

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

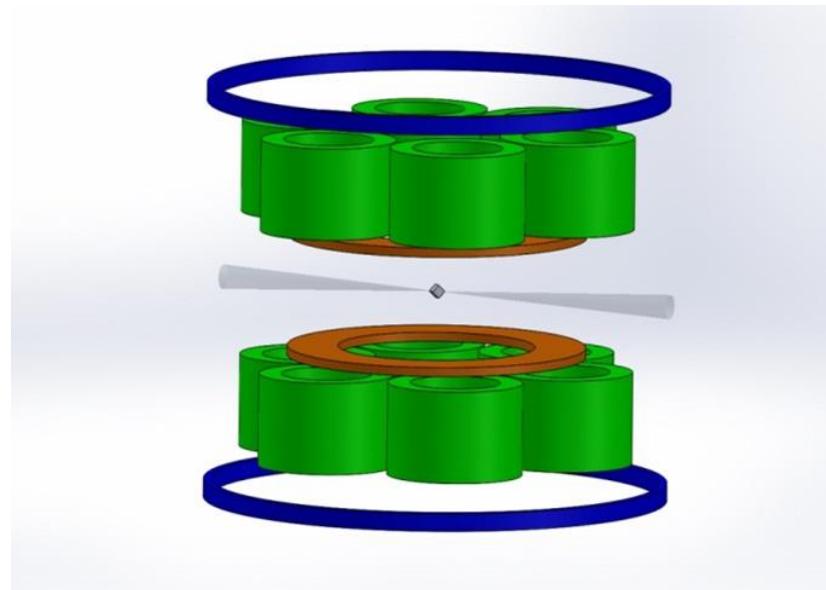
cea

Irfu



SOUTENANCE DE STAGE

DÉVELOPPEMENT D'ÉLECTRO-AIMANTS VECTORIELS SUPRACONDUCTEURS À STRUCTURES INNOVANTES



Damien SIMON

Jeudi 7 Janvier 2016
École des Mines de Saint-Étienne



- Le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) est un organisme public de recherche scientifique français
- IRFU : Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers
- SACM : Service des Accélérateurs, de Cryogénie et de Magnétisme
- LEAS : Laboratoire d'Études des Aimants Supraconducteurs

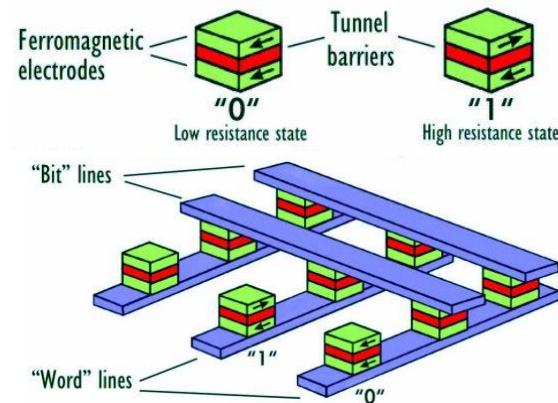
- 1. Généralités**
- 2. Objectifs du stage**
- 3. Projet WAVE**
- 4. Projet NanoWAVE**
- 5. Conclusion**

Utilisation des aimants vectoriels pour la recherche:

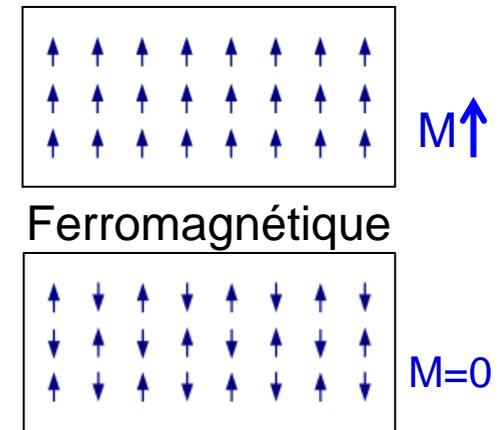
- Etude de l'aimantation de la matière
- Développement de la spintronique
- Etude de l'anisotropie des matériaux antiferromagnétiques



Tête de lecture d'un disque dur (application directe de la spintronique)



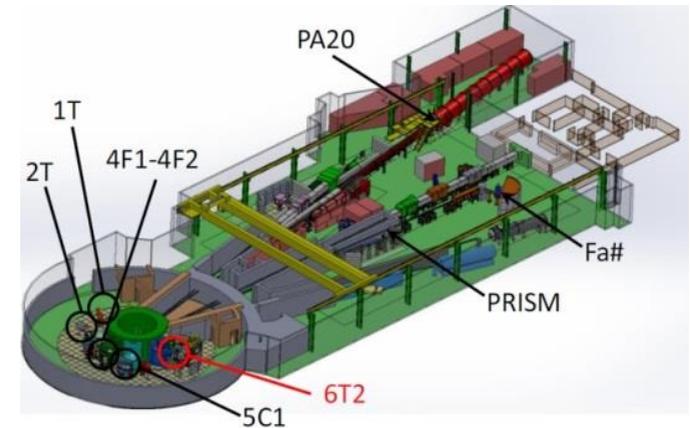
Magnetic Random Access memory (MRAM)



Antiferromagnétique

Méthodes Utilisées:

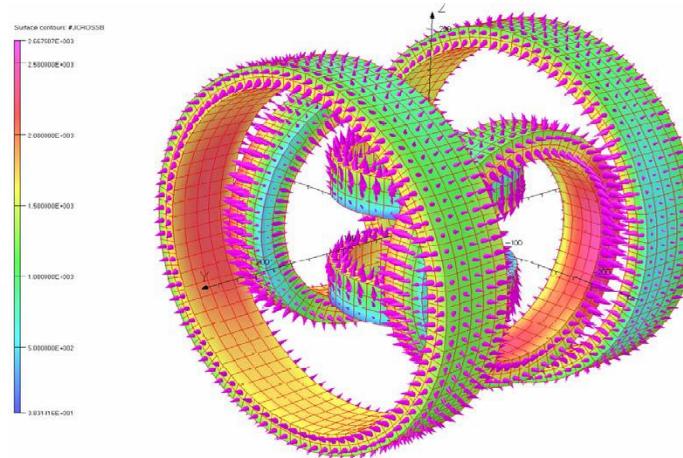
- Diffusion de neutrons (LLB)



- Microscopie X (SOLEIL)

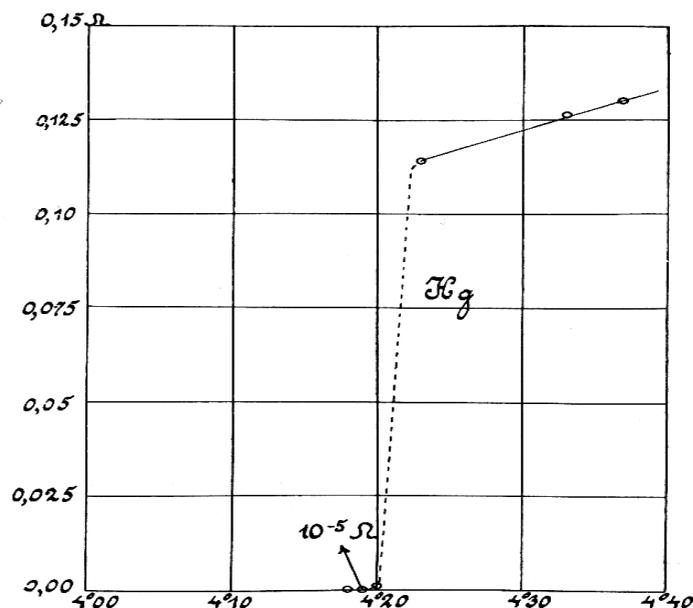


- Aimant vectoriel 3D : Aimant créant un champ magnétique orientable dans les trois directions de l'espace (Possibilité de contrôler les composantes x,y,z)
- Aimant vectoriel 2D : Aimant créant un champ magnétique orientable dans un plan de l'espace.

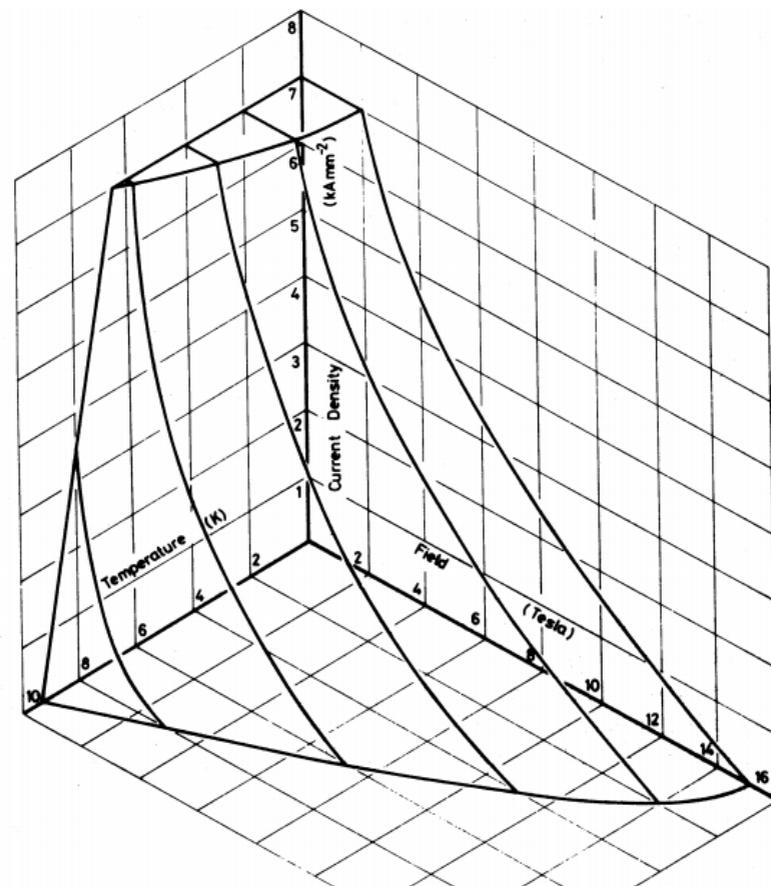


Aimant Vectoriel 3D
Supraconducteur

- Supraconductivité : phénomène caractérisé par l'absence de résistance électrique de certains matériaux que l'on a refroidis à basse température.



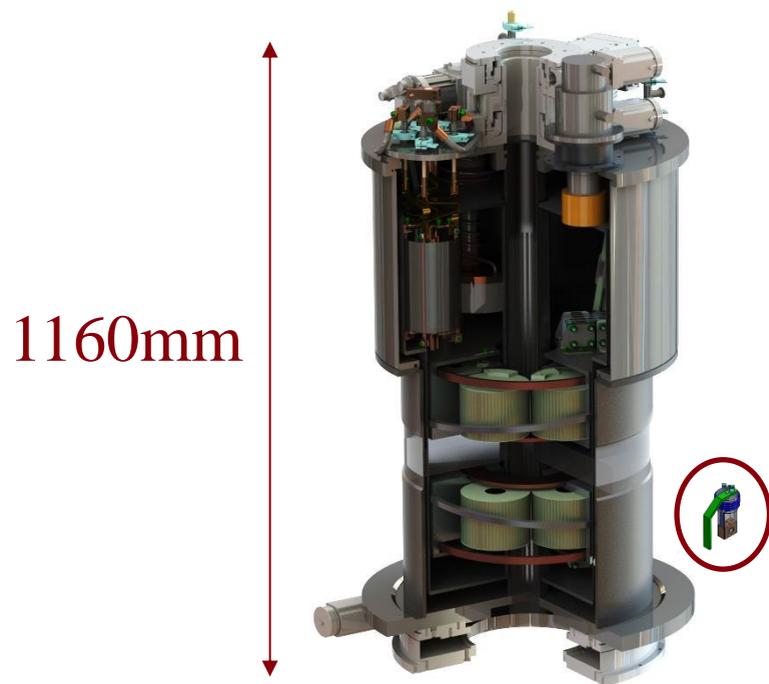
Résistance du mercure
en fonction de la
température



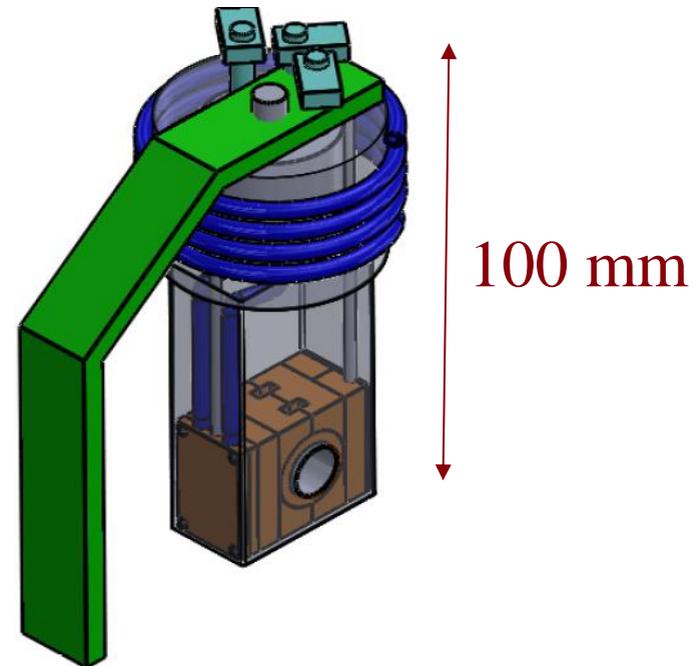
Surface critique du NbTi

- La réalisation d'électro-aimants supraconducteurs constitue l'application la plus courante de la supraconductivité.
- Les domaines d'utilisation sont l'imagerie médicale (Iseult), les accélérateurs de particules (projet LHC), la fusion nucléaire (ITER), la lévitation magnétique...
- Création de forts champs magnétiques.
- La conception d'aimants supraconducteurs fait intervenir de nombreux domaines de la physique comme le magnétisme, la thermique (cryogénie), l'électricité, la mécanique...

Aimants Vectoriels supraconducteurs pour étudier sous champ magnétique des échantillons



Projet WAVE (LLB)



Projet NanoWAVE (SOLEIL)

Cahiers des charges	WAVE (LLB)	NanoWAVE (SOLEIL)
Intensité du champ magnétique	0 à 1 T	0 à 0,4 T
Direction du champ magnétique	Orientable dans les trois dimensions de l'espace	Orientable dans le plan horizontal
Homogénéité au niveau de l'échantillon	<1000 ppm	<2000 ppm
Zone échantillon	Sphère de 5 mm de rayon	Sphère de 200µm de rayon
Ouverture angulaire horizontale (de part et d'autre du faisceau)	+/- 110°	-
Ouverture angulaire verticale (de part et d'autre du plan équatorial)	+/- 10°	-

Cahier des charges	WAVE (LLB)	NanoWAVE (SOLEIL)
Largeur de l'aimant suivant la direction s	<650 mm	<30 mm
Longueur de l'aimant suivant la direction x	<650 mm	<54.5 mm
Hauteur de l'aimant suivant la direction z	~ 600 mm	<40 mm
Diamètre pour le passage du faisceau	~ 50 mm	>16 mm
Insertion de l'échantillon	Puits débouchant de diamètre 100 mm	Passage de l'échantillon (Direction de s*Direction de x) >4mm*10mm
Intensité électrique des alimentations	<200A	<50 A
Amplitude des vibrations acceptée	-	<10 nm

Objectifs pour le projet WAVE:

- Suivi de l'étude réalisée par SIGMAPHI
- Définition du schéma cryogénique de l'aimant WAVE

Objectifs pour le projet NanoWAVE:

- Rédaction du cahier des charges
- Design Magnétique, Cryogénique et CAO
- Prototypage

PROJET WAVE



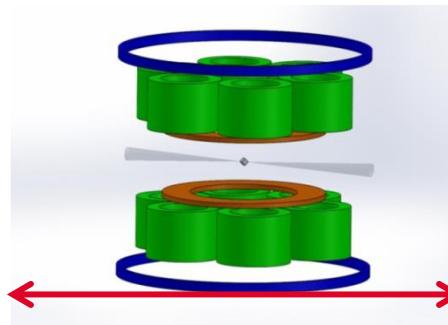
Acteurs du projet:



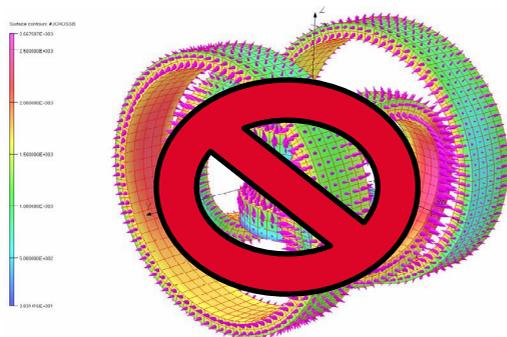
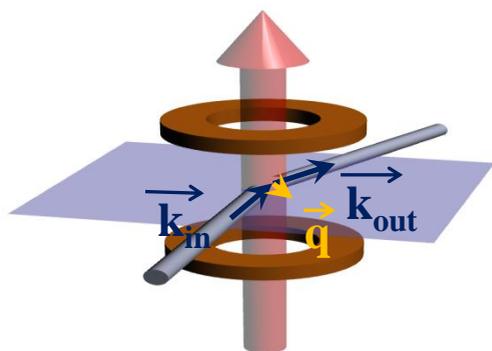
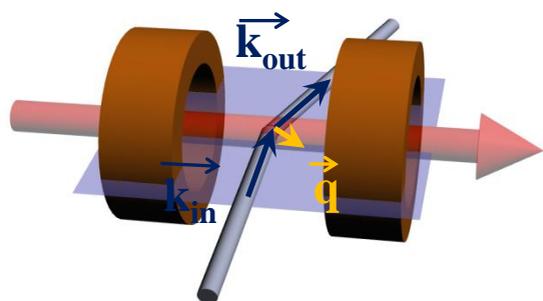
Utilisateur de l'aimant WAVE



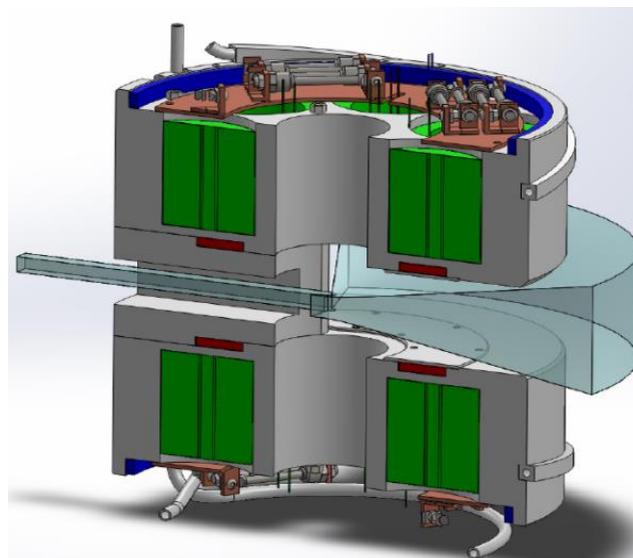
Concepteur de l'aimant WAVE



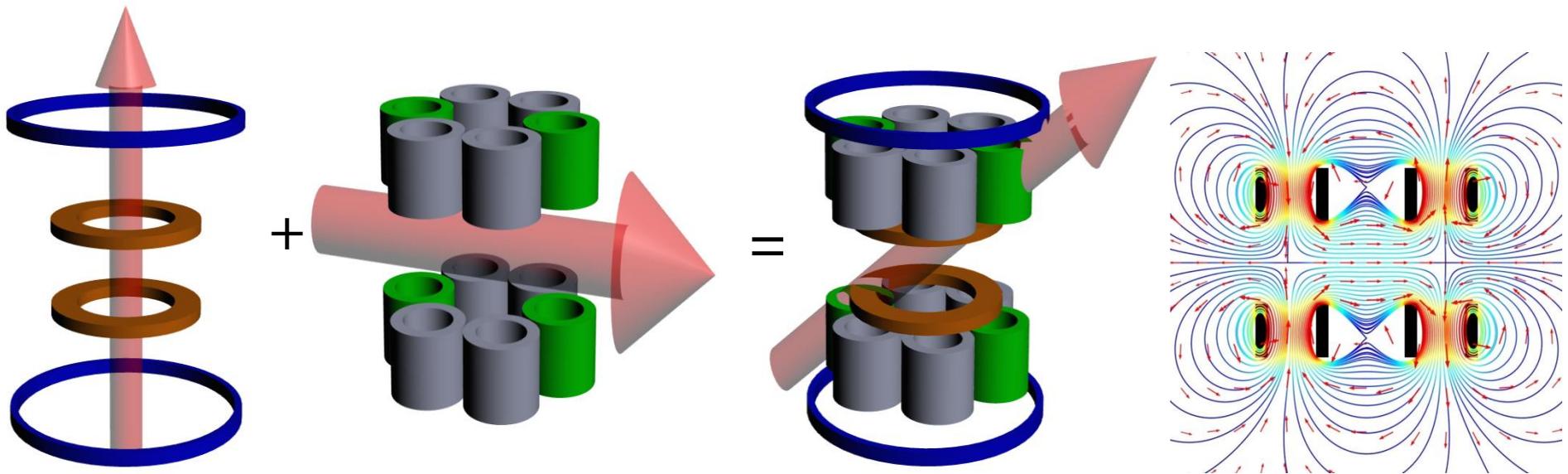
Fabricant de l'aimant WAVE



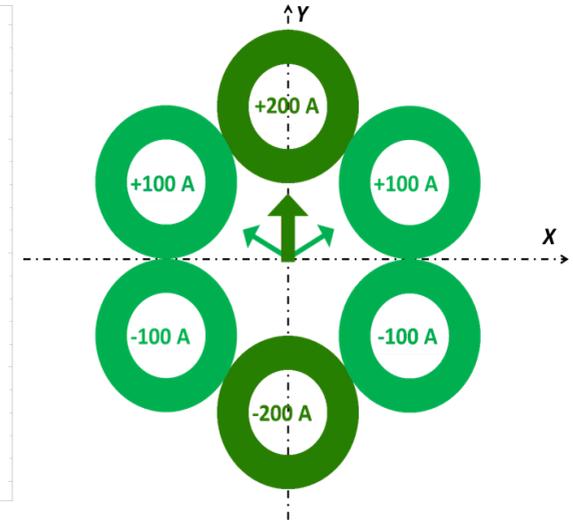
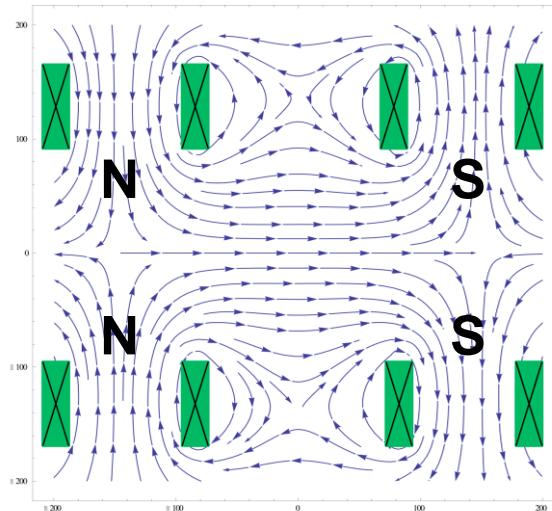
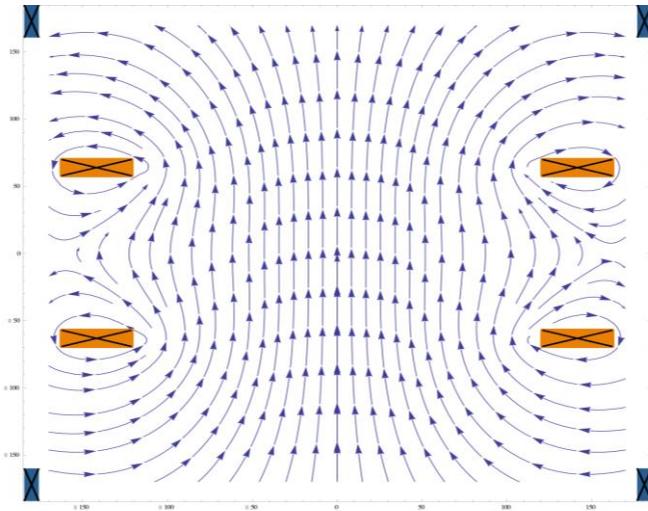
- Les aimants utilisés pour les expériences de diffusion de neutrons sont le plus souvent des aimants scalaires où l'échantillon peut tourner seulement autour d'un axe vertical
- Le but du projet WAVE est de concevoir et de construire un aimant vectoriel compatible avec les expériences de diffusion de neutrons à large ouverture angulaire (Brevet français #1262070)



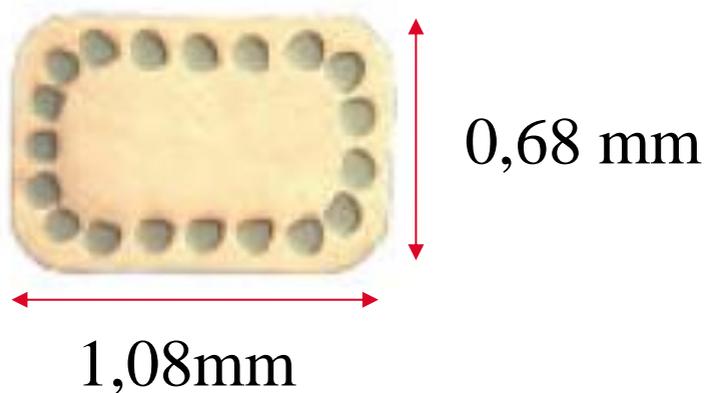
- La « couronne magnétique » : un concept made in Guy Aubert
- Utilisation des champs de fuite pour créer les composantes horizontales du champ magnétique (4 bobines, montées en série-opposition)
- Utilisation de bobines type « Helmholtz » pour créer la composante verticale du champ



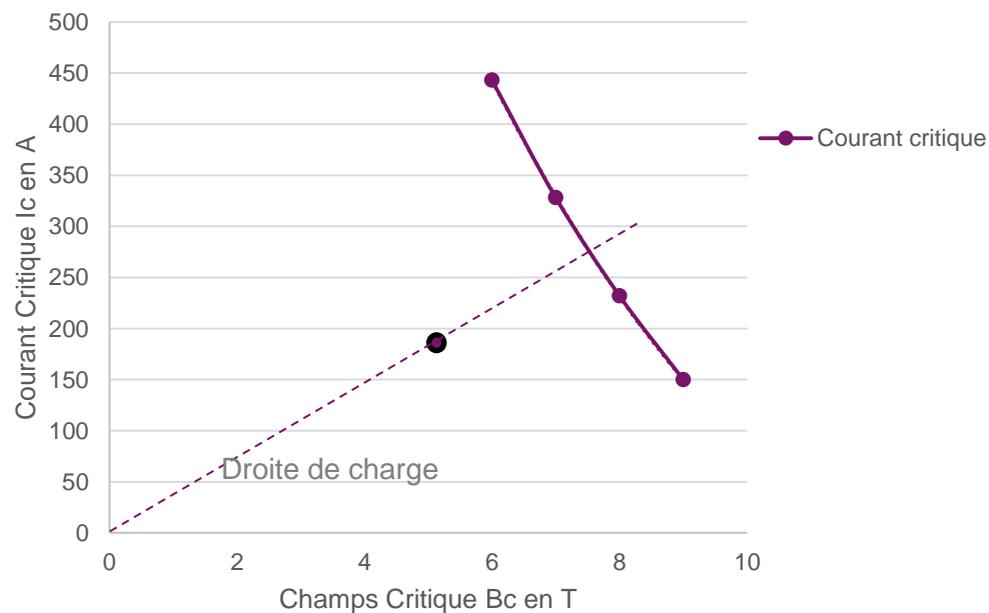
- Champ vectoriel maximum: 1T
- Homogénéité du champ : meilleure que 50ppm dans une sphère de 5mm de rayon
- Couronne de 6 bobines pour avoir une meilleure homogénéité
- Bobines bleues pour le blindage et pour l'homogénéité



- Fil supraconducteur en NbTi (Oxford)
- Température des bobines 4,3K
- Champ pic : 5,7T
- Densité de courant « engineering » : 250 A/mm²



Courant critique en fonction du champ critique à T=4,3K (Données Oxford)



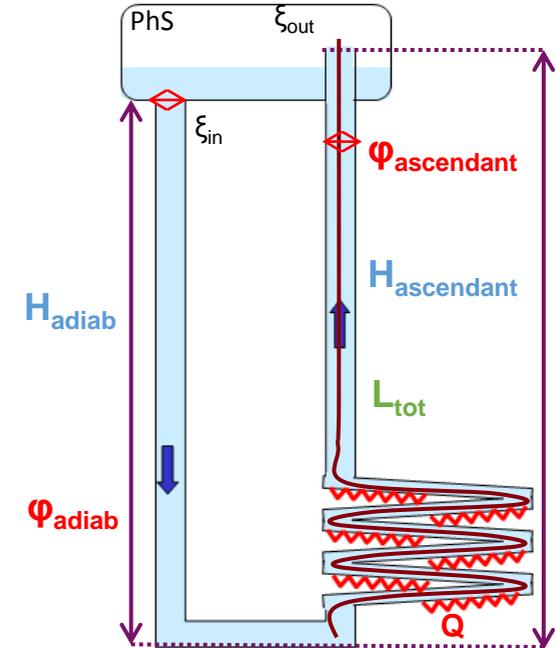
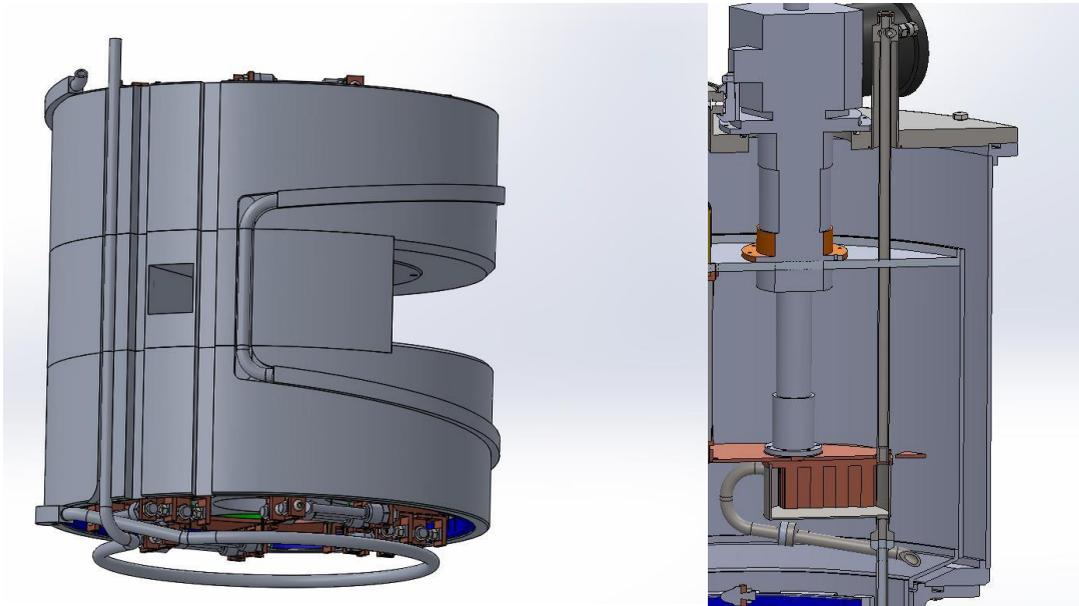
Demandes du LLB en terme de cryogénie :

- Système qui doit être autonome
- Système peu gourmand en hélium
- Système peu encombrant

Choix du système cryogénique

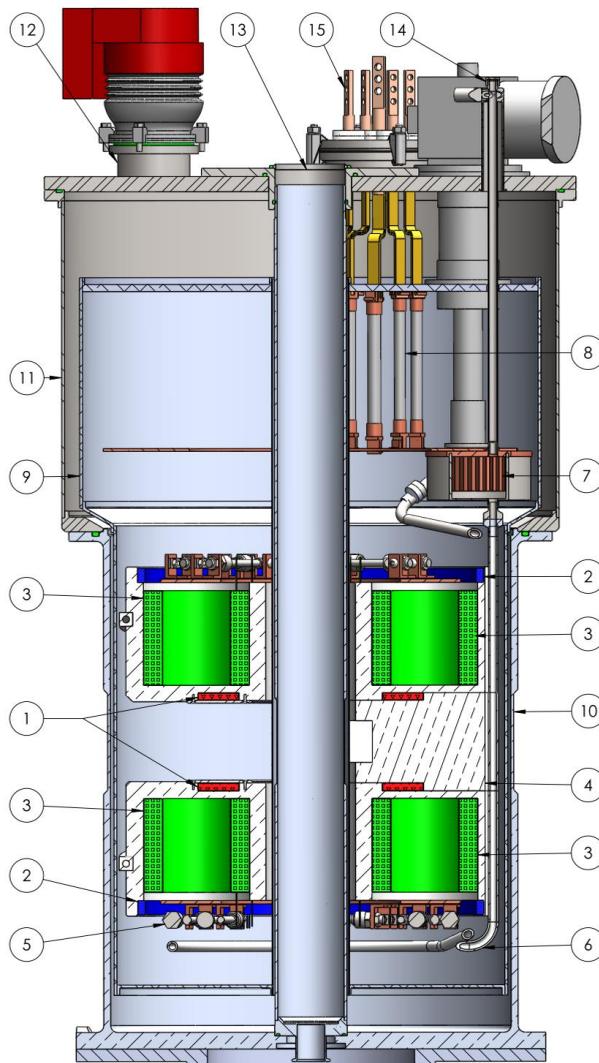
- Refroidissement indirect (« Therm autonome » par Bertrand Baudouy)
- Utilisation de deux cryogénérateurs (le premier à un seul étage 100 W@50 K et le deuxième à deux étages, 35 W@50 K et 1,5 W@4,5 K)

- Refroidissement Indirect
- Masse froide en aluminium (150kg)
- $Q_{\text{massefroide}} \sim 0,25\text{W}$
- $D_{\text{mtot}} \sim 0,97\text{g/s}$ et $x = 1,22\%$

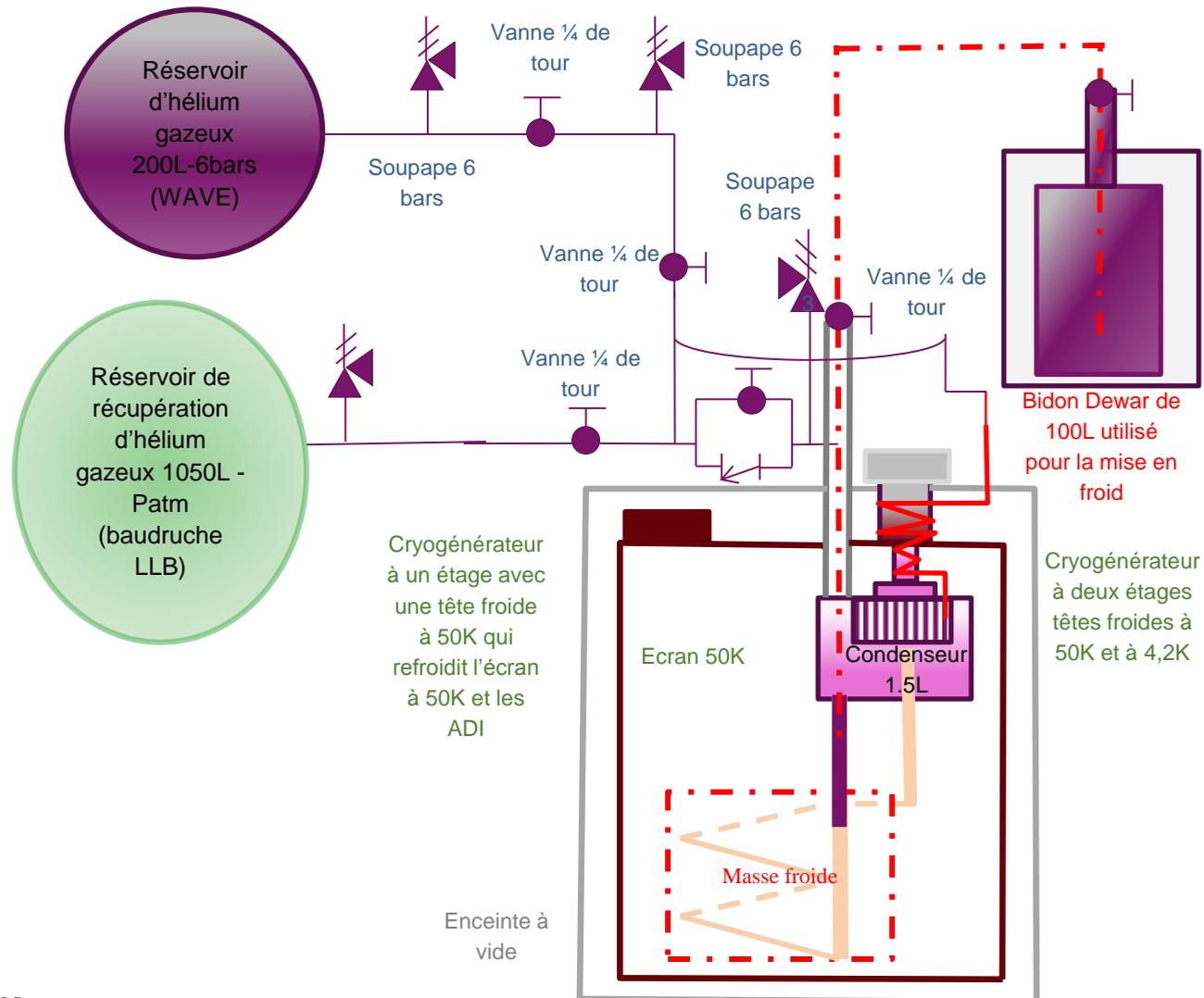


Hypothèse de fluide homogène

1. Bobines oranges
2. Bobines bleues
3. Bobines vertes
5. Diodes de protection
9. Ecran thermique 50K
10. Fenêtre à neutrons
11. Enceinte à vide du cryostat
12. Pompe à vide
13. Passage du cryostat de l'échantillon

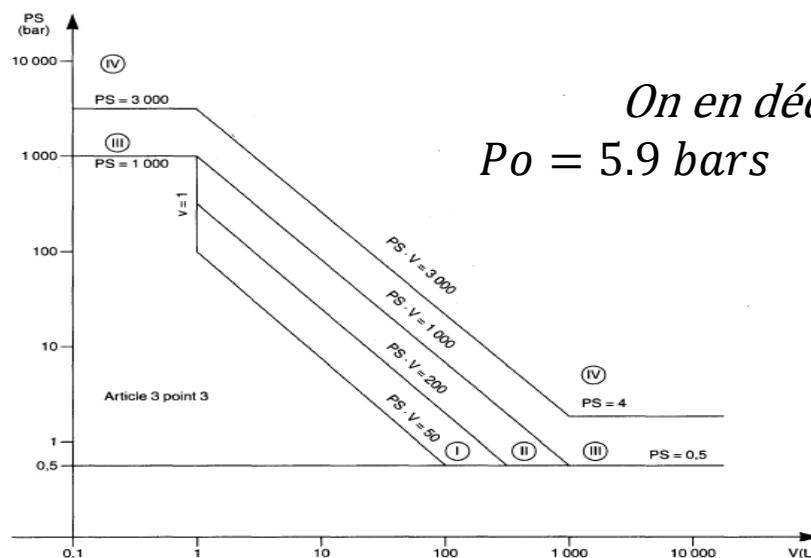


4. Masse froide (Boîte à bobine en Aluminium)
6. Boucle thermosiphon
7. Séparateur de phase
8. ADI haute température supra
14. Arrivée d'hélium
15. Entrée des ADI



Calcul de la masse d'hélium et de la pression après quench dans l'aimant:

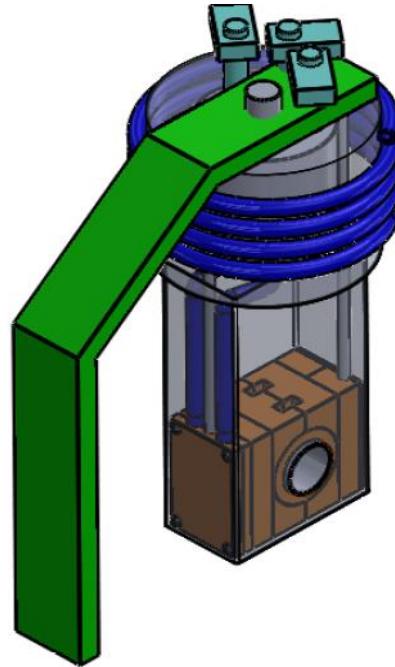
$$\begin{aligned}
 m_{\text{hélium}} &= \text{densité}(300\text{K}, P_0) * (V_{\text{réservoir}} + V_{\text{séparateurdephase}} + V_{\text{boucle thermosiphon}}) \\
 &= V_{\text{réservoir}} * \text{densité}(300\text{K}, P_f) + V_{\text{séparateurdephase}} \\
 &\quad * \left(\frac{\text{densité}(4.2\text{K}, P_f, \text{gaz})}{2} + \frac{\text{densité}(4.2\text{K}, P_f, \text{liquide})}{2} \right) + V_{\text{boucle thermosiphon}} \\
 &\quad * \text{densité}(4.2\text{K}, P_f, \text{liquide}) =
 \end{aligned}$$



On en déduit la pression P_0
 $P_0 = 5.9 \text{ bars}$ et $m_{\text{hélium}} = 190.7 \text{ g}$

- Suivi du projet chez SIGMAPHI
 - « Kick-off meeting » le 7/07/15 à Vannes
 - Réunion cryogénie le 8/07/15
 - Visite du LLB et du SACM par SIGMAPHI le 17/09/15
 - Revue de l'étude préliminaire le 02/10/15 à Vannes
 - Visite du LLB et du SACM par SIGMAPHI le 11/12/15
- Réunion de revue de plans de fabrication le 22/12/2015
- Lancement du prototypage début 2016
- Livraison de l'aimant WAVE au LLB en avril 2017

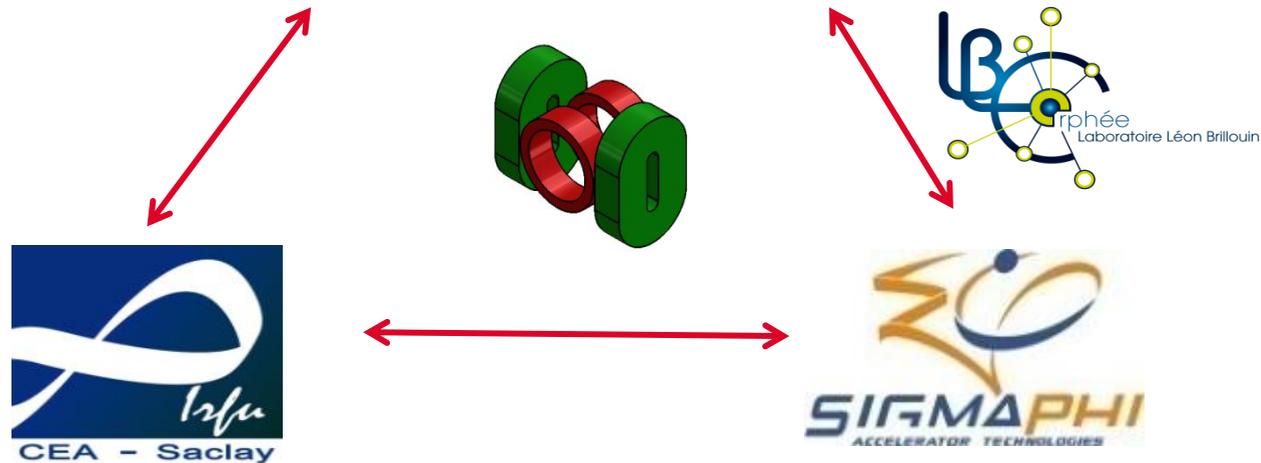
PROJET NANOWAVE



Acteurs du projet:



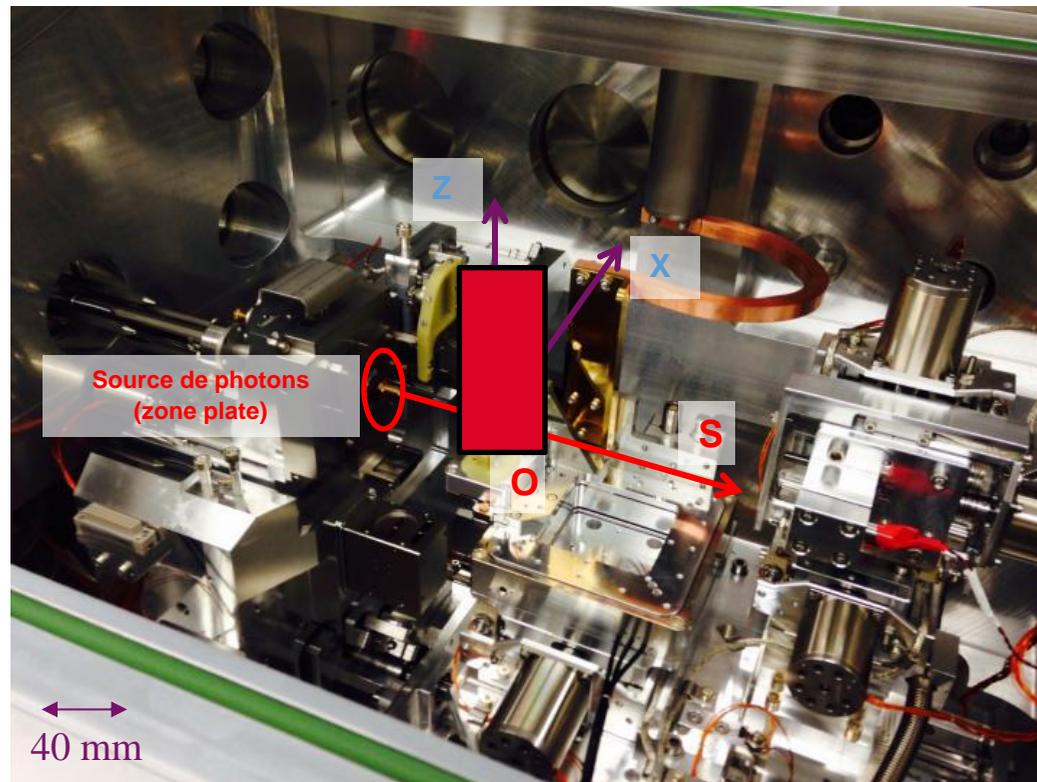
Utilisateur de l'aimant NanoWAVE

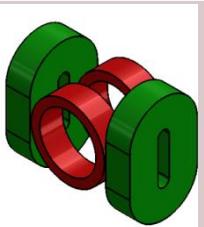
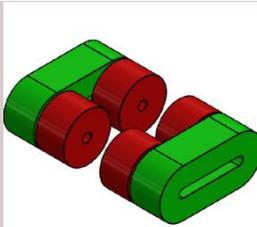


Concepteur de l'aimant NanoWAVE

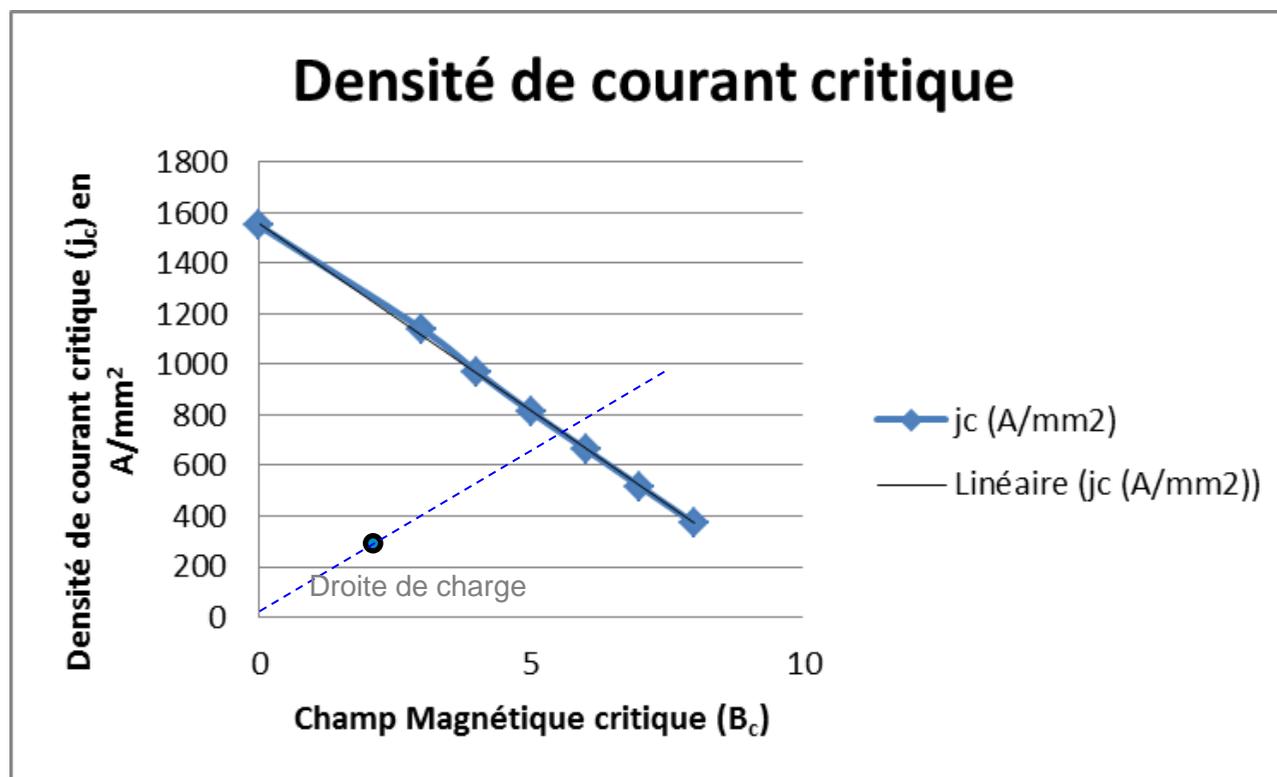
Conseiller pour la conception de l'aimant NanoWAVE

- Créer un aimant vectoriel supraconducteur dans une chambre expérimentale déjà sous vide
- Encombrement très problématique



Concept	Solution 1 : 2 paires de bobines type Helmholtz	Solution 2 : Une paire de bobines type Helmholtz et une paire de bobines hippodromiques	Solution 3 : Une paire de bobines hippodromiques et 4 bobines type « WAVE »
Géométrie			
Densité de courant	315 A/mm ²	315 A/mm ²	315 A/mm ²
Champ Bs au niveau de l'échantillon	0.466 T	0.466 T	0.0715 T
Champ Bx au niveau de l'échantillon	0.271 T	0.404 T	0.062 T
Champ pic bobines vertes (Bx)	2.281 T	2.112 T	1.184 T
Champ pic bobines rouges (Bs)	0.7321 T	0.7321 T	1.297 T
Homogénéité du champ sur une sphère de rayon 200µm	3700 ppm	1800 ppm	9000 ppm

- Fil supraconducteur rond en NbTi (Oxford) de diamètre extérieur 0,32mm
- Température des bobines : 4,3K
- Champ pic : 2,3 T
- Densité de courant « engineering » : 315 A/mm²

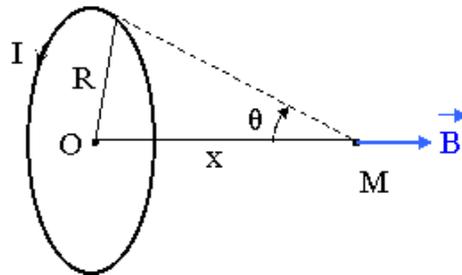


Calcul analytique bobines rouges (s-dir) :

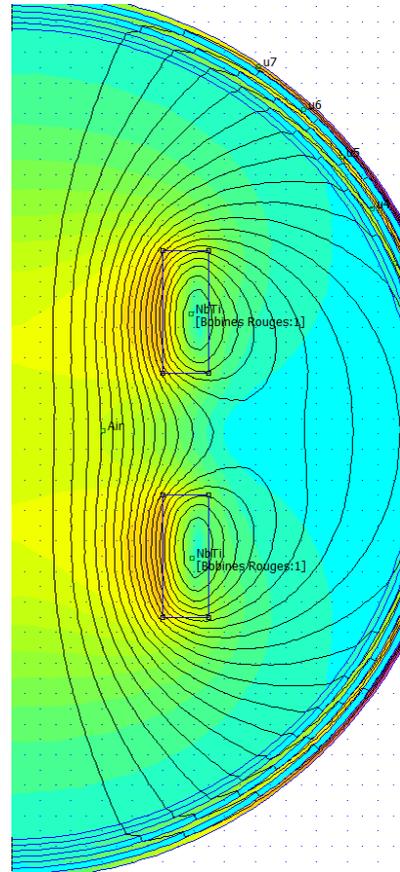
$$B_{\text{échantillon}} = 2 * B_{\text{centre spire}} * (\sin \alpha)^3$$

$$\text{Avec } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{R_{eq}}{H_{eq}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{R_{eq}}{z} \right)$$

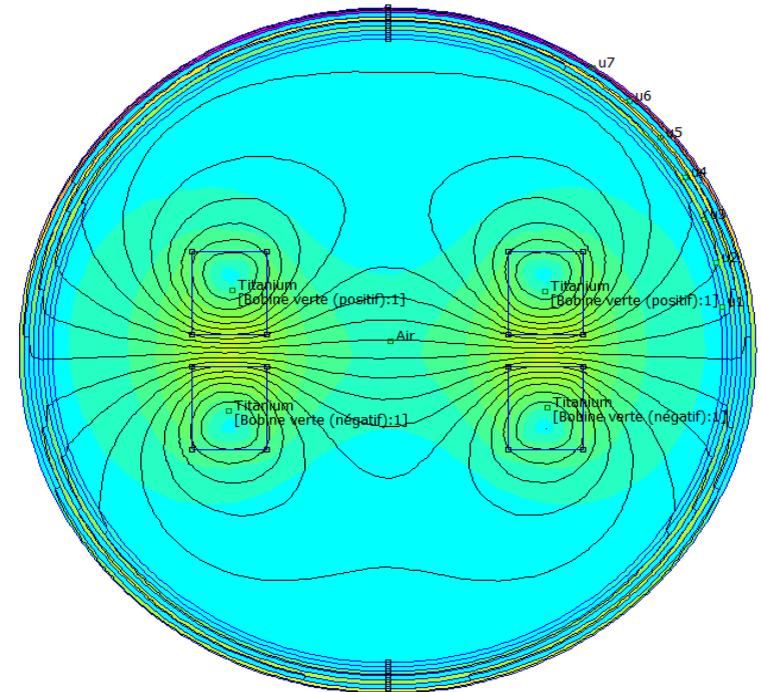
$$B_{\text{centre spire}} = \frac{\mu_0 * N * I}{2 * R_{eq}} = \frac{\mu_0 * J_0 * (R_e - R_i) * (H_e - H_i)}{2 * R_{eq}}$$



FEMM: Finite element method magnetics (Calcul en 2D)

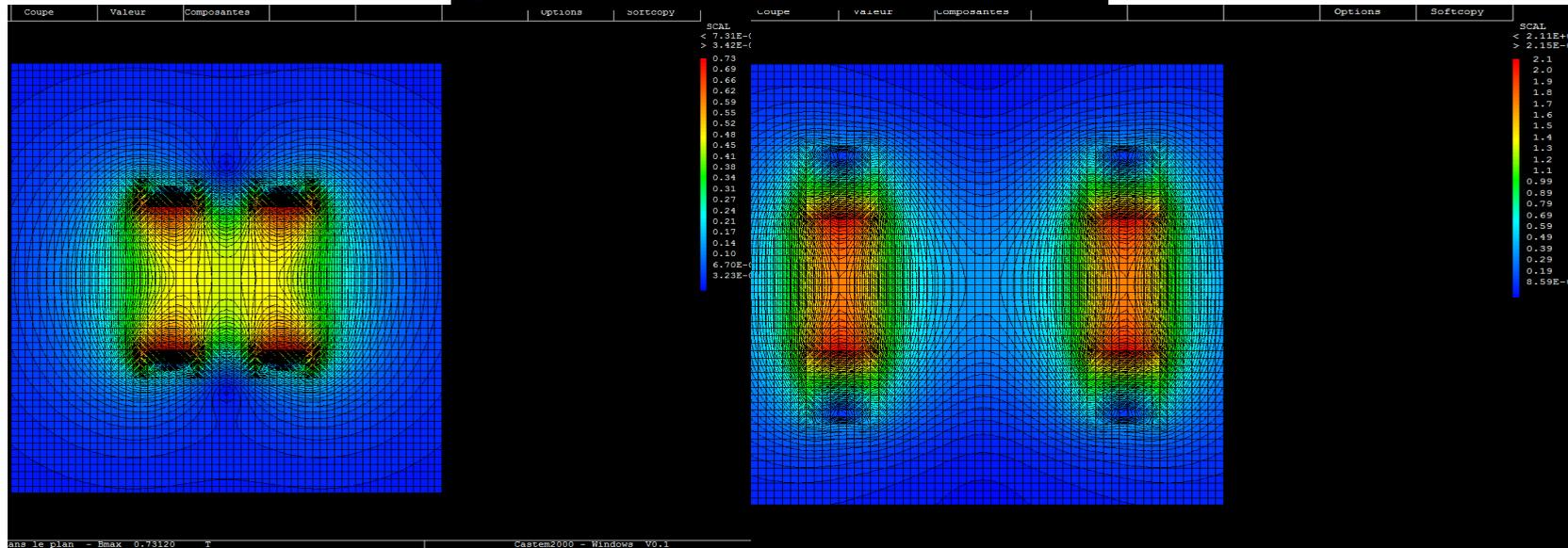
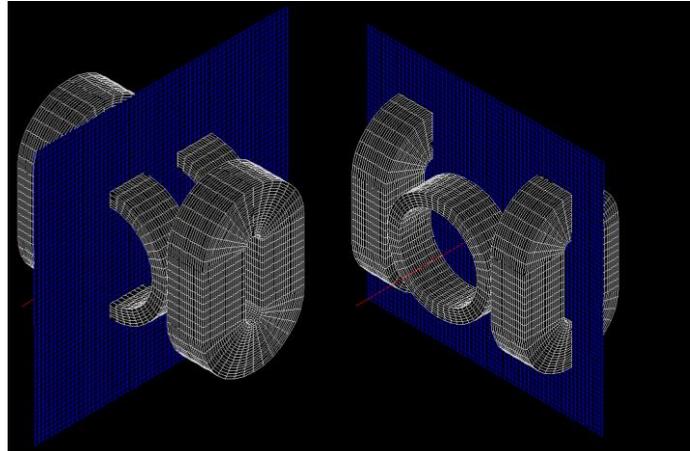


Bobines rouges
Calcul axisymétrique



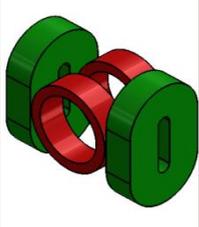
Bobines vertes
Calcul planaire

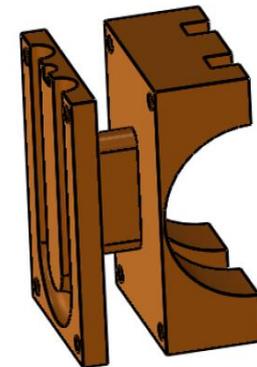
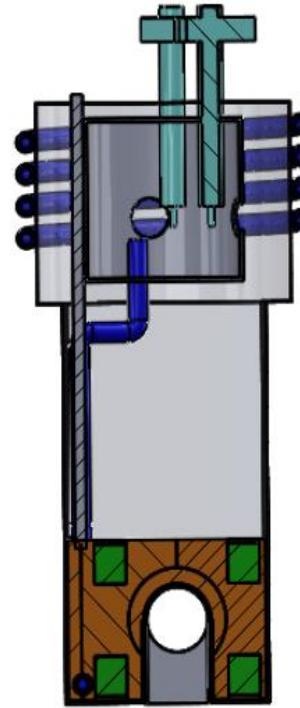
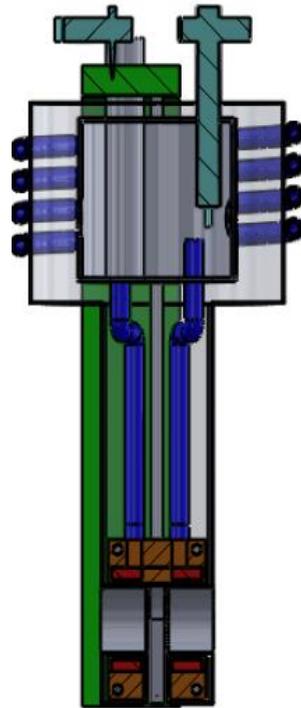
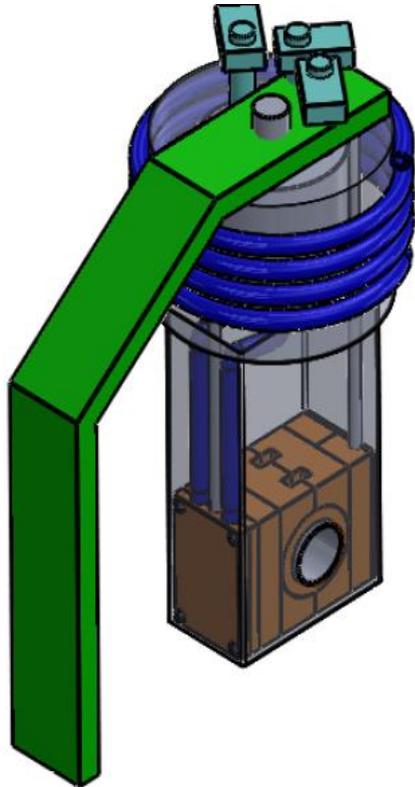
CAST3M:



Bobines rouges

Bobines vertes

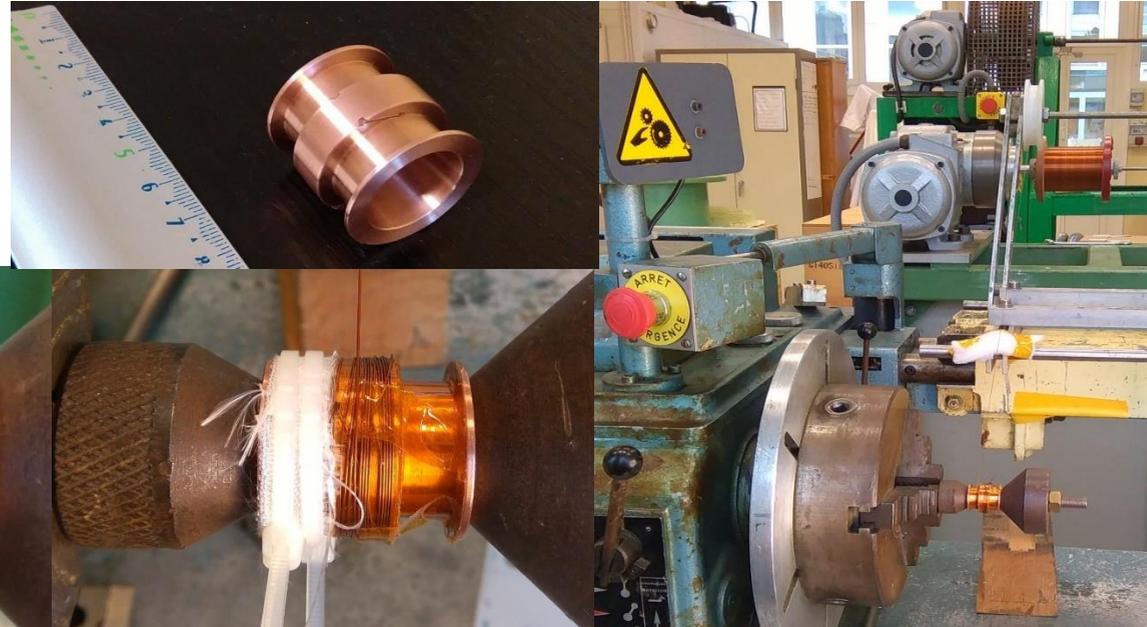
Concept	Solution 2 : Une paire de bobines type Helmholtz et une paire de bobines hippodromiques
Géométrie	
Densité de courant	315 A/mm ²
Champ Bs au niveau de l'échantillon	0.466 T
Champ Bx au niveau de l'échantillon	0.404 T
Champ pic bobines vertes (Bx)	2.112 T
Champ pic bobines rouges (Bs)	0.7321 T
Homogénéité du champ sur une sphère de rayon 200µm	1800 ppm



CAO de l'aimant NanoWAVE

Mandrins des bobines rouges et vertes de l'aimant NanoWAVE

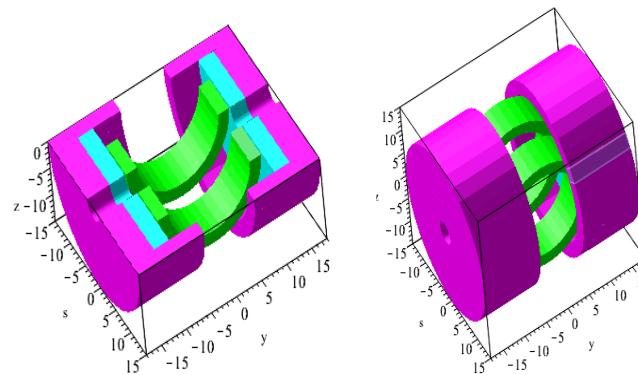
- **Bobinage**



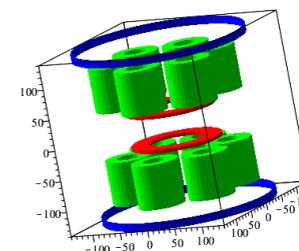
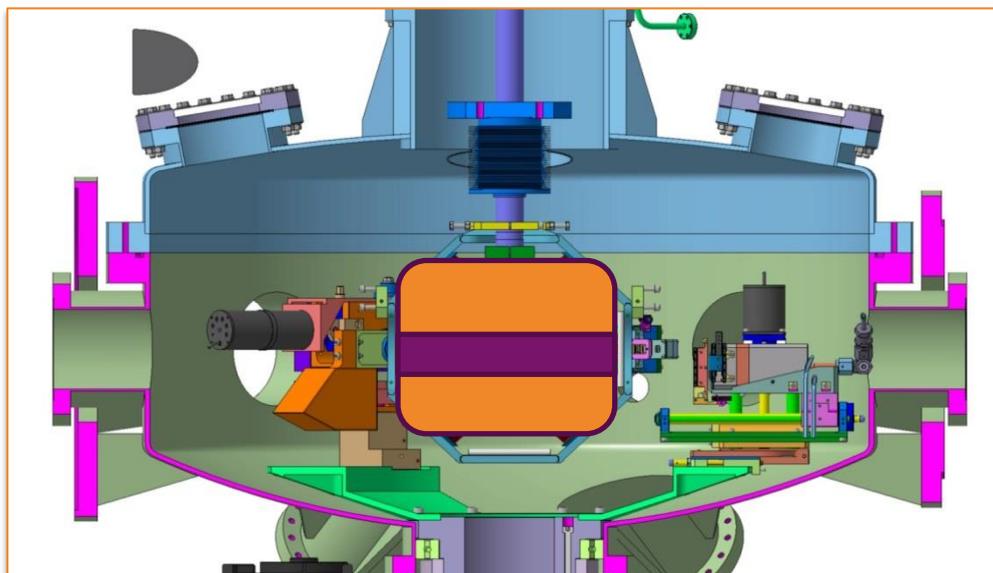
- **Ecran thermique en impression 3D**



- Rédaction du cahier des charges
- Premier Design Magnétique, Cryogénique et CAO
- Prototypage à continuer
- Tests magnétiques à réaliser
- Optimisation de l'homogénéité du champ magnétique possible (Pr. Guy Aubert)

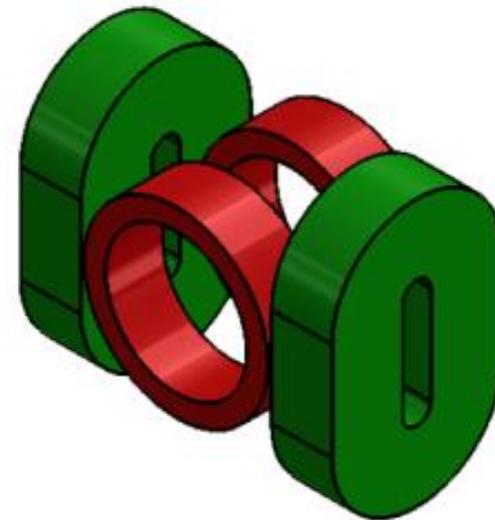
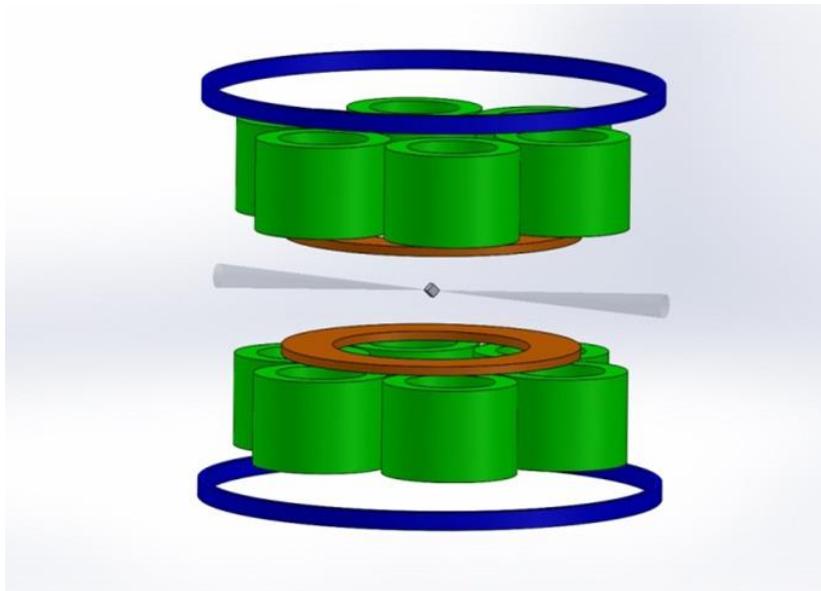


- Projet d'un aimant WAVE Photons pour la ligne de lumière SEXTANTS du synchrotron SOLEIL



Remplacement de l'équipage mobile SEXTANTS par un aimant supraconducteur WAVE

Merci pour votre attention



$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{moteur} &= \rho_{adiab} * g * H_{adiab} - \rho_{ascendant} * g * H_{ascendant} \\ \Delta P_{frein} &= \sum_i \lambda * \frac{L_{toti} * \rho_i * v_i^2}{\varphi * 2g} + \varepsilon_{in} * \frac{\rho_{adiab} * v_{adiab}^2}{2} + \varepsilon_{out} * \frac{\rho_{ascendant} * v_{ascendant}^2}{2} \\ \Delta P_{moteur} &= \Delta P_{frein} \end{aligned} \right.$$

Avec $i = 1 = adiab$ et $i = 2 = ascendant$

Avec λ le coefficient de perte de charges régulières donné par:

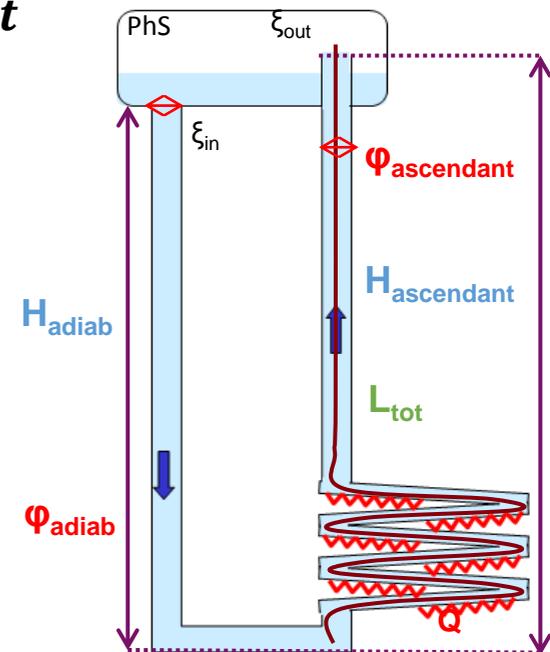
$$\lambda = \frac{64}{Re} \text{ si } 0 < Re < 2300 \text{ et } \lambda = 0.3164 * Re^{0.25} \text{ si } Re > 2300$$

$$\text{Or } Re = \frac{v * \varphi * \rho}{\mu} \text{ et } v = \frac{D_{mtot}}{S * \rho}$$

Avec ξ le coefficient de perte de charges singulières donné par :

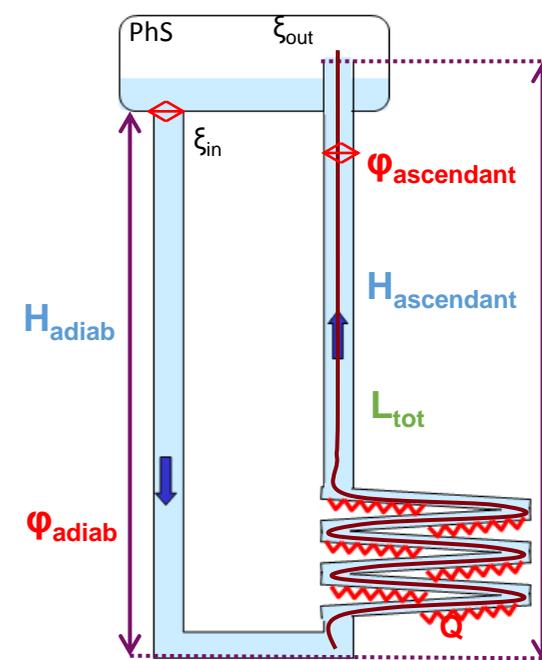
$$\varepsilon_{in} = 0.5 * \left(1 - \frac{S_{adiab}}{S_{PhS}} \right) \sim 0.5 \text{ (rétrécissement brusque de section)}$$

$$\varepsilon_{out} = \left(1 - \frac{S_{ascendant}}{S_{PhS}} \right)^2 \sim 1 \text{ (élargissement brusque de section)}$$

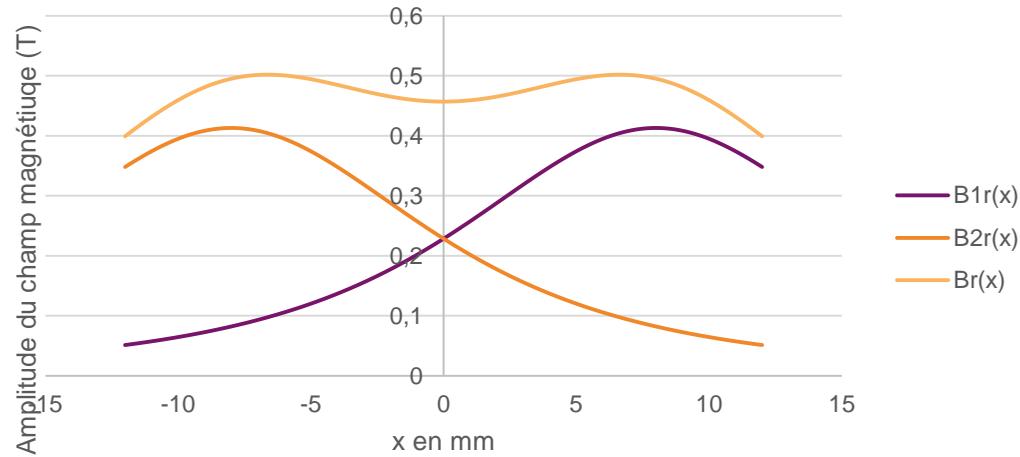


$$\left\{ \begin{array}{l} D_{mtot} = \frac{Q}{L_{\text{hélium}} * x} \\ \sum_i \lambda * \frac{L_{toti} * \rho_i * v_i^2}{\varphi * 2g} + \varepsilon_{in} * \frac{\rho_{adiab} * v_{adiab}^2}{2} + \varepsilon_{out} * \frac{\rho_{ascendant} * v_{ascendant}^2}{2} \\ -\rho_{adiab} * g * H_{adiab} + \rho_{ascendant} * g * H_{ascendant} = 0 \end{array} \right.$$

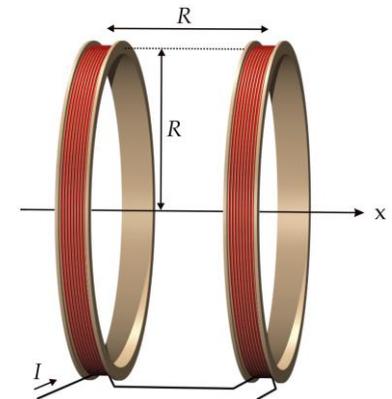
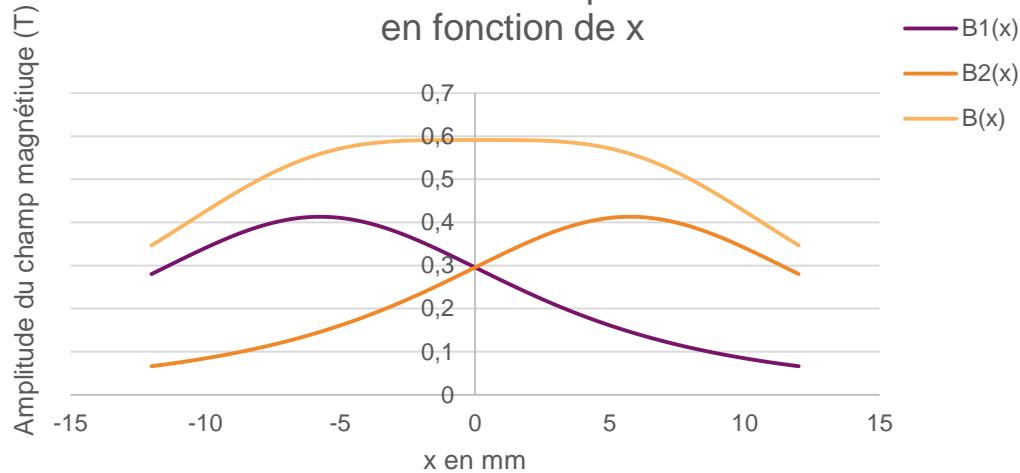
$x=1.22\%$ et $D_{mtot}=0.965\text{g/s}$

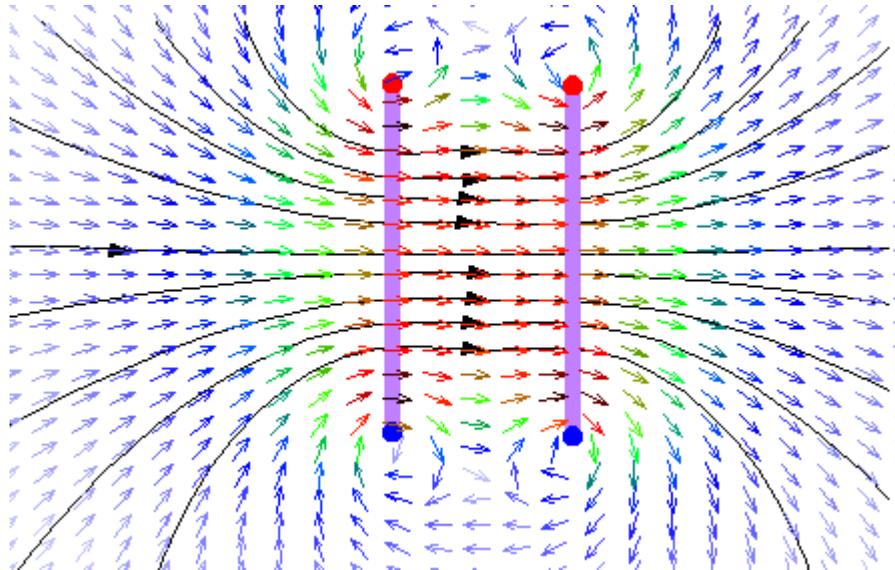
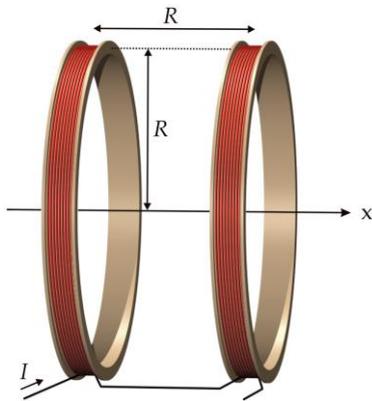


Champ magnétique des bobines rouge pour l'aimant NanoWAVE en fonction de x



Champ magnétique des bobines rouges dans le cas où elles seraient dans la position d'Helmholtz en fonction de x





$$B_{spire}(x) = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$B_1(x) = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + (x - R/2)^2)^{3/2}}$$

$$B_2(x) = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + (x + R/2)^2)^{3/2}}$$

$$B_{Helmholtz}(x) = B_1(x) + B_2(x)$$

Si on fait un développement limité de $B_{helmholtz}$ en $x=0$ on remarque que les termes de l'ordre 1, 2 et 3 s'annulent et qu'il faut donc aller jusqu'à l'ordre 4 pour voir une variation du champ aux alentours de 0.