



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



# SURFING THE **WAVE** OF INNOVATION



*Double Chooz*



*ALICE*



*Edelweiss*



*HESS*



*Herschel*



*CMS*

*Detecting radiations from the Universe.*

Présentation finale WAVE | Ambroise Peugeot

ETUDE TECHNIQUE

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)



## Contexte du projet

- I. Conception d'un aimant vectoriel**
- II. Etude(s) technique(s)**
- III. Aboutissements et perspectives**

# **WAVE : UN AIMANT VECTORIEL 3D SUPRACONDUCTEUR**

- Créer un champ B orientable dans toutes les directions de l'espace
- Variable entre 0 et 1 Tesla
- Compatible avec la diffusion neutronique:
  - Bonne *homogénéité* sur un échantillon macroscopique ( $10^{-4}$  dans une sphère de 1 cm de diamètre)
  - Grande *ouverture angulaire*

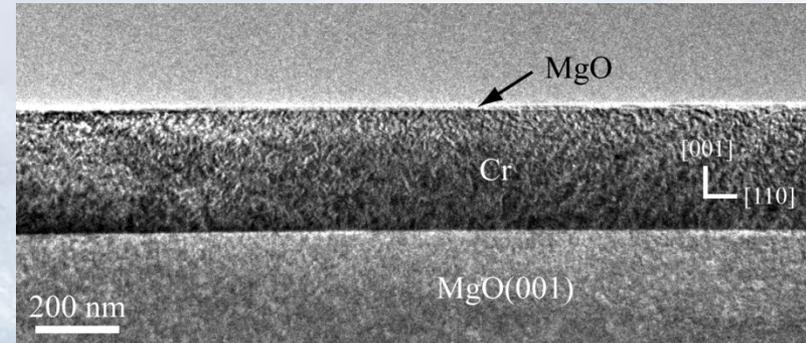
Wide Aperture VEctor magnet | Jeudi 12 Mars 2015

| PAGE 3

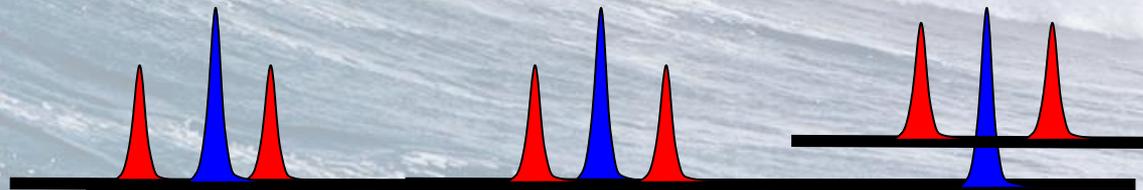
## *Etude de films antiferromagnétiques pour la spintronique*

*Propriétés nano-magnétiques*

*Etude par diffraction X ou neutrons*

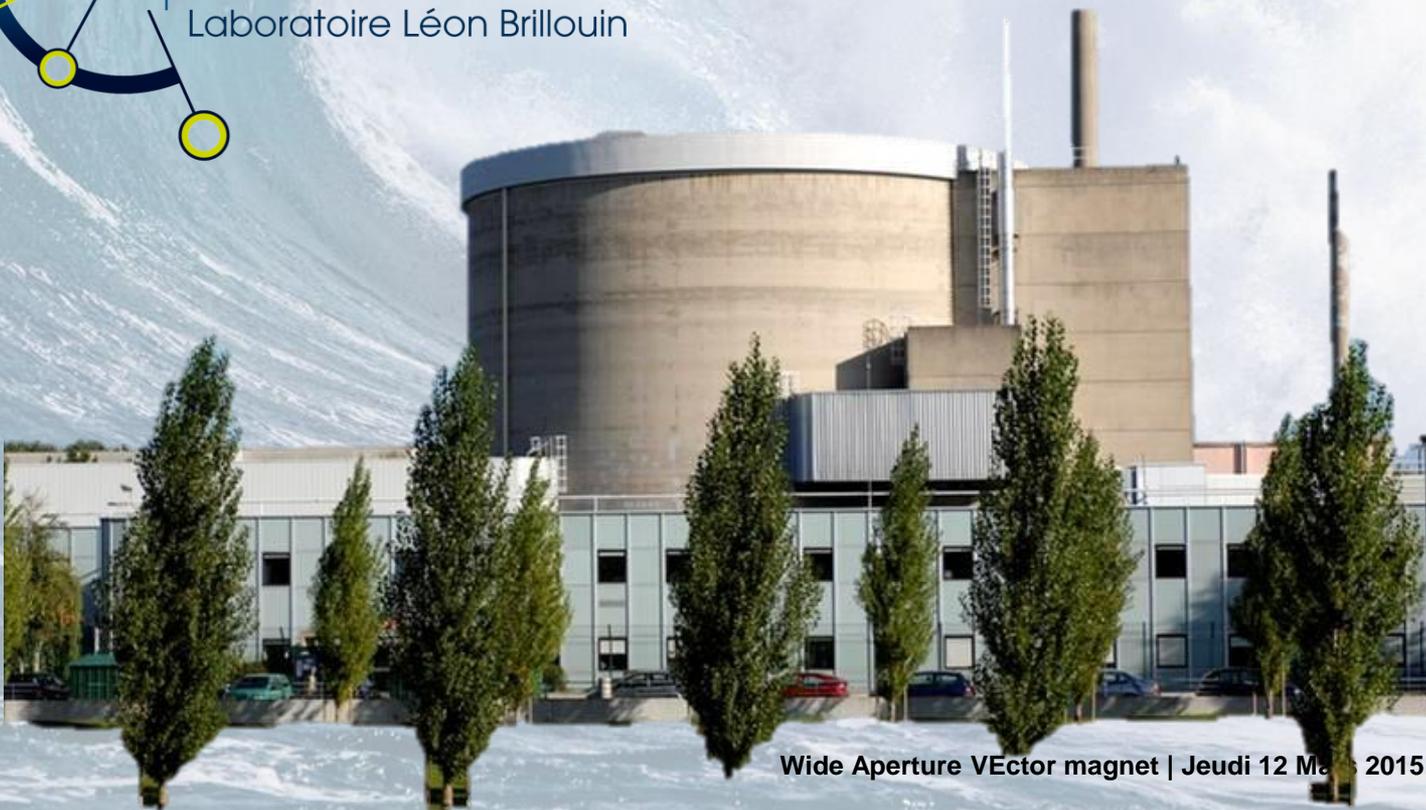
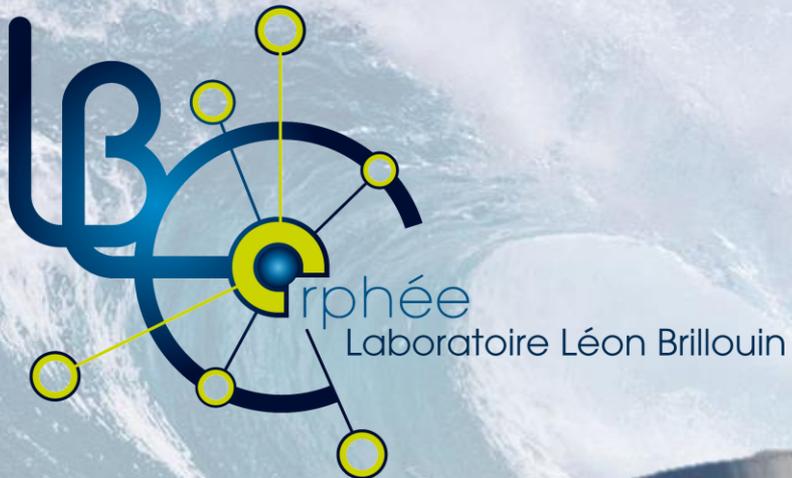


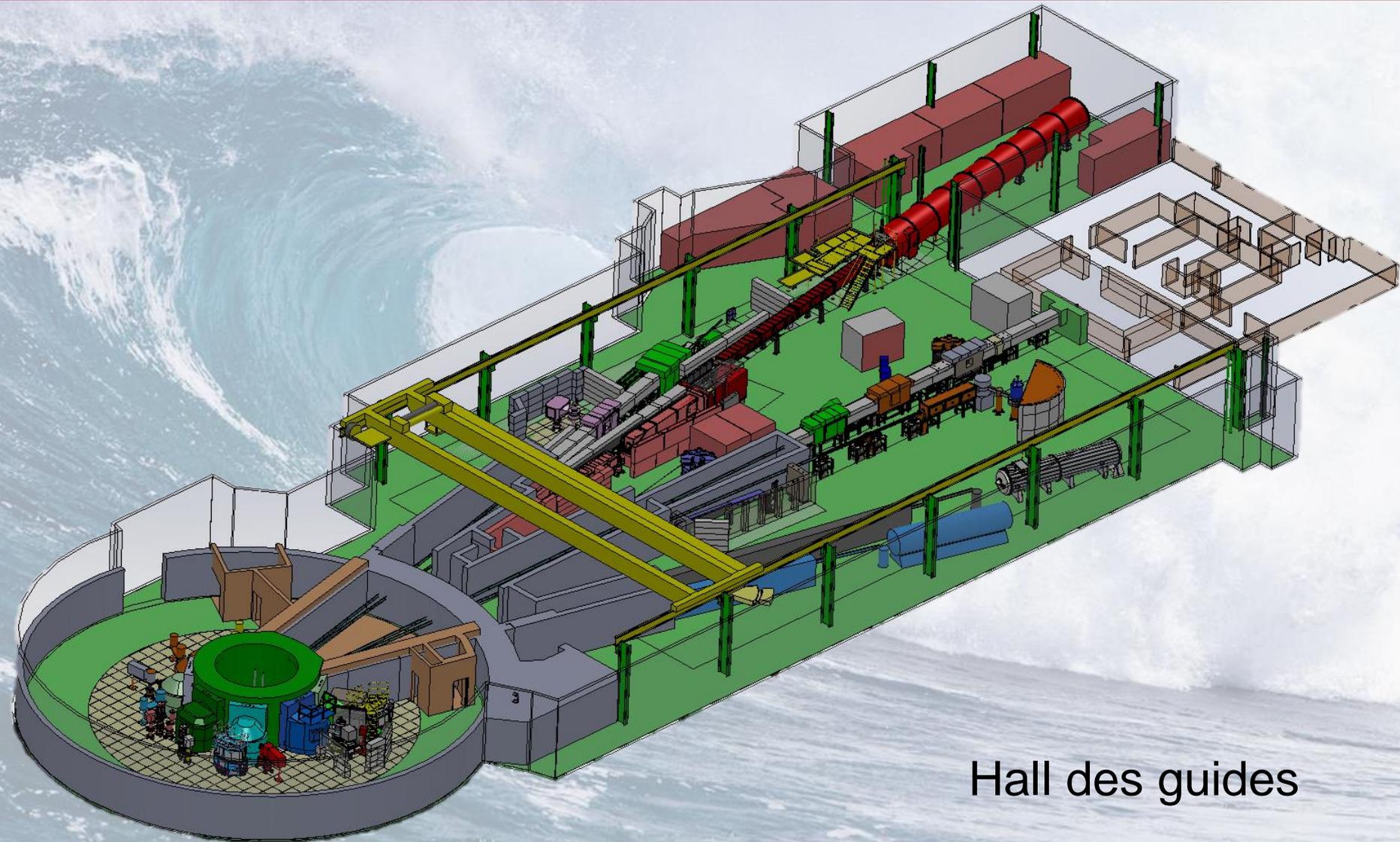
*Maille magnétique incommensurable avec la maille cristalline*



## Applications industrielles :







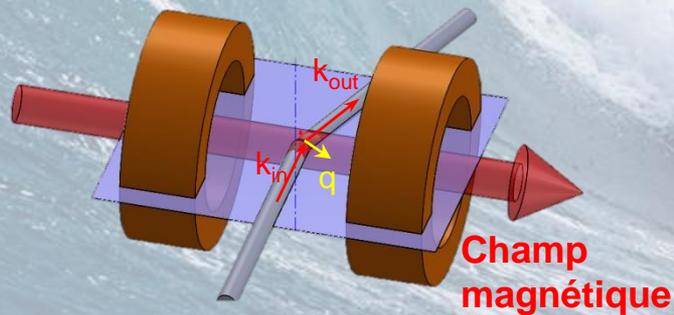
Hall réacteur

Hall des guides

***Pas de solution satisfaisante aujourd'hui pour l'étude systématique des propriétés magnétiques:***

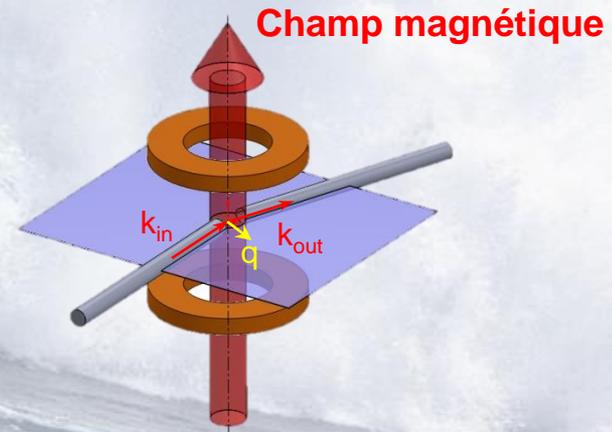
Champ magnétique horizontal

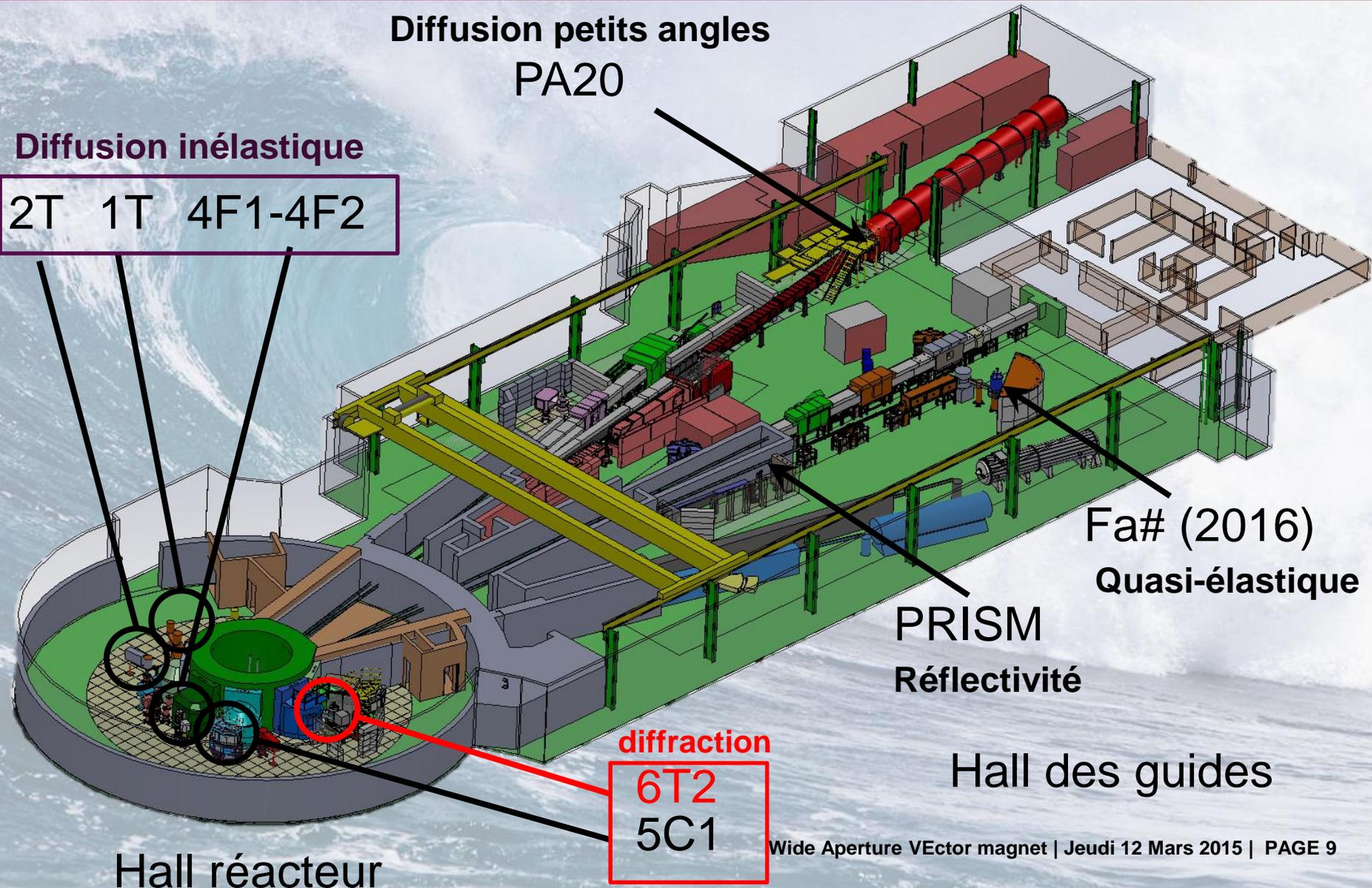
 Rotation échantillon

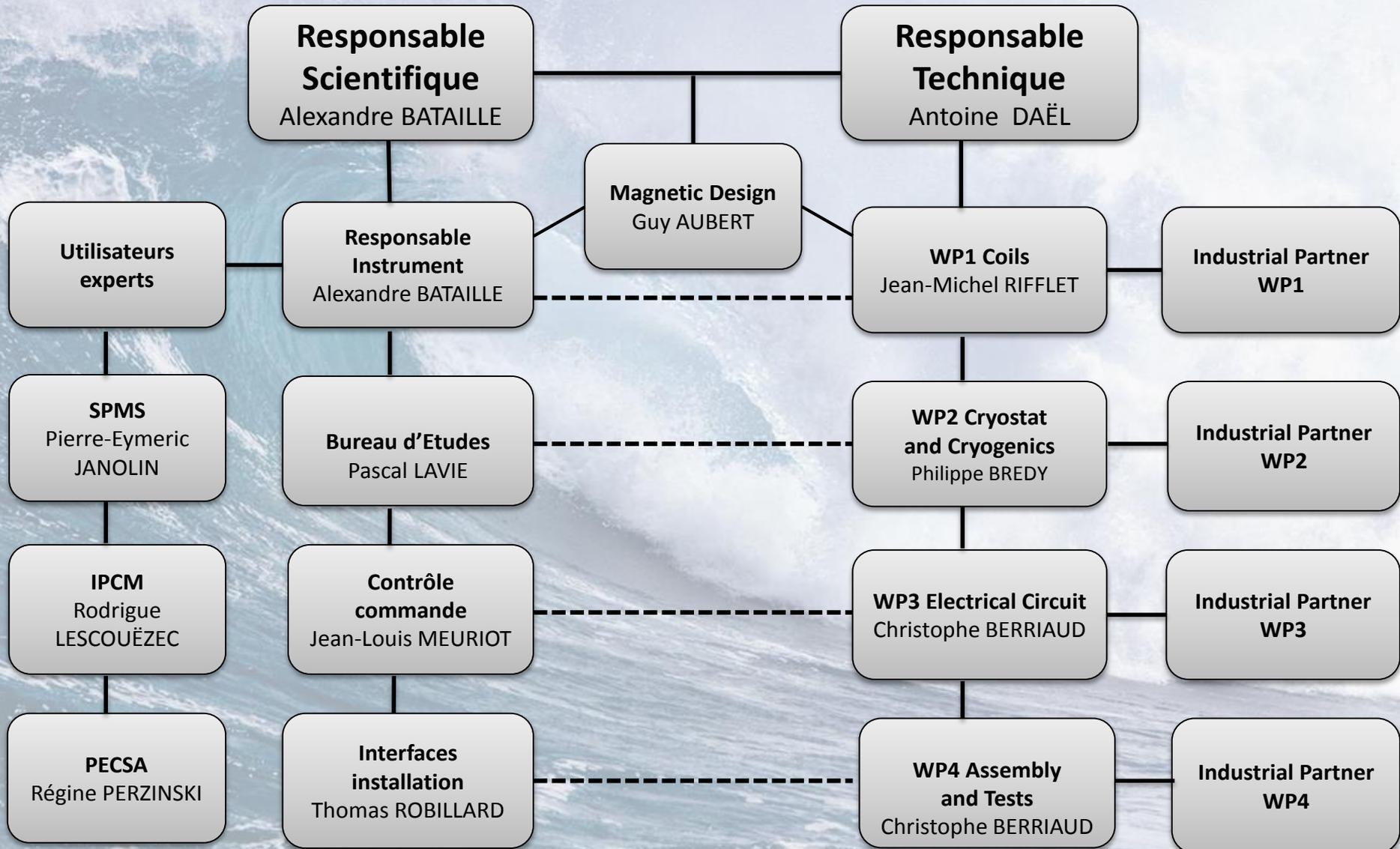


Champ magnétique vertical

 Rotation échantillon







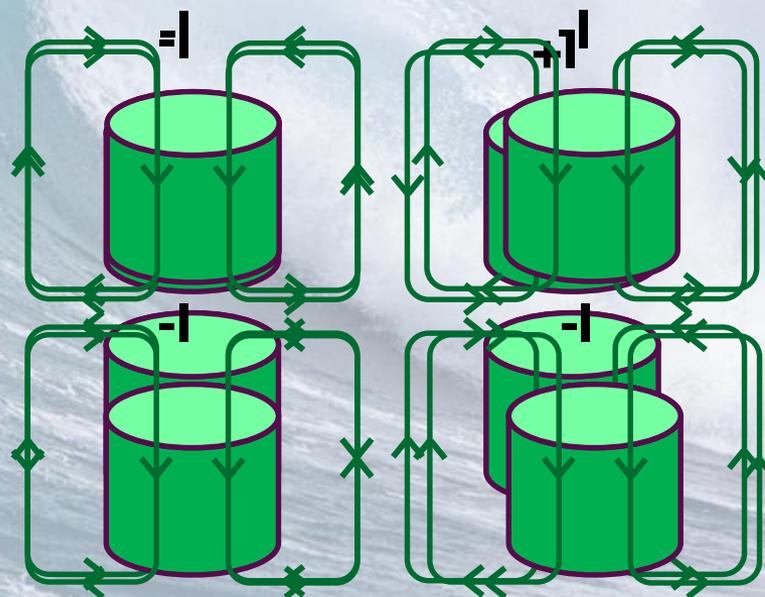
**« QUEL DESIGN MAGNÉTIQUE POUR  
REEMPLIR TOUTES CES CONDITIONS? »**

**Wide Aperture VEctor magnet | Jeudi 12  
Mars 2015**

**| PAGE 11**

## *La « couronne magnétique » : un concept made in Guy Aubert*

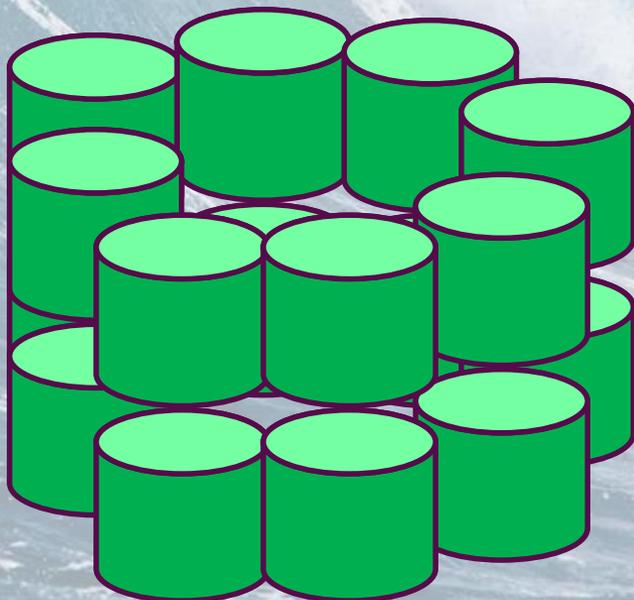
- Faire boucler les champs de fuite de plusieurs bobines
- Utiliser des symétries judicieuses pour l'homogénéité



*Champ  
vertical  
aussi  
possible !*

## *Disposition des bobines en couronne*

- Libère un puits central pour les échantillons
- Ouverture équatoriale importante
- Mais combien de bobines utiliser ?
- Quelle répartition des courants ?



→ On choisit (de façon plus moins heuristique) une répartition en  $\cos(\varphi)$

## Les harmoniques sphériques à la rescousse

$$Y_n^m$$

$$n = (0, 1, 2, \dots)$$

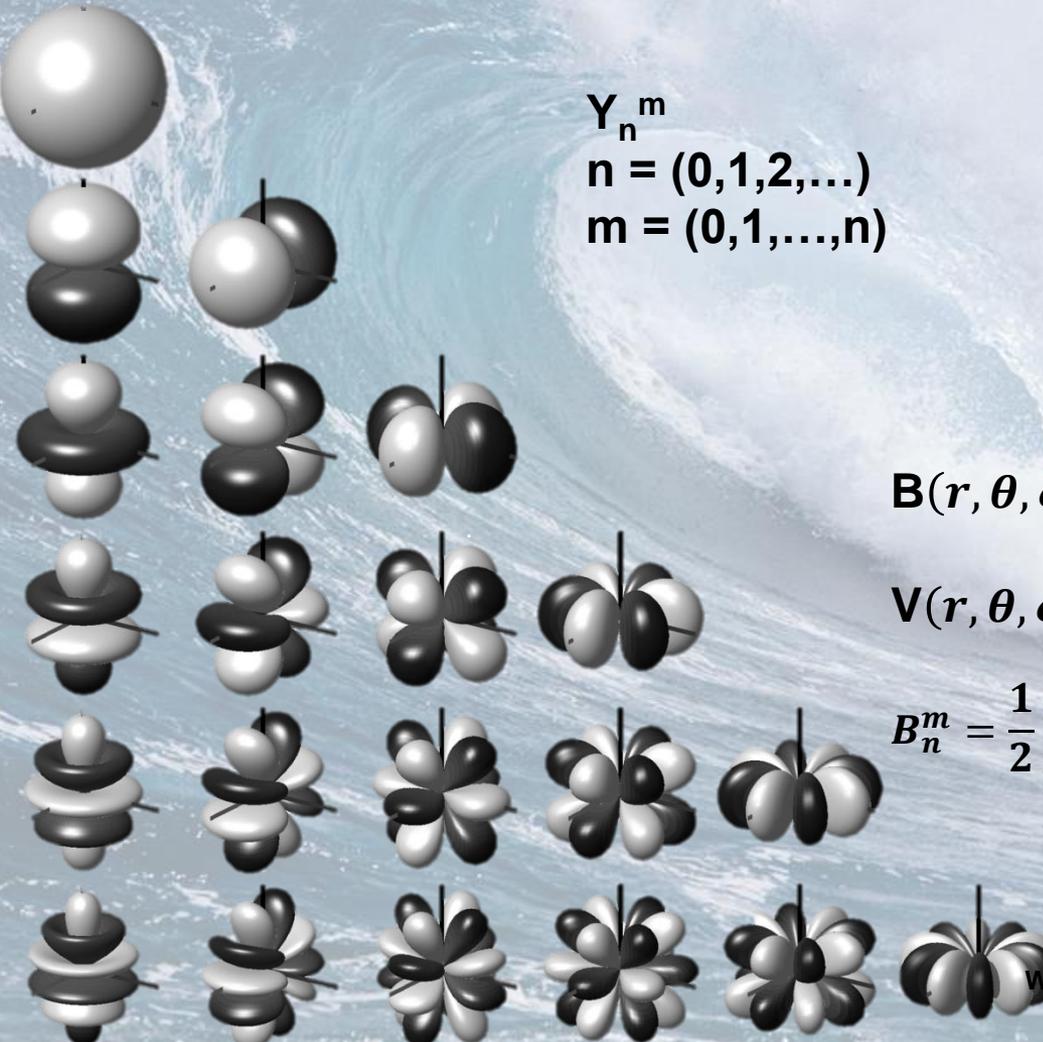
$$m = (0, 1, \dots, n)$$

- Famille de fonctions dont le Laplacien est à support dans  $R^{n*}$   
 $\Delta = 0$  presque partout
- Forment une base sur laquelle on peut décomposer le champ magnétique et son potentiel scalaire (hors des sources)

$$\mathbf{B}(r, \theta, \varphi) = \sum_n^\infty \sum_m^n (\mathbf{B}_n^m * r^n) * Y_n^m(\theta, \varphi)$$

$$V(r, \theta, \varphi) = \sum_n^\infty \sum_m^n (V_n^m * r^n) * Y_n^m(\theta, \varphi)$$

$$B_n^m = \frac{1}{2} (V_{n+1}^{m-1} - (n+m+1)(n+m+2) * V_{n+1}^{m+1})$$



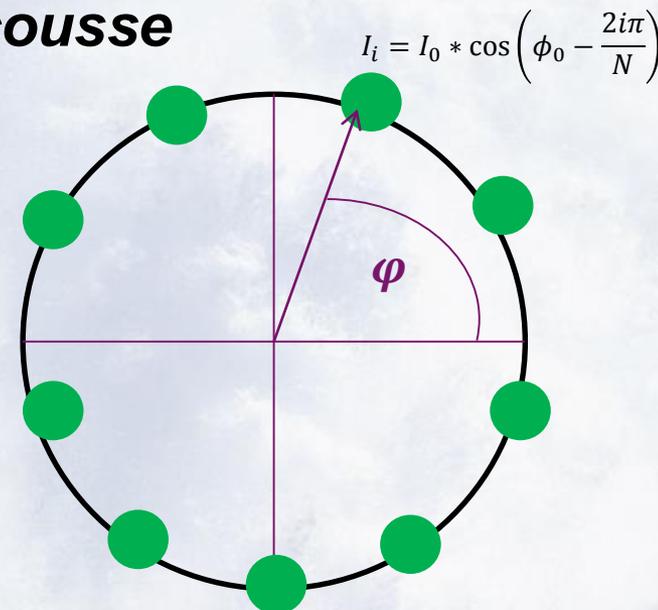
## Les harmoniques sphériques à la rescousse

$$Y_n^m$$

$$n = (0, 1, 2, \dots)$$

$$m = (0, 1, \dots, n)$$

$$N = 6$$



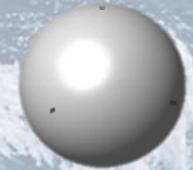
- Le choix de  $N$  annule certaines colonnes :

$$V_n^m = 0 \text{ si } m \neq k * N \pm 1$$

$$B_n^m = 0 \text{ si } m \neq (k * N \pm 1) \pm 1$$

- L'antisymétrie annule des diagonales

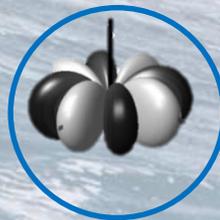
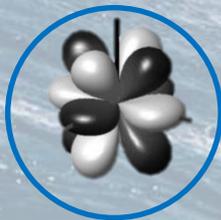
## Les harmoniques sphériques à la rescousse



$$Y_n^m$$

$$n = (0, 1, 2, \dots)$$

$$m = (0, 1, \dots, n)$$



- Premiers termes non-nuls en  $r^2$
- Proportionnels entre eux:

$$B_2^0 \propto B_2^2 \propto V_3^1$$

→ On peut les annuler en même temps en jouant sur la géométrie des bobines.

→ Premiers termes non-nuls en  $r^4$

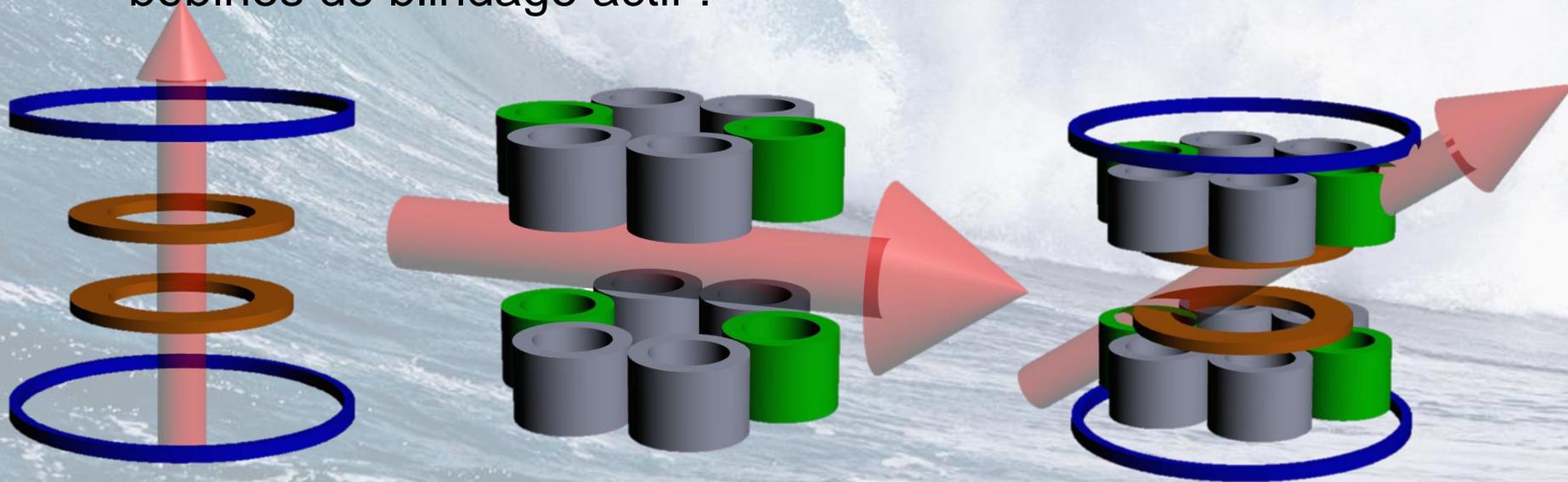
→ Homogénéité atteint **4 ppm**

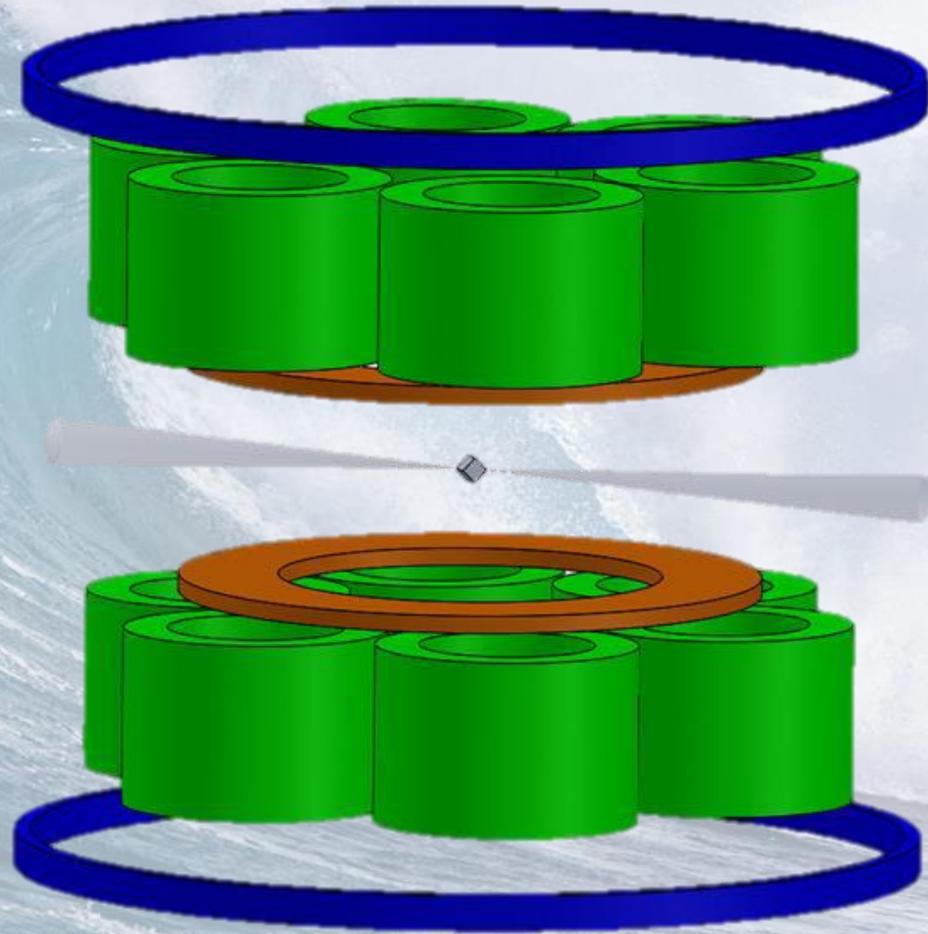
Avec les contraintes de ST2 (diamètre extérieur, intérieur...) on dimensionne les bobines :

a1	a2	b1	b2	j0
0.058018394	0.082	0.0825	0.217734457	250e6

## *La configuration hybride*

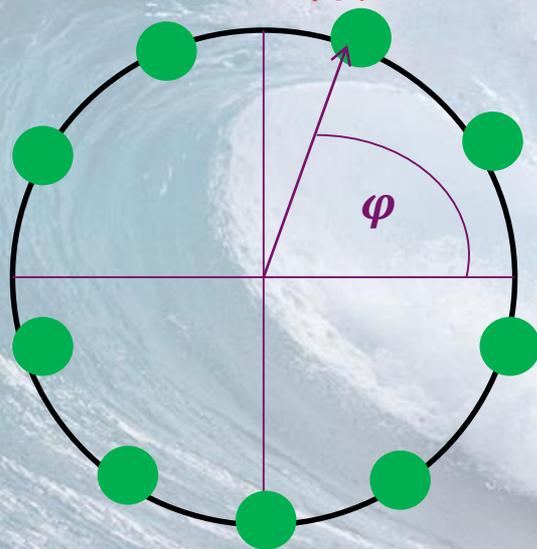
- Si on abandonne la création de  $B_z$  par les bobines de la couronne on peut diviser par deux le nombre d'alimentations nécessaires : **4 alimentations à +/- 200 A**
- On emploie des bobines de Helmholtz avec une paire de bobines de blindage actif :





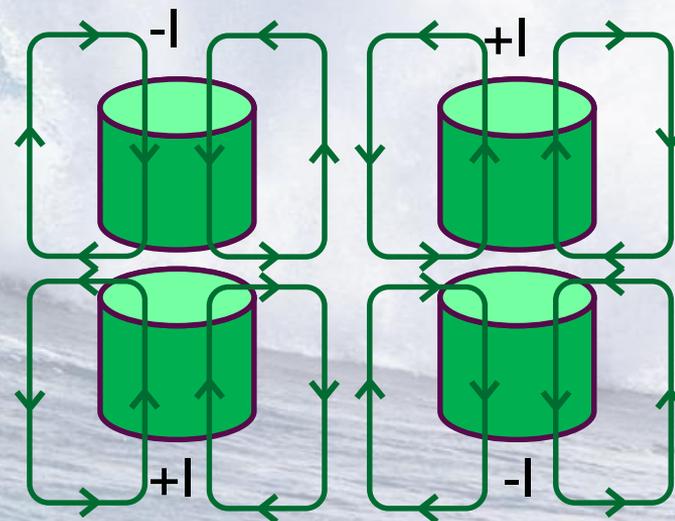
## Idées à retenir :

- Courants en  $\cos(\varphi)$  comme dans un dipôle d'accélérateur



$$I_i = I_0 * \cos\left(\phi_0 - \frac{2i\pi}{N}\right)$$

- Boucles de champ



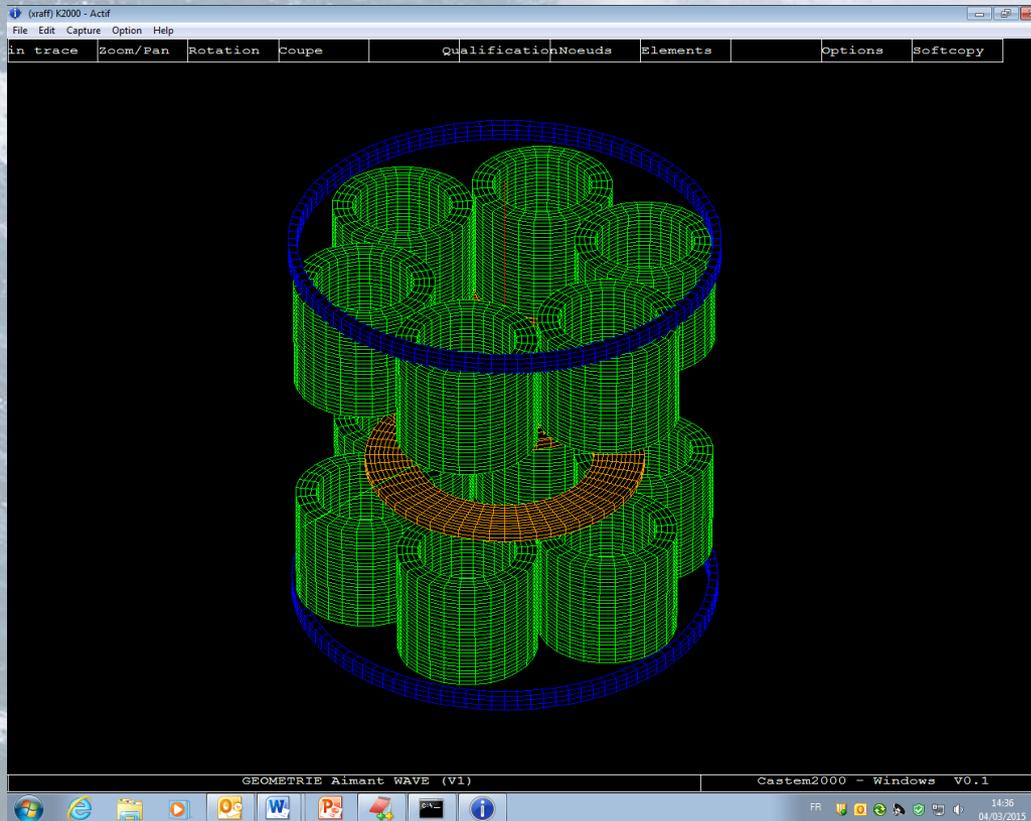
# « QUELLES SOLUTIONS POUR AVOIR UNE TELLE DISPOSITION DE BOBINES SUPRACONDUCTRICES? »

## *ETUDE DE FAISABILITÉ*

Wide Aperture VVector magnet | Jeudi 12  
Mars 2015

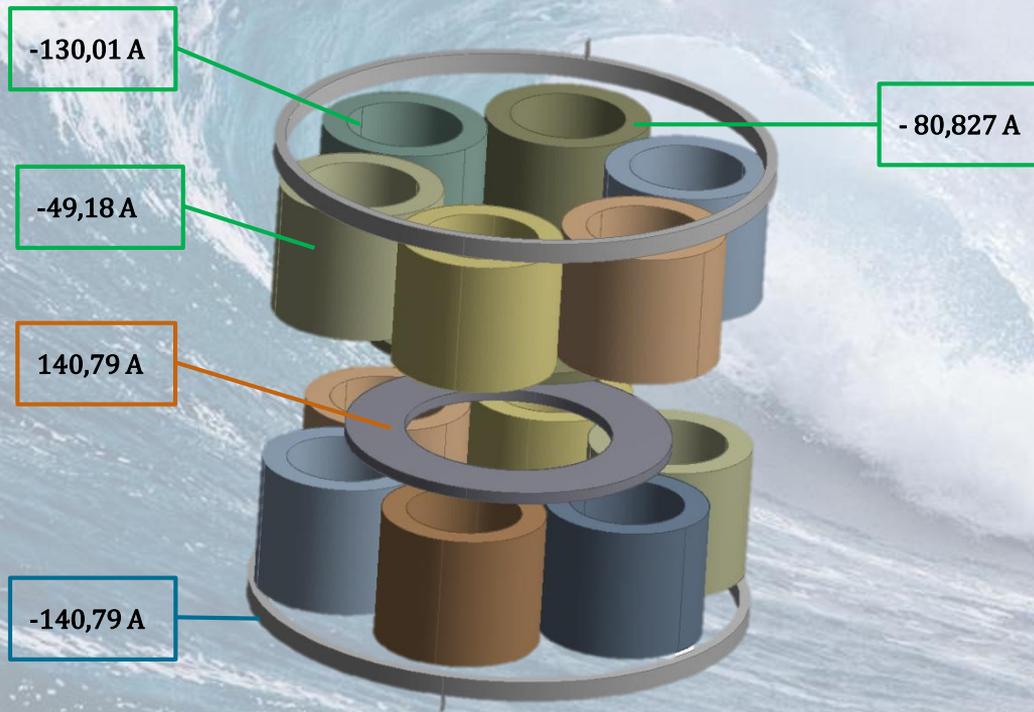
| PAGE 20

## Simulations magnétiques



- Construction d'un modèle sous Cast3M à partir de codes de François Nunio (SIS) pour Iseult
- Suite de procédures interactives pour :
  - construire facilement un maillage paramétrique
  - évaluer le champ de fuite, l'homogénéité, le champ-pic
  - calculer en tout point les efforts magnétiques
- 1300 lignes de code : 500 originales + 800 « empruntées »

## Simulations magnétiques

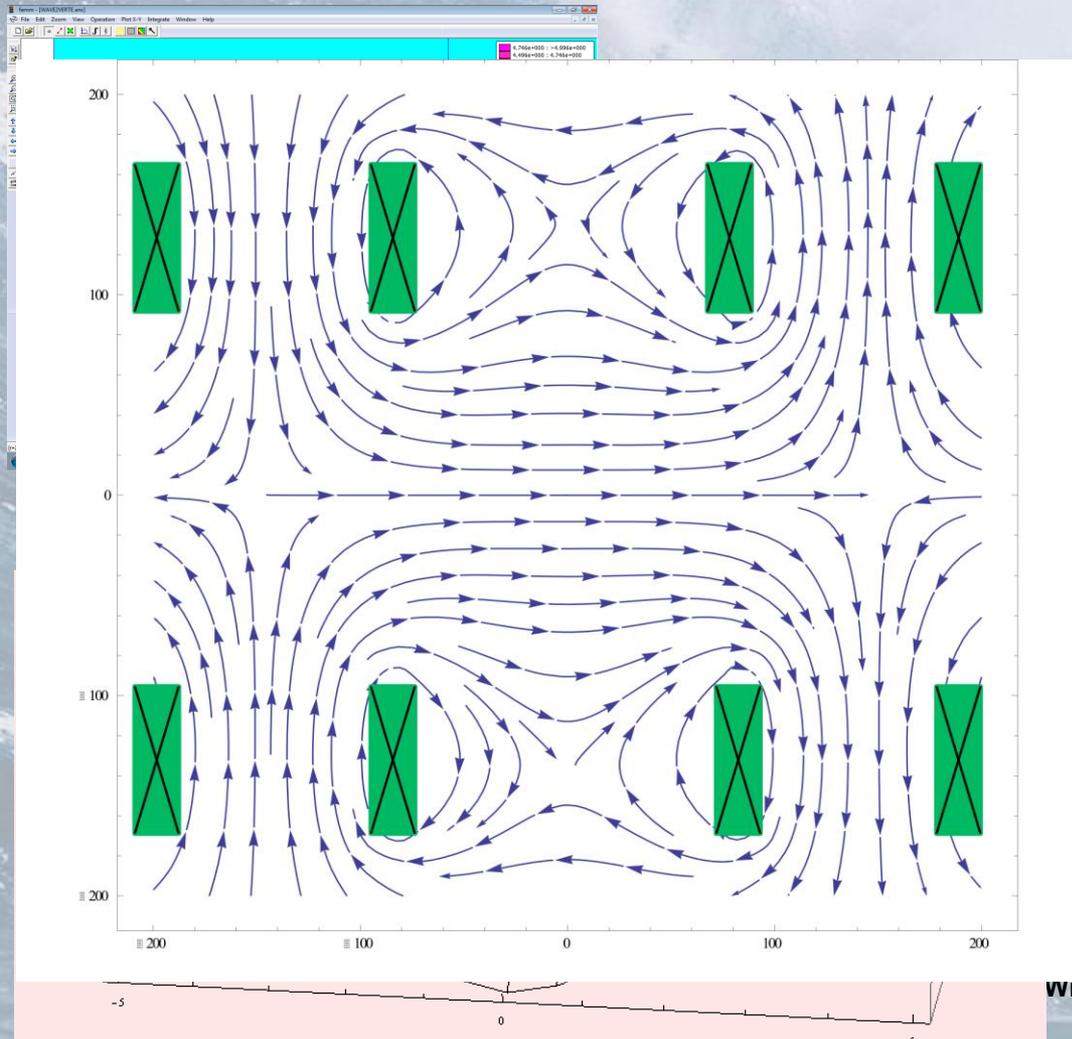


- Pourquoi l'interactivité ?

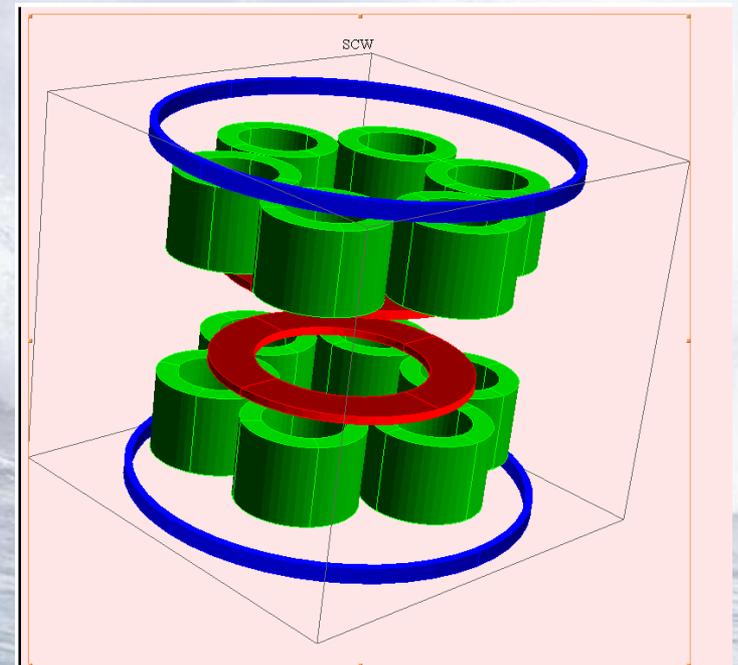
- Dimensions pas encore fixées de façon sûre à ce stade là
- Très nombreux cas d'aimantation différents → difficile à visualiser

$$I_i = \pm I_0 * \sin(\theta) * \cos\left(\phi - \frac{2i\pi}{N}\right)$$

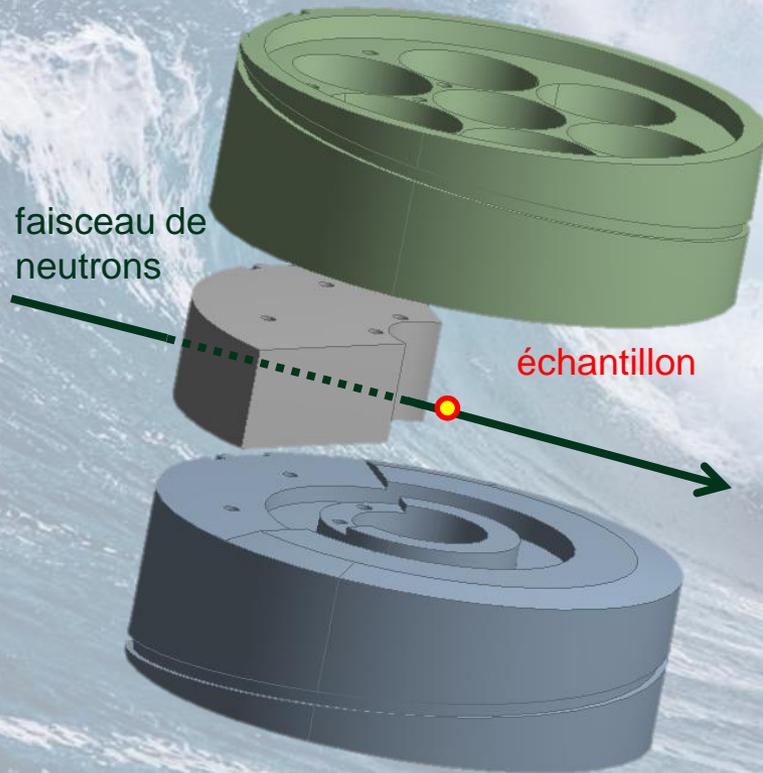
## Simulations magnétiques



Comparaisons avec FEMM et Radia (package de Mathematica) pour vérifications

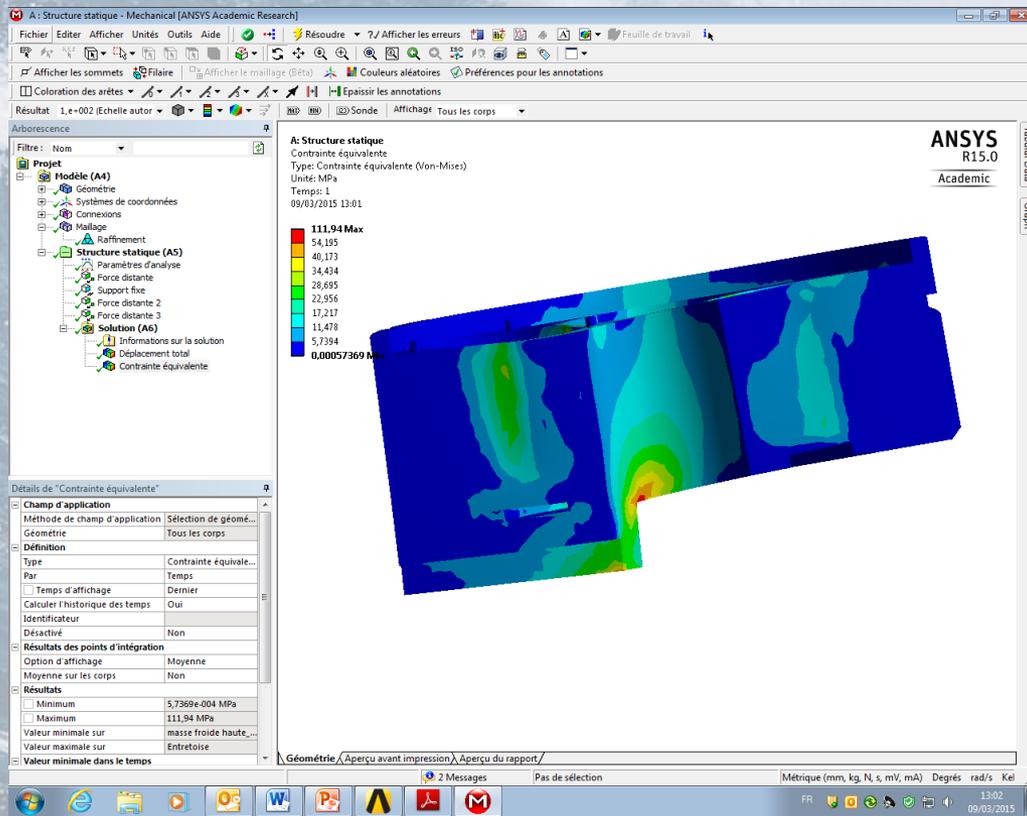


## Conception mécanique



- Boîte à bobines en trois parties, **cf maquette**
- Aluminium avec de bonnes propriétés mécaniques
- Tirants précontraints pour reprendre les efforts verticaux
- Bobines collées et coincées dans leurs logements par le rétreint différentiel pour reprendre les efforts horizontaux

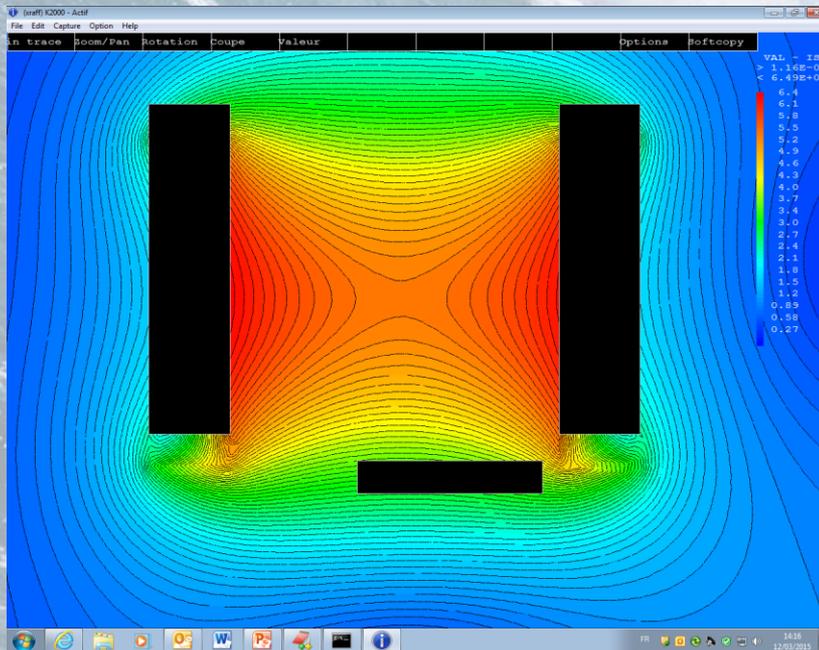
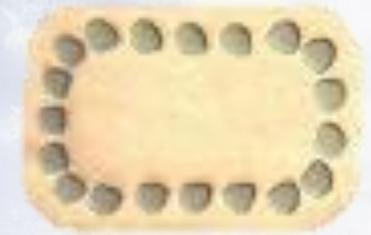
## Simulations de cas mécaniques



- On teste différents cas d'aimantation avec les efforts magnétiques calculés sous Ansys
- Déformations  $\leq 0,4 \text{ mm}$
- Contraintes  $\leq 50 \text{ MPa}$

## La protection électrique (avec Christophe Berriaud)

- On a choisi le même conducteur que pour Lotus
  - → Oxford Instruments, NbTi Rectangle Enamel 1\*0,6 mm<sup>2</sup> non isolé
- Avec le design initial : ça ne passe pas !



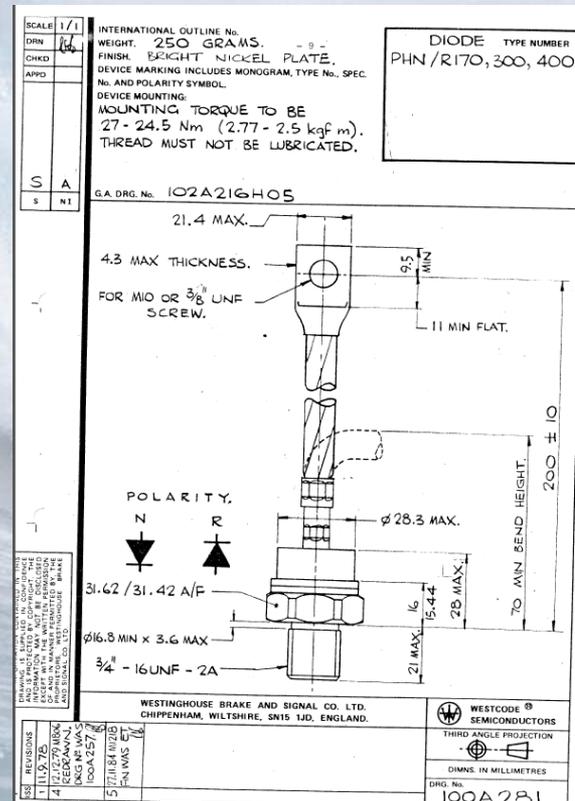
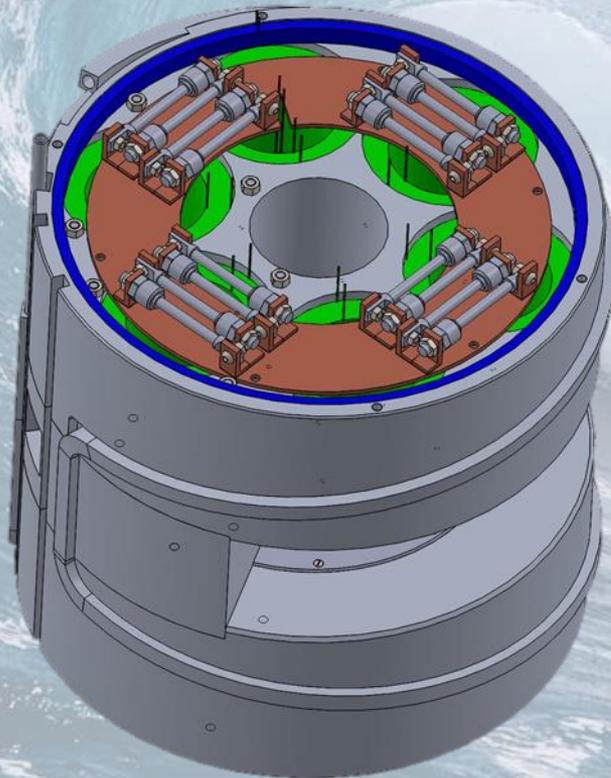
Densité de courant 300 A\*mm<sup>-2</sup>  
et champ-pic 6,4 Tesla

→ redimensionnement via Aubert:

- Bobines plus grandes
- 250 A\*mm<sup>-2</sup>
- Champ-pic 5,6 Tesla

## La protection électrique (avec Christophe Berriaud)

- Deux diodes tête-bêche aux bornes de chaque bobine



Référence  
**W0628SA150**

## Calcul de Quench

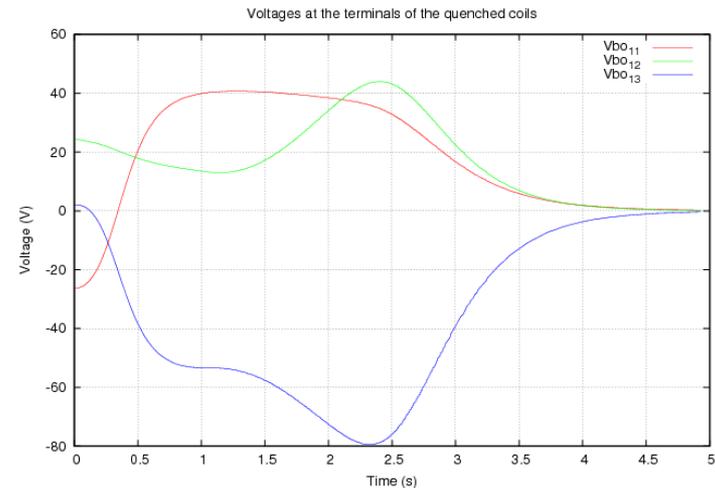
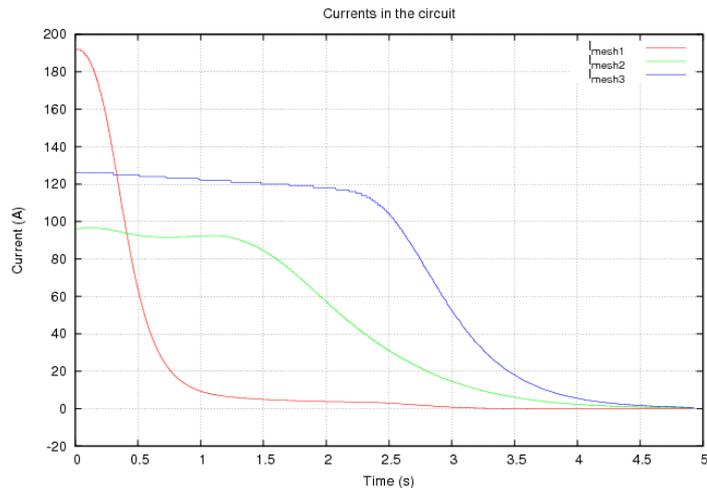
- A l'aide du programme TRANSITION de Claude Lesmond
- A nouveau confronté à la complexité de l'aimant
- La matrice des inductances permet de déterminer quelles interactions prédominent

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2	1	7,05E-02	1,49E-02	6,68E-03	2,25E-03	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03
3	2	1,49E-02	2,56E-01	4,63E-02	6,68E-03	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02
4	3	6,68E-03	4,63E-02	2,56E-01	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,49E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02	1,81E-02
5	4	2,25E-03	6,68E-03	1,49E-02	7,05E-02	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02	3,57E-02
6	5	3,57E-02	1,81E-02	1,49E-02	4,82E-03	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02
7	6	3,57E-02	1,81E-02	1,49E-02	4,82E-03	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02
8	7	3,57E-02	1,81E-02	1,49E-02	4,82E-03	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03
9	8	3,57E-02	1,81E-02	1,49E-02	4,82E-03	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03
10	9	3,57E-02	1,81E-02	1,49E-02	4,82E-03	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02	2,56E-02
11	10	3,57E-02	1,81E-02	1,49E-02	4,82E-03	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02
12	11	4,82E-03	1,49E-02	1,81E-02	3,57E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02
13	12	4,82E-03	1,49E-02	1,81E-02	3,57E-02	2,56E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02
14	13	4,82E-03	1,49E-02	1,81E-02	3,57E-02	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02
15	14	4,82E-03	1,49E-02	1,81E-02	3,57E-02	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02	2,56E-02	5,35E-03	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02	-2,55E-02
16	15	4,82E-03	1,49E-02	1,81E-02	3,57E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02	2,56E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00	-7,94E-02
17	16	4,82E-03	1,49E-02	1,81E-02	3,57E-02	2,56E-02	5,35E-03	1,50E-03	5,35E-03	2,56E-02	3,22E-02	-7,94E-02	-2,55E-02	-1,10E-02	-2,55E-02	-7,94E-02	1,48E+00

- Modèle simplifié à 3 circuits

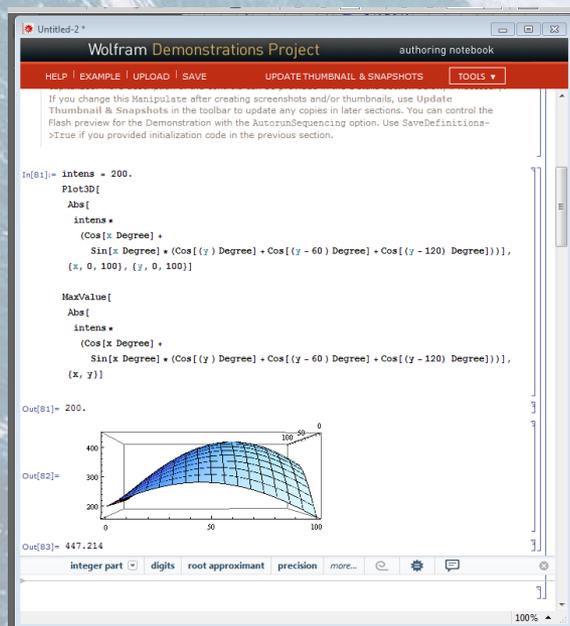
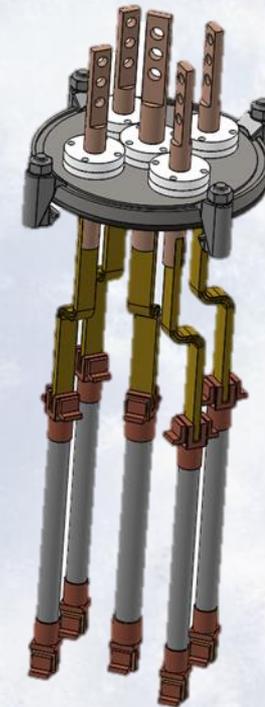
## Calcul de Quench

- Résultats : on arrive bien à propager le quench s'il démarre dans une bobine
- Point chaud à 106 K
- 10 kJ dissipés dans la diode



## Amenées de courant

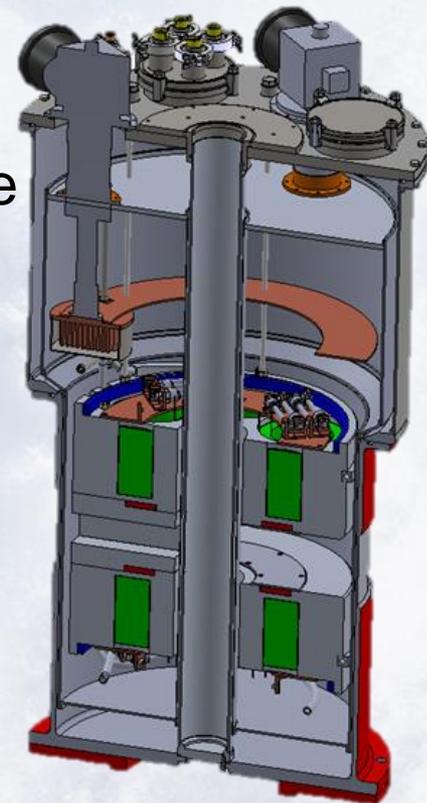
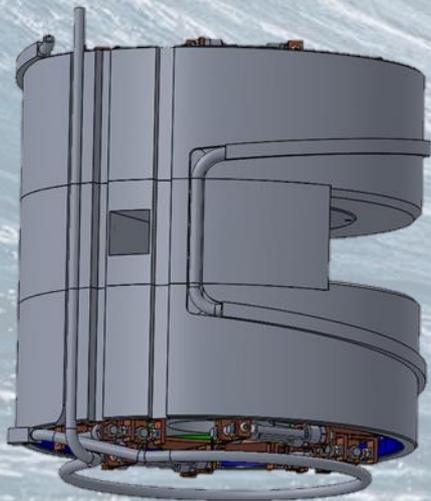
- Laiton / Bi-2212
- A priori besoin de 4 paires soit 8 AdI
- Mais on peut en utiliser seulement 5 :  
→ 4 entrées de courant et 1 retour commun



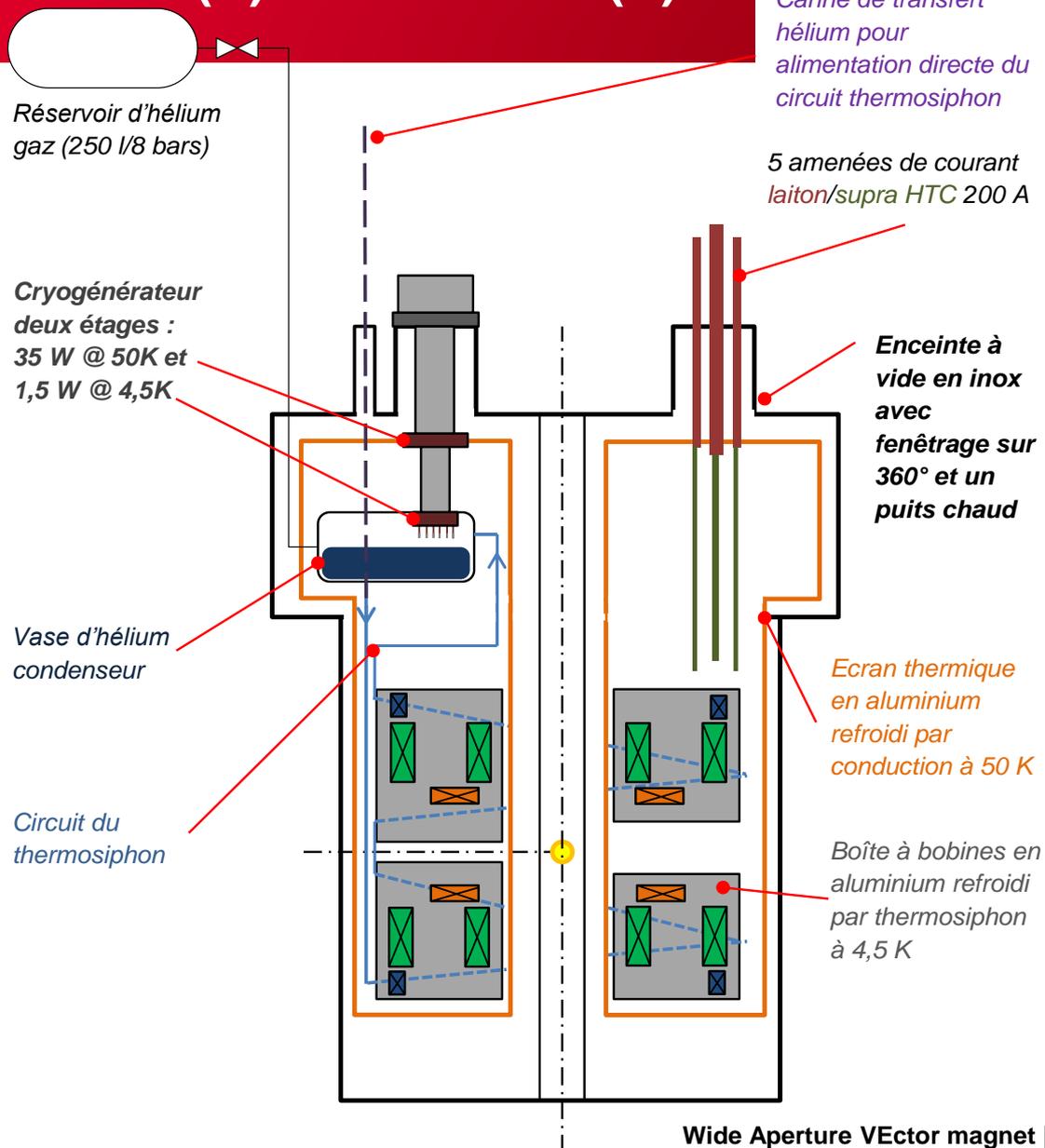
**Somme des intensités  
max = 450 A**

## ***Conception cryogénique***

- Bobines refroidies par conduction dans la boîte
- Boîte alu refroidie par un thermosiphon He
- Ecran à 50 K, super-isolation 30 couches
- Deux cryogénérateurs:
  - un étage, 100 W @ 50 K
  - deux étages, 35 W @ 50 et 1,5 W @ 4,5 K

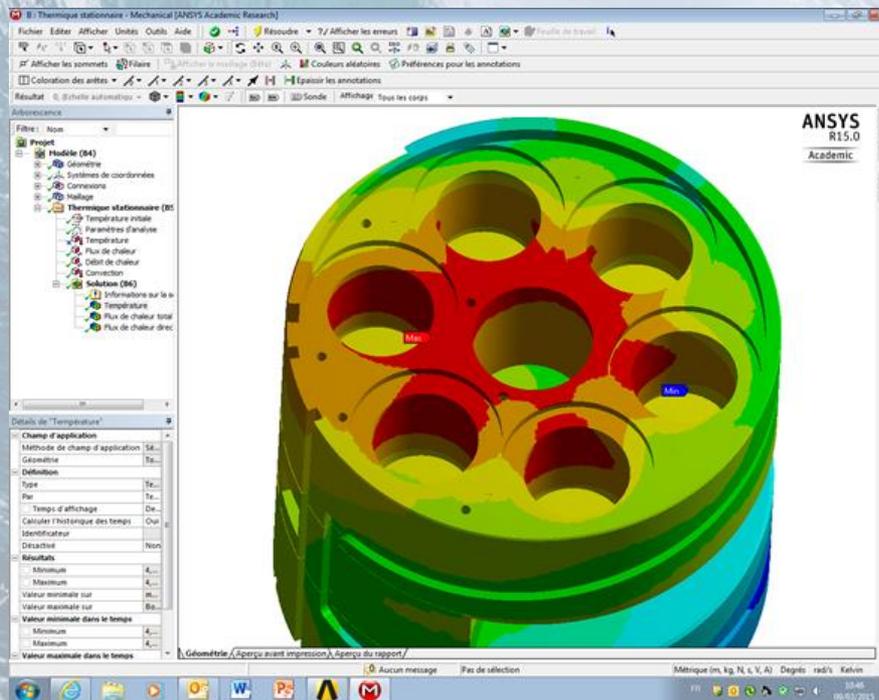


## ETUDE(S) TECHNIQUE(S)



## Etude thermique

- Etude en régime permanent sous Ansys
- La température dans les bobinages ne dépasse jamais 4,7 K ce qui laisse toujours une marge de sécurité de 1 K



# « QUELS RÉSULTATS DE L'ÉTUDE ? »

Wide Aperture VEctor magnet | Jeudi 12  
Mars 2015

| PAGE 34

## *Documents livrés*

- Spécification technique pour l'appel d'offres
- Rédaction d'un rapport technique détaillant l'étude
- Legs des codes et outils de calculs pour le futur stagiaire
- Publication par A. Bataille et al. sur l'aimant WAVE

## *Etudes restant à mener*

- Courants de Foucault dans la boîte à bobines
- Tresses de thermalisation
- Bus : disposition, technologie, protection, thermalisation
- Deux autres modèles de WAVE pour SOLEIL

| PAGE 37

**Wide Aperture VECtor magnet | Jeudi 12  
Mars 2015**

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
T. +33 (0)1 69 08 xx xx | F. +33 (0)1 69 08 99 89

DSM  
Irfu  
DIR