

ÉTUDE MAGNETIQUE ET MECANIQUE D'UN DISPOSITIF D'ETALONNAGE DE SONDES HALL

Expérience ATLAS Muons

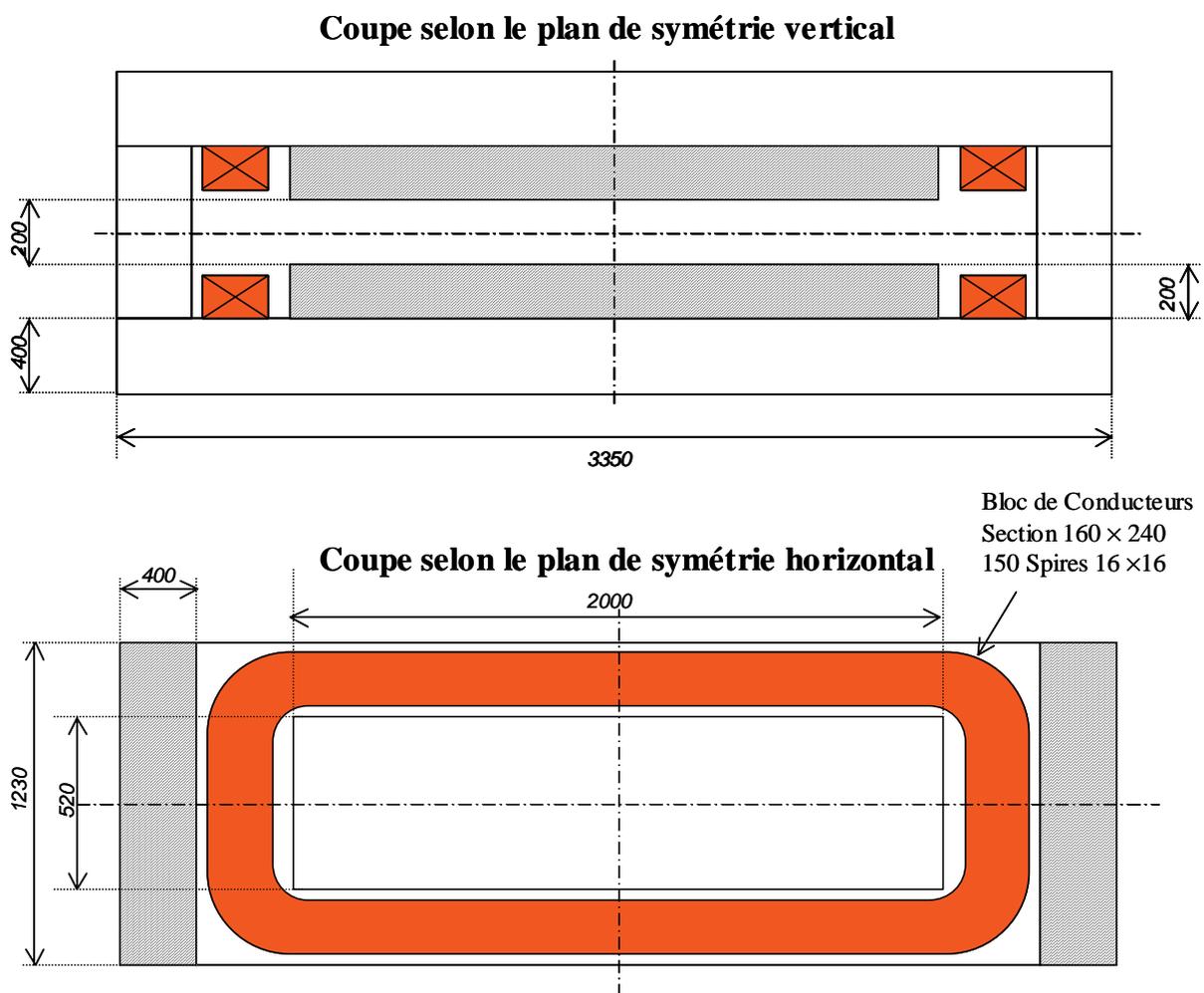
Auteur : François-Paul Juster (DSM/Dapnia/SACM)
Rapport N° : DAPNIA-02-314

I. INTRODUCTION

I-1. Problème posé

On se propose d'étudier un système d'étalonnage de sondes de Hall (Expérience 'ATLAS-Muons') garantissant une **homogénéité de champ d'au moins 10^{-4} dans un cube de 1 litre** ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$) pour une induction de **1 Tesla** dans le volume du cube. On définit dans notre étude l'homogénéité comme la différence relative entre les extrema du module de l'induction dans le cube sus-évoqué.

Le dispositif sera placé dans l'entrefer de 20 cm d'un aimant en 'H' existant (Aimant MNP 24), installé au CERN (cf. annexes). Le circuit magnétique (Fer + courants) est schématisé ci-dessous (cotes en mm). On y a également rappelé les caractéristiques qui nous intéressent ici.



Il est par ailleurs demandé que le dispositif prévu n'encombre pas la partie centrale de l'entrefer mais soit disposé dans la partie droite située entre le plan d'abscisse $x = 300\text{ mm}$ et le bord droit du plateau (Le centre magnétique correspondant à $x = 0$).

I-2. Généralités sur la méthode de calcul

Les calculs magnétiques décrits dans le présent rapport sont effectués avec le code par éléments finis CAST3M en 3d et prennent en compte la non-linéarité du circuit magnétique. La

formulation adoptée est la formulation en **potentiel scalaire** du champ H où le volume dans lequel on calcule le champ est séparé en deux sous-volumes :

- Une zone dite de potentiel total contenant nécessairement le fer, ne contenant pas les courants et dans laquelle on peut écrire : $H = -grad . \psi$
- Une zone dite de potentiel réduit contenant nécessairement les courants, ne contenant pas le fer et où le champ est décrit comme la somme d'un champ H_s du aux sources de courants et d'un champ irrotationnel H_m du à la magnétisation, soit :

$$H = H_s + H_m = H_s - grad . \phi$$

Cette formulation n'est possible que si certaines conditions topologiques sont remplies, il faut notamment pouvoir choisir une zone de potentiel total dans laquelle n'existe aucun chemin pouvant enlacer un courant non nul. Ce qui est heureusement possible dans notre cas. Le lecteur désireux d'en savoir davantage pourra utilement se reporter aux réf. [1] et [2].

II.L'AIMANT MNP24

II-1. Mesures existantes

Nous disposons de mesures effectuées au centre magnétique de l'aimant MNP 24, ces mesures sont résumées dans le Tableau n°1 et illustrées sur la *fig.1*.

I (A)	0.3	53	107	160.5	214	268	322	377.5	434
B₀ (T)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
I (A)	491	555	622	700.5	790	883	990		
B₀ (T)	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5		

Tableau 1. Mesures Induction au centre magnétique Aimant MNP 24

On notera que le comportement n'est plus linéaire à partir d'un champ au centre d'environ 1 tesla, ce qui indique une saturation du fer dans une partie du circuit magnétique. Ces mesures permettent surtout de valider le calcul numérique et plus particulièrement son ingrédient principal : la courbe de dépendance de la perméabilité magnétique du fer avec le champ $\mu=f(H)$.

II.2. Calculs

Nous avons donc effectué des calculs pour plusieurs valeurs de courant effectivement mesurées en retenant la courbe $\mu = f(H)$ par défaut (ou 'nominale') implantée dans le programme CAST3M et donnant une **perméabilité relative de 3998.9 à champ nul** (cf. *fig. 2-1*) et une **magnétisation de saturation de 2.13 teslas** (cf. *fig. 2-2*).

Ils sont résumés dans le Tableau n° 2 (cf. également *fig.1*). On a retenu 3 valeurs de courant : 434 A qui conduit à un point situé dans la partie linéaire de la courbe de charge, 700.5 et 990 A, soit deux points situés dans la partie non-linéaire, et qui donnent plus d'indications sur la perméabilité effective de l'aimant.

I	B Mesuré	B Calculé μ nominal	Écart	B Calculé $0.9 \times \mu$	B Calculé $1.1 \times \mu$	B Calculé $\mu = C^{ste}$	B Calculé $\mu = \infty$
Ampère	Tesla	Tesla	%	Tesla	Tesla	Tesla	Tesla
434	0.8	0.807	0.9	0.804	0.808	0.8089	0.814
700.5	1.2	1.212	1.0	1.169	1.247	1.3056	1.314
990	1.5	1.525	1.6	1.451	1.585	1.8452	1.856

Tableau 2. Comparaison Mesures/Calculs Induction au centre magnétique Aimant MNP 24

Commentaires :

- On constate que les **calculs sont en très bon accord ($\approx 1\%$) avec les mesures effectuées** que ce soit dans la partie linéaire de la courbe de charge de l'aimant (0-500 ampères) que dans la partie concave ($I \geq 500$ ampères, début de la saturation).

- On a également calculé les inductions auxquelles conduirait une multiplication respectivement par 1.1 ou 0.9 de l'évolution de perméabilité magnétique implantée, ce que l'on a illustré par une barre d'erreur (de manière un peu impropre !) sur la *fig.1*. On notera, comme attendu, que c'est pour les points à haut champ donc induisant une saturation partielle du circuit magnétique que cette modification conduit à un effet significatif. On pourrait être tenté d'ajuster la courbe de perméabilité utilisée pour mieux reproduire les données expérimentales ; on a renoncé à un tel raffinement pour de multiples raisons : absence d'information sur les erreurs expérimentales (systématiques ? , statistiques ? ...) grevant les mesures effectuées, information 'limitée' quant à l'emplacement exact des lignes de courants, écarts éventuels entre les cotes réelles et les cotes sur plan, etc.

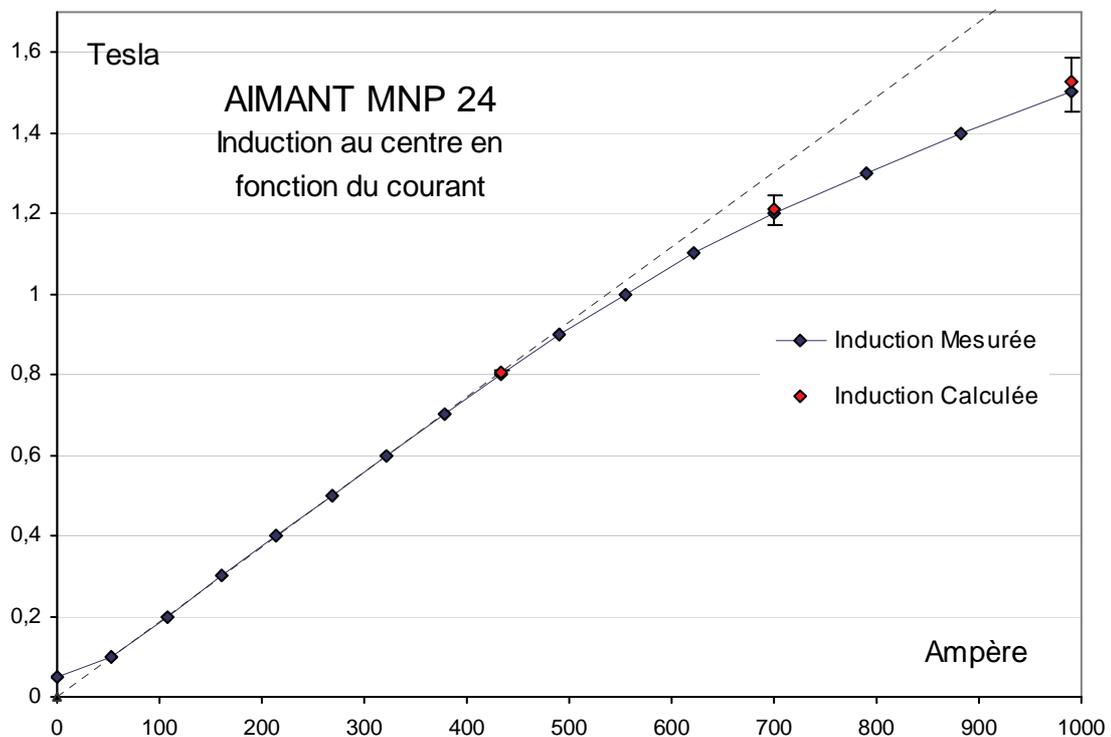


Fig.1 : Mesures et Calculs effectués sur l'aimant MNP 24.

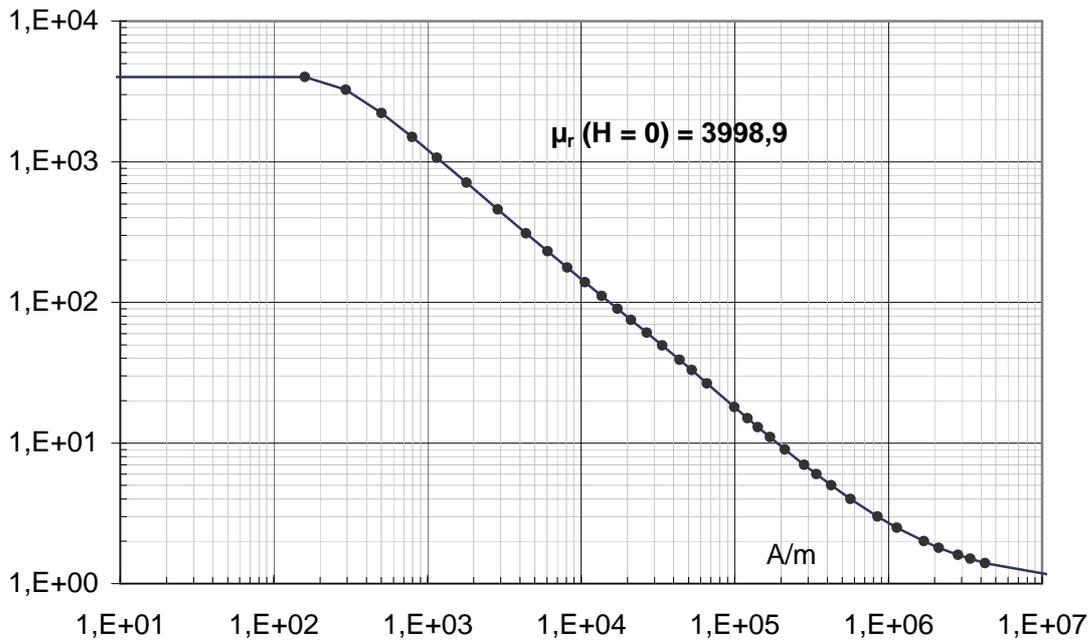


Fig.2-1 : Courbe de perméabilité relative CAST3M

On retiendra, sauf avis contraire la courbe de la Fig. 2-1 pour tous les calculs à venir.

On se reportera également aux cartes de lignes de champ et de perméabilité magnétique fournies en annexe.

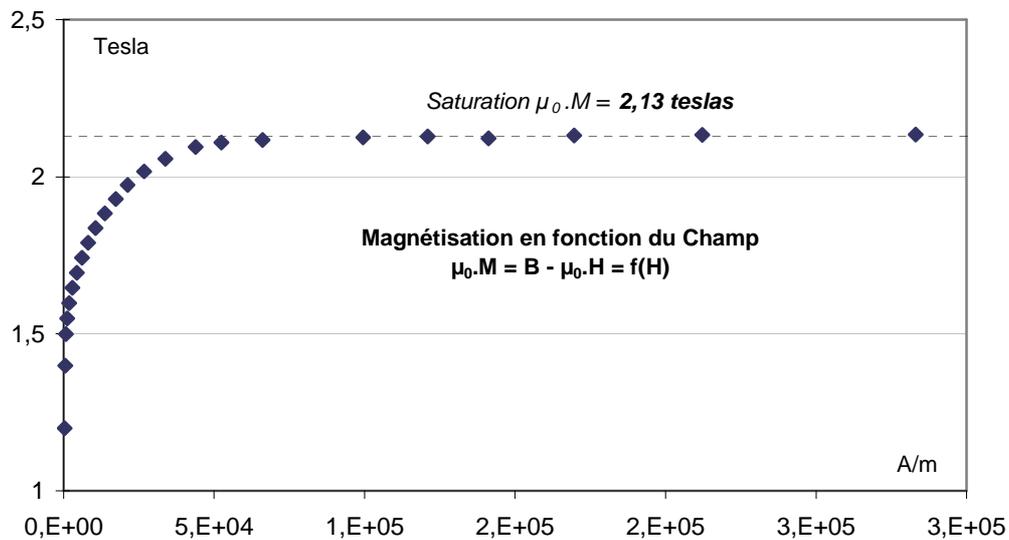


Fig.2-2 : Courbe de magnétisation en fonction du champ CAST3M

II.3. Homogénéité de l'aimant MNP24

Nous pouvons par calcul reconstituer l'homogénéité de l'aimant existant. On a considéré un cube de 1 litre, dont les faces sont parallèles aux plans de symétrie de l'aimant et dont le centre occupe une position variable d'abscisse x sur la droite horizontale Ox passant par le centre magnétique et parallèle au grand coté du plateau. La fig.3 montre l'évolution de l'homogénéité calculée. Elle est sans surprise minimale au centre, mais sa valeur y est quasiment d'un ordre de grandeur plus élevée ($6 \cdot 10^{-4}$) que la valeur recherchée donc non satisfaisante.

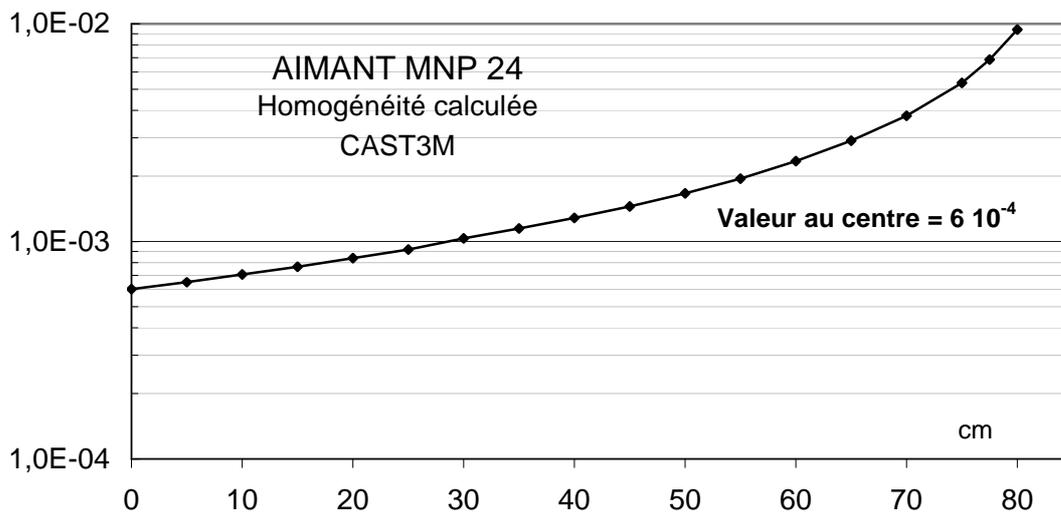
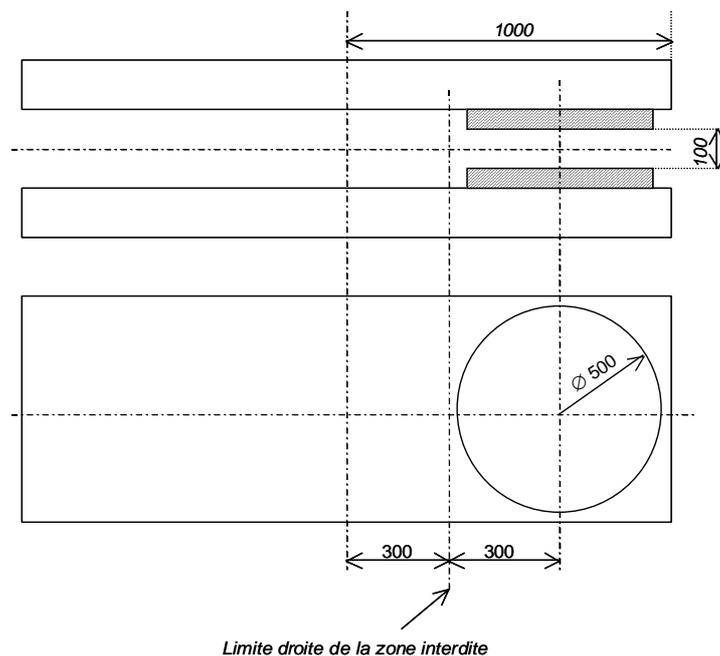


Fig.3 : Évolution de l'homogénéité selon la distance au centre magnétique

III. AMELIORATION DE L'HOMOGENEITE – INFLUENCE DES PARAMETRES

On se propose d'améliorer localement l'homogénéité du champ dans l'entrefer en disposant 2 plateaux ferromagnétiques symétriquement par rapport au plan horizontal médian. On choisit une forme circulaire pour éviter les phénomènes de saturation que l'on aurait inévitablement dans les angles d'une forme rectangulaire. On a de plus choisi un diamètre quasiment le plus grand possible (500 mm) qui ne déborde pas du plateau rectangulaire existant et qui reste dans la zone autorisée (abscisse du bord gauche à au moins 35 cm du centre magnétique). Dans un premier temps, les plateaux circulaires sont supposés plaqués sur les plateaux rectangulaires (ou pièces polaires). On retiendra pour ce premier calcul, une perméabilité magnétique des plateaux circulaires identique à celle de l'aimant. Les deux plateaux font 50 mm d'épaisseur et ménagent donc un entrefer local de 100 mm.



III.1. Calcul nominal

Un premier calcul a été effectué, les ingrédients et les résultats sont résumés dans le Tableau n°3 ci-dessous. Le cube de 1 litre où l'homogénéité est calculée est supposé centré dans le volume inter-plateaux.

I	Ampères-tours	$ B_0 $ Centre cube	Homogénéité	Ø Plateau	Centre plateau	Entrefer Plateaux
Ampère		Tesla		Mm	mm	mm
274.46	82339.2	1.0184	4.510^{-5}	500	Z = 600	100

Tableau 3. Calcul homogénéité - Plateaux plaqués épaisseur 50 mm

On constate que le dispositif proposé permet, avec une induction au centre du plateau voisine de 1 tesla, d'atteindre l'objectif fixé, soit une **homogénéité meilleure que 10^{-4}** .

III.2. Autres Calculs : Influence des paramètres.

III.2.1. Influence du diamètre

On a effectué un calcul dans les mêmes conditions, mais en diminuant le diamètre du plateau de 500 à **350 mm** : l'homogénéité au centre se dégrade alors spectaculairement de 4.510^{-5} à **10^{-3}** .

III.2.2 Influence de la forme du plateau

On a effectué un calcul dans les mêmes conditions mais en remplaçant les plateaux circulaires par des plateaux **rectangulaires** occupant la quasi-totalité du volume autorisé soit une longueur de 65 cm, une largeur de 52 cm, le bord gauche étant situé à 35 cm du centre magnétique (ou à 5 cm de la limite de la zone interdite). On obtient cette fois une homogénéité de **2.10^{-4}** , minimale au centre du plateau, soit une dégradation significative et non acceptable par rapport au calcul nominal. C'est la forte saturation dans les angles des plateaux qui explique vraisemblablement cette dégradation : on a en effet comparé les résultats obtenus en supposant une perméabilité magnétique constante (égale à sa valeur à champ nul, calcul dit linéaire), donc ignorant les phénomènes de saturation et observé que l'homogénéité calculée ne variait quasiment pas entre les deux géométries (circulaire ou rectangulaire).

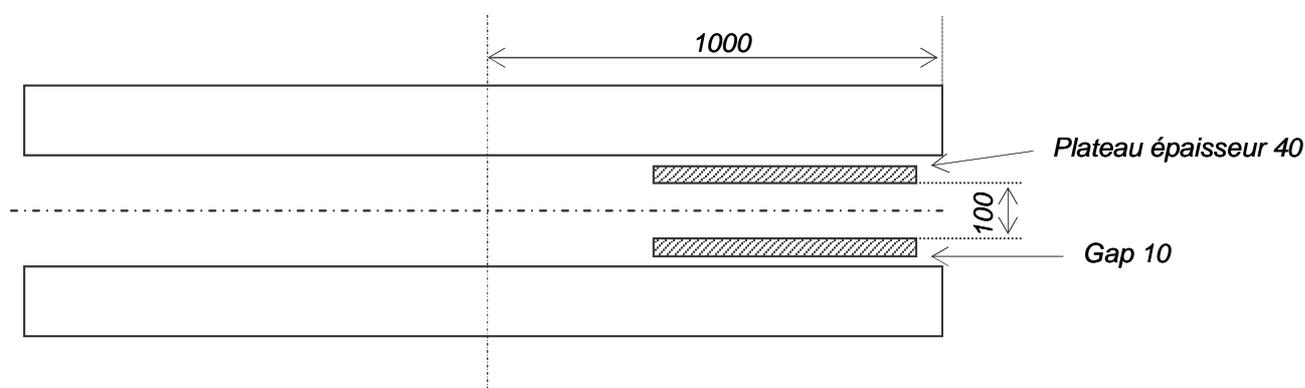
III.2.3 Influence de la perméabilité du plateau

On a effectué un calcul dans les mêmes conditions mais en multipliant (violemment !) la courbe de perméabilité magnétique du plateau $\mu=f(H)$ par 1.6 tout en maintenant la courbe nominale pour le circuit magnétique de l'aimant. On observe comme attendu, une amélioration de l'homogénéité qui passe alors de $4.5 \cdot 10^{-5}$ à **$4.0 \cdot 10^{-5}$** mais l'effet n'est pas réellement spectaculaire !

IV. DISPOSITIF REEL

Les premiers calculs effectués supposent des plateaux plaqués sur les pièces polaires existantes et idéalement plates et parallèles, ce qui n'est pas nécessairement le cas. Or il est crucial

pour assurer une bonne homogénéité dans l'entrefer inter-plateaux circulaires d'assurer le meilleur **parallélisme** possible de ces derniers. En d'autres termes on aimerait pouvoir assurer un bon parallélisme de notre dispositif, indépendamment des caractéristiques de planéité et de parallélisme de l'aimant existant. Ceci impose que l'on puisse modifier éventuellement *in situ* l'inclinaison du dispositif par rapport aux surfaces polaires. On est naturellement amené à ménager un espace entre les pièces polaires et les plateaux circulaires. L'entrefer du dispositif étant imposé (100 mm), comme évidemment celui de l'aimant existant (200 mm), on souhaite à priori un espacement le plus petit possible entre les surfaces polaires et les plateaux pour ne pas réduire l'épaisseur de ces derniers et conséquemment dégrader l'homogénéité de champ dans la zone centrale. On a choisi, après avoir considéré les contraintes d'encombrement d'un dispositif réalisable, un **espacement de 10 mm entre les pièces polaires et les plateaux circulaires d'épaisseur 40 mm** (cf. figure ci-dessous)



IV.1. Calcul de l'homogénéité

Les résultats sont résumés dans le Tableau n°4 et illustrés sur la Fig.5. Le courant est choisi de façon à obtenir une induction théorique variable de 0.01 T à 2 T. L'induction théorique ($\mu = \infty$ soit $H = 0$ dans le fer et plateaux infinis) est calculée selon la formule :

$$B_{th} \times \{ \text{Entrefer} + \Sigma \text{ Gap} \} = \mu_0 \times \Sigma NI$$

I (A)	3.183	31.83	159.2	191.0	222.8	254.6	286.5	318.3	350.1
 B_{th} (T)	0.01	0.1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
 B réel (T)	$9.67 \cdot 10^{-3}$	$9.67 \cdot 10^{-2}$	0.4836	0.5803	0.6769	0.7734	0.8696	0.9656	1.0613
Homog.	$5.84 \cdot 10^{-5}$	$5.84 \cdot 10^{-5}$	$5.87 \cdot 10^{-5}$	$5.93 \cdot 10^{-5}$	$6.05 \cdot 10^{-5}$	$6.21 \cdot 10^{-5}$	$6.48 \cdot 10^{-5}$	$6.77 \cdot 10^{-5}$	$7.15 \cdot 10^{-5}$
I (A)	382.0	413.8	445.6	477.5	509.3	541.1	573.0	604.8	636.6
 B_{th} (T)	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
 B réel (T)	1.156	1.250	1.342	1.426	1.502	1.570	1.629	1.684	1.738
Homog.	$7.70 \cdot 10^{-5}$	$8.92 \cdot 10^{-5}$	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$3.77 \cdot 10^{-4}$	$7.03 \cdot 10^{-4}$	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$1.75 \cdot 10^{-3}$	$2.39 \cdot 10^{-3}$

Tableau 4. Calcul homogénéité avec gap 10 mm- Plateaux épaisseur 40 mm, Ø Plateaux : 500 mm, Centre Plateaux en Z = 600 mm, Gap : 10 mm, $\mu_r(B = 0) = 3998.9$

On obtient, sous une induction de **0.97 T**, une **homogénéité de 6.810^{-5}** soit une valeur légèrement dégradée mais meilleure que la valeur souhaitée de 10^{-4} . La figure 5 montre l'existence de 2 zones :

- En dessous de 1 T, on note une homogénéité peu ou prou constante et corrélativement un écart entre les valeurs de champ théoriques et calculées également quasi constant (3.3-3.4 %). Cet écart est d'origine essentiellement géométrique (hypothèse des plateaux infiniment grands), l'hypothèse $\mu = \infty$ ne coûtant que 0.5 % environ (cf. Tableau n° 2). Dans cette zone, la saturation du fer est négligeable.

- Au-dessus de 1.2 T, on note une dégradation significative de l'homogénéité corrélée à une augmentation de l'écart entre valeurs de champ théoriques et calculées : le comportement magnétique dans cette zone est dominé par la saturation du fer.

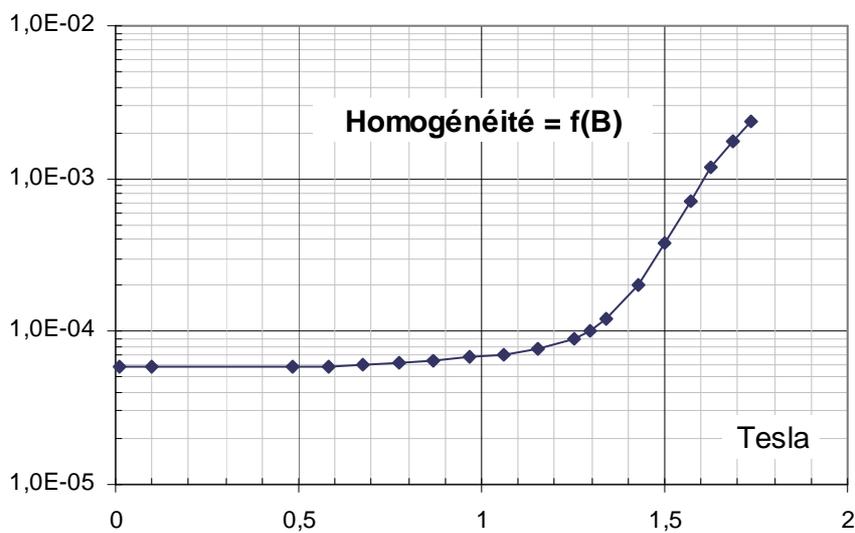


Fig.5 : Évolution de l'homogénéité selon l'induction au centre du cube.

On trouvera ci-dessous (Fig. 6) l'évolution du module de l'induction selon Ox (cas $B_{th} = 1 T$).

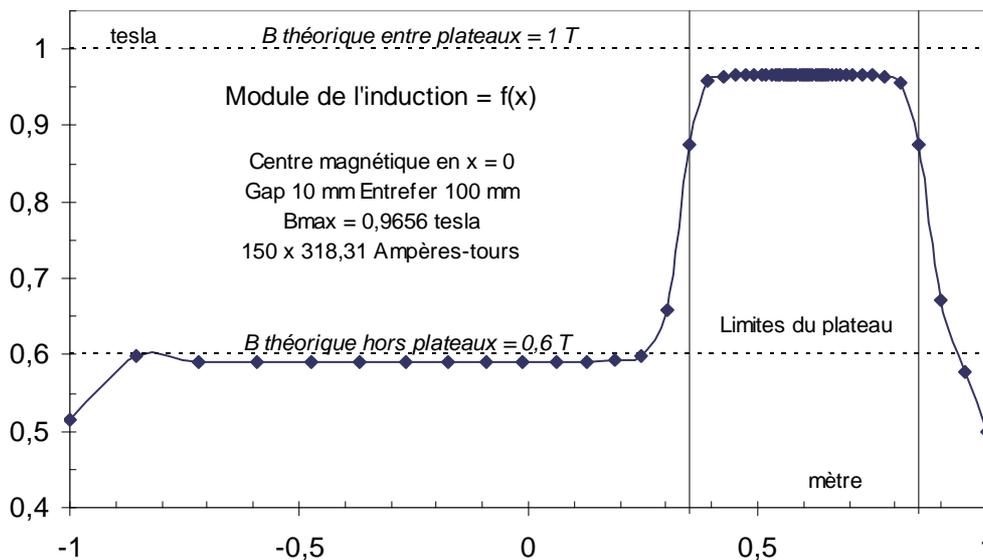


Fig.6 : Évolution du module de l'induction magnétique selon Ox

IV.2. Calcul des efforts

Le calcul des forces magnétiques qui s'exercent sur un des plateaux est obtenu par intégration du **tenseur de Maxwell** sur l'enveloppe du dit plateau. Sous l'action de ces forces et selon la façon dont les efforts sont repris, le plateau se déforme. Il en résulte une modification du champ magnétique et donc des forces magnétiques : le calcul est effectué de manière itérative.

Les efforts magnétiques tendent à plaquer les plateaux sur les pièces polaires ; on a choisi de reprendre ces efforts par un système de cales placées entre les plateaux et ces pièces polaires. Il y a au total 7 cales par plateau : 1 cale au centre et six cales régulièrement disposées le long de la circonférence du plateau (cf. Annexes).

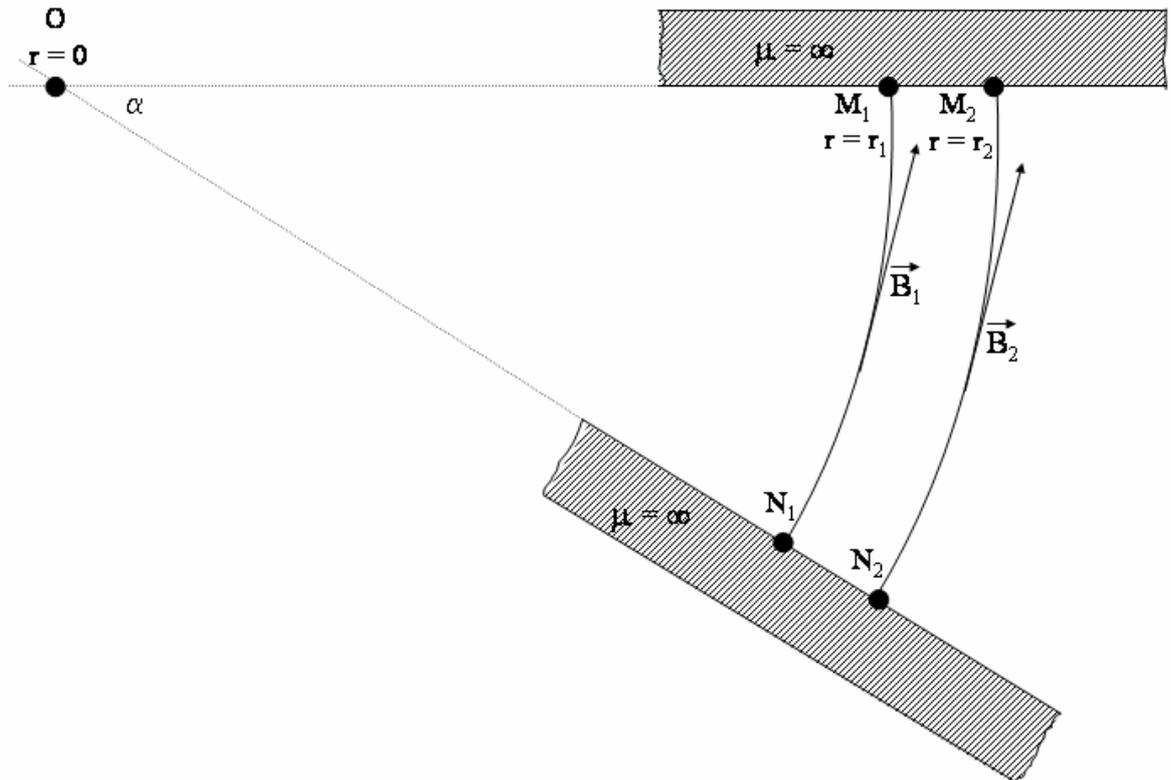
Les calculs conduisent aux résultats suivants :

- Une force de **13 300 newtons par plateau** dirigée orthogonalement au plateau vers la pièce polaire, soit environ 1/6 de la force que l'on aurait obtenue si le plateau avait été plaqué sur le pôle (1 tesla → 4 bars)
- Une force de quelques dizaines de newtons selon Ox, largement dans la barre d'erreur du calcul. La composante selon la troisième direction est nulle par raison de symétrie
- Une **flèche maximale de 5.5 microns** (cf. Annexes). Cette flèche n'induit aucune variation d'homogénéité à l'intérieur du cube de 1 litre considéré (ici l'intérieur est le volume cubique maillé épluché de sa dernière couche qui dans notre maillage représente 10 % du volume initial). Le calcul montre, comme attendu, une modification du champ dans le voisinage de l'enveloppe extérieure (déformée) du cube. Il est vraisemblable que cette modification se manifeste à une distance de l'enveloppe du même ordre de grandeur que la flèche calculée mais nous n'avons pas vérifié cette hypothèse, du fait des temps de calculs rédhibitoirement longs que cela impliquerait.

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que le calcul des forces par intégration du tenseur de Maxwell est numériquement délicat et conséquemment flanqué d'une certaine barre d'erreur. Pour estimer celle-ci nous avons répété ce calcul de forces avec le logiciel **TOSCA** et obtenu des **forces de 30 % inférieures** à celles fournies par CAST3M. Toutefois, compte tenu de la très faible valeur des flèches calculées, cette discordance est sans incidence significative sur l'homogénéité obtenue.

IV.3. Influence du parallélisme des plateaux

Plutôt qu'un calcul par éléments finis, qui se serait avéré assez long puisque incluant la suppression de certaines symétries et donc la création d'un maillage spécifique plus volumineux, on a choisi d'évaluer l'impact d'un défaut de parallélisme dans un cas idéal théorique simple : perméabilités magnétiques de l'aimant et des plateaux infinies, plateaux plans, infinis mais formant un dièdre d'angle α .



Le champ est alors purement azimutal en $1/r$. Les circulations de B sont identiques le long des lignes de champ N_1M_1 et N_2M_2 . B_1 et B_2 sont dans un rapport égal au rapport des rayons r_2 et r_1 donc, pour des petits angles, dans le rapport des distances d_2 (distance M_2, N_2) et d_1 (distance M_1, N_1). Pour maintenir une homogénéité d'au moins 10^{-4} dans le cube de 1 litre considéré, il faut pouvoir y assurer, compte tenu d'un entrefer de 100 mm, le parallélisme des plateaux à $10^{-4} \times 100$ mm près soit **10 microns**. Il est juste de préciser que cette étude simplifiée ne permet pas de prédire comment cette inhomogénéité d'origine géométrique se convoluerait avec l'inhomogénéité intrinsèque du dispositif.

IV.4. Influence de la perméabilité magnétique des plateaux

Il peut être intéressant, en vue de la réalisation industrielle, d'étudier la sensibilité de l'homogénéité obtenue en fonction de la perméabilité du plateau. Pour tous les calculs précédents, on a considéré la perméabilité standard du code de calcul, choix justifié par la bonne reproductibilité des mesures effectuées sur l'aimant existant, et attribué aux plateaux une perméabilité identique à celle de l'aimant. On se propose maintenant de reconduire le calcul du §IV.1 en multipliant la courbe implantée $\mu = f(H)$ par un coefficient de dégradation K et ce uniquement pour les plateaux, la perméabilité standard étant conservée pour l'aimant. On notera que cette méthode est *stricto sensu* artificielle et inadéquate puisqu'elle conduit, pour des valeurs très élevées du champ H , à des valeurs de μ inférieure à μ_0 , toutefois ces valeurs ne sont heureusement pas atteintes en pratique (Cette remarque vaut également pour §II.2). On retiendra que cette méthode est vraisemblablement pessimiste. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Coefficient K	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_r (\mathbf{H} = \mathbf{0})$	2799	3199	3599	3999
Homogénéité	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$8.7 \cdot 10^{-5}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$	$6.8 \cdot 10^{-5}$

Tableau 5. Variation de l'homogénéité avec la perméabilité magnétique des plateaux

On constate une **dégradation significative de l'homogénéité en dessous d'une perméabilité relative à champ nul de 3000** environ.

CONCLUSION

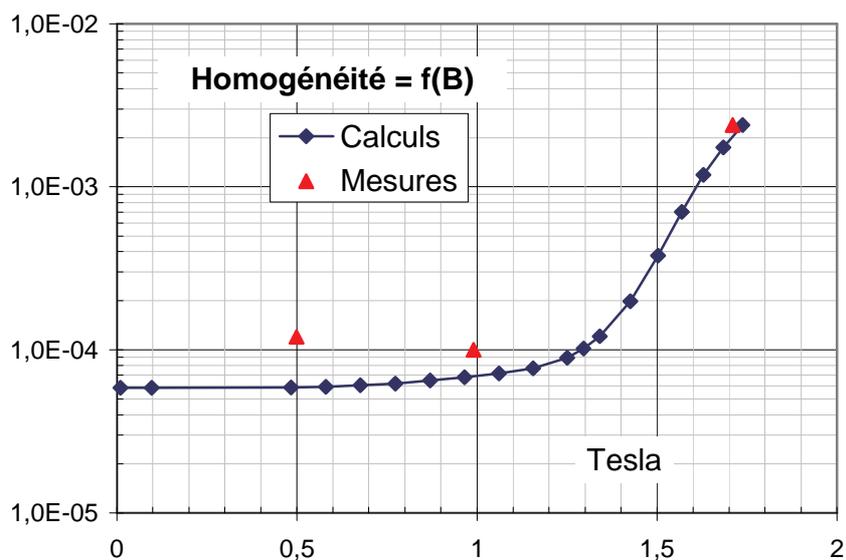
Les calculs (éléments finis, calcul magnétostatique non-linéaire 3d, CAST3M) montrent qu'il est possible d'obtenir une homogénéité de champ de 10^{-4} à 1 tesla (soit 1 gauss) dans un cube de 1 litre en plaçant dans l'entrefer de l'aimant 'MNP 24' un dispositif constitué de deux plateaux circulaires ferromagnétiques parallèles (\varnothing 500 mm, épaisseur 40 mm) ménageant un entrefer local de 100 mm (avec une tolérance de 1/100 mm) et un gap de 10 mm avec les pièces polaires existantes. On a évalué des forces de plaquage sur les pôles d'environ 1.3 tonnes par plateaux, induisant une flèche maximale parfaitement admissible de 5.5 microns. On a, par ailleurs calculé, pour ces plateaux, une valeur minimale de perméabilité magnétique relative de 3000 à champ nul pour assurer l'homogénéité recherchée.

ATLAS MUON – Calibrateur sondes B réalisé par la Sté CLM



EPILOGUE

Sur la base des calculs décrits dans le présent rapport, un dossier complet de fabrication et d'appel d'offre a été réalisé par le CEA/DSM/Dapnia/SIS, [3]. À réception, un contrôle du parallélisme (par cales) a été effectué. Des mesures d'homogénéité de champ ont été effectuées *in situ* (dispositif placé dans l'aimant MNP24) en 16 points régulièrement espacés à l'intérieur du désormais familier cube de 1 litre. Sous des champs de 0.5 et 1T, des homogénéités absolues respectives de 0.6 gauss ($1.2 \cdot 10^{-4}$ relatif) et 1 gauss (10^{-4} relatif) ont été mesurées. Les mesures se dégradent sans surprise à plus haut champ : $2.4 \cdot 10^{-3}$ à 1.7 teslas. L'objectif d'une homogénéité de 10^{-4} est donc atteint et ces résultats sont en accord satisfaisant avec les prédictions numériques, on notera toutefois un comportement plutôt inattendu à bas champ puisque l'homogénéité mesurée est plus mauvaise à 0.5 T qu'à 1 T. On pourrait suspecter une modification du parallélisme des plateaux avec le champ, la force de plaquage des plateaux sur les pôles existants variant comme le carré de l'induction.

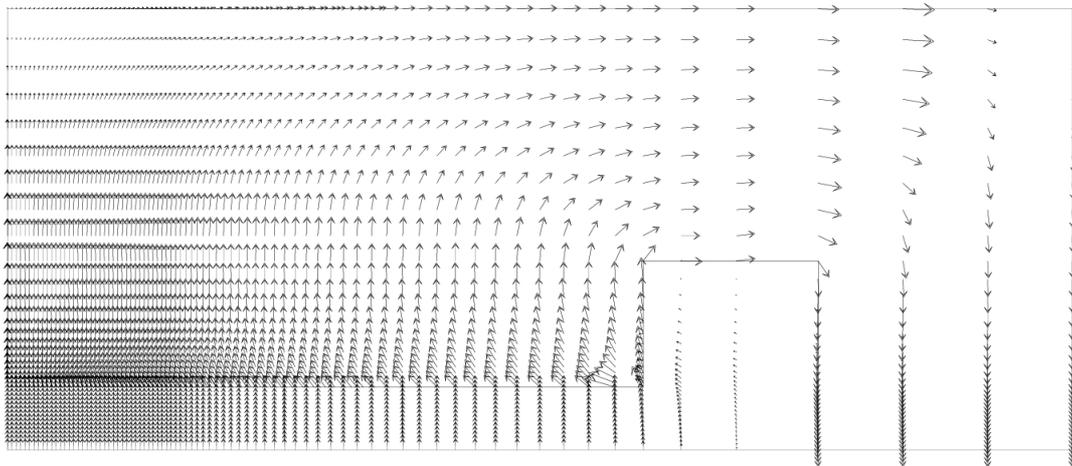


ANNEXES

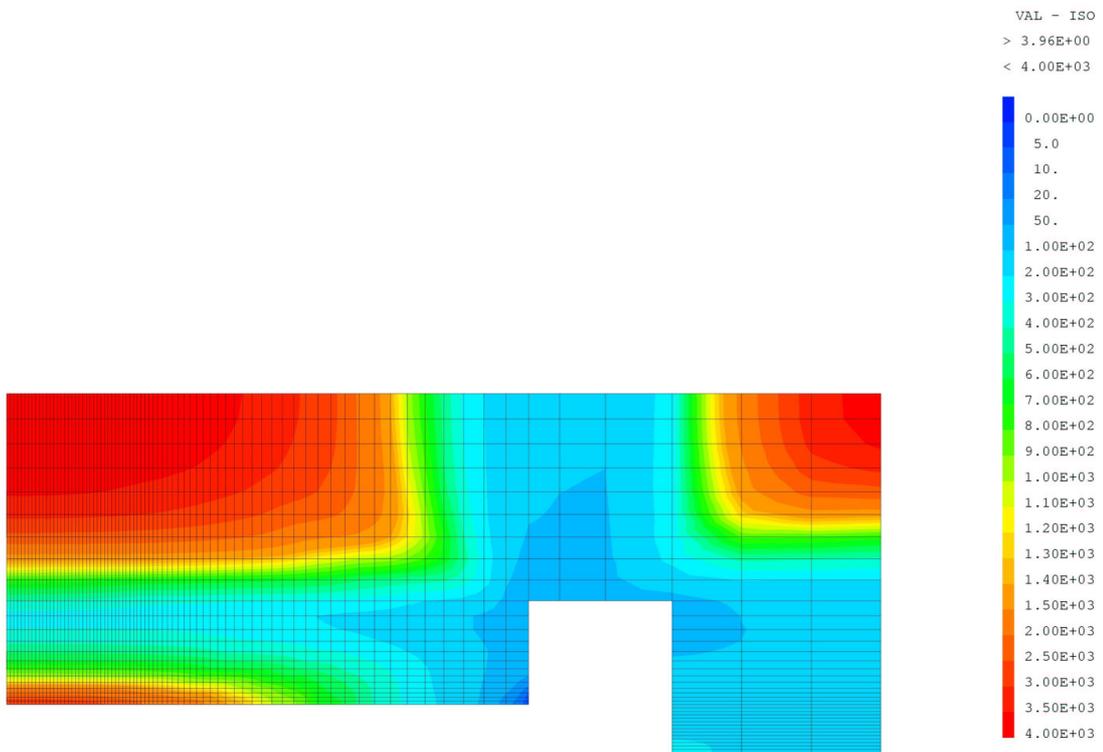
Aimant MNP24 existant



Carte de Champ / Plan de symétrie vertical / Aimant existant MNP 24 / Entrefer 200mm

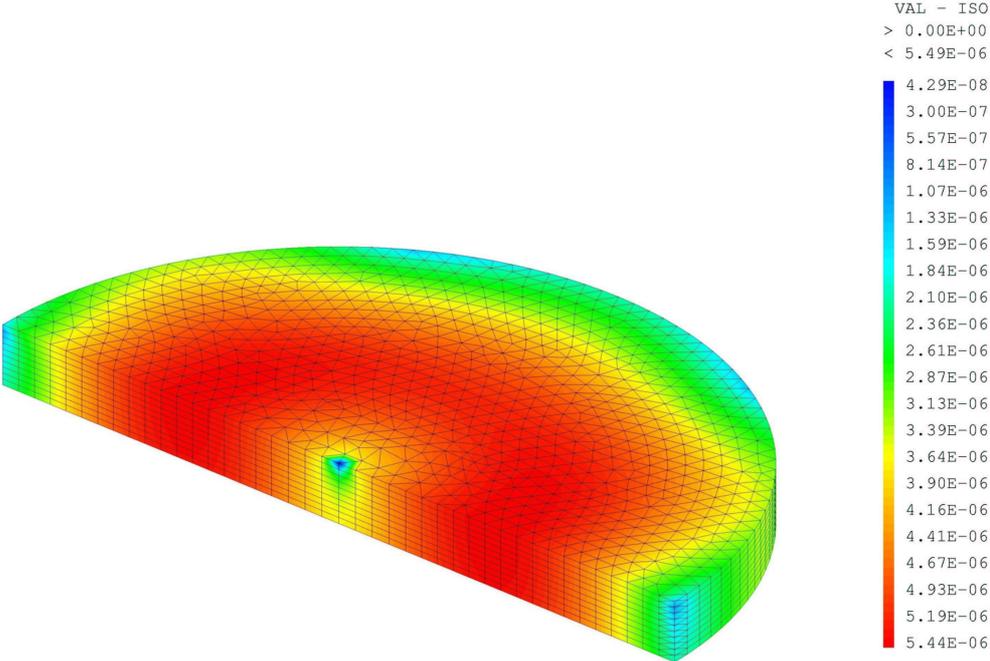


Carte de Perméabilité / Plan de symétrie vertical / Aimant existant MNP 24 / Entrefer 200 mm



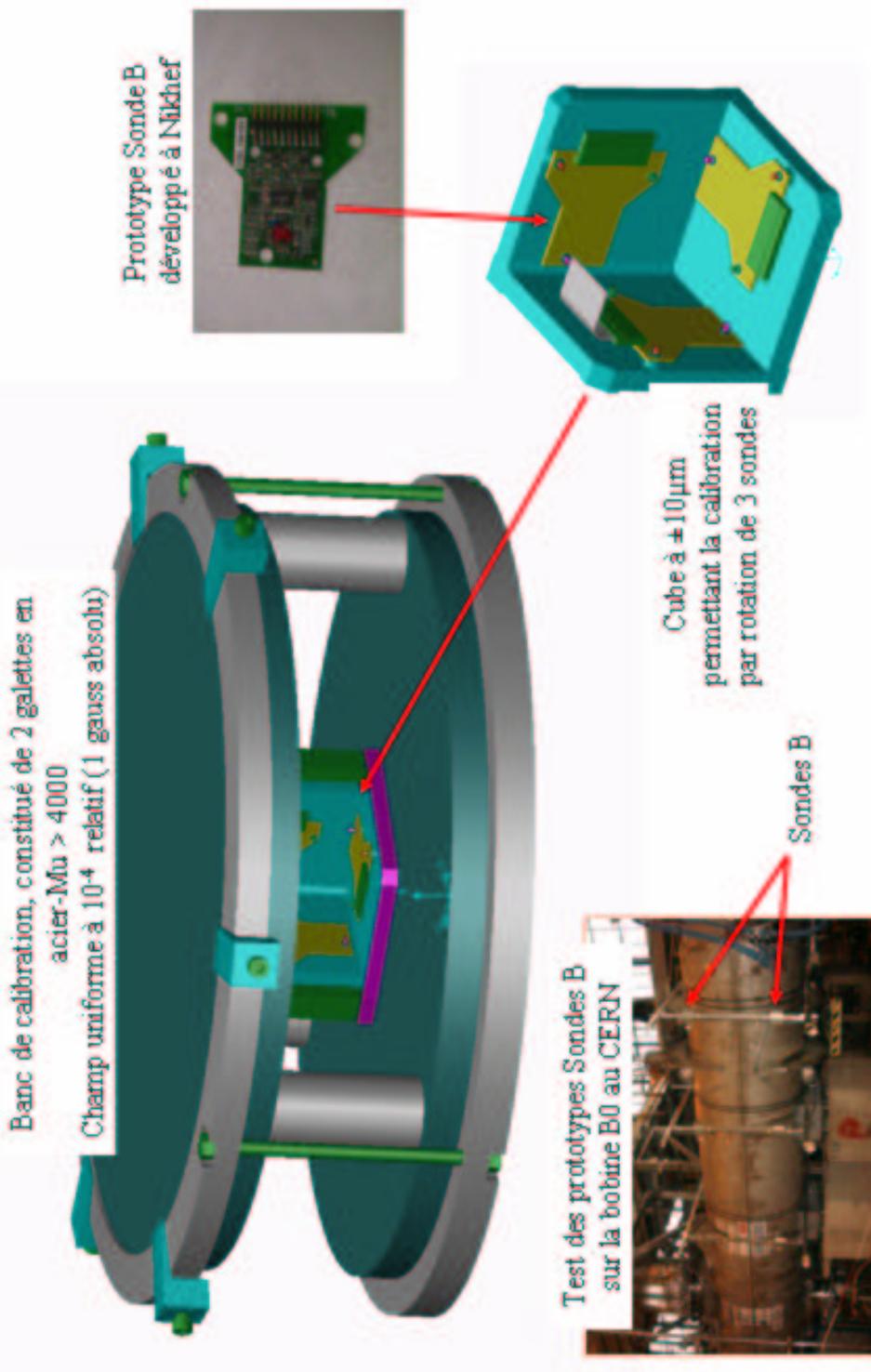
Module du déplacement / Demi-plateau ep. 40 mm - Gap 10 mm / Entrefer local 100 mm

Flèche Maximale : 5.5 µm



ATLAS MUON

Banc de calibration des sondes B (Qualification des prototypes en vue d'en produire 1700)



REFERENCES

- [1] : An Introduction to Computer Aided Electromagnetic Analysis. C.W. Trowbridge. Vector Field Limited
- [2] : Formation de base à OPERA 3d . Vector Services
- [3] : Spécifications Techniques DAPNIA/SIS-3152G-2700-001-2002