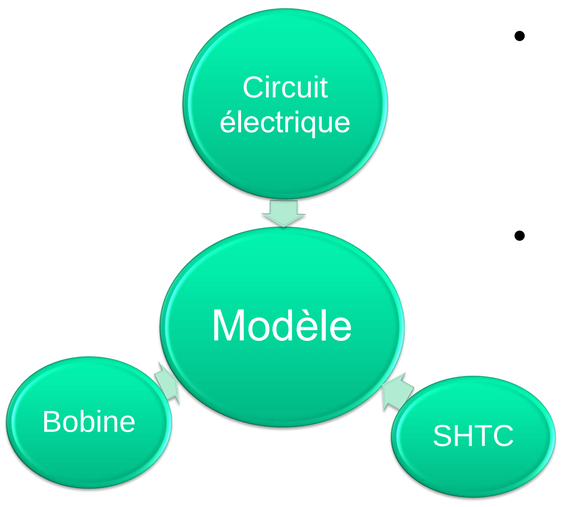
Modélisation 3D par la MEF et couplage circuit du procédé d'aimantation impulsionnel d'un ensemble de pastilles supraconductrices massives

Jakub Kapek, Kévin Berger, Jean Lévêque

Summary

Un supraconducteur peut induire des courants lorsqu'il est soumis à une variation de champ magnétique extérieur, créé par exemple par une impulsion courant circulant dans une bobine. Ces courants induits circulant indéfiniment, il en résulte un champ magnétique piégé, quand le champ magnétique appliqué a disparu. Ce procédé est appelé aimantation par un Champ Magnétique Pulsé (CMP). Dans cet article, nous nous sommes intéressés à la modélisation de l'aimantation par CMP d'un arrangement de plusieurs pastilles Supraconductrices à Haute Température Critique (SHTC). Nous avons développé un modèle de calcul 3D basé sur la Méthode des Eléments Finis (MEF) couplé avec un circuit électrique externe. Dans ce modèle, les formulations en A et H sont couplées à l'aide de conditions aux frontières appropriées afin de tirer avantages de chacune d'elles dans des régions spécifiques.

Description du problème



- Problème 3D qui assume un couplage entre le circuit électrique, la bobine et le SHTC
- Pour les SHTC, une loi en puissance non-linéaire est généralement utilisée pour décrire la relation E(J) :

$$\mathbf{E}(\mathbf{J}) = E_c \left(\frac{\|\mathbf{J}\|}{J_c} \right)^n \frac{\mathbf{J}}{\|\mathbf{J}\|},$$

$$E_c = 1\ \mu\text{V/cm},\ J_c = 100\ \text{A/mm}^2,\ n = 21$$

- Nous avons défini l'équation électrique du circuit qui peut être représenté par

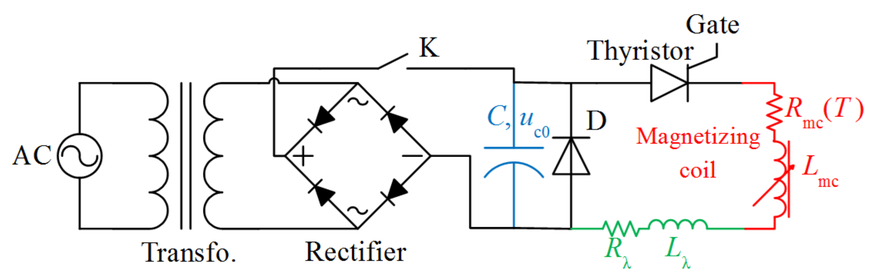
$$-u_c + (R_\lambda + R_{mc})i + L_\lambda \frac{di}{dt} + u_{L_{mc}} = 0 \quad \text{où} \quad i = -C\frac{du_c}{dt},\ u_{L_{mc}} = +\frac{d\Phi}{dt}$$

$u_c(0) = 2000$ V, $R_\lambda = 4$ mΩ, $L_\lambda = 4\ \mu$H, $R_{mc} = 26{,}3$ mΩ

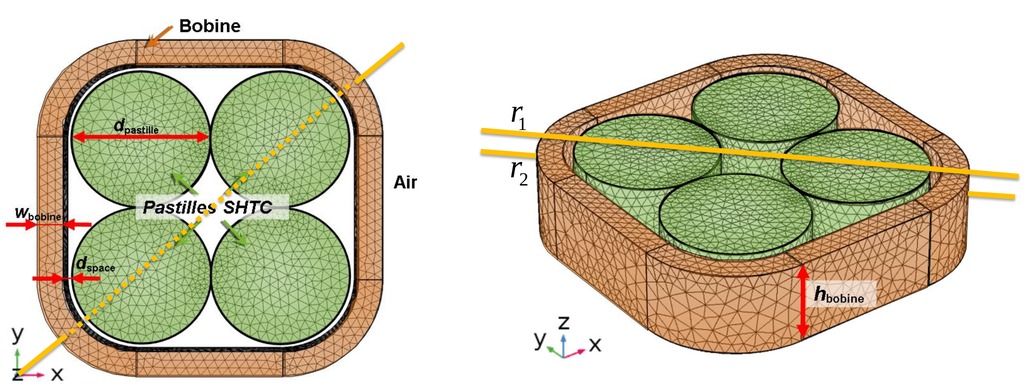
- Pour résoudre les équations de Maxwell, nous proposons le couplage des formulations A et H

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \times \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_{app} \qquad \frac{\partial(\mu_0 \mu_r \mathbf{H})}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0$$

- Circuit électrique

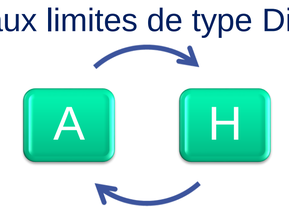


- La géométrie 3D du problème est illustrée ci-dessous



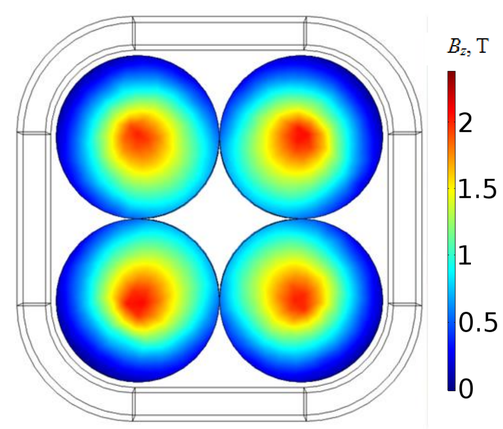
Couplage des formulations A et H

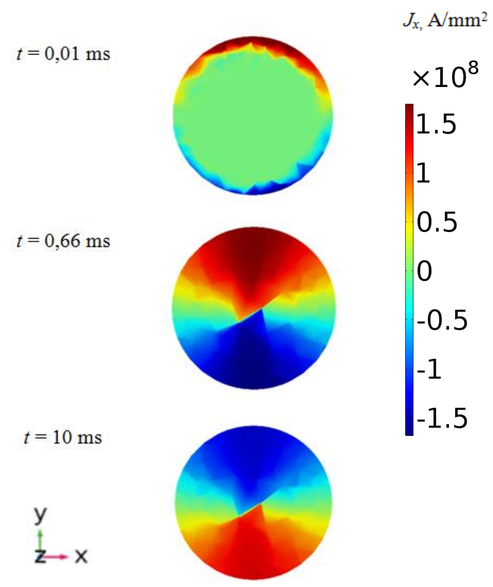
Condition aux limites de type Dirichlet pour **H**



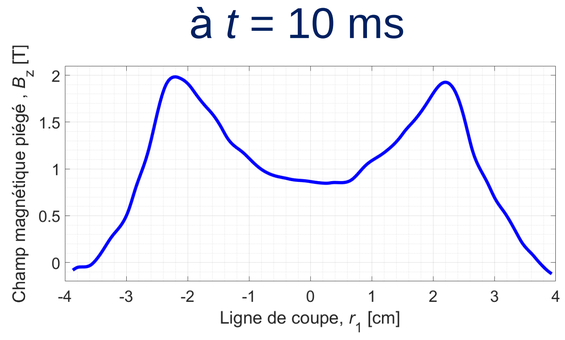
Courant induit $\mathbf{J}_{app}$

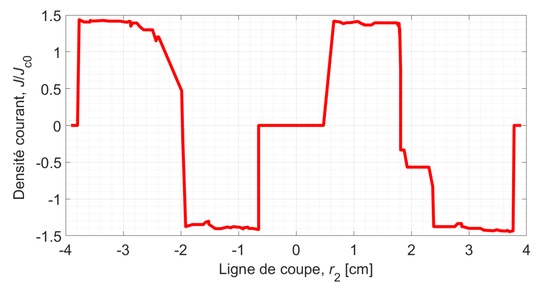
- Champ magnétique piégé à la surface des pastilles
- Distribution du courant pendant l'aimantation





- Champ magnétique piégé à t = 10 ms
- Densité de courant piégée à t = 10 ms





Avantages

+ Possibilité de simuler le SHTC avec une loi en puissance non-linéaire et une bonne convergence
+ Augmentation de la précision de l'estimation du champ magnétique piégé
+ Calcul du flux magnétique total basé sur le potentiel du vecteur magnétique
+ Possibilité de simuler des structures 3D

Conclusion

☑Maximum de champ magnétique piégé dans chaque pastille autour de 2 T

☑Une autre méthode de couplage des deux formulations A et H en 3D est à l'étude

☑Nous devons accélérer le temps de simulation

☑La simulation possible de ces systèmes 3D va nous aider à concevoir des moteurs supraconducteurs, par exemple

Perspectives

☑Prendre en compte des effets thermiques à cause de pertes induites dans d'une pastille supraconductrice pendant PFM, qui réduisent la quantité de champ magnétique piégé.

☑Le modèle final nous permettra de choisir la meilleure configuration pour l'inducteur magnétisant

☑Vérification du modèle numérique avec résultats expérimentaux