

Gel et ∇H^2

Denis NETTER

Séminaire CEA

4 juillet 2014



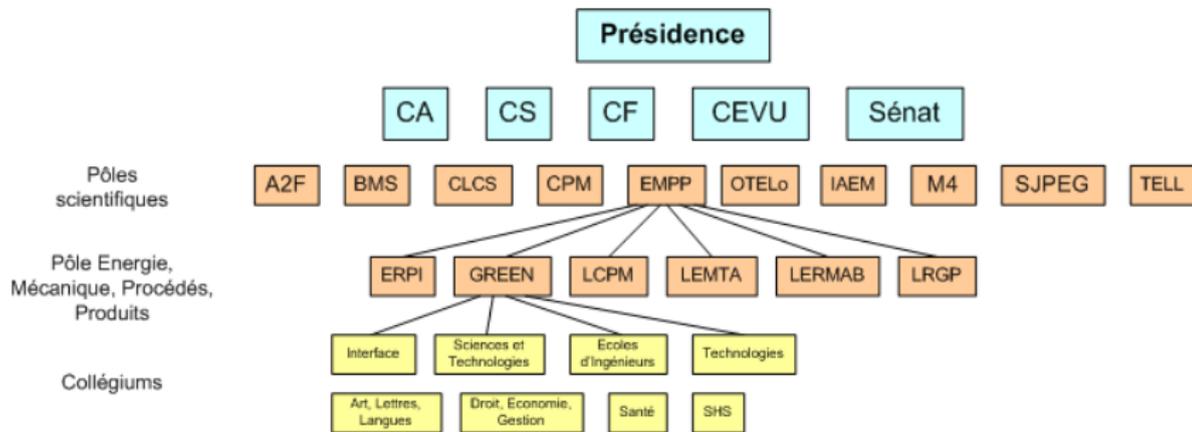
UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Plan de la présentation

- 1 Contexte
- 2 Problématique
- 3 Modélisation mécanique et magnétique
- 4 Analyse
- 5 Conclusion et perspectives

Université de Lorraine (3700 EC, 3000 BIATSS, 52000 étudiants)



ENSEM

- Ecole Nationale supérieure Électricité et de Mécanique.
- Conseil d'administration présidé par Bernard Bigot.
- Ecole de l'Énergie.
- Fusion avec 2 autres écoles.

GREEN

Quelques chiffres.

- 22 EC et 7 BIATS.
- 22 thésards.

Supraconductivité Appliqué : 3 PU, 4 MC.

- Moteurs supraconducteurs.
- Caractérisation des supraconducteurs.

Mes thématiques.

- Calculs de champs.
- Structures multiphysiques.
- Aide à la décision (\neq Optimisation).

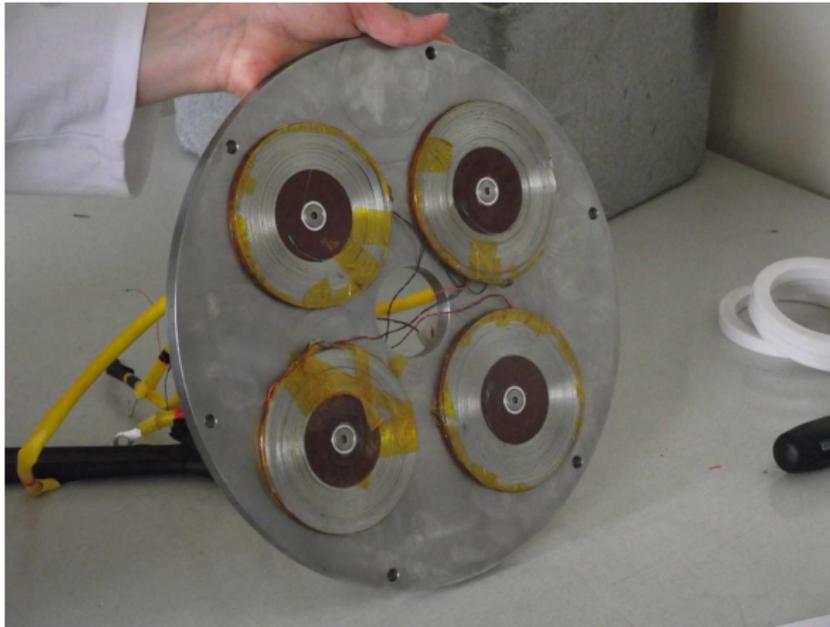
Une thématique de longue date...



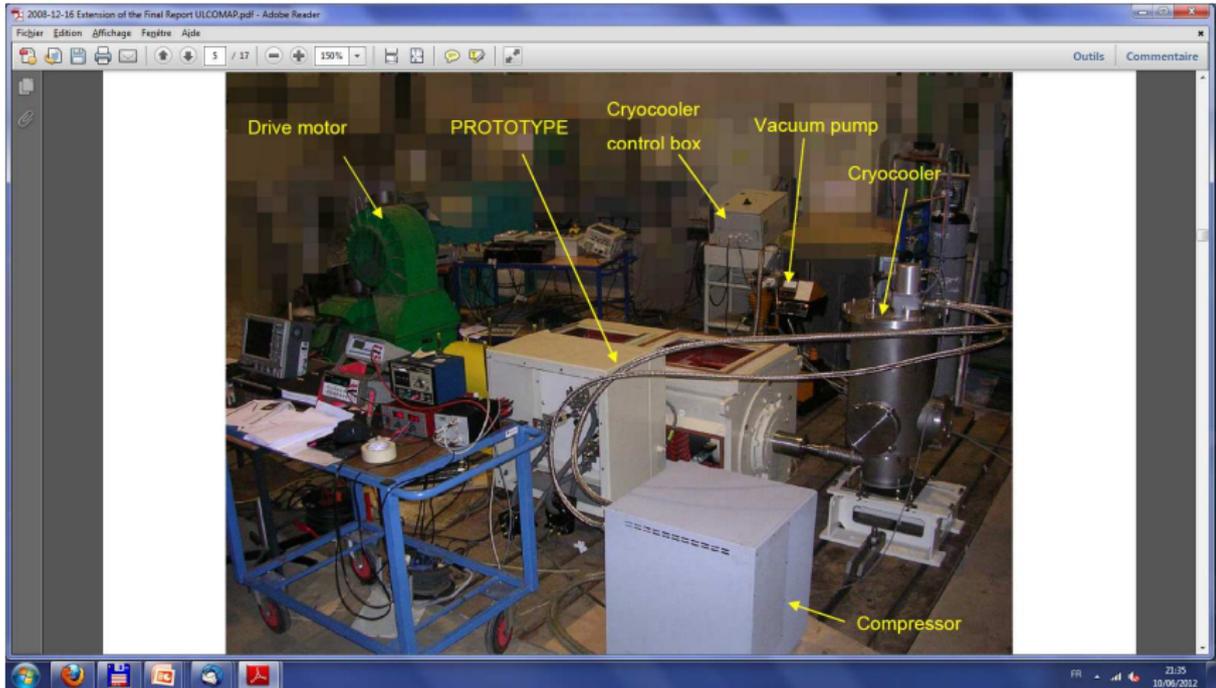
... qui a de l'avenir.



Coupleur magnétique



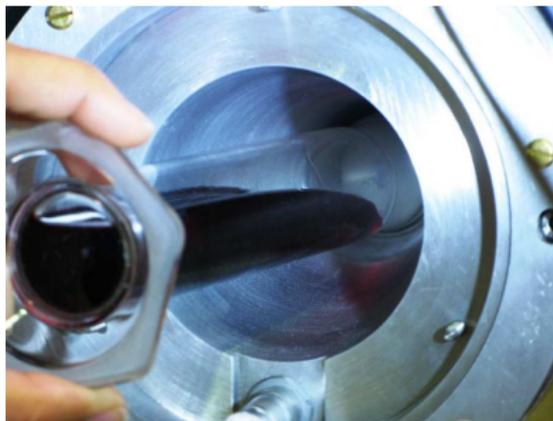
Projet ULCOMAP



Genèse d'un "sujet de fous"

Thèse de Laurent Heyrendt

- Ingénieur ENSEM Mécanicien.
- Physicien (Agrégation de Physique Appliquée).
- PRAG à l'Université de Lorraine (Thèse longue).



Après quelques temps de réflexion

Définition intuitive d'un gel

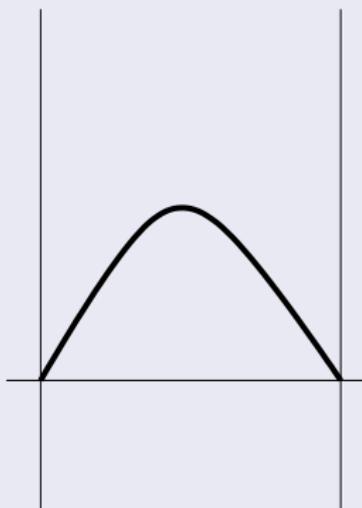
C'est un solide qui devient liquide lorsqu'on lui applique une contrainte de cisaillement supérieure à une contrainte seuil.

Exemples

- shampoing, dentifrice, mousse à raser
- yaourts, crèmes
- boues de forage , de dé-pollution,...

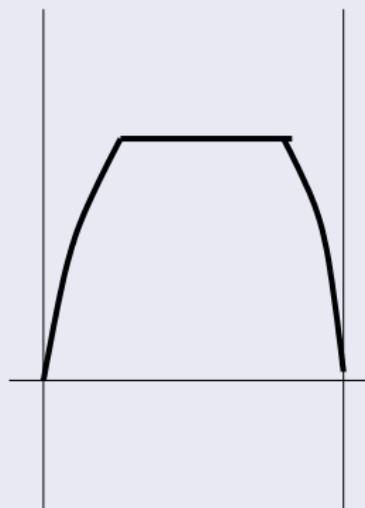
Profil de vitesse dans un tuyau

pour un fluide



FLUIDE

pour un gel



GEL

Contexte actuel

Problèmes

- Ca bouche les tuyaux (cosmétiques, agroalimentaire, pétrole, pollution, etc...)
- Pertes de charge dues à la présence d'un solide (dans les coudes par exemple).
- La contrainte de cisaillement critique est très difficile à mesurer.

Comment transformer un gel en liquide ? Comment mesurer la contrainte seuil ?

Solutions actuelles : Forces de contact (mélangeur)

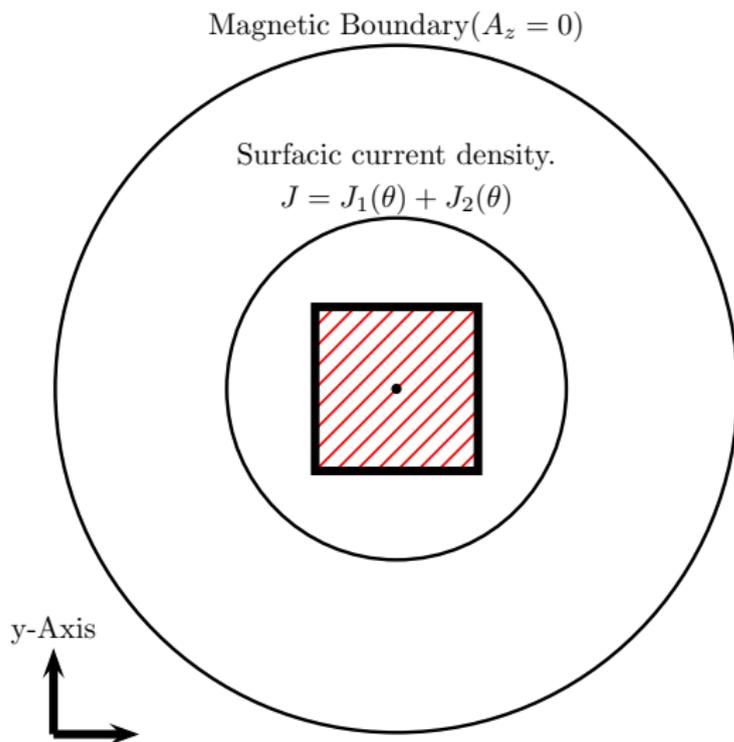
- Moins efficace qu'un champ de forces volumiques.
- Modélisation de l'interface très compliquée.

Forces Magnétiques

$$\vec{f} = \frac{\chi\mu_0}{2} \overrightarrow{\text{grad}} H^2$$

- Champ de forces volumiques.
- Sans contact.
- Réglage très facile.
- Les mécaniciens sont très enthousiastes.
- Retour d'expérience de la lévitation magnétique.

Dispositif magnétique



Inconnues du problèmes

Problème 2D

3 contraintes σ_{xx} , σ_{yy} and σ_{xy} .

3 allongements ε_{xx} , ε_{yy} and ε_{xy} .

2 déplacements U_x and U_y .

Elasticité linéaire

Equilibre

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = F_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = F_y \quad (2)$$

Relations entre déplacement et allongements

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} \quad (3)$$

$$\sigma_{yy} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{xx} \quad (4)$$

$$\sigma_{xy} = 2\mu\varepsilon_{xy} \quad (5)$$

Équations cinématiques

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla(\mathbf{U}) + (\nabla(\mathbf{U}))^T \right) \quad (6)$$

Critique du modèle

- La loi de comportement est linéaire.
- Pas de prise en compte de la température.
- Modèle 2D : 8 inconnues par noeuds.

Objectifs

- Trouver les paramètres pertinents : analyse dimensionnelle.
- Balayage paramétrique (pas d'optimisation).

Choix des paramètres pertinents

Paramètres physiques

$$E, d, R_o, \nu, \sigma_c, \mu_0, \chi, \theta_1, \theta_2$$

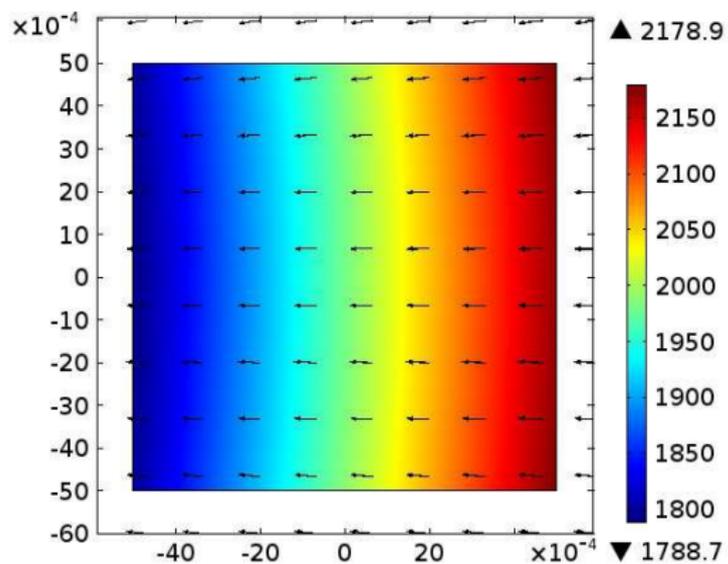
A la place des densités de courants :

B_p : valeur de l'induction maximale sur fil.

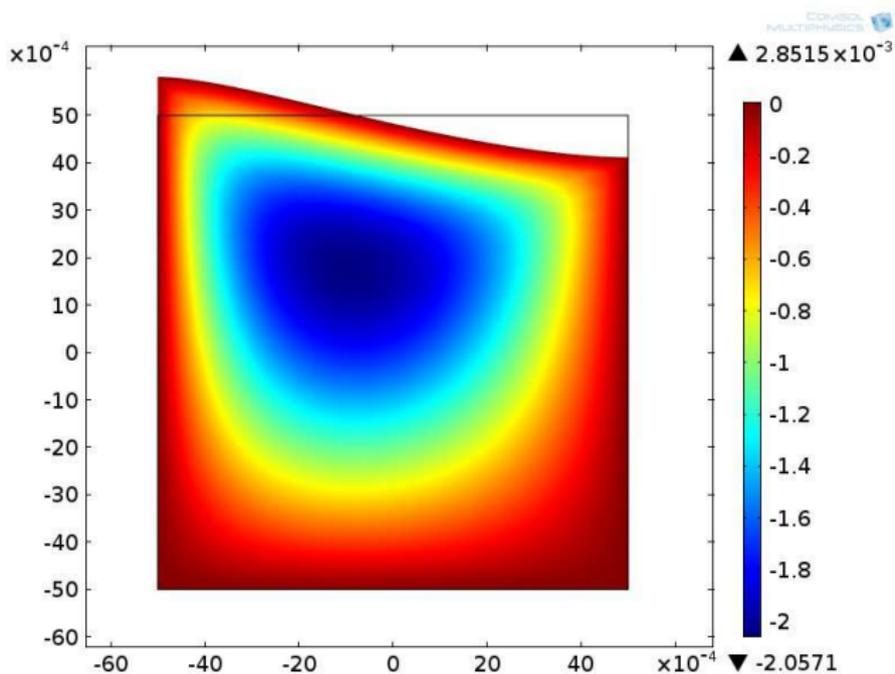
G_o : valeur du gradient de H^2 au centre du dispositif.

$$J(\theta) = \frac{2B_o}{\mu_0} \cos(\theta + \theta_1) + \frac{G_o R_o}{\mu_0 B_o} \cos(2(\theta + \theta_2)) \quad (7)$$

Exemple de calcul



Exemple de calcul



Analyse dimensionnelle

$$B_p, G_o, E, d, R_o, \nu, \sigma_c, \mu_0, \chi, \theta_1, \theta_2$$

11 paramètres de départ mais après une analyse dimensionnelle

$$\sigma_{max} = \sigma_c F_{\sigma_c} \left(\frac{dG_o}{\mu_0 \sigma_c}, \frac{dG_o}{B_p^2}, \frac{E}{\sigma_c}, \frac{R_o}{d}, \nu, \chi, \theta_1, \theta_2 \right) \quad (8)$$

$$S = F_S \left(\frac{dG_o}{\mu_0 \sigma_c}, \frac{dG_o}{B_p^2}, \frac{E}{\sigma_c}, \frac{R_o}{d}, \nu, \chi, \theta_1, \theta_2 \right) \quad (9)$$

Simplification

$$S = F_S \left(\frac{dG_o}{\mu_0 \sigma_c}, \frac{dG_o}{B_p^2}, \frac{E}{\sigma_c}, \frac{R_o}{d}, \nu, \chi, \theta_1, \theta_2 \right)$$

Diminution du nombre de paramètres

Résultat connu Problème indépendant de E.

Optimum magnétique $B_p = 2B_o = 2\sqrt{\frac{R_o G_o}{2}}$.

$(\theta_1, \theta_2) = (0, 0)$ permet d'atteindre une surface transitée maximale.

$\frac{R_o}{d}$ fixé pour des raisons de construction.

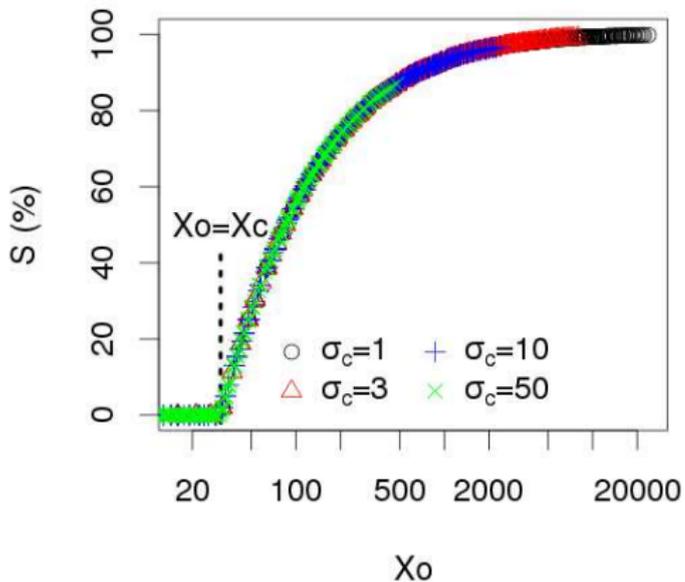
L'analyse des relations donne une force proportionnelle à χ et G_o .

2 paramètres pour décrire le phénomène

$$S = S(X_o, \nu) \text{ with } X_o = -\frac{\chi d G_o}{\mu_0 \sigma_c} \quad (10)$$

Simulations pour un coefficient de poisson donné

Fig. a



Expression semi analytique

$$X_o = -\frac{\chi d G_o}{\mu_o \sigma_c} \quad (11)$$

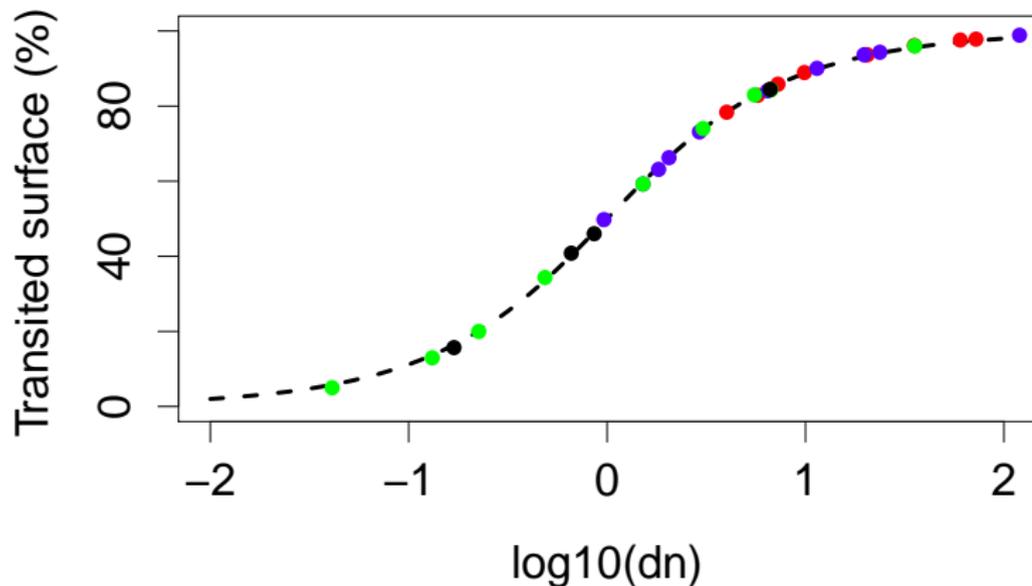
$$\lambda = -170.1\nu + 136.2 \quad (13)$$

$$d_n = \left(\frac{X_o - X_c}{\lambda} \right)^{0.75} \quad (14)$$

$$X_c = 342.2\nu^2 - 373.7\nu + 132.2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{If } X_o < X_c, \quad S = S_{fit}(d_n) &= 0 \\ \text{Else } S \approx S_{fit}(d_n) &= \frac{2}{\pi} * \arctan(d_n) \end{aligned} \quad (15)$$

Toutes les simulations en une seule courbe



Condition nécessaire de transition. $\nu \rightarrow 0.5$

$$-\frac{\chi d G_o}{\mu_o \sigma_c} > 30.9$$

Configuration accessible

$$\sigma_c = 3 \text{ Pa}$$

$$B_p = 10 \text{ T}$$

$$G_o = 2000 \text{ T}^2 / \text{m}$$

Ce qu'il reste à faire

D'un point de vue théorique

- Modèle mécanique non linéaire.
- Forme du réservoir de gel.
- Design de l'aimant supraconducteur (3d, axisymétrie).
- Optimisation.

D'un point de vue pratique

- Définition du protocole expérimental.
- Utiliser un aimant existant ?
- Construire un aimant ?
- Brevets ?

Plus généralement

Nos atouts.

- Utilisation des bobines supraconductrices dans des applications atypiques.
- Quels supraconducteurs pour quelles applications ?
- Proximité avec d'autres laboratoires (IJL pour le nanomagnétisme, LEMTA pour les aspects mécaniques et thermiques).

Échanges

- Stages de 3ème année (ENSEM et/ou MASTER).
- Thèses.
- Habilitations à Diriger des Recherches.

Merci de votre attention

Vous êtes les bienvenus à Nancy.