

Etude de Dipôles Supraconducteurs en Nb₃Sn à Haut Champ : Isolation Electrique à Base de Céramique et Conception Magnétique.

Etienne Rochepault

I. Contexte

1. Les collisionneurs de particules
2. Les aimants d'accélérateurs
3. La fabrication du Nb_3Sn

II. Etude de conducteurs isolés céramique

1. L'isolation céramique
2. La sensibilité du Nb_3Sn à la contrainte
3. Tests de courant critique
4. Développements sur l'isolation céramique

III. Proposition de conceptions magnétiques

1. La conception magnétique
2. Optimisation 2D
3. Optimisation 3D, modèle blocs
4. Optimisation 3D, modèle rubans

IV. Conclusion

1. Bilan
2. Perspectives

I. Contexte

- **A la recherche de particules élémentaires :**

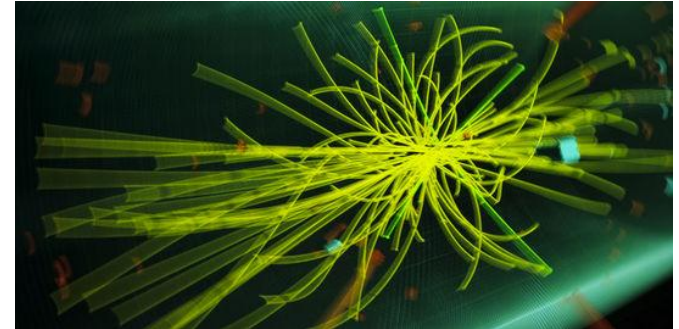
Genève, le 4 Juillet 2012 : « *Nous observons dans nos données des indices clairs d'une nouvelle particule, dans la gamme de masses autour de 126 GeV...* »

[[Fabiola Gianotti, porte-parole ATLAS](#)]

- **La production des particules :**

→ Accélérateurs linéaires

→ Accélérateurs circulaires



- **Le LHC (CERN) :**

→ 8,6 km de diamètre

→ 27 km de circonférence

→ collisions à 8 TeV

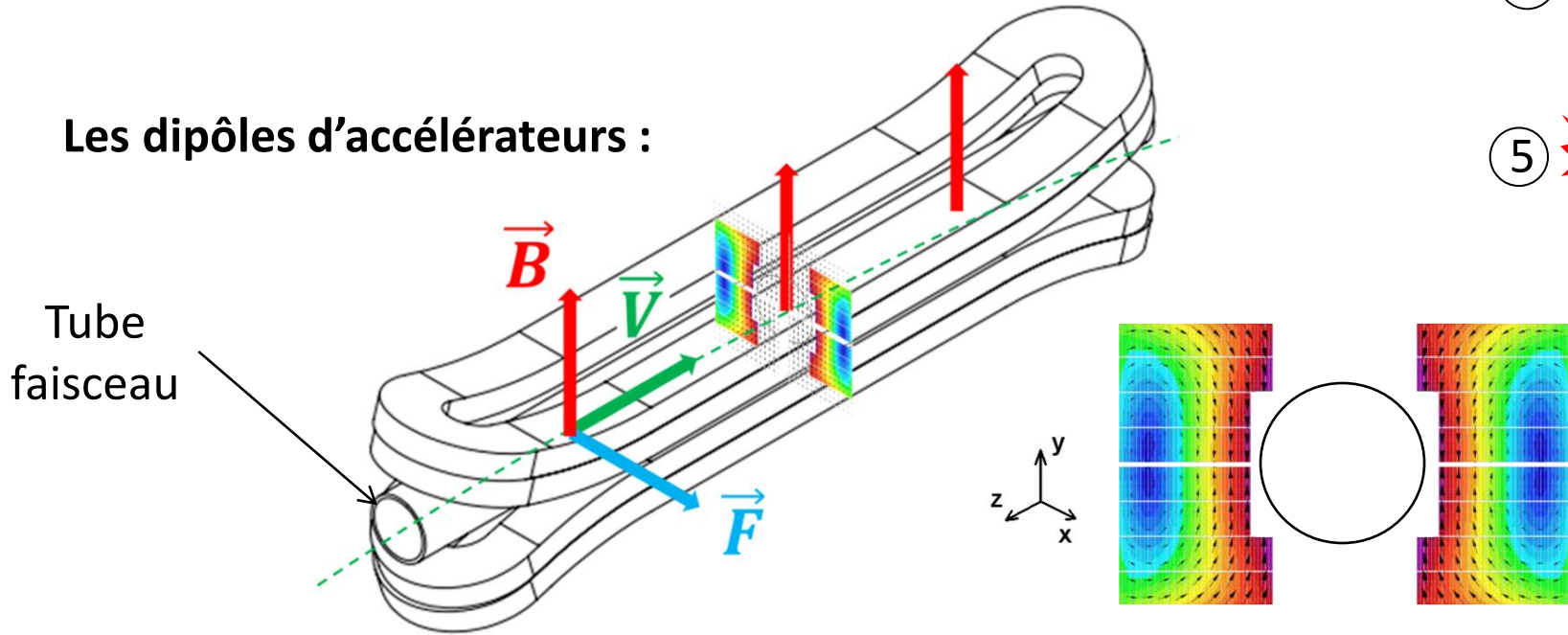


Le principe des accélérateurs circulaires :

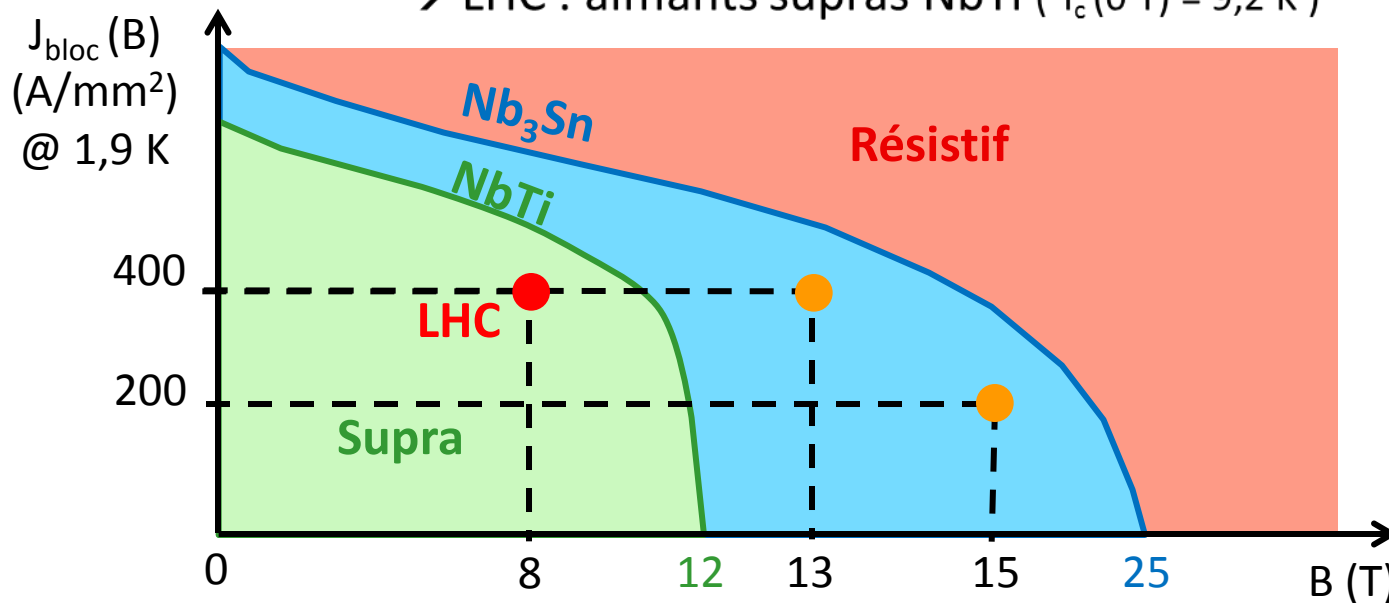
1. Accélérer les particules $\vec{F} = q\vec{E} \rightarrow$ cavités radiofréquences
2. Dévier les particules : $\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B} \rightarrow$ aimants dipolaires
3. Focaliser le faisceau de particule \rightarrow aimants quadripolaires
4. Corriger les aberrations \rightarrow aimants sextupolaires, octupolaires...
5. Faire entrer deux faisceaux en collision



Les dipôles d'accélérateurs :



- **Supraconducteurs** : → Résistance nulle à basses températures (<150 K)
 - Pas de perte d'énergie
 - LHC : aimants supras NbTi ($T_c(0 T) = 9,2 K$)



- Améliorations du LHC :
 - HL-LHC, 2022, luminosité x 10
 - HE-LHC, 2035, énergie x 2,5

→ Collisionneur circulaire : $\mathcal{E} = cBr$

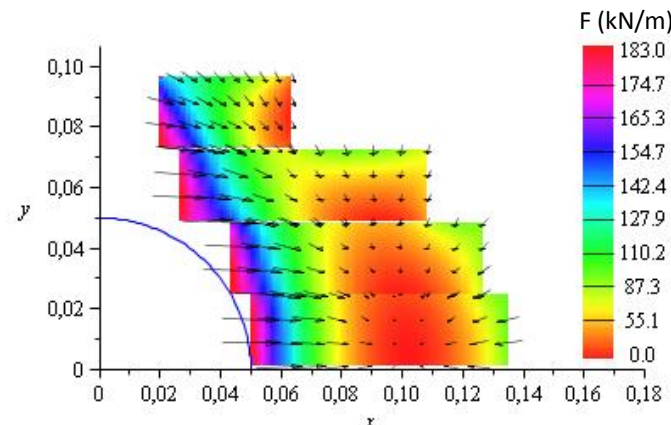
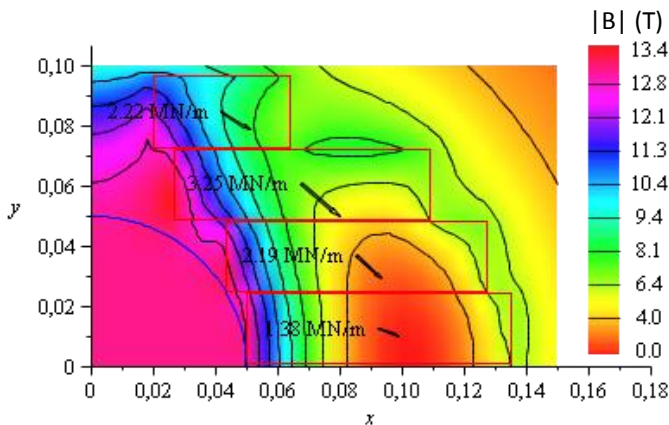
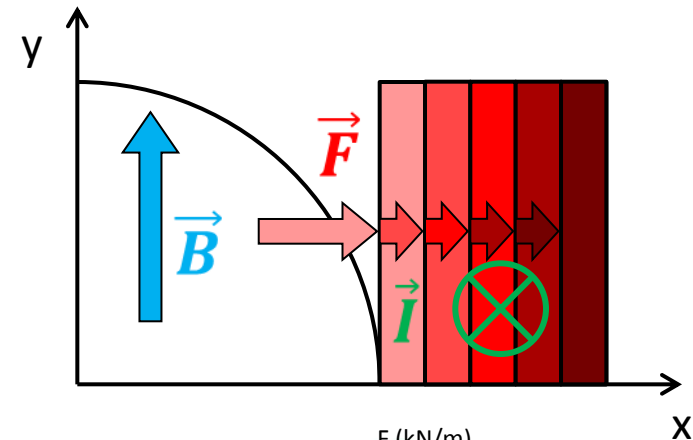
→ Augmenter l'énergie \mathcal{E} à r constant = augmenter B

→ NbTi limité en B → utiliser le Nb₃Sn ($T_c(0 T) = 18 K$)

- Electroaimants : forces de Laplace sur les conducteurs

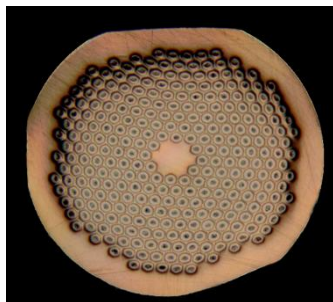
$$\vec{f}_v = \vec{j} \times \vec{B}$$

- Augmentation de **B** → augmentation de **F**
- Accumulation des forces
→ Jusqu'à 8 MN/m
→ Pression de 150 MPa sur les câbles



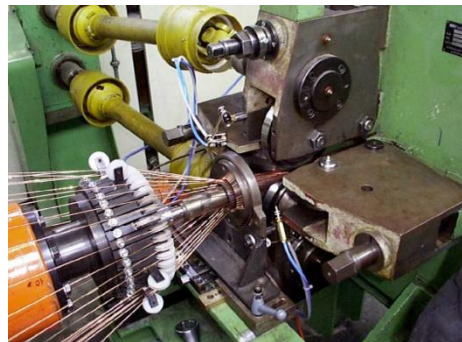
- Enjeux :
→ **Matériaux résistants** aux efforts mécaniques → isolation céramique
→ **Conceptions magnétiques** qui prennent en compte les efforts

1. Assemblage des précurseurs
→ brins multi-filamentaires

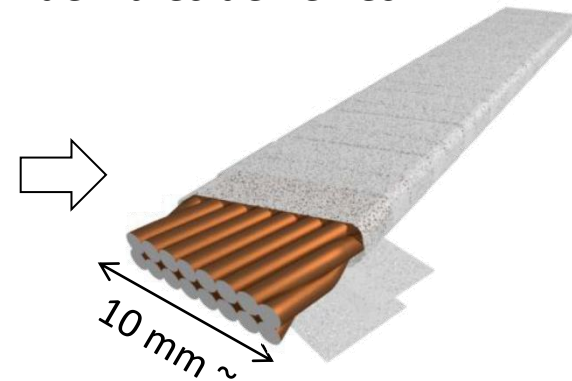


← φ 1 mm ~ →

2. Câblage des brins



3. Guipage avec une bande de fibres de verres



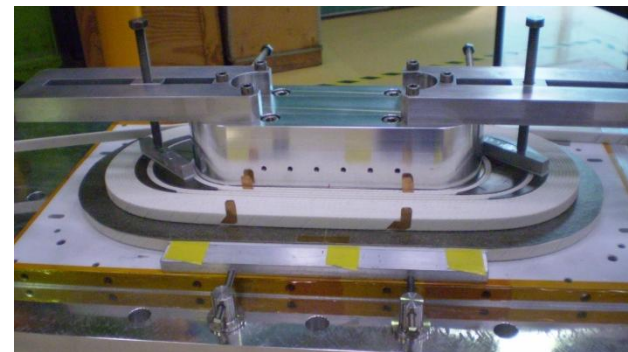
6. Isolation électrique
(Processus classique)
→ Imprégnation par résine époxy



5. Procédé métallurgique
→ Traitement Thermique (TT)
650-700 C, 100h
→ ☹️ **Fragile une fois réagi**

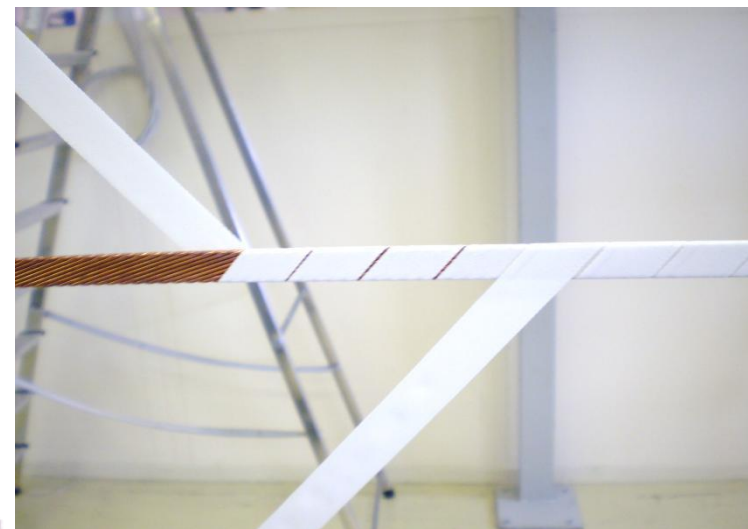
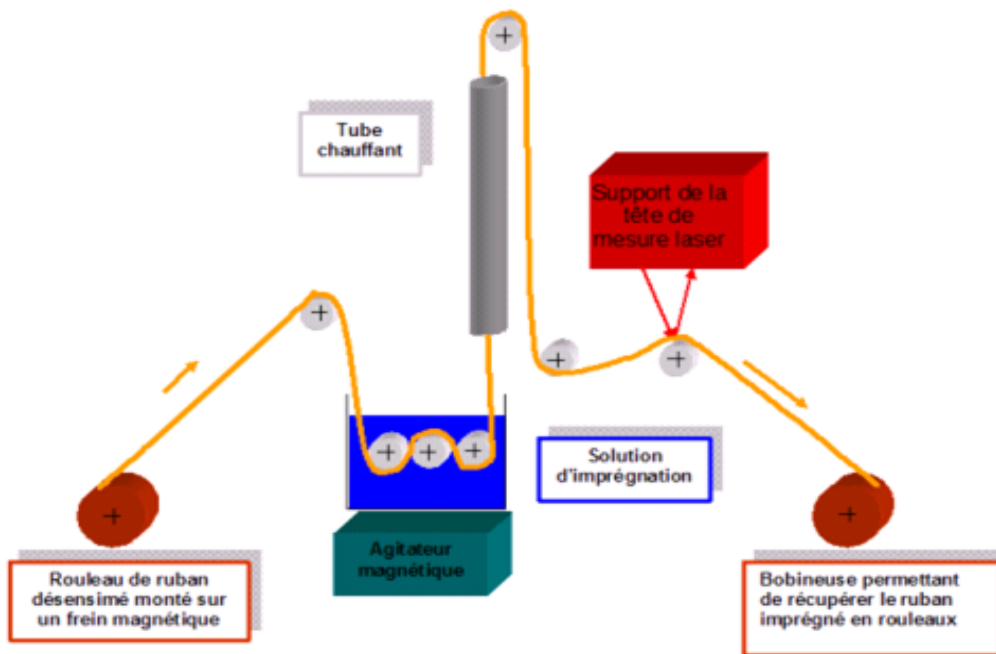


4. Bobinage de l'aimant



II. Etude de conducteurs isolés céramique

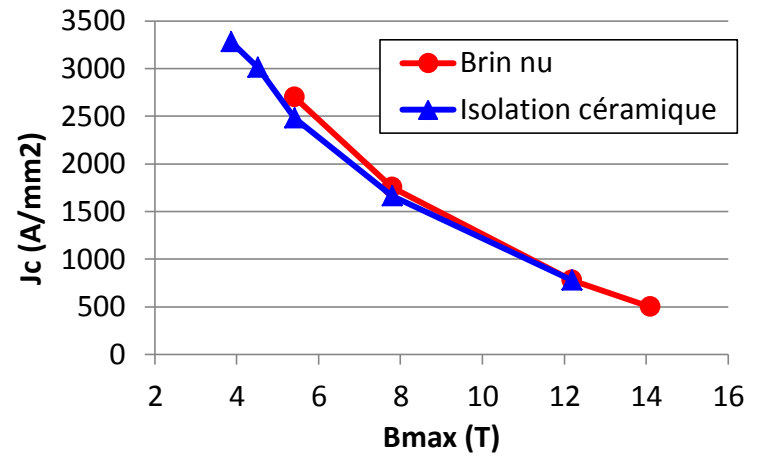
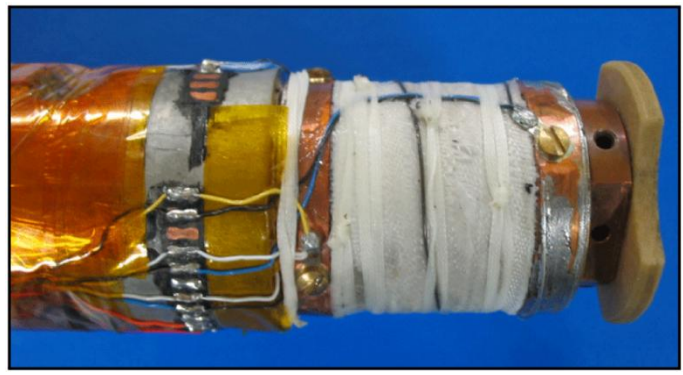
- **Problèmes des pertes faisceau :**
 - ☹ Chaleur déposée sur le câble → x5 pour le futur LHC
 - ☹ Dégradation des matériaux due aux radiations
 - Isolations classiques limitées
- Isolation céramique développée au CEA [2 brevets : J.M. Rey, S. Marchant, E. Prouzet, A. Devred (2001) & A. Puigségur, F. Rondeaux, E. Prouzet (2003)]
 - Bande fibre de verre imprégnée d'une solution argile + fritte de verre



1. L'isolation céramique

	Résine Epoxy	Céramique CEA
Tenue à 650°C	☹️	😊
Evacuation chaleur	☹️	😊 [S. Pietrowicz, B. Baudouy, ICMC2011]
Résistance aux radiations	☹️	😊
Résistance diélectrique	😊	😊
Tenue mécanique	😊	?
Influence sur J_c	😊	?

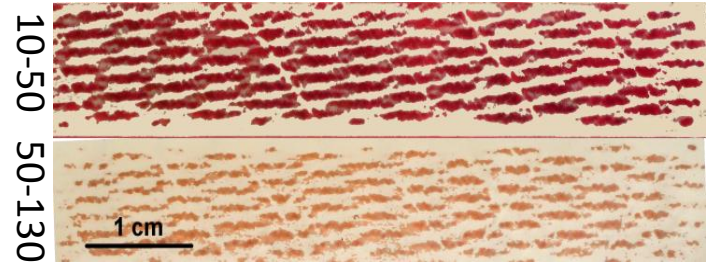
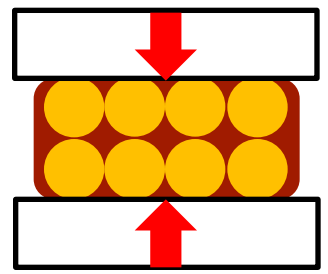
- Solénoïde isolé céramique → pas de dégradation de J_c 😊



[A. Puigsegur, thèse, 2005]

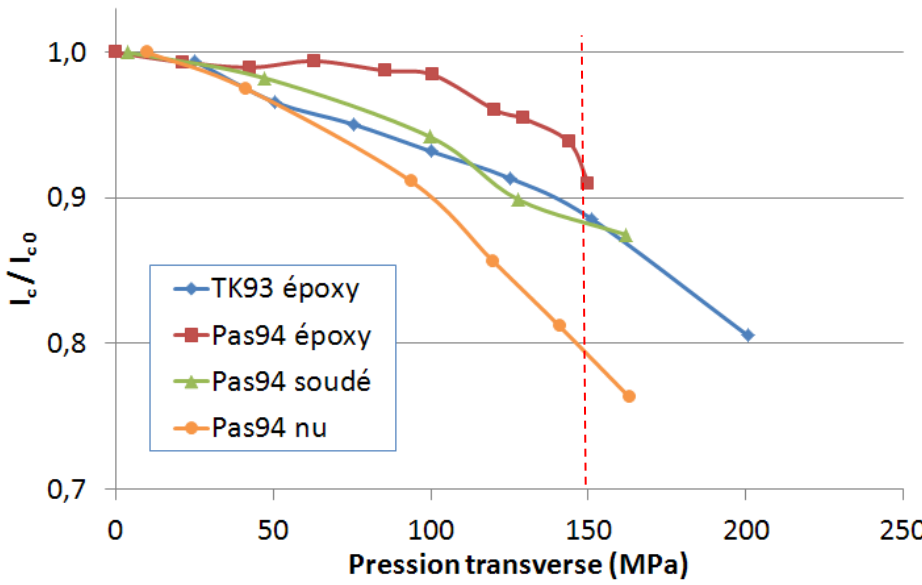
2. La sensibilité du Nb₃Sn à la contrainte

Nb₃Sn très sensible à la contrainte mécanique :

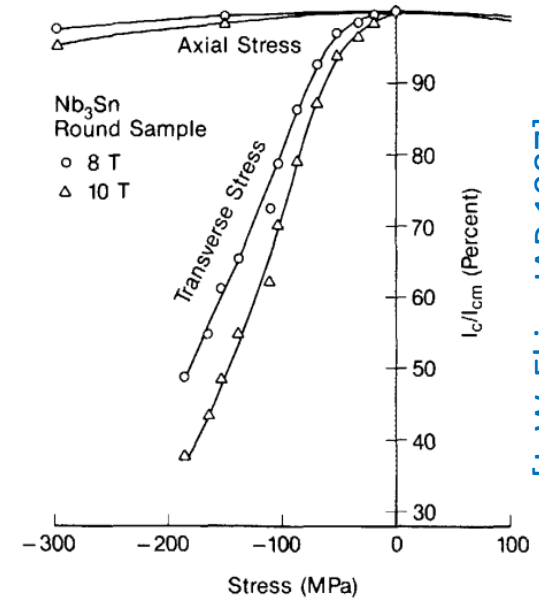


Film sensible, serrage à 40 MPa

→ Un câble non imprégné est plus sensible



[G. Pasztor et al., IEEE 1994]

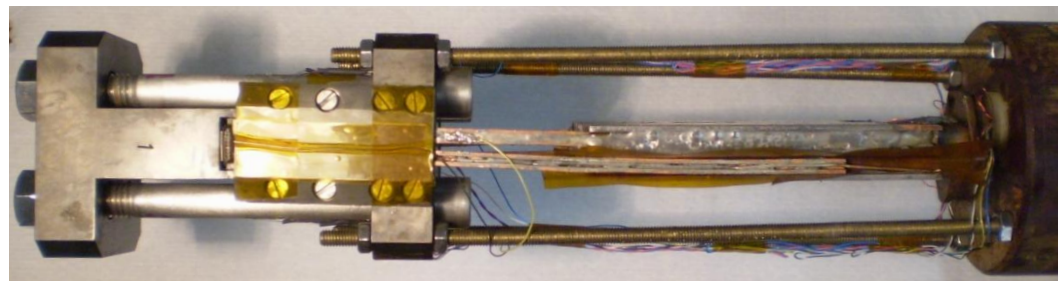
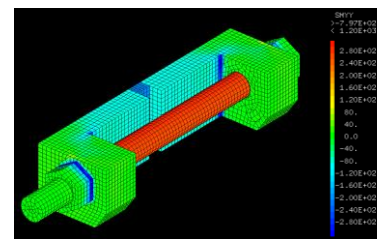
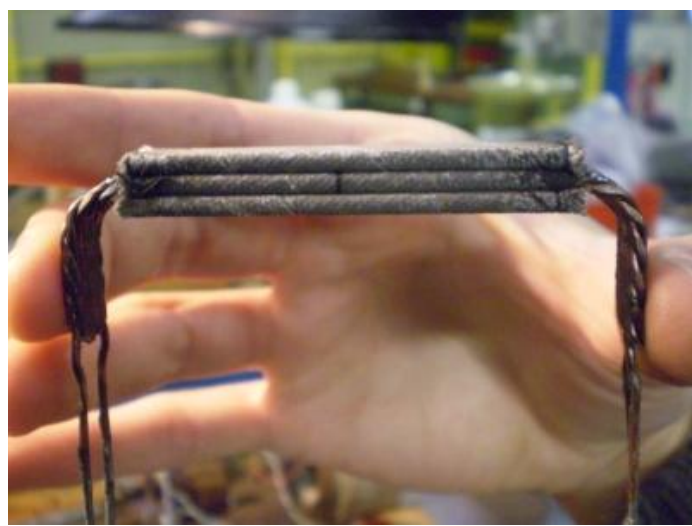
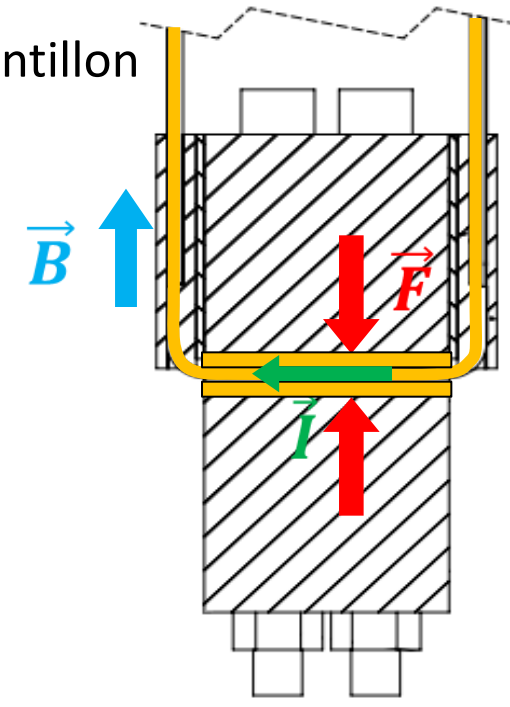


[J. W. Ekin, JAP 1987]

Problématique n°1 (Pb1):
La tenue mécanique de l'isolation céramique est-elle suffisante ?
Quel est le courant critique des câbles isolés céramique ?

3. Mesures de courant critique

- Premiers tests de I_c sur câbles avec isolation céramique CEA [E. Rochepault et al., IEEE 2012]
- Expérience CEA : conception d'un nouveau porte-échantillon
 - Echantillon en forme de U
 - **Champ B** extérieur jusqu'à 11 T
 - **Force F** ajustable sur le câble
 - Adapté pour l'isolation céramique
 - **Courant I** limité à 1800 A : un seul brin à la fois



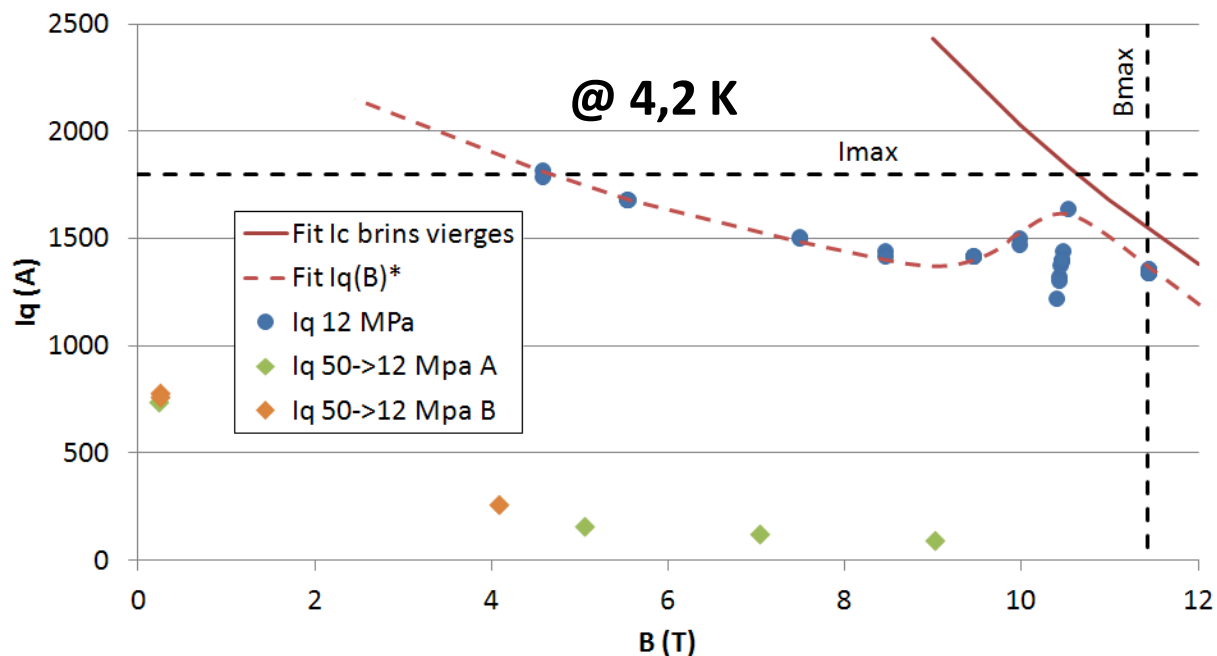
3. Mesures de courant critique

- Brin PIT, ϕ_{brin} 1,25 mm, ϕ_{fil} 50 μ m, J_c (12T; 4,2K) = 2300 A/mm²

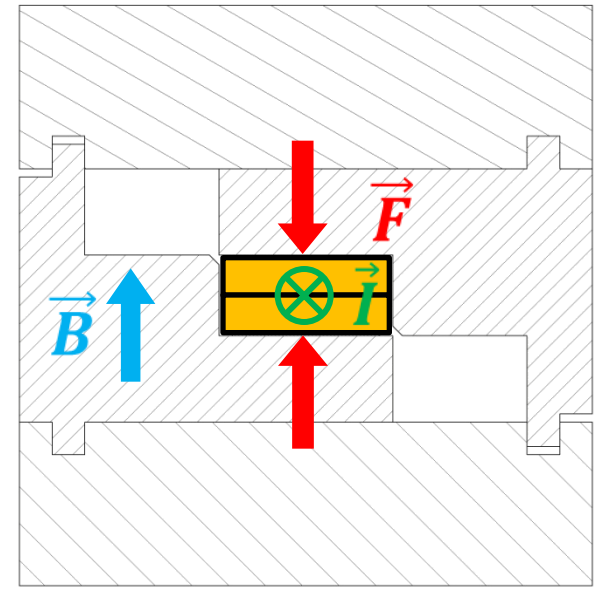
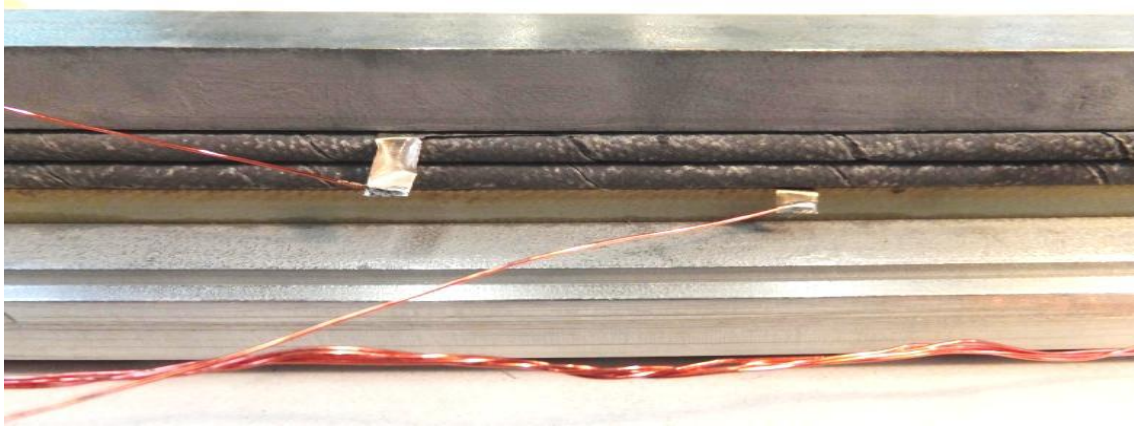
Echantillon témoin

Câble SMC 14 brins

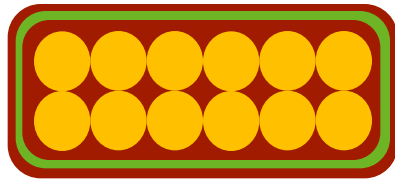
- Instabilité mécanique du câble → Mouvements de brins
→ Quenches prématurés
- Essai 1 : pression 12 MPa
Haut champ (10-11 T) :
10% dégradation
Champ < 10 T :
instabilité champ propre
[\[B. Bordini & L. Rossi, IEEE 2009\]](#)
- Essai 2 : pression 50 MPa
90% dégradation
- Essai 3 : retour à 12 MPa
dégradation irréversible



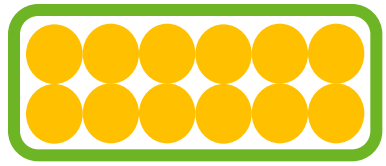
- Collaboration avec le CERN : expérience FRESCA
 - 2 câbles, soudés à une extrémité
 - **Champ B** extérieur jusqu'à 9 T
 - **Force F** ajustable
 - Câble alimenté entièrement



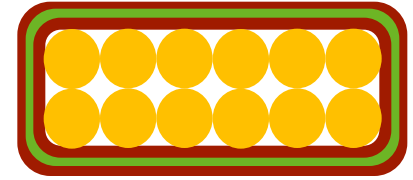
• 3 types d'isolation



Imprégné Epoxy



Non imprégné



Céramique

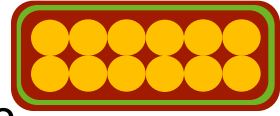
● Brin

— Bande

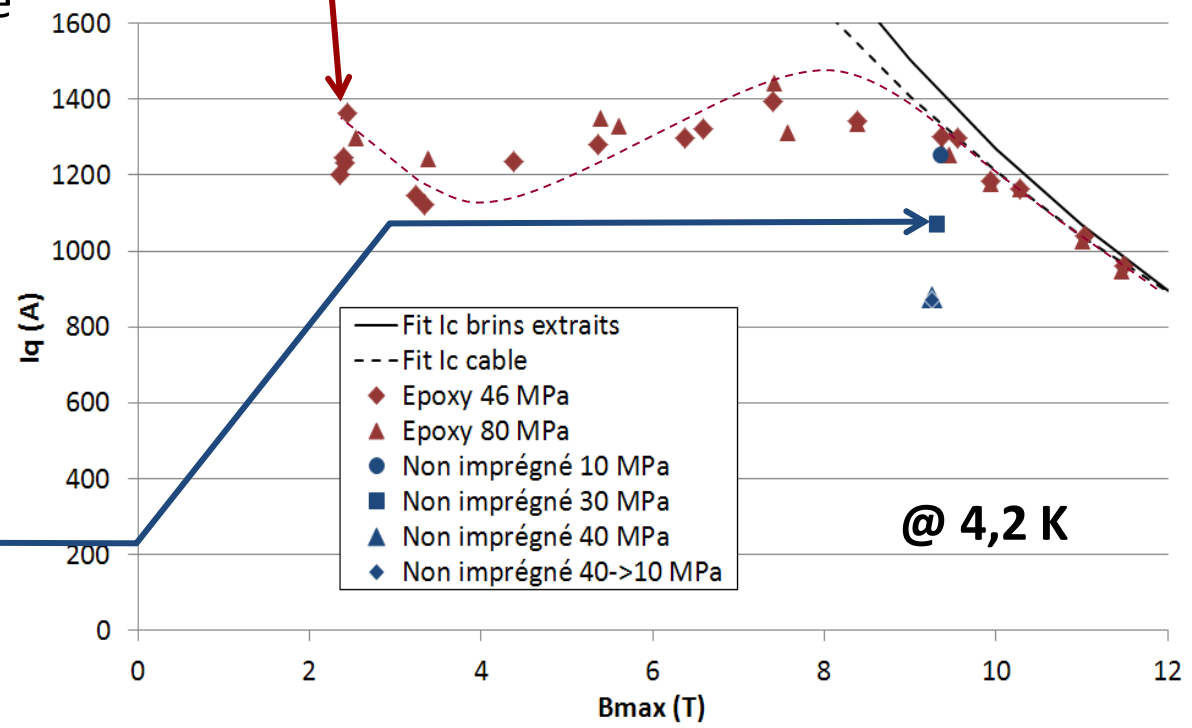
— Imprégnation

3. Mesures de courant critique

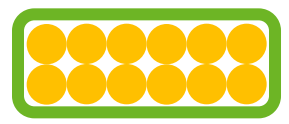
- **Câble imprégné époxy**
 - Peu de bruit de mesure
 - Instabilité champ propre
 - Essai 1 : 46 MPa
10 % dégradation
 - Essai 2 : 80 MPa
10 % dégradation



18 brins PIT, ϕ_{brin} 1 mm, ϕ_{fil} 50 μ m,
 J_c (12T; 4,2K) = 2300 A/mm²

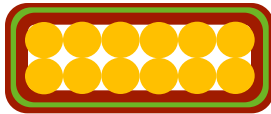


- **Câble non imprégné**
 - Mesures bruitées
 - Quenches prématurés
 - Essai 1 : 10 MPa
10 % dégradation
 - Essai 2 : 30 MPa
25 % dégradation



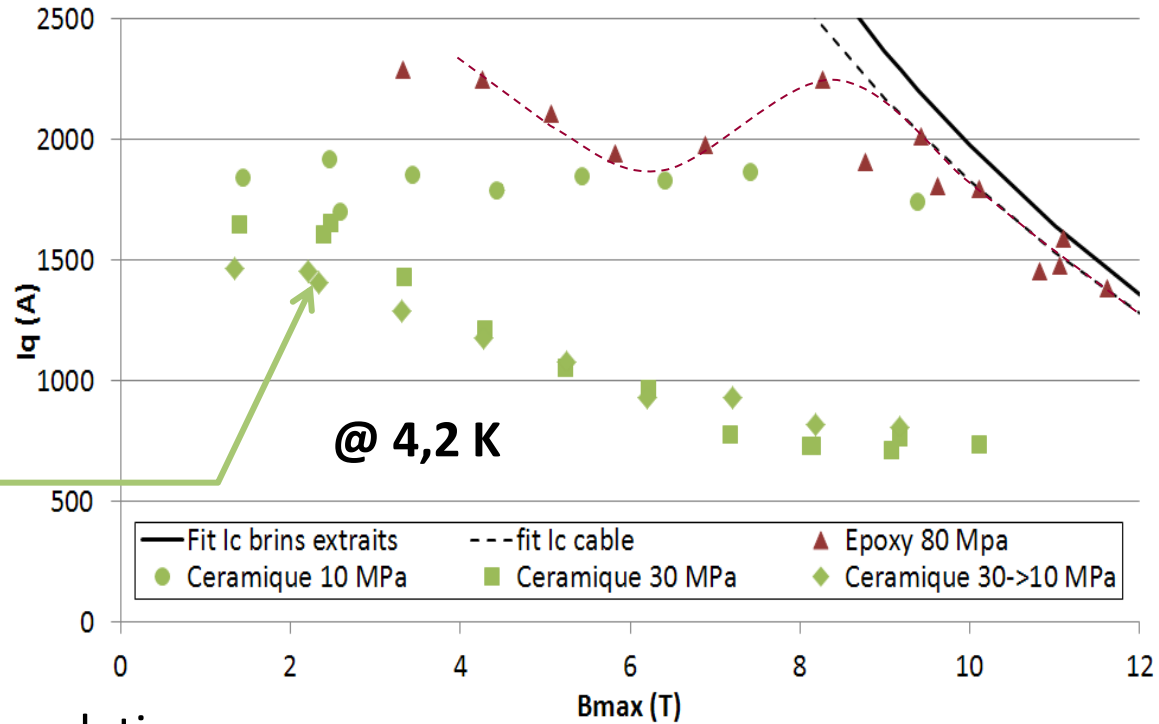
- Essai 3 : 40 MPa
40 % dégradation
- Essai 4 : retour à 10 MPa
dégradation irréversible (40 %)

14 brins PIT, Φ 1,25 mm,
 J_c (12T; 4,2K) = 2300 A/mm²



• Câble isolé céramique

- Mesures bruitées
- Quenches prématurés
- Pas de transition mesurée
- Essai 1 : 10 MPa : 10 % dégradation
- Essai 2 : 30 MPa : 65 % dégradation
- Essai 3 : retour à 10 MPa : **dégradation irréversible (65 %)**



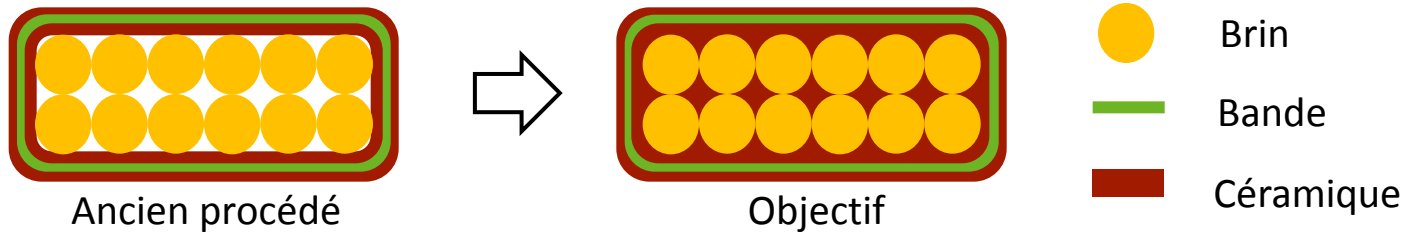
→ Les câbles non imprégnés ne supportent pas la pression transverse

Les céramiques frittées peuvent résister à des compressions de 5 GPa !

Comment améliorer la tenue mécanique de l'isolation céramique ?

- Améliorer le frittage : gamme de frittage 900-1600°C
 - excursion à 1000°C → pas d'effet qualitatif ☹️
 - augmenter taux de fritte de verre → mauvaise plasticité ☹️
 - appliquer à d'autres supras : Nb₃Al (800°C), MgB₂ (900°C), Bi2212 (900°C)

- Remplir les interstices inter-brins



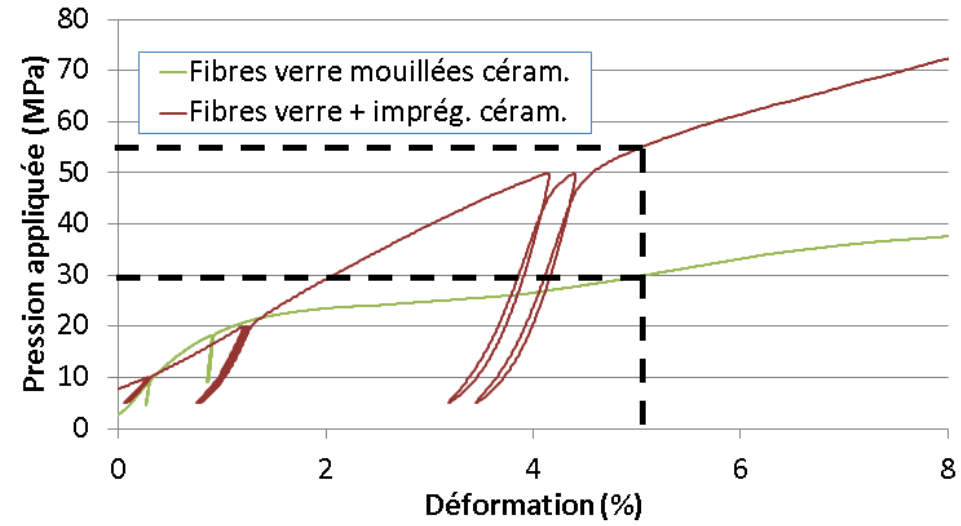
- Porosité diminuée = refroidissement diminué
 - compromis à trouver
 - conductivité thermique meilleure pour céramiques que pour résines 😊
- Augmenter la résistance de la bande → fibres céramiques

→ **Matériaux céramiques : potentiels sur le plan mécanique et thermique**

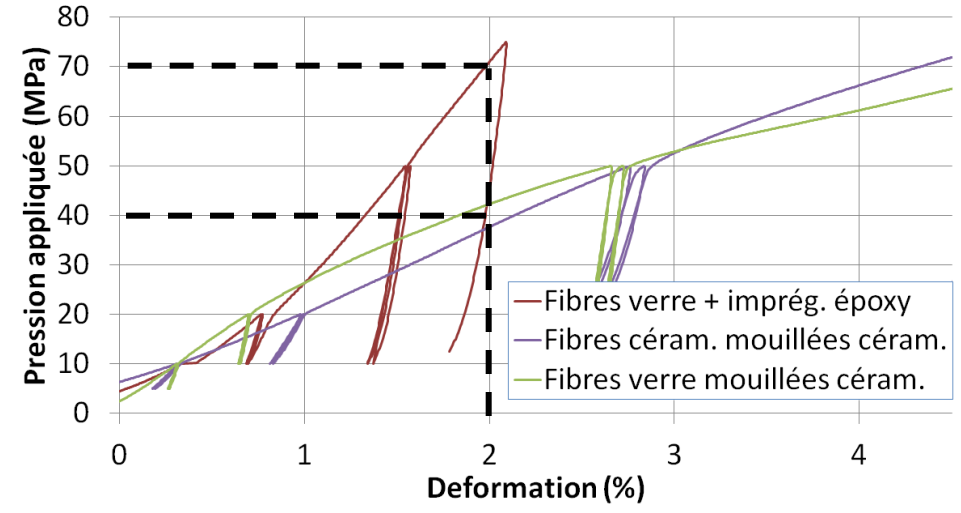
Empilements de câbles



Mini-racetracks



Moulage : pas d'amélioration suffisante



Fibres céramiques : pas d'amélioration visible

→ Pb1 : L'isolation céramique ne permet pas d'atteindre des pressions élevées

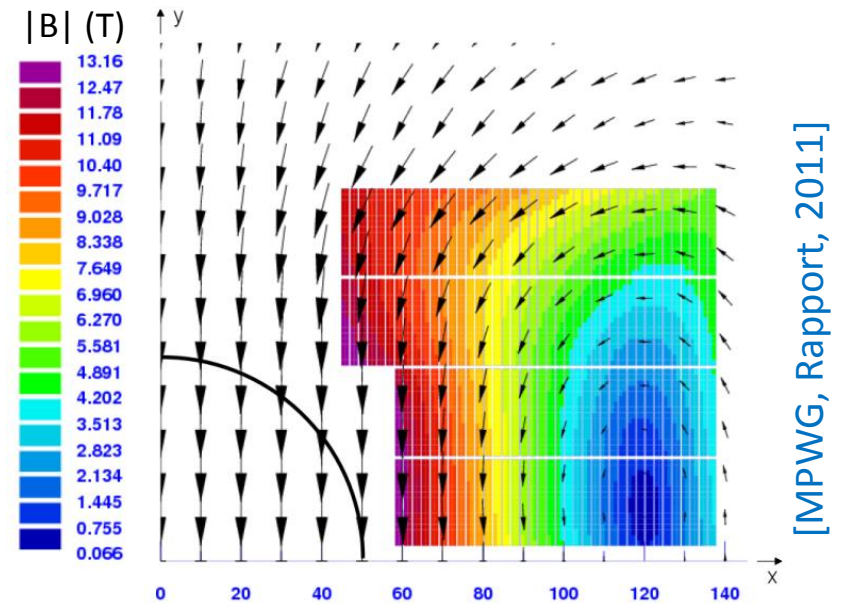
III. Proposition de conceptions magnétiques

1. La conception magnétique

- Stabilité du faisceau → homogénéité de champ
 $B_y = B_1 + \sum_n B_n \cos(n - 1) \theta \rightarrow$ minimiser les B_n } ⇒ Optimisation transverse 2D
- Marges de fonctionnement I/I_c
- Nb_3Sn sensible à la contrainte → gérer les efforts ⇒ Conception « blocs »

→ Principe validé au LBNL [P. Ferracin, IEEE, 2010] et à TAMU [A. McInturff, IEEE, 2011]
 → Projets en cours : EDIPO [A. Portone, IEEE, 2011] et FRESCA2 [G. de Rijk, IEEE, 2011]
 $B_1 \sim 13$ T, ouverture ~ 100 mm

Problématique n°2 (Pb2):
Quelles formes 2D de bobinage permettent de respecter ces contraintes pour des aimants à haut champ ?



[MPWG, Rapport, 2011]

Raccorder les parties droites avec des têtes de bobines

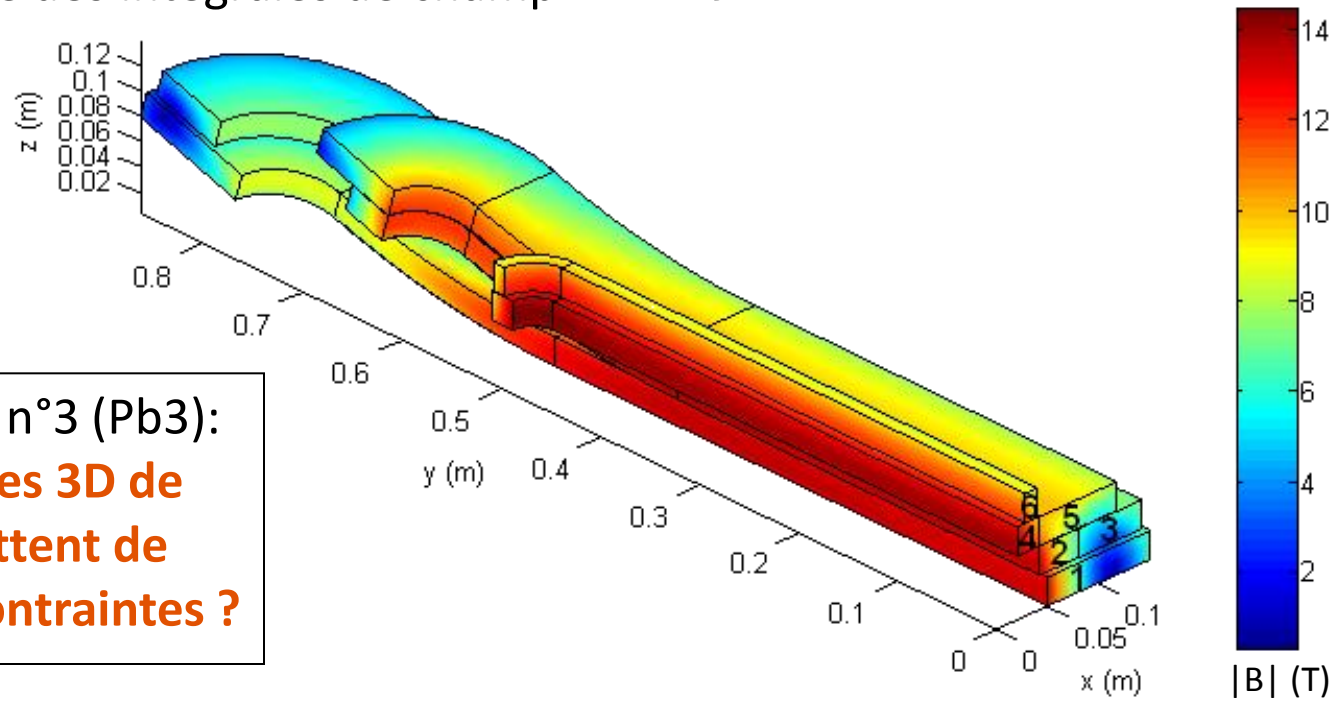
- Respecter la courbure limite du conducteur
- Quantité de mouvement donnée aux particules :

$$\Delta p_x = q \int B_y dz$$

Trajectoire stable

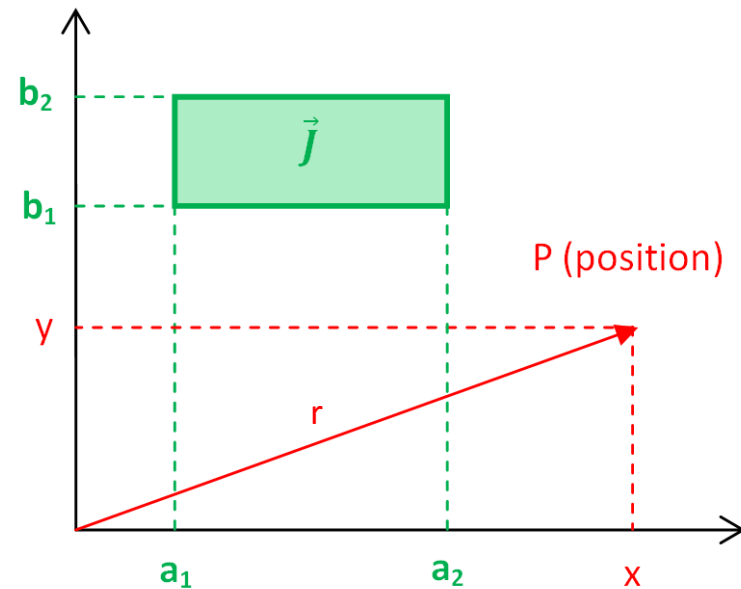
→ homogénéité des intégrales de champ

Optimisation 3D des têtes de bobine
Peu de références dans la littérature



Problématique n°3 (Pb3):
Quelles formes 3D de têtes permettent de respecter ces contraintes ?

- Configuration en blocs rectangulaires
→ modélise un câble, un ruban ou un bloc
- Formules analytiques [G. Aubert]
→ Champ magnétique
→ Harmoniques de champ
→ Forces intégrées sur le bloc
- Avantages/Inconvénients de l'approche :
 - Très rapide 😊
 - Très précis 😊
 - Pas besoin d'analyse de Fourier 😊
 - Pas de solution pour le fer non linéaire ☹️



$$B_{x,bloc}(x, y) = -\frac{\mu_0 J}{4\pi} \left[\left[(x-a) \ln R^2 + 2(y-b) \arctan \left(\frac{x-a}{y-b} \right) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2}$$

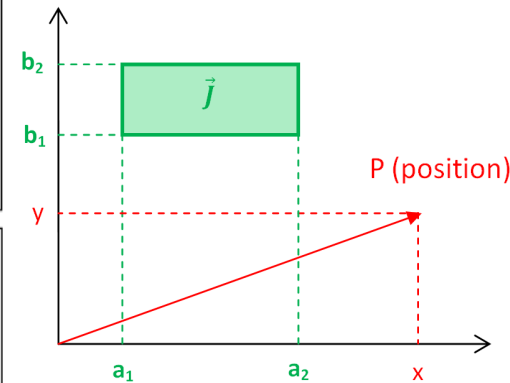
$$A_n = -\frac{\mu_0 J}{2\pi} \left[\left[c \left(\frac{r}{c} \right)^{n-1} \frac{\sin(n-2)\alpha}{(n-1)(n-2)} \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2} \quad \forall n \geq 3$$

$$B_{y,bloc}(x, y) = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \left[\left[(y-b) \ln R^2 + 2(x-a) \arctan \left(\frac{y-b}{x-a} \right) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2}$$

$$B_n = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \left[\left[c \left(\frac{r}{c} \right)^{n-1} \frac{\cos(n-2)\alpha}{(n-1)(n-2)} \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2} \quad \forall n \geq 3$$

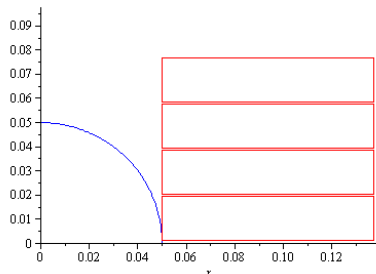
$$F_{x,i} = \sum_{j=1}^{N_{blocs}} -\frac{\mu_0 J^2}{4\pi} \left[\left[(y-b)(x-a)^2 \arctan \frac{y-b}{x-a} + \frac{1}{3}(y-b)^3 \arctan \frac{x-a}{y-b} + \frac{2}{3}(x-a)^3 \ln(y-b) + \frac{(x-a)}{2} \left\{ (y-b)^2 - \frac{1}{2}(x-a)^2 \right\} \ln R^2 - \frac{5}{6} \left\{ (x-a)^2 + \frac{1}{3}(y-b)^2 \right\} \right]_{a_{1,j}}^{a_{2,j}} \right]_{b_{1,j}}^{b_{2,j}} \quad (6.31)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{b}{a} \right)$$



$$F_{y,i} = \sum_{j=1}^{N_{blocs}} -\frac{\mu_0 J^2}{4\pi} \left[\left[(x-a)(y-b)^2 \arctan \frac{x-a}{y-b} + \frac{1}{3}(x-a)^3 \arctan \frac{y-b}{x-a} + \frac{2}{3}(y-b)^3 \ln(x-a) + \frac{(y-b)}{2} \left\{ (x-a)^2 - \frac{1}{2}(y-b)^2 \right\} \ln R^2 - \frac{5}{6} \left\{ (y-b)^2 + \frac{1}{3}(x-a)^2 \right\} \right]_{a_{1,j}}^{a_{2,j}} \right]_{b_{1,j}}^{b_{2,j}} \quad (6.32)$$

- Formules implantées dans un code d'optimisation Maple® [E. Rochepault et al., IEEE 2012]
 - 4 degrés de liberté par bloc
 - Résultat en quelques minutes (Core™ 2 Duo, 2,66 GHz, 3 Go RAM)



Objectif de minimisation :

- Coût en conducteur
- Harmoniques
- Forces

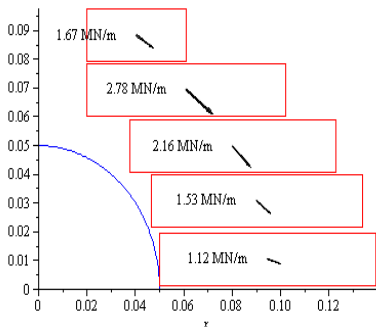
Spécifications :
 Champ au centre, ouverture, densité de courant

Contraintes :

- Géométriques
- Harmoniques
- Marges
- Forces
- ...

Optimisation non linéaire

Coordonnées des blocs
 ($a_{1_i}, a_{2_i}, b_{1_i}, b_{2_i}$)



Quelques exemples académiques :

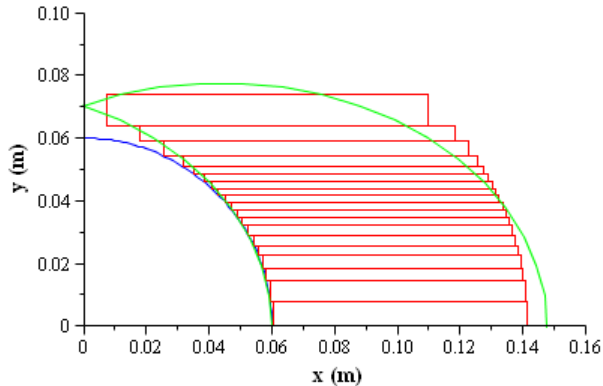
- Champ au centre $B_1 = 13 \text{ T}$
- 100 mm d'ouverture
- $J_{\text{bloc}} = 260 \text{ A/mm}^2$

$$\text{THD} = \sum_{p=1}^{10} \frac{B_{2p+1}^2}{B_1^2}$$

1 unité = $10^{-4} B_1$
aux 2/3 de l'ouverture

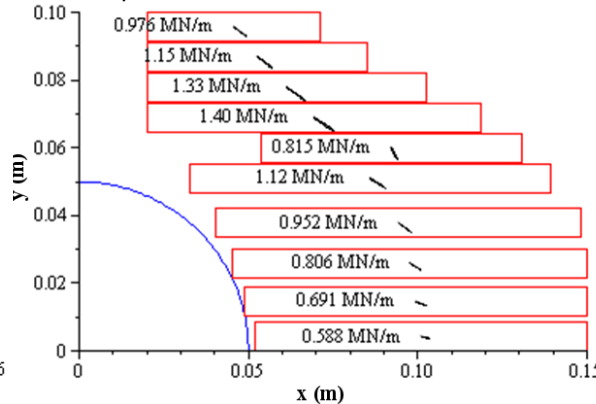
Objectif : 1. Volume min.

Contraintes : Tous les B_{2p+1} nuls



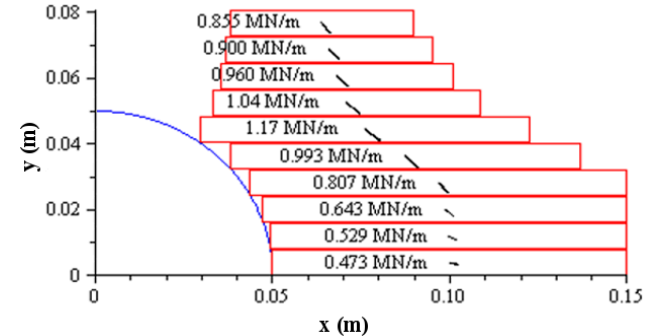
2. Volume min.

B_{2p+1} nuls $p \leq 10$, géométrie



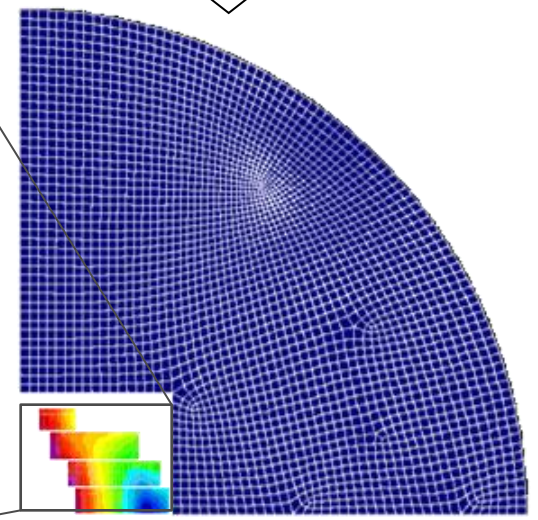
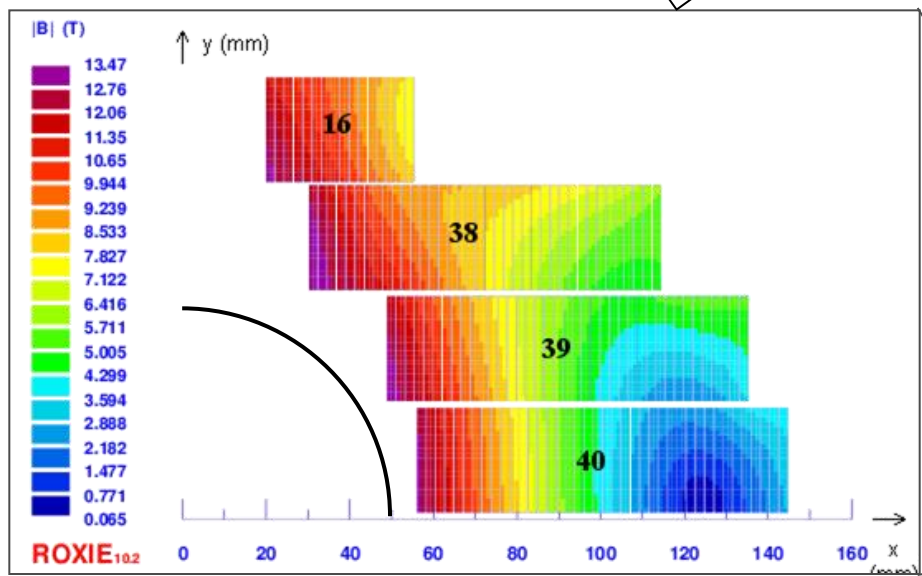
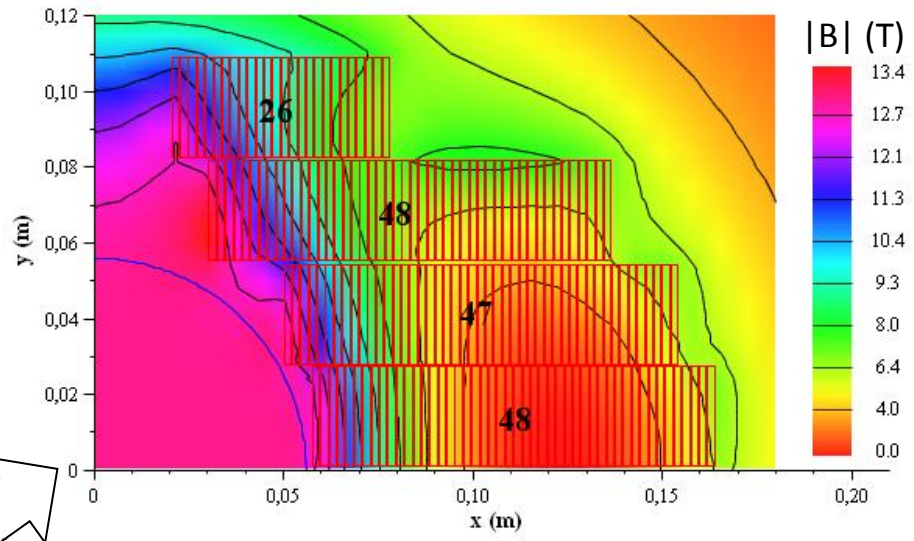
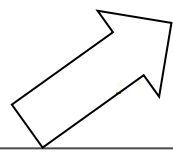
3. Forces min.

géométrie



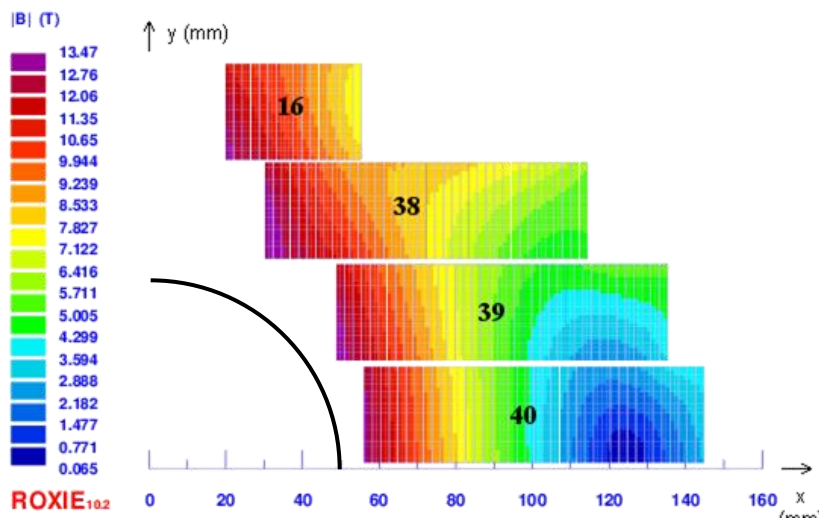
Design	N (blocs)	Section (mm ²)	B_{max} (T)	Marge (%)	THD (unités)	$F_{y,\text{tot}}$ (MN/m)	$F_{x,\text{max}}$ (MN/m)	P_y (MPa)	$P_{x,\text{max}}$ (MPa)
1	19	6 601	13,2	14,0	$<10^{-5}$	3,08	1,82	66,7	179
2	10	7 543	13,6	12,2	$2,5 \cdot 10^{-3}$	3,21	1,40	79,9	104
3	10	6 488	13,5	12,4	204	2,73	1,17	71,9	120

1. Cahier des charges FRESCA2
[HFM Magnet Design Working Group, 2011]
→ Nb₃Sn, 13 T, ouverture 100 mm
2. Optimisation sans fer
→ B_n = 1 unité
3. Calcul avec fer (ROXIE)
→ B₃ = -5 unités, B₅ = +3 unités
4. Optimisation sans fer
→ B₃ = 0, B₅ = 0

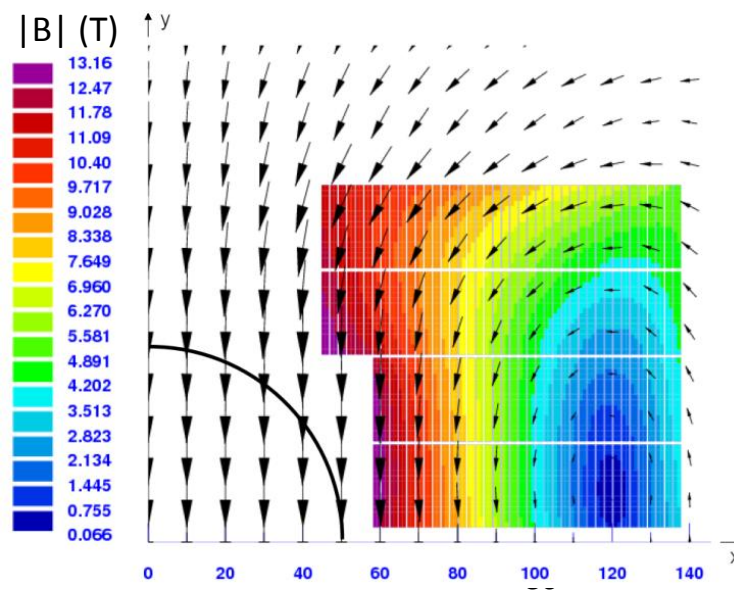


2. Optimisation 2D

Paramètre	Sans fer	Avec fer	FRESCA2 (avec fer)
N (tours)	169	133	156
Section (mm ²)	8031	5684	6076
B _{max} (T)	13.4	13.5	13.2
Marge (%)	16.8	16.0	17.3
THD (unités)	1.89	0.94	60.7



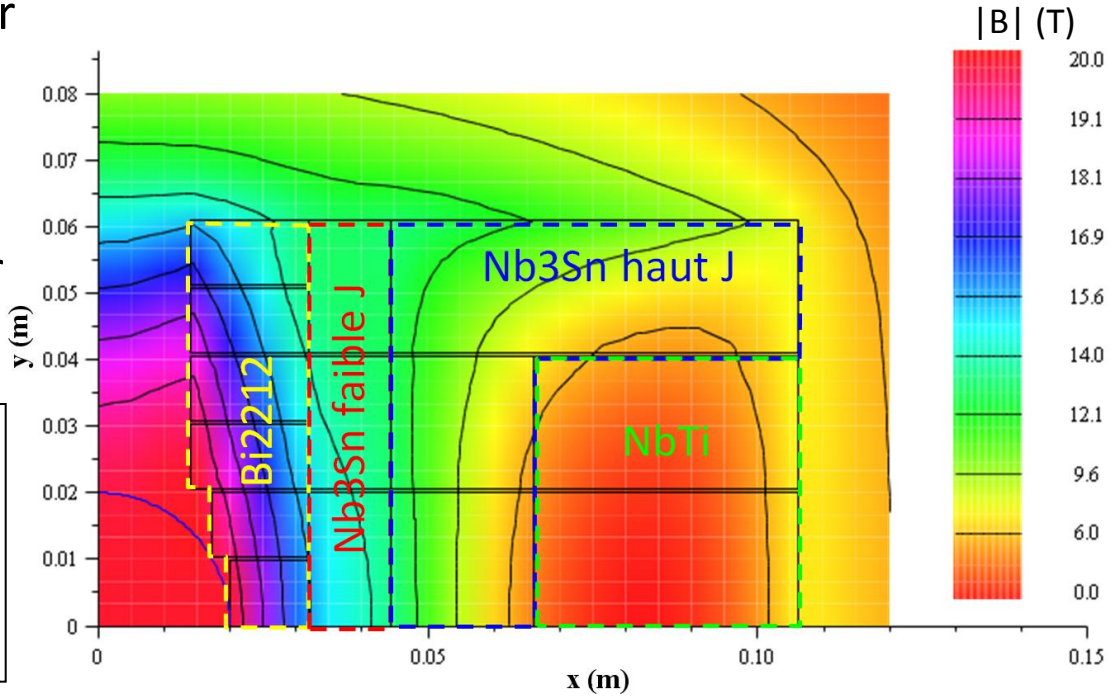
Optimisation avec fer



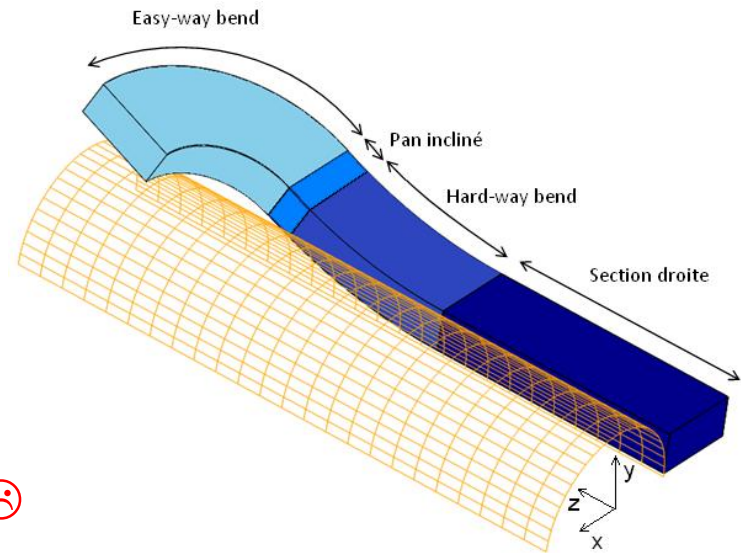
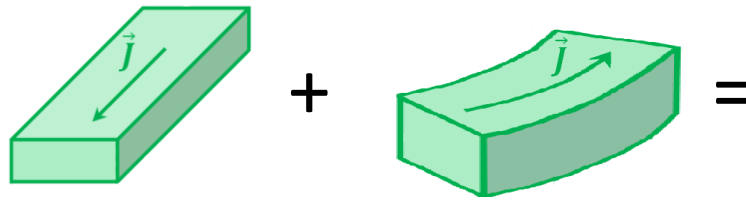
FRESCA2

- Cahier des charges inspiré du projet HE-LHC → énergie x 2,5 (2035)
[Rossi & Todesco, IEEE 2011]
 - Hybride Nb₃Sn + NbTi + HTS
 - 20 T au centre
 - 40 mm d'ouverture
- Minimisation du coût en conducteur, sans culasse en fer
 - Marge de fonctionnement imposée = 20 %
 - 5400 mm² de conducteur
- Design HE-LHC pour comparaison :
 - Culasse en fer
 - 5400 mm² de conducteur

➔ **Pb2 : Nouvelle méthode pour optimiser en 2D des aimants d'accélérateurs à haut champ.**



- Configuration en blocs rectangulaires
 - modélise une galette ou un tour de bobinage
 - Formules analytiques pour blocs et arcs [J. Sackett, IEEE, 1975], [L. Urankar, IEEE, 1982], [G. Aubert]



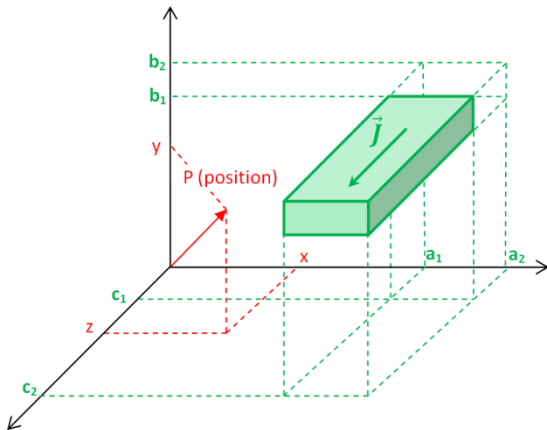
- Avantages/Inconvénients de l'approche :
 - Rapide, précis 😊
 - Besoin d'une analyse de Fourier ☹️
 - Pas de solution pour le fer non linéaire ☹️
- Formules implantées dans un code d'optimisation Fortran [E. Rochepault et al., Numélec 2012]
 - 6 degrés de liberté par bloc
 - Objectif : minimisation des intégrales d'harmoniques
 - Contraintes géométriques et mécaniques

3. Optimisation 3D, modèle blocs

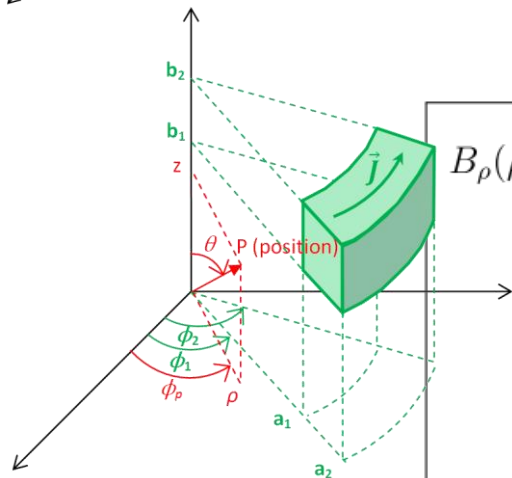
$$B_x = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \left[\left[\left[-(z-c) \operatorname{arcth} \left(\frac{x-a}{r} \right) - (x-a) \operatorname{arcth} \left(\frac{z-c}{r} \right) + (y-b) \operatorname{arctan} \left(\frac{(x-a)(z-c)}{r(y-b)} \right) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2} \right]_{c_1}^{c_2} \quad (7.4)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \left[\left[\left[(z-c) \operatorname{arcth} \left(\frac{y-b}{r} \right) + (y-b) \operatorname{arcth} \left(\frac{z-c}{r} \right) - (x-a) \operatorname{arctan} \left(\frac{(y-b)(z-c)}{r(x-a)} \right) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2} \right]_{c_1}^{c_2} \quad (7.5)$$

$$B_\phi(\rho, z, \phi_P) = \frac{\mu_0 J}{8\pi\rho} \left[\left[\left[(a - \rho \cos \psi) \sqrt{R} + T f_2 \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2} \right]_{\psi_1}^{\psi_2}$$



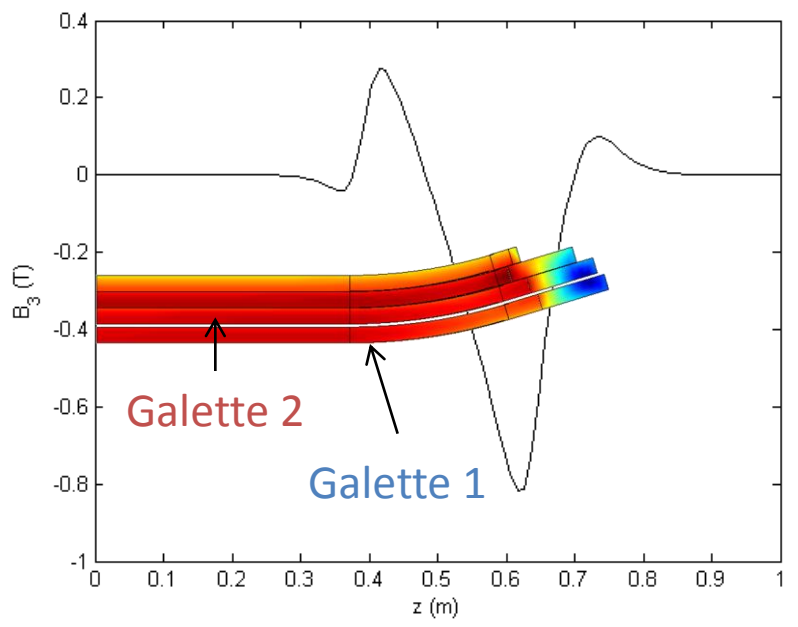
$$B_z(\rho, z, \phi_P) = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \left[\left[\left[bF_2 - \rho \sin \psi f_1 + \rho \cos \psi f_3 - \frac{b}{r_1} \left\{ 3aK \left(\frac{\pi - \psi}{2}, k \right) + r_0 \frac{r_0 + a}{\rho - r_0} \Pi \left(\frac{\pi - \psi}{2}, \nu_-, k \right) + r_0 \frac{r_0 - a}{\rho + r_0} \Pi \left(\frac{\pi - \psi}{2}, \nu_+, k \right) - a \frac{a - \rho}{a + \rho} \Pi \left(\frac{\pi - \psi}{2}, \nu, k \right) \right\} \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2} \right]_{\psi_1}^{\psi_2} \quad (7.17)$$



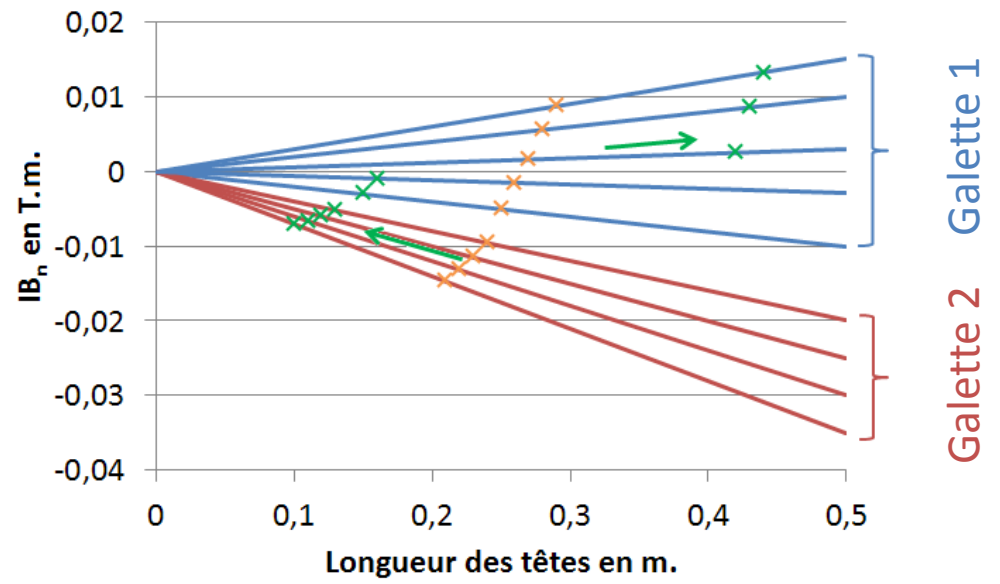
$$B_\rho(\rho, z, \phi_P) = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \left[\left[\left[\frac{1}{2} F_2 - \frac{\rho}{4} \sin(2\psi) f_2 - \frac{1}{2} \sqrt{R} \sin \psi + \frac{a}{2\rho} \left\{ r_1 E \left(\frac{\pi - \psi}{2}, k \right) - \frac{a^2 + 3b^2 - \rho^2}{r_1} K \left(\frac{\pi - \psi}{2}, k \right) \right\} + \frac{b^2 r_0}{2\rho r_1} \left(\frac{r_0 + a}{r_0 - \rho} \Pi \left(\frac{\pi - \psi}{2}, \nu_-, k \right) - \frac{r_0 - a}{r_0 + \rho} \Pi \left(\frac{\pi + \psi}{2}, \nu_+, k \right) \right) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2} \right]_{\psi_1}^{\psi_2} \quad (7.18)$$

$$IB_n = \frac{\int B_n dz}{\int B_1 dz} \text{ en unités}$$

- Pics d'harmoniques
→ minimisation de l'intégrale



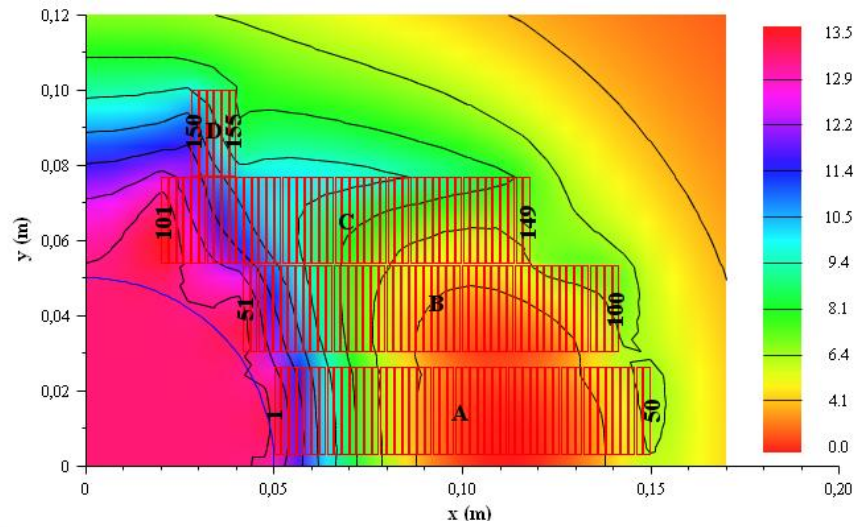
- Evolution linéaire avec la longueur des têtes δ :



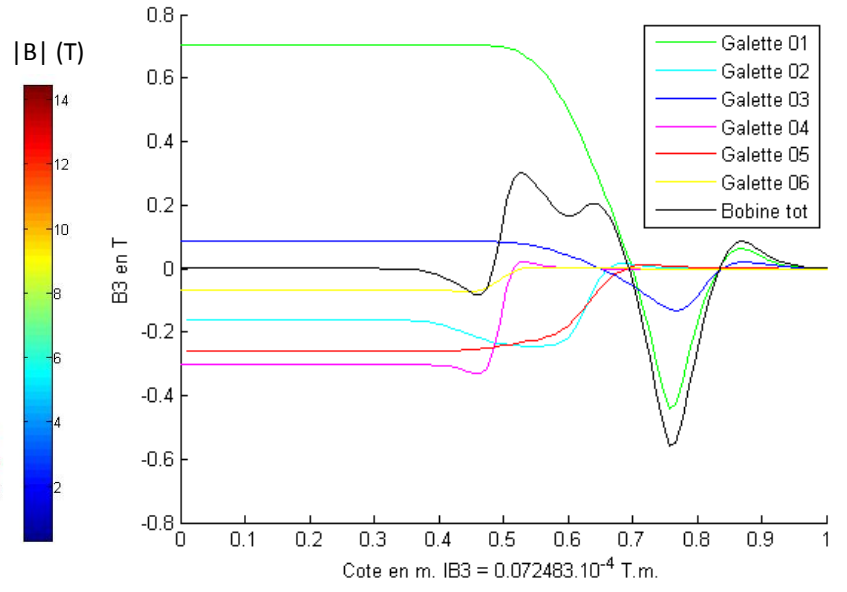
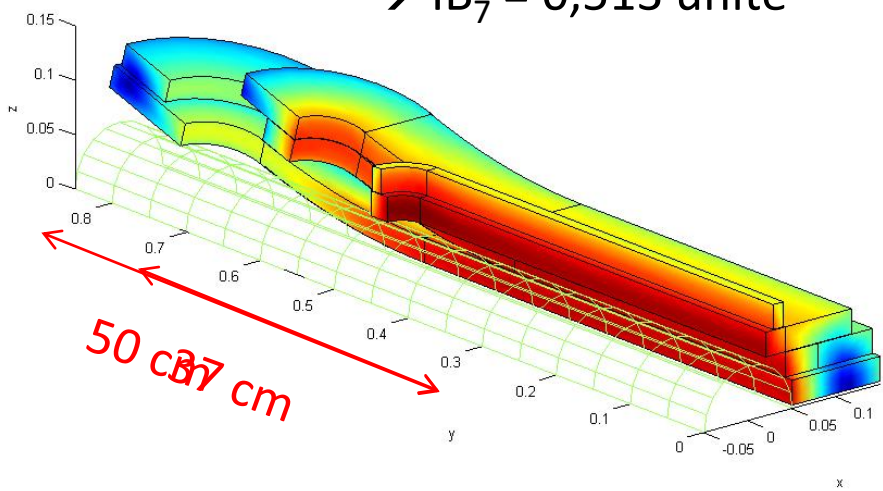
- × Point de départ de l'optimisation
- × Point d'arrivée de l'optimisation
- Evolution de la longueur des têtes

3. Optimisation 3D, modèle blocs

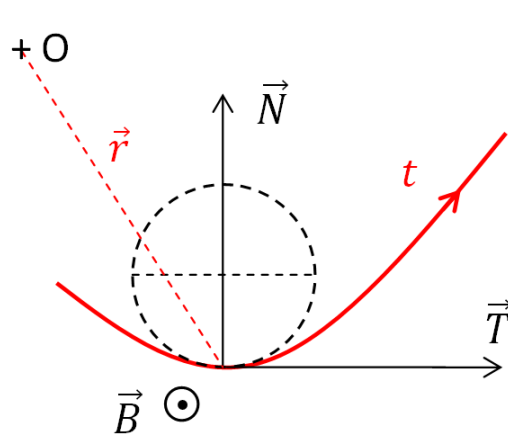
- Design 2D à 4 blocs
 - 13 T au centre
 - $B_3 = B_5 = B_7 = B_9 = B_{11} = 0$
- Raccordement au plus court :
 - $IB_3 = -5,64$ unités
 - $IB_5 = -0,564$ unité



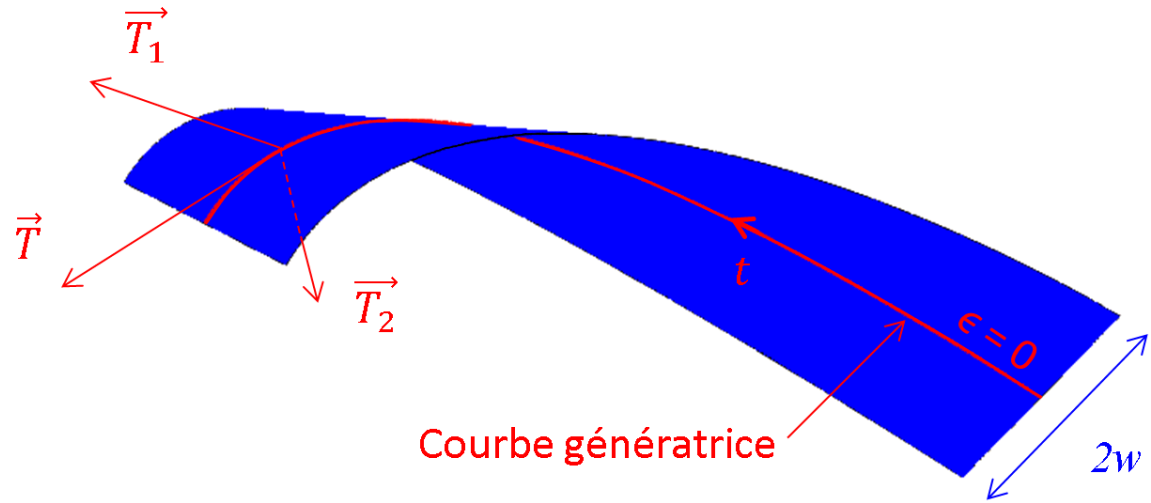
- Optimisation : 😊
 - IB_3 et $IB_5 < 5 \cdot 10^{-4}$ unités
 - $IB_7 = 0,513$ unité



Comment décrire la forme d'un ruban par-dessus un tube ?



Repère de Frenet associé à la courbe génératrice



Repère de Darboux associé au ruban

- Notion de « développable rectifiante » [G. Aubert]

→ Energie de déformation = 0 😊

$$\vec{R}(t, \epsilon) = \vec{r}(t) + \epsilon \left[\vec{B}(t) + \frac{\tau(t)}{\kappa(t)} \vec{T}(t) \right]$$

$$t \in [0, \pi] \quad \epsilon \in [-w, w]$$

- Génératrice « elliptique »

→ Ruban appuyé sur le cylindre

→ Simplifications analytiques pour le calcul du champ 😊

4. Optimisation 3D, modèle rubans

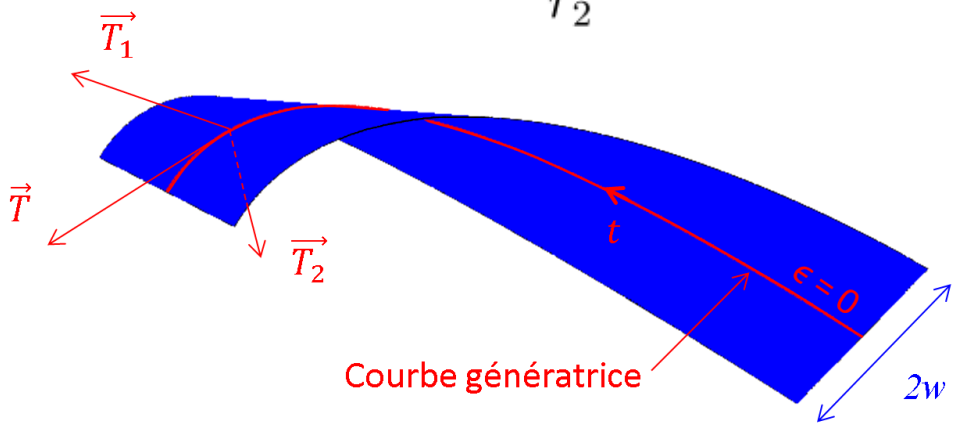
$$\int_{-\infty}^{\infty} B_y dz = \frac{\mu_0 I}{8\pi w} \int_{-w}^w \int_0^\pi f(t, \epsilon) dt d\epsilon$$

$$f(t, \epsilon) = 2\delta \cos t + 2\epsilon\delta^2\alpha^2 \frac{\cos t}{\rho_0 r_2^5} g(t, \epsilon) h_x(t, \epsilon) (h_x(t, \epsilon)^2 + h_y(t, \epsilon)^2 + \rho^2 \sin^2 \phi)$$

$$g(t, \epsilon) = \alpha^2 \psi_1^4 \sin^{12} t - 2\psi_1^2 \alpha (6\alpha - \delta^2 \psi_1^2) \sin^{10} t + \psi_1^2 (\delta^4 \psi_1^2 + 15\alpha^2 - 15\delta^2 \alpha) \sin^8 t + 2\delta^2 \psi_1^2 (11\alpha - 3\delta^2) \sin^6 t$$

$$h_x(t, \epsilon) = \rho \cos \phi + \rho_0 \sin u - \frac{\epsilon\delta}{r_2} (\psi_1 \sin^2 t \cos t \cos u - \sin u) - \frac{\sigma r_0}{r_1} \sin t \cos u$$

$$h_y(t, \epsilon) = \rho_0 \cos u + \frac{\epsilon\delta}{r_2} (\psi_1 \sin^2 t \cos t \sin u - \cos u) - \frac{\sigma r_0}{r_1} \sin t \sin u$$



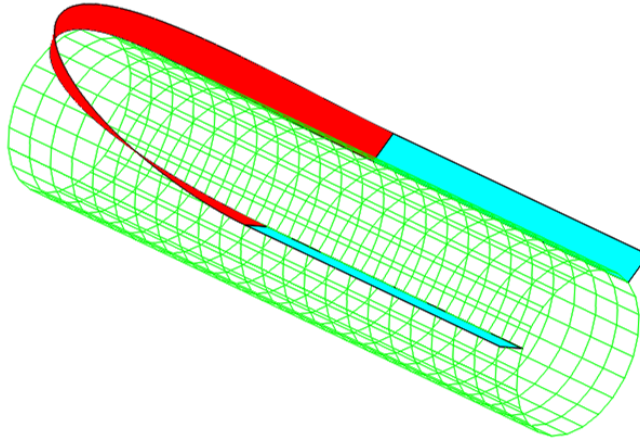
$$u = \psi_1 \cos t \quad r_0 = \rho_0 \psi_1$$

$$r_1 = \sqrt{r_0^2 \sin^2 t + \delta^2 \cos^2 t}$$

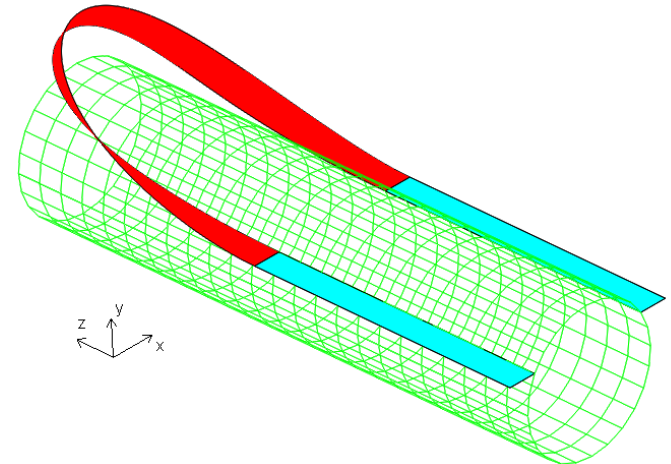
$$r_2 = \sqrt{r_0^2 \psi_1^2 \sin^6 t + \delta^2 (1 + \psi_1^2 \sin^4 t \cos^2 t)}$$

$$\sigma = -\frac{\sin \psi_1 \delta r_1^3}{r_0 r_2^3} (3 + \psi_1^2 \sin^4 t) \sin t \cos t$$

- Modèle adapté pour :



1. Disposition radiale
→ secteurs angulaires



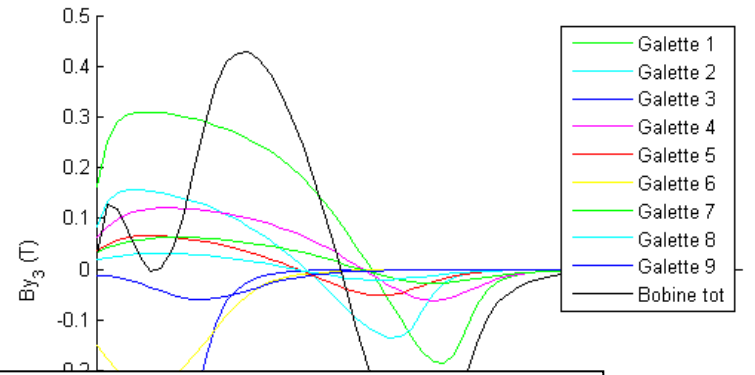
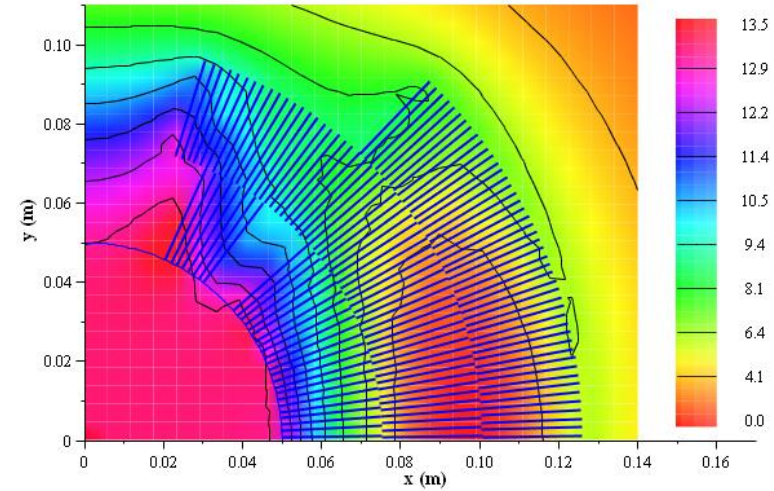
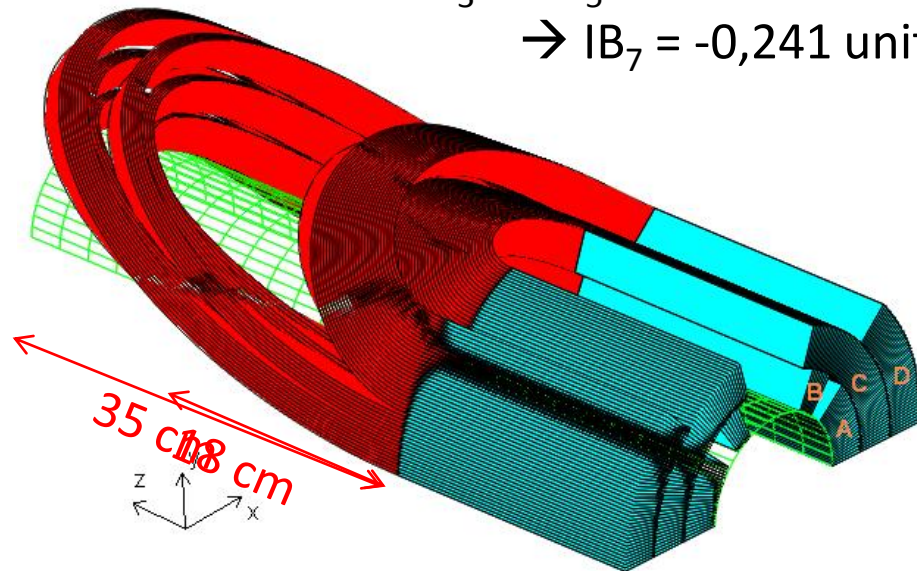
2. Disposition horizontale
→ blocs rectangulaires

- ...et pour toutes les dispositions situées entre les 2
- Avantages/Inconvénients de l'approche :
 - Rapide, précis 😊
 - Pas de solution pour le fer non linéaire 😞
- Code d'optimisation Fortran
 - 1 degré de liberté par ruban
 - Objectif : minimisation des intégrales d'harmoniques
 - Contraintes géométriques et mécaniques

4. Optimisation 3D, modèle rubans

- Design 2D à 4 secteurs angulaires
 - 13 T au centre
 - $B_3 = B_5 = B_7 = 0$
- Raccordement au plus court :
 - $IB_3 = -2,87$ unités
 - $IB_5 = -0,343$ unité

- Optimisation : 😊
 - IB_3 et $IB_5 < 5 \cdot 10^{-4}$ unités
 - $IB_7 = -0,241$ unité



➔ Pb3 : 2 nouvelles méthodes pour optimiser en 3D des aimants d'accélérateurs.

IV. Conclusion

- **Isolation céramique CEA**

- Premiers tests sur câbles Nb_3Sn → tenue mécanique insuffisante ☹️
- courant critique dégradé ☹️
- Tentatives d'amélioration du procédé pour une meilleure imprégnation

→ **L'isolation céramique n'est pas adaptée, dans sa version actuelle, aux aimants d'accélérateurs à haut champ.**

- **Conception 2D, modèle blocs rectangulaires**

- Nouvelles formules implantées dans un code d'optimisation 😊
- Proposition de configurations magnétiques académiques et pratiques 😊

- **Conception 3D pour têtes de dipôles**

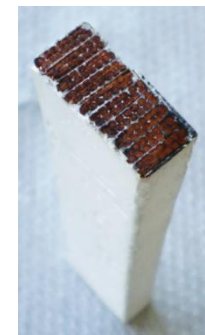
- Formules réécrites : configuration 3D de type « blocs » 😊
- Nouvelles formules : configurations 3D de type « rubans » 😊
- Proposition de configurations magnétiques pour dipôles Nb_3Sn 13 T 😊

→ **Nouvelles méthodes de calcul pour optimiser rapidement en 2D et 3D des configurations d'aimants d'accélérateurs.**

- **Futures isolations céramiques :**

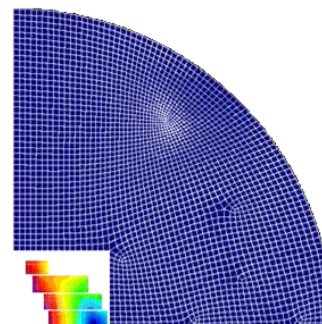
Optimiser les propriétés mécaniques :

- Imprégner totalement le câble
- Assurer un excellent frittage (traitement thermique, matériaux...)
- Comment modéliser les contraintes à l'intérieur du câble ?



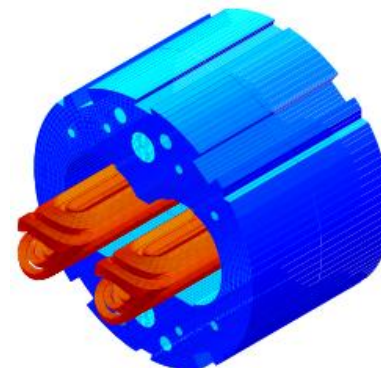
- **Design 2D :**

- Principe validé avec le fer
- A intégrer dans des méthodes globales
- Quelle homogénéité attendue ?



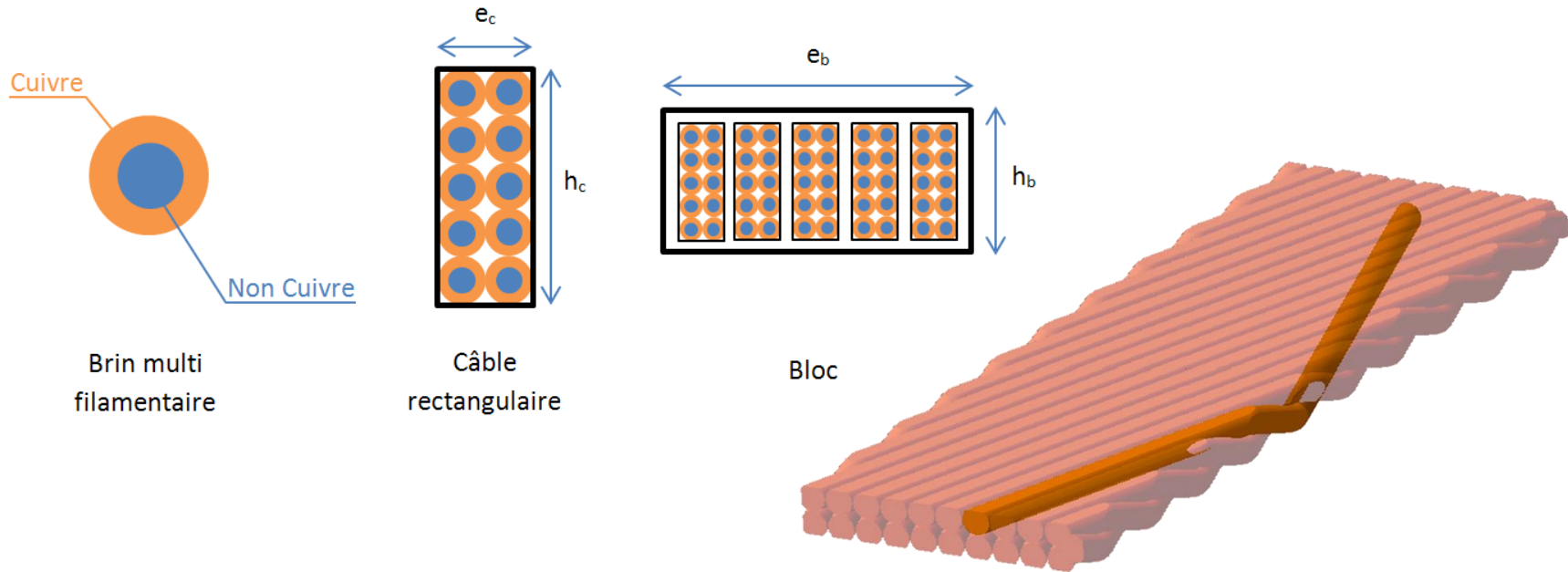
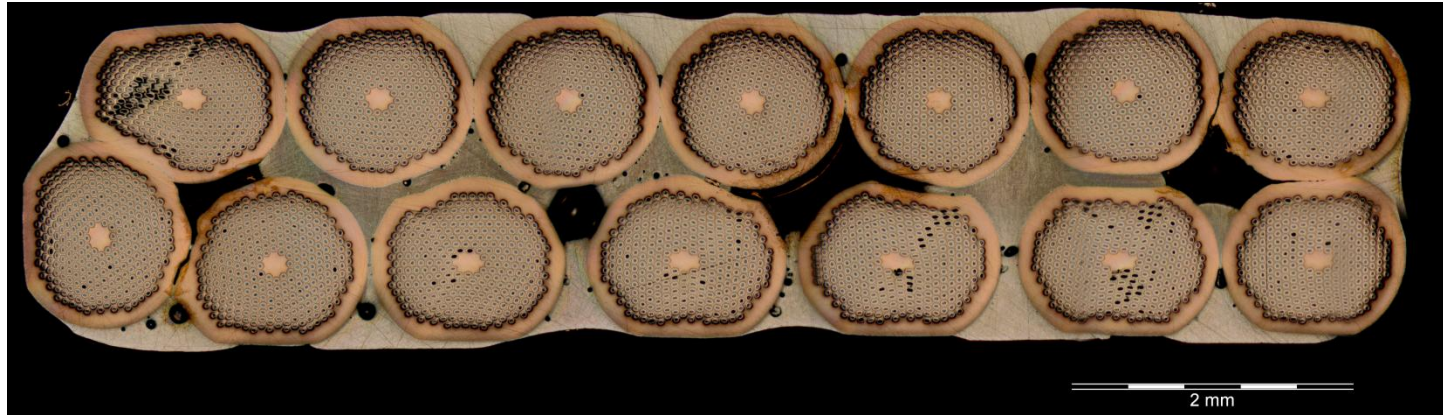
- **Design 3D :**

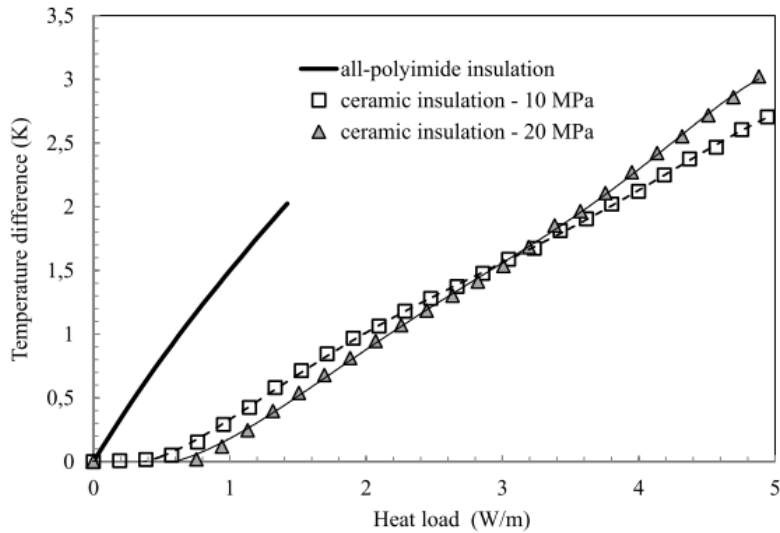
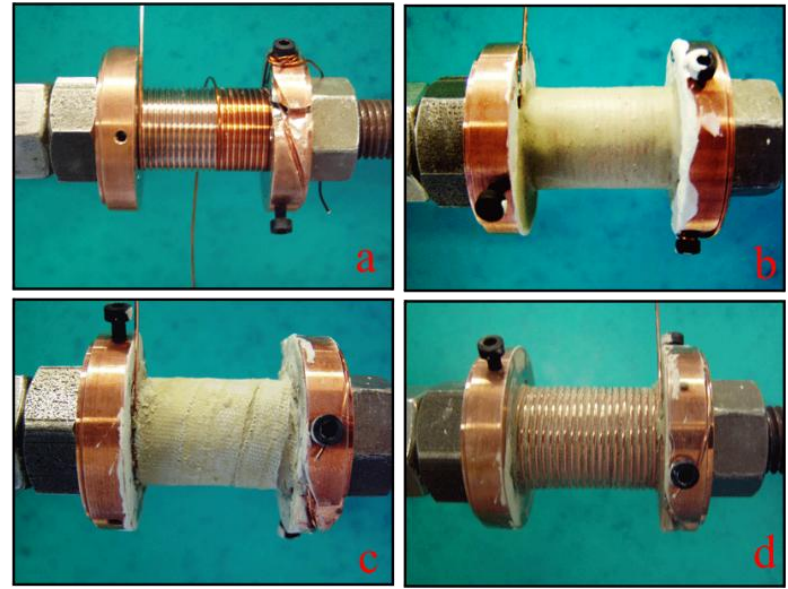
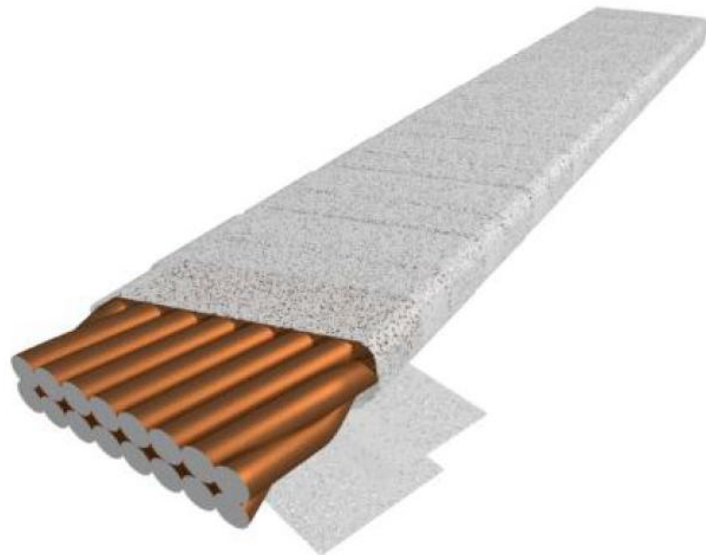
- Intégrer le calcul des forces
- Comment prendre en compte le fer ?
- Quel est le rôle de la marge ?



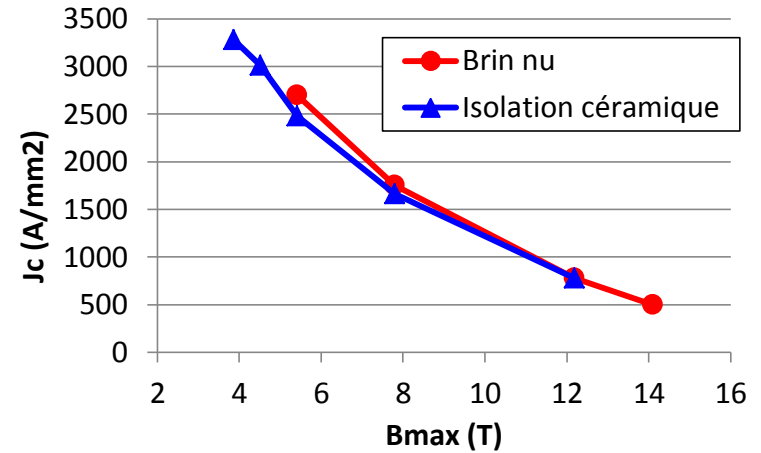
Merci de votre attention !

Backup slides

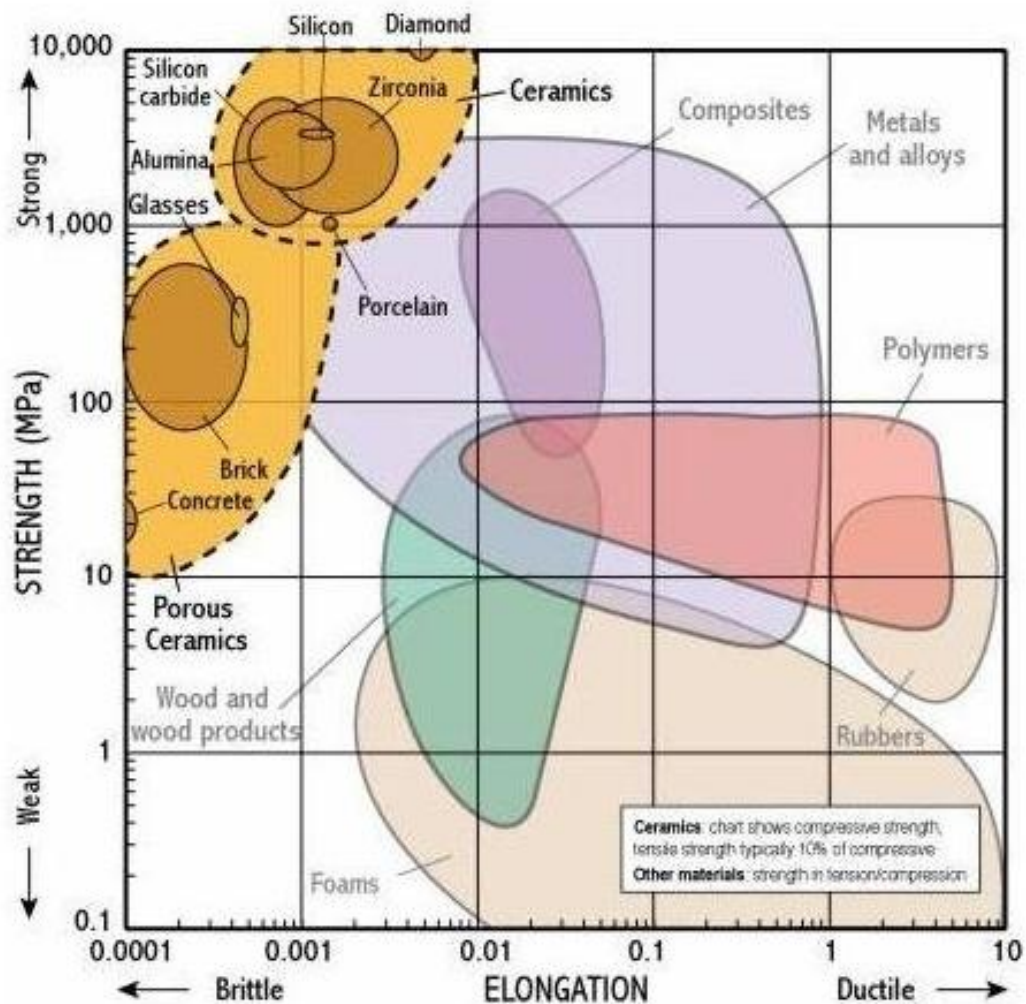




[S. Pietrowicz, B. Baudouy, ICMC2011]

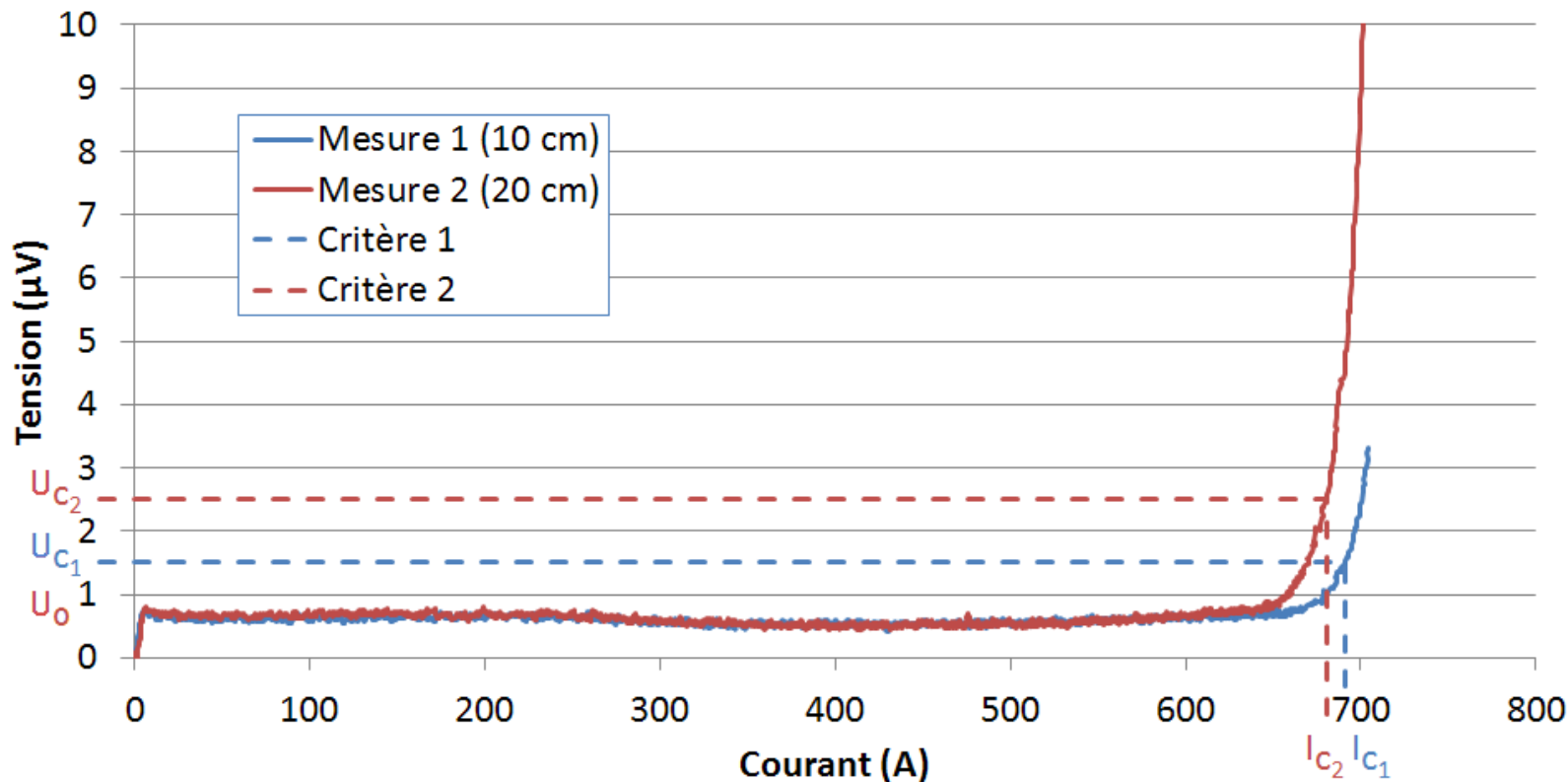


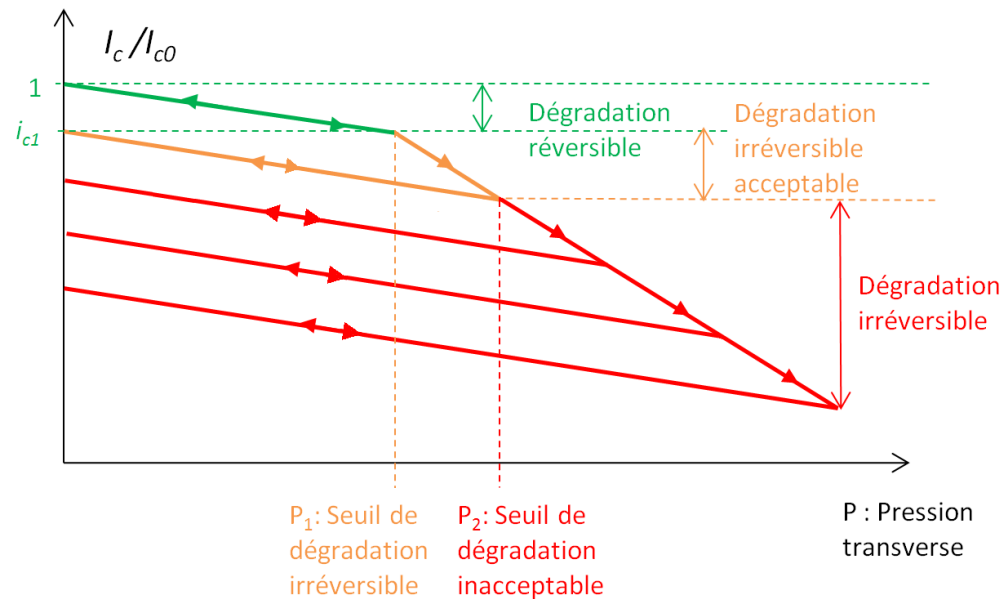
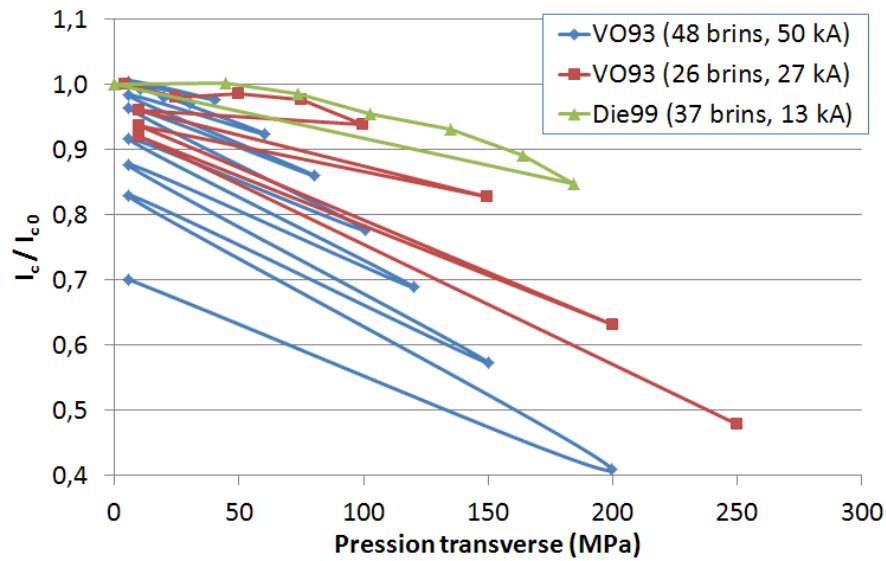
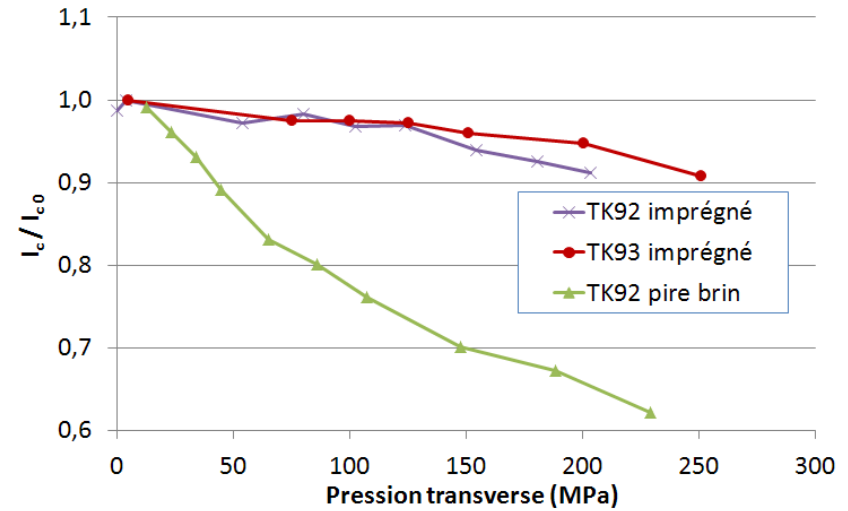
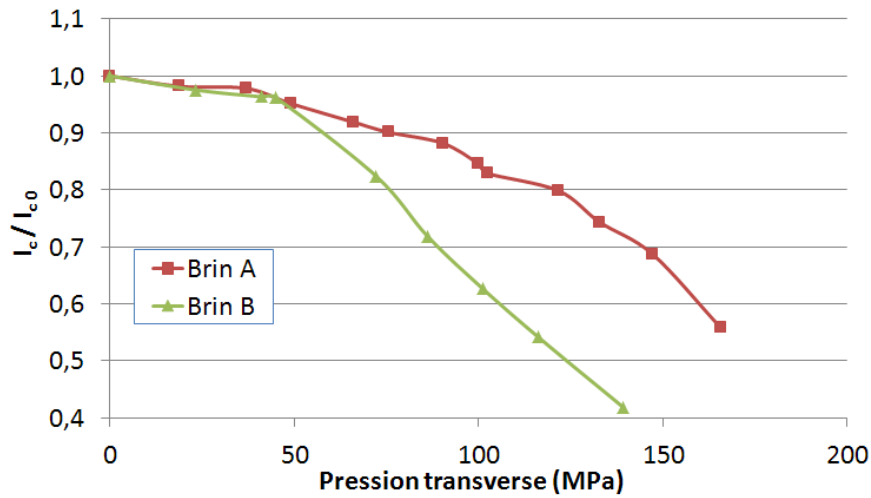
[A. Puigsegur, thèse, 2005]

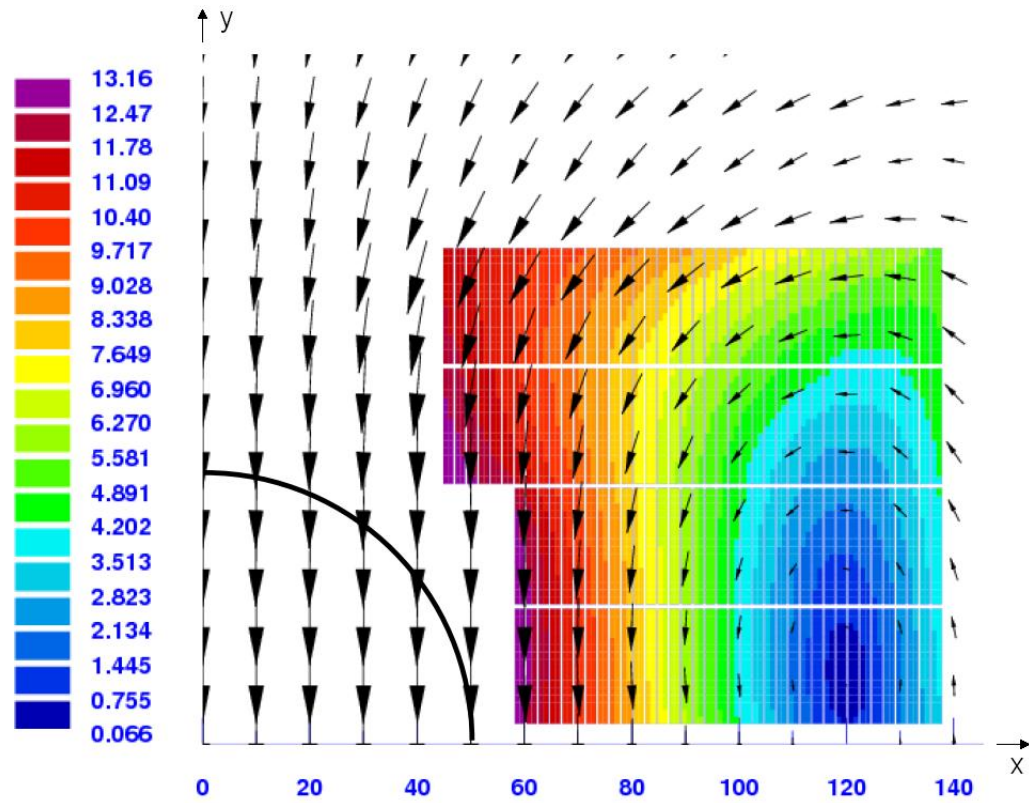
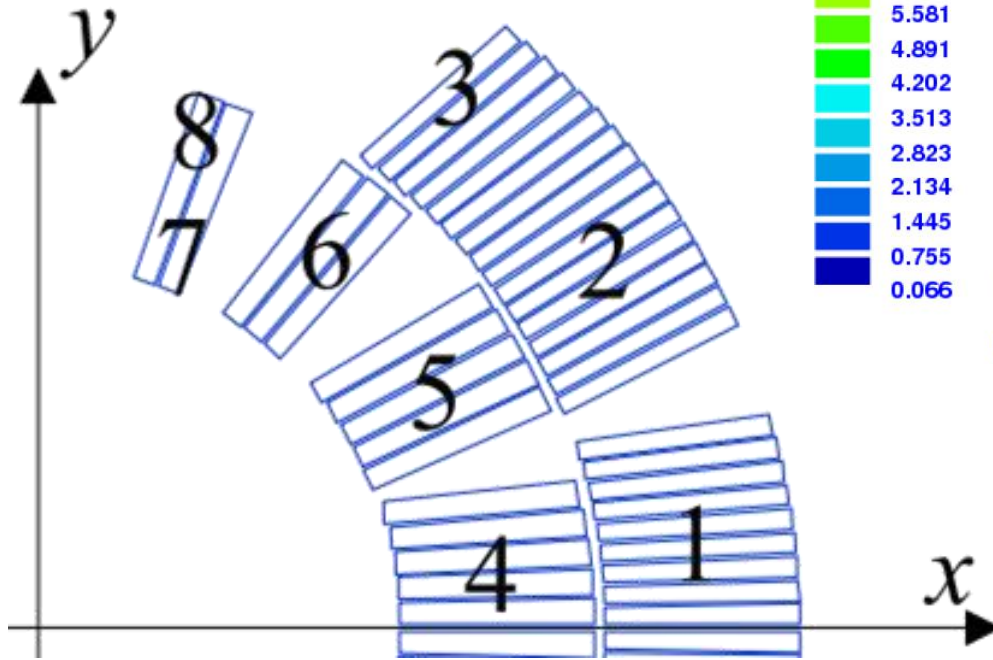


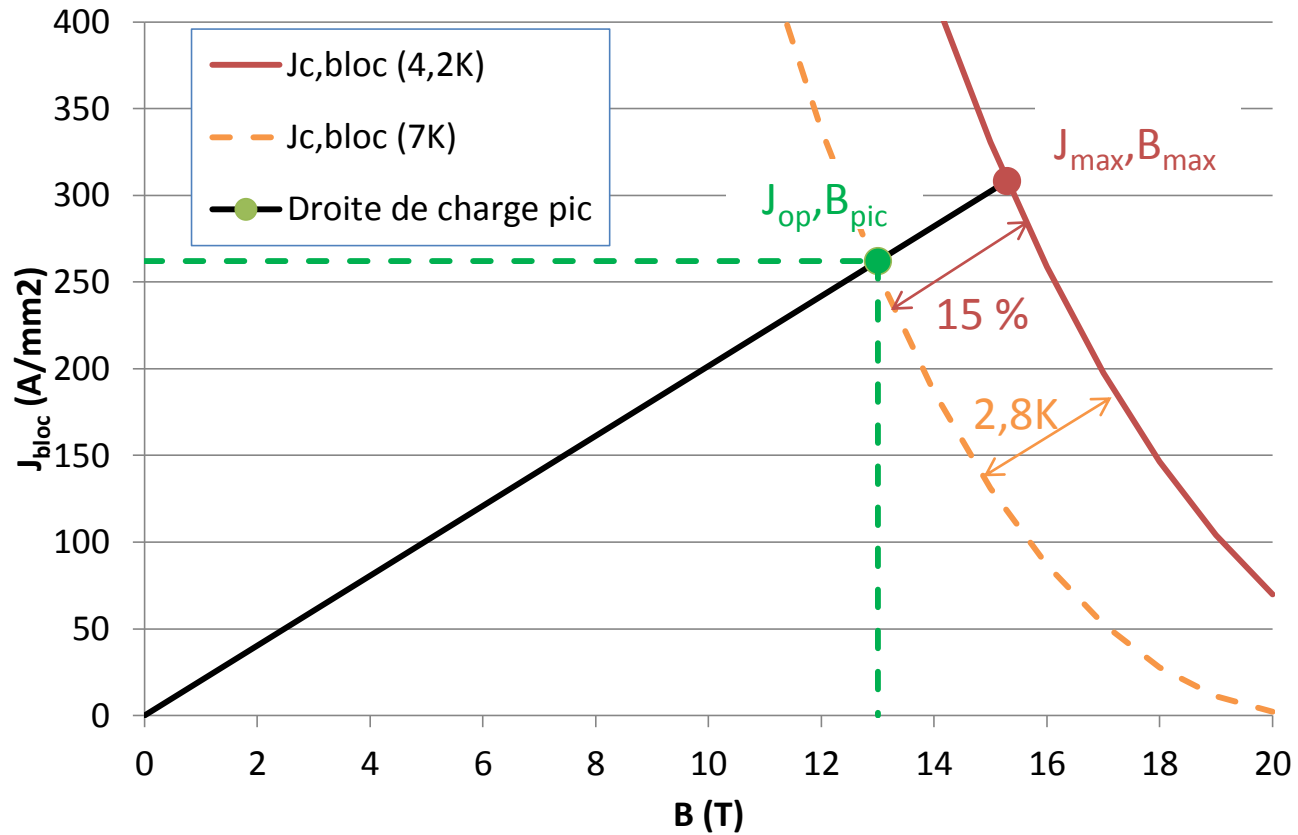
Issu de "Material selection and processing"
<http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/>

Echantillon témoin VAMAS







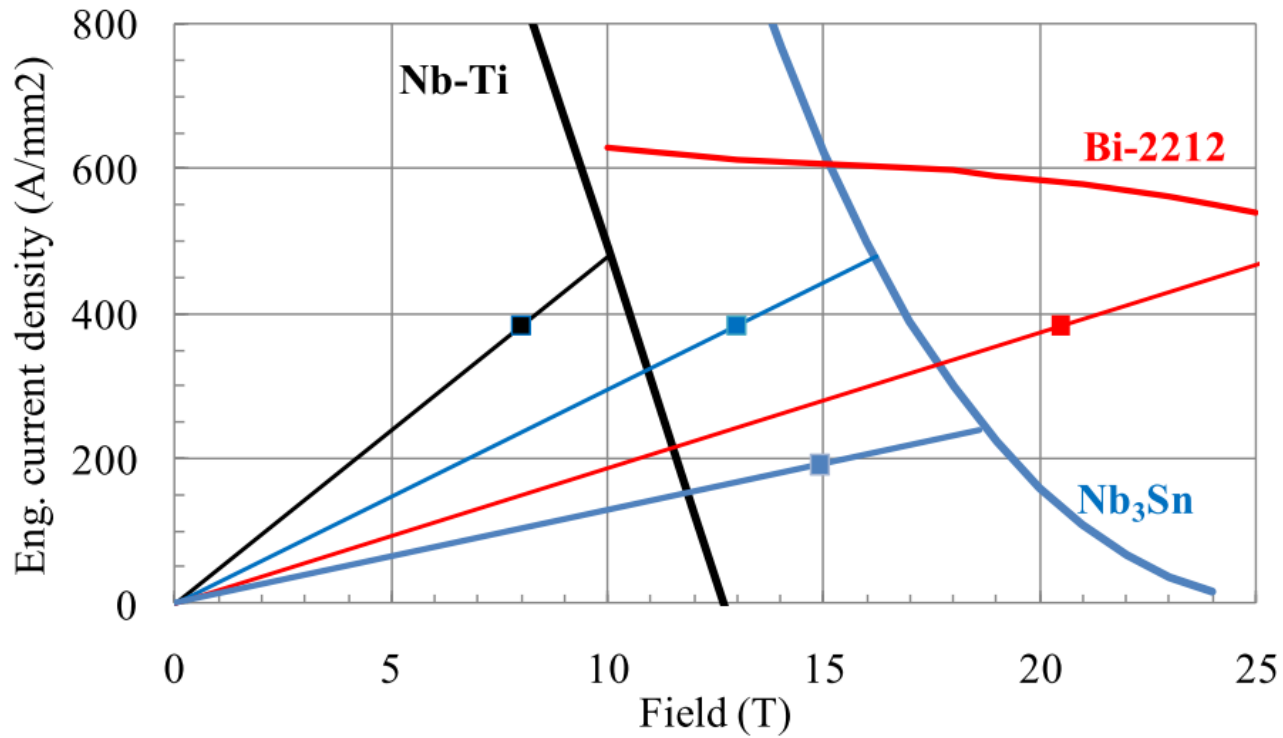


$$A_1 = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \left[\left[b \arctan \left(\frac{a}{b} \right) + \frac{a}{2} \ln (a^2 + b^2) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2}$$

$$B_1 = -\frac{\mu_0 J}{2\pi} \left[\left[a \arctan \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{b}{2} \ln (a^2 + b^2) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2}$$

$$A_2 = \frac{\mu_0 J r}{2\pi} \left[\left[\ln (a^2 + b^2) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2}$$

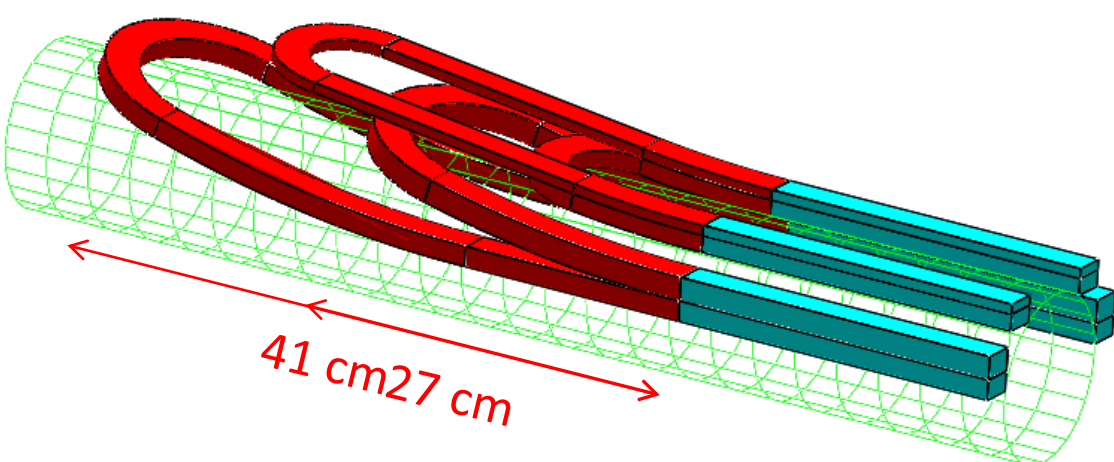
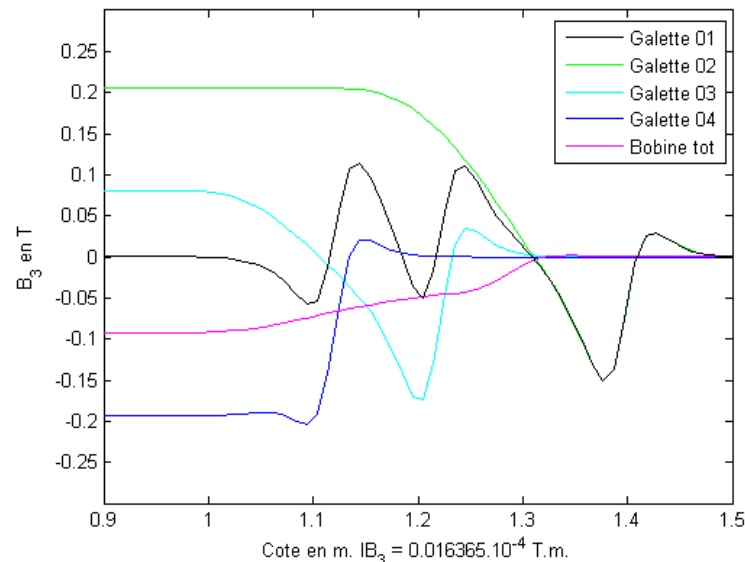
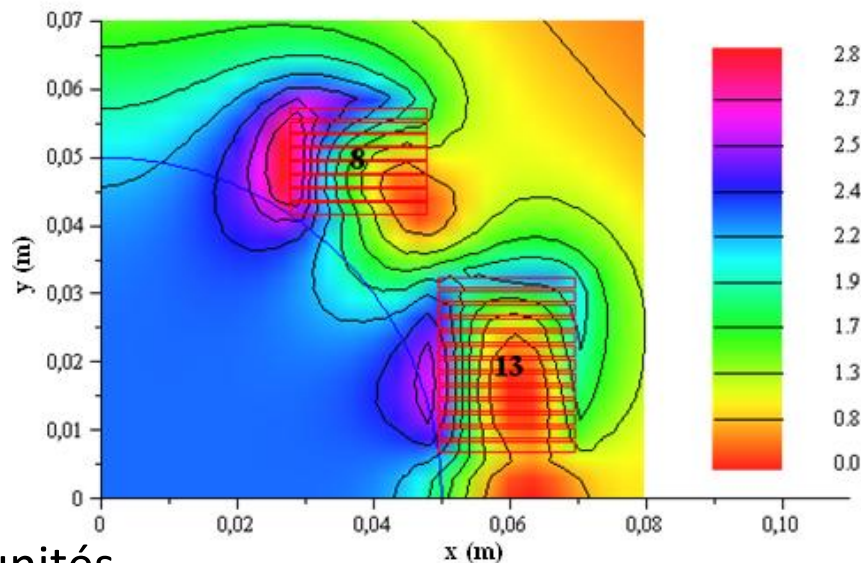
$$B_2 = -\frac{\mu_0 J r}{2\pi} \left[\left[\arctan \left(\frac{b}{a} \right) \right]_{a_1}^{a_2} \right]_{b_1}^{b_2}$$



[Todesco, EuCARD meeting, 2011]

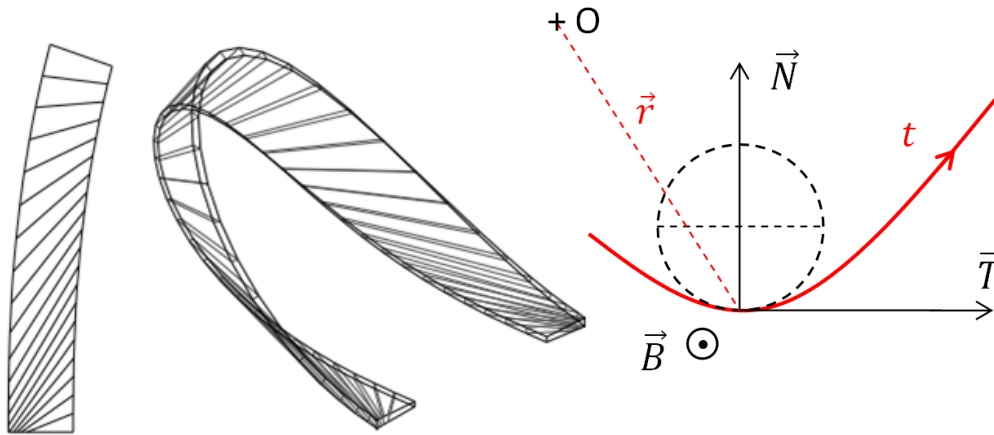
- Design 2D à 2 blocs
 - 2,3 T au centre
 - $B_3 = B_5 = 0$
- Raccordement au plus court :
 - $\int B_3 dz = -1,1$ unité
 - $\int B_5 dz = -0,33$ unité

- Optimisation : 😊
 - $\int B_3 dz$ et $\int B_5 dz < 5 \cdot 10^{-4}$ unités
 - $\int B_7 dz = 0,62$ unité



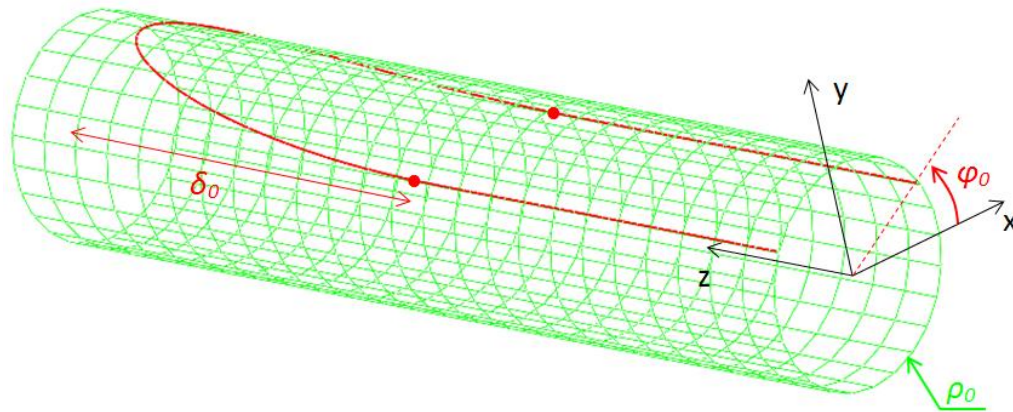
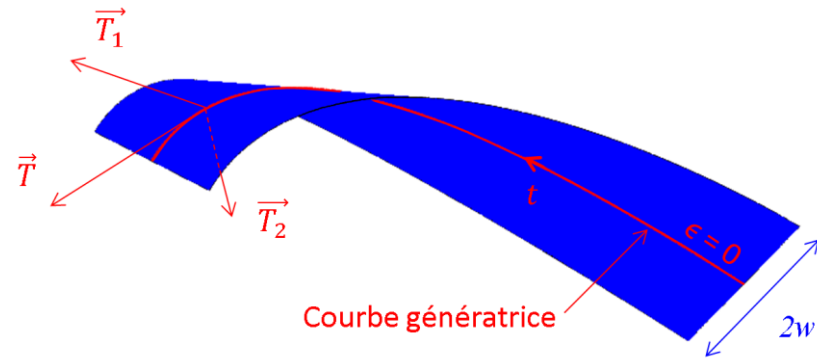
$$\vec{R}(t, \epsilon) = \vec{r}(t) + \lambda [\kappa(t) \vec{B}(t) + \tau(t) \vec{T}(t)]$$

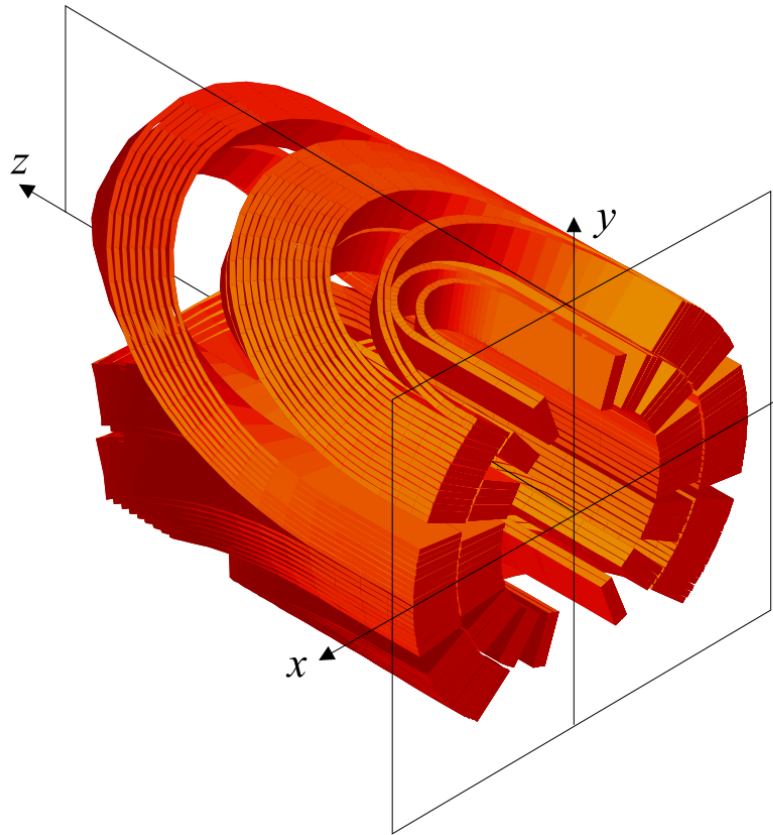
S. Russenschuck



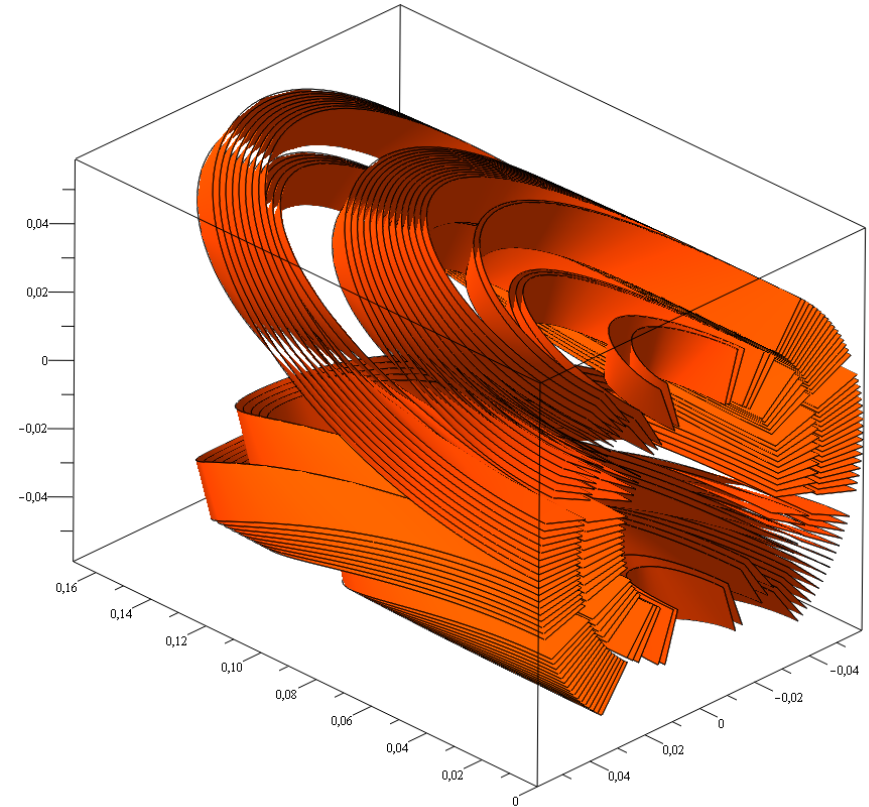
$$\vec{R}(t, \epsilon) = \vec{r}(t) + \epsilon \left[\vec{B}(t) + \frac{\tau(t)}{\kappa(t)} \vec{T}(t) \right]$$

G. Aubert





(a)



(b)

- Design 2D à 2 blocs
 - câbles horizontaux
 - idem modèle blocs
- Raccordement au plus court :
 - $\int B_3 dz = -2,5$ unités
 - $\int B_5 dz = -0,97$ unité

- Optimisation : 😊
 - $\int B_3 dz < 5 \cdot 10^{-4}$ unités
 - $\int B_5 dz = -4,1$ unités

