



Université de Lorraine - UR 4366

Pôle Scientifique « Energie Mécanique Procédés Produits »

Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy

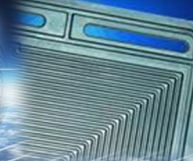
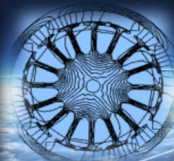
Séminaire Scientifique du GREEN

Caractérisation de défauts structuraux dans les rubans supraconducteurs multicouches par thermographie inductive

Doctorant : Walid DIRAHOUI

Encadrants : Melika HINAJE et Hocine MENANA

12 septembre 2022



- Introduction
- Dispositif expérimental
- Modélisation magnétothermique 3D
- Résultats et validation
- Conclusions et perspectives

➤ Introduction

Contexte

- Dégradation des performances des rubans SHT-2G en présence de défauts structurels.

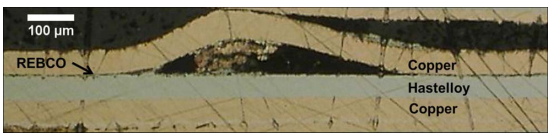


Image microscopique d'un délaminage dans un ruban SHT-2G

Objectif

- Contrôle non destructif en utilisant la thermographie infrarouge par induction à **température ambiante.**

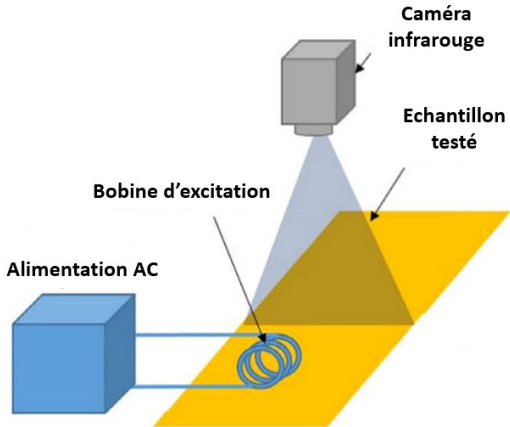
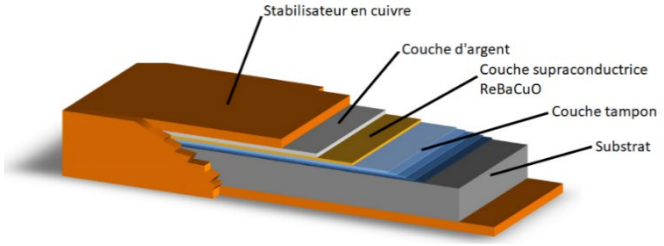


Schéma de principe du contrôle par thermographie infrarouge par induction

Verrous scientifiques et techniques

- Structure multicouche fine.
- Dimensions multi-échelles.
- Matériaux avec des propriétés physiques différentes.

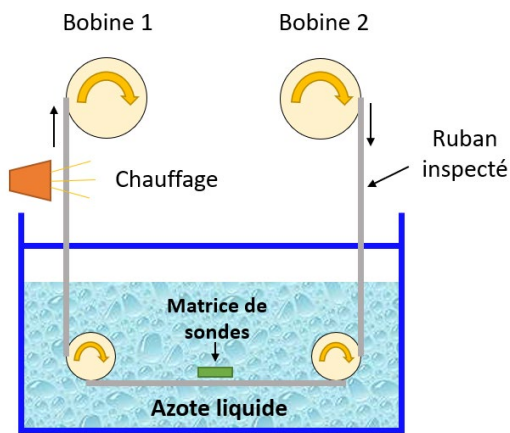


Structure type d'un ruban SHT-2G à base de REBCO

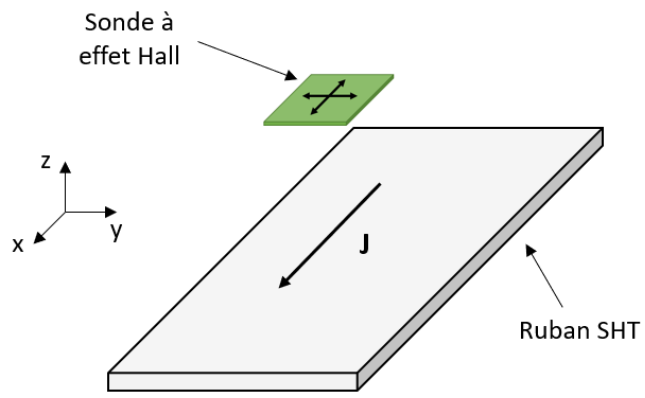
➤ Introduction

➤ Etat de l'art sur les techniques de contrôle

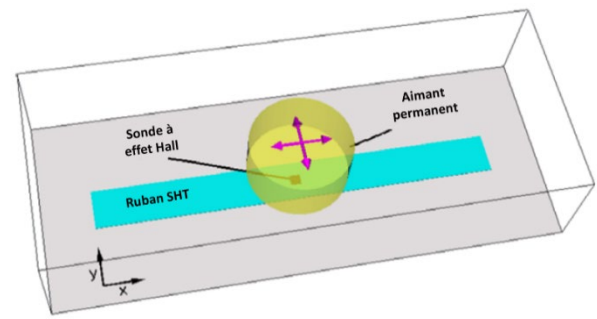
- Cartographie de la carte de champ « field mapping »:



Système de mesure avec une matrice de sondes à effet Hall développé par THEVA



Balayage par sonde à effet Hall

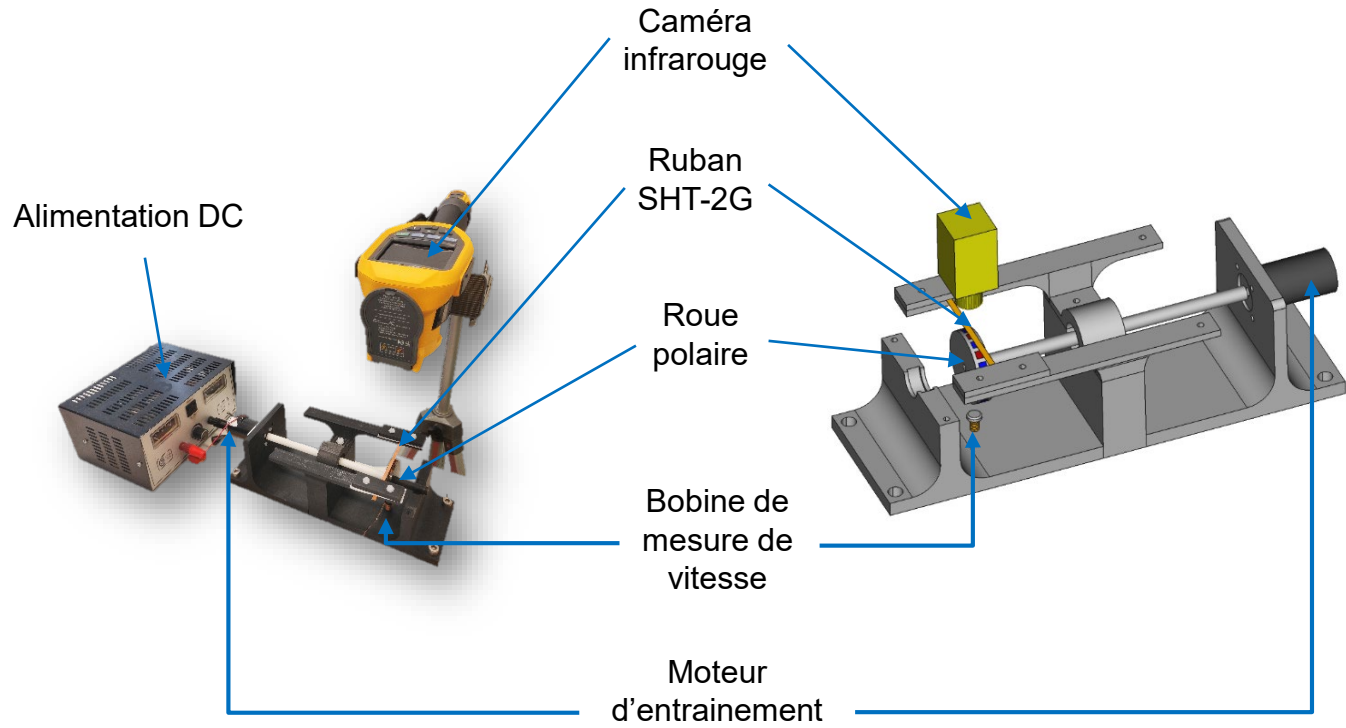


MagnetoScan

➤ Dispositif expérimental

➤ Description du dispositif expérimental

- Inducteur tournant.
- Permet d'éviter les perturbations thermiques générées par les inducteurs électromagnétiques.



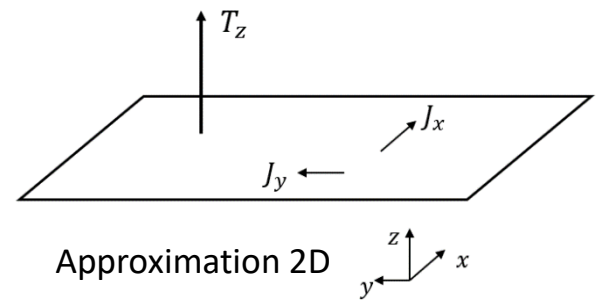
Structures réelle et conceptuelle du dispositif expérimental pour le contrôle des rubans SHT-2G par thermographie infrarouge

➤ Modélisation magnétothermique en 3D

➤ Modèle électromagnétique

- Courants induits

$$\vec{\nabla} \times \bar{\sigma}^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{T}_z = -\partial_t \left(\vec{B}_z^s + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\vec{\nabla} \times \vec{T}_z \times \vec{r}}{r^3} dv \right) \longrightarrow \begin{cases} J_x = \frac{\partial T_z}{\partial y} \\ J_y = -\frac{\partial T_z}{\partial x} \end{cases}$$

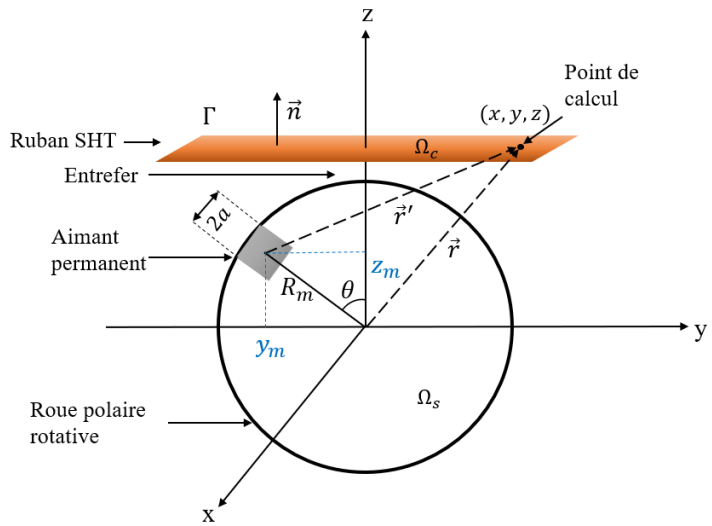


- Champ magnétique source

$$\vec{B}_z^s = \frac{B^r}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \text{atan2}(SK, RU) \vec{e}_z$$

$$\begin{cases} S = x - (-1)^i a \\ K = (y + R_m \sin\theta) - (-1)^j a \\ U = (z - R_m \cos\theta) - (-1)^k a \\ R = \sqrt{S^2 + K^2 + U^2} \end{cases}$$

$\theta = \Omega t$



Le système modélisé

Paramètre	Valeur	Description
L	50 mm	Longueur du ruban SHT
W	4 mm	Largeur du ruban SHT
D	0,1 mm	Epaisseur du ruban SHT
a	2,5 mm	Demi-longueur du coté des aimants permanents
R_m	22.5 mm	Distance entre le centre de la roue polaire et ceux des aimants permanents
B^r	1.4 T	Champ magnétique rémanent des aimants permanents
Ω	826,73 rad/s	Vitesse angulaire de la roue polaire

➤ Modélisation magnétothermique en 3D

➤ Modèle thermique

- Equation de diffusion thermique

$$\begin{cases} \gamma C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \mathcal{P} \\ -\lambda \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T - T_e), \quad \text{on } \Gamma \end{cases}$$

- Conditions aux limites

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_W \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_W = h_x (T_p - T_e) \\ -\lambda_E \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_E = h_x (T_p - T_e) \\ \lambda_F \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_F = h_y (T_p - T_e) \\ -\lambda_B \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_B = h_y (T_p - T_e) \\ \lambda_S \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_S = h_z^S (T_p - T_e) \\ -\lambda_N \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_N = h_z^N (T_p - T_e) \end{array} \right.$$

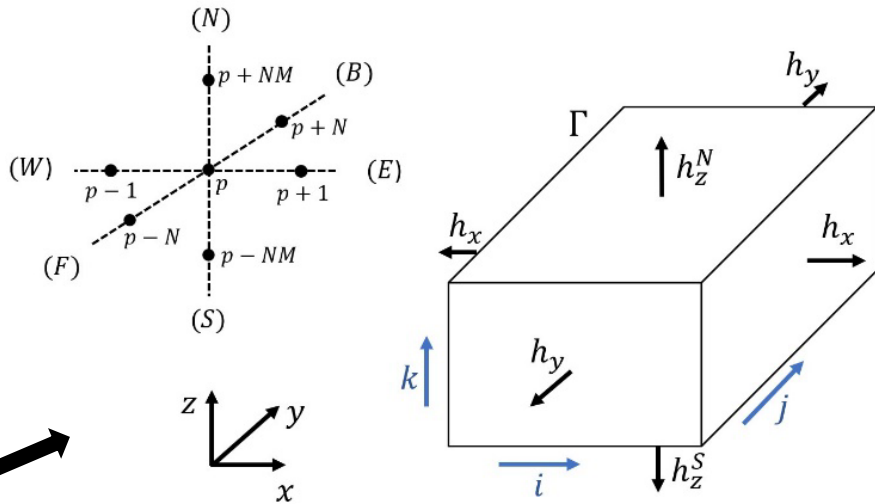


Schéma de discrétisation basé sur la MDF

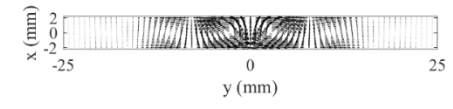
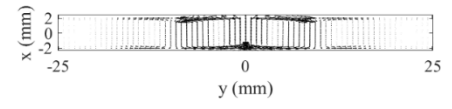
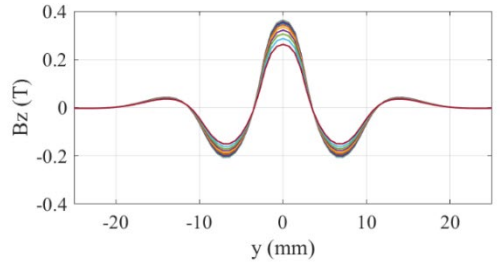
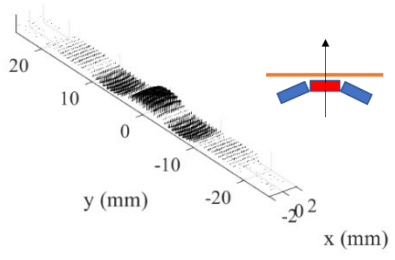
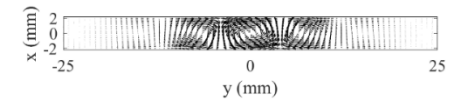
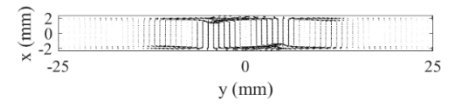
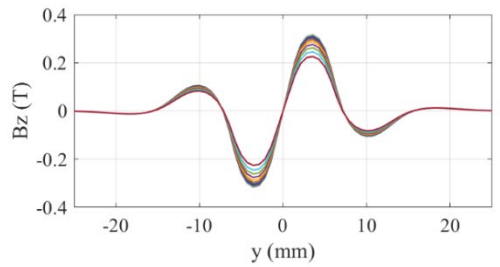
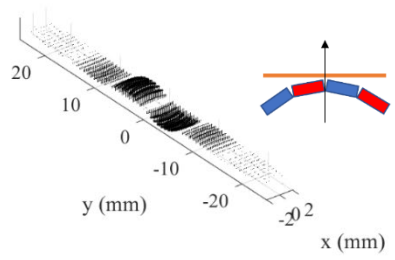
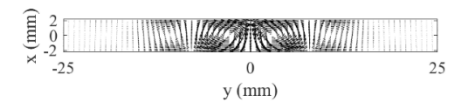
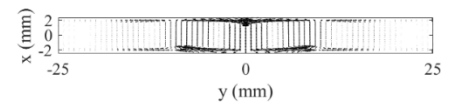
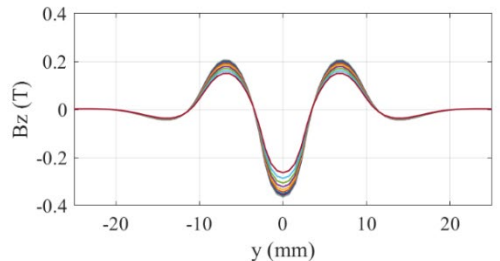
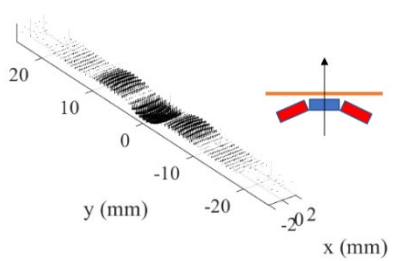
Indice global :

$$p = i + (j - 1)N + (k - 1)NM$$

avec $(1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M, 1 \leq k \leq L)$

Résultats et validation

Résultats de simulation électromagnétique



Evolution spatiale du champ magnétique B_z dans la couche Hast-YBCO

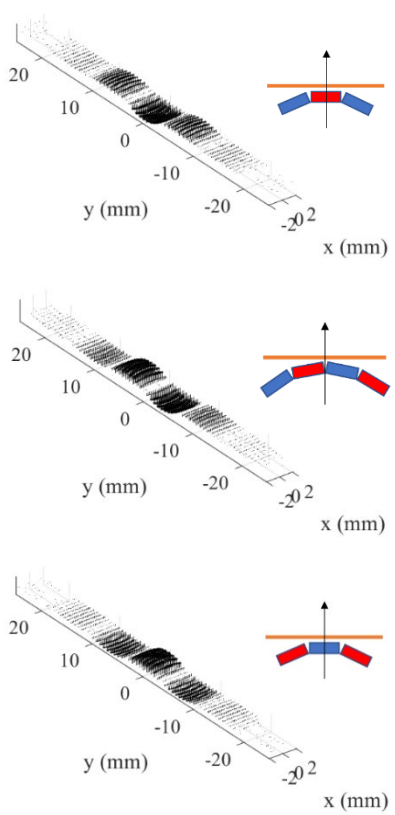
Profils du champ magnétique B_z suivant la longueur du ruban dans la couche Hast-YBCO

Evolution spatiale des courants dans la couche Hast-YBCO

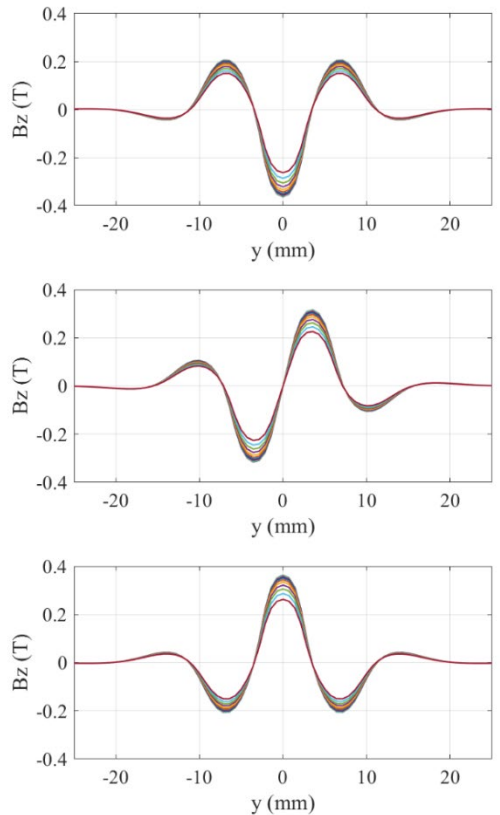
Evolution spatiale des courants dans la couche Cu-Ag

➤ Résultats et validation

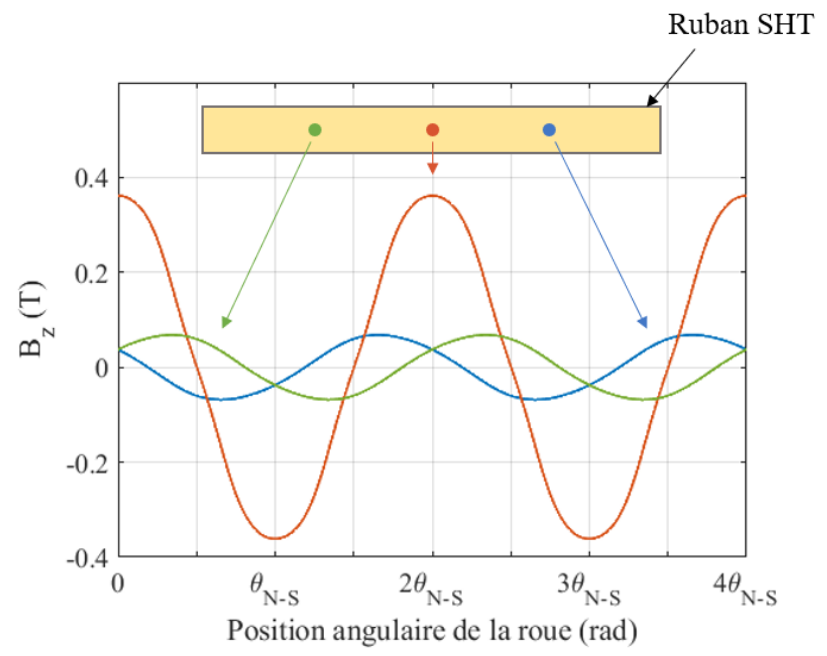
➤ Résultats de simulation électromagnétique



Evolution spatiale du champ magnétique B_z dans la couche Hast-YBCO



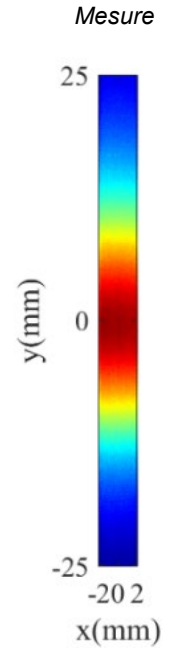
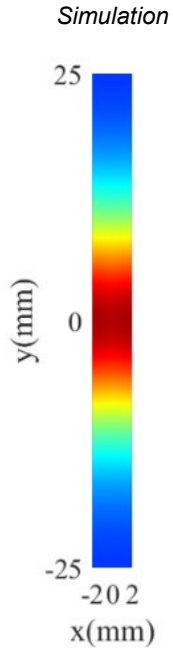
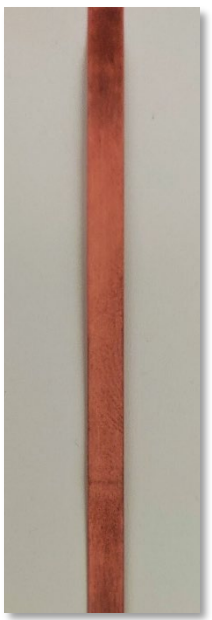
Profils du champ magnétique B_z suivant la longueur du ruban dans la couche Hast-YBCO



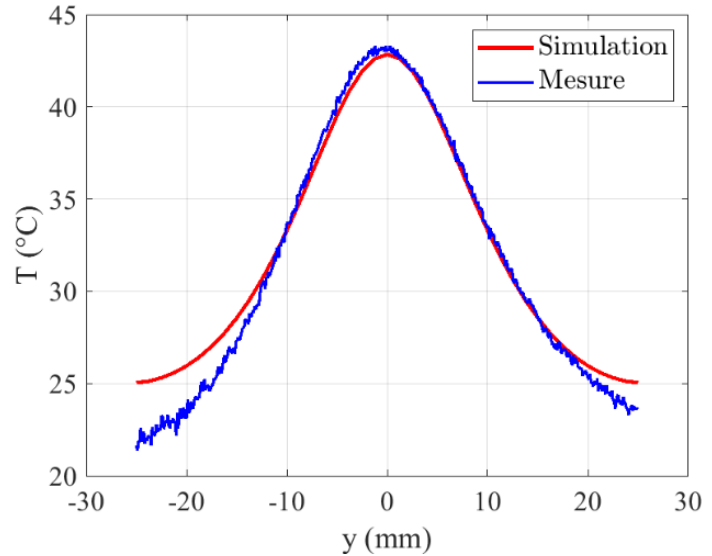
Evolution du champ magnétique B_z en trois points de la surface du ruban SHT

➤ Résultats et validation

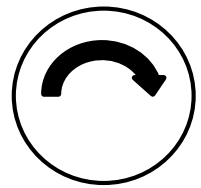
➤ Résultats de mesure et de simulation thermiques



Profils de température suivant la longueur du ruban SHT



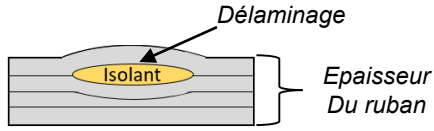
*Photographie du ruban SHT-2G
fourni par Shanghai
Superconductor*



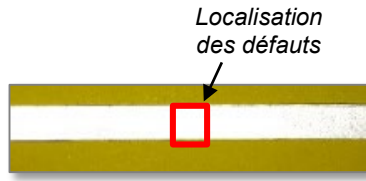
*Sens de rotation
de la roue polaire*

Résultats et validation

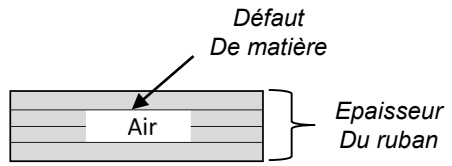
Caractérisation de défauts structuraux



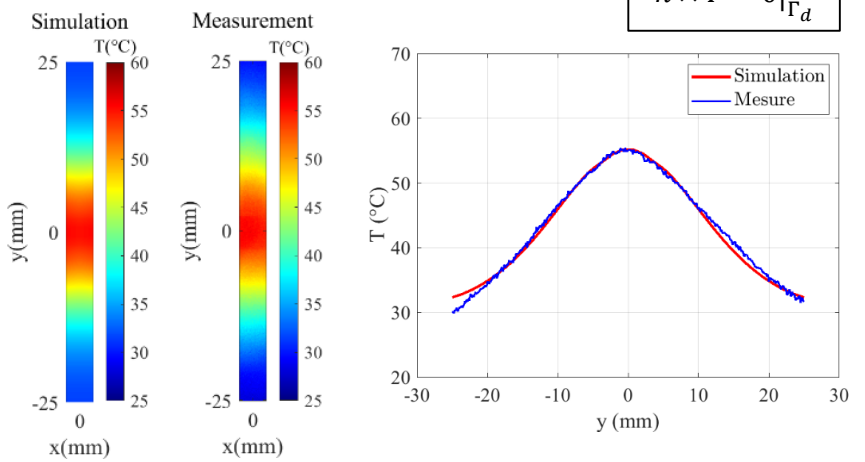
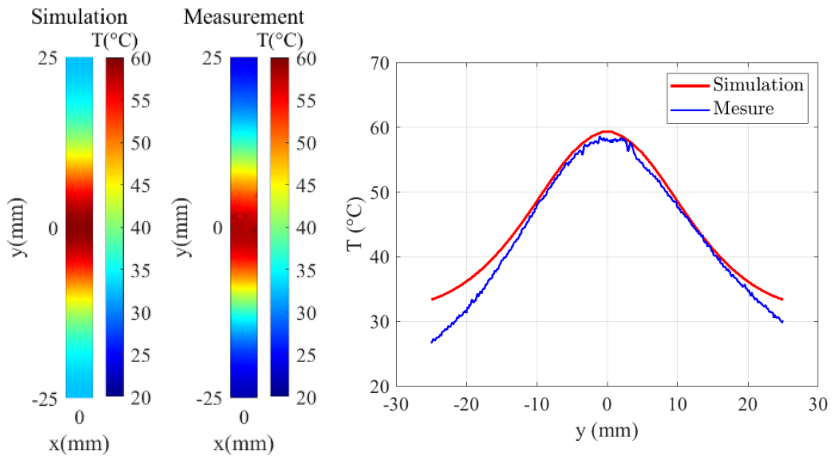
Défaut de délaminage : 5 mm × 5 mm × 20 μm



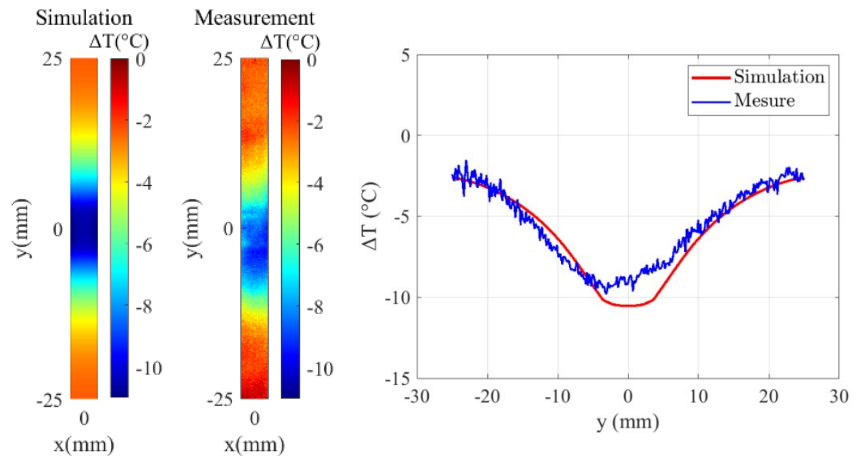
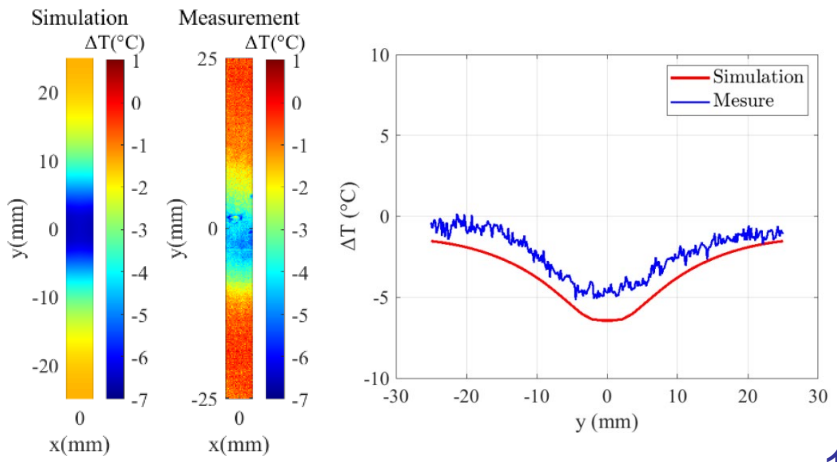
Photographie du ruban multicouche en aluminium



Défaut de matière : 5 mm × 5 mm × 30 μm

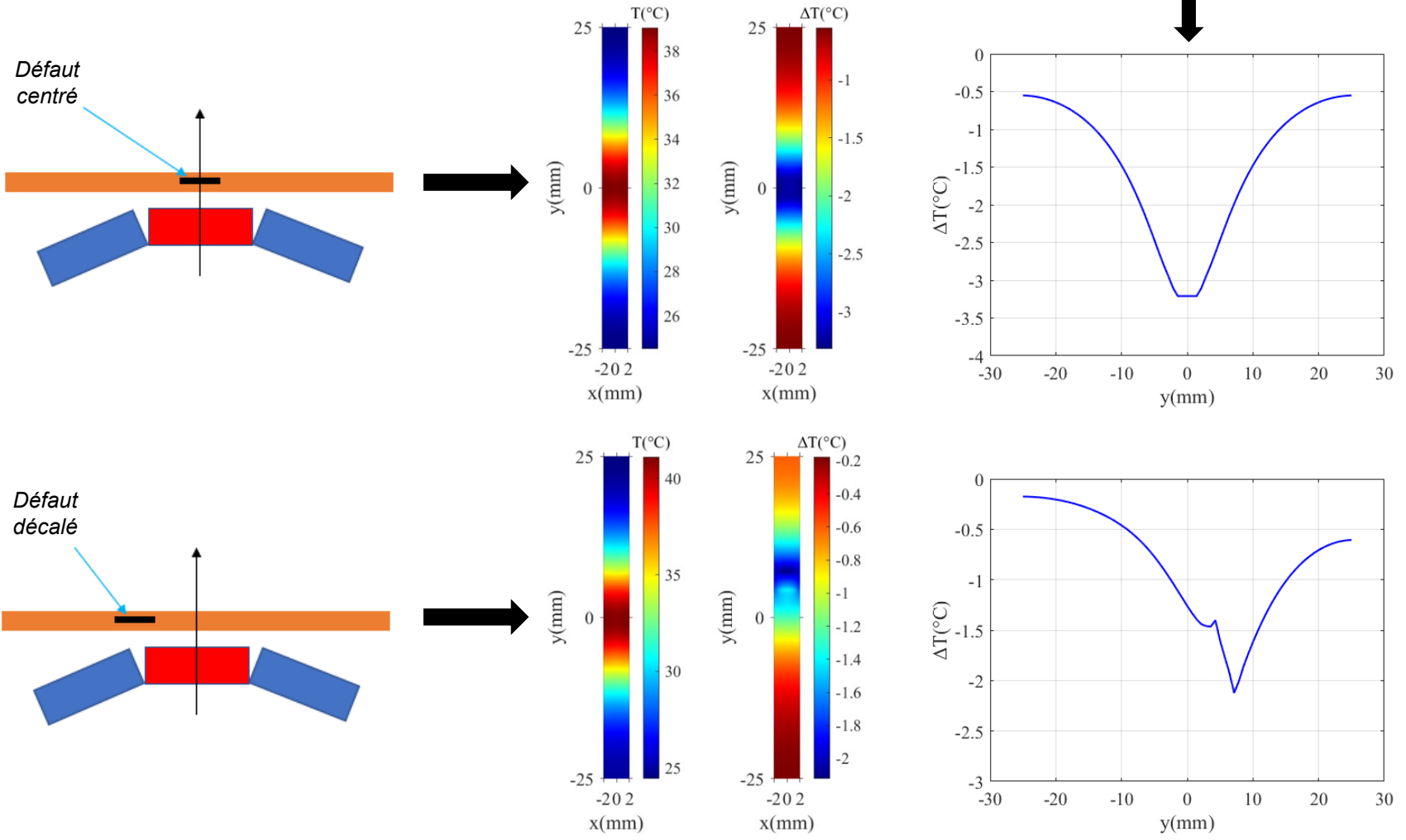


$$\vec{n} \times \vec{T} = \vec{0} |_{\Gamma_d}$$



Résultats et validation

Influence de la position du défaut par rapport à la roue polaire

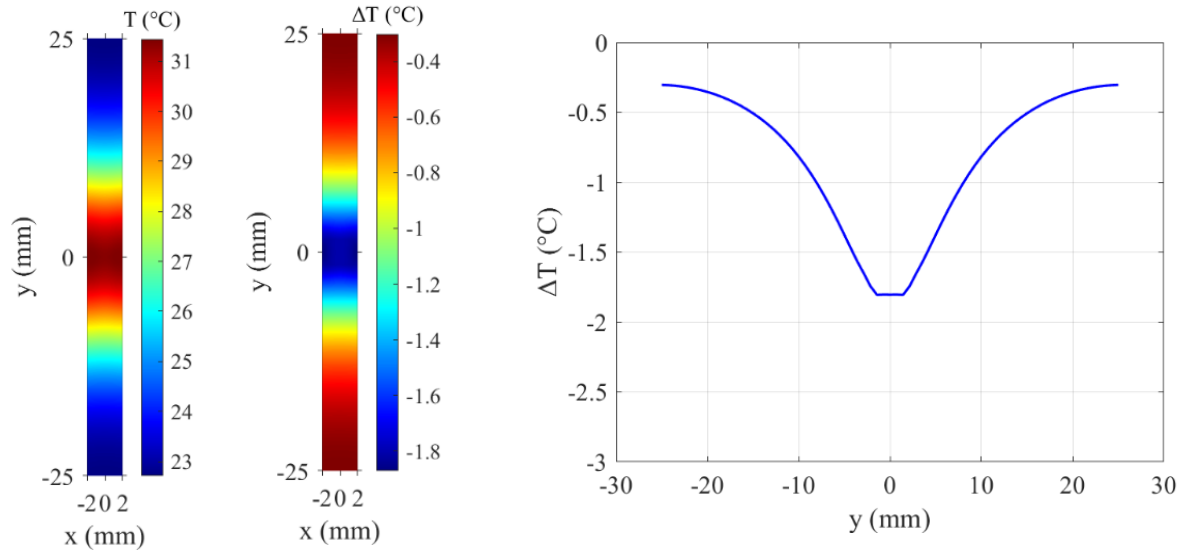


➤ Résultats et validation

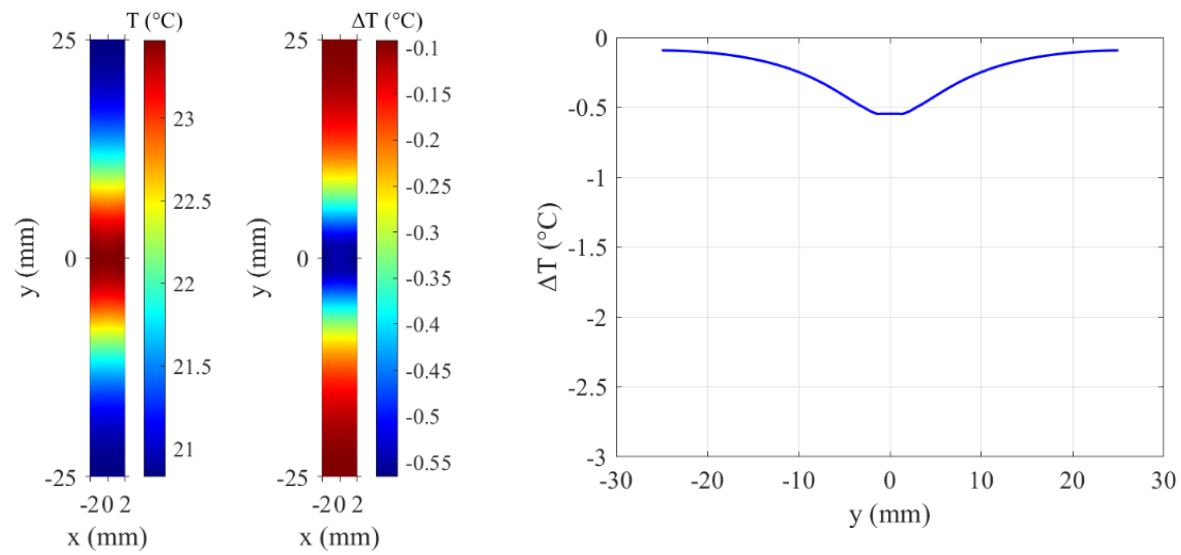
➤ Influence de la variation de la fréquence du champ magnétique sur la détection des défauts

Défaut de délaminage : 4 mm × 5 mm × 30 μm

• $\Omega = 698,13 \text{ rad/s}$



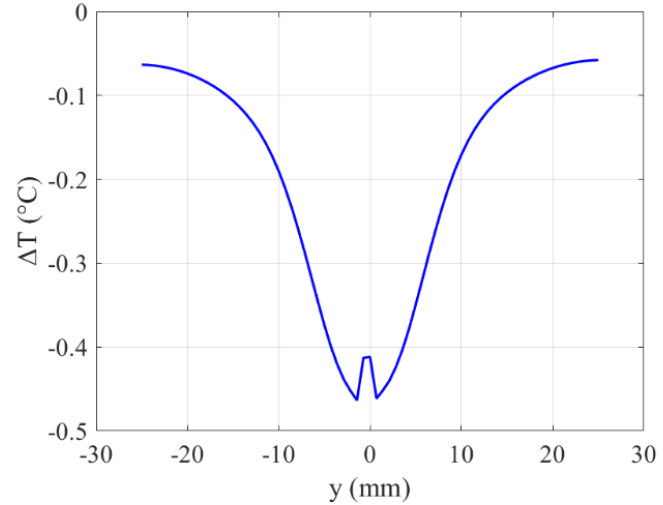
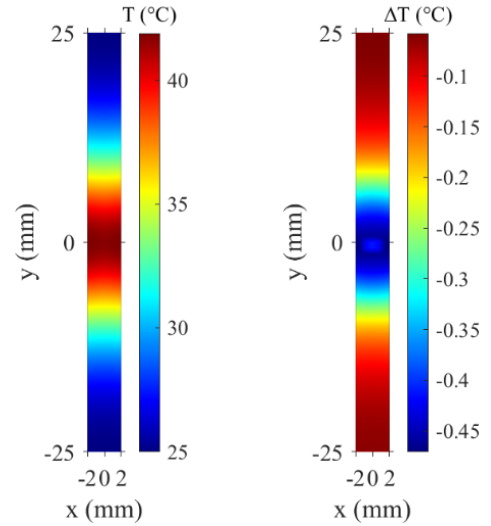
• $\Omega = 455,3 \text{ rad/s}$



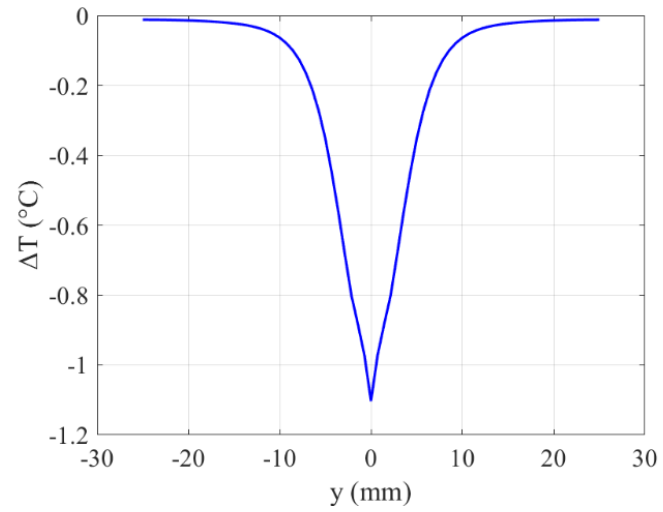
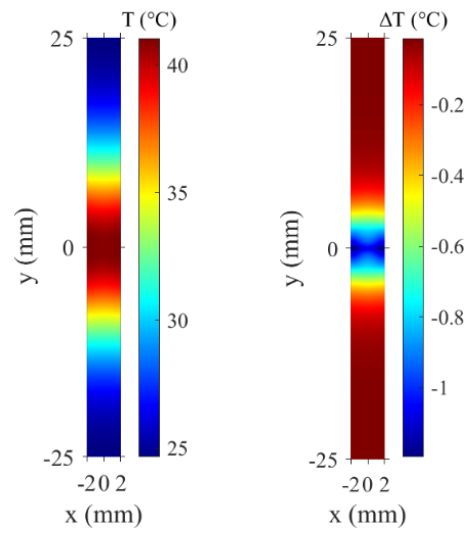
➤ Résultats et validation

- Influence de la taille des défauts par rapport à la taille des aimants

Défaut de matière :
3 mm × 2 mm × 40 μm

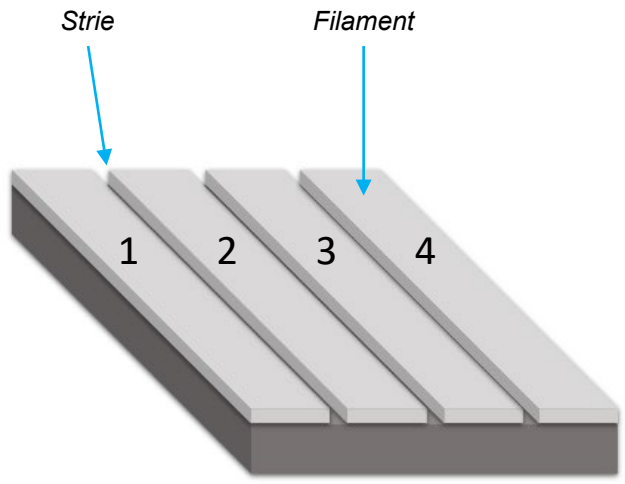


Fissure :
4 mm × 2 mm × 20 μm

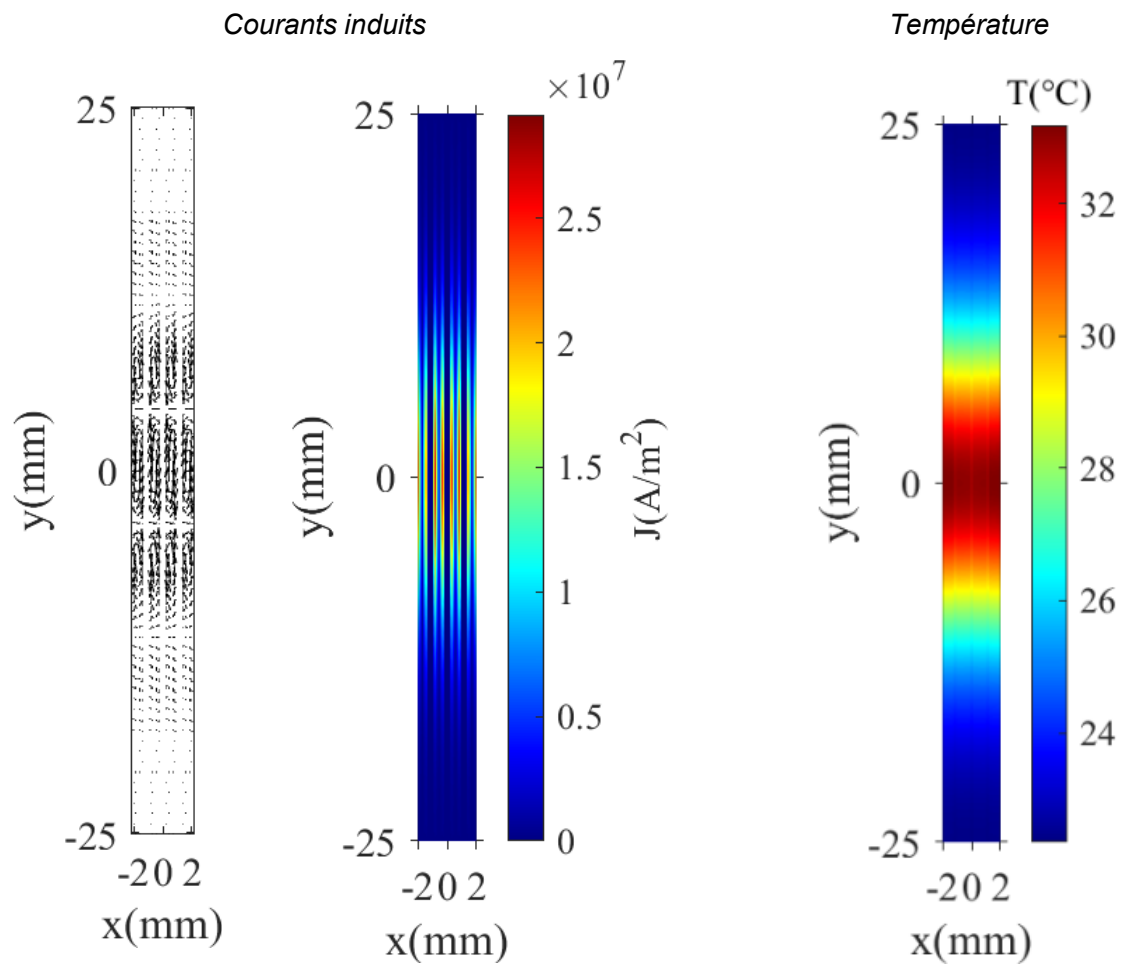


➤ Résultats et validation

➤ Contrôle de l'intégrité des filaments dans les rubans striés

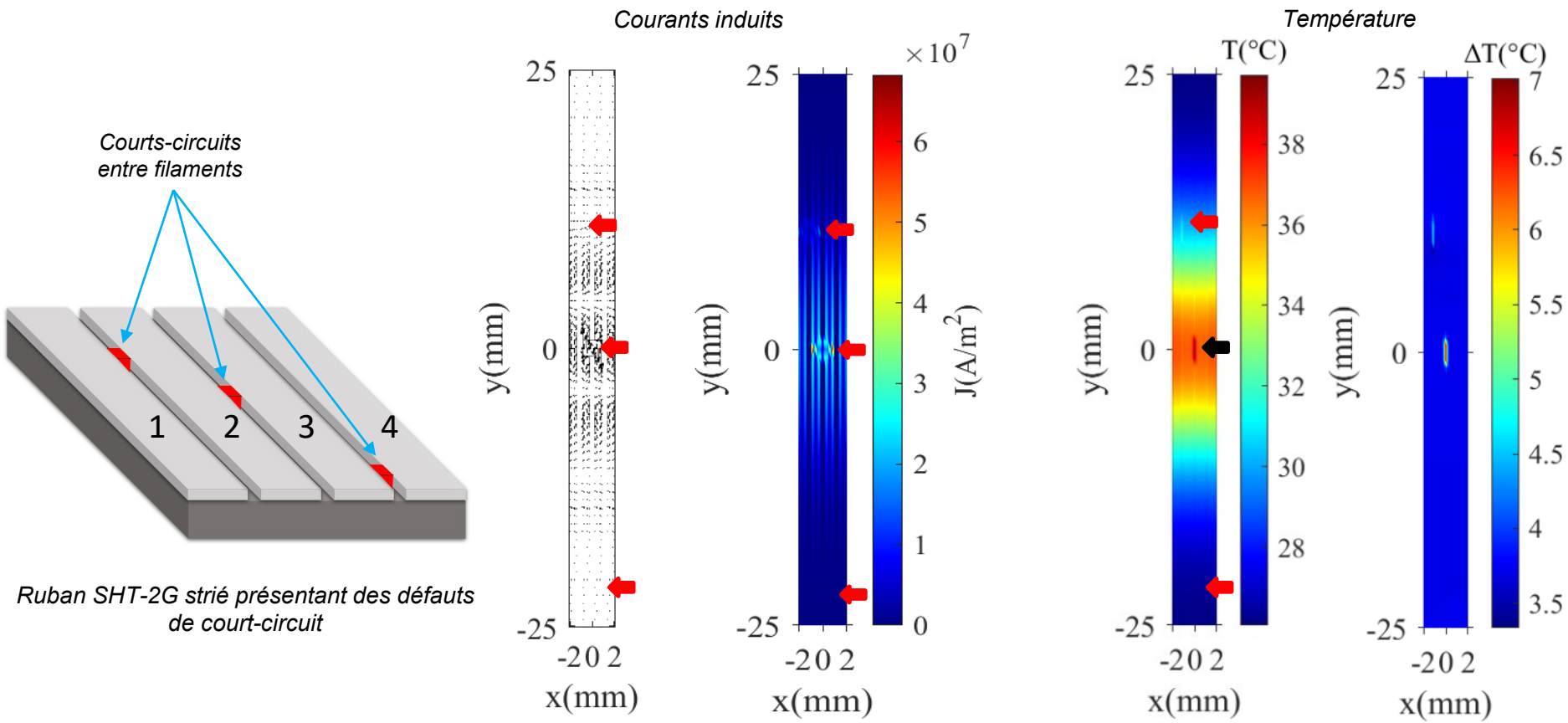


Ruban SHT-2G strié sans défaut



➤ Résultats et validation

➤ Contrôle de l'intégrité des filaments dans les rubans striés



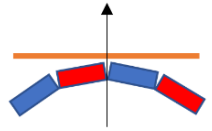
➤ Résultats et validation

➤ Evaluation des effets mécaniques

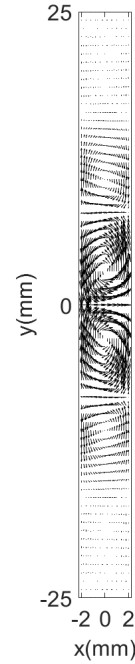
$$d\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} = (j_y B_z) \vec{e}_x - (j_x B_z) \vec{e}_y + (j_x B_y - j_y B_x) \vec{e}_z$$

$$\begin{cases} d\vec{F}_x = (j_y B_z) \vec{e}_x \\ d\vec{F}_y = -(j_x B_z) \vec{e}_y \\ d\vec{F}_z = (j_x B_y - j_y B_x) \vec{e}_z \end{cases}$$

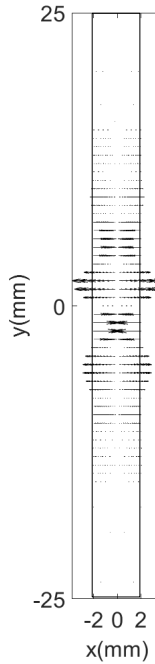
$$\vec{F}_u = \sum_{i=0}^{Ne} d\vec{F}_u^{(i)} v c_i \quad (u \equiv x, y, z)$$



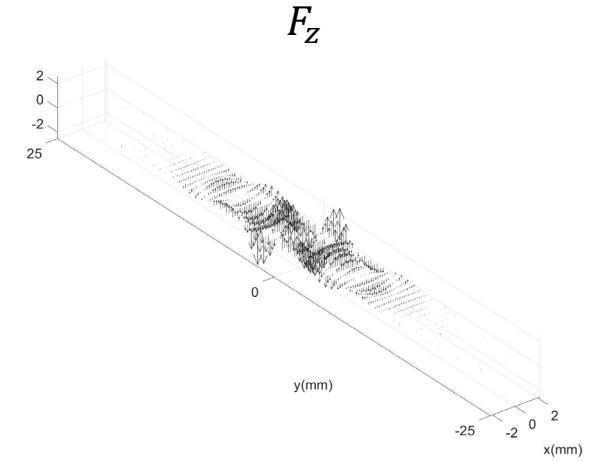
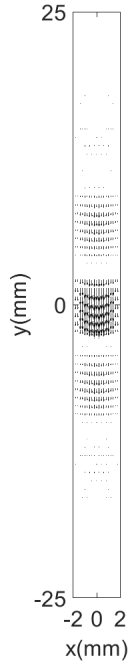
Courants induits



F_x



F_y



Evolution des forces suivant les trois axes x,y et z dans la couche Hast-YBCO

➤ Conclusions et perspectives

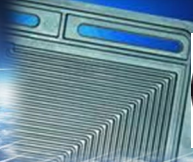
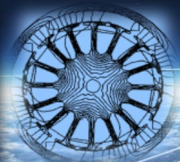
- Investigations numériques et expérimentales pour le contrôle des rubans SHT-2G par thermographie infrarouge inductive à température ambiante.
- Possibilité de détection de plusieurs type de défauts.
- Modélisation numérique efficace et qui permet de simuler des défauts sans les reproduire expérimentalement.
- Evaluation des effets mécaniques.
- Perspectives : amélioration de la structure de l'inducteur et réalisation de défauts structurels de formes maîtrisées dans les rubans SHT-2G et les caractériser par thermographie infrarouge.

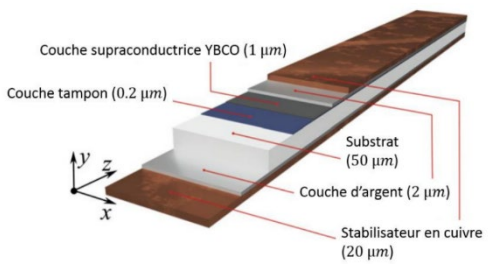


Université de Lorraine - UR 4366
Pôle Scientifique « Energie Mécanique Procédés Produits »
Groupe de Recherche en Energie et Electrique de Nancy

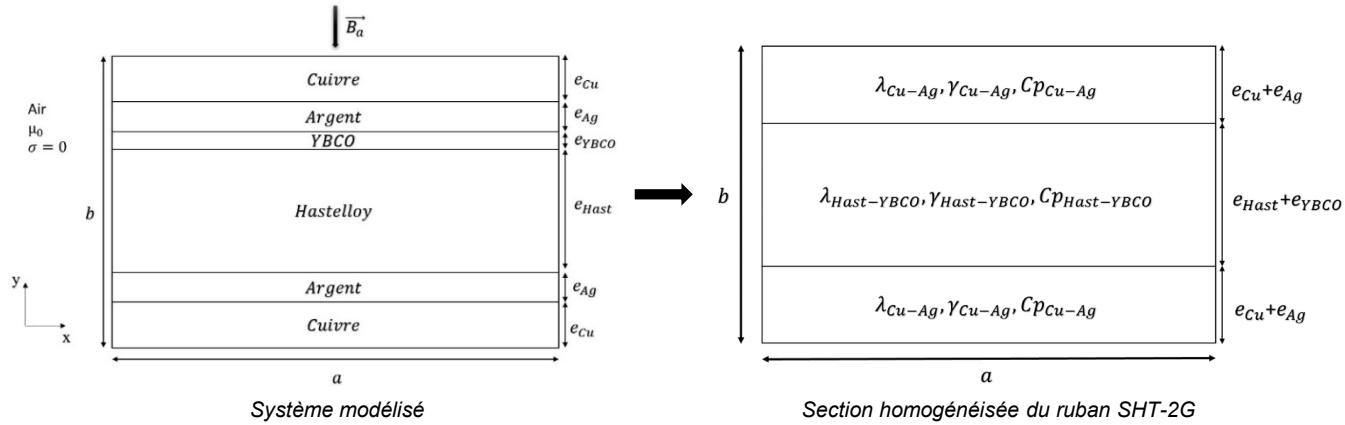
Merci pour votre attention

QUESTIONS





Structure type d'un ruban SHT-2G



• Formulation du modèle électromagnétique :

$$\nabla^2(A - xB_a) = -\mu_0 J \quad (1)$$

$$A(\vec{r}) - xB_a = -\mu_0 \iint_S G(\vec{r}, \vec{r}') J(\vec{r}') ds \quad (2)$$

$$\partial_t A = -\rho J \quad (3)$$

$$\rho J(\vec{r}) - j\omega\mu_0 \iint_S G(\vec{r}, \vec{r}') J(\vec{r}') dS = -j\omega x B_a \quad (4)$$

• Formulation du modèle thermique :

$$\begin{cases} \gamma C_p \partial_t T = \partial_x(\lambda \partial_x T) + \partial_y(\lambda \partial_y T) + P \\ -\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} = h(T - T_e) \end{cases} \quad (5)$$

Paramètre	a	b	B_a	f
Valeur	5 mm	0,1 mm	0,1 T	7 kHz

• Résultats de simulation thermiques :

