



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**DSM - DAPNIA**

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Service des Accélérateurs  
de Cryogénie et de Magnétisme

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE - CEA/SACLAY  
DSM/DAPNIA/SACM bât. 701 – L'Orme des Merisiers  
91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX



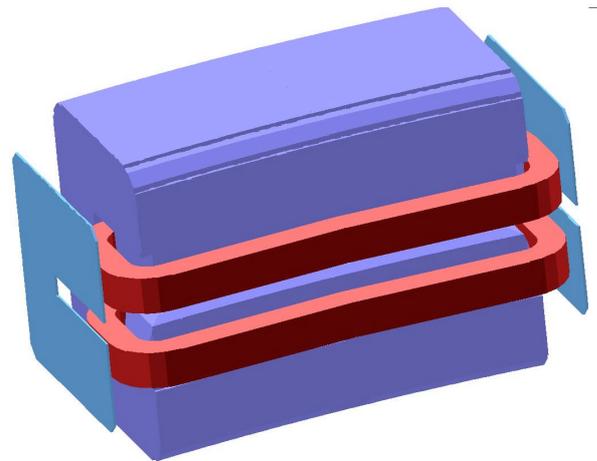
O. DELFERRIERE – D. DE MENEZES

DATE : 10 mars 2002

N/REF. : DSM/DAPNIA/SACM/SOLEIL-\*\*-2002

Olivier DELFERRIERE : [odelferriere@cea.fr](mailto:odelferriere@cea.fr)

Denis De MENEZES : [ddemenezes@cea.fr](mailto:ddemenezes@cea.fr)



**LE DIPOLE DE L'ANNEAU DE SOLEIL**  
**ETUDE MAGNETOSTATIQUE 3D DETAILLEE**

**Olivier DELFERRIERE**  
**Denis DE MENEZES**

*Diffusion :*

Jean-Marc FILHOL  
Marie-Paule LEVEL  
Antoine DAËL  
Amor NADJI  
Murielle CORLIER  
Pascale BRUNELLE



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**DSM - DAPNIA**

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Service des Accélérateurs  
de Cryogénie et de Magnétisme

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE - CEA/SACLAY  
DSM/DAPNIA/SACM bât. 701 – L'Orme des Merisiers  
91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX



O. DELFERRIERE – D. DE MENEZES

## I° - INTRODUCTION

Le dipôle de l'anneau de stockage du projet SOLEIL avait fait l'objet d'une étude détaillée en 1997-1998 qui figure dans la partie "Eléments magnétiques" du Livre Jaune de l'APD SOLEIL[1]. Le fonctionnement de la machine à deux niveaux d'énergie différentes, 1.5 GeV et 2.5 GeV correspondait alors à des dipôles travaillant à 1 Tesla et 1.57 Tesla. L'étude magnétique du dipôle et l'optimisation des chanfreins dans la section courante ainsi qu'en extrémité avaient permis d'obtenir une invariance de l'homogénéité des intégrales de champ à ces deux niveaux d'induction. On avait alors évoqué une possibilité de fonctionnement à 2.75 GeV, mais aucune étude 3D n'avait été effectuée pour ce niveau d'énergie correspondant à des aimants optimisés pour 1.71 Tesla, sachant que les effets de saturation vont intervenir à partir de 1.6 Tesla.

La reprise d'APD commencée fin 2001 par la "nouvelle équipe SOLEIL" a débouchée sur la réactualisation des paramètres de la machine, et en particulier son fonctionnement à un seul niveau d'énergie qui sera de 2.75 GeV.

Les aimants de SOLEIL ayant été optimisés et définis en grande partie par l'équipe du Laboratoire National SATURNE, nous avons donc été sollicités pour reprendre les calculs effectués sur le dipôle de l'Anneau et étudier en détail son fonctionnement à 1.71 Tesla.

Nous présentons dans ce rapport les résultats de simulation obtenus en montant l'induction à 1.71 Tesla pour le design du dipôle initialement prévus pour l'APD. Nous comparons les performances de l'aimant avec celles résultant de son fonctionnement à l'énergie de 2.5 GeV. Nous abordons également les solutions permettant de réduire le niveau de saturation du dipôle.

## II° - Outils de Simulation

### NOUVELLE VERSION D'OPERA-3D<sup>0</sup> de VECTOR-FIELDS<sup>0</sup>:

Les études magnétiques effectuées dans le cadre de l'APD utilisaient des versions des codes VECTOR-FIELDS[2] qui ne sont plus maintenues actuellement. En particulier, le solveur pour la magnétostatique était TOSCA V.2.6, et chacun des modules évoluait indépendamment avec son numéro de version. Maintenant, la version correspond à l'ensemble des modules d'OPERA-3D et il y a eu successivement les versions V7, V7.1, V7.5, V8. Nous utilisons depuis peu la version V8.5. L'environnement des pré-processeur et post-processeur a considérablement évolué avec maintenant un viewer 3D dynamique.

Bien que nous disposons d'une version bien plus performante, nous nous sommes heurté malgré tout à quelques problèmes.

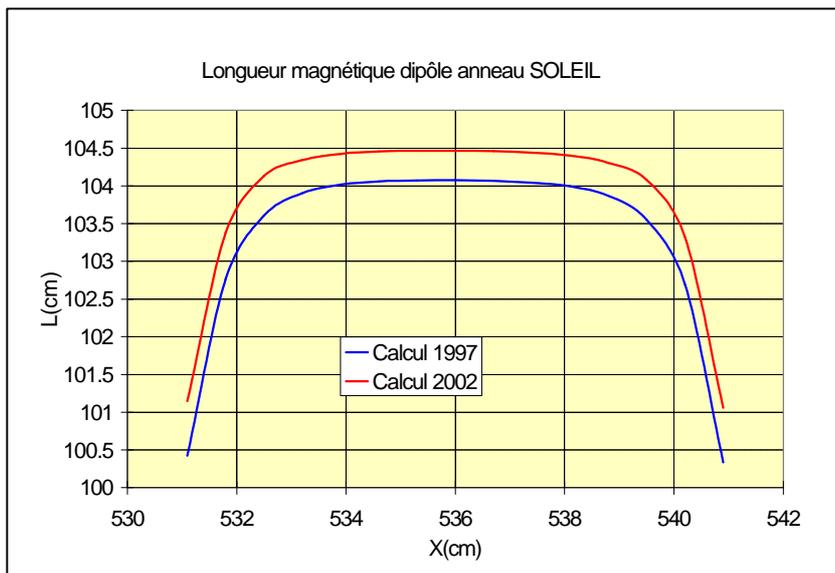
D'une part, les formats des fichiers de résultats issus des modèles calculés lors de l'APD sont incompatibles pour la relecture avec les nouvelles versions (depuis la V7). Les fichiers de l'époque (.toscab) avaient un format ASCII; les fichiers actuels (.op3) sont au format binaire pour une plus grande compacité et une taille minimale. Pour reprendre les études, il a donc fallu dans un premier temps, régénérer les résultats de l'optimisation obtenus dans l'APD.

D'autre part, beaucoup de commandes appartenant au langage interne à OPERA-3D (GUI) et permettant de programmer des séquences automatiques pour l'exploitation de résultats dans le post-processeur, ont été modifiées. En raison de l'introduction du codage sur 256 caractères, certaines commandes ont changé de syntaxe, ou de nouvelles commandes ont été introduites. Pour ces raisons et aussi pour améliorer les performances des procédures, l'ensemble des programmes d'automatisation des tâches pour la génération des résultats à partir des fichiers ".op3" a été réécrit (fichiers .comi).

Les listes de valeurs obtenus à partir des ces fichiers sont ensuite exploités sous EXCEL<sup>®</sup>. Leur format ayant changé, les fichiers EXCEL ont été eux aussi remis à jour.

Plus important encore, le passage en DOUBLE PRECISION de l'ensemble OPERA-3D nous à fait découvrir un "bug" dans le post-processeur utilisé pendant l'APD. Le calcul de l'intégrale du champ magnétique sur un

chemin (droite ou cercle) était sous estimée de 5 mm sur 1052 mm (cf. Fig. 1). Un simple calcul d'intégrale par la méthode des trapèzes sous EXCEL nous a permis de confirmer le résultat de la nouvelle version. En réinjectant le tableau de points, obtenus avec l'ancienne version, dans la nouvelle version nous avons pu également retrouver le bon résultat. L'optimisation de la longueur magnétique pendant l'APD était donc sous-estimée à  $5 \cdot 10^{-4}$  près, ce qui correspondait à la tolérance dans la zone utile.



### III° - MODELISATION 3D DU DIPOLE PHILOSOPHIE GENERALE ET TYPES D'ANALYSES EFFECTUEES

#### 1° - Processus de Modélisation :

L'optimisation du circuit magnétique de l'aimant commence par une étude précise de la section courante en 2D pour garantir les tolérances exigées à l'intérieur de la zone utile. La tolérance peut, être globale ( $\Delta B/B \leq 5 \cdot 10^{-4}$ ), ou porter sur la décomposition harmonique du champ magnétique (Tab. 1). A ce stade après définition de l'entrefer (37 mm pour le dipôle anneau), la géométrie de la section courante avait été optimisée (épaisseur culasse, géométrie du pôle,...) pour obtenir une invariance de  $\Delta B/B$  à 2 niveaux d'induction qui étaient  $B=1$  Tesla et  $B=1.57$  Tesla. Le design des pôles comporte donc un profil latéral antisaturant à 2 pentes.

Après optimisation en 2D, un modèle 3D est construit. Il intègre alors tous les détails ayant une influence sur le comportement magnétique de l'aimant. La culasse comporte des chanfreins à 45 degrés sur les parties haute et basse, là où le champ est très faible (gain sur le poids). Afin de permettre le passage des bobines autour du pôle, un dégagement à 45 degrés aux 4 coins des pôles est effectué. L'étude des extrémités conduira à la réalisation d'un profil particulier du pôle, permettant d'ajuster la longueur magnétique et réduire la saturation. L'ajout de plaques de garde permet d'ajuster le champ de fuite et participe au réglage de la longueur magnétique.

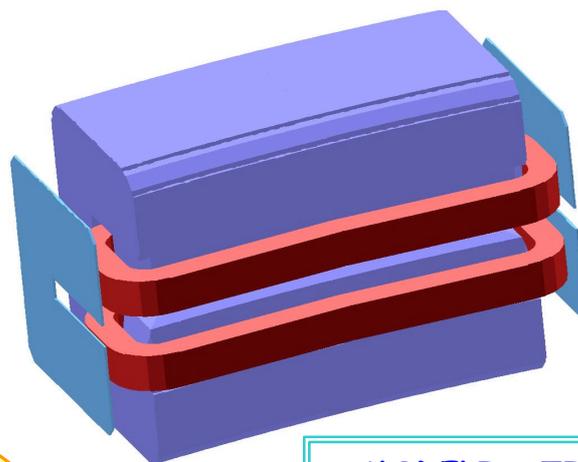
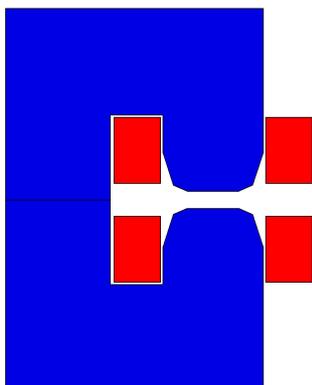
DIPOLE ANNEAU Composantes multipolaires à $\pm x$	Systématique	Aléatoire
Quadripôle	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Hexapôle	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Octupôle	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Décapôle	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Zone utile ( $\pm x$ mm)	$\pm 20$ mm	
Reproductibilité intégrale	$\frac{s(BI)}{(BI)_0} \leq 10^{-3}$	

Tableau 1 : Extrait du livre jaune de l'APD SOLEIL  
Tolérances multipolaires sur le dipôle

#### MODELISATION 2D

##### OPERA-2D

Optimisation  
de la section courante



#### MODELISATION 3D

##### OPERA-3D/TOSCAÓ

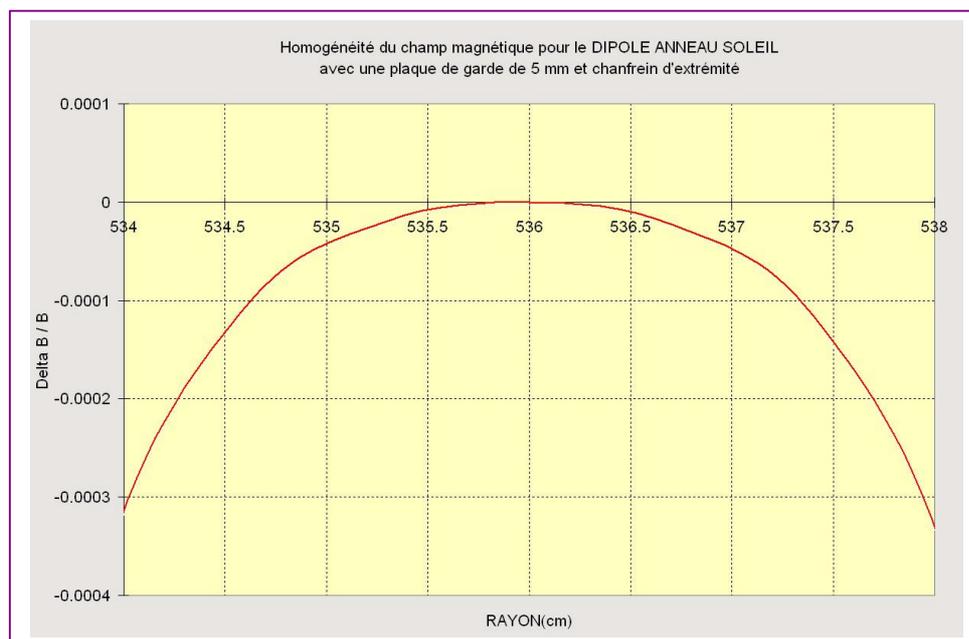
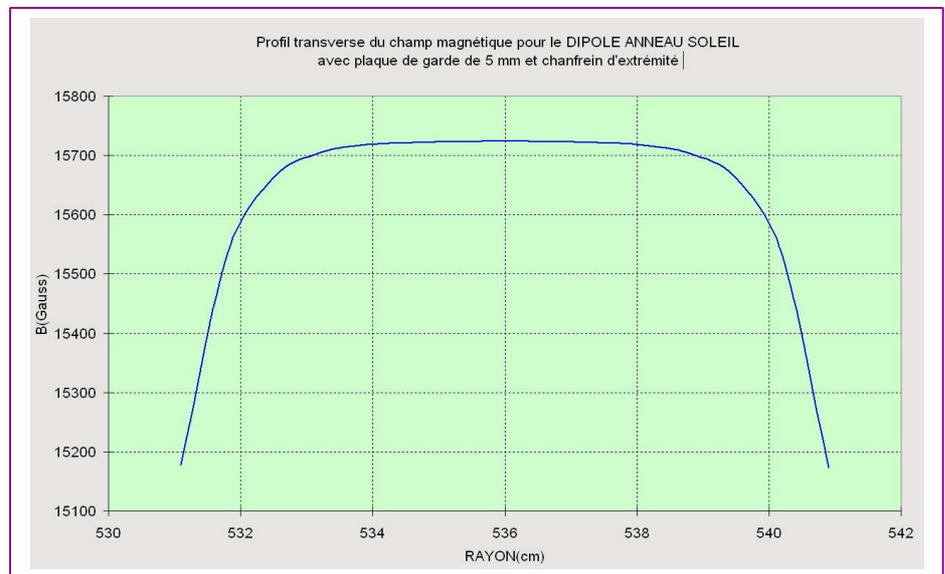
Solveur magnétostatique  
**I-DEAS(CAO+maillage)**  
(géométries complexes)

## 2° - Les différents types d'analyse effectués :

La caractérisation complète d'un aimant passe par différentes analyses :

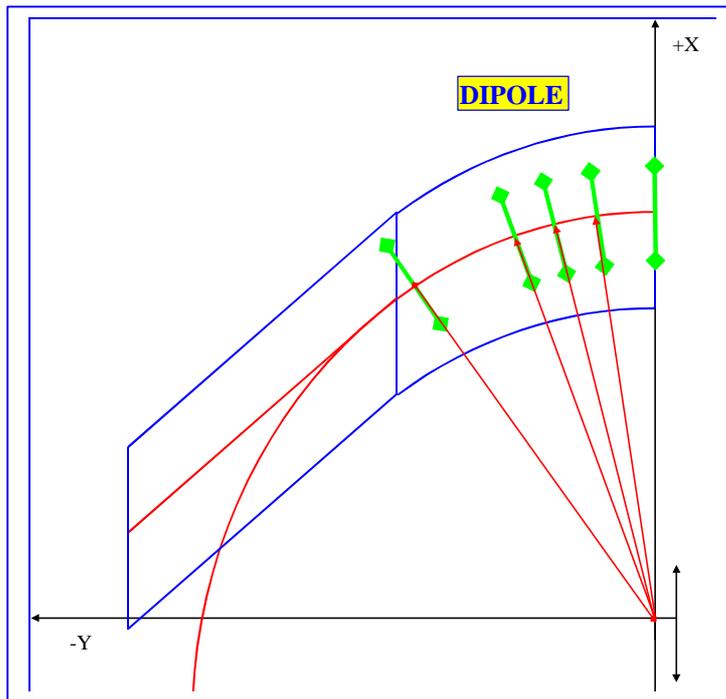
- a) Homogénéité du champ au centre de l'aimant : On s'intéresse en premier lieu à l'induction maximale dans l'entrefer  $B_0$ , et à l'homogénéité du champ au centre de l'aimant  $(B-B_0)/B_0$ . Le niveau de champ dépend bien entendu du nombre d'Ampères-tours, mais surtout du matériau magnétique utilisé identifié par sa courbe  $\mu=B(H)$ . Le point de fonctionnement de la machine à un niveau d'induction élevé ( $> 1.57T$ ), entraîne une saturation du circuit magnétique dans les dipôles, ce qui se traduira par une surconsommation électrique et un comportement non linéaire de l'aimant plus difficile à gérer au point de vue des réglages de la machine.

Figure 2 : ?  
Profil du champ magnétique au centre de l'aimant



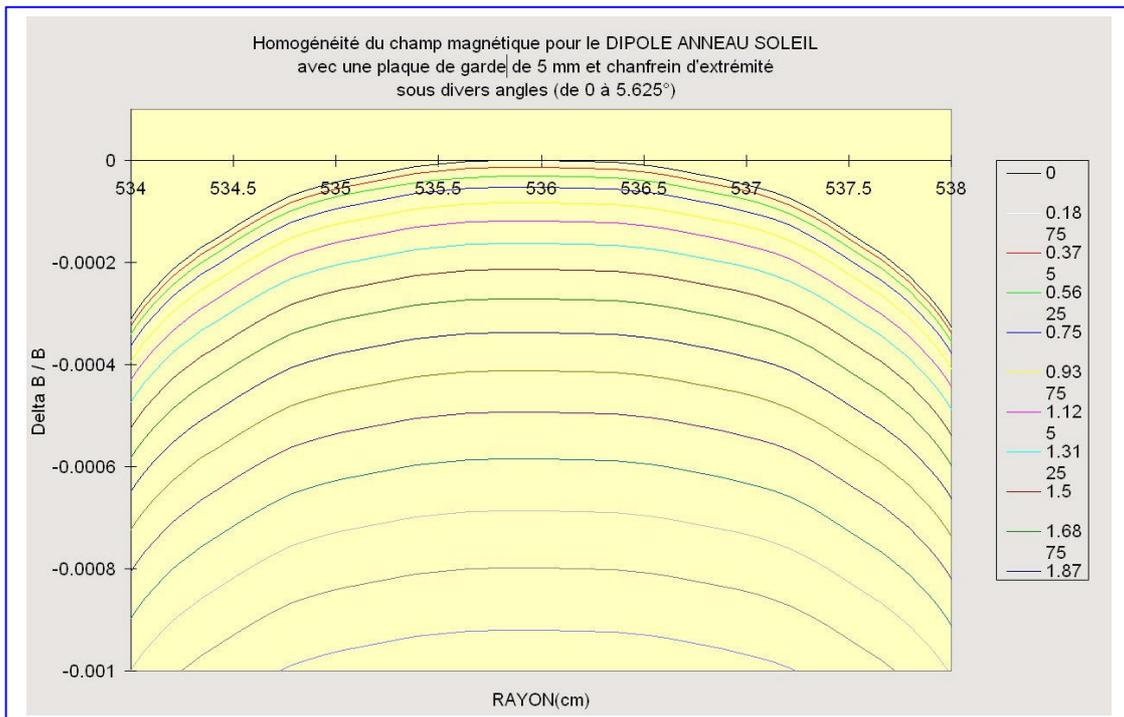
? Figure 3 :  
Homogénéité du champ magnétique  $(B-B_0)/B_0$  au centre de l'aimant

- b) Evolution du champ dans la zone utile entre le centre et l'extrémité de l'aimant : On regarde aussi l'évolution du profil transverse du champ à mesure que l'on s'écarte du centre de l'aimant dans la direction du faisceau. Pour cela, bien que l'aimant soit constitué de tôles empilées, on regarde l'homogénéité du champ dans la section transverse perpendiculairement à la trajectoire centrale, c'est-à-dire en parcourant l'aimant en angle comme pour un aimant "secteur" (cf. Fig. 4).



? Figure 4 :  
Définition du tracé pour regarder l'évolution de l'homogénéité du champ magnétique dans la zone utile

Figure 5 : ?  
Homogénéité du champ magnétique  $(B-B_0)/B_0$  au voisinage du centre de l'aimant



- c) Carte de champ dans le plan médian : Pour tenir compte des effets 3D du dipôle dans les calculs d'optique, comme par exemple le profil du champ de fuite, il est nécessaire de définir une carte de champ dans le plan médian à la fois dans tout l'entrefer du dipôle et en sortie d'aimant. Nous avons adopté pour cela une méthode "hard edge" approprié pour ce type de dipôle à faces parallèles du fait de l'empilement des tôles. Dans le dipôle, la largeur de la carte est définie par 2 rayons de 5360 mm correspondant au rayon du dipôle, décalés de +20 mm et -20 mm pour parcourir toute la zone utile. A la sortie de l'aimant, la carte de champ est définie en prolongeant ces 2 rayons par des tangentes aux points d'extrémités. On trace alors directement la carte de champ complète sous la forme d'une grille régulière en (x,y), en assignant un certain nombre de points à chacun des quatre côtés du patch ainsi défini.

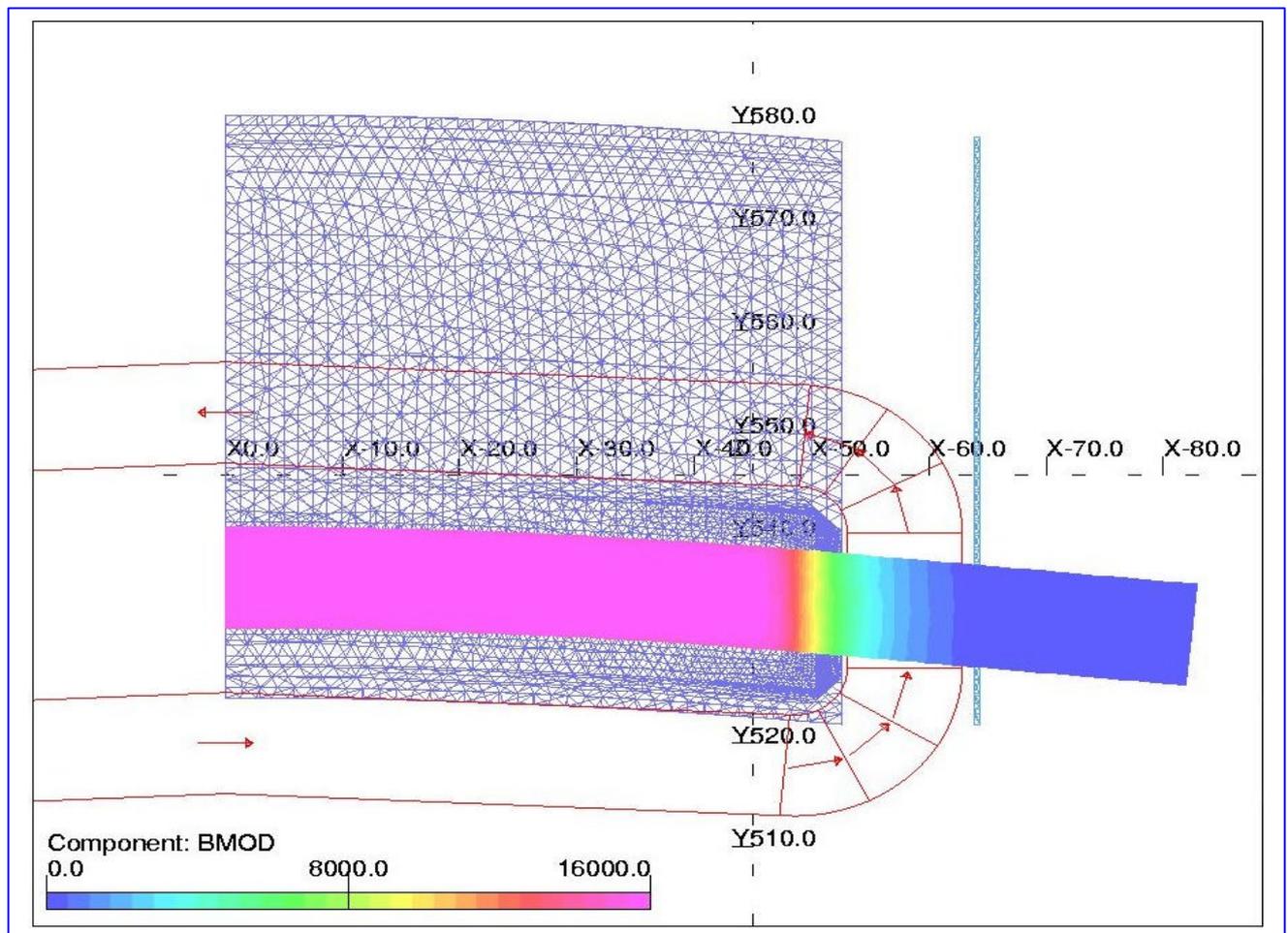
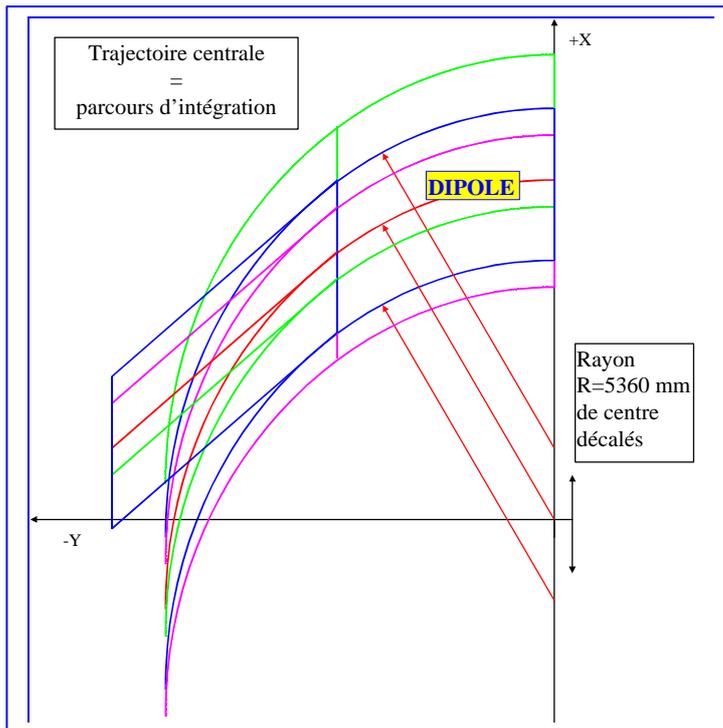


Figure 5 : Carte de champ du dipôle dans le plan médian (modèle 3D)

- d) Homogénéité des intégrales de champ : Pour la définition des intégrales de champ, on conserve la méthode précédente dite "hard edge" (cf. Fig. 6). Le tracé du champ magnétique s'effectue sur des rayons concentriques à  $R=5360$  mm à l'intérieur de l'aimant et on prolonge par la tangente à la trajectoire de référence pour le champ de fuite. Pour cela on est obligé de recharger le modèle à

chaque tracé avec un décalage d'origine. Pour parcourir toute la zone utile, on s'est fixé 15 points. Les intégrales sont calculées directement dans OPERA-3D. On représente sur la Figure 7 l'évolution transverse.

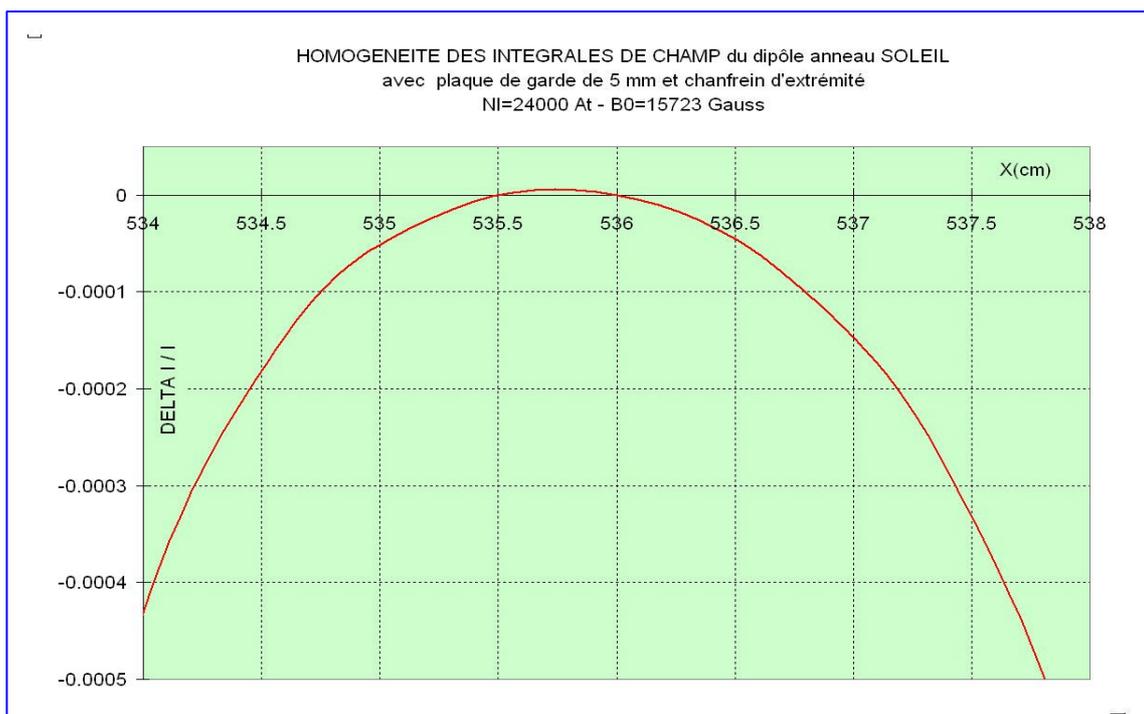


? **Figure 6 :**  
Définition du tracé pour calculer les intégrales de champ

**Figure 7 :** ?  
Homogénéité des intégrales de champ dans la zone utile  $\pm 20$ mm

$$\frac{\int B dl - \int B_0 dl}{\int B_0 dl}$$

( $B_0$  = champ au centre du dipôle)



- e) Longueurs magnétiques : A partir des résultats obtenus pour le calcul des intégrales de champ, on déduit les longueurs magnétiques obtenues en rapportant l'intégrale de champ à la valeur du champ au centre de l'aimant :

$$L_m = \frac{\int B dl}{B_0}$$

On trace sur la figure 8 l'évolution transverse de la longueur magnétique  $L_m$ .

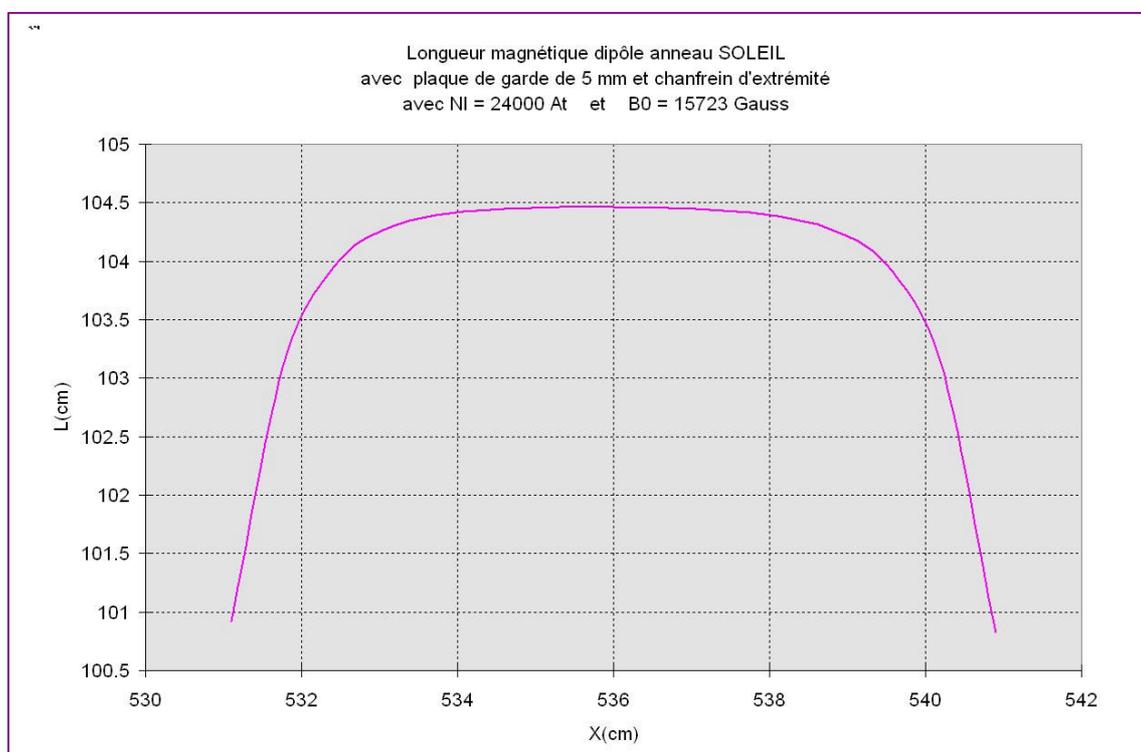
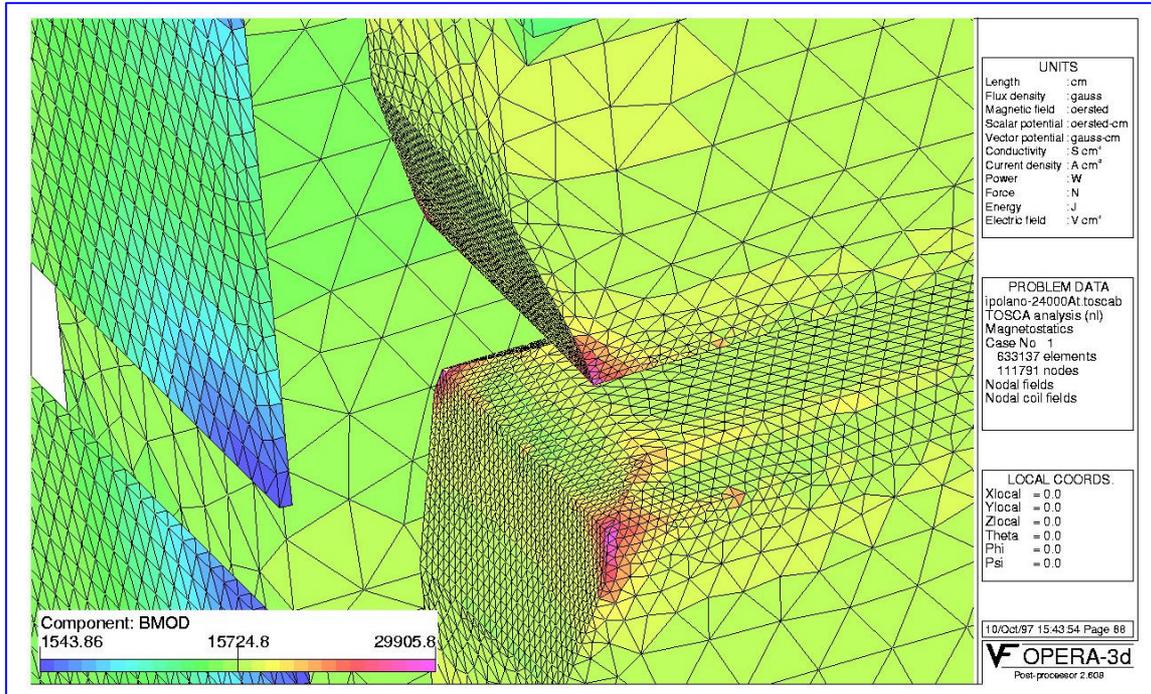
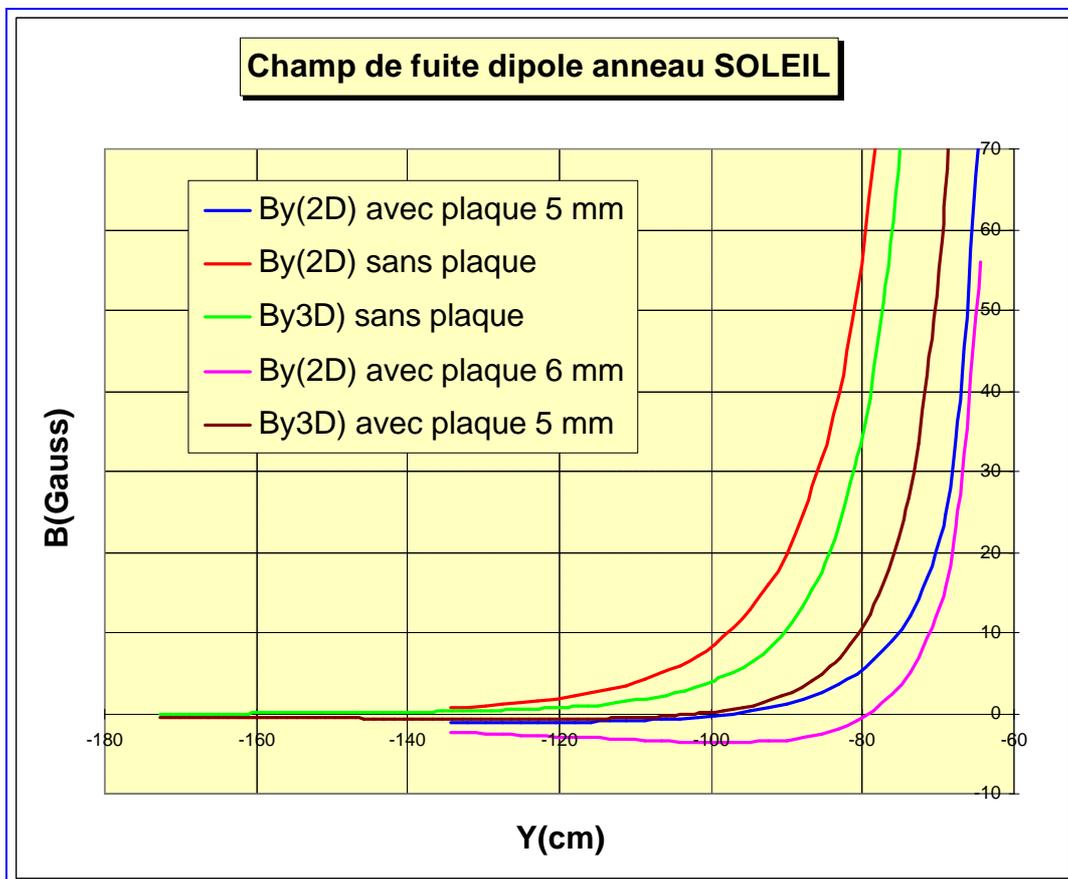


Figure 8 : Evolution transverse de la Longueur magnétique du dipôle de l'anneau

- f) Etude des extrémités : L'intérêt des études 3D est de simuler un aimant fini avec ses extrémités. Un profil de pôle adéquat permettra de minimiser d'une part les effets de saturation, et d'autre part l'effet de coupure qui entraîne des taux d'harmoniques indésirables dans la décomposition multipolaire du champ. Généralement un simple chanfrein à 45° suffit. On peut également chercher un profil de pôle à partir d'une solution analytique satisfaisant l'équation de Laplace et assurant un taux d'harmoniques minimal [3]. Pour régler de manière simple la longueur magnétique du dipôle de l'anneau, tout en évitant une trop forte saturation, nous avons choisi un profil d'extrémité à 2 pentes que nous développerons au chapitre IV. Pour ajuster le niveau du champ de fuite, nous avons également préconisé l'ajout d'une plaque de garde, découplée du circuit magnétique principal, mais dont le fonctionnement participe aussi à l'ajustement de la longueur magnétique. Sur la figure 9, on distingue l'extrémité des pôles ainsi que la plaque de garde avec les iso valeurs du champ magnétique. La figure 10 résume l'étude effectuée pour atténuer le champ de fuite en optimisant l'épaisseur de la plaque de garde. Une étude similaire a été menée pour fixer sa position par rapport au dipôle.



σFigure 9 : Etude de l'extrémité du dipôle    τFigure 10 : champ de fuite en fonction de l'épaisseur de la plaque



g) Analyse harmonique sous TOSCA® : Les tolérances multipolaires données par les calculs d'orbite doivent être obtenues en tenant compte du champ tout au long de la trajectoire des particules dans l'aimant, et également dans la zone du champ de fuite. L'analyse harmonique est généralement effectuée en 2D sur un cercle au centre de l'aimant. La résolution de l'équation de Laplace à deux dimensions en coordonnées cylindriques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} = 0$$

permet d'écrire le potentiel scalaire V sous la forme :

$$V(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n r^n \sin(n\varphi - \alpha_n)$$

où :

r est le rayon d'analyse

$\alpha_n$  est l'amplitude de la composante multipolaire

$\varphi_n$  est la phase de la composante multipolaire

Cette formulation est utilisable dans TOSCA qui résout les équations de Maxwell en potentiel scalaire. De l'expression de V on tire celle de  $B_r$  et  $B_\theta$  :

$$B_r(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} n r^{n-1} (a_n \sin(n\varphi) + b_n \cos(n\varphi))$$

$$B_\theta(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} n r^{n-1} (a_n \cos(n\varphi) - b_n \sin(n\varphi))$$

L'objectif est de réaliser en 3D l'analyse harmonique du champ magnétique en termes multipolaires intégrés. L'intégration se fait suivant l'axe de l'aimant de -8 à +8 sur un cylindre dont le rayon correspond au rayon d'analyse 2D de la section courante de l'aimant. En raisonnant toujours sur la variable potentiel, on écrit V sous la forme :

$$V(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n r^n \sin(n\varphi)$$

En intégrant  $V(r, \theta)$  suivant  $\theta$  :

$$\begin{aligned} & \int_0^{2p} V(r, \varphi) \sin(m\varphi) d\varphi \\ &= \int_0^{2p} \sum_{n=1}^{\infty} a_n r^n \sin(n\varphi) \sin(m\varphi) d\varphi \end{aligned}$$

Cette intégrale est nulle sauf si  $m=n$ , et :

$$= \int_0^{2p} a_n r^n \sin^2(n\varphi) d\varphi = p r^n a_n$$

D'où :

$$a_n = \frac{1}{p r^n} \int_0^{2p} V(r, \varphi) \sin(n\varphi) d\varphi$$

Remarque : Sous OPERA-3D, l'utilitaire de calcul d'intégrale en coordonnées cylindriques effectue des intégrales en  $r.dq$  et non en  $dq$ . Le potentiel  $V(r, \theta)$  correspondant sous OPERA-3D à la variable POT, on a donc la relation :

$$a_n = \frac{1}{pr^{n+1}} \int_0^{2p} POT \sin(nq) dq$$

Pour définir une décomposition en séries de Fourier des termes multipolaires intégrés  $A_n$ , on écrit :

$$A_n = \frac{1}{pr^{n+1}} \int_{-L}^{+L} \int_0^{2p} POT \sin(nq) dq dz$$

$z$  étant l'axe faisceau de l'aimant, et  $L$  la longueur d'intégration choisie suffisamment grande pour tenir compte des champs de fuite. En général, on prend la limite du modèle de l'aimant. Revenons maintenant à l'expression des composantes du champ magnétique  $B_r$  ou  $B_\theta$  :

$$B_r = -\frac{\nabla V}{\nabla r} ; B_\theta = -\frac{1}{r} \left( \frac{\nabla V}{\nabla q} \right)$$

D'où on tire les coefficients :

$$a_n = \frac{1}{pr^n} \int_0^{2p} B_r(r, q) \sin(nq) dq, \quad \text{non nul pour } B_r$$

$$b_n = \frac{1}{pr^n} \int_0^{2p} B_\theta(r, q) \cos(nq) dq, \quad \text{non nul pour } B_\theta$$

Ainsi que les coefficients multipolaires intégrés :

$$A_n = \frac{1}{pr^n} \int_{-L}^{+L} \int_0^{2p} B_r(r, q) \sin(nq) dq dz, \quad \text{non nul pour } B_r$$

$$B_n = \frac{1}{pr^n} \int_{-L}^{+L} \int_0^{2p} B_\theta(r, q) \cos(nq) dq dz, \quad \text{non nul pour } B_\theta$$

Sur la figure 11, on représente le terme multipolaire  $A_{12}$  du développement de  $B_r$ . Cependant afin d'effectuer ce type d'analyse sur le dipôle de l'anneau, il ne faut pas oublier que l'aimant est courbe.

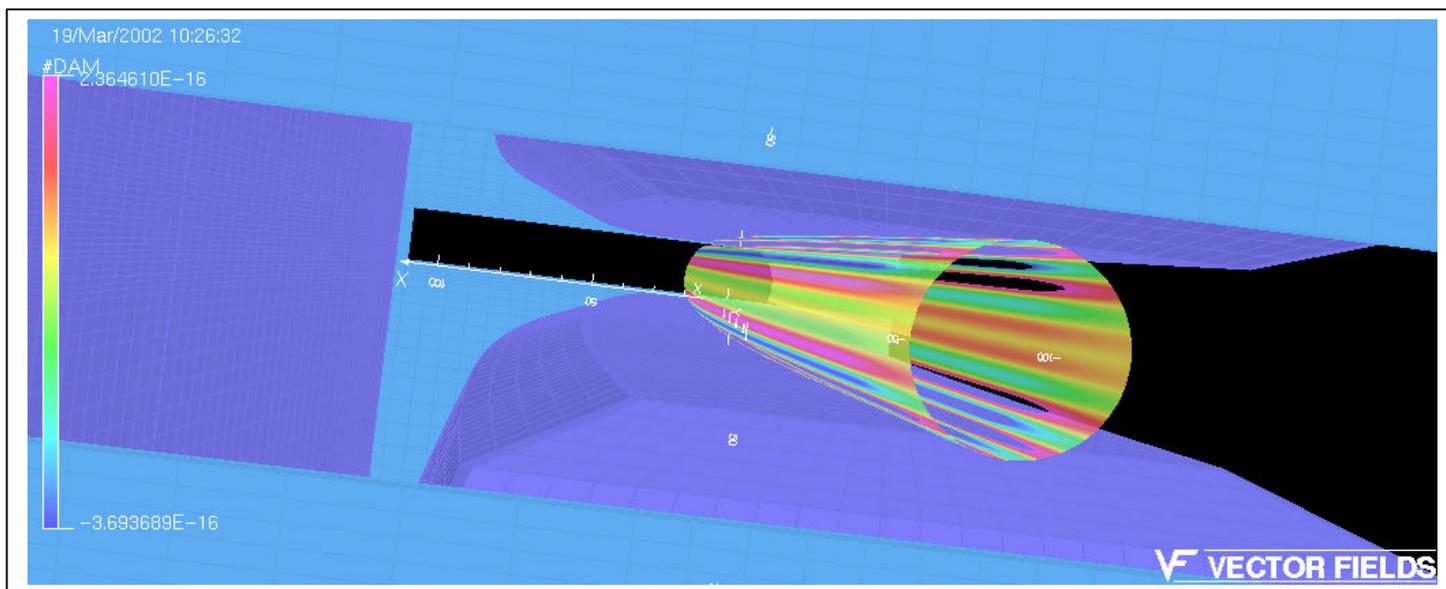
Il a donc fallu effectuer l'intégration sur un tore définissable dans OPERA-3D. Malheureusement, la définition de cartes de champ appuyées sur des tores est imprécise, car les cotés ne sont pas strictement des cercles et s'appuient sur une équation du second degré. Il en résulte une incertitude sur la position des points, supérieure à la tolérance recherchée.

Dans la version actuelle du post-processeur (V8), cette méthode d'intégration est donc inutilisable pour un aimant courbe.

De plus, le développement ainsi effectué sur une base d'harmoniques cylindriques n'est théoriquement plus valable, sauf en première approximation si la flèche est très faible.

Mais dans notre cas, la flèche totale est d'environ 25 mm sur 1000 mm, soit un rapport de  $2.5 \cdot 10^{-2}$  ce qui n'est plus négligeable.

Il est donc impératif d'effectuer un développement sur une base d'harmoniques en coordonnées toriques [4], mais ce travail n'a pas été effectué.



**Figure 11** : Intégration du terme  $A_{12}$  en coordonnées cylindriques dans le développement harmonique du champ

## IV° - LA MODELISATION 3D - MAILLAGE EN ELEMENTS FINIS:

### 1° - Génération des modèles - Les différents types de maillage:

Le maillage, sous les versions d'OPERA-3D antérieures à la V7, était un maillage en hexaèdres généré par extrusion d'un plan de base dans lequel il avait fallu imaginer la projection du modèle à réaliser. Tous les points et arrêtes nécessaires à la création des volumes devaient être présent dans le plan de base à l'origine, car aucune entité ne pouvait être rajoutée par la suite, à moins de redéfinir complètement le modèle. De plus, le fait de mailler en hexaèdres nécessite d'avoir un maillage réglé dans le plan de base, c'est-à-dire avoir défini l'ensemble des surfaces, soit par 4 arrêtes avec des quadrilatères normaux, soit par 3 cotés avec des éléments dégénérés en 1 point. Par la suite, l'extrusion de ces surfaces donnera des hexaèdres ou des prismes, mais en aucun cas des tétraèdres.

Cependant, il existait, et existe toujours, une interface directe entre la partie CAO+maillage du logiciel I-DEAS™, et le solveur magnétostatique TOSCA. Le gros avantage de cette interface est qu'elle permet d'importer des modèles maillés, par l'intermédiaire d'un fichier universel (type .unv), et ce maillage peut être à base d'hexaèdres mais aussi à base de tétraèdres qui ne pouvaient être générés à l'époque sous OPERA-3D.

Cette interface avait suscité un vif intérêt pour la modélisation du dipôle surtout au niveau du raccordement des trois chanfreins latéral, d'extrémité et de dégagement de coin pour les bobines.

#### A-Le maillage tétraédrique :

Le modèle est créé sous I-DEAS, ou sous un autre logiciel de CAO comme EUCLID par exemple, et récupéré par interface IGES 3D. La figure 12 représente la géométrie d'un quart du dipôle avec une demi plaque de garde, ainsi que l'inclusion de celui ci dans un volume d'air environnant.

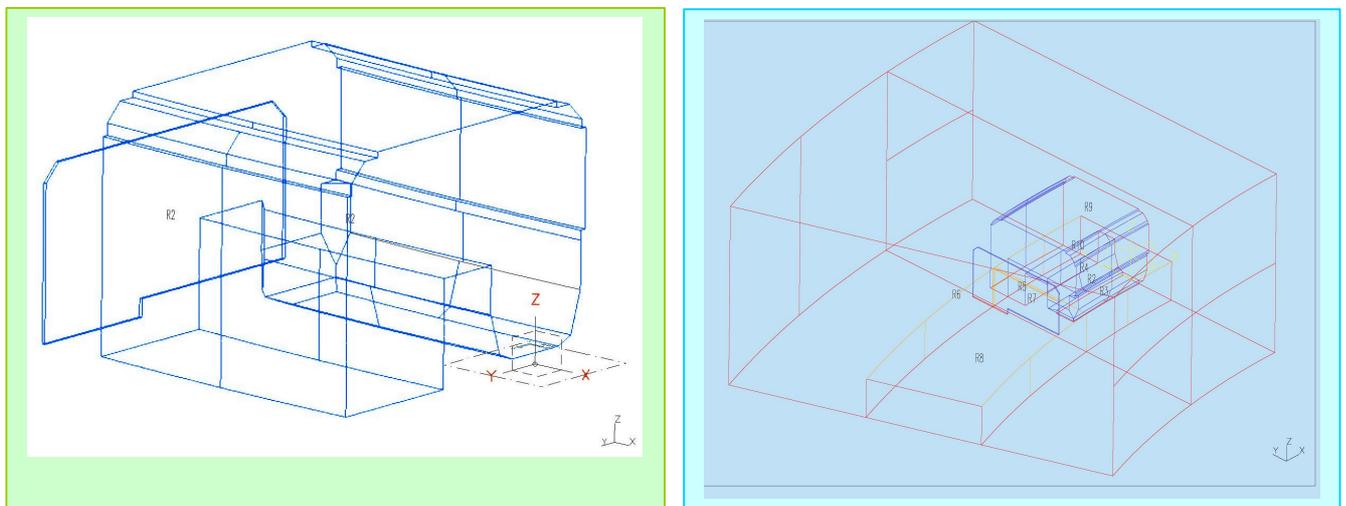
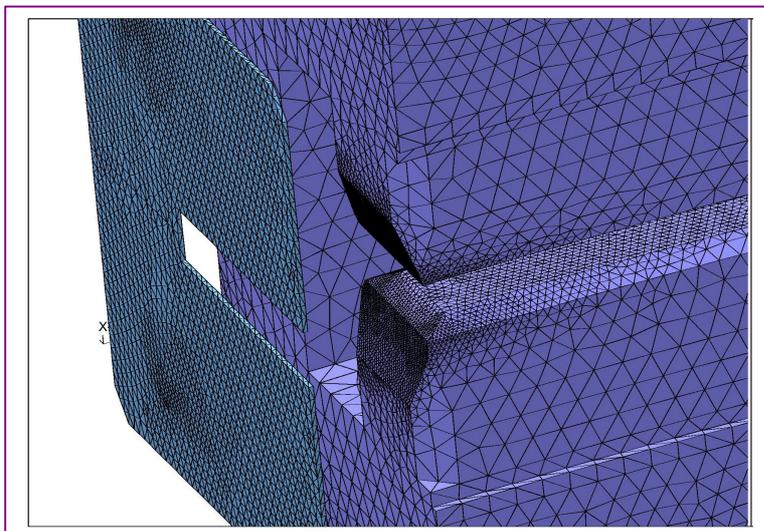
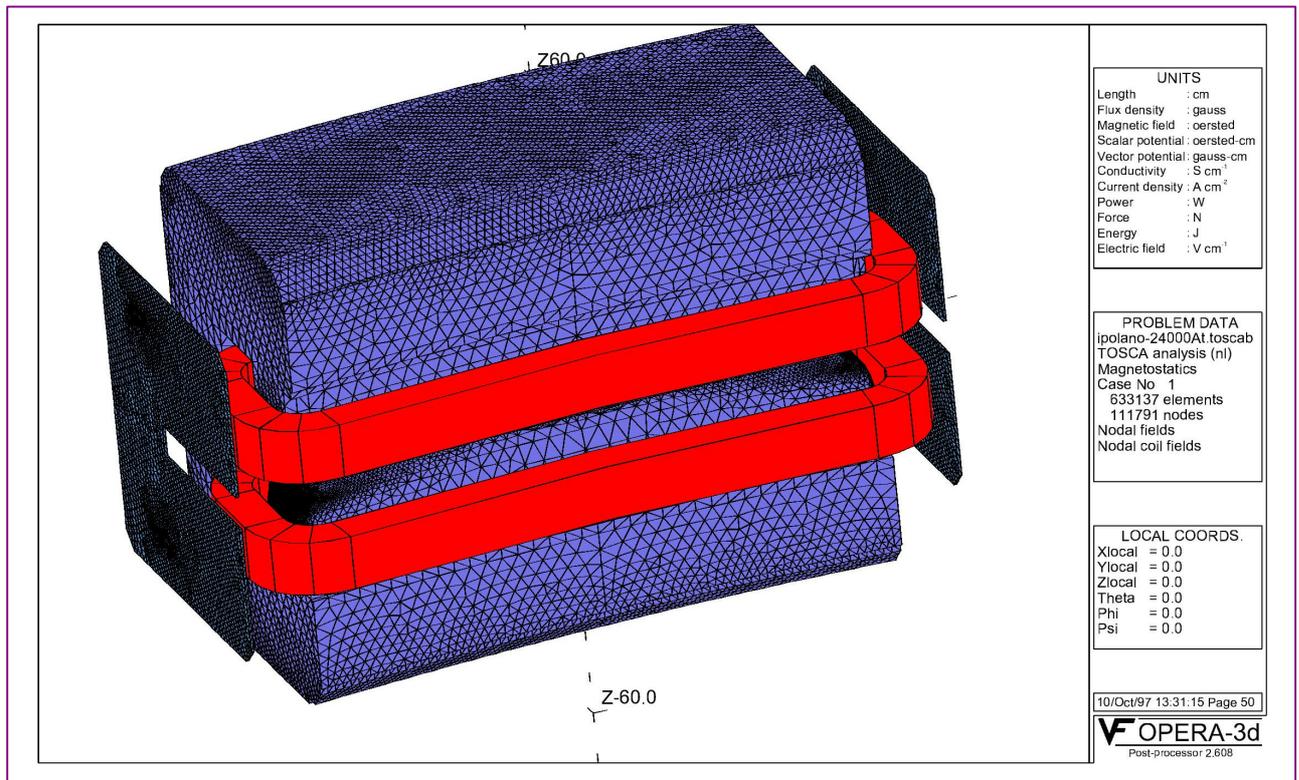


Figure 12 : Géométrie du dipôle sous I-DEAS

Le maillage en tétraèdres obtenu est représenté sur les figures 13 et 14. Bien que ce type de maillage permette de représenter l'aimant de manière exacte, nous nous sommes aperçu que la précision de calcul avec des tétraèdres était largement insuffisante devant les tolérances demandées, à moins de générer un nombre considérable de tétraèdres incompatible avec des temps de calculs raisonnables (<24 h). Il existe environ 1 ordre de grandeur entre la précision atteinte avec des tétraèdres ( $\sim 10^{-3}$ ) par rapport à celle obtenue avec des hexaèdres ( $\sim 10^{-4}$ ).



**Figure 13 :** ?  
Maillage tétraédrique du dipôle de l'anneau de SOLEIL

? **Figure 14 :**  
Détail de l'extrémité avec la plaque de garde

### B-Le maillage hexaédrique :

Afin d'améliorer la précision de calcul du champ, le modèle avait finalement été construit sous OPERA-3D. Le problème du raccordement des chanfreins a pu finalement être résolu grâce à une astuce de modélisation (cf. Fig. 15)

La méthode d'extrusion est néanmoins un handicap pour ce type d'aimant. En effet, il est courbe, on ne peut donc pas l'extruder à partir de sa section courante. D'autre part, ce n'est pas un secteur, on ne peut donc pas non plus le générer par rotation de sa section courante.

Il est donc impératif de l'extruder à partir du plan médian avec la contrainte des chanfreins. Sur la figure 15, on voit le plan d'extrusion n° 5 (hauteur par rapport au plan médian  $h=47.8$  mm).

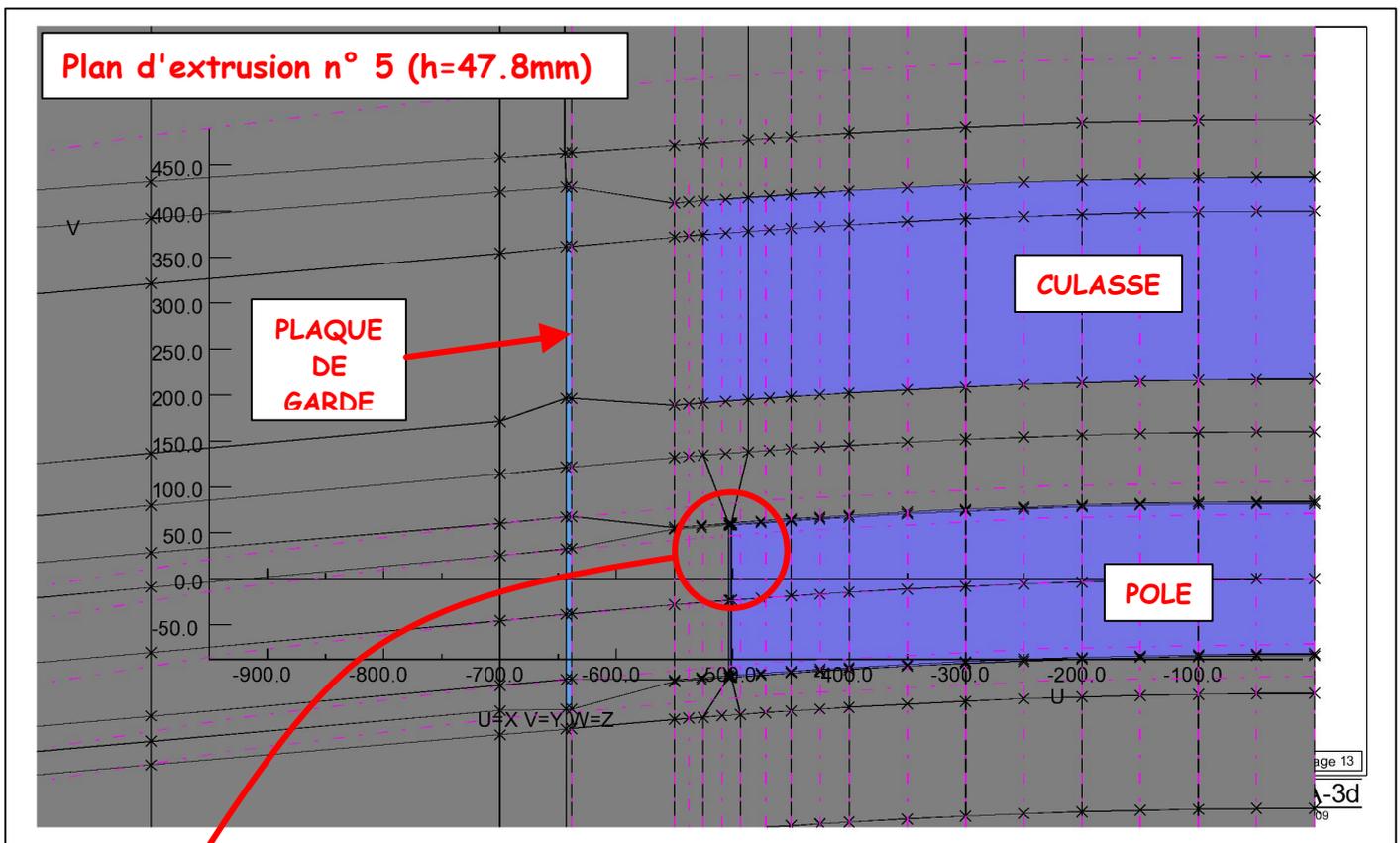
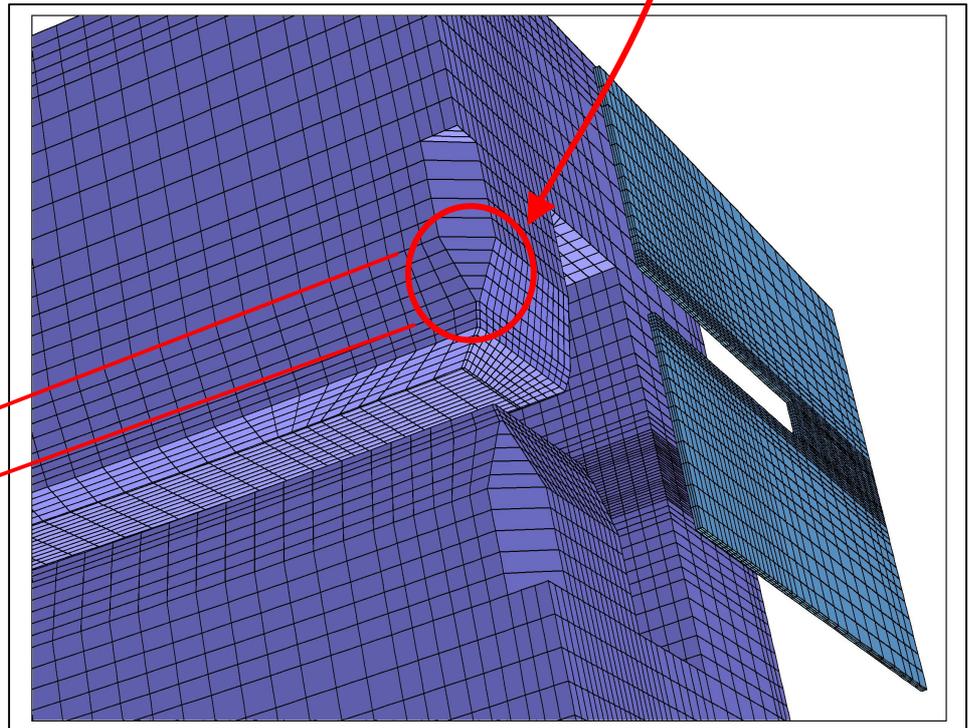
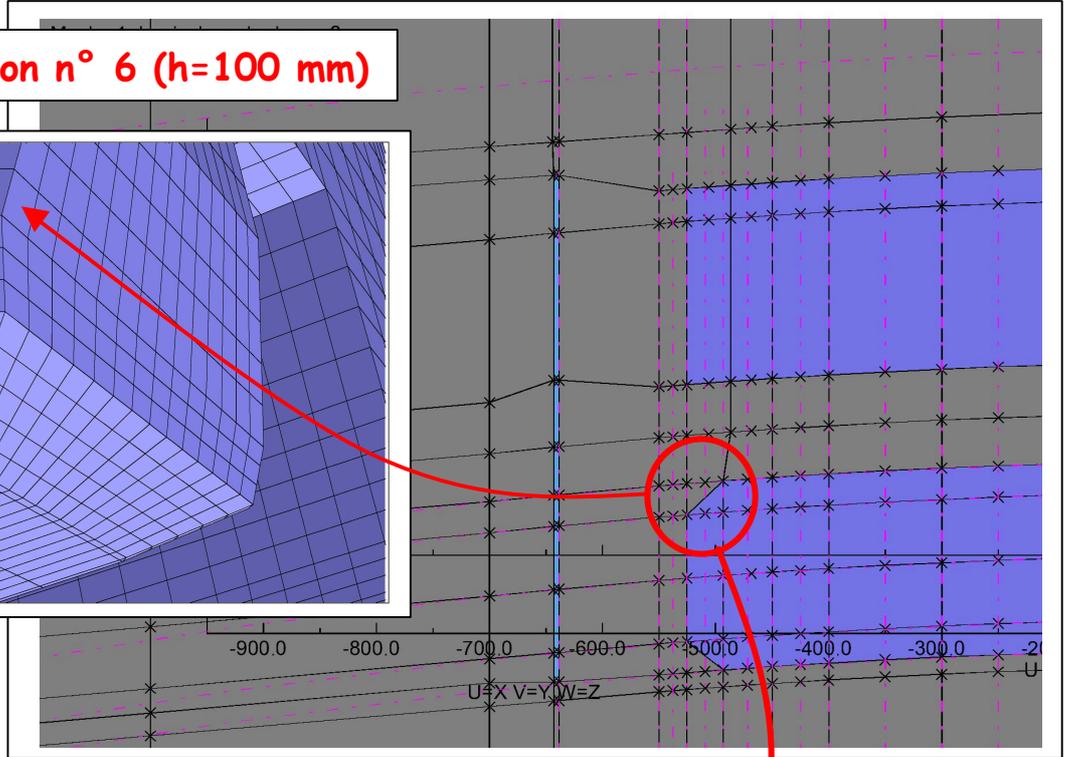
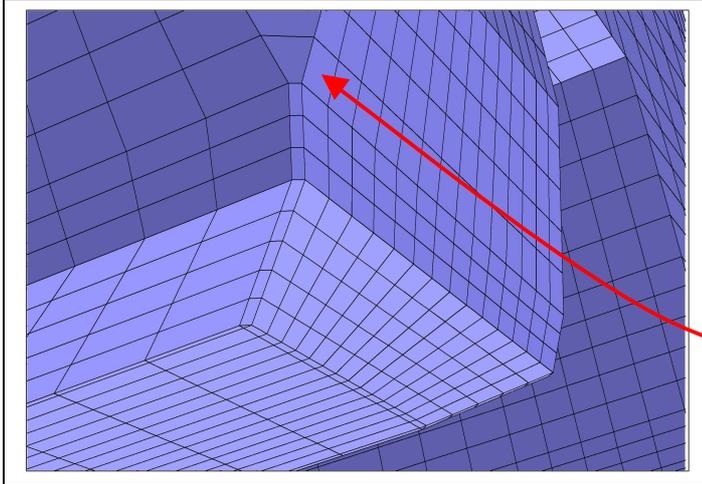


Figure 15 : plan d'extrusion du modèle à  $h=47.8$  mm du plan médian

Afin de construire le chanfrein de dégagement pour le passage des bobines, on construit une petite zone sur le pourtour du pôle, avec une zone triangulaire au coin. Par élargissement et élévation de cette zone en passant du plan n° 5 au plan n° 6, on peut créer le chanfrein visible sur les figures 16 et 17.

**Plan d'extrusion n° 6 (h=100 mm)**



Plan de base n°6: h=100 mm

Plan de base n°5: h=47.8 mm



## 2° - Choix effectué pour le dipôle Anneau de SOLEIL:

L'ensemble des études sur le dipôle anneau de SOLEIL a été effectué avec le modèle réalisé sous OPERA-3D. L'aimant est un dipôle courbe constitué d'un empilement de tôles décalées, avec un circuit magnétique en C. Le redémarrage des études avec la nouvelle version a permis d'affiner le maillage, notamment dans les zones proches des chanfreins.

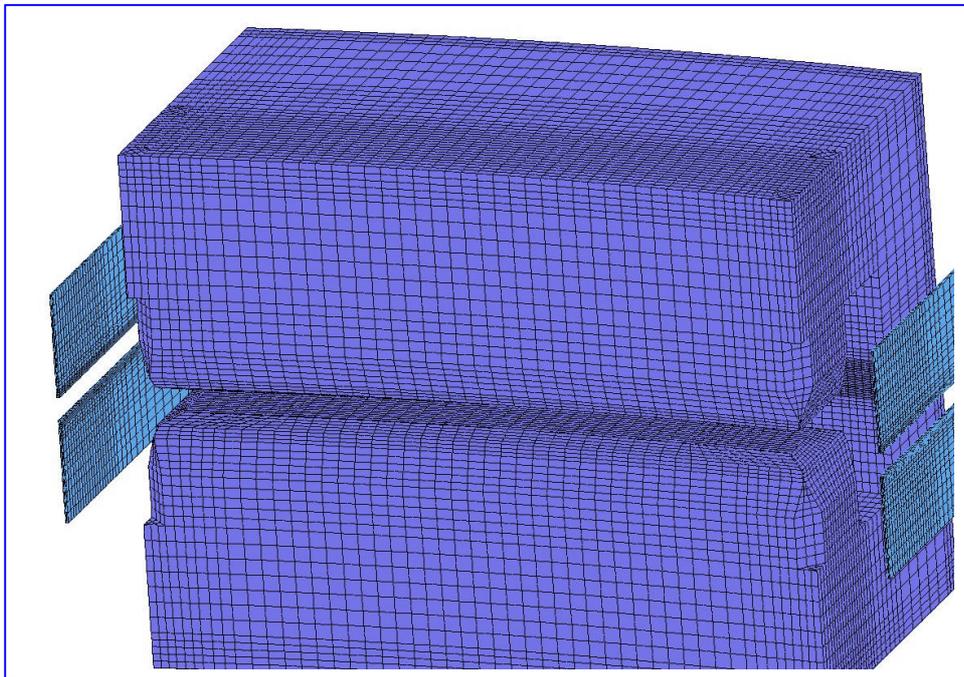
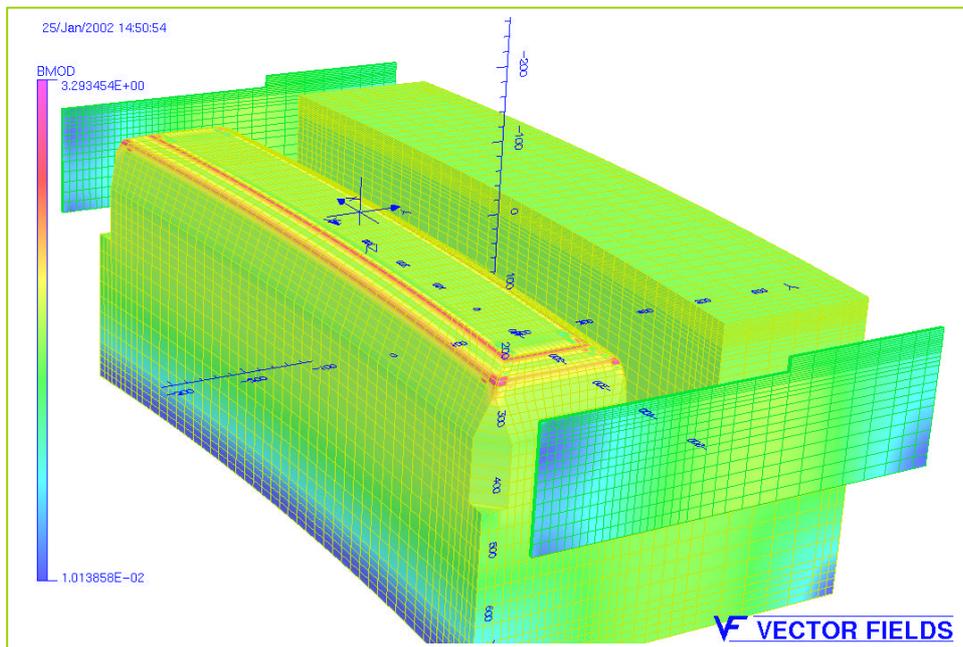


Figure 18: Modèle réalisé avec OPERA-3D



## V° -REPRISE DE L'OPTIMISATION DE 1997-1998 REACTUALISATION DES RESULTATS

Le redémarrage des études sur les aimants de SOLEIL débute par la remise à jour des résultats obtenus pour le dipôle de l'anneau [5,6]. On distingue le modèle dit "de référence" qui correspond au dipôle avec un chanfrein d'extrémité identique au chanfrein latéral, et équipé d'une plaque de garde de 5 mm d'épaisseur, et le modèle dit "optimisé" qui dispose d'un chanfrein d'extrémité ajusté de manière à obtenir la longueur magnétique égale à la longueur fer, et une plaque de garde de 6 mm.

### 1° - Le cas dit "de référence" à 1.57 Tesla :

Dans le tableau 2, on rappelle les caractéristiques du dipôle pour l'APD pour lequel le champ maximal était de 1.57 T. Le cas de référence a été recalculé à 1.57 Tesla avec la nouvelle version de TOSCA. Le chanfrein antisaturant autour du pôle est représenté sur la figure 19. Les résultats de l'APD ont été retrouvés à l'exception de la longueur magnétique comme indiqué au chapitre II.

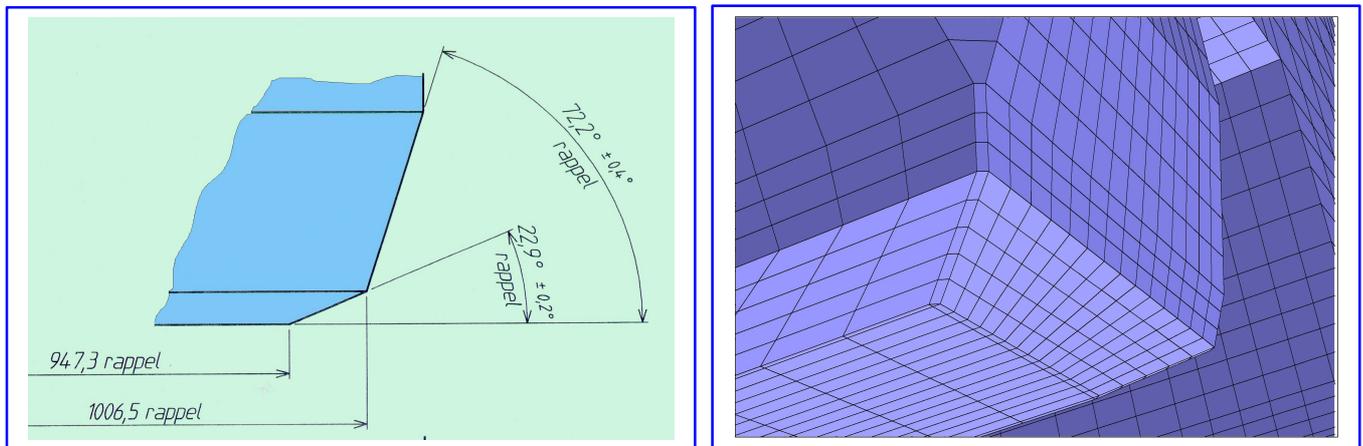


Figure 19: Chanfrein d'extrémité du modèle de référence

Rayon de courbure	5360 mm
Zone utile	± 20 mm
Entrefers	37 mm
Valeurs nominales du champ	1.0 T; 1.56 T
Tolérance sur l'intégrale de champ	$5 \cdot 10^{-4}$
Longueur magnétique	1052.434 mm
Longueur de fer	1050.7 mm
Ampères-tours maximaux	27500. At
Densité de courant maximale	3.1 A/mm <sup>2</sup>
Champ maximum	1.7 T

Tableau 2 : Caractéristiques du dipôle

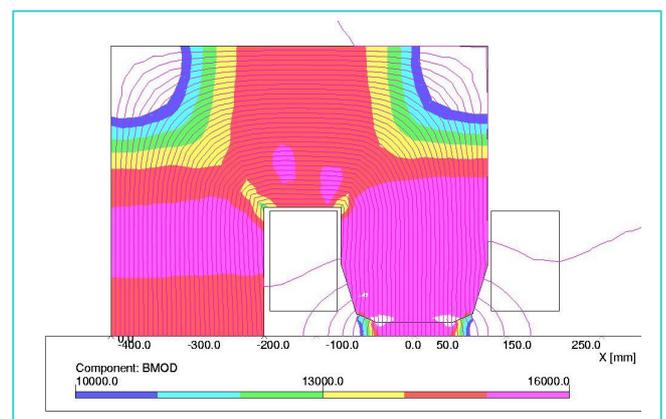


Figure 20 : Optimisation 2D de la section courante

**DIPOLE ANNEAU DE SOLEIL**

Resultats obtenus sur le cas de référence à 1.57 Tesla  
 Plaque de garde de 5 mm d'épaisseur  
 Chanfrein d'extrémité identique au chanfrein latéral

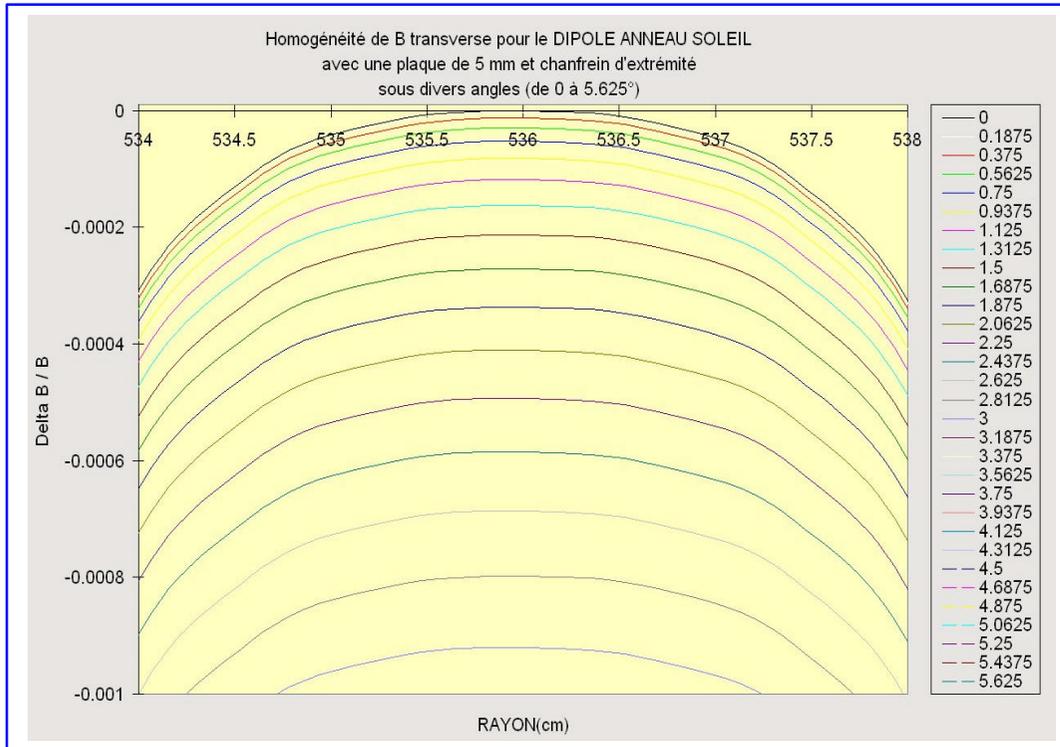
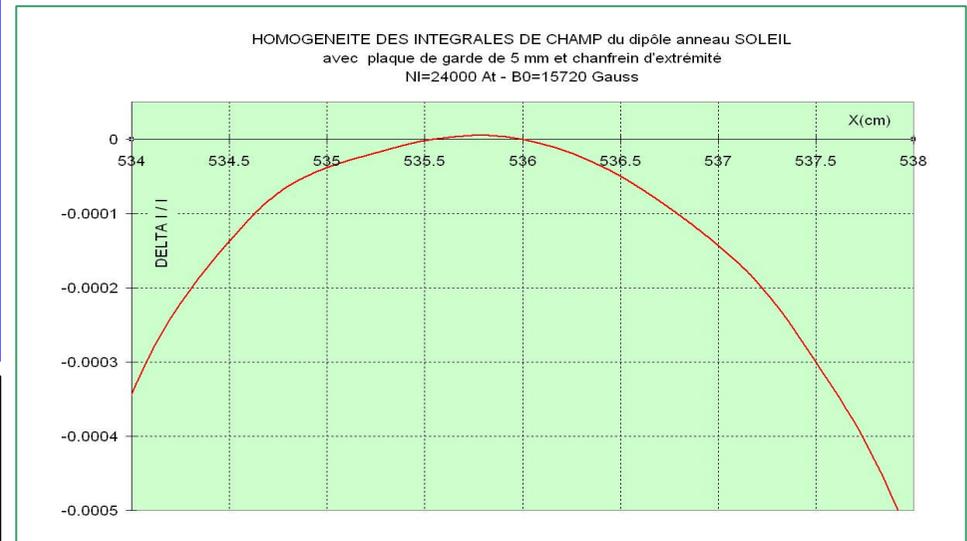
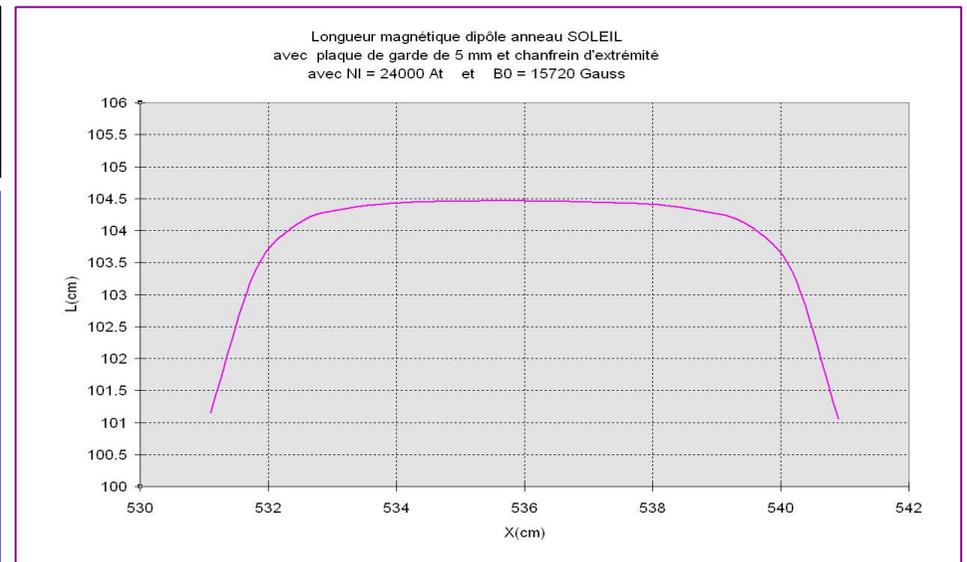


Figure 21: Evolution du plateau de champ ▲

Figure 22: Longueur magnétique  $L_m$  ▶ ▲

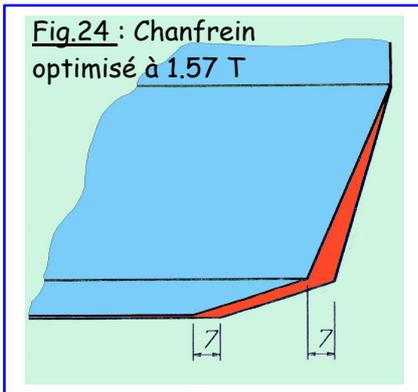
Figure 23: Homogénéité des intégrales de champ dans la section courante ▶





## 2° - Le cas dit "optimisé" à 1.57 Tesla :

Le profil d'extrémité du cas dit "optimisé" consiste en un décalage de 7 mm de 2 points du chanfrein latéral comme illustré sur la figure 24. La plaque de garde a une épaisseur de 6 mm.

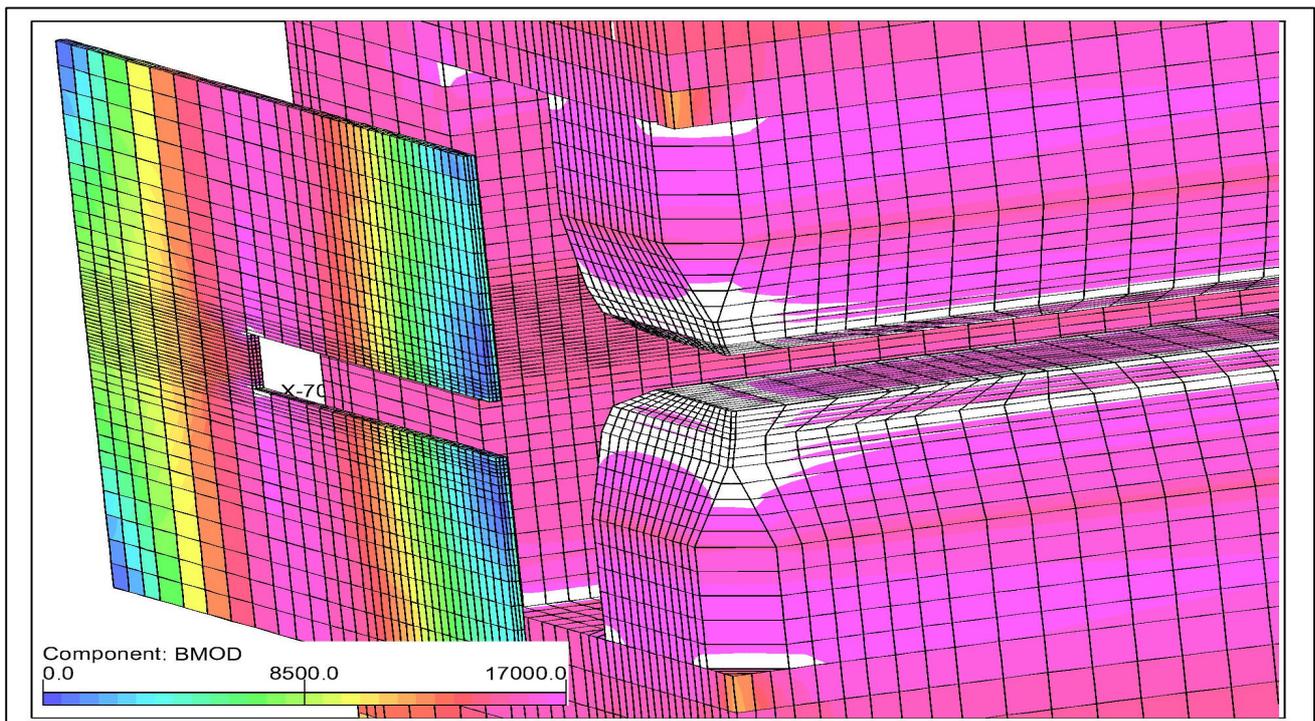


L'optimisation de l'épaisseur de cette plaque, sa position par rapport à l'aimant, et le décalage du chanfrein avaient permis d'obtenir la longueur magnétique égale à la longueur fer. La longueur magnétique théorique est  $L_{th}=1052.434$  mm et la simulation donnait une longueur magnétique  $L_m=1052.84$  mm pour une longueur fer  $L_{Fe}=1050.7$  mm. Ci dessous dans le tableau 3, un extrait des résultats d'optimisation du dipôle pour 1.57 Tesla. La réactualisation des calculs donne maintenant  $L_m=1055.05$  mm. L'homogénéité intégrale est inchangée.

	$\int Bdl$ (Gauss.cm)	$B_0$ (Gauss)	$L_{mag}$ (mm)
Chanfrein d'origine sans plaque de garde	824686.66	15726.3	1048.7993
Plaque 5 mm	818037.42	15720.3	1040.7402
Plaque 6 mm et chanfrein + 7 mm (1 point)	823049.62	15710.0	1044.5455
Plaque 6 mm et chanfrein + 16 mm	826372.77	15697.2	1052.8919
Plaque 6 mm et chanfrein + 7 mm (2 points)	826003.76	15690.9	1052.8443

▲ Tableau 3 : Optimisation pour l'APD SOLEIL 1998

▼ Figure 25 : Le dipôle optimisé à 1.57 Tesla



### DIPOLE ANNEAU DE SOLEIL

Resultats obtenus sur le cas dit "optimisé" à 1.57 Tesla

Plaque de garde de 6 mm d'épaisseur

Chanfrein d'extrémité décalé de 7 mm par rapport au chanfrein latéral

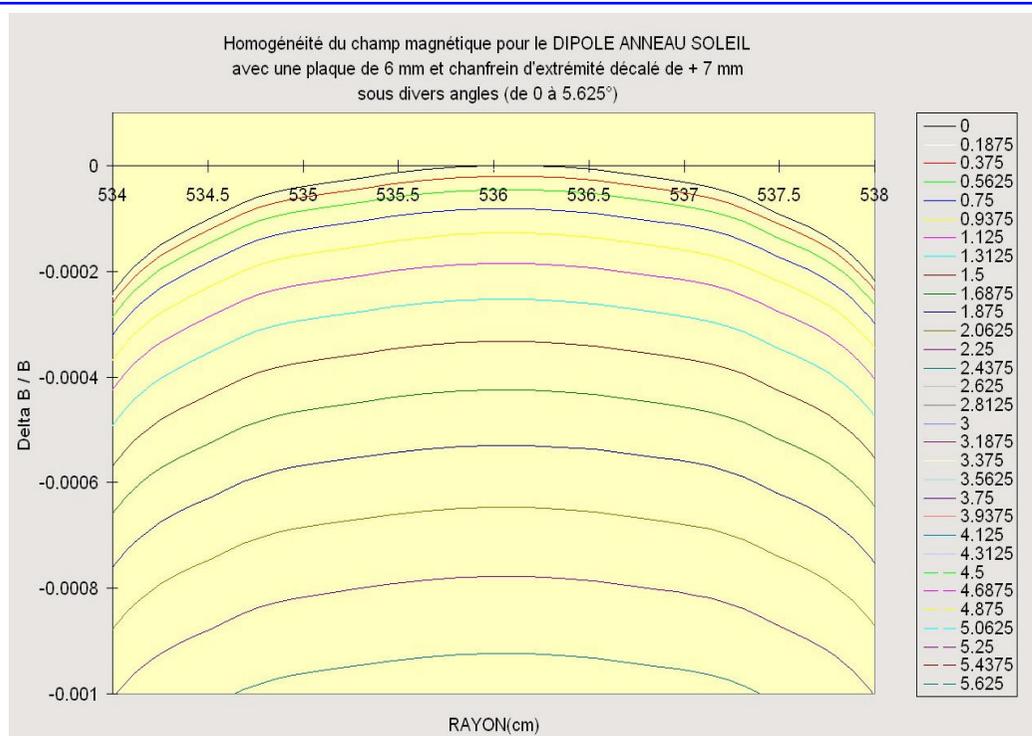
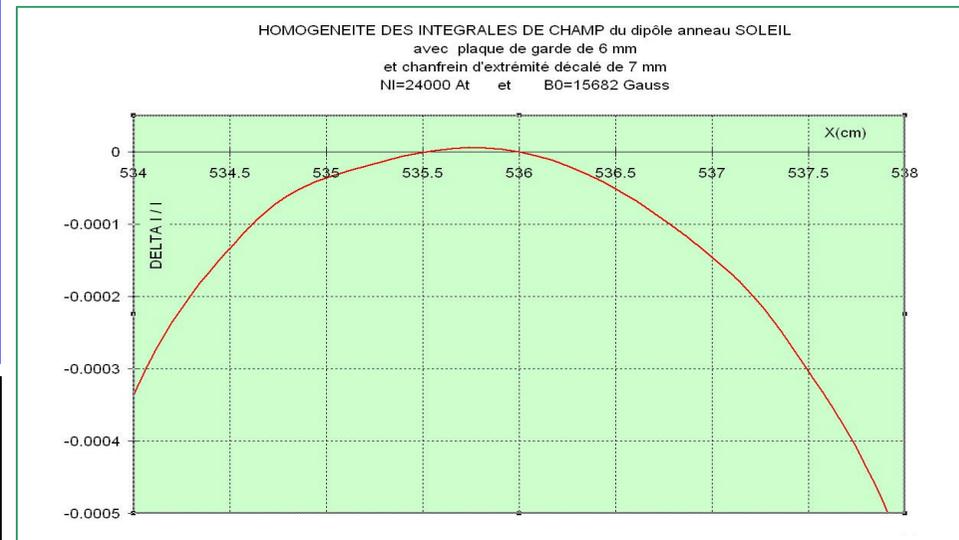
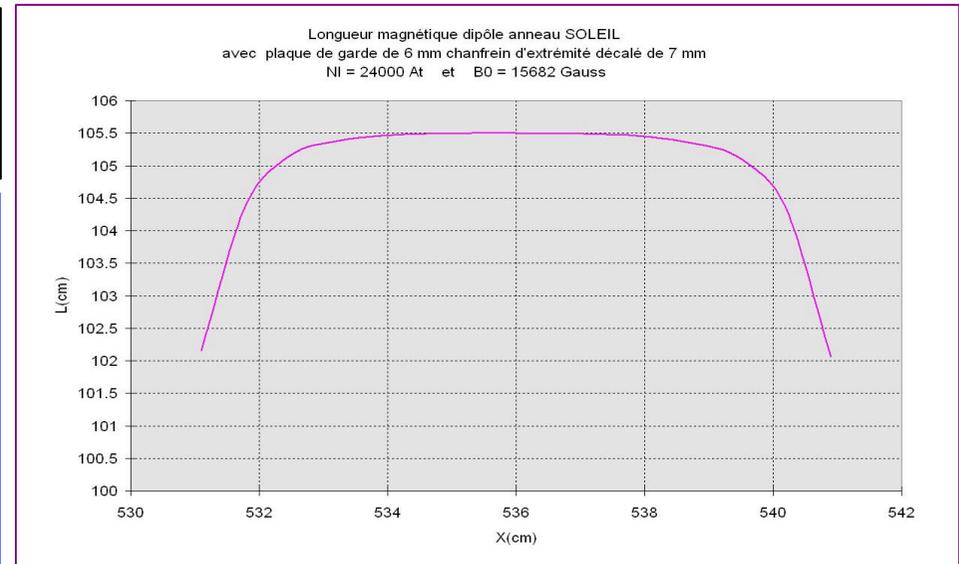


Figure 26: Evolution du plateau de champ ▲

Figure 27: Longueur magnétique  $L_m$  ▶ ▲

Figure 28: Homogénéité des intégrales de champ dans la section courante ▶

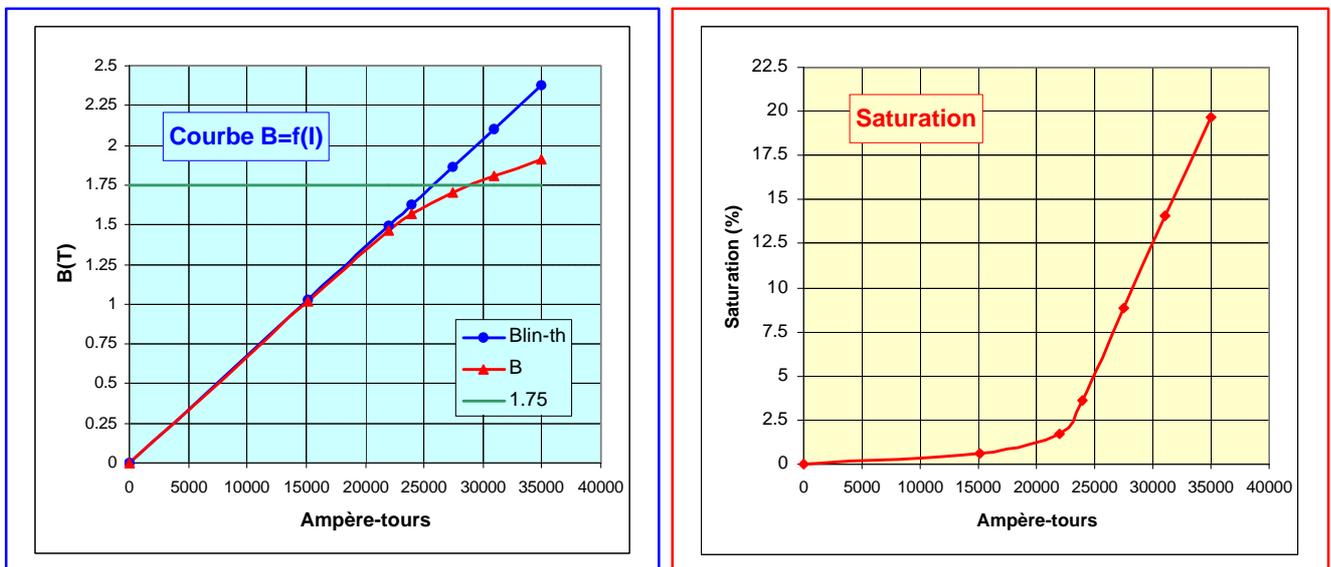




## VI° - LA MACHINE SOLEIL EN 2002

### FONCTIONNEMENT A ENERGIE FIXE DE 2.75 GeV

La principale modification de la machine, du point de vue du magnétisme, est l'augmentation de l'énergie à 2.75 GeV. Dans le cadre de l'APD de 1998, le dipôle était optimisé pour une énergie maximale de 2.5 GeV, soit un champ maximum de 1.57 Tesla. L'aimant fonctionnait en limite de la zone linéaire de la courbe de perméabilité. Pour l'énergie nominale de 2.75 GeV, l'aimant devra monter à une induction de 1.71 Tesla, et pour le cyclage à 1.75 Tesla; les effets de saturation du circuit magnétique ne seront plus négligeables (cf. Fig. 29). Nous présentons ici les mêmes cas du dipôle qu'au chapitre précédent pour 1.71 Tesla, et on s'intéresse aux dégradations des performances induites par la saturation essentiellement.



Figures 29 : Effet de saturation pour un fonctionnement nominal du dipôle à 1.71 Tesla

On observe que, pour un champ de 1.71 Tesla, la saturation atteint 8.8%, la saturation étant définie par le rapport  $(B_l - B_{nl})/B_l$  où  $B_l$  est le champ obtenu pour un comportement linéaire de l'aimant, et  $B_{nl}$  le champ réel dû à la non linéarité. Lorsqu'on monte à 1.75 Tesla on arrive à 12.5 % de saturation. Cet effet aura une conséquence importante pour le dimensionnement des alimentations et le coût d'exploitation si on adopte définitivement cette configuration.

### 1° - Le cas dit "de référence" à 1.71 Tesla :

L'effet sur l'homogénéité des intégrales n'est pas dramatique. On perd seulement  $0.5 \cdot 10^{-4}$  sur les bords de la zone utile à  $\pm 20$  mm (cf. Fig. 32). La longueur magnétique au centre passe de 1044.7 mm à 1042.6 mm (cf. Fig. 31). On voit également que le champ chute plus vite longitudinalement (cf. Fig. 30).

### DIPOLE ANNEAU DE SOLEIL

Resultats obtenus sur le cas de référence à 1.71 Tesla  
Plaque de garde de 5 mm d'épaisseur  
Chanfrein d'extrémité identique au chanfrein latéral

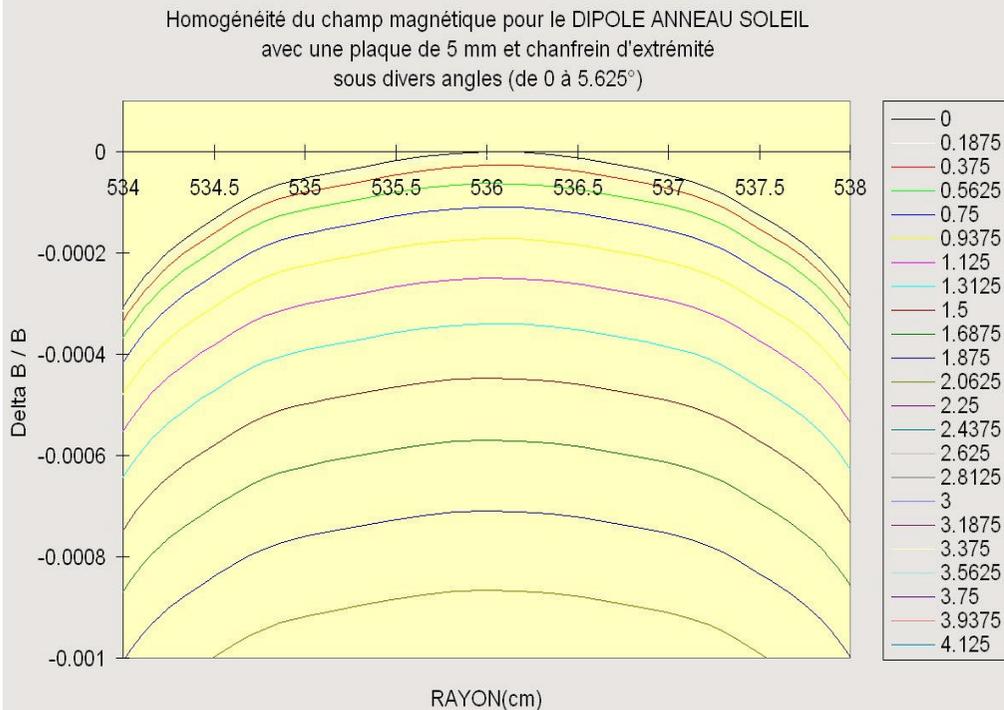
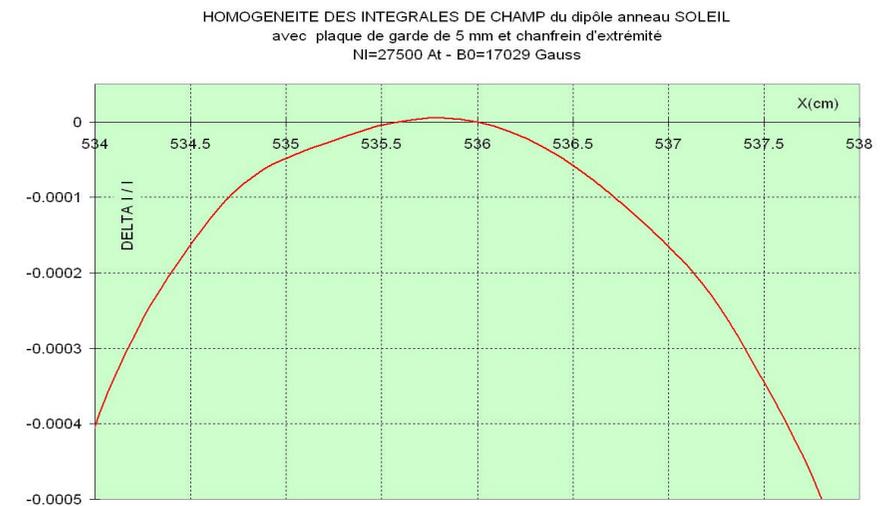
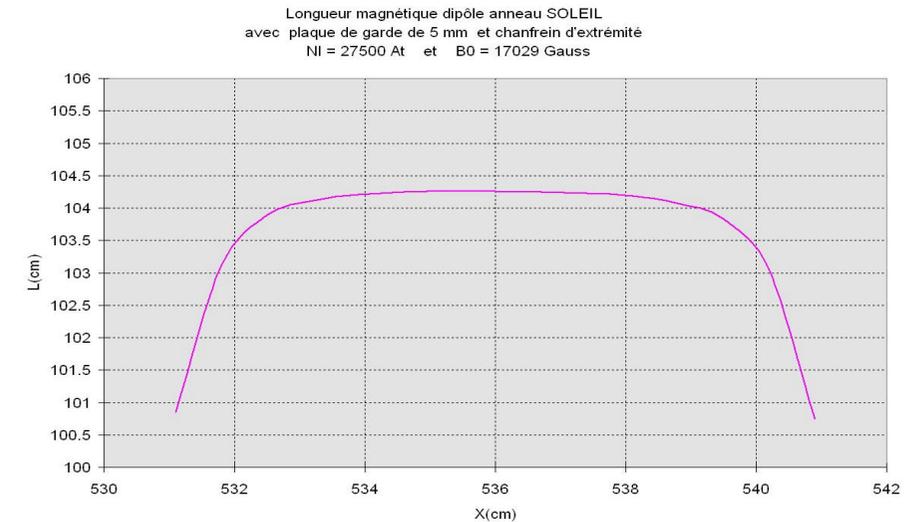


Figure 30: Evolution du plateau de champ ▲

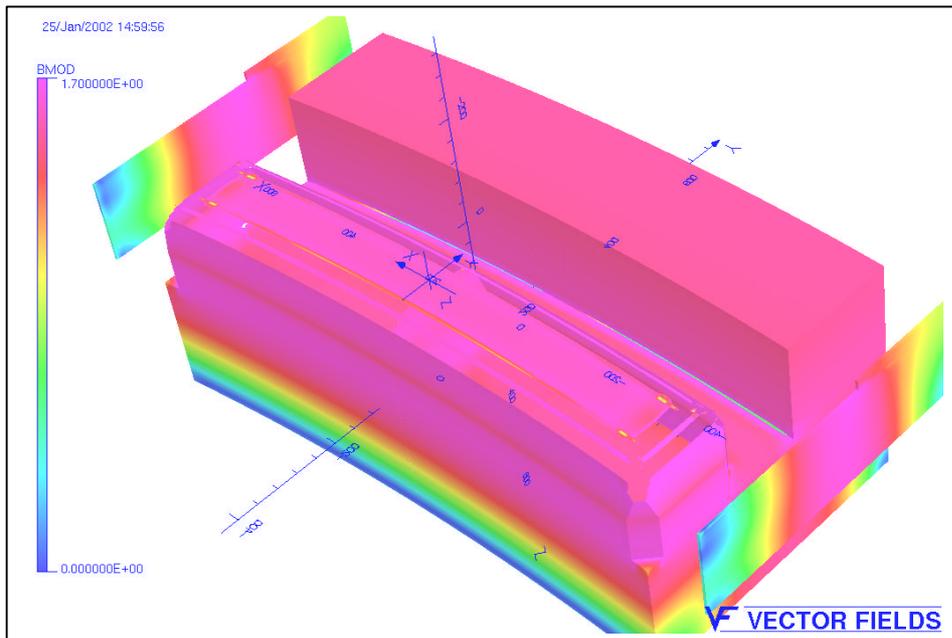
Figure 31: Longueur magnétique  $L_m$  ▶ ▲

Figure 32: Homogénéité des intégrales de champ dans la section courante ▶



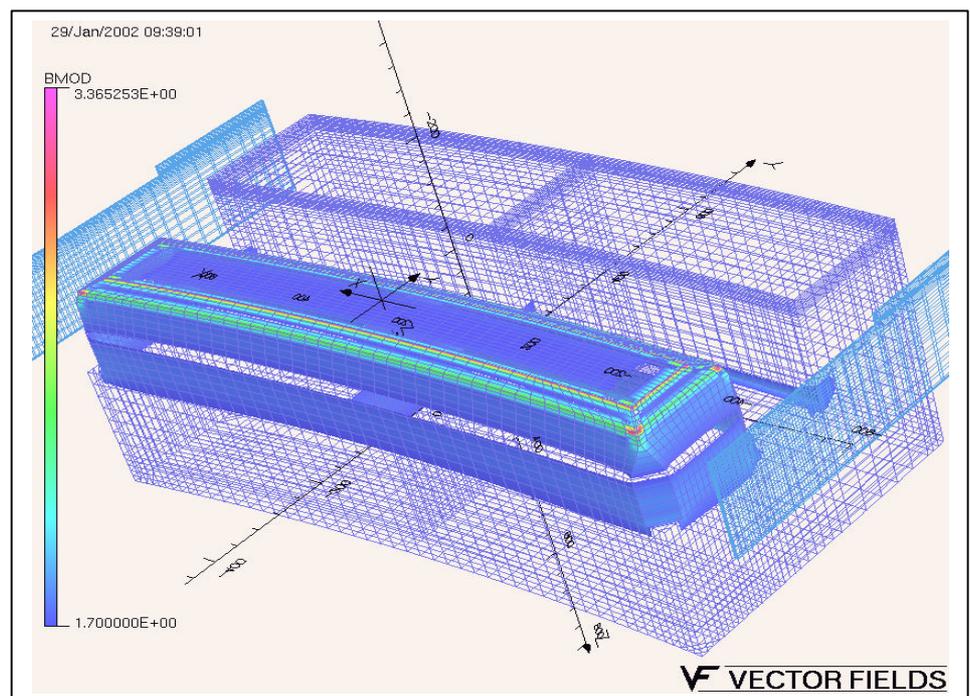
## 2° - Le cas dit "optimisé" à 1.71 Tesla :

L'homogénéité des intégrales reste dans la tolérance dans la zone de  $\pm 20$  mm (cf. Fig. 37). La longueur magnétique au centre diminue de 1055.05 mm à **1052.22 mm** (cf. Fig. 36) pour une longueur magnétique théorique de **1052.434 mm**. Là encore, le champ chute plus vite longitudinalement (cf. Fig. 35). Ci-Dessous (Fig. 33 & 34), on visualise le module du champ magnétique dans l'aimant.



**Figure 33 :**  
Module du champ  
magnétique entre  
0 et 1.71 Tesla

**Figure 34 :**  
Module du champ  
magnétique  
au delà de  
1.71 Tesla



### DIPOLE ANNEAU DE SOLEIL

Resultats obtenus sur le cas dit "optimisé" à 1.71 Tesla

Plaque de garde de 6 mm d'épaisseur

Chanfrein d'extrémité décalé de 7 mm par rapport au chanfrein latéral

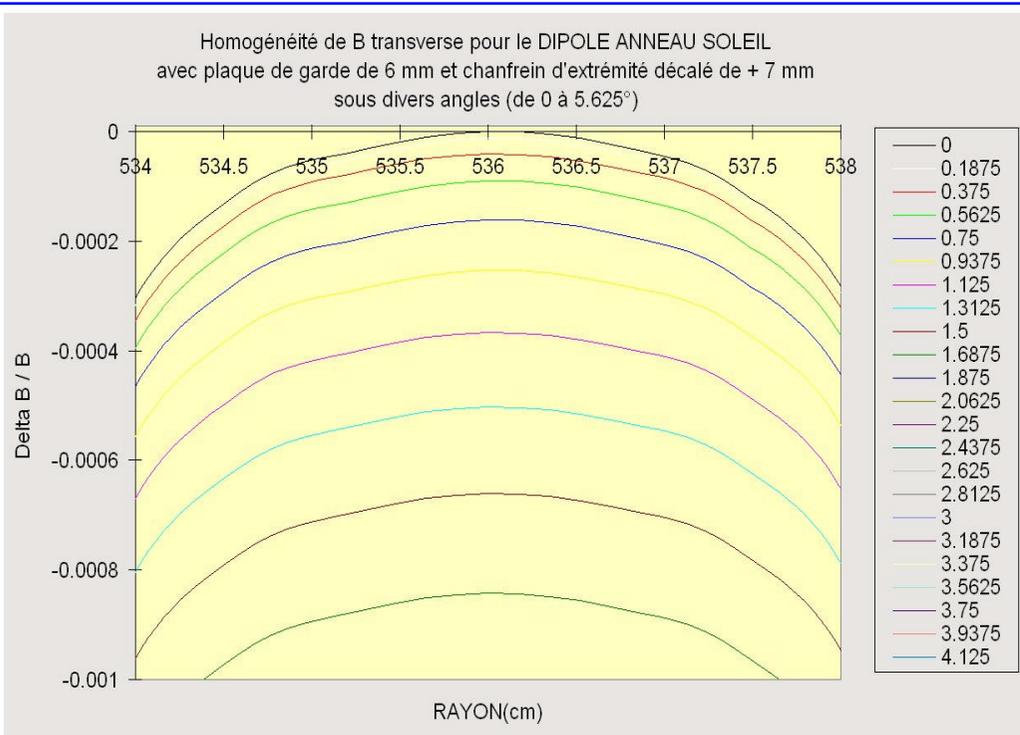
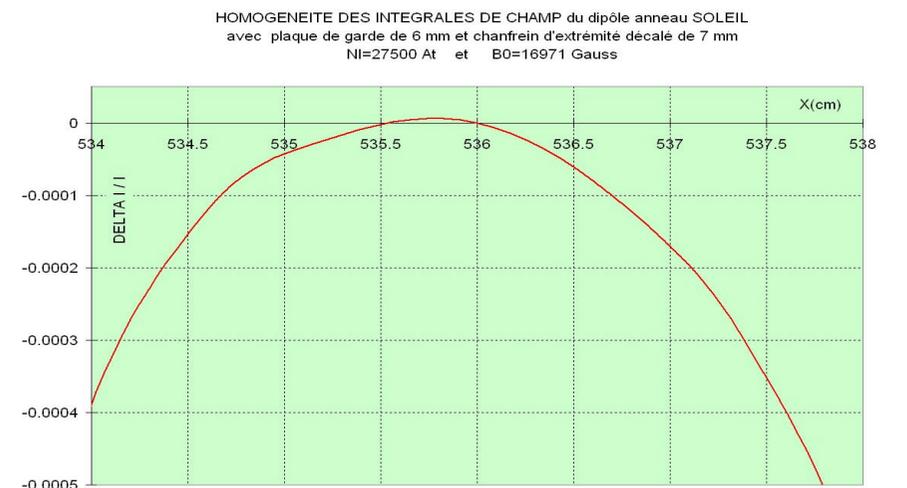
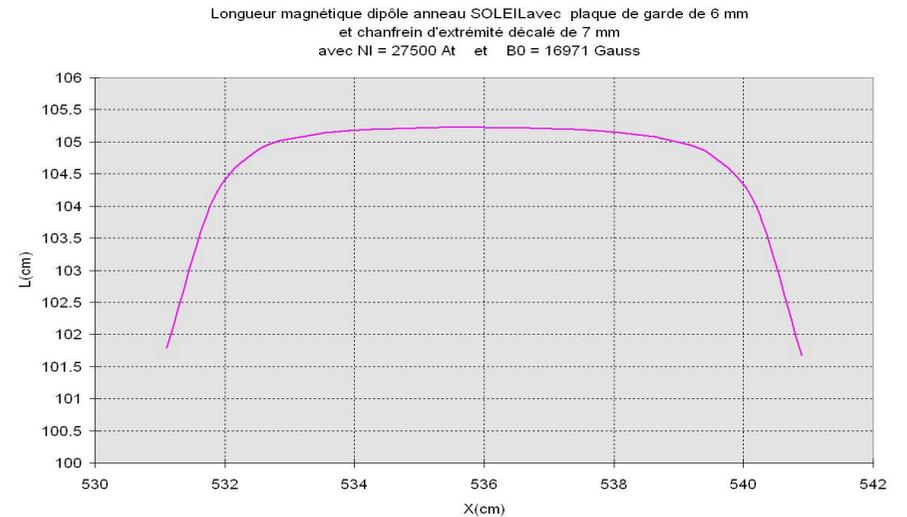


Figure 35: Evolution du plateau de champ ▲

Figure 36: Longueur magnétique  $L_m$  ▶ ▲

Figure 37: Homogénéité des intégrales de champ dans la section courante ▶



## VII° -AFFINEMENT DES SIMULATIONS

### 1° - Influence du maillage et modification du matériau :

Le passage à 1.71 Tesla a mis en évidence le problème important de la saturation. Jusqu'à présent, les simulations avaient été effectuées en supposant un aimant massif, et dont la courbe de perméabilité du matériau magnétique correspondait à l'ARMCO™. Nous avons donc affiné les simulations en prenant compte d'un coefficient de foisonnement de 0.98 (packing factor) pour l'empilement des tôles, et en utilisant la courbe de perméabilité correspondant à celle des aimants de l'ESRF. Nous avons aussi ajusté les Ampères-tours pour avoir exactement 1.71 Tesla. De plus, nous avons raffiné le maillage en passant d'un modèle de 356351 nœuds et 191072 éléments, à un modèle de 639452 nœuds et 321720 éléments. Ce nouveau maillage permet une meilleure définition du champ dans la zone située à l'extrémité du dipôle, sous le chanfrein. On voit très nettement sur la figure 38 l'effet de cette amélioration. Les courbes représentent le champ magnétique le long de la trajectoire centrale et à  $\pm 20$  mm depuis le centre de l'aimant ( $X=0$ ) jusqu'à l'extrémité de l'aimant ( $X=-50$  cm). Il n'existe plus de bosse de champ due au maillage.

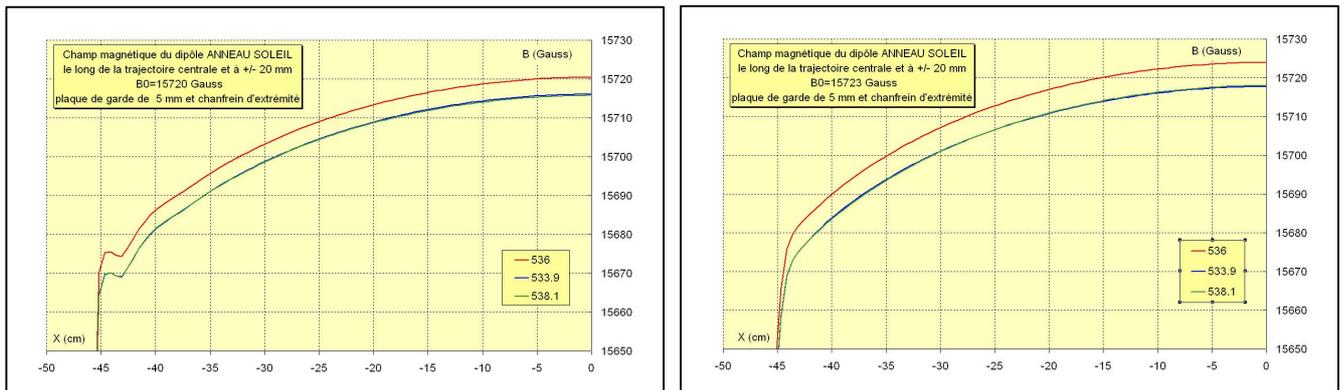


Figure 38: Effet de l'amélioration du maillage sur le calcul du champ en sortie d'aimant

La courbe de perméabilité des aimants de l'ESRF est représentée figure 39 et comparée à celle de l'ARMCO™, ainsi que la courbe utilisée par défaut pour TOSCA (magnet.bh).

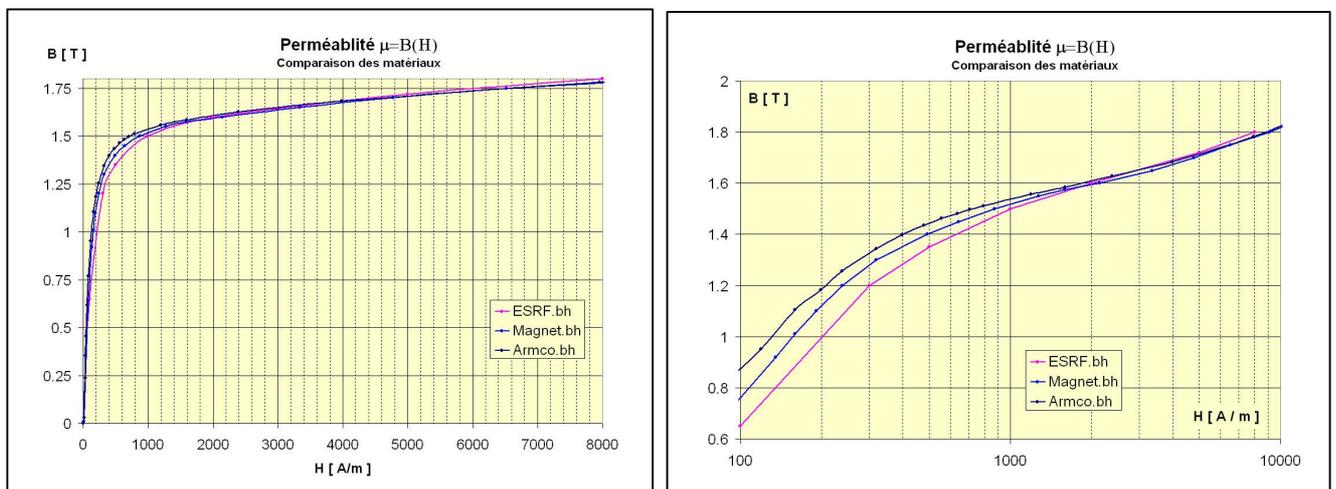


Figure 39: Courbes de perméabilité

Lorsqu'on cumule toutes les corrections, on voit que l'homogénéité des intégrales dans la zone utile passe de l'intervalle  $[-4. \cdot 10^{-4}, -6.5 \cdot 10^{-4}]$  pour un aimant massif en ARMCO, à  $[-5.5. \cdot 10^{-4}, -8.5 \cdot 10^{-4}]$  pour le même aimant, feuilleté, et dont le matériau correspond à celui des aimants de l'ESRF (Fig. 40a).

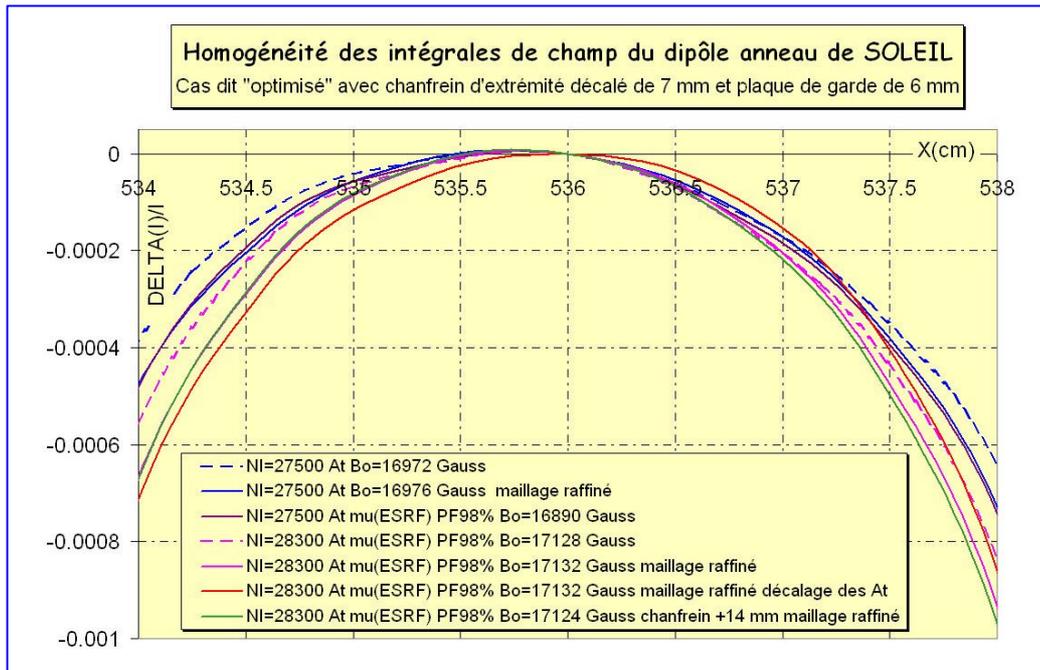


Figure 40a : Evolution de l'homogénéité des intégrales de champ suivant les cas étudiés

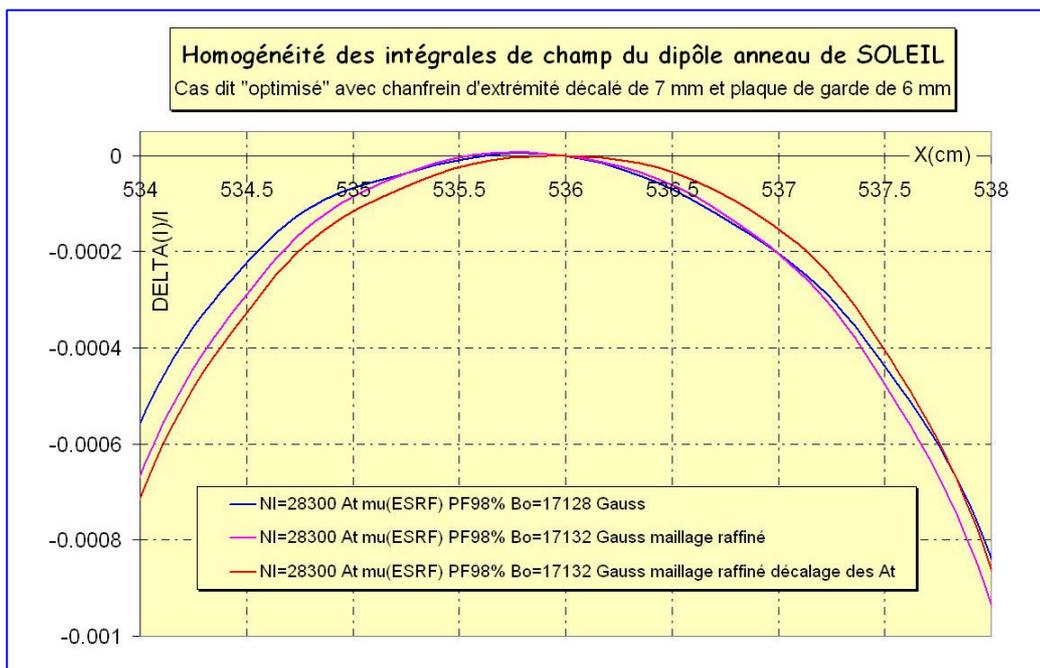


Figure 40b : Evolution de l'homogénéité des intégrales de champ à 1.71 Tesla

En ce qui concerne les longueurs magnétiques, on trace les courbes correspondant à la longueur magnétique en fonction de la position dans la section transverse (Fig. 41). On voit apparaître une petite diminution ( $<0.5$  mm) due au raffinement du maillage (courbes bleue et bleue pointillée). Une diminution non négligeable est due à l'augmentation des ampères-tours correspondant au réajustement du niveau de champ à 1.71 Tesla (courbes marron et rose pointillée). Elle est de 2.35 mm au centre. Enfin la prise en compte du feuilletage de l'aimant entraîne une diminution de 7 mm (courbes bleue pointillée et marron). On perd donc au total de l'ordre de 10 mm.

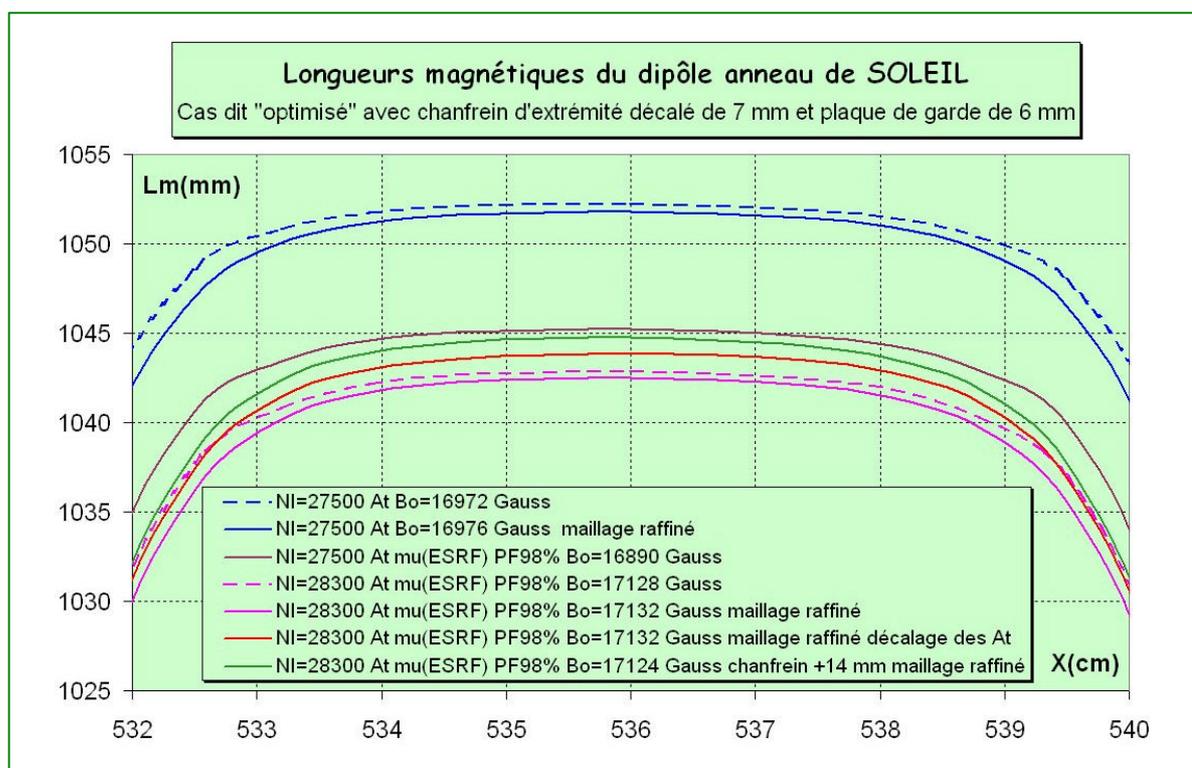


Figure 41 : Evolution de la longueur magnétique suivant les cas étudiés

## 2° - Influence des connexions :

Nous nous sommes également intéressé à l'effet des connexions de bobines sur la longueur magnétique. Le conducteur utilisé dans la modélisation est composé d'une suite de barres et d'arcs de manière à reconstituer une bobine de type "racetrack" avec les 2 grands côtés courbes. Nous avons modifié la répartition de la densité de courant d'un côté de l'aimant sur la barre d'extrémité (cf. Fig. 42), de manière à simuler le changement de couche côté intérieur, et les connexions côté extérieur.

Cette correction consiste à superposer au conducteur initial, un conducteur de section correspondant à  $1/6^{\text{ème}}$  de la section originale (équivalent à une rangée de conducteur) avec un nombre d'Ampères-tours égal à  $-NI/12$ , et un conducteur extérieur identique mais avec un nombre d'Ampères-tours égal à  $+NI/12$  ( $NI/12$ =la moitié des d'Ampères-tours pour une rangée de conducteurs)

Les résultats de cette simulation sont représentés sur les figures 40b et 41. On observe un effet non symétrique du au fait que l'aimant est à faces parallèles. On assiste globalement à un recentrage de la zone utile. La longueur magnétique augmente de  $1.3\text{mm}/2=0.65\text{ mm}$  côté connexions.

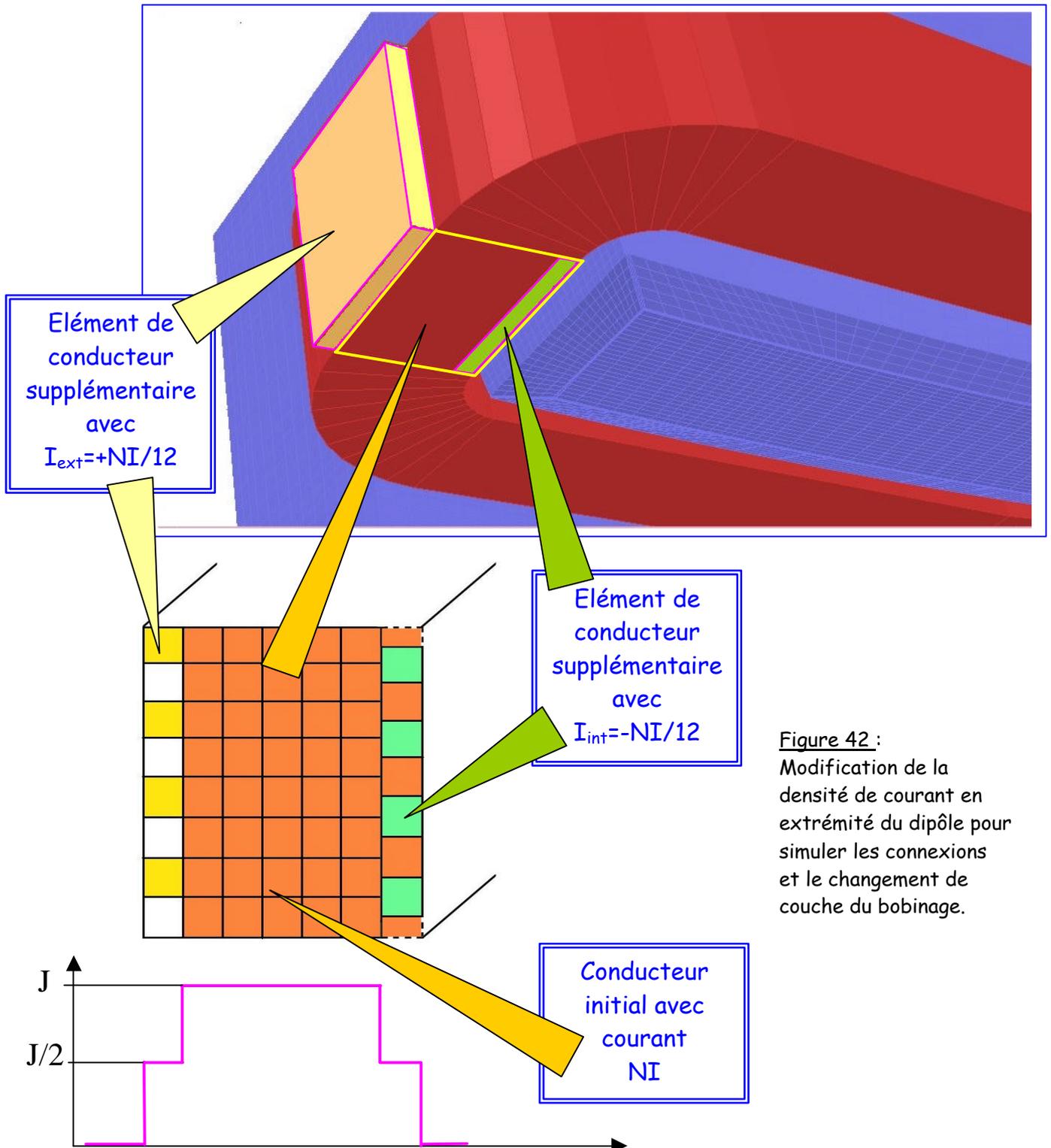


Figure 42 :  
Modification de la densité de courant en extrémité du dipôle pour simuler les connexions et le changement de couche du bobinage.

### 3° - Allongement de la longueur magnétique :

Au final, en prenant en compte tous les effets, on voit que la longueur magnétique a énormément chuté. Nous avons essayé d'y remédier en retouchant à nouveau au profil d'extrémité.

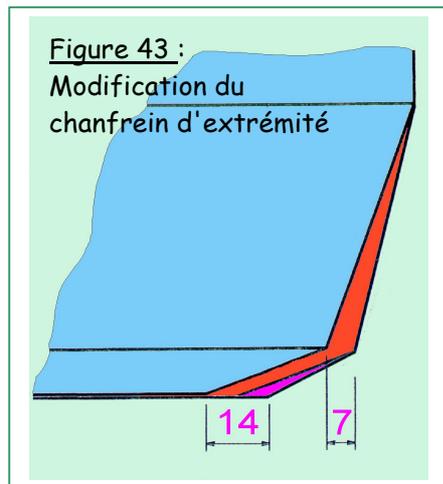


Figure 43 :  
Modification du  
chanfrein d'extrémité

Pour cela nous avons décalé un seul point de 7 mm, comme indiqué sur la figure 43, et regardé l'effet produit. On voit d'après la figure 41, que la longueur magnétique au centre est passée de 1042.49 mm (courbe rose pleine) à 1044.74 mm (courbe verte). On peut vérifier sur la figure 40a, que cela n'affecte pas l'homogénéité des intégrales dans la section transverse.

Cependant, le gain sur la longueur magnétique est faible comparé à l'extension du pôle :  $2.25 \text{ mm}/2=1.125 \text{ mm}$  par demi aimant pour un décalage de 7 mm.

Pour parvenir à une longueur magnétique de 1052.434 mm (longueur théorique), il nous faudrait gagner encore 10 mm, soit 5 mm par demi aimant. En supposant le même gain par mm de chanfrein décalé, il nous faudrait encore allonger la partie droite du pôle de 31 mm, sans tenir compte des effets de saturation.

Cela revient à dire qu'on supprimerait complètement la première pente du chanfrein qui était prévue à l'origine pour justement limiter ces effets de saturation. Il n'est donc pas envisageable d'ajuster complètement la longueur magnétique à la longueur magnétique théorique de cette manière.

### 4° - Longueur magnétique effective - Calcul de trajectoires :

La longueur magnétique est calculée à partir des cartes de champ données par TOSCA avec la méthode décrite au chapitre III-2-d. Elle correspond à un trajet qui n'est jamais celui suivi par une particule. Cependant, l'environnement OPERA-3D/POST nous permet, à partir du calcul du champ magnétique, de calculer des trajectoires de particules.

Nous avons donc calculé la longueur magnétique effective vue par un électron en procédant de la manière suivante :

- Nous avons utilisé le cas du dipôle de référence à 1.57 Tesla.
- L'électron a une énergie de 2.5 GeV et est lancé à partir du centre de l'aimant.
- Sa trajectoire dans l'aimant et dans le champ de fuite est stockée sous la forme d'un fichier de coordonnées de points (X,Y,Z) avec 2000 points pour 1 mètre de longueur.
- Par l'intermédiaire d'un fichier de commandes (.comi), on relit ces coordonnées et on calcule le champ en chaque point.
- Le fichier contenant les coordonnées et les valeurs de champ est transféré sous EXCEL où on intègre le champ sur tout le parcours de l'électron.

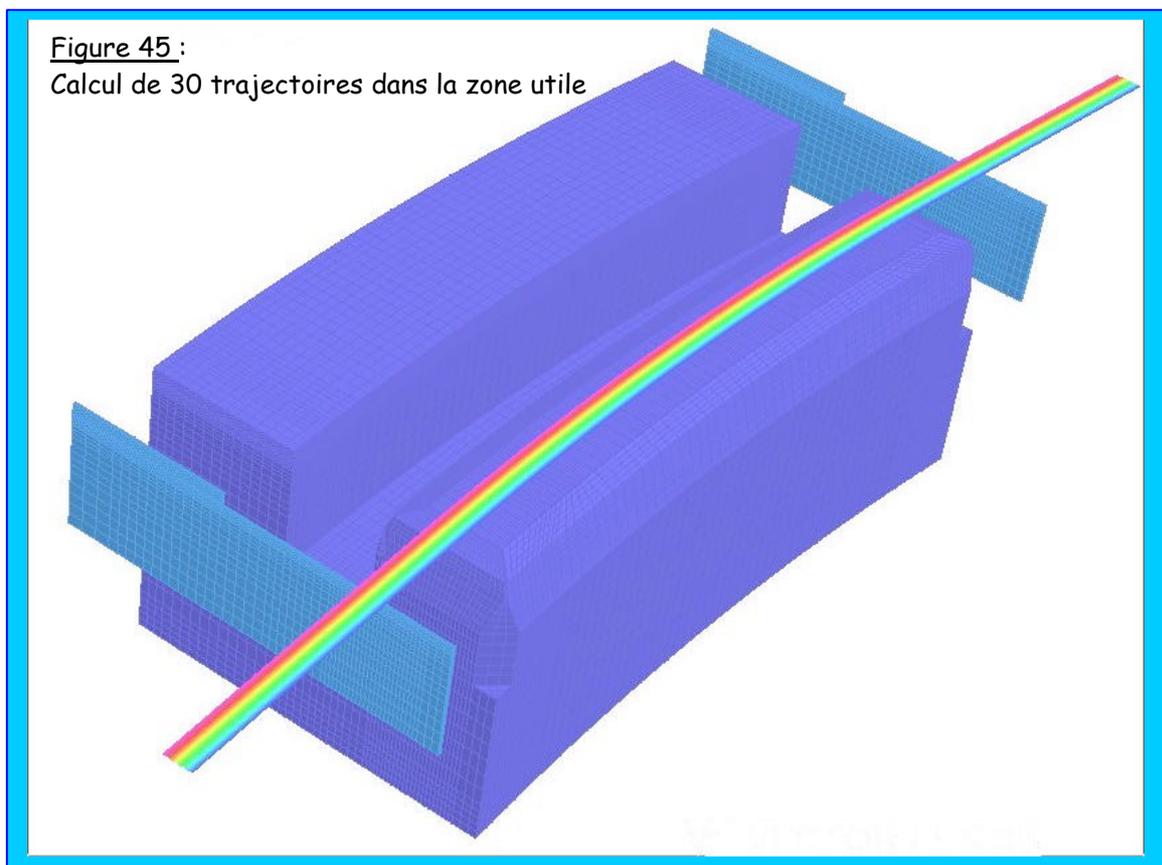
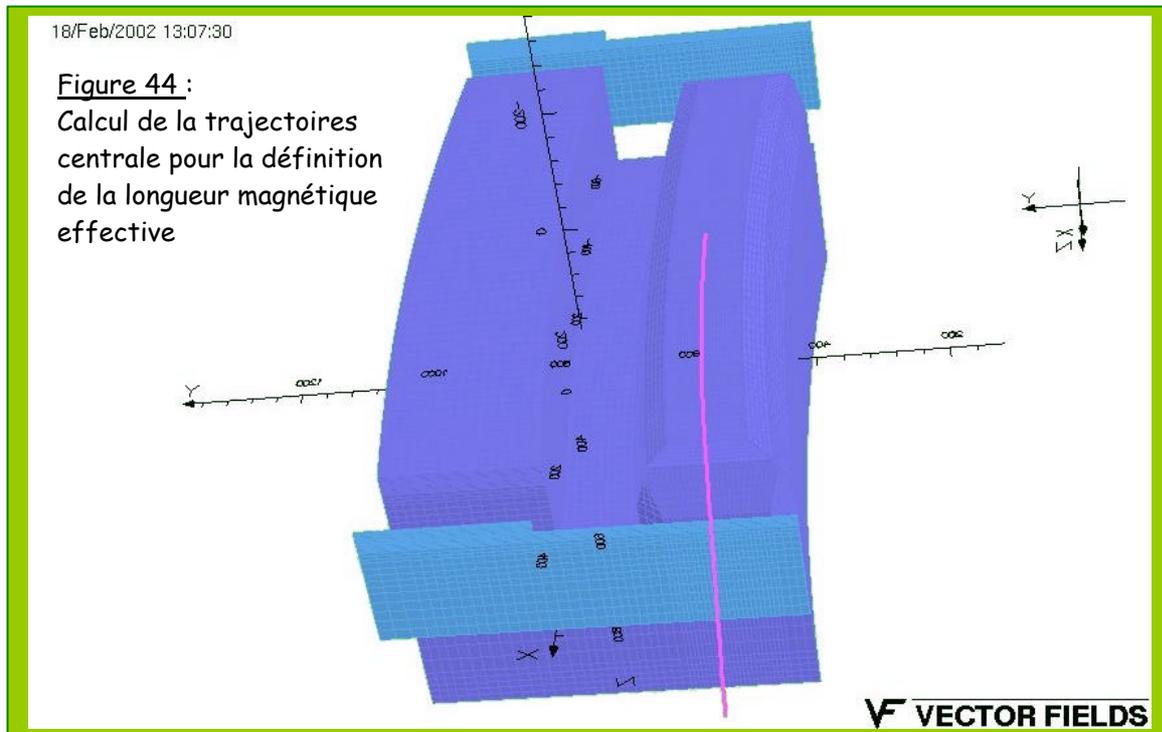
Les résultats obtenus sont les suivants :

$L_m$  calculée sur  $R=5360 \text{ mm}$  prolongé par sa tangente en sortie d'aimant : **1044.63178 mm**

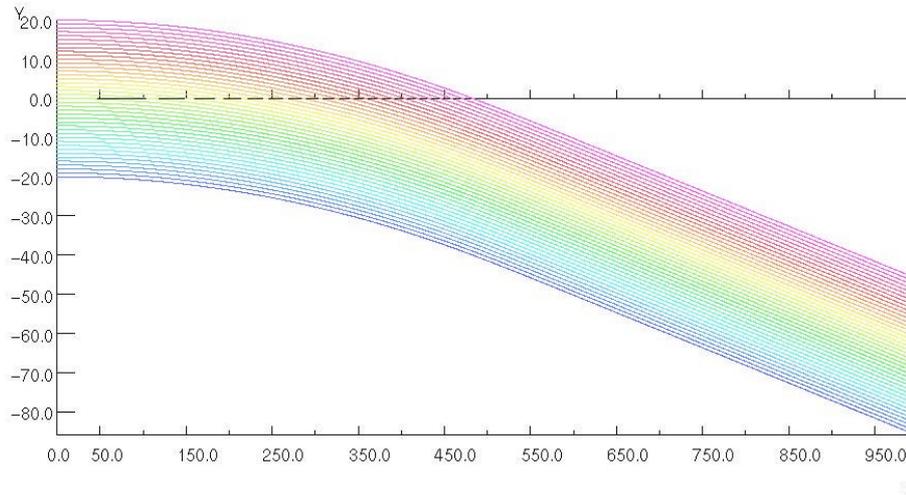
$L_m$  calculée sur la trajectoire de l'électron : **1043.69868 mm**

Soit :  $DL_m=0.9330 \text{ mm}$ ,  $DL_m/L_m=9.10^{-4}$

Le calcul des trajectoires est représenté sur les figures suivantes.



19/Feb/2002 16:15:42



**Figure 45 :**  
Représentation des trajectoires  
dans le plan médian en (XY)

**VF VECTOR FIELDS**

Les conditions initiales du calcul 3D des 30 trajectoires correspondent à des électrons de 2.5 GeV démarrant au centre de l'aimant ( $X=0$ ) répartis entre  $\pm 20$  mm, avec une direction perpendiculaire au plan de symétrie de l'aimant (YZ). On pourrait recalculer, comme pour la trajectoire centrale, les longueurs magnétiques correspondantes, et retracer l'homogénéité des intégrales dans la section transverse de cette manière. C'est une procédure très longue qui n'a pas été envisagée.

Il pourrait par contre être intéressant de calculer un faisceau "réaliste" traversant tout le dipôle, dont les conditions ( $x,y,z$ ) seraient données par les théoriciens faisceau.

## VIII° - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les simulations approfondies effectuées sur le dipôle de l'anneau montrent que l'on approche le  $1.10^{-3}$  sur l'homogénéité des intégrales dans la zone utile.

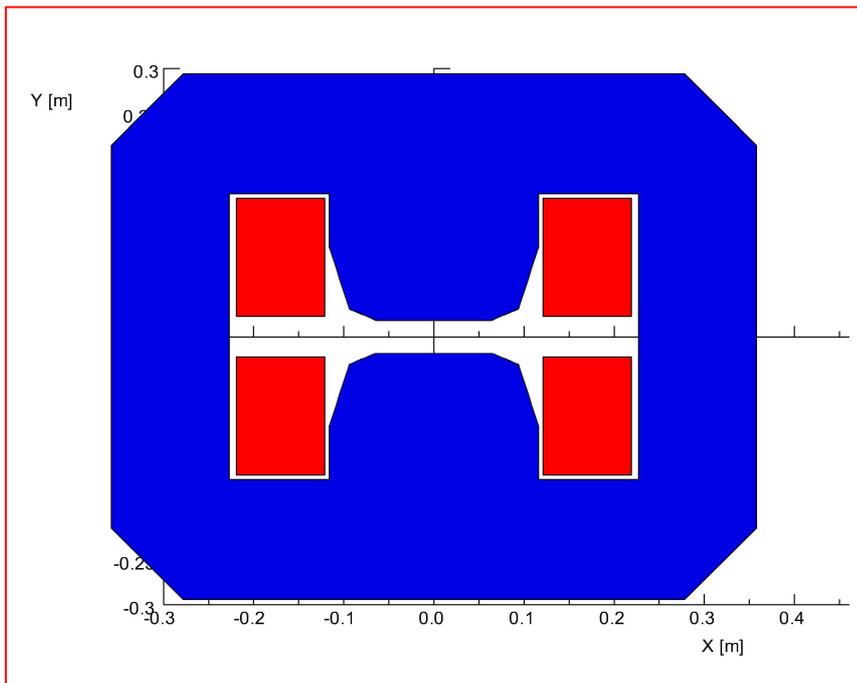
Le critère longueur magnétique égale à longueur fer n'est plus assuré.

L'implantation des connexions à une extrémité du dipôle entraîne une dissymétrie de la longueur magnétique qui s'accroît de l'ordre de 0.65 mm côté connexions.

La saturation est importante pour un fonctionnement à 1.71 Tesla, de l'ordre de 10 %, même si cela affecte peu l'homogénéité dans la zone utile, l'effet a une conséquence importante sur la définition des alimentations et sur le coût d'exploitation.

Afin de réduire la saturation dans la culasse, il est envisagé d'étudier une version de dipôle en H, et droit, avec un élargissement du pôle pour intégrer la flèche ( $\pm 12.9$  mm).

Une étude préliminaire en 2D a montré une amélioration du point de vue de la saturation, et aussi un gain très appréciable sur le poids de l'aimant.



### CARACTERISTIQUES :

#### Bobines

Section **120x98 mm<sup>2</sup>**

Champ maximal **1.76 T**

Ampères-tours **27500 At**

#### Pôles :

Largeur basse **130 mm**

Largeur haute **230 mm**

Chanfrein antisaturant

#### Culasse :

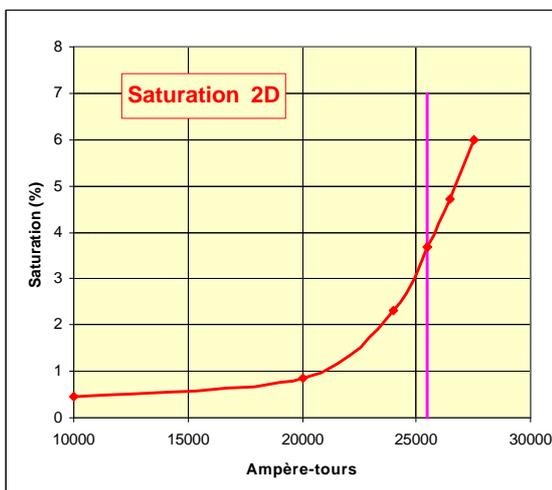
Demi-hauteur **294 mm**

Largeur retour **132 mm**

Demi largeur hors-tout **358 mm**

### Figure 46 :

Caractéristiques du dipôle en H pour l'anneau de SOLEIL



Pour un nombre d'ampères-tours  $NI=27500$  At, on obtenait  $B_0=1.702$  Tesla pour le C, alors que pour le H on a  $B_0=1.761$  Tesla, soit un gain de 3.5 %. Pour obtenir 1.71 Tesla il faut maintenant 26460 At. L'effet de saturation 2D est représenté figure 47.

Le poids du fer pour le dipôle en H, évalué à partir de la surface de la section de la tôle, est de 2.6 tonnes, alors qu'il était de 3.5 tonnes pour le C.

Figure 47 : Courbe de saturation 2D du dipôle en H

Sur la figure 48, on représente le champ magnétique dans l'aimant. Sur la figure 49, on compare l'homogénéité de champ dans une zone utile de  $\pm 30$  mm pour deux géométries : le dipôle en H avec la même largeur de pôle que le dipôle en C (courbe rouge pleine), et le dipôle en H doté d'un pôle élargi à  $\pm 116$  mm au lieu de  $\pm 106$  mm afin d'intégrer la flèche.

Une étude complémentaire en 3D du dipôle en H sera bientôt programmée.

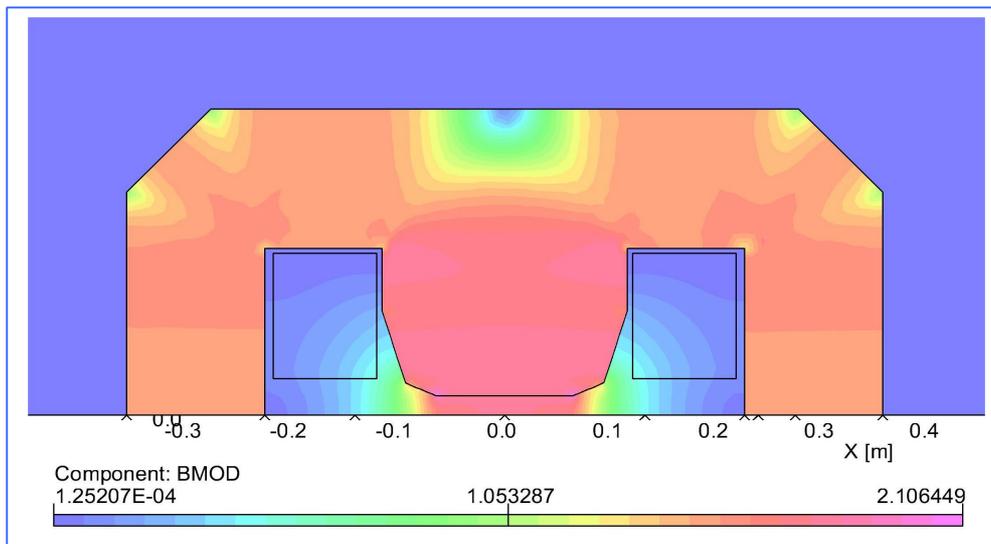


Figure 48 : Iso valeurs de champ dans l'aimant en 2D

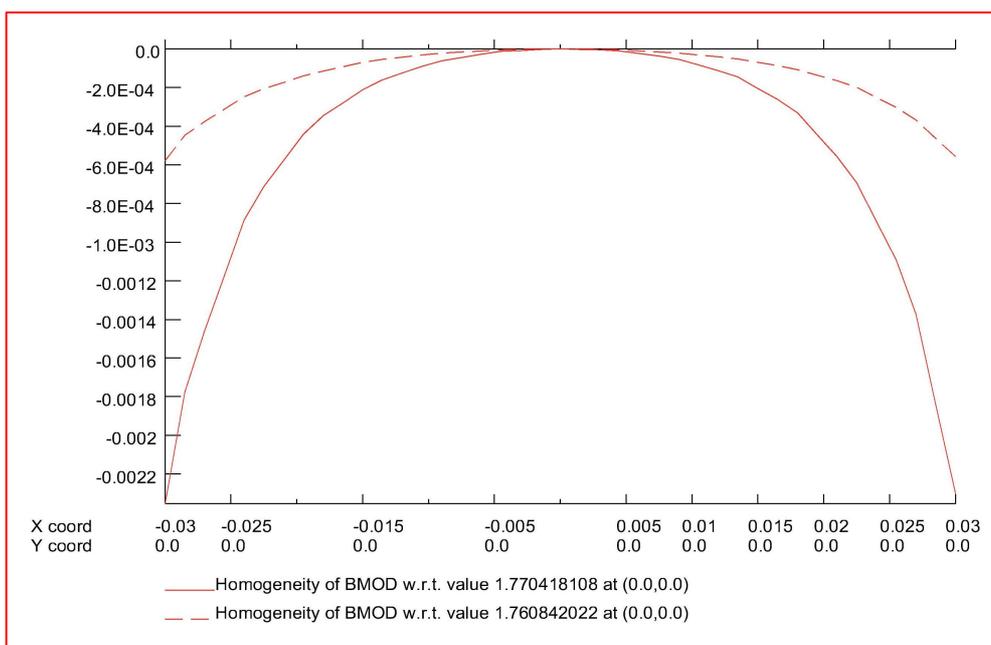


Figure 49 : Homogénéité de champ  $\Delta B/B_0$  du dipôle en H en 2D



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**DSM - DAPNIA**

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Service des Accélérateurs  
de Cryogénie et de Magnétisme

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE - CEA/SACLAY  
DSM/DAPNIA/SACM bât. 701 – L'Orme des Merisiers  
91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX



O. DELFERRIERE – D. DE MENEZES

## REFERENCES

- [1] "SOLEIL – Rapport d'Avant Projet Détaillé", juin 1999
- [2] OPERA-3D © Vector Fields Limited, Oxford, England
- [3] O. Delferrière, D. De Ménezès, R. Duperrier " 3D Simulations of accelerator conventional magnets with end pole defined by an analytical approach controlling multipoles and magnetic length", IEEE TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol. 10, n° 1, march 2000 (1388)
- [4] E. Durand - Electrostatique Tome II, Problèmes généraux conducteurs (419)
- [5] O. Delferrière, J. P. Pénicaud, "Le dipôle de l'anneau de SOLEIL", Rapport interne DSM/DAPNIA/SEA/SOLEIL-98/07
- [6] O. Delferrière, "Etat d'avancement des calculs 3D pour les aimants de SOLEIL", Rapport interne DSM/DAPNIA/SEA/SOLEIL-98/26