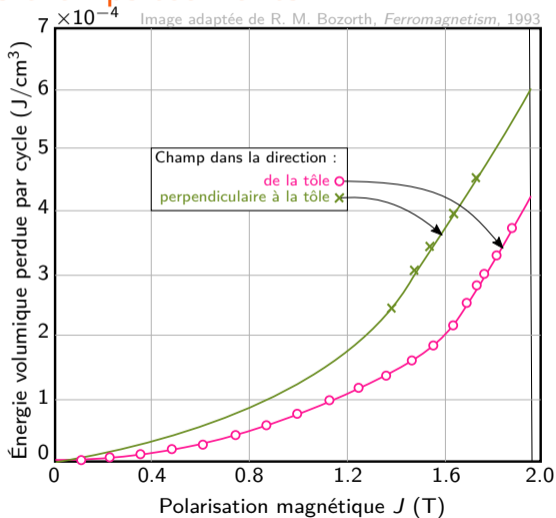
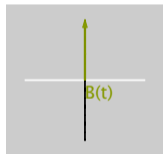
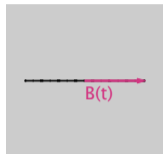
2D

Moteurs



2D

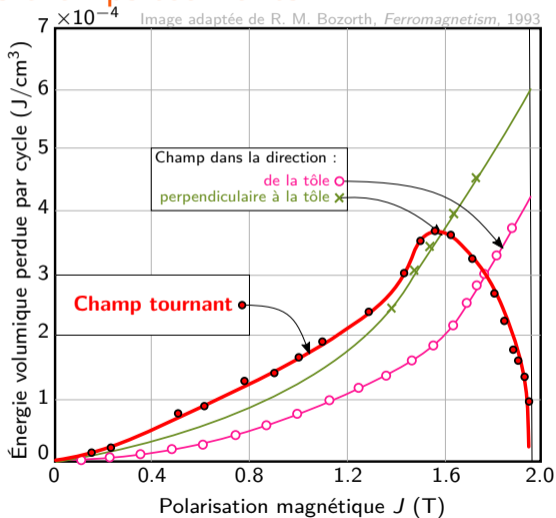
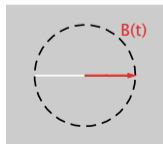
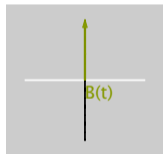
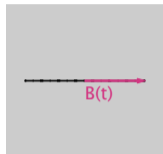
Pertes fer sous champs tournants



Champ 1D

- ◆ $W \nearrow$ avec J
- ◆ $f(\text{direction})$

Pertes fer sous champs tournants



Champ 1D

- ◆ $W \nearrow$ avec J
- ◆ $f(\text{direction})$

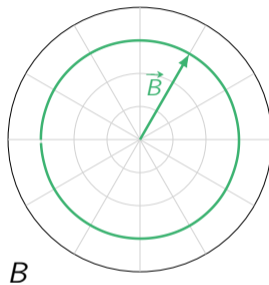
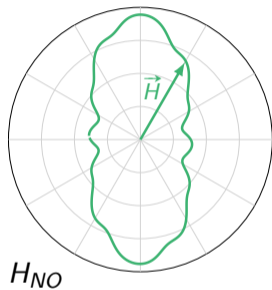
Champ 2D

- ◆ W élevées à faible J
- ◆ $W \searrow$ à fort J

Et en température ?

Lieux des champs & Fer-Silicium

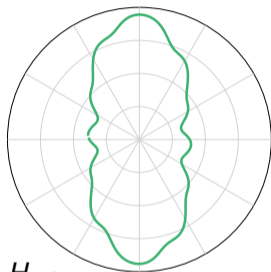
Non-Orienté



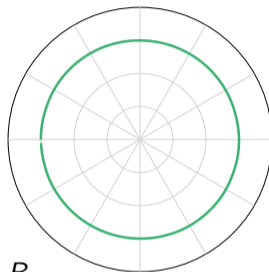
Grains-Orientés

Lieux des champs & Fer-Silicium

Non-Orienté

 H_{NO}

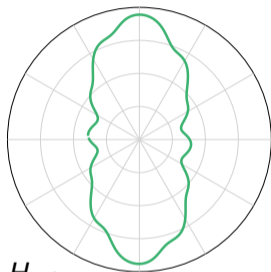
Orientation
cristalline
favorisée par
la fabrication

 B

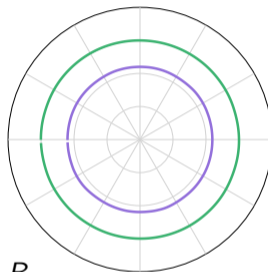
Grains-Orientés

Lieux des champs & Fer-Silicium

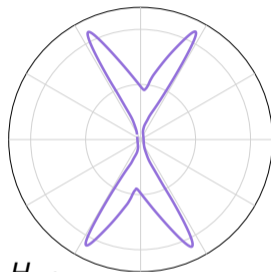
Non-Orienté



Orientation
cristalline
favorisée par
la fabrication



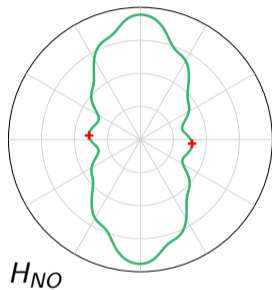
Orientation
cristalline
imposée par
la fabrication



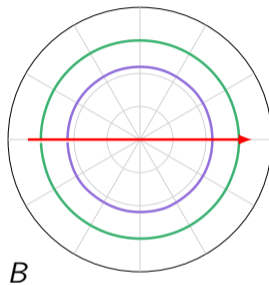
Grains-Orientés

Lieux des champs & Fer-Silicium

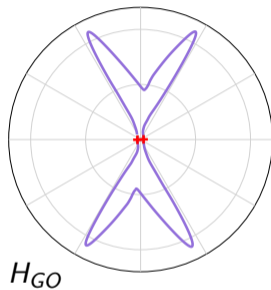
Non-Orienté



Orientation
cristalline
favorisée par
la fabrication



Orientation
cristalline
imposée par
la fabrication



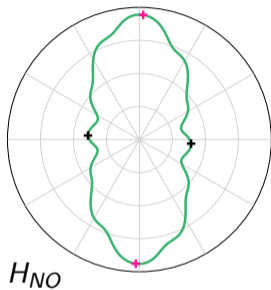
Grains-Orientés

Directions remarquables

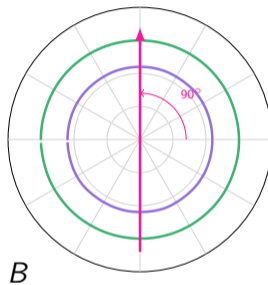
- ◆ Direction de laminage DL

Lieux des champs & Fer-Silicium

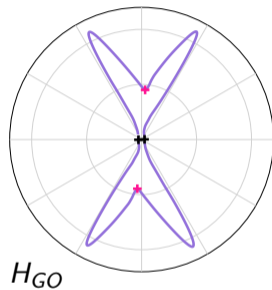
Non-Orienté



Orientation
cristalline
favorisée par
la fabrication



Orientation
cristalline
imposée par
la fabrication



Grains-Orientés

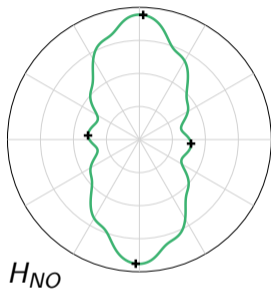
Directions remarquables

◆ Direction de laminage DL

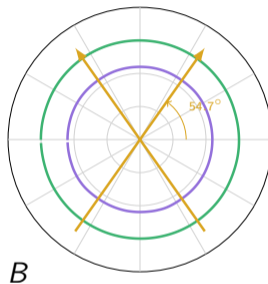
◆ Direction transverse DT

Lieux des champs & Fer-Silicium

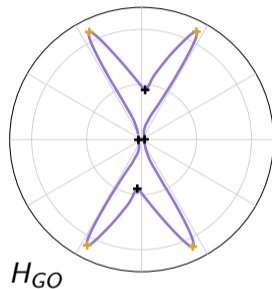
Non-Orienté



Orientation
cristalline
favorisée par
la fabrication



Orientation
cristalline
imposée par
la fabrication



Grains-Orientés

Directions remarquables

◆ Direction de laminage DL

◆ Direction transverse DT

◆ Direction difficile DD (GO)

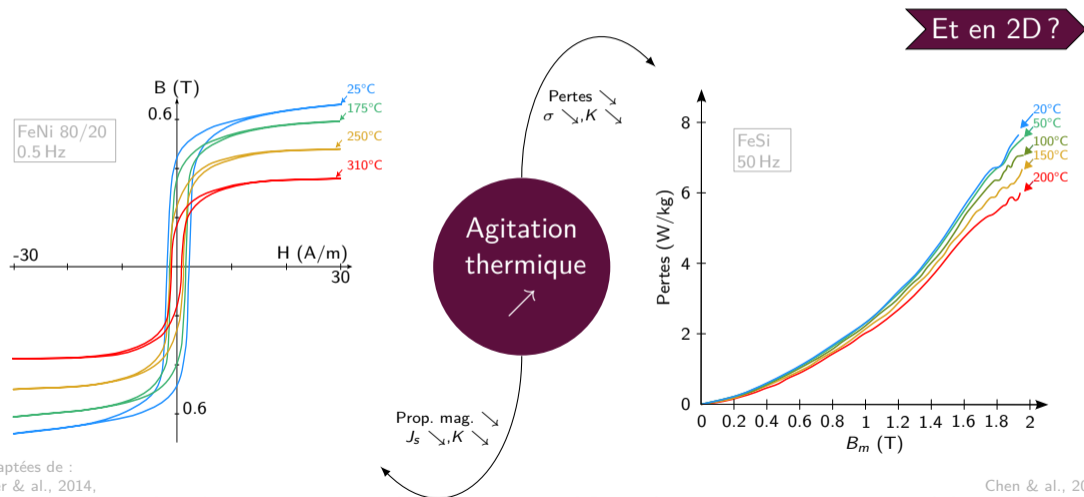
Objectifs de la thèse

Développement de méthodes de caractérisation magnétique

sous champs tournants

 et sous contrainte thermique

Phénomènes magnétiques en T



Figures adaptées de :
F. Sixdenier & al., 2014,
Caractérisation et modélisation de matériaux et composants magnétiques.

Chen & al., 2017,
Influence of temperature on magnetic properties of silicon steel laminations.

Objectifs de la thèse

Développement de méthodes de caractérisation magnétique

Banc + exploitations

sous champs tournants

\vec{B} circulaire

et sous contrainte thermique

$T \in [\text{amb.}; 200] \text{ } ^\circ\text{C}$

Partie I. Introduction et contexte

Partie II. Développement et présentation du banc de caractérisation magnétique sous champs tournants et sous contrainte thermique

Partie III. Comparaison du banc à ceux d'autres laboratoires

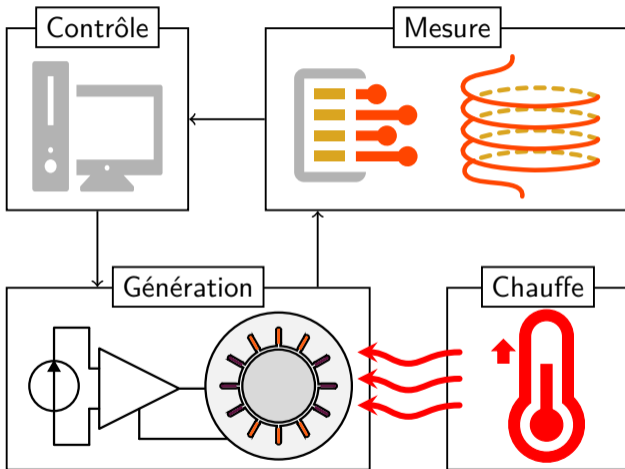
Partie IV. Caractérisations 2D en température

Partie V. Conclusions et perspectives



Partie II

Développement et présentation du banc de caractérisation magnétique sous champs tournants et sous contrainte thermique



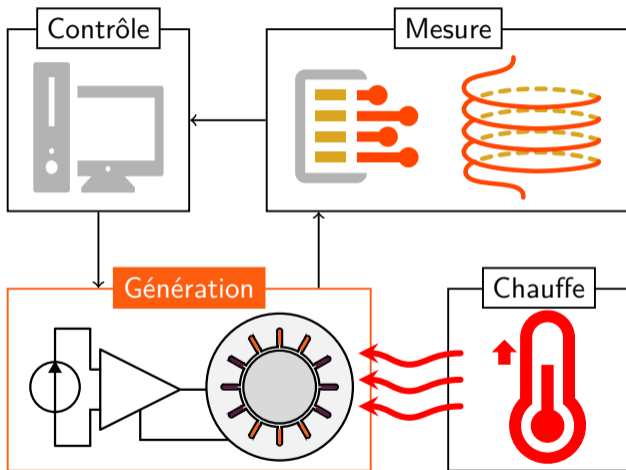
Abréviation

Système de caractérisation
magnétique 2D



RSST

(Rotational Single-Sheet Tester)

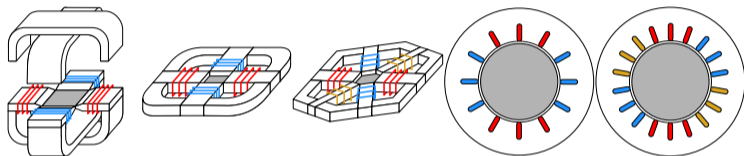


Objectif

- ◆ Création d'un champ tournant
- ◆ Performance = homogénéité
- ◆ $f \approx 50 \text{ Hz}$
- ◆ $B \approx [1 \text{ T} - 1.7 \text{ T}]$

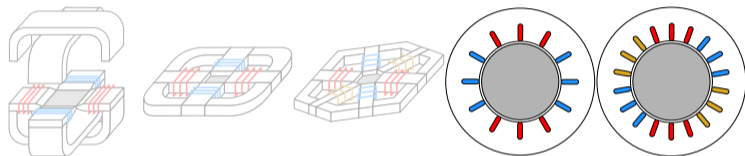
Inducteur

- ◆ Différentes formes d'inducteur possibles



Inducteur

- ◆ Différentes formes d'inducteur possibles
- ◆ Choix : Stator

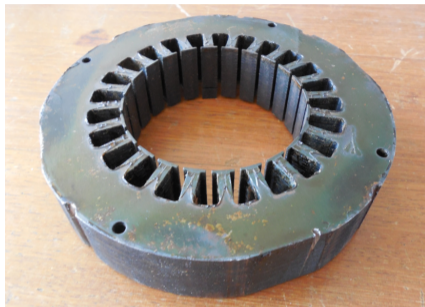


Choix d'un stator

- ◆ Réalisation facile
- ◆ Exemples récents

Inducteur

- ◆ Différentes formes d'inducteur possibles
- ◆ Choix : Stator
 - $D_i = 80 \text{ mm}$
 - $h = 35 \text{ mm}$

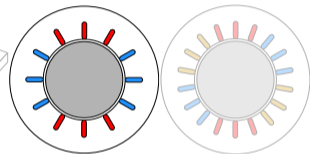
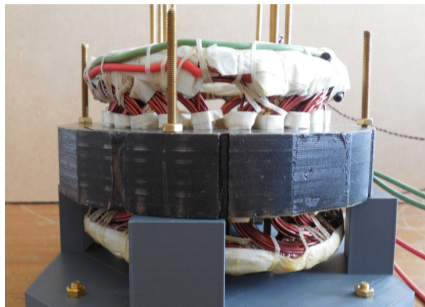


Choix d'un stator

- ◆ Réalisation facile
- ◆ Exemples récents

Inducteur

- ◆ Différentes formes d'inducteur possibles
- ◆ Choix : Stator diphasé
 - $D_i = 80 \text{ mm}$
 - $h = 35 \text{ mm}$



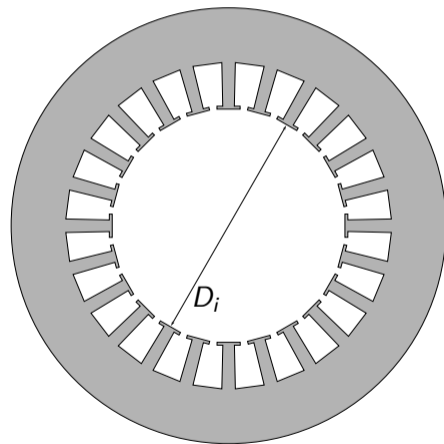
Choix d'un stator

- ◆ Réalisation facile
- ◆ Exemples récents

Échantillon

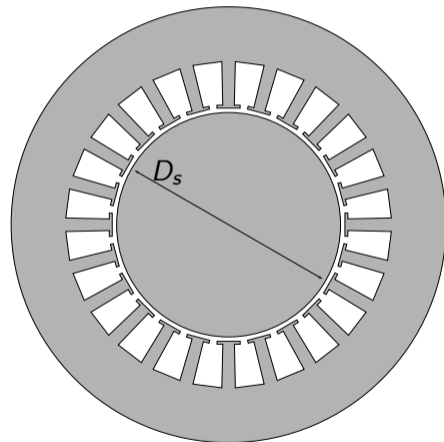
◆ Inducteur : Stator

■ $D_i = 80 \text{ mm}$



Échantillon

- ◆ Inducteur : Stator
 - $D_i = 80$ mm
- ➔ Échantillon circulaire
 - $D_s = 78$ mm



Échantillon

◆ Inducteur : Stator

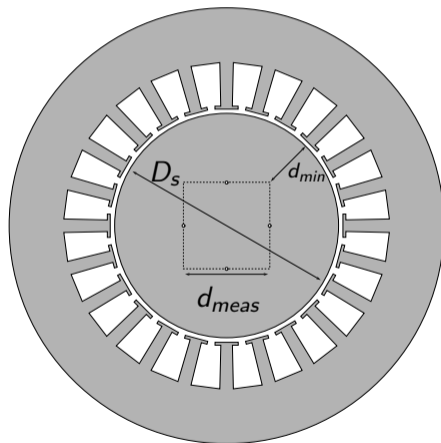
- $D_i = 80 \text{ mm}$

➔ Échantillon circulaire

- $D_s = 78 \text{ mm}$

- Zone de Mesure (ZM) de $(20 \times 20) \text{ mm}^2$

- $d_{min} \approx 25 \text{ mm}$

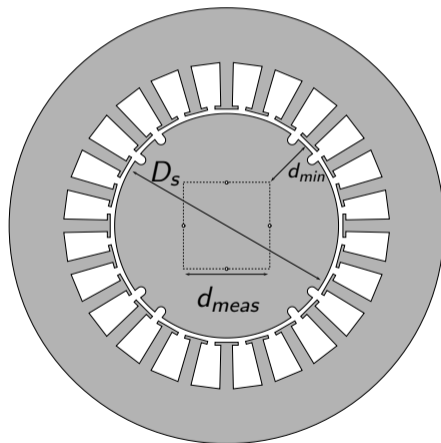


Échantillon

- ◆ Inducteur : Stator
 - $D_i = 80$ mm
- ➔ Échantillon circulaire
 - $D_s = 78$ mm
 - Zone de Mesure (ZM) de (20×20) mm²
 - $d_{min} \approx 25$ mm

Encoches

- ◆ Objectif : position angulaire
- ◆ Validations en simulation

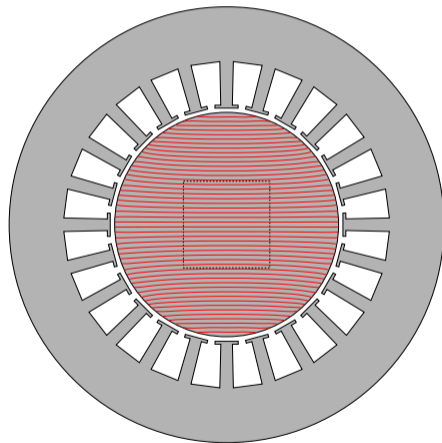


Échantillon

- ◆ Inducteur : Stator
 - $D_i = 80$ mm
- ➔ Échantillon circulaire
 - $D_s = 78$ mm
 - Zone de Mesure (ZM) de (20×20) mm²
 - $d_{min} \approx 25$ mm

Encoches

- ◆ Objectif : position angulaire
- ◆ Validations en simulation
 - Variations de B sur la ZM moindre avec encoches

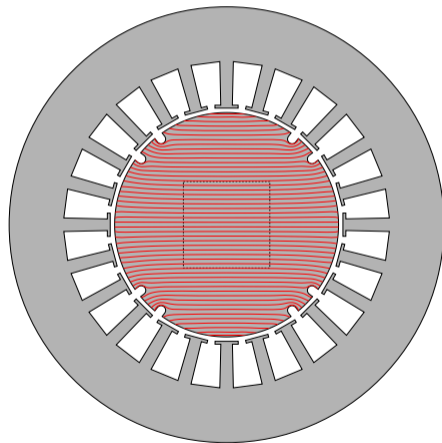


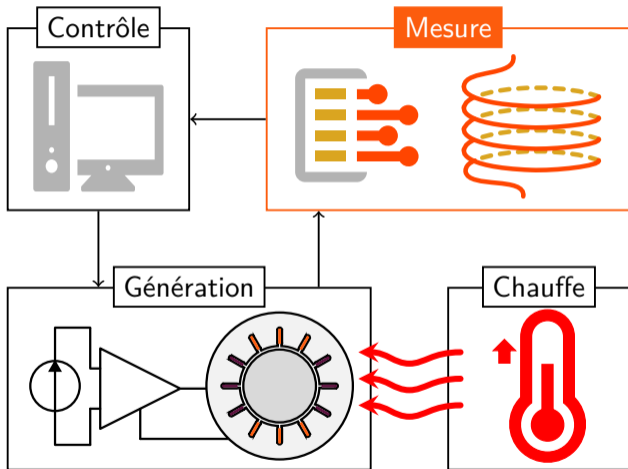
Échantillon

- ◆ Inducteur : Stator
 - $D_i = 80 \text{ mm}$
- ➔ Échantillon circulaire
 - $D_s = 78 \text{ mm}$
 - Zone de Mesure (ZM) de $(20 \times 20) \text{ mm}^2$
 - $d_{min} \approx 25 \text{ mm}$

Encoches

- ◆ Objectif : position angulaire
- ◆ Validations en simulation
 - Variations de B sur la ZM moindre avec encoches





Objectif

- ◆ Mesure des champs \vec{H} et \vec{B}
- ◆ Deux composantes :

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}$$

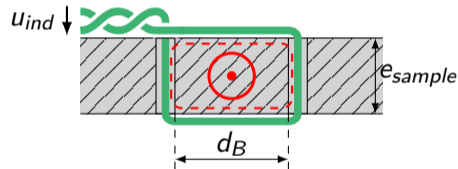
Mesure de B

- ◆ Flux ϕ défini dans la tôle
- ◆ Lenz-Faraday : tension e sur un contour

$$U_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

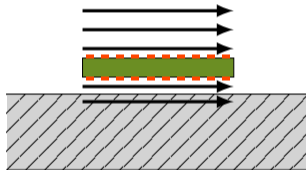
- ◆ Mesure par bobine :

- ⚠ Perçages
- ⊕ Bobinages



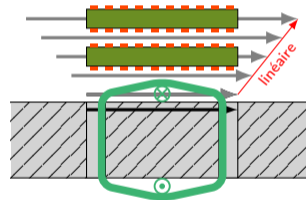
Mesure de H

- ◆ Composante tangentielle de H conservée
- ◆ Capteur intégré (Hall, MR), Bobines...
- ◆ Bobine PCB
 - ⊖ Faible sensibilité
 - ⊕ Reproductible

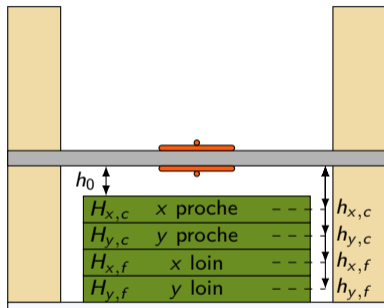


Mesure de H

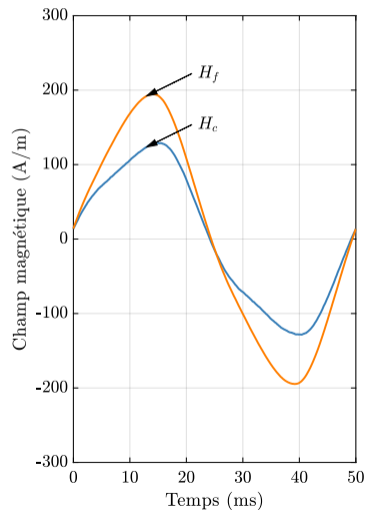
- ◆ Composante tangentielle de H conservée
- ◆ Capteur intégré (Hall, MR), Bobines...
- ◆ Bobine PCB
 - ⊖ Faible sensibilité
 - ⊕ Reproductible
- ◆ Extrapolation (linéaire)



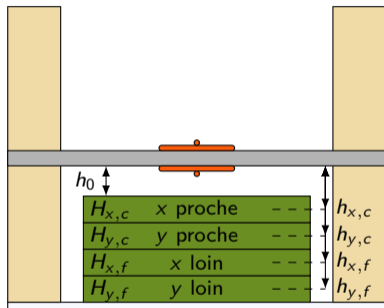
Extrapolation de H



- ◆ Écart h_0 :
 - protection
 - précision h
- ◆ 2 bobines/direction
 - H_c
 - H_f

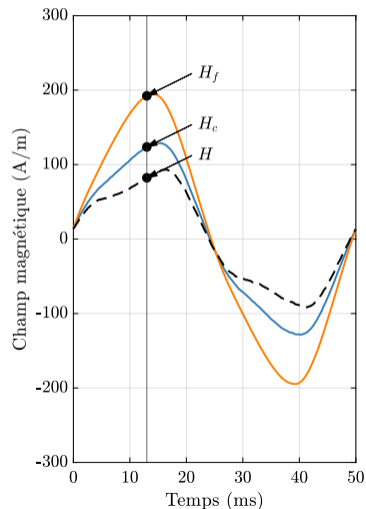


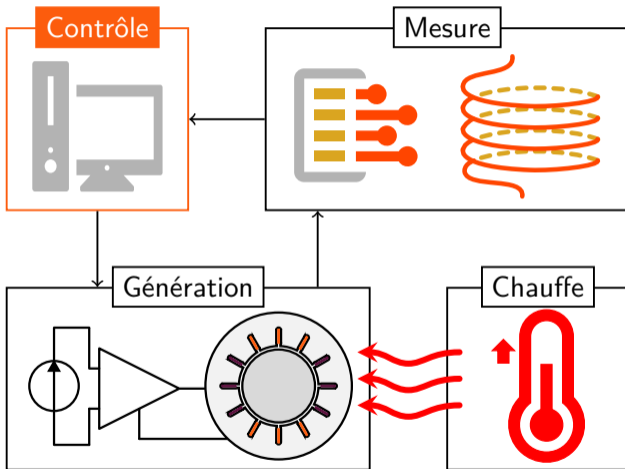
Extrapolation de H



- ◆ Écart h_0 :
 - protection
 - précision h
- ◆ 2 bobines/direction
 - H_c
 - H_f

$$H = H_c - \frac{H_c - H_f}{h_c - h_f} \times h_c$$



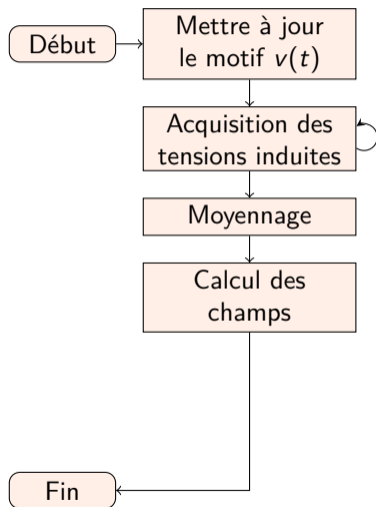


Objectif

- ◆ Entrée =
Tensions numérisées des capteurs et générateurs
- ◆ Sortie =
Motif périodique de tension

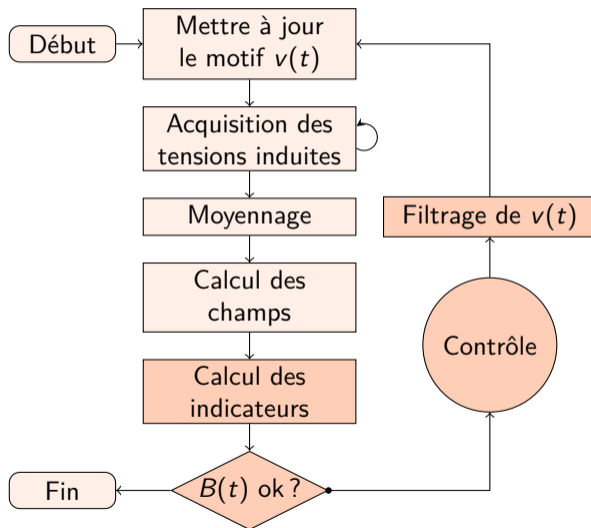
Asservissement de $B(t)$

- ◆ Fonctions de base :
 - Génération
 - Acquisition
 - Conversion
- ◆ Phénomènes magnétiques fonction des variations du champ
- ◆ Usage/norme :
 - ~ 1D $\rightarrow B(t)$ sinusoïdal
 - 2D $\rightarrow \vec{B}(t)$ circulaire



Asservissement de $B(t)$

- ◆ Fonctions de base :
 - Génération
 - Acquisition
 - Conversion
- ◆ Phénomènes magnétiques fonction des variations du champ
- ◆ Usage/norme :
 - ~ 1D $\rightarrow B(t)$ sinusoïdal
 - 2D $\rightarrow \vec{B}(t)$ circulaire
- ◆ Asservissement de la forme de $\vec{B}(t)$ via la tension $v(t)$



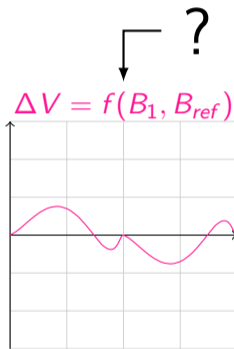
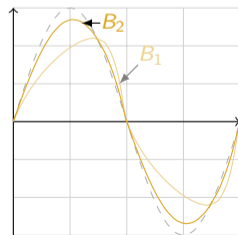
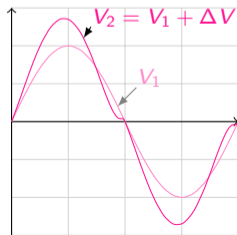
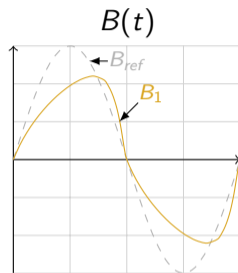
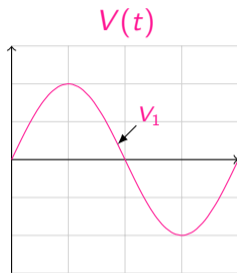
Asservissement de B

Problématique

- ◆ Comment calculer ΔV ?
- ☰ PI itératif
- ✏ Méthodes originales inspirées d'algorithmes d'optimisation

↓
Annulation

{ d'une fonction objectif
de l'erreur $\langle B, B_{ref} \rangle$ }



Bilan des méthodes développées (1D)

2 Méthodes

- Newton-Rhaphson (NR)
- Bad-Broyden (BB)



✂ Peu de paramètres à régler :

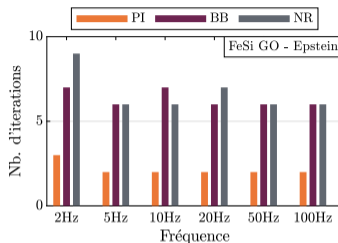
PI

- ◆ Tension initiale
- ◆ 2 gains

NR, BB

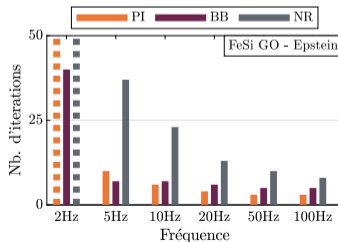
- ◆ Tension initiale

- ◆ Test : caractérisations 1D sur un système standard (Epstein). 
- ✓ BB satisfaisant sur un vaste domaine
- ✗ NR peu stable 



$B = 1.7\text{ T}$
« facile »

$PI > BB \approx NR$

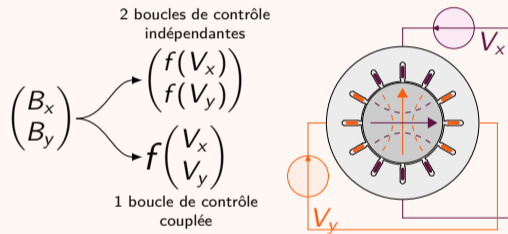


$B = 2.1\text{ T}$
« difficile »

$PI \approx BB < NR$

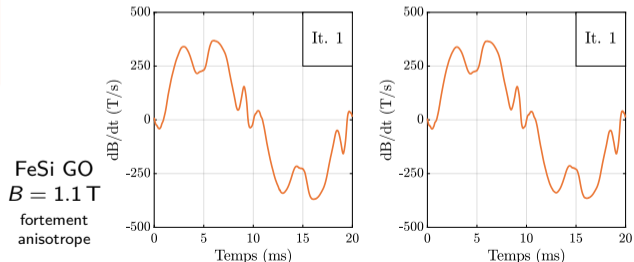
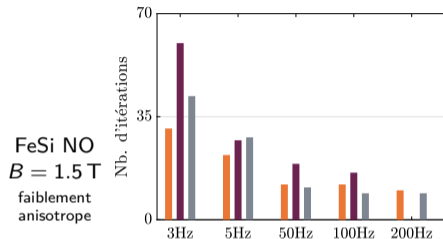
Bilan des méthodes développées (2D)

Couplages X/Y



- ◆ Prise en compte des couplages = adaptation de la fonction objectif
- ✓ Faible anisotropie : amélioration

PI BB BBC

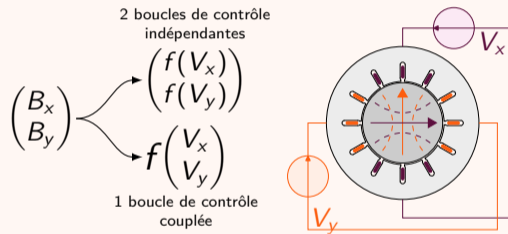


BB (sans couplages)

BBC (avec couplages)

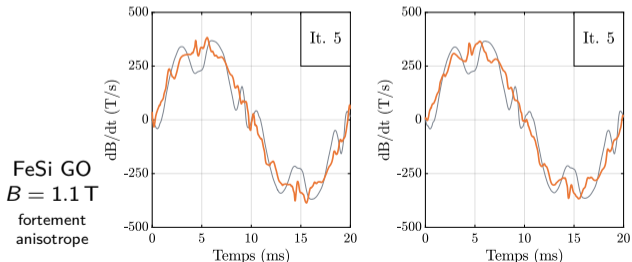
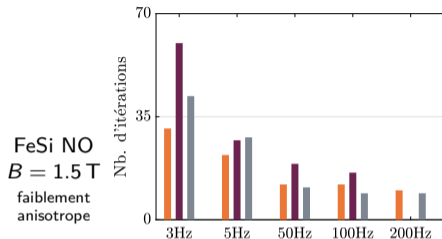
Bilan des méthodes développées (2D)

Couplages X/Y



- ◆ Prise en compte des couplages = adaptation de la fonction objectif
- ✓ Faible anisotropie : amélioration

PI BB BBC

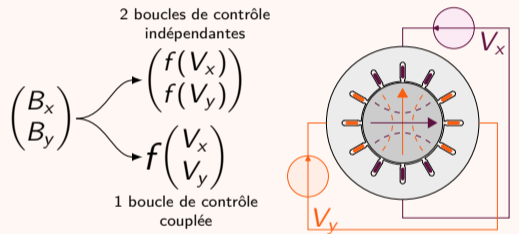


BB (sans couplages)

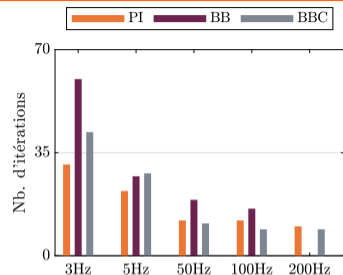
BBC (avec couplages)

Bilan des méthodes développées (2D)

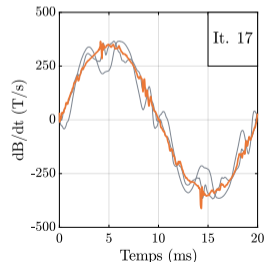
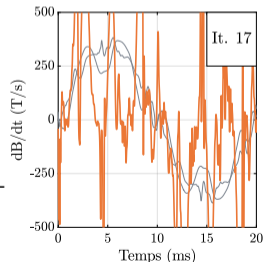
Couplages X/Y



- ◆ Prise en compte des couplages = adaptation de la fonction objectif
- ✓ Faible anisotropie : amélioration



FeSi NO
B = 1.5 T
faiblement anisotrope

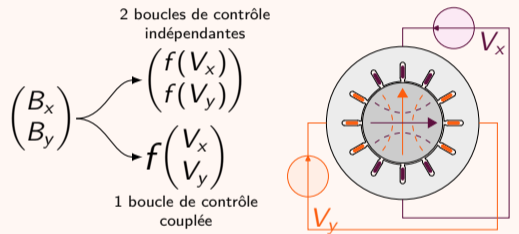


BB (sans couplages) = instable

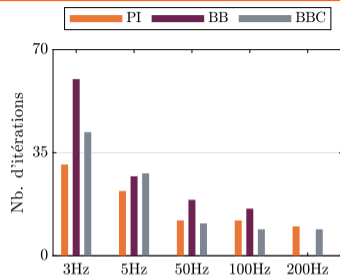
BBC (avec couplages) = stable

Bilan des méthodes développées (2D)

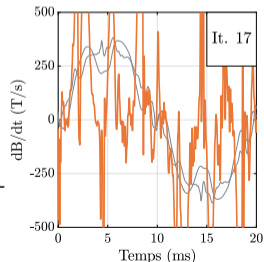
Couplages X/Y



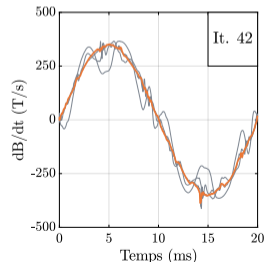
- ◆ Prise en compte des couplages = adaptation de la fonction objectif
- ✓ Faible anisotropie : amélioration
- ✚ Forte anisotropie : nécessaire



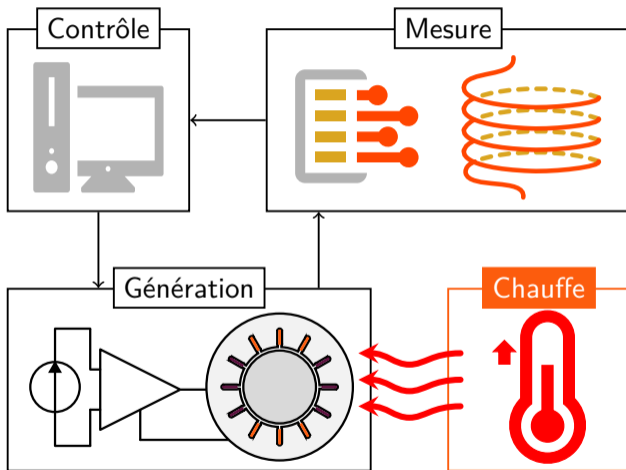
FeSi NO
 $B = 1.5 \text{ T}$
faiblement anisotrope



BB (sans couplages) = instable







BBC (avec couplages) = stable







Objectif

- ◆ $T_{sample} \in [25; 200] \text{ } ^\circ\text{C}$
- ◆ T maintenue durant les expérimentations
- 🕒 Plusieurs heures
- ⚠ Interférences avec la mesure
- ➡ Chauffe localisée

Méthodes de chauffe localisée

Méthode	Localisée	Interférences	Matériel	Analyse
Résistance 	+	-	●	+
Air chaud 	-	+	+	-
Infrarouge 	-	+	- -	-
Induction 	+ +	- -	-	+

Méthodes de chauffe localisée

Méthode	Localisée	Interférences	Matériel	Analyse
Résistance 	+	-	●	+
Air chaud 	-	+	+	-
Infrarouge 	-	+	- -	-
Induction 	+ +	- -	-	+



<4>

Chauffe par air chaud soufflé



Pompe à air chaud

Chauffe par air chaud soufflé



- ◆ Deux géométries étudiées

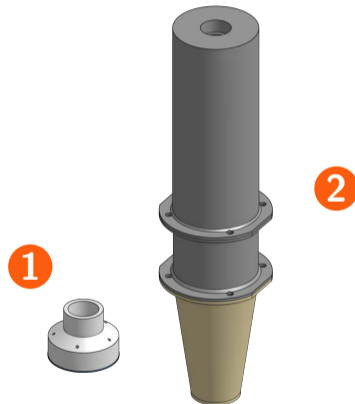
Pompe à air chaud

Chauffe par air chaud soufflé



Pompe à air chaud

- ◆ Deux géométries étudiées
 - Chambre avec évacuation par le haut ①
 - Buse divergente-convergente ②

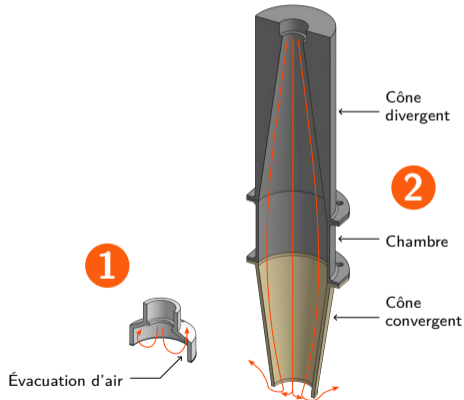


Chauffe par air chaud soufflé

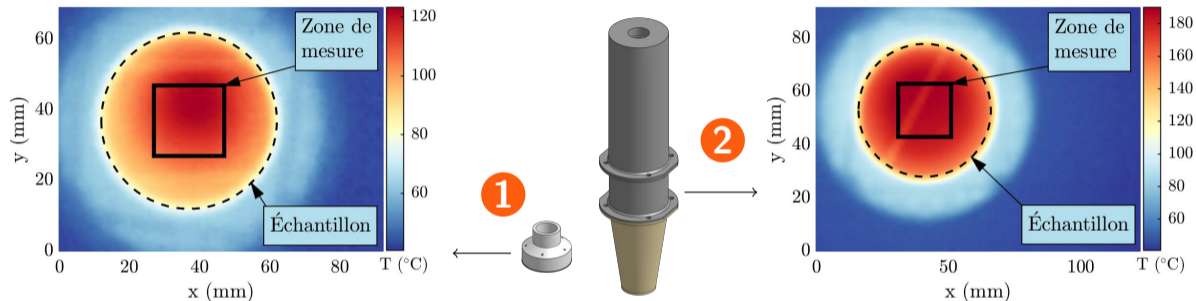


Pompe à air chaud

- ◆ Deux géométries étudiées
 - Chambre avec évacuation par le haut ①
 - Buse divergente-convergente ②



Homogénéité de température



Conditions expérimentales

- 📷 Clichés thermiques
- ♦ Échantillon 0.5 mm

Homogénéité

95 % de la zone de mesure inclus dans :

① $T_{moy} \pm 8\%$

3 $T_{moy} \in [60, 120] \text{ } ^\circ\text{C}$

② $T_{moy} \pm 5\%$

5 $T_{moy} \in [90, 185] \text{ } ^\circ\text{C}$



Bilan

- Mise en place d'un banc de caractérisations 2D
- Adaptation du RSST pour la mise en température
- Réalisation et analyse de caractérisations 2D en température



Bilan

- Mise en place d'un banc de caractérisations 2D
 - RSST complet fonctionnel
 - Méthodes de contrôle originales

- Adaptation du RSST pour la mise en température
 - Chauffe par air chaud soufflé
 - Buse d'apport d'air sélectionnée
 - Homogénéité en température satisfaisante

- Réalisation et analyse de caractérisations 2D en température



Partie III

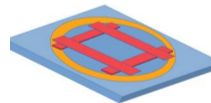
Comparaison du banc à ceux d'autres laboratoires

Contexte de l'étude



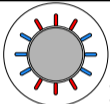
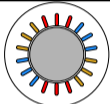
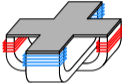
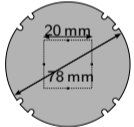
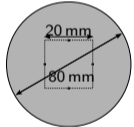
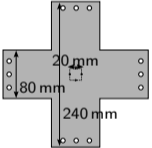
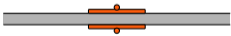
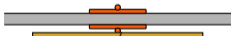
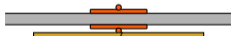
Plusieurs décennies
d'expériences sur les
caractérisations 2D

Projet HEFMAG :
point sur les caract.
2D dans le cadre des
pbliq. énergétiques

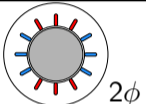
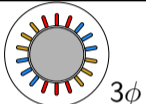
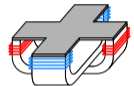
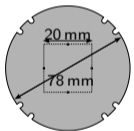
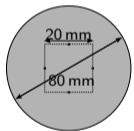
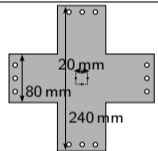
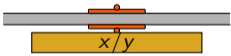
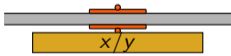
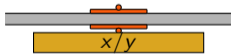


Projet inclus dans
*European Metrology
Programme for
Innovation and Research*

RSST impliqués

Labo	Ampère	INRIM	PoliTO
Inducteurs	 2ϕ	 3ϕ	 2ϕ
Échantillons			
Mesures	 <div style="background-color: #4b7c3c; color: white; padding: 5px; margin-top: 5px;"> x proche y proche x loin y loin </div>	 <div style="background-color: #f0e68c; padding: 5px; margin-top: 5px;"> x/y </div>	 <div style="background-color: #f0e68c; padding: 5px; margin-top: 5px;"> x/y </div>

RSST impliqués

Labo	Ampère	INRIM	PoliTO
Inducteurs	 2φ	 3φ	 2φ
Échantillons	 20 mm 78 mm	 20 mm 80 mm	 20 mm 80 mm 240 mm
Mesures	 x/y ▶ Adaptation ◀	 x/y	 x/y



Conditions expérimentales

◆ Objectif :

- Comparaison des pertes
- Échantillon FeSi NO
- $T = T_{amb}$
- $B \in \{1; 1.5\}$ T

Comparaison 1D

- ◆ 3 RSST
- ◆ Standards 1D (Epstein, SST)

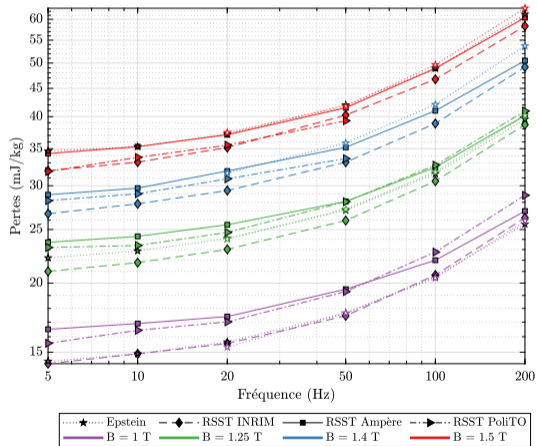
Comparaison 2D

- ◆ 3 RSST

Extrapolation (Amp.)

- ◆ Bobines PCB (×4) éloignées + extrapolation
- ◆ Bobines PCB (×2) collées
- ◆ Bobine enroulée (×1) collée

Mesures 1D



Comparaison au standard

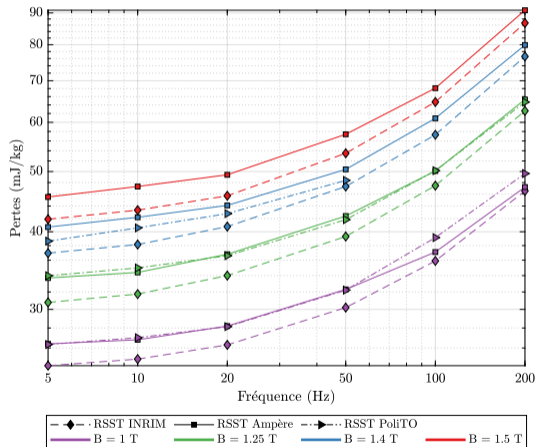
- ☺ Moyenne des RSST : écart de 2 à 7 %
- Écart individuel jusqu'à 15 %
- ☺ Pas d'historique + quelques % attendus

Comparaison entre RSST

- ☺ Dispersion p.r.à la moyenne des RSST :
 - Maximale : $\pm 7\%$
 - Moyenne : 2.5 %
- ☺ Historiquement, de 2 à 40 %

Mesures 2D

—◆— RSST INRIM —■— RSST Ampère - -> RSST PoliTO



Pas de standard

◆ Pas de valeur globalement acceptée

Comparaison entre RSST

☺ Dispersion p.r.à la moyenne des RSST :

■ Maximale : $\pm 5\%$ (1D : $\pm 7\%$)

■ Moyenne : 2.4% (1D : $\pm 2.5\%$)

☺ Historiquement, de 2 à 40 %

Bilan - Intercomparaison

◆ Ont été testés :

1 matériau

méthode de mesure de H

2 formes d'inducteurs

3 inducteurs

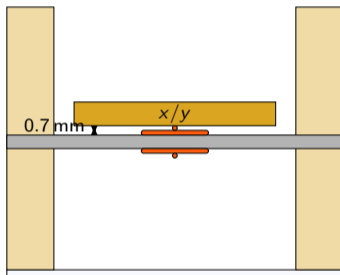
systèmes d'acquisition

◆ Cohérence encore modérée...

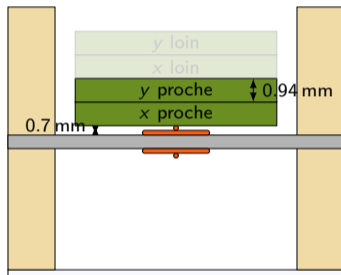
◆ ...mais encourageante!

- C. Appino *et al.* *Interlaboratory Comparison of Two-Dimensional Magnetic Measurements* 26th SMM Sept. 2023
- Article de revue en cours d'écriture.

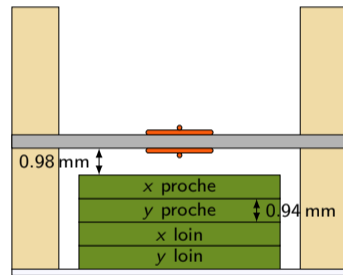
Configurations de bobines utilisées



Bobine « INRIM » collée contre la surface



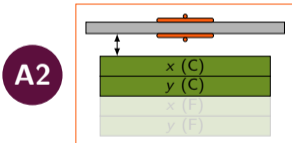
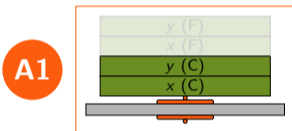
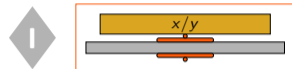
Bobines PCB collées contre la surface



Bobines PCB fixées à courte distance de la surface

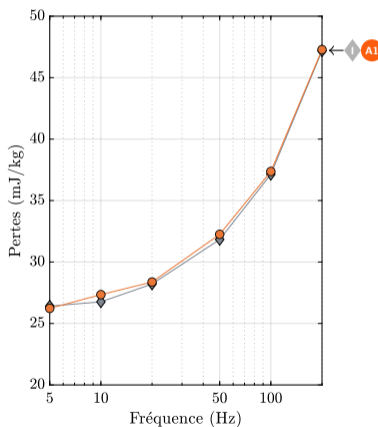
$$H = H_c - \frac{H_c - H_f}{h_c - h_f} \times h_c$$

Comparaison des mesures de H



AE

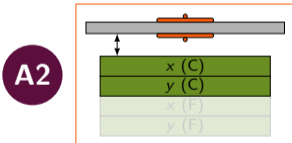
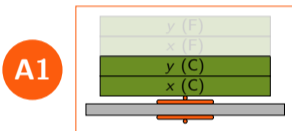
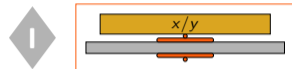
$$H = H_c - \frac{H_c - H_f}{h_c - h_f} \times h_c$$



Observations

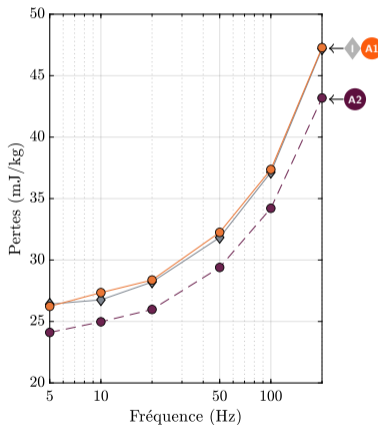
◆ « INRIM » \approx « Collées »

Comparaison des mesures de H



AE

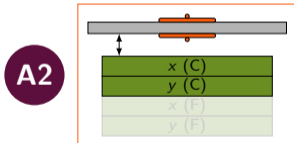
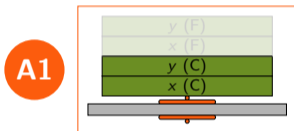
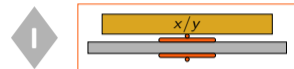
$$H = H_c - \frac{H_c - H_f}{h_c - h_f} \times h_c$$



Observations

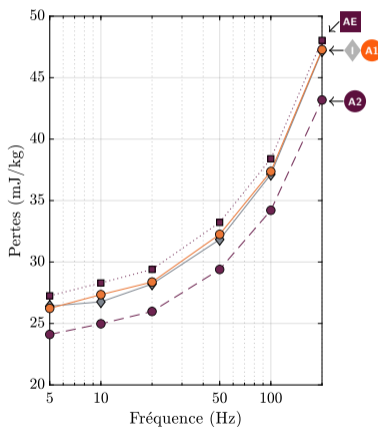
- ◆ « INRIM » \approx « Collées »
- ◆ $h \nearrow \Rightarrow H \nearrow, P \searrow$

Comparaison des mesures de H



AE

$$H = H_c - \frac{H_c - H_f}{h_c - h_f} \times h_c$$



Observations

- ◆ « INRIM » \approx « Collées »
- ◆ $h \nearrow \Rightarrow H \nearrow, P \searrow$
- ◆ Extrapolation = amélioration
- ⚠ du cas « fixées »

1 T	1.25 T	1.4 T	1.5 T
Écart A2 vs. A1			
-17 %	-14 %	-9.1 %	-8.1 %

Bilan

- Mise en place d'un banc de caractérisations 2D
 - ➔ RSST complet fonctionnel
 - ➔ Méthodes de contrôle originales
 - ➔ Mesures 1D comparables avec d'autres laboratoires et des méthodes standards
 - ➔ Mesures 2D comparables avec d'autres laboratoires

- Adaptation du RSST pour la mise en température
 - ➔ Chauffage par air chaud soufflé
 - ➔ Buse d'apport d'air sélectionnée
 - ➔ Homogénéité en température satisfaisante

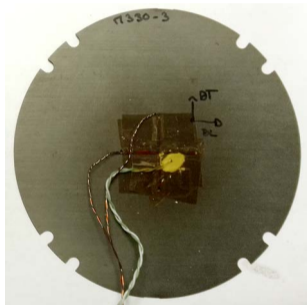
- Réalisation et analyse de caractérisations 2D en température



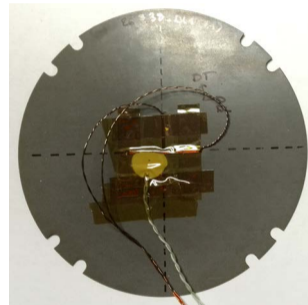
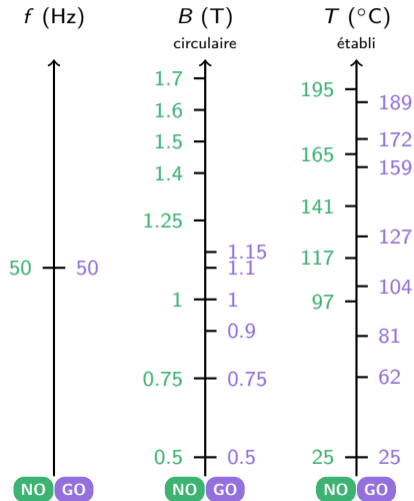
Partie IV

Caractérisations 2D en température

Conditions de test



Échantillon **NO**



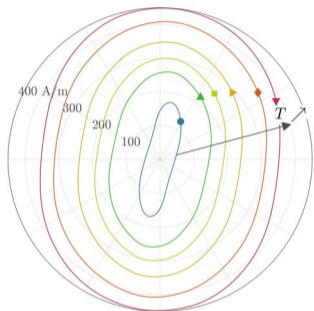
Échantillon **GO**



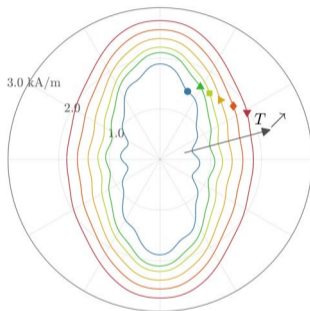
Échantillon **NO**

NO : Lieux de H

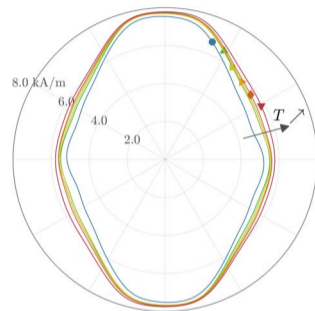
● $T = 25\text{ °C}$
 ▲ $T = 97\text{ °C}$
 ■ $T = 117\text{ °C}$
 ▶ $T = 141\text{ °C}$
 ◆ $T = 165\text{ °C}$
 ▼ $T = 195\text{ °C}$



1.0 T



1.5 T



1.7 T

 B (T)
circulaire

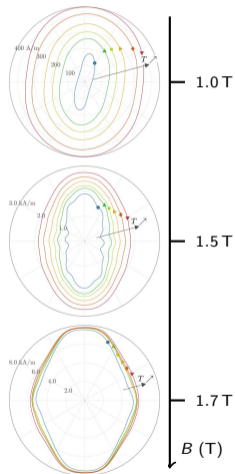
Observations

◆ $T \nearrow \Rightarrow$ cycle s'élargit

◆ Surtout pour $\|\vec{B}\|$ faible

◆ $T \nearrow \Rightarrow$ cycle s'arrondit

NO : Lieux de H (2)



Lorsque $T \nearrow$

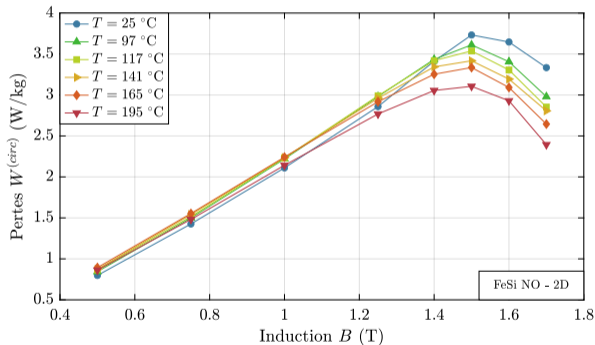
- ◆ Cycles s'élargissent
- ◆ Surtout à faible $\|\vec{B}\|$
- ◆ Cycles s'arrondissent

◆ Variation de H_{DL} et H_{DT} entre T_{amb} et 195°C :

B	H_{DL}	H_{DT}
1.25 T Var. max.	+500 %	+300 %
1.5 T Typique	+130 %	+70 %

- φ Agitation thermique à compenser
- φ Constantes d'anisotropie \searrow

NO : Pertes



Observations

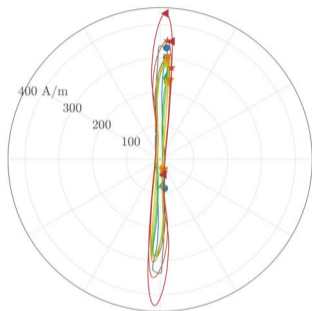
- ∅ Pertes ↘ avec T (sauf T_{amb})
- ? Tendence pour $T = T_{amb}$?
- ♦ Variation entre T_{amb} et 195 °C :

B	Var.
1.0 T	+1.5 %
1.5 T	-17 %
1.7 T	-28 %

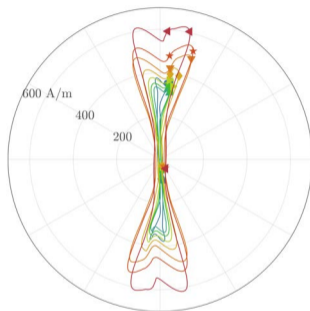


Échantillon **GO**

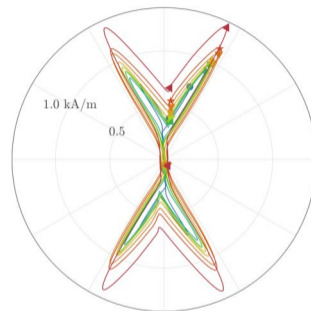
GO : Lieux de H



0.75 T



1.0 T



1.1 T

 B (T)
circulaire

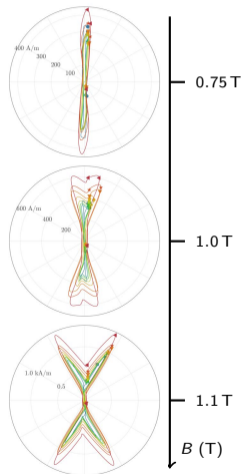
Observations

◆ Difficile à lire

◆ Agrandissement conservé

◆ Tendances à T_{amb} ?

GO : Lieux de H (2)



Observations

- ◆ Difficile à lire
- ◆ Agrandissement conservé
- ◆ Tendances à T_{amb} ?

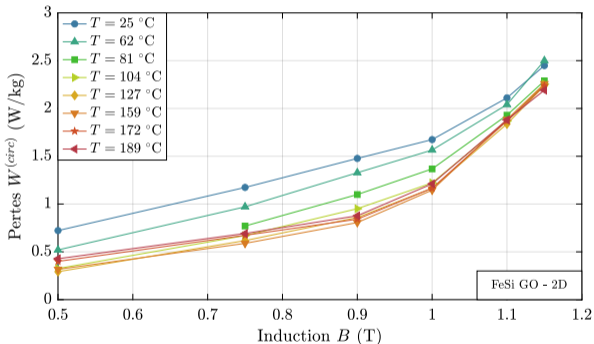
- ◆ Variation de H_{DL} , H_{DT} et H_{DD} entre T_{amb} et 189°C :

	B	DL	DT	DD
	1 T	+140 %	+59 %	+64 %
	1.15 T	+325 %	+95 %	+40 %

- ◆ Comparaison NO :

- ✔ Champs croissants
- ✔ Surtout selon DL
- ✘ Marqué à « fort » B

GO : Pertes



Observations

∅ Pertes ↘ avec T ... HT?

♦ Variation entre T_{amb} et 189 °C :

B	Var.
0.75 T	-41 %
1.0 T	-28 %
1.15 T	-11 %

♦ Variation moindres à « fort » B

Bilan

- Mise en place d'un banc de caractérisations 2D
 - ➔ RSST complet fonctionnel
 - ➔ Méthodes de contrôle originales
 - ➔ Mesures 1D comparables avec d'autres laboratoires et des méthodes standards
 - ➔ Mesures 2D comparables avec d'autres laboratoires
- Adaptation du RSST pour la mise en température
 - ➔ Chauffe par air chaud soufflé
 - ➔ Buse d'apport d'air sélectionnée
 - ➔ Homogénéité en température satisfaisante
- Réalisation et analyse de caractérisations 2D en température
 - ➔ Caractérisation de 2 échantillons de FeSi à différents T , B
 - ➔ Observation sur les pertes
 - ➔ Observation sur la forme des lieux



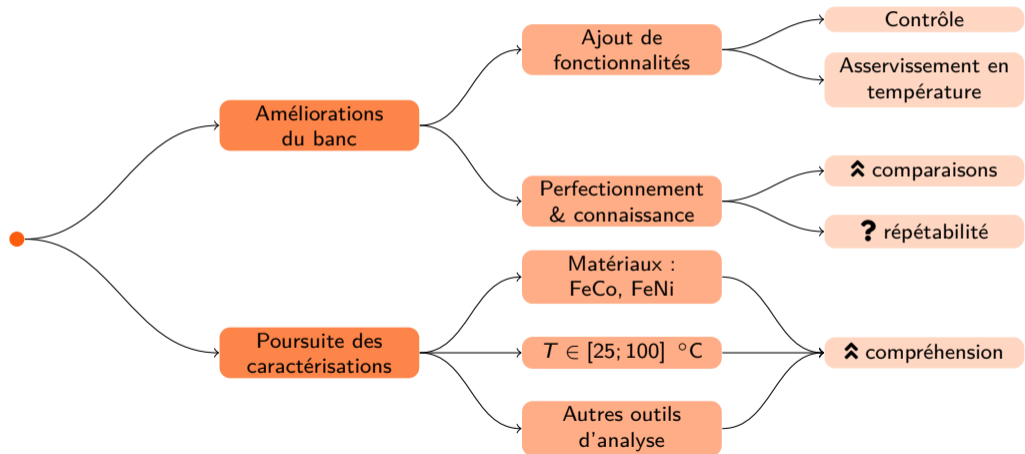
Partie V

Conclusions et perspectives

Bilan

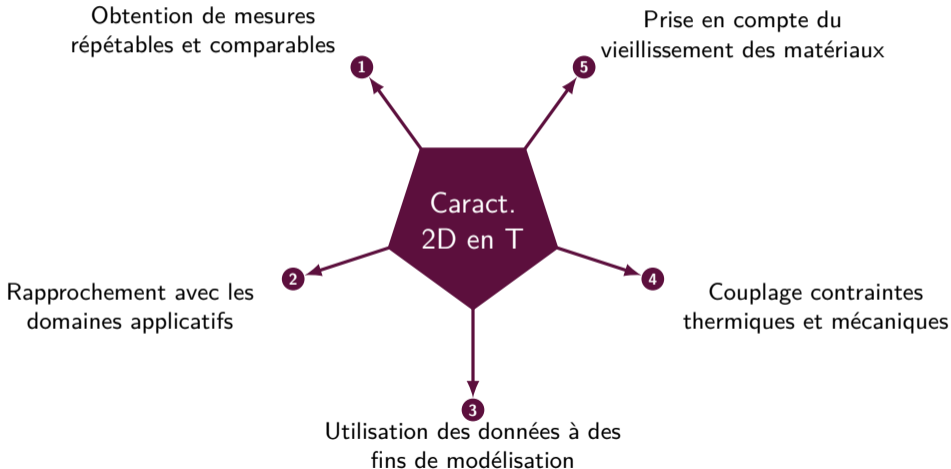
- Mise en place d'un banc de caractérisations 2D
 - ➔ RSST complet fonctionnel
 - ➔ Méthodes de contrôle originales
 - ➔ Mesures 1D comparables avec d'autres laboratoires et des méthodes standards
 - ➔ Mesures 2D comparables avec d'autres laboratoires
- Adaptation du RSST pour la mise en température
 - ➔ Chauffe par air chaud soufflé
 - ➔ Buse d'apport d'air sélectionnée
 - ➔ Homogénéité en température satisfaisante
- Réalisation et analyse de caractérisations 2D en température
 - ➔ Caractérisation de 2 échantillons de FeSi à différents T , B
 - ➔ Observation sur les pertes
 - ➔ Observation sur la forme des lieux

Perspectives : banc





Perspectives : sujet



Merci pour votre attention !