

Jérémie Muzet

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

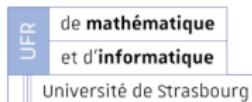
Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion



Stage de M2 Supraconducteurs à Haute Température Critique

Jérémie Muzet
Supervisé par : Christophe Trophime

Master 2 CSMI
Université de Strasbourg

Février - Août 2022

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

Présentation du LNCMI

Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses

Infrastructure de recherche du CNRS

Génère des champs magnétiques intenses

Expériences dans des champs magnétiques intenses

Recherche en physique fondamentale et physique appliquée

Deux sites :

Grenoble : champs magnétiques continus jusqu'à 37 T

Toulouse : champs magnétiques pulsés jusqu'à 90 T sur 9 ms



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

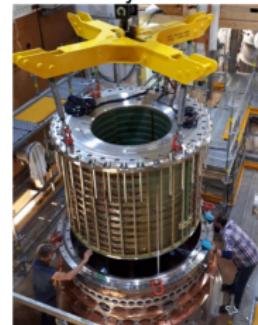
LNCMI-G Électro-Aimants

Le LNCMI-G fabrique trois types d'aimants :

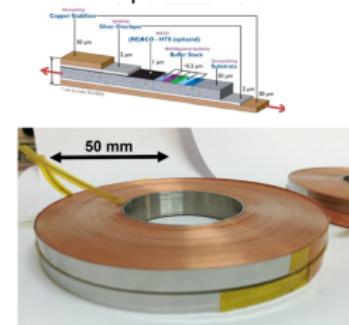
Aimant résistif 37 T :



Aimant hybride 43 T :



Aimant supraconducteur 32 T :



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

Contexte

Objectifs principaux du stage

Activité de simulations de supraconducteurs au LNCMI

- Appuyer les développements du laboratoire
- Modélisation des supraconducteurs

Formulations classiquement utilisées pour HTS

- Comprendre & Implémenter
- Modélisation avec Feelp - Collaboration avec Cemosis

Intégrer au développement d'applications internes

- Application PythonMagnetSetup (système de mise en données)

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

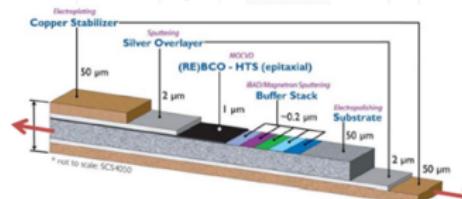
Contexte

Supraconducteurs à Haute Température Critique (HTS)

- Transportent de l'électricité sans perte Joule
- Dépendent du champ magnétique externe
- Fonctionnent à température très basse
 - jusqu'à 100°K (~ -173°C)
 - transporte assez de courant vers les 4°K (~ -269°C)

⇒ Difficile à modéliser car :

- Comportement fortement non-linéaire
- Propriétés physiques anisotropes
- Facteurs d'échelle très différents



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

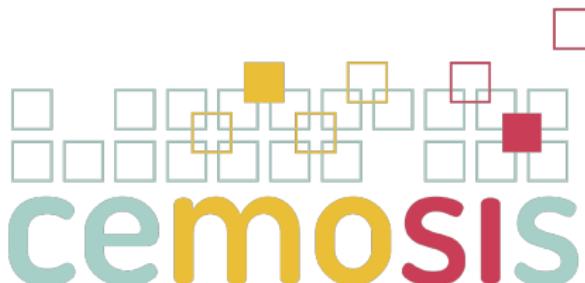
Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

Collaboration avec le Cemosis



cemosis

Centre de modélisation et de simulation de Strasbourg

Simulation précise d'aimant avant la fabrication :
Utilisation de Feel++ : logiciel développé par CEMOSIS



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

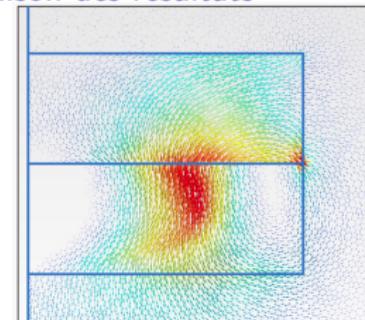
Conclusion

Logiciels éléments finis

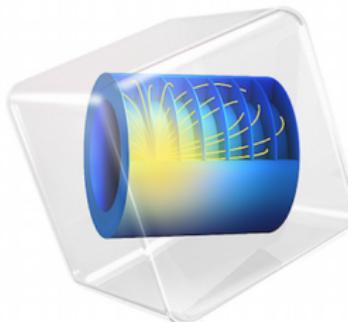
Comparaison des résultats



Feelepp



getDP



Comsol



FreeFEM

IntroductionPrésentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS**Modèle physique**

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

**Transport de
courant**

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

Modèle physique

Équations de Maxwell

$$\begin{cases} \nabla \cdot B = 0 & (\text{Maxwell-Thompson}) \\ \nabla \times H = J & (\text{Maxwell-Ampère}) \\ \nabla \times E = -\partial_t B & (\text{Maxwell-Faraday}) \end{cases}$$

Matériaux conducteurs classiques :

$$B = \mu H$$

$$J = \sigma E$$

Matériaux supraconducteurs :

$$B = \mu_0 H$$

$$J = \frac{J_c}{E_c} \left(\frac{||E||}{E_c} \right)^{(1-n)/n} E^1$$

Avec :

- B , flux de densité magnétique (T),
- H , champ magnétique (A/m),
- J , densité de courant (A/m^2),
- E , champ électrique (V/m)
- μ , perméabilité magnétique (H/m)
- μ_0 , perméabilité magnétique du vide (H/m)
- J_c , densité de courant critique (A/m^2)
- E_c , champ électrique de seuil (V/m)
- σ , conductivité (S/m)

1. Loi de puissance $e - j$

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

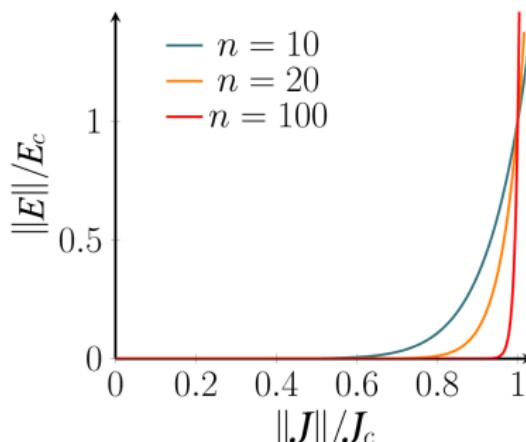
Résultats

Implémentations

Conclusion

Loi de Puissance E-J

Les deux formes de la loi de puissance :



- Conductivité électrique σ :

$$J = \sigma(E)E = \frac{J_c}{E_c} \left(\frac{\|E\|}{E_c} \right)^{(1-n)/n} E$$

- Résistivité électrique ρ :

$$E = \rho(J)J = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{\|J\|}{J_c} \right)^{(n-1)} J$$

- J , densité de courant (A/m^2),
- E , champ électrique (V/m)
- E_c , champ électrique de seuil (V/m)
- n , exposant dépendant du matériau

- J_c , densité de courant critique (A/m^2)
 - dépend du champ magnétique
 - dépend de la température

IntroductionPrésentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

**Transport de
courant**

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

Formulations

Formulations non couplées

- **A Formulation** : Dépend du potentiel magnétique \mathbf{A} (avec $B = \nabla \times A$).
- **H Formulation** : Dépend du champ magnétique \mathbf{H} .

Formulations couplées

- **H- ϕ Formulation** (*matériau simplement connexe*)
 - champ magnétique \mathbf{H} dans le supraconducteur.
 - potentiel scalaire ϕ sinon (avec $H = -\nabla\phi$).
- **H-A Formulation** :
 - champ magnétique \mathbf{H} dans le supraconducteur.
 - potentiel magnétique \mathbf{A} sinon (avec $B = \nabla \times A$).
- **T-A Formulation** :
 - potentiel magnétique \mathbf{A} (avec $B = \nabla \times A$) dans tout le domaine.
 - potentiel de courant \mathbf{T} (avec $J = \nabla \times T$) dans le supraconducteur.

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage
Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

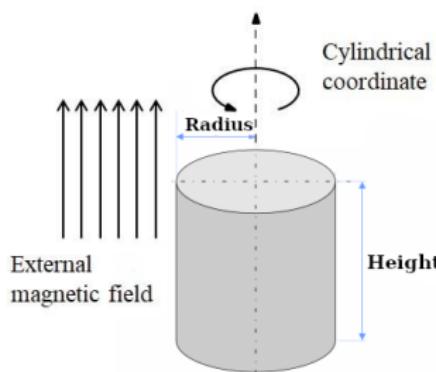
Résultats

Implémentations

Conclusion

Deux Types de Problèmes

Magnétisation



Transport de courant

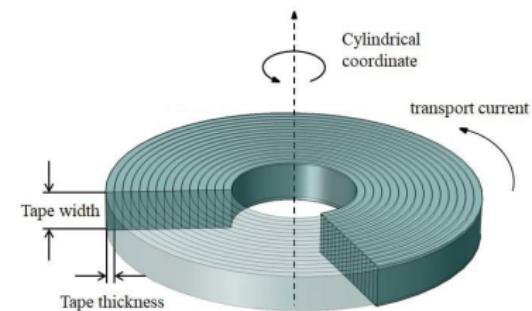


Figure – Massif ("Bulk")

Figure – Galette ("Pancake")

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

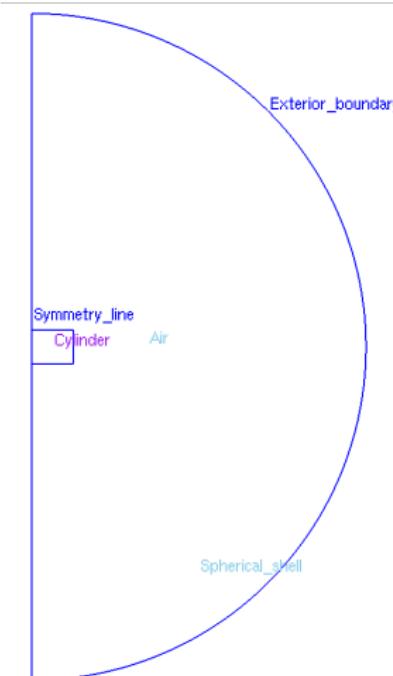
Résultats

Implémentations

Conclusion

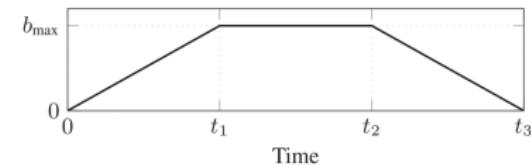
Magnétisation - Géométrie

Cylindre Massif HTS



Cylindre HTS entouré par l'air :

- Coordonnées Axisymétriques
 - Ω_c : Cylinder
 - Ω_c^C : Air
- Pas de courant appliqué
- Modèle transitoire $t_f = 15s$
- Champ magnétique externe appliqué sur *Exterior_Boundary* :



B. Vanderheyden, J. Dular, C. Geuzaine, Finite-element formulations for systems high-temperature-superconductors, IEEE Transactions on applied superconductivity, (2020).

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

A Formulation

L'équation de Maxwell-Thompson implique :

$$\nabla \cdot B = 0 \implies B = \nabla \times A$$

Avec une condition de Gauge : $\nabla \cdot A = 0$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \partial_t A = 0$$

- A , potentiel magnétique (Tm)
- B , flux de densité magnétique (T)
- μ , perméabilité magnétique (H/m)
- σ , conductivité (S/m)

$$\sigma = \frac{J_c}{E_c} \left(\frac{|| - \partial_t A ||}{E_c} \right)^{(1-n)/n}$$

IntroductionPrésentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

**Transport de
courant**

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

H formulation

En combinant l'équation de Maxwell-Faraday ($\nabla \times E = -\partial_t B$) et de Maxwell-Ampère ($\nabla \times H = J$), on obtient :

$$\nabla \times (\rho \nabla \times H) = -\mu(\partial_t H)$$

avec :

- dans le Supraconducteur :

$$\rho_{\text{HTS}} = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{||\nabla \times H||}{J_c} \right)^{(n-1)}$$

- dans l'Air :

$$\rho_{\text{air}} = 1$$

- B , flux de densité magnétique (T)
- H , champ magnétique (A/m)
- J , densité de courant (A/m^2)

- E , champ électrique (V/m)
- μ , perméabilité magnétique (H/m)
- ρ , résistivité (Ωm)

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

H- ϕ Formulation

Matériau simplement connexe

Potentiel scalaire magnétique ϕ

- Dans les domaines non-supraconducteurs : $\nabla \times H = 0$
 $\rightarrow H = -\nabla\phi$
- Maxwell-Thompson ($\nabla \cdot B = 0$) $\implies -\nabla \cdot \nabla\phi = 0$

$$\begin{cases} \nabla \times (\rho \nabla \times H) = -\mu(\partial_t H) & \text{dans } \Omega_c \\ -\nabla \cdot \nabla\phi = 0 & \text{dans } \Omega_c^C \\ n \times H = n \times -\nabla\phi & \text{sur } \Gamma_D \\ \frac{\partial\phi}{\partial n} = \nabla\phi \cdot n = H \cdot n & \text{sur } \Gamma_N \end{cases}$$

- B , flux de densité magnétique (T)
- H , champ magnétique (A/m)
- μ , perméabilité magnétique (H/m)
- ρ , résistivité (Ωm)

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{||\nabla \times H||}{J_c} \right)^{(n-1)}$$

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

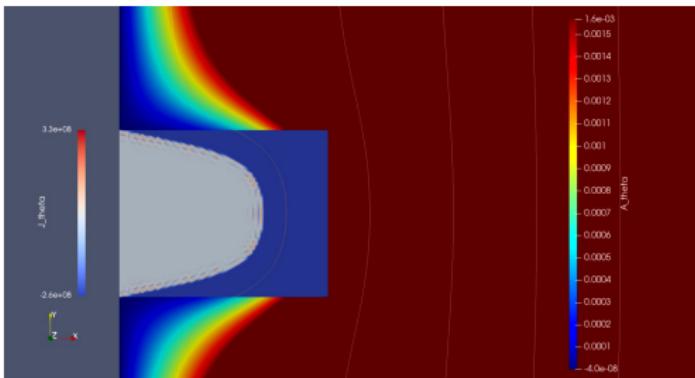
Résultats

Implémentations

Conclusion

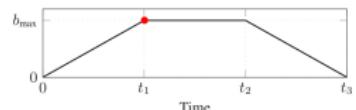
Résultats

Cylindre HTS Axi avec Feelpp



Densité de courant J & flux de densité magnétique B

- Temps $t_1 = 5\text{s}$
- $B_{externe} = B_{max}$:



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

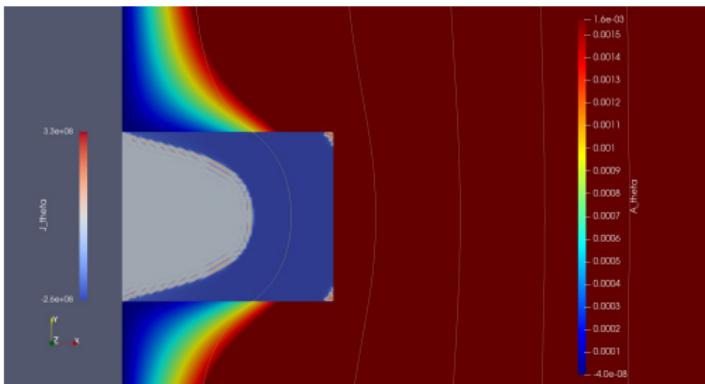
Résultats

Implémentations

Conclusion

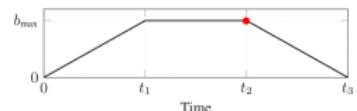
Résultats

Cylindre HTS Axi avec Feelpp



Densité de courant J & flux de densité magnétique B

- Temps $t_2 = 10\text{s}$
- $B_{externe} = B_{max}$:



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

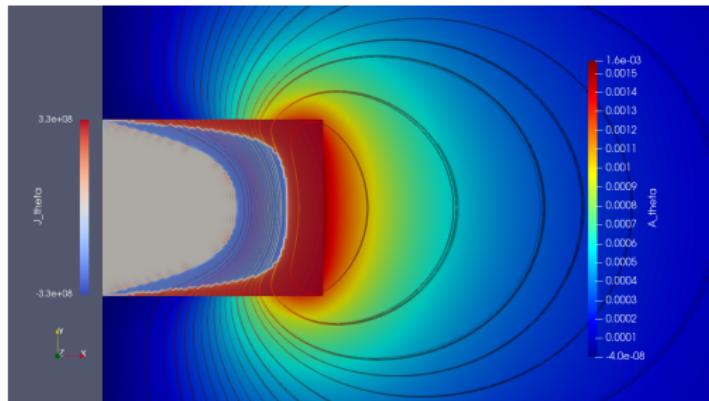
Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

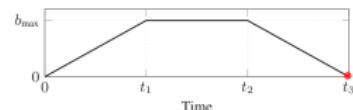


Densité de courant J & flux de densité magnétique B

Résultats

Cylindre HTS Axi avec Feelpp

- Temps final $t_3 = 15\text{s}$
- $B_{externe} = 0$:



Supraconducteur : aucun champ à l'intérieur

→ génère champ inverse au champ externe

⇒ piège champ généré après la disparition du champ externe

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

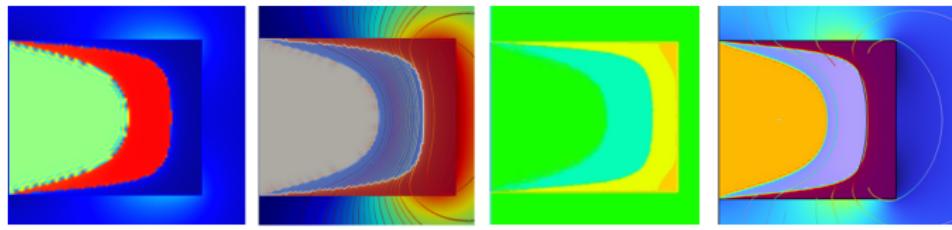
Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

Bilan des Implémentations



Norme L^2 relative de l'erreur B_z selon l'axe O_r à $t = 15s$

| Formulation | GetDP | Feelpp | FreeFEM | Comsol |
|--------------------------------------|-------|--------|---------|--------|
| En coordonnées axisymétriques | | | | |
| A Formulation | Sol. | 6.54%* | 7.44% | × |
| H Formulation | | △ | | 2.99% |
| H- ϕ Formulation | ✓ | ~ | | |

~ nécessite des fonctionnalités supplémentaires de Feelpp

△ modèle correct mais problème de convergence

* fonctionne avec la v109 de Feelpp

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant
courant

Géométrie

Formulation

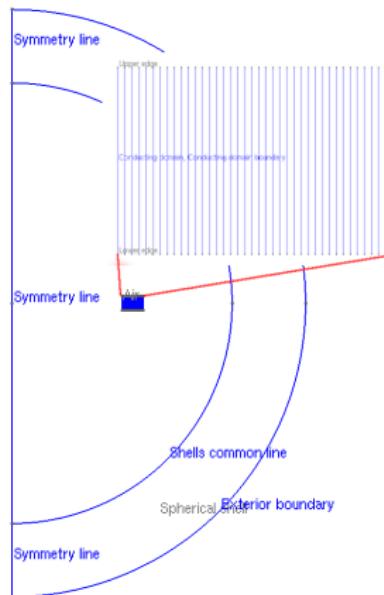
Résultats

Implémentations

Conclusion

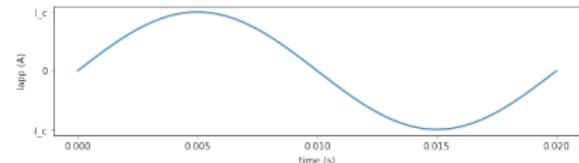
Transport de courant - Géométrie

Rubans Supra Bobinés



Galette HTS entouré par l'air :

- Coordonnées Axisymétriques
 - Ω_c : Galette
 - Ω_c^C : Air
- Pas de champ appliqué
- Modèle transitoire $t_f = 0.02s$
- Courant de transport :



E. Berrospé-Juarez et al. Real-time simulation of large-scale HTS systems : multi-scale and homogeneous models using the T-A formulation. Supercond. Sci. Technol. 32 (2019).

Appliquer le Transport de courant

Selon les Formulations

Implémentation du courant

→ utilisation de formulations couplées :

- H-A Formulation - Multiplicateurs de Lagrange

- H- ϕ Formulation - Coupure dans la géométrie

⇒ simplement connexe

- T-A Formulation - Conditions aux bords

⇒ plus simple à implémenter :

$$I_{app} = (T_1 - T_2)\delta$$

avec :

- T_1 & T_2 , potentiels aux extrémités des rubans supra (A/m)
- δ , largeur des rubans supra (m)

IntroductionPrésentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion **B , flux de densité magnétique**

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

T-A formulation

 J , densité du courant électrique

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}$$

A-formulation

Équation Maxwell-Ampere : $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ avec $\mathbf{H} = \mu \mathbf{B}$ donne :

$$-\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \nabla \times \mathbf{T}$$

T-formulation

Équation Maxwell-Faraday : $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}$ avec $\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$ donne ;

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = -\partial_t (\nabla \times \mathbf{A})$$

- B , flux de densité magnétique (T)
- H , champ magnétique (A/m)
- J , densité de courant (A/m^2)

- E , champ électrique (V/m)
- μ , perméabilité magnétique (H/m)
- ρ , résistivité (Ωm)

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{\|\nabla \times \mathbf{T}\|}{J_c} \right)^{(n-1)}$$

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

Résultats

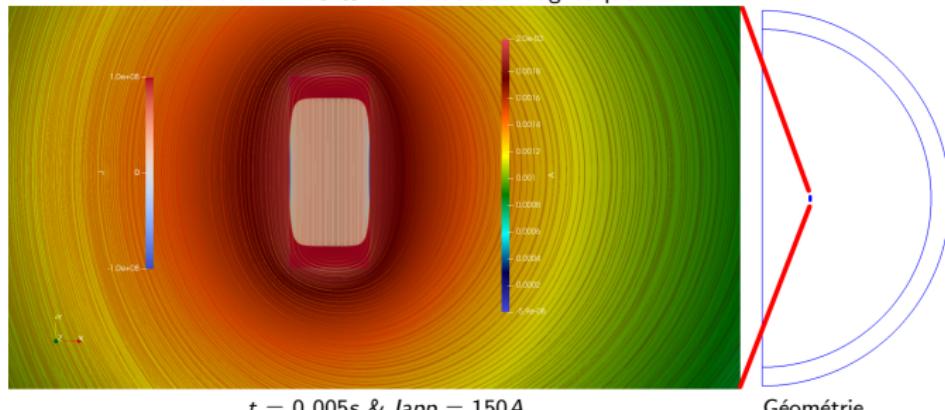
Implémentations

Conclusion

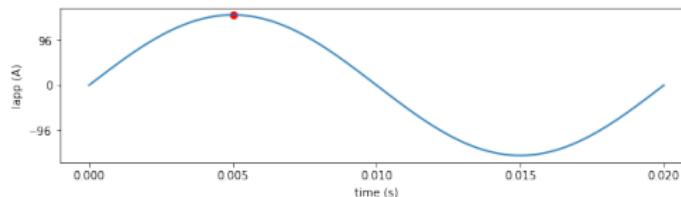
Résultats

Galette HTS Axi avec Feelpp

Densité de courant J & flux de densité magnétique B



Courant transporté :



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

Résultats

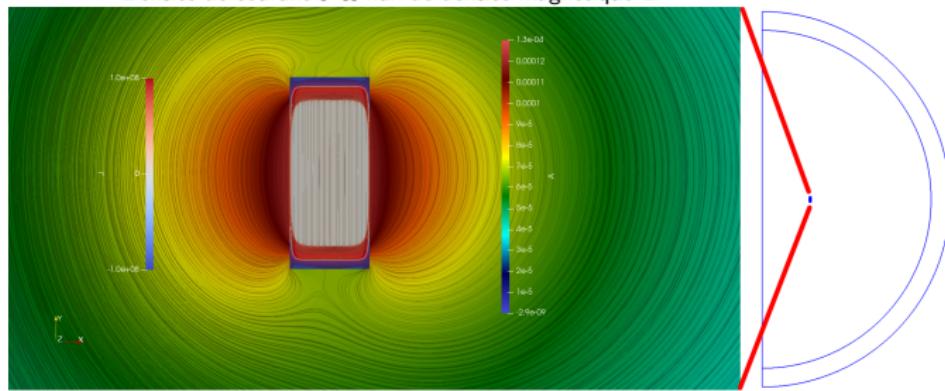
Implémentations

Conclusion

Résultats

Galette HTS Axi avec Feelpp

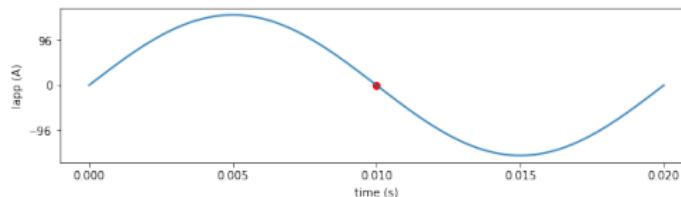
Densité de courant J & flux de densité magnétique B



$t = 0.01s \text{ & } I_{app} = 0A$

Géométrie

Courant transporté :



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

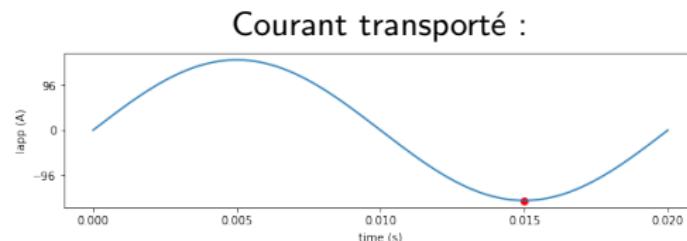
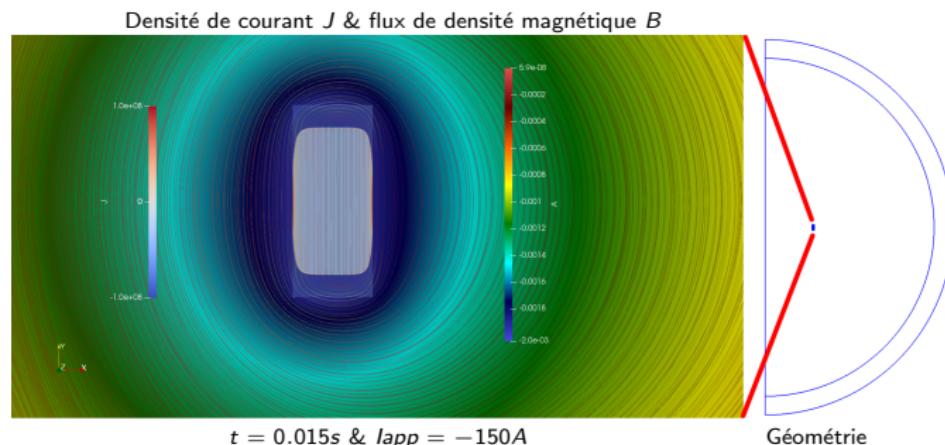
Résultats

Implémentations

Conclusion

Résultats

Galette HTS Axi avec Feelpp



Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de courant

Géométrie

Formulation

Résultats

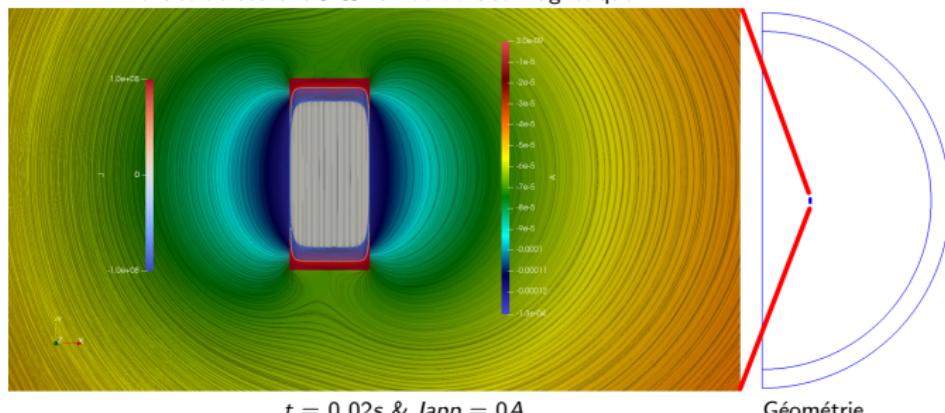
Implémentations

Conclusion

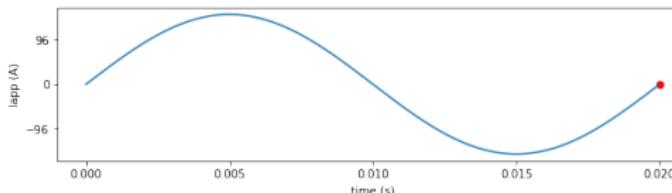
Résultats

Galette HTS Axi avec Feelpp

Densité de courant J & flux de densité magnétique B



Courant transporté :



Rubans supraconducteurs

- $I_{app} = \pm 150A$
 \Rightarrow Champ généré
- $I_{app} = 0A$
 \Rightarrow Champ piégé

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

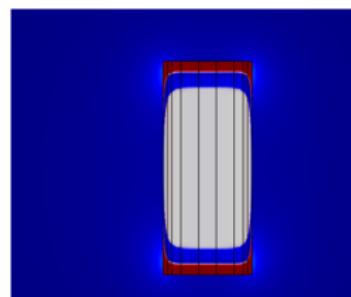
Résultats

Implémentations

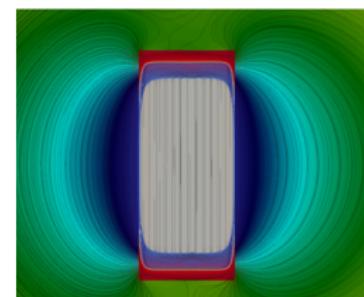
Conclusion

Bilan Implémentations

T-A Axi Homogénéisé



Comsol



Feelpp

Norme L^2 relative de l'erreur B_r selon l'axe O_z à $t = 0.02s$

| Formulation | Comsol | Feelpp |
|--|--------|--------|
| Galette en coordonnées axisymétriques | | |
| T-A Homogénéisé* Formulation | Sol. | 3.02% |

*prendre les rubans en un seul bloc plutôt qu'individuellement

Introduction

Présentation du
LNCMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

Conclusion

- Modèles implémentés sur différents logiciels

 ⇒ Cylindre Massif HTS

 ⇒ Galette HTS

- PythonMagnetSetup

 ⇒ Ajout de formulations et développement

- Création d'un programme passerelle entre Feelpp et Comsol.

Pour des modèles plus précis/performants :

- Pas de temps adaptatif

- Maillage adaptatif

 → déjà implanté sur FreeFEM, en cours sur Feelpp

Conclusion

Difficulté

- Problèmes de convergence des modèles fortement non linéaires

Prochaines étapes

- Étude de modèle HTS couplé à la thermique
- Adaptation des formulations aux HTS du LNCMI
- Implémentation des modèles en 3D

Fonctionnalités manquantes pour Feelpp CFPDEs :

- Couplage de formulations sur les bords
- Multiplicateurs de Lagrange surfacique
- Résoudre EDP 1D

Introduction

Présentation du
LNCFMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

PythonMagnetSetup

Templates pour Feelpp

```
python -m python_magnetsetup.cli --magnet HL-test --method cfpdes --time static --geom Axi --model thmag
```

$$-\underbrace{\frac{1}{\mu}}_c \Delta \mathbf{A} + \underbrace{\frac{1}{\mu r^2}}_a \mathbf{A} = \underbrace{J_\theta}_f$$

```

magnetic-conductor.mustache
1  {
2      "name": "magnetic_{{name}}",
3      "materials": "{{name}}",
4      "setup": {
5          "coefficients": {
6              "c": "x/materials_{{name}}_mu:x:materials_{{name}}_mu",
7              "a": "1/materials_{{name}}_mu/x:x:materials_{{name}}_mu",
8              "f": "materials_{{name}}_j_th*x:materials_{{name}}_j_th:x"
9          }
10     }
11 }

HL-test-cfpdes-thmag_hcurl-Axi-sim.json
500 {
501     "name": "magnetic_H1_CuI",
502     "materials": "H1_CuI",
503     "setup": {
504         "coefficients": {
505             "c": "x/materials_H1_CuI_mu:x:materials_H1_CuI_mu",
506             "a": "1/materials_H1_CuI_mu/x:x:materials_H1_CuI_mu",
507             "f": "materials_H1_CuI_j_th*x:materials_H1_CuI_j_th:x"
508         }
509     }
510 },

```



PythonMagnetSetup

- Fichiers .mustache
- Choix d'un aimant
- Détection des matériaux
- Création du .json & .cfg

Développement

- Ajout de nouveaux templates
- Ajout de thmqsel
- Feelpp v109 → v110

Introduction

Présentation du
LNCFMI

Contexte du stage

Logiciels

HTS

Modèle physique

Loi de Puissance E-J

Formulations

Types de problèmes

Magnétisation

Géométrie

Formulations

Résultats

Implémentations

Transport de
courant

Géométrie

Formulation

Résultats

Implémentations

Conclusion

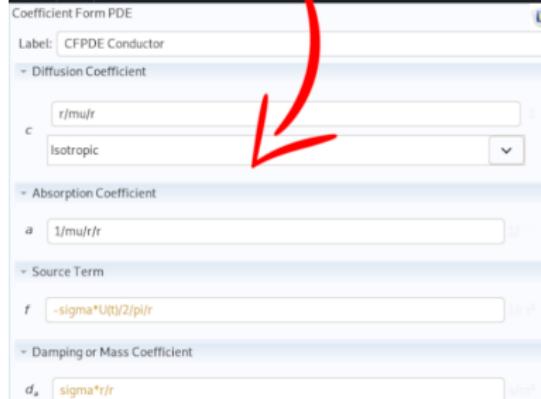
Programme Python MPH

Python pour Comsol

```
python create_model.py --file=mqs_axis.json --formulation=cfpdes --axis --timedep
```

$$-\underbrace{\frac{1}{\mu} \Delta \mathbf{A}}_{c} + \underbrace{\frac{1}{\mu r^2} \mathbf{A}}_{a} + \underbrace{\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}}_{d} = \underbrace{-\sigma \frac{U}{2\pi r}}_{f}$$

```
(0) mqs_axis.json
36     "Materials":
37     {
38         "Conductor":
39         {
40             "magnetic_c": "x/mu/x:mu",
41             "magnetic_a": "1/mu/x:mu:x",
42             "magnetic_f": "-sigma*U/2/pi:sigma:U",
43             "magnetic_d": "sigma*x:sigma:x"
44         },
45     }
```



create_model.py

- Choix d'un fichier .json
- Importation du maillage
- Détection des matériaux
- Création de la physique
- Création du solveur

Développement

- CFPDEs (général) & H-form
- Géométrie 2D & axisymétriques
- Problème statique & transitoire
- Option pour solveur non linéaire
- Fonctionne avec fichiers Feelpp v109