

dapnia



saclay

Insert ferromagnétique pour compenser la force de pesanteur

Application au transfert thermique en Hélium

dapnia



saclay

Introduction

I. Cadre de l'étude

II. Calcul d'un insert ferromagnétique

III. Expérimentation dans Christiane

IV. Expérimentation dans la Station Cétacé

Conclusion

Introduction

dapnia

cea

saclay

Forts champs nécessitent l'utilisation de matériaux supraconducteurs



**Aimants supraconducteurs refroidis par l'hélium,
marge de sécurité en fonctionnement faible en terme d'échauffement**



Existence de zones de gravité réduite dans l'aimant



Crise d'ébullition de l'hélium inconnue dans ces conditions

**Y-a-t-il une influence de la gravité sur la crise d'ébullition?
si oui affecte-t-elle la marge de sécurité de l'aimant**

Cadre de l'étude: Force Magnétique

dapnia



saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé

Force de lévitation: $\vec{f} = \frac{1}{2\mu_0} \chi V \vec{\nabla} B^2$ où $\chi = \frac{\mu}{\mu_0} - 1$

Pour un corps diamagnétique (exemple l'hélium) χ est négatif

Dans le cas paramagnétique (exemple l'oxygène) χ est positif

Condition de lévitation: $\vec{G} \Big|_z = \vec{\nabla} B^2 \Big|_z = \frac{2\rho g}{\mu_0 \chi}$

Dans le cadre de notre étude, nous utiliserons la notation G_z pour désigner la composante axiale du vecteur $\vec{G} = \vec{\nabla} B^2$

Corps	Hydrogène (l)	Eau à 1°C	Hélium	Oxygène (l)
Gz (T ² /m)	-1000	-2796	-4100	+16

Cadre de l'étude: Courbe d'ébullition de l'hélium

dapnia

cea

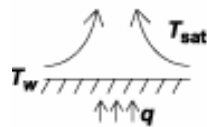
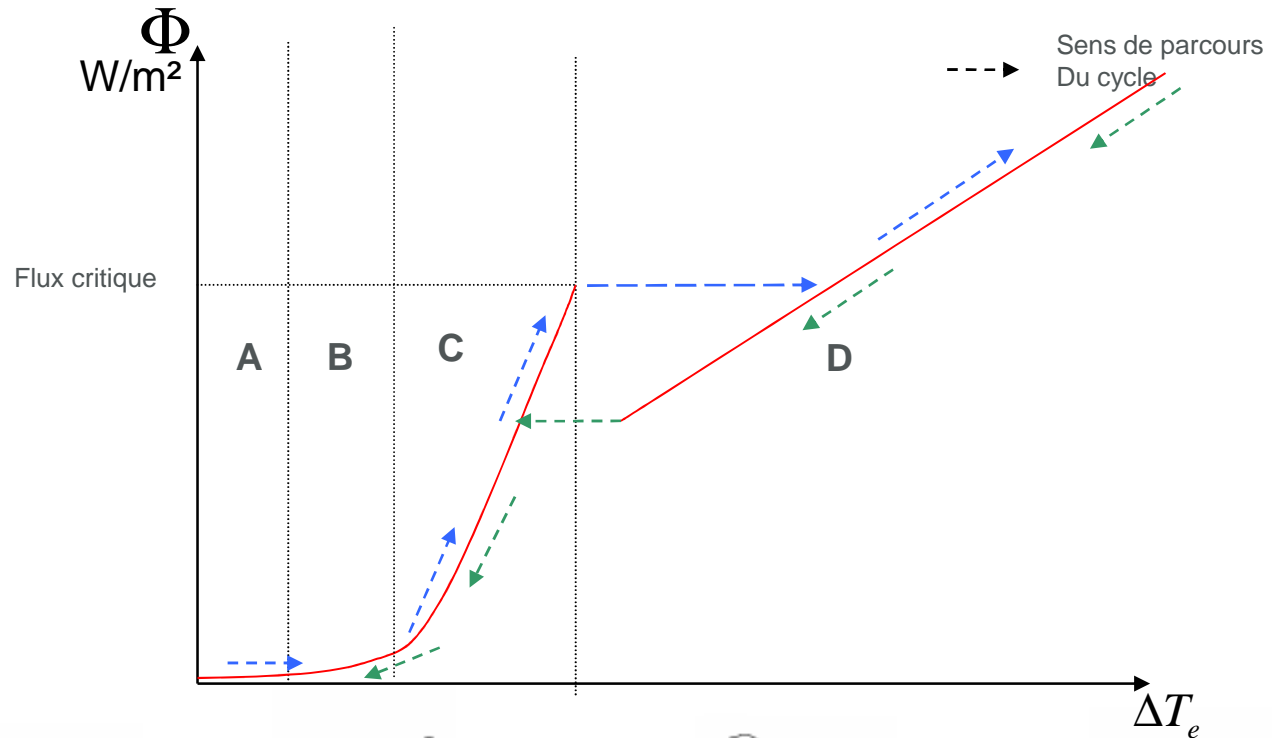
saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé



Zone A

Convection naturelle



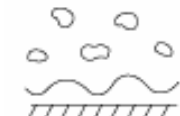
Zone B

Ebullition nucléée partiellement développée



Zone C

Ebullition nucléée totalement développée



Zone D

Ebullition en film

Cadre de l'étude: Paramètres influençant le flux critique

dapnia



saclay

L'état de surface (exemple : rugosité)

Propriétés thermo-physique du fluide

Orientation de la surface

Confinement de la surface de chauffe

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique



Il sera important de garder le même état de surface
Pour comparer deux campagnes successives

Expérimentation
dans Christiane

Expérimentation
dans Cétacé



Vérifier les propriétés de confinement de notre système

Cadre de l'étude: Lévitación de l'hélium

dapnia



saclay

Force magnétique, G_z de la forme:

$$G_z = 2B_z \frac{dB_z}{dz}$$

Apporté par la bobine

Existence d'une zone dans la bobine fournissant le gradient nécessaire à la lévitation du corps

Création d'un insert permettant d'apporter le gradient nécessaire

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé

Force de lévitation nécessaire pour faire léviter l'hélium : - 4100T²/m

Champ de fond de 7 T

Gradient de - 300 T/m!!!!

Cadre de l'étude: Lévitation de l'hélium

dapnia



saclay

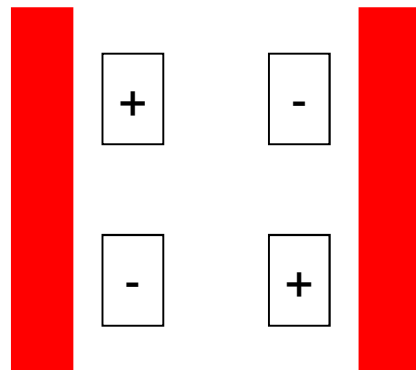


Utilisation d'une bobine existante : Christiane, fournissant 7 T de champ de fond

Création d'un insert pour le *fournir le gradient nécessaire*

Géométrie de type quadripôle:

Bobinage



Au centre, pas de création de champ magnétique, mais création d'un gradient



Utilisation d'un quadripôle ferromagnétique entièrement hypersaturé à 2.13T par le champ extérieur

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé

Cadre de l'étude: Géométrie de l'insert

dapnia

cea

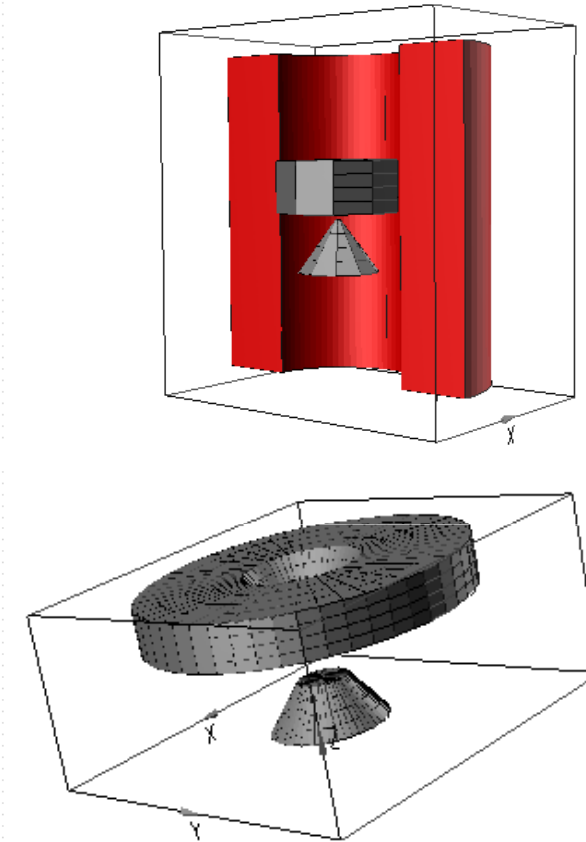
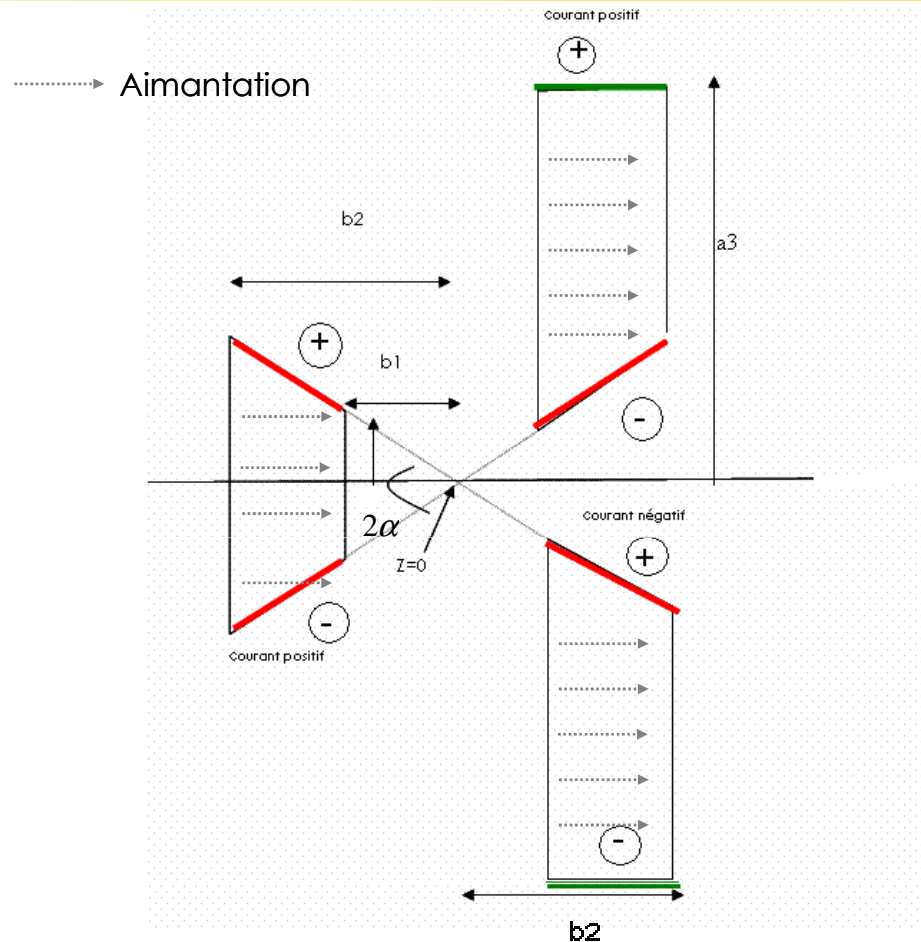
saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé



En utilisant le méthode des courants ampériens, l'aimantation peut être remplacée par des densités de courants superficiels dans le cas d'un matériau ferromagnétique entièrement saturé

$$\vec{K} = \vec{M}_s \times \vec{n} \quad \text{avec } \vec{n} \text{ normale sortante à la surface}$$

Cadre de l'étude: Intérêt géométrie de l'insert

dapnia

cea

saclay

- La géométrie conique apporte des effets de pointe importants (exemple séparation magnétique)
- Géométrie tronquée dans le but d'insérer une sonde thermique
- Insert tronconique et son complémentaire forment un quadripôle au sens des distributions superficielles de courant.

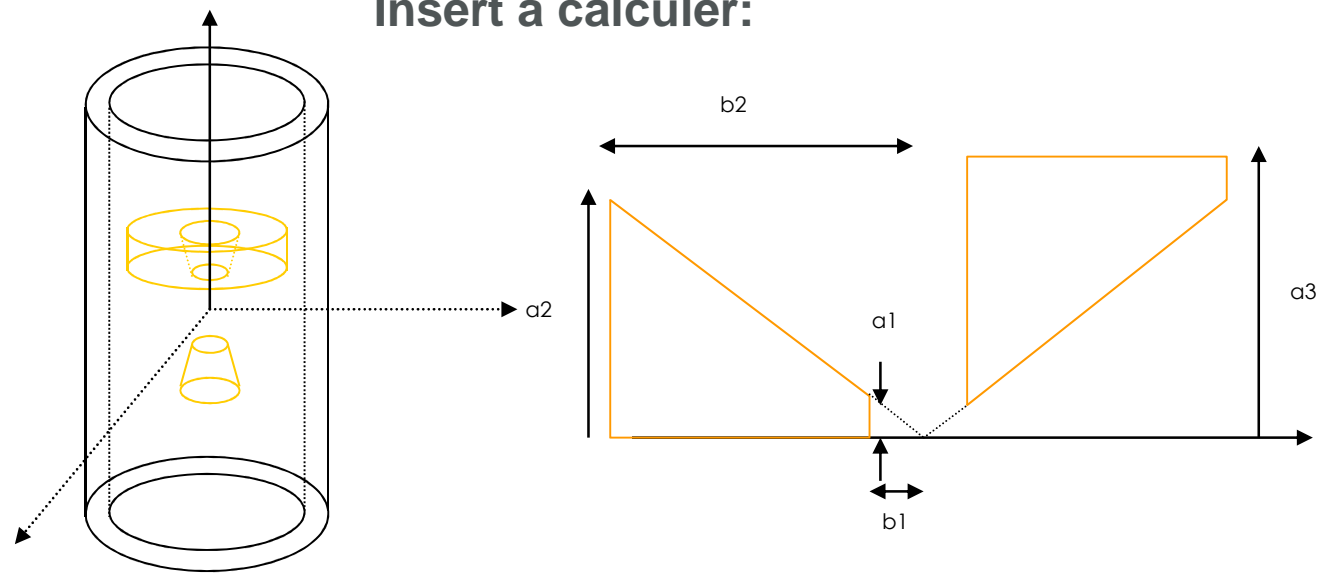
Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé

Insert à calculer:



Calcul analytique de l'insert: Induction magnétique

dapnia



saclay

Le calcul de l'induction sur l'axe résulte de l'intégration du champ créé par une spire uniformément aimantée, de rayon a de distance à l'origine b , de densité superficielle de courant K : $\vec{K} = \vec{M}_s \times \vec{n}$

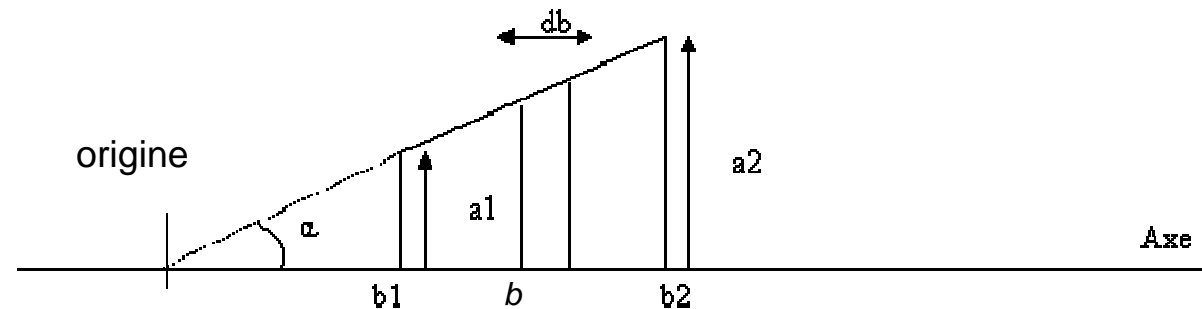
$$B_z = \frac{\mu_0 K}{2} \frac{a^2}{(a^2 + (b - z)^2)^{3/2}}$$

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé



$$B_z = \frac{\mu_0 M_s}{2} \tan^2 \alpha \int_{b_1}^{b_2} \frac{b^2}{(b^2 \tan^2 \alpha + (b - z)^2)^{3/2}} db$$

Calcul analytique de l'insert: Induction magnétique

dapnia



saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique

Expérimentation
dans Christiane

Expérimentation
dans Cétacé

L'induction magnétique pour le cône s'écrit:

$$B_z = \frac{\mu_0 M_s}{2} \left\{ \begin{array}{l} \sin^2 \alpha \cos \alpha \ln \frac{b_2}{b_1} + \sin^2 \alpha \cos \alpha \left\{ \ln \left[1 - \frac{z}{b} \cos^2 \alpha + \sqrt{1 - \frac{z}{b} \left(2 - \frac{z}{b} \right) \cos^2 \alpha} \right] \right\}_{b_1}^{b_2} \\ - \cos \alpha \left[\frac{1 - \left(2 - \frac{z}{b} \right) \cos^2 \alpha}{\sqrt{1 - \frac{z}{b} \left(2 - \frac{z}{b} \right) \cos^2 \alpha}} \right]_{b_1}^{b_2} \end{array} \right\}$$

Le résultat pour le complémentaire est le même, en changeant le signe de la densité superficielle de courant.

Calcul analytique de l'insert: Décomposition en harmoniques sphériques

dapnia



saclay

A l'intérieur d'une sphère magnétiquement vide, de centre 0, chacune des composantes de l'induction a son Laplacien nul. Il existe une décomposition unique du champ en harmoniques sphériques, qui se simplifie dans le cas axisymétrique:

$$B_z(r, \theta, \varphi) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (Z_n r^n P_n(\cos \theta))$$

Il suffit donc de développer le champ créé par une spire en série et de l'intégrer entre b_1 et b_2 . Pour la spire énoncée précédemment on obtient:

$$B_z = \frac{\mu_0 K}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a^2}{(a^2 + b^2)^{3/2}} P_n(\cos \alpha) \frac{1}{(a^2 + b^2)^{(n-1)/2}} z^n$$

En intégrant la décomposition de la spire entre b_1 et b_2 on obtient:

$$B_z = \frac{\mu_0 K}{2} \left(\sin^2 \alpha \cos \alpha \ln \frac{b_2}{b_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \alpha \cos^{n+1} \alpha P_{n+1}^1(\cos \alpha) \left(1 - \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^n \right) \left(\frac{z}{b_1} \right)^n \right)$$

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé

Calcul analytique de l'insert: Décomposition en harmoniques sphériques

dapnia



saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique

Expérimentation
dans Christiane

Expérimentation
dans Cétacé

Cette décomposition fait apparaître 3 termes importants:

→ Terme d'ordre 0 : $\frac{\mu_0 K}{2} \sin^2 \alpha \cos \alpha \ln \frac{b_2}{b_1}$

→ Terme d'ordre 1, relatif au gradient : $\frac{\mu_0 K}{2} \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha \left[1 - \left(\frac{b_1}{b_2} \right) \right] \left(\frac{z}{b_1} \right)$

On note la valeur remarquable de l'angle qui maximise

le terme d'ordre 1:

$$\alpha_1 = \text{ArcCos} \sqrt{\frac{3}{5}}$$

→ Terme d'ordre 2, relatif à la dérivée seconde de B_z :

$$\frac{3\mu_0 K}{8} \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha (5 \cos^2 \alpha - 1) \left[1 - \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^2 \right] \left(\frac{z}{b_1} \right)^2$$

qui s'annule pour

$$\alpha_2 = \text{ArcCos} \sqrt{\frac{1}{5}}$$

Calcul numérique de l'insert: Géométrie à optimiser

dapnia

cea

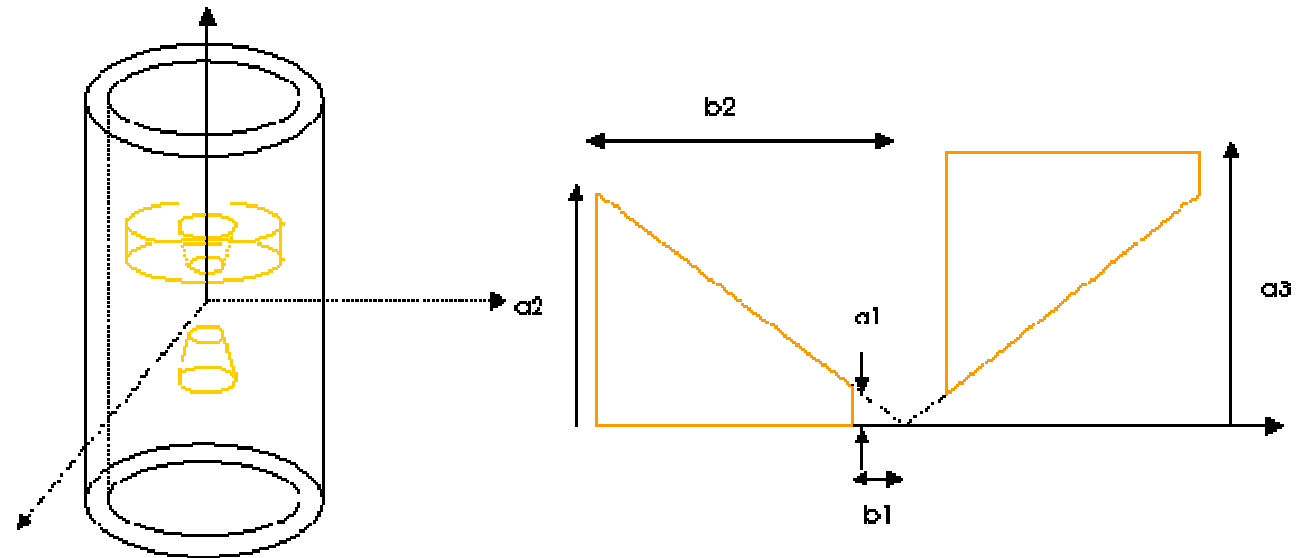
saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique

Expérimentation
dans Christiane

Expérimentation
dans Cétacé



On va faire varier les paramètres a_3 , b_1 , b_2 pour l'angle maximisant le gradient de champ:

$$\alpha_1 = \text{ArcCos} \sqrt{\frac{3}{5}}$$

Calcul numérique de l'insert: Géométrie retenue

dapnia

cea

saclay

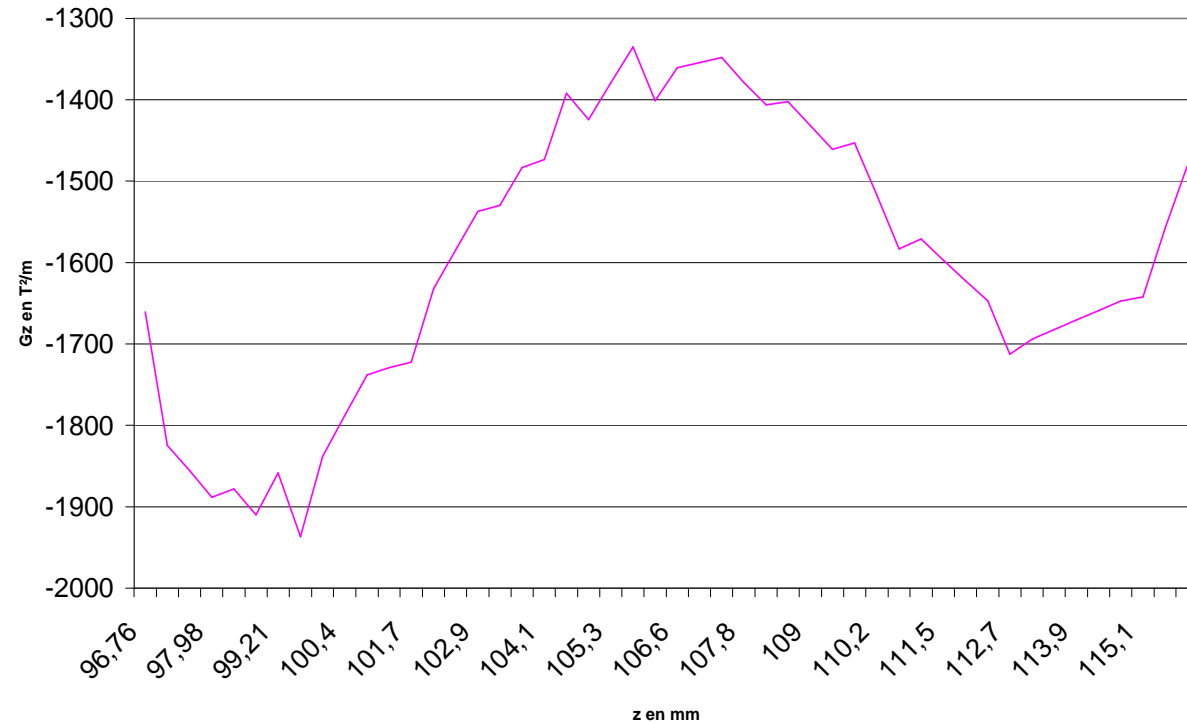
Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique

Expérimentation
dans Christiane

Expérimentation
dans Cétacé

α	b_1	b_2	a_1	a_2	a_3
39.23°	10 mm	40 mm	8.16 mm	32.65 mm	35 mm



Pour une compensation exacte de la pesanteur nous devrions avoir **$Gz = -4100 \text{ T}^2/\text{m}$** . Ici la compensation de la pesanteur est de l'ordre de **36%**, et l'homogénéité axiale ramenée à une sphère de rayon 8mm de près de **15%**

Calcul numérique de l'insert: Carte de force magnétique

dapnia



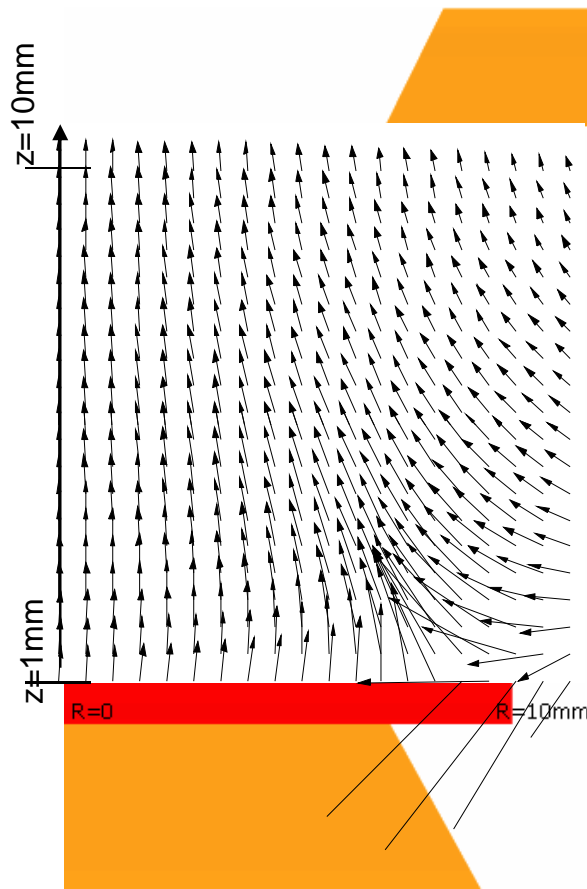
saclay

Cadre de l'étude

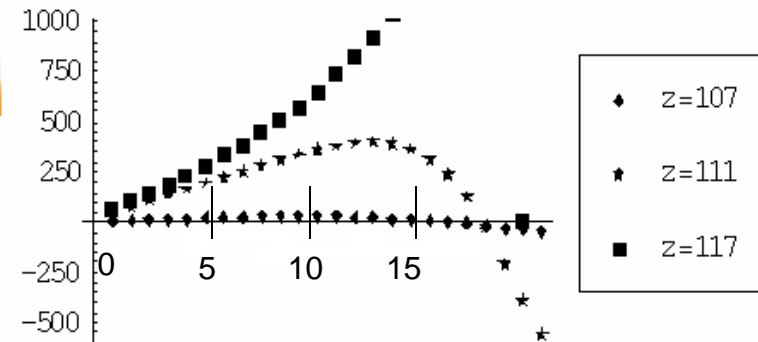
Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé



Gr en fonction du rayon



Gz en fonction de la position axiale



Les bulles subissent une force centripète, elle devient plus intense si l'on se place à un rayon supérieur à 8.16mm. (rayon minimal du cône tronqué)

Calcul numérique de l'insert: calcul des forces

dapnia



saclay

Le calcul des efforts donne le résultat suivant

		Bobine	Totalité de l'insert	Cône	Complémentaire
FEMM	$\vec{F} = \iiint \vec{j} \times \vec{B}$	53 N			
	Tenseur de Maxwell	40 N	-56 N	1504 N	-1556 N
ANSYS	Travaux virtuels	53 N	-51 N	1380 N	-1441 N
	Tenseur de Maxwell		-30 N	1364 N	-1403 N

Nous reprendrons ces efforts grâce à 2 pièces en céloron ©

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé

Description des pièces: Ensemble des pièces

dapnia

cea

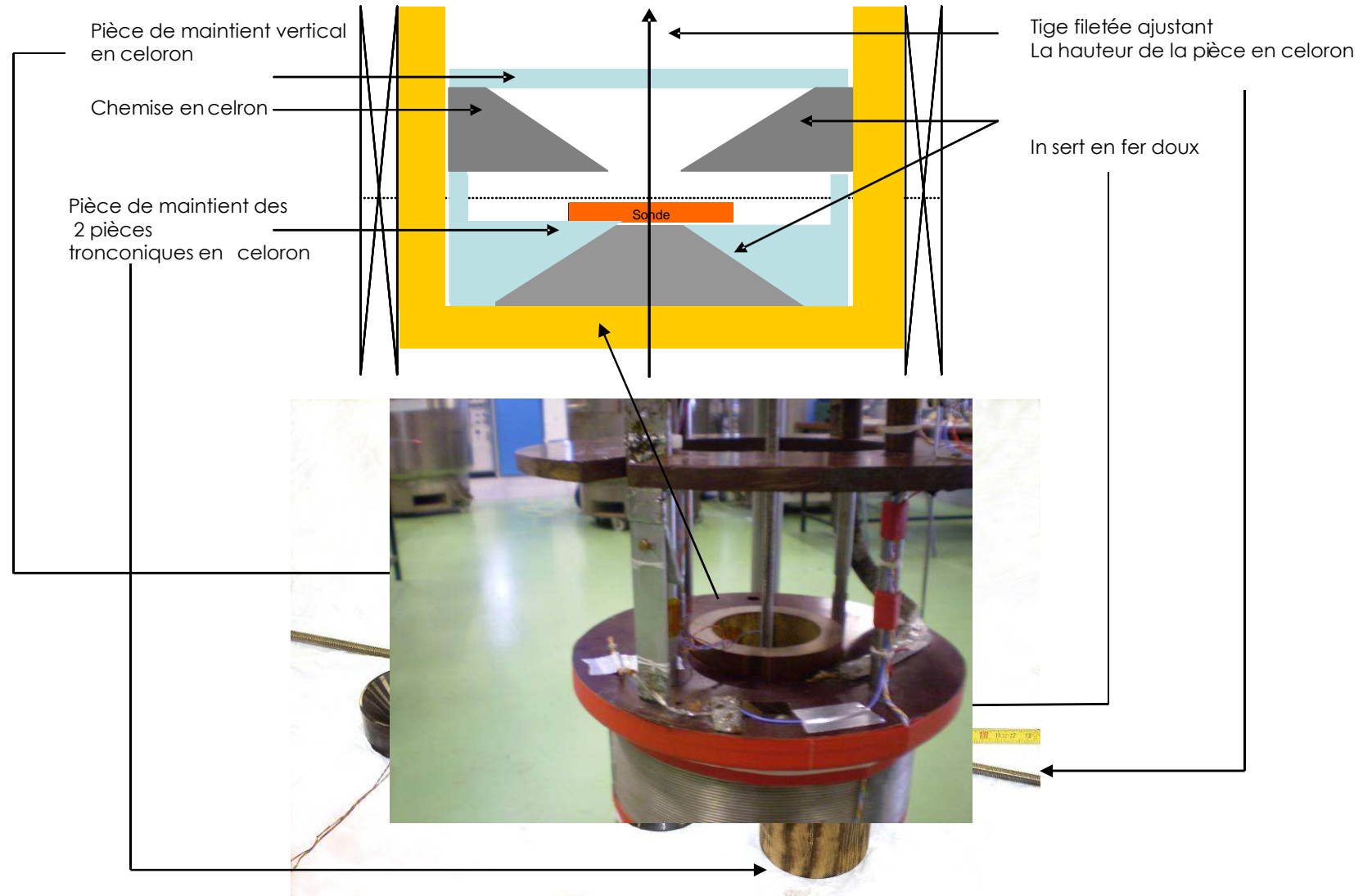
saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé



Résultat dans Christiane sans champ magnétique

dapnia

cea

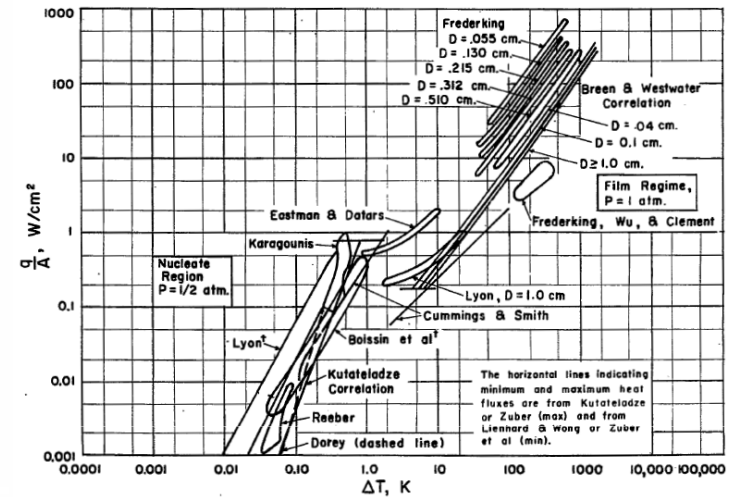
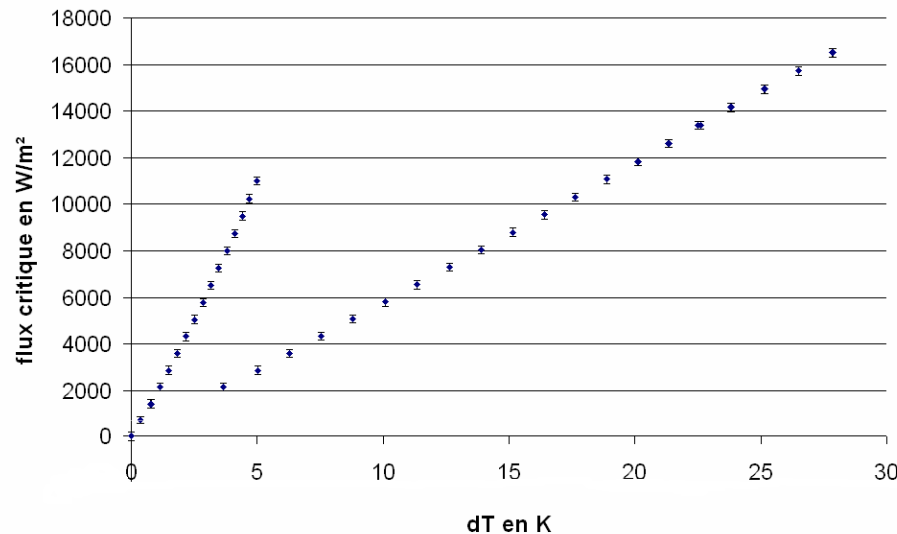
saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé



- Mesure erronée des coefficients d'échange
- Mauvaise mesure de la variation de température, les tables donnent 1 K
- Incertitude de mesure du flux critique
- Flux critique non perturbé par notre système de mesure
- Flux critique : *Moyenne de sa borne supérieure et inférieure*

Expérimentation dans Christiane: Mesure de flux critiques

dapnia



saclay

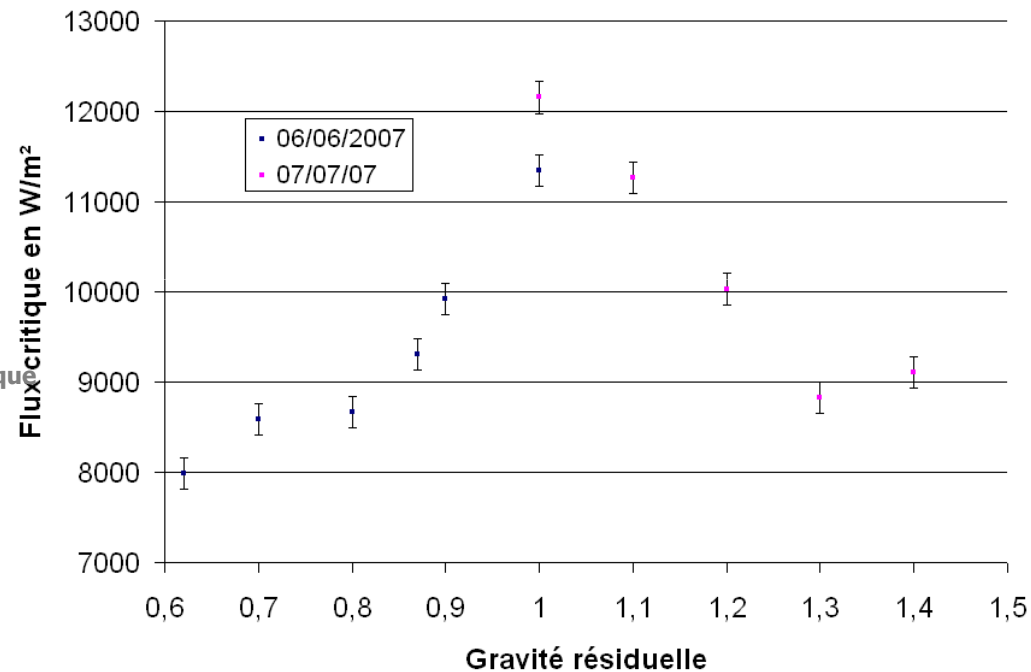
Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique

Expérimentation
dans Christiane

Expérimentation
dans Cétacé

Deux manipulations à deux états de surfaces différents, faites
Gravité réduite et hyper gravité



• $g=1$ maximum!!!

• *Influence du champ magnétique???*

Gravité résiduelle: gravité au niveau de la cellule en tenant compte de la force magnétique

Expérimentation dans Christiane: Aspect confinement

dapnia

cea

saclay

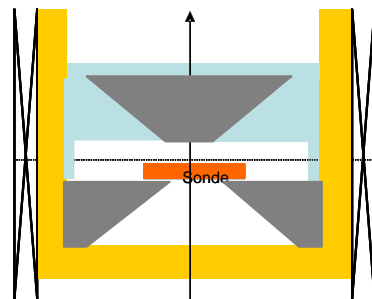
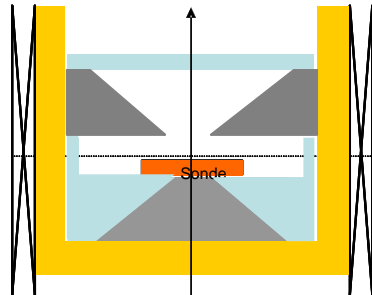
Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique

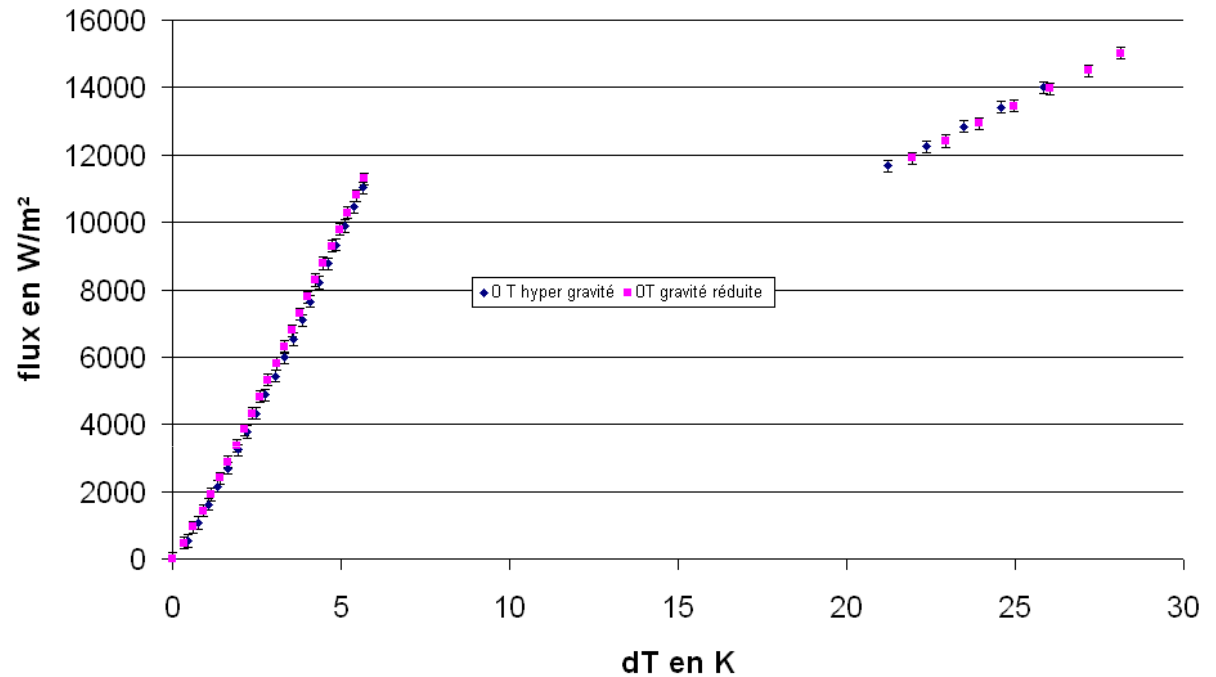
Expérimentation
dans Christiane

Expérimentation
dans Cétacé

Gravité réduite



Sur gravité



Pour un état de surface identique mais un confinement différent
l'expérience à 0 T est tout à fait reproductible. On ne peut donc pas
incriminer le confinement.

Expérimentation dans Christiane: Flux fonction du champ magnétique?

dapnia



saclay

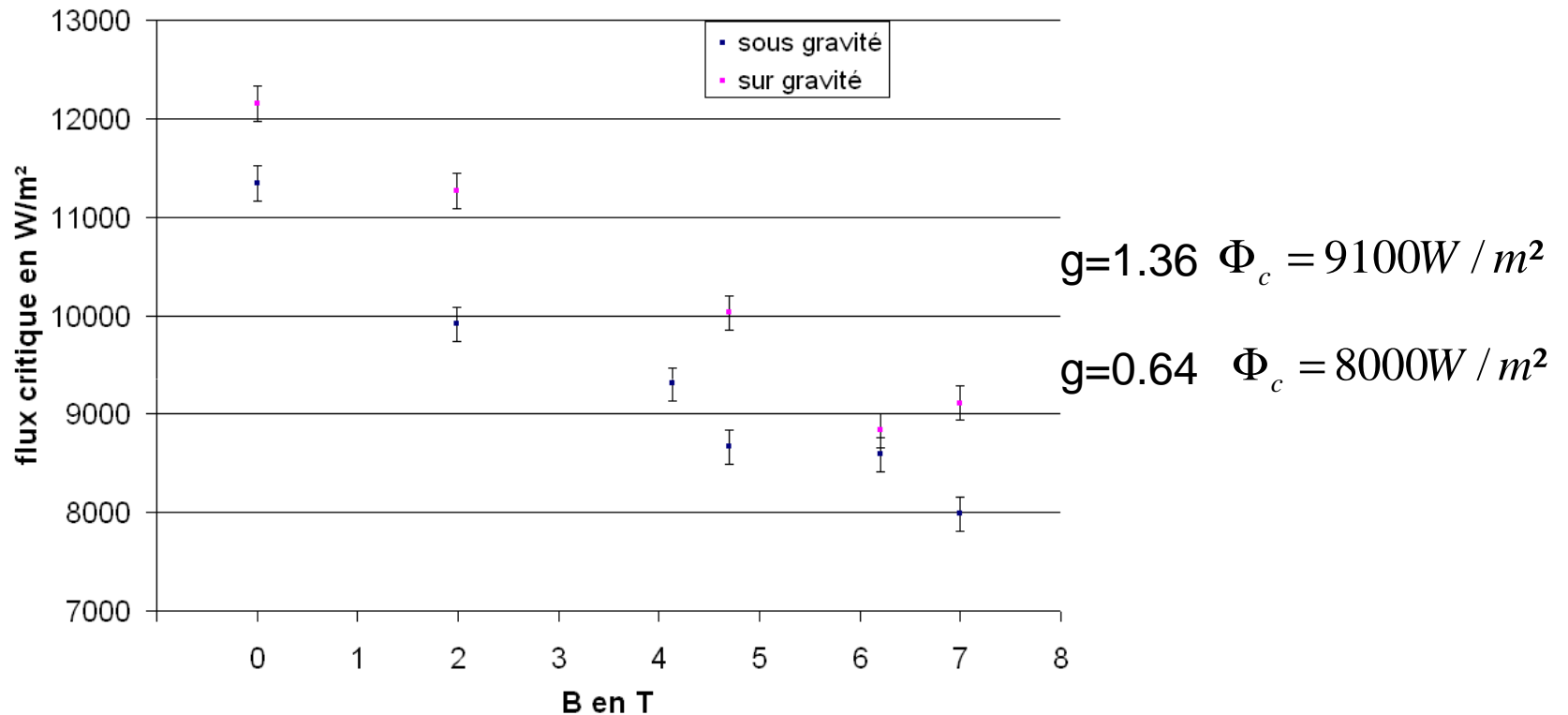
Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé

Comparaison de deux expériences à deux états de surface différentes



- Flux critique diminuerait avec la champ magnétique
- *Nécessité d'une campagne de mesure dans la station Cétacé*

dapnia



saclay

**Le sujet de stage change. On s'intéressera désormais à la relation
Champ magnétique et flux critique.**

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert
ferromagnétique

**Expérimentation
dans Christiane**

**Expérimentation
dans Cétacé**

**Malgré de nombreuses recherches bibliographiques, rien n'a
été trouvé sur le sujet.**

Expérimentation dans Cétacé: Influence du champ sur le flux critique

dapnia

cea

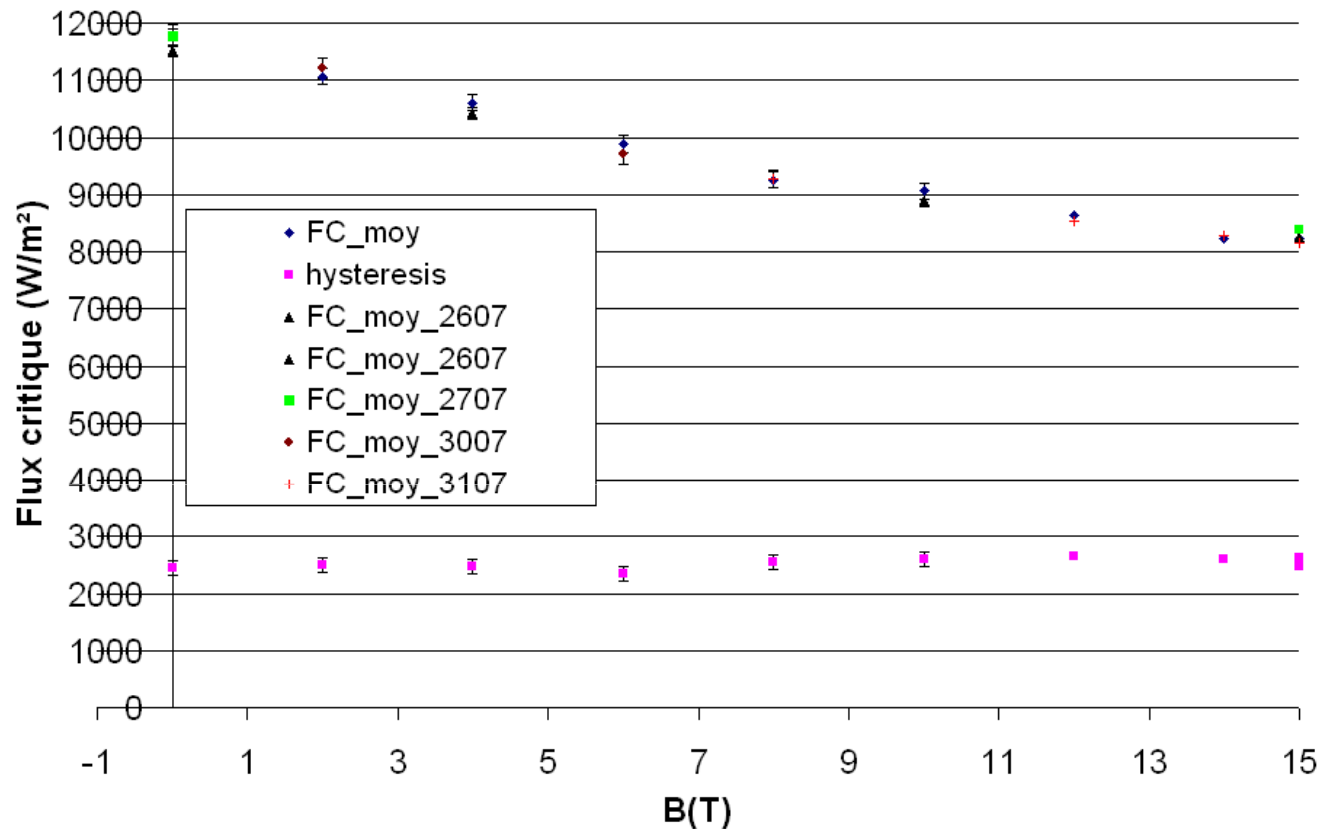
saclay

Cadre de l'étude

Calcul d'un insert ferromagnétique

Expérimentation dans Christiane

Expérimentation dans Cétacé



- Le flux critique diminue quand le champ augmente
- Le recovery flux semble ne pas être perturbé par le champ



Phénomènes différents: il faut trouver ce qui différencie les deux mécanismes

Conclusion

dapnia



saclay

- **Le flux critique diminue avec l'augmentation du champ magnétique**
- **Compte tenu de la cellule actuelle:**
 - **Pas d'information sur le coefficient d'échange**
 - **le flux critique est bien mesuré, donc la tendance est certaine**
 - **Explication physique à trouver: L'énergie magnétique peut avoir une influence sur la tension superficielle et ainsi tendre à améliorer la coalescence des bulles.**
- **L'effet de la pesanteur est toujours à étudier : nous n'avons pas pu discriminer la part de la force magnétique et du champ**

Perspectives

dapnia



saclay

- 1. Il faut investiguer sur les causes de ce phénomène: faire une manipulation à champ positif puis négatif**
Absolument concevoir un système de mesure permettant de mesurer les coefficients d'échange
Etudier l'impact de la microgravité et de l'hypergravité
- 2. Tester un nouvel insert permettant d'obtenir une meilleure homogénéité dans le cas de la compensation de la pesanteur**
- 3. Envisager un dispositif magnétique plus ambitieux:**
 - En augmentant le champ de fond**
 - En augmentant le gradient (conception d'un insert quadripolaire supraconducteur à placer dans SEHT par exemple)**