

CONFIGURATION MAGNETIQUE OCTUPOLAIRE A BASE DE COURONNES D'AIMANTS PERMANENTS POUR LA SOURCE D'ION H⁻ @2.45GHZ

Olivier DELFERRIERE, Olivier TUSKE

Afin d'améliorer le rendement en ions H⁻ de la source à 2.45 GHz de Saclay, une configuration multipolaire en aimants permanents a été étudiée pour remplacer les bobines solénoïdales actuelles. Elle est basée sur le même principe que celle des couronnes d'aimants réalisées pour la source D⁺ de SPIRAL2[1]. Seule l'orientation de la magnétisation des 24 aimants est modifiée de manière à obtenir la configuration multipolaire qui semble la mieux adaptée à la géométrie actuelle de la source. Nous analyserons les différentes solutions hexapolaire, octupolaire et dodécapolaire réalisables avec 24 aimants, et nous préciserons les choix qui nous ont amenés à retenir la solution octupolaire. Cette réalisation constitue une première étape vers la future source H⁻ à 10 GHz.

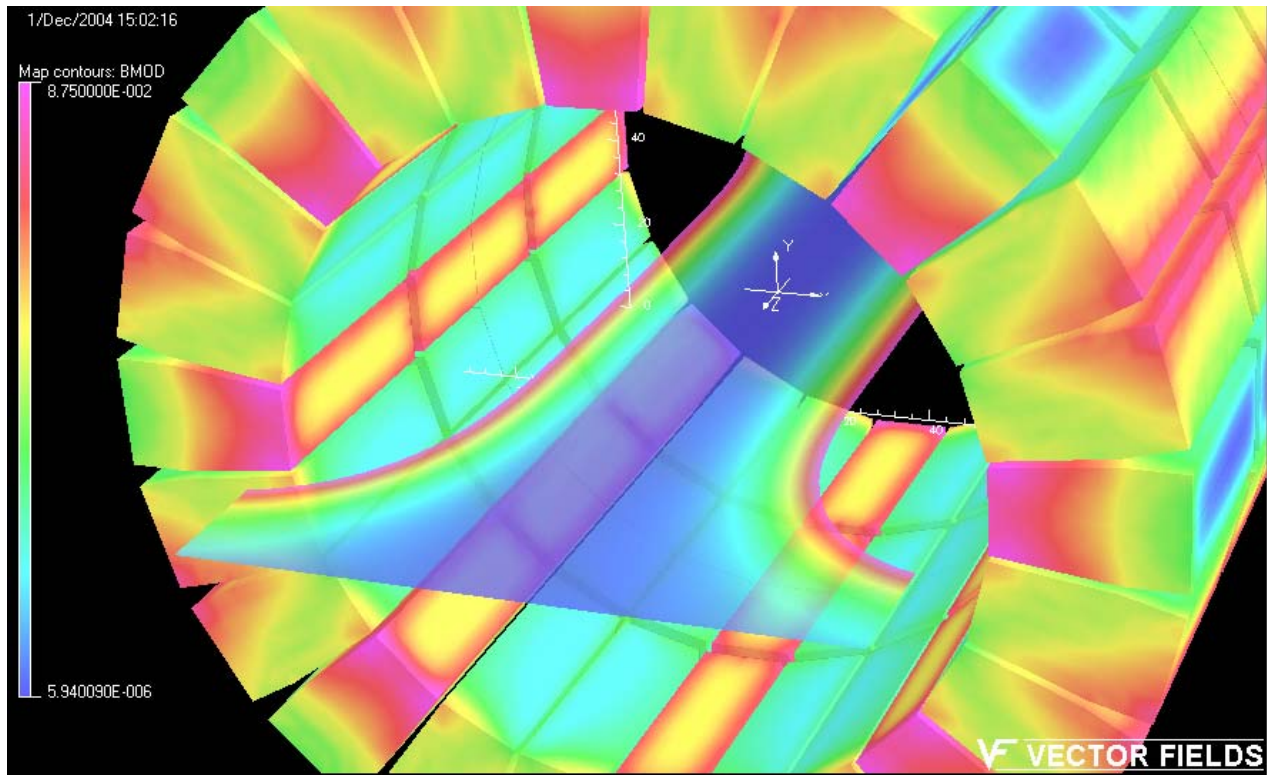


Fig. 1 : Champ magnétique généré par un ensemble de 3 couronnes d'aimants permanents de 60 mm de longueur en configuration octupolaire
Carte de champ dans un plan radial de 0 à 875 Gauss

Les différentes configurations magnétiques

Nous avons pris comme base de départ la géométrie des couronnes d'aimants permanents de la source d'ions D⁺ de Spiral2 dont les dimensions sont compatibles avec celle de la source d'ion H⁻.

Du point de vue mécanique, il suffirait donc simplement de remplacer les bobines solénoïdales par les couronnes d'aimants avec le même principe de montage.

Nous avons donc effectué notre étude avec des couronnes de 24 aimants mais dont l'orientation magnétique a été modifiée pour réaliser un multipôle (Fig2). L'orientation suit celle définie par K. Halbach [2][3]. La longueur d'une couronne a été fixée à 60 mm pour l'étude. Les dimensions principales sont données ci dessous, ainsi que les périodes d'aimantation des 3 configurations étudiées.

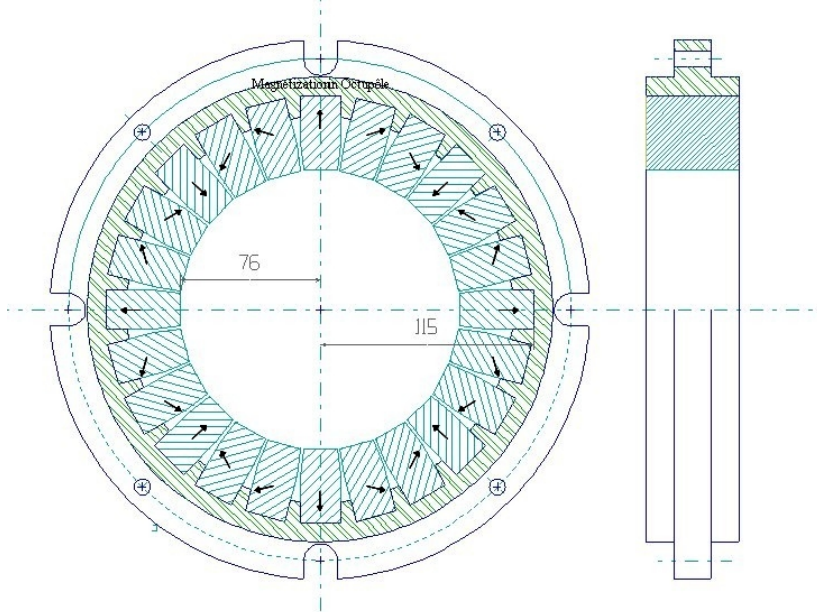


Fig. 2 :
Configuration multipolaire basée sur la géométrie des couronnes d'aimants de la source D⁺ de SPIRAL2.

Caractéristiques de la couronne :

Un tube central de 0.5mm d'épaisseur permet de contenir les aimants, réduisant ainsi le rayon interne à 75mm.

Nombre d'éléments	Rayon interne	Rayon externe	Longueur totale	Aimantation B _r
24	75 mm	115 mm	50 mm	1,24 T

Périodes des aimantations :

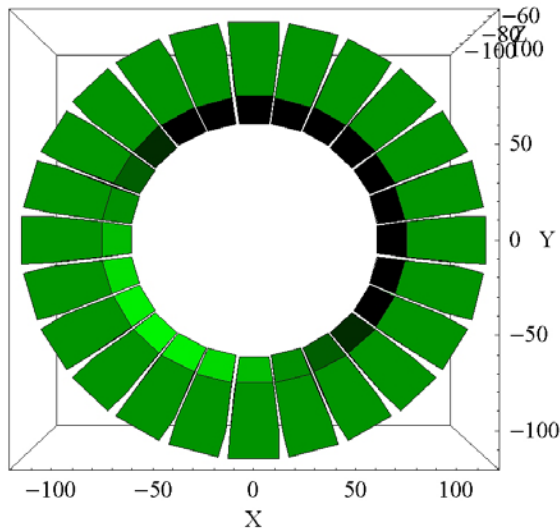
$\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{2} = \frac{7\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{3} = \frac{5\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6} = \frac{3\pi}{12}$
Dodécapôle	Octupôle	Hexapôle
Magnetization in Dodecapole	Magnetization in Octupole	Magnetization in Hexapole

Les codes de calcul utilisés

L'étude réalisée est une étude 3D. Elle doit nous permettre d'ajuster la zone de résonance dans un plan radial de manière à ce qu'elle se situe dans la chambre plasma, mais aussi de définir la longueur minimale du système compte tenu de la fermeture des lignes de champ aux extrémités.

Nous disposons de 2 codes de simulation pour notre étude :

- a - Le code RADIA [4]:



*Fig. 3 :
Simulation d'une couronne
d'aimants permanents en
configuration multipolaire
avec le code RADIA*

C'est un logiciel 3D dédié à la magnétostatique. Radia peut résoudre une large variété de problèmes avec des matériaux linéaires, non-linéaires, isotropiques et anisotropiques et aussi des structures à bobines. Il utilise la méthode des intégrales de frontière. Seuls les volumes sont définis, puis les caractéristiques des matériaux leur sont appliqués. RADIA permet de calculer de manière très précise les composantes intégrées des champs.

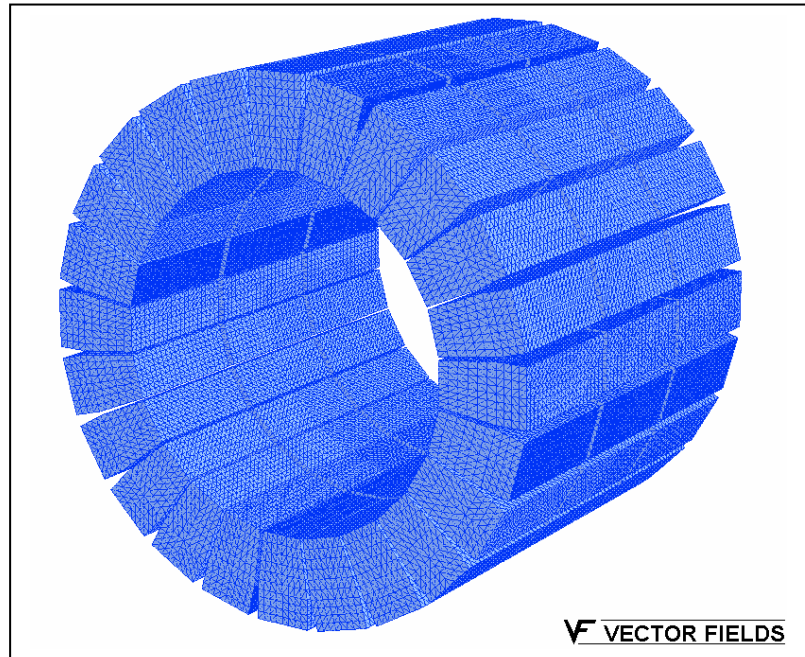
La paramétrisation des modèles ainsi que la visualisation se fait sous Mathematica®. Le calcul peut être très rapide et fournit une bonne précision de calcul.

- b - Le code TOSCA [5] :

C'est un code de simulation 3D pour l'électrostatique et la magnétostatique doté d'un environnement pour le pré et post processing (OPERA-3D). C'est le code de référence pour le calcul d'aimants d'accélérateurs de tous les types et de toutes géométries. Il permet lui aussi de simuler des problèmes non linéaires avec des matériaux anisotropiques. En particulier il peut traiter tout problème concernant les aimants permanents. Le programme incorpore l'état de l'art en ce qui concerne les algorithmes de calcul des champs électromagnétiques. Il est basé contrairement à RADIA sur la méthode des éléments finis, et dans ce cas il est indispensable de mailler toute la partie d'air entourant les différents matériaux du problème (fer, bobines, aimants...). La précision du calcul dépend directement de la discrétisation du modèle. Et le temps de calcul dépend directement du nombre d'éléments nécessaires à la constitution du modèle.

Il existe, au post-processing, un moyen de s'affranchir de la discrétisation du volume d'air dans lequel on veut étudier le champ. Le code dispose de la méthode intégrale, qui consiste, à partir de la magnétisation calculée à chaque nœud du matériau (fer, aimant permanent), à intégrer cette contribution sur l'ensemble du volume du matériau, afin d'évaluer le champ à la position étudiée. Cette option nécessite de charger toutes les symétries du problème, et le temps de calcul est prohibitif. Si le maillage est suffisamment fin, la méthode nodale suffit et c'est ce que l'on utilise en général.

Fig. 4 :
Simulation de 3 couronnes
d'aimants permanents en
configuration multipolaire
avec le code TOSCA



Recherche de la configuration magnétique idéale pour la source H⁻ @2.45GHz

Nous présentons ici les résultats obtenus avec TOSCA. Nous reviendrons ultérieurement sur la comparaison entre les 2 codes RADIA et TOSCA sur un cas précis.

La chambre plasma actuelle de la source a une section rectangulaire de dimension 72 mm par 34 mm. La structure solénoïdale actuelle à base de bobines a un diamètre intérieur cuivre de 200 mm de manière à s'insérer autour de la chambre rectangulaire, compte tenu des brides (Fig.5). Etant donné que le champ est constant radialement en première approximation et que le niveau de champ est ajustable, il est toujours possible de créer une zone de résonance dans la chambre.

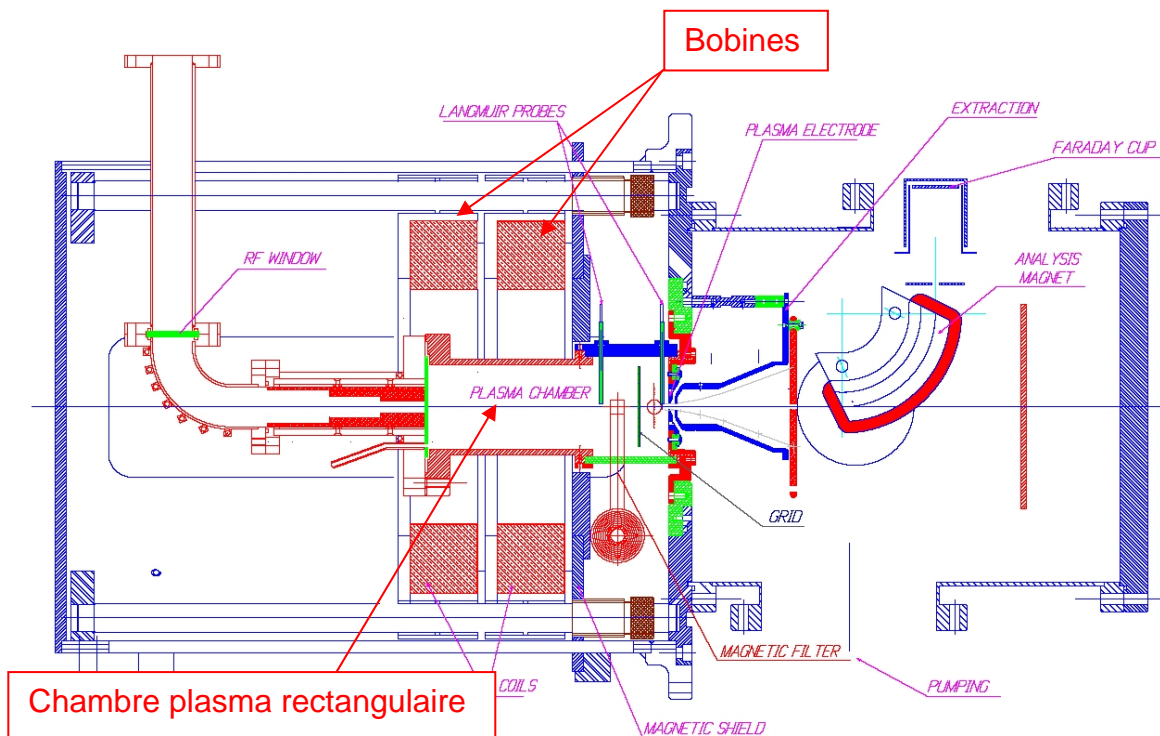


Fig. 5 : Géométrie actuelle de la source H⁻

En revanche, avec un système multipolaire, le champ est nul sur l'axe et varie selon $B \propto r^{\frac{n}{2}-1}$, où n est l'ordre du multipôle. Il s'agit donc de s'assurer que la zone de résonance (à 875 Gauss dans notre cas) est bien située à l'intérieur de la chambre plasma. Nous avons effectué l'étude en conservant la géométrie des aimants de la source SPIRAL2 (Fig. 6) et en changeant uniquement leur orientation magnétique. Le matériau est le même, à savoir du néodyme fer bore (NdFeBo) dont les caractéristiques sont les suivantes :

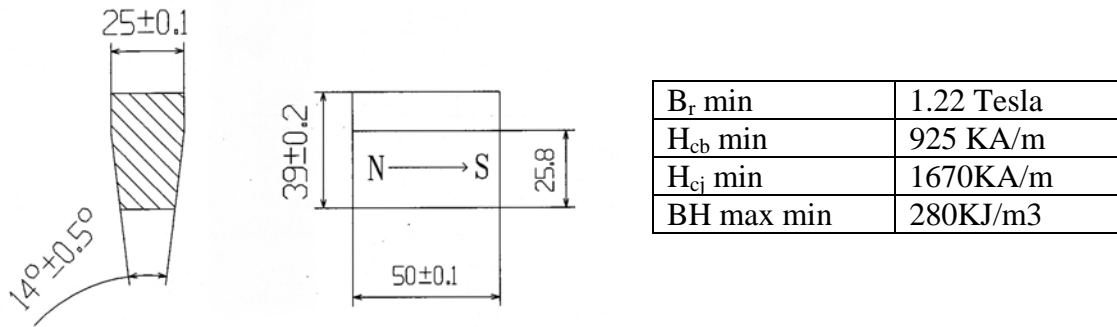


Fig. 6 : Géométrie et caractéristiques des 24 aimants d'une couronne

La longueur des couronnes a été fixée arbitrairement à 50 mm.

- a – Exploration des multipôles :

Le dodécapôle :

A partir des 24 aimants, on crée une configuration dodécapolaire avec 3 familles d'aimants :

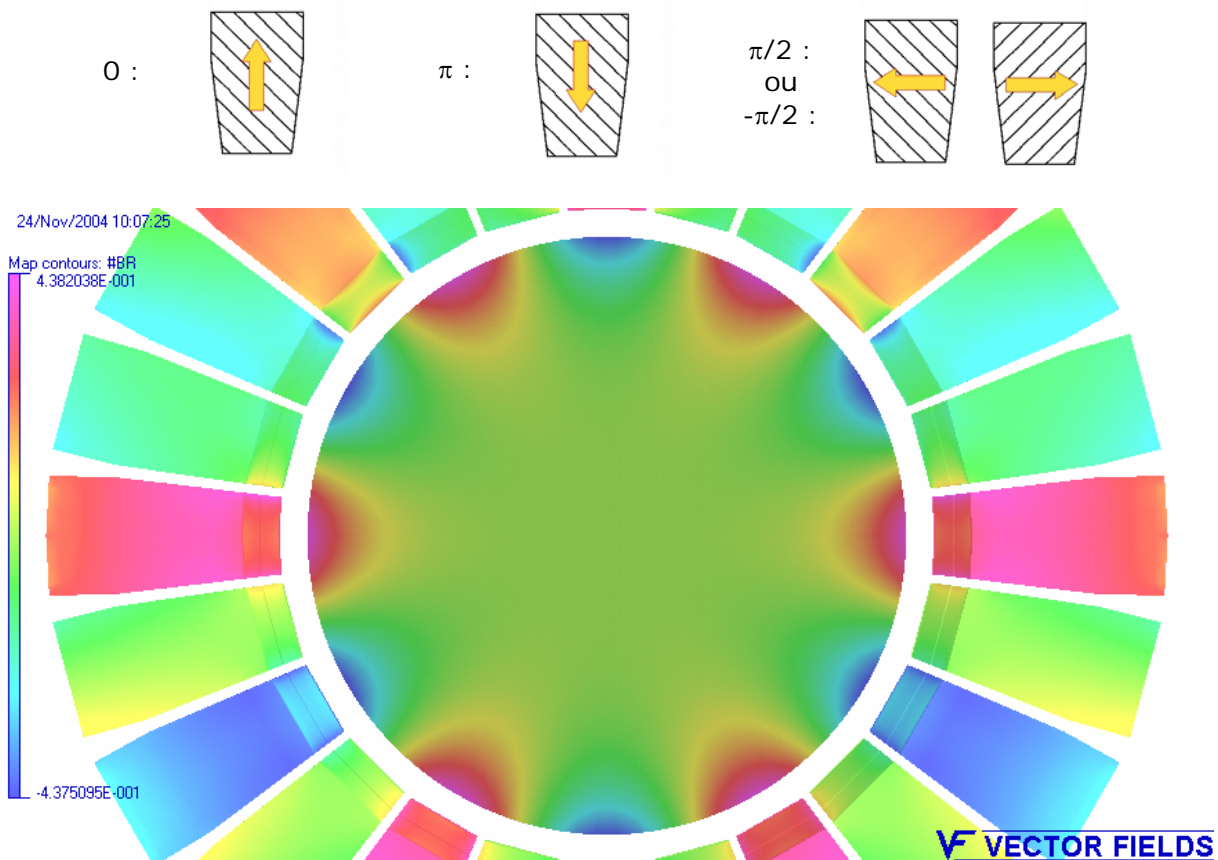


Fig. 7 : Champ magnétique radial généré par une couronnes d'aimants permanents en configuration dodécapolaire

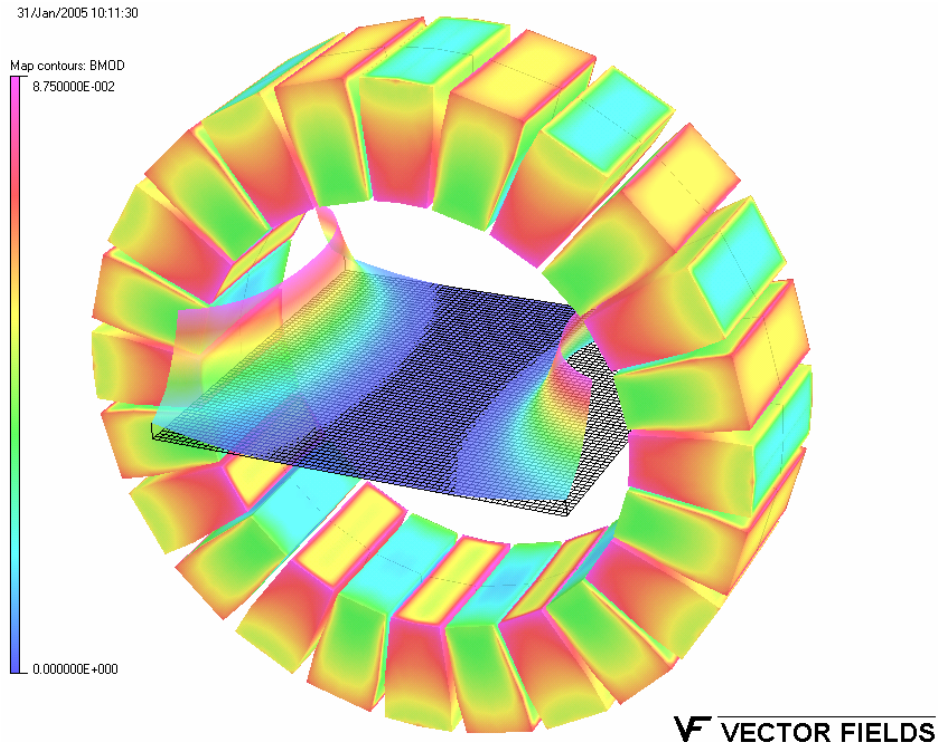


Fig. 8 : Couronne d'aimants permanents dans une configuration dodécapolaire

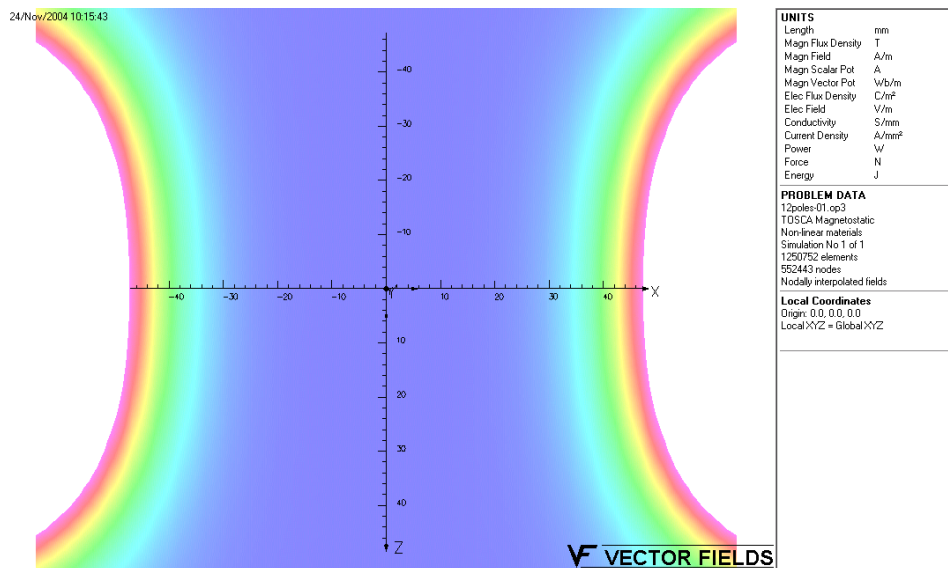


Fig. 9: Module du champ magnétique généré par une couronnes d'aimants permanents en configuration dodécapolaire dans un plan radial

Dans ce cas, au centre de la couronne, la zone de résonance à $B=875$ Gauss se situe à 47 mm de l'axe de la chambre (Fig. 8-9). Le rapport ouverture sur longueur étant grand du fait de la courte longueur de la couronne (50 mm), les effets de bords sont très importants. On peut montrer qu'en fonction de la longueur de la couronne, la position radiale de la résonance diminue asymptotiquement vers une valeur fixe, valeur obtenue avec un multipôle de longueur infinie (Fig. 19): elle tend vers une valeur fixe pour une longueur de l'ordre de l'ouverture de la couronne.

L'octupôle :

A partir des 24 aimants, on crée une configuration octupolaire avec 4 familles d'aimants :

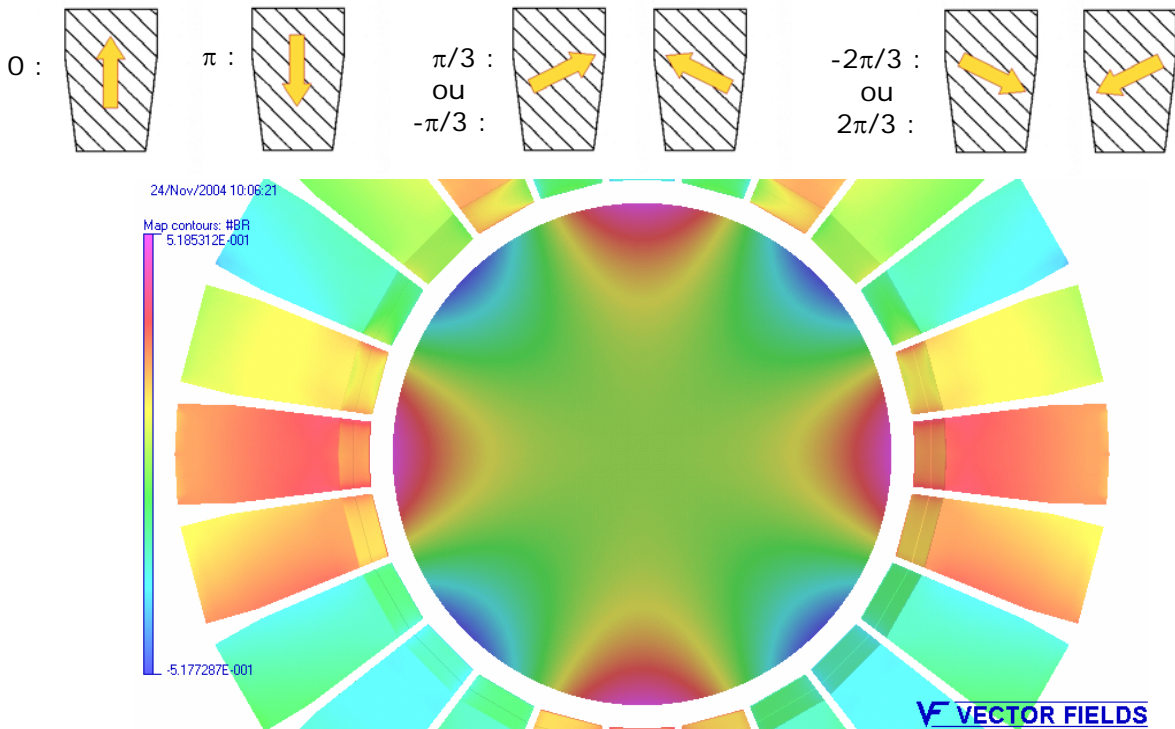


Fig. 10 : Champ magnétique radial généré par une couronne d'aimants permanents en configuration octupolaire

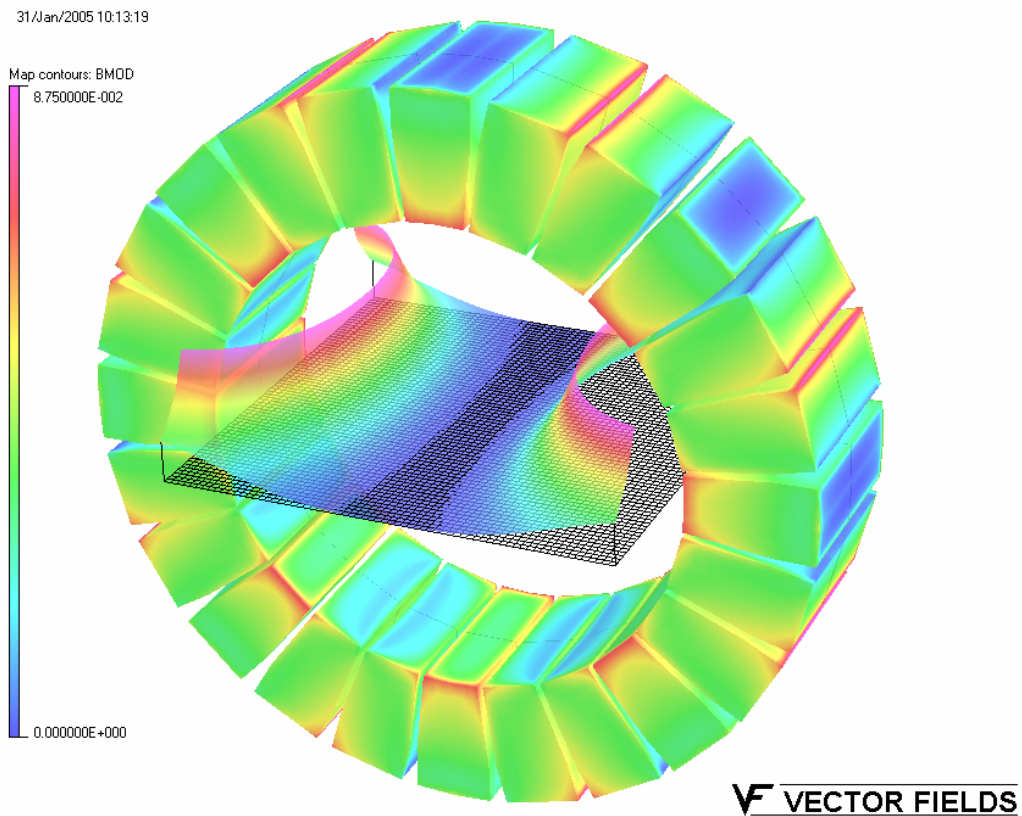


Fig. 11 : Couronne d'aimants permanents dans une configuration octupolaire

Dans le cas d'une couronne octupolaire unique, la zone de résonance à $B=875$ Gauss se situe à 37 mm de l'axe de la chambre (Fig. 11-12). La distance entre la zone de résonance à l'axe est plus faible que dans le cas du dodécapôle (47 mm).

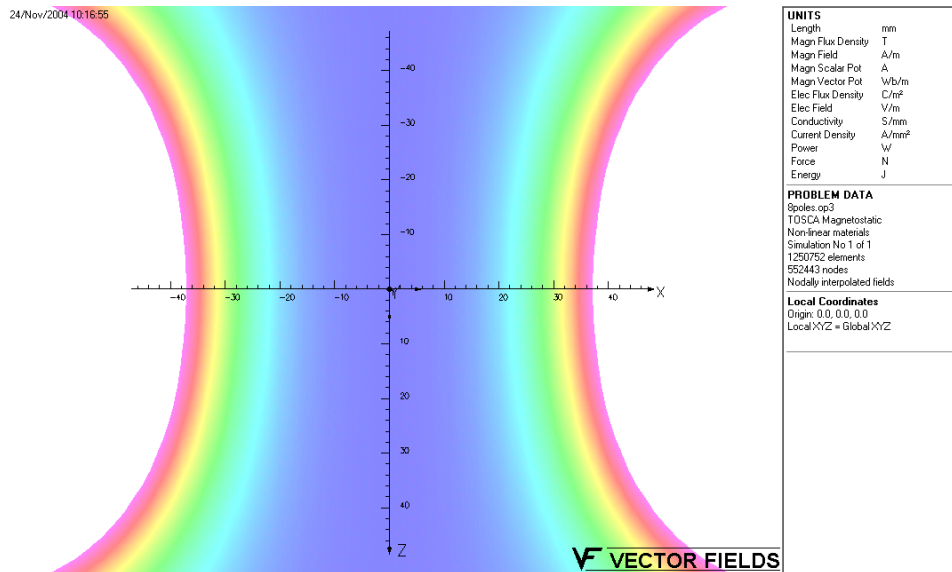


Fig. 12: Module du champ magnétique généré par une couronne d'aimants permanents en configuration octupolaire dans un plan radial

L'hexapôle :

A partir des 24 aimants, on crée une configuration hexapolaire avec 4 familles d'aimants :

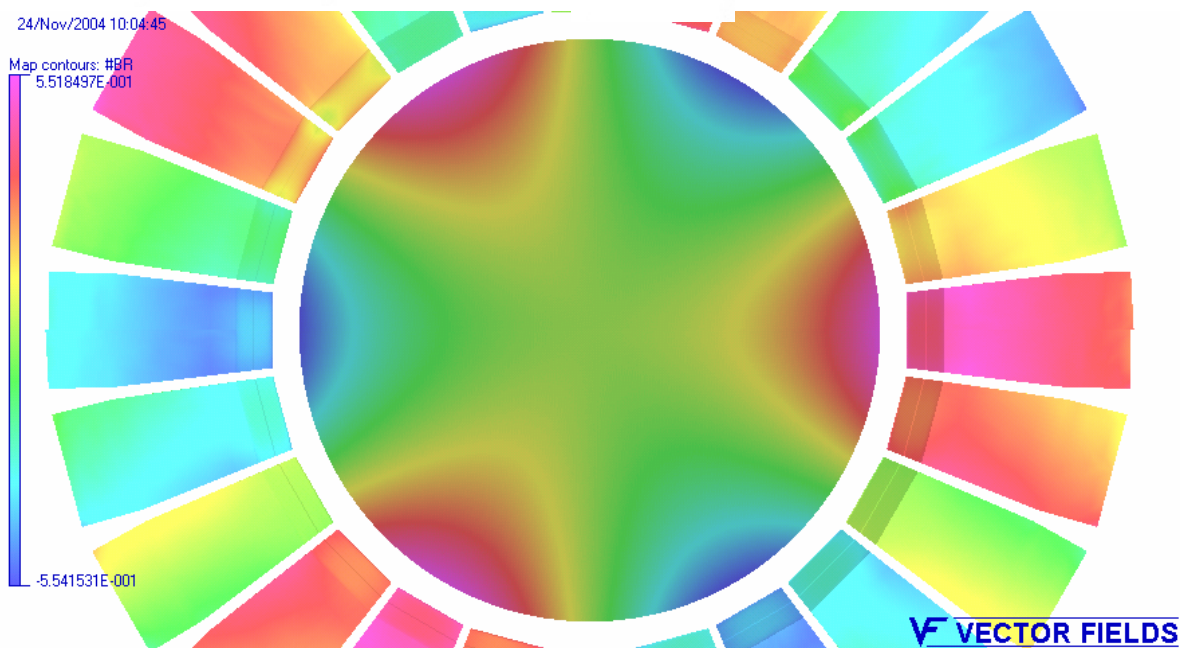
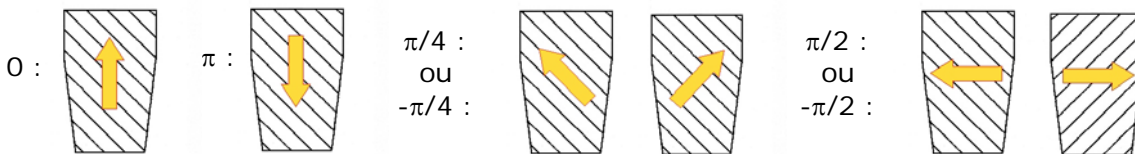
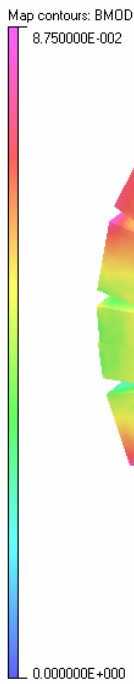


Fig. 13 : Champ magnétique radial généré par une couronne d'aimants permanents en configuration hexapolaire

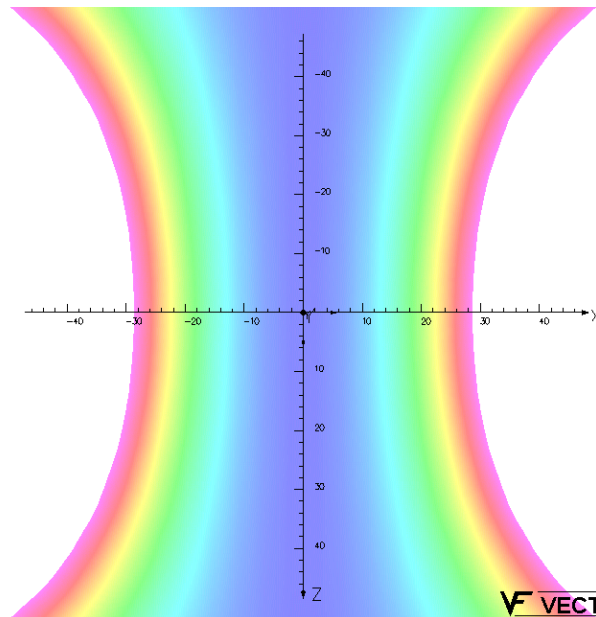
31/Jan/2005 11:13:33



V VECTOR FIELDS

Fig. 14 : Couronne d'aimants permanents dans une configuration hexapolaire

24/Nov/2004 10:19:21



UNITS	
Length	mm
Magn Flux Density	T
Magn Field	A/m
Magn Scalar Pot	A
Magn Vector Pot	Wb/m
Elec Flux Density	C/m ²
Elec Field	V/m
Conductivity	S/mm
Current Density	A/mm ²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA	
6poles.op3	
TOSCA Magnetostatic	
Non-linear materials	
Simulation No 1 of 1	
640114 elements	
111237 nodes	
Nodally interpolated fields	

Local Coordinates	
Origin:	0.0, 0.0, 0.0
Local XYZ =	Global XYZ

V VECTOR FIELDS

Fig. 15: Module du champ magnétique généré par une couronne d'aimants permanents en configuration hexapolaire dans un plan radial

La zone de résonance à $B=875$ Gauss se situe maintenant à 28 mm de l'axe de la chambre (Fig. 14-15). Cette valeur se situe à l'intérieur de la chambre plasma. Pour une même longueur de couronne la diminution de la valeur de la position radiale de la résonance est directement liée à l'ordre du multipôle, la valeur minimale étant donnée par le quadripôle (Fig 16). L'aimant permanent fait 1.24 tesla à 76 mm et le profil magnétique évolue en puissances croissantes de r à mesure que l'on monte en multipôles.

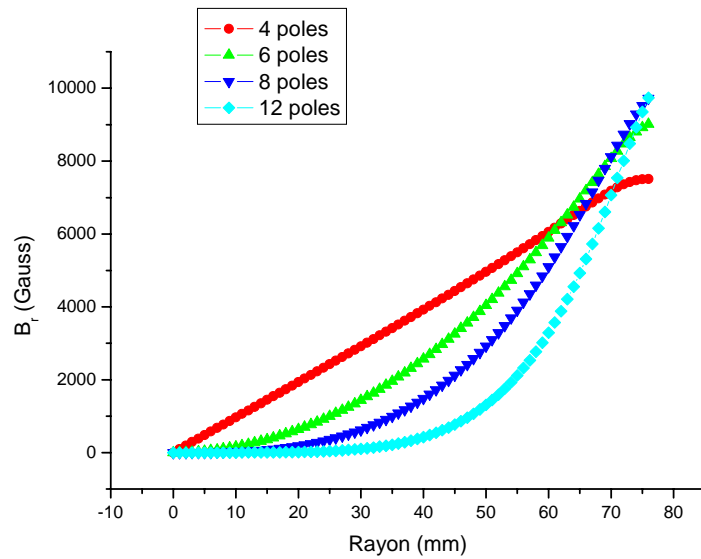


Fig. 16: Évolution de position de la résonance en fonction du multipôle dans le cas idéal d'une couronne infinie

Comparaison des codes TOSCA et RADIA sur un assemblage de 3 couronnes de 60 mm de longueur en configuration octupolaire

Le modèle TOSCA est réalisé sur $\frac{1}{4}$ de la section courante et sur la moitié de la longueur (Fig. 17). C'est le plus petit volume que l'on dessine puis on lui applique les différentes symétries évoquées plus haut. Ainsi faisant on peut améliorer la précision du calcul car le maillage peut être plus fin sans pour autant avoir un temps de calcul important. Le modèle entier n'est que reconstitué lors du post-processing par symétries.

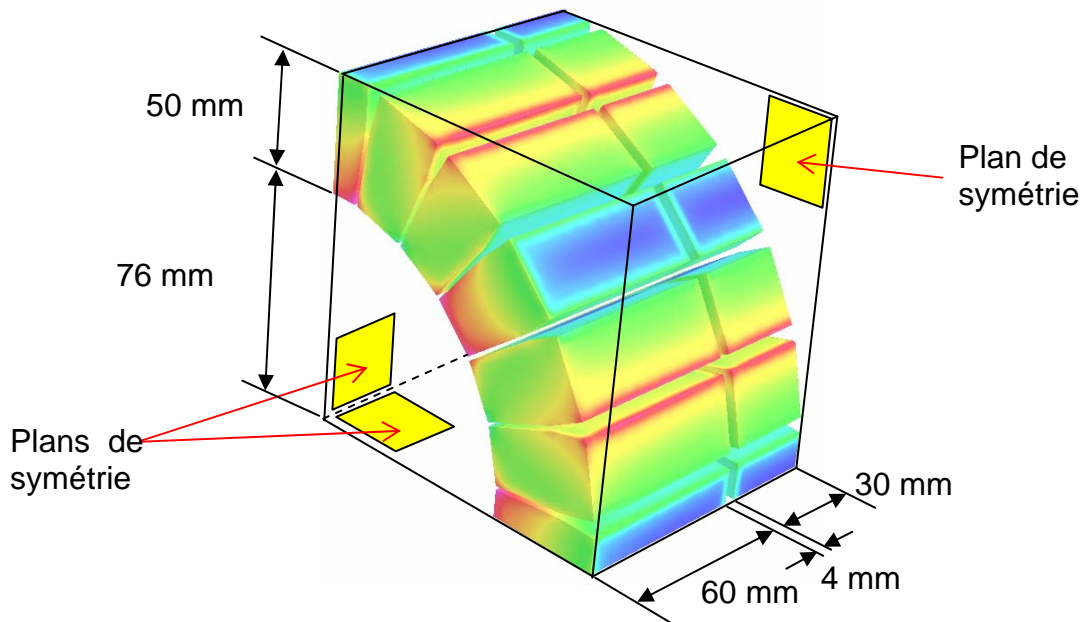


Fig. 17: Modèle réalisé avec TOSCA

Avec RADIA on réalise le modèle complet sans définir aucun plan de symétrie particulier (Fig. 18). Le programme étant très modulaire, le modèle est réalisé par une série de fonctions indépendantes. A l'aide d'une première fonction on décrit la forme d'un aimant. Une seconde fonction permet de lui attribuer son aimantation et sa position dans l'espace.

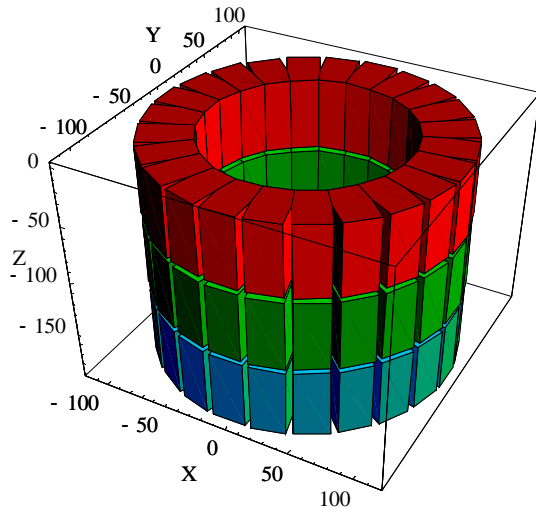


Figure 18 : Modèle de trois couronnes pour un calcul avec RADIA. Modèle non-jointif

Ainsi en répétant l'opération on crée une première couronne très aisément. Pour les suivantes, on répète l'opération à une élévation (z) différente. Ainsi il est facile de modifier très rapidement la configuration.

Avant de comparer les deux codes, avec 3 couronnes le rapport ouverture sur longueur diminue et réduit les effets de bords. La distance entre l'axe et la zone de résonance sera plus faible que celle obtenue avec une couronne unique.

Sur le graphe ci dessous, la distance à l'axe est reportée en fonction de la longueur de la couronne.

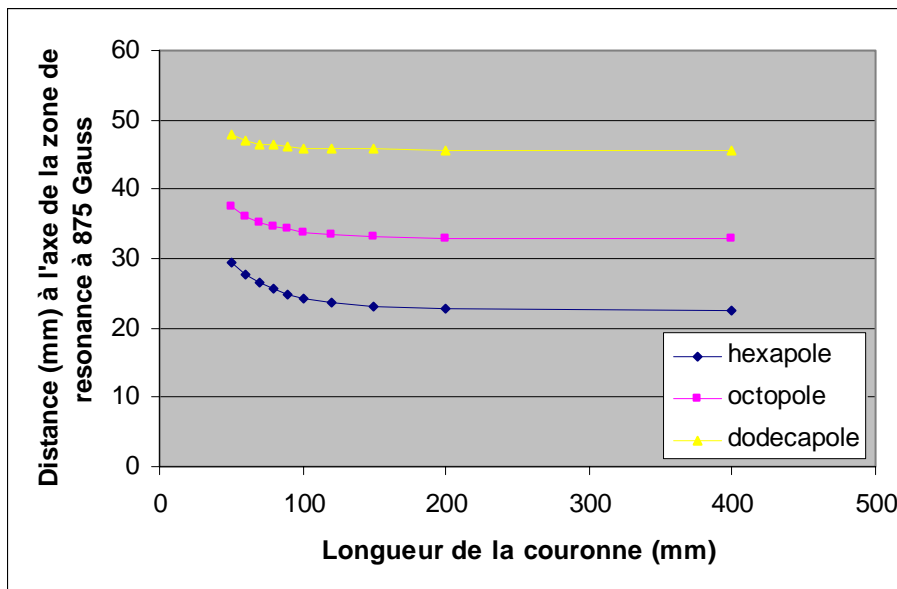


Figure 19 : Visualisation des effets de bords sur les couronnes courtes. Distance à l'axe de la zone de résonance en fonction de la longueur de la couronne.

Pour la comparaison entre les deux codes nous effectuons un calcul avec un matériau linéaire avec une aimantation de 1.24 Tesla. Nous représentons (Fig. 20 a et b) le champ magnétique dans un plan radial sous forme d'histogramme. La carte est réalisée de R=0 à R=70 mm, et de Z=0 à Z=150 mm.

On peut observer (Fig. 20 c) que la différence relative $(B_{\text{RADIA}} - B_{\text{TOSCA}}) / B_{\text{RADIA}}^{\text{max}}$ est inférieure à $3 \cdot 10^{-2}$, $B_{\text{RADIA}}^{\text{max}}$ étant le champ au point (R=0 ; Z=150). La précision obtenue est très satisfaisante et nous permet d'utiliser les deux codes et de profiter au mieux des outils et performances de chacun.

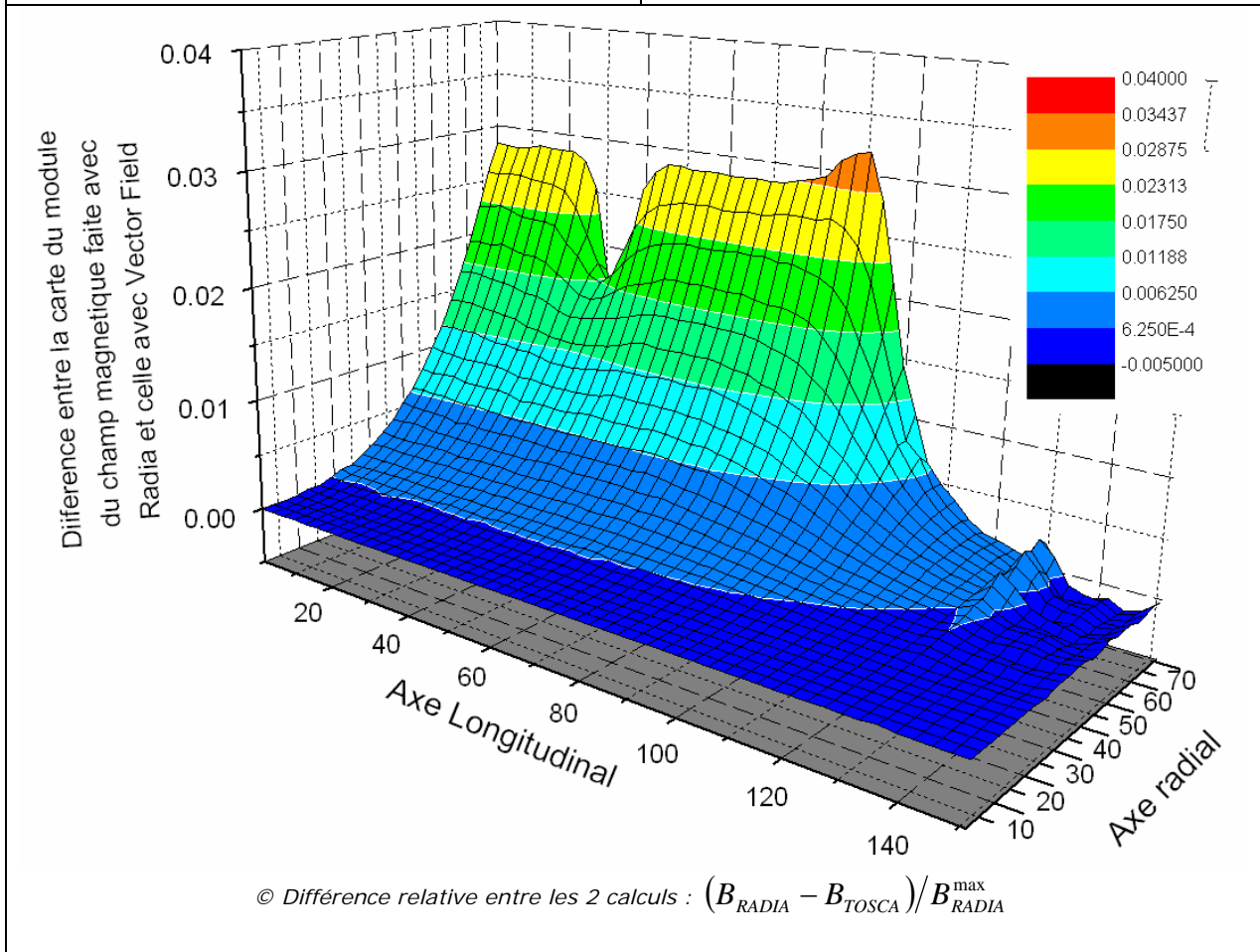
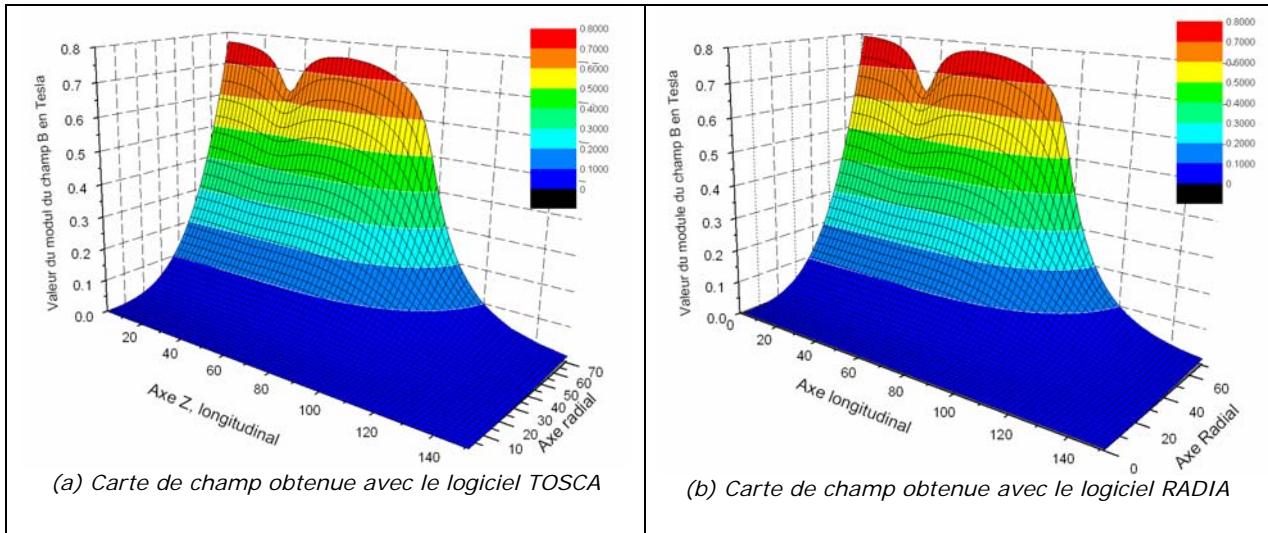


Fig. 20: Différences entre les simulations TOSCA et RADIA

Choix retenu et considérations mécaniques

Nous avons retenu la configuration octupolaire pour avoir, la résonance magnétique au voisinage des parois de la chambre pour le chauffage des électrons, ainsi qu'une zone centrale de champ faible suffisamment grande pour la production des ions H⁺.

Avec un arrangement hexapolaire, la résonance est trop proche de l'axe. De plus, la symétrie hexapolaire n'est pas favorable du point de vue des mesures magnétiques dans les plans de

référence horizontaux et verticaux, ni du point de vue de couplage avec le déviateur d'électrons.

Avec une configuration dodécapolaire, la résonance se situe hors de la chambre plasma.

Nous avons décidé de faire fabriquer 4 couronnes avec des longueurs différentes de manière à pouvoir explorer un fonctionnement de la source avec des zones ECR plus ou moins étendues longitudinalement.

Ces longueurs ont été fixées à 40 mm, 50 mm, 60 mm et 70 mm. Elles nous permettent de couvrir une longueur de couronne totale de 40 mm à 220 mm, sachant que, en plus, on peut laisser un espace de quelques mm à 10 mm entre chaque couronne sans modification significative du profil de champ longitudinal.

A l'origine nous avons prévu une conception identique à celle des couronnes de la source SPIRAL2. Les aimants s'inséraient dans des logements réalisés dans la couronne en aluminium extérieure (Fig. 2) et il existait un espace entre les aimants. Or la configuration solénoïdale induisait des forces longitudinales, sans conséquences pour les « dents » le la couronne.

Dans le cas de la source H^- , la configuration multipolaire induit des forces transverses. Il n'est donc plus possible de maintenir les aimants par le même procédé, ni même laisser les aimants non jointifs.

Les simulations initiales avec espaces inter aimants (Fig. 21) ont été effectuées avec 3 couronnes de 60 mm séparées de 4 mm. Avec cette longueur il n'y a plus d'influence significative sur la position radiale de la résonance (Fig. 19). La zone de résonance s'établit à 33 mm de l'axe.

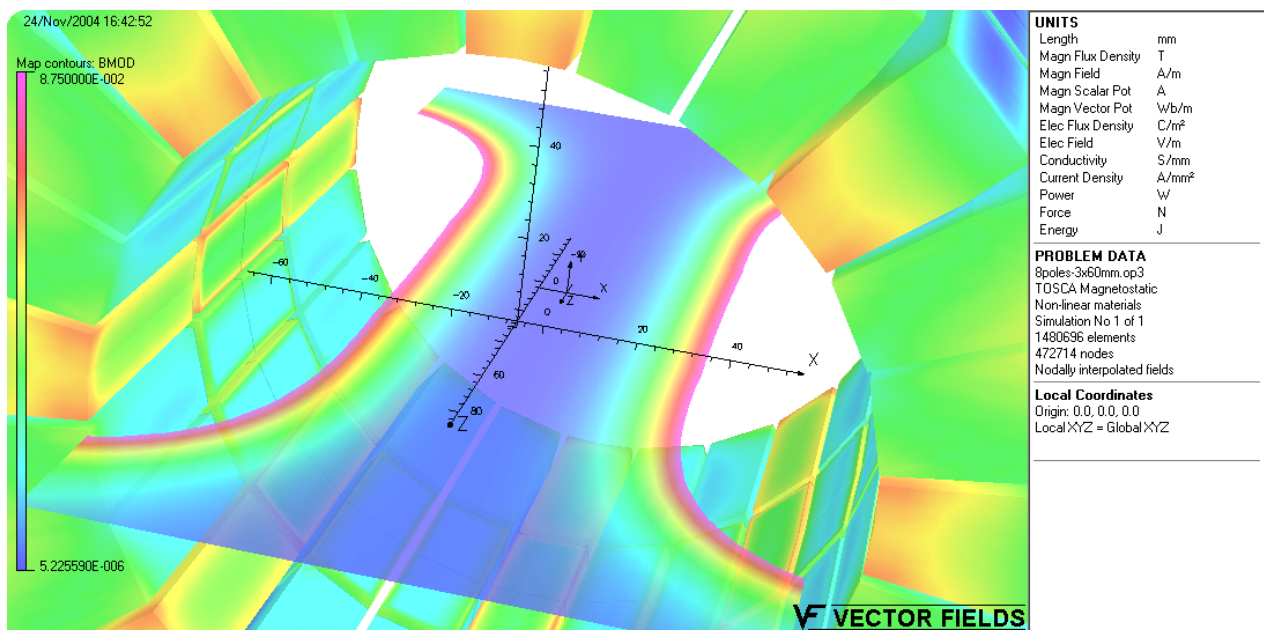


Fig. 21: Simulations TOSCA d'un ensemble de 3 couronnes octupolaires

Nous allons maintenant nous intéresser de plus près à la manière d'assembler et de maintenir les aimants dans la couronne. Suite aux contacts pris avec la société TE2M pour la réalisation de telles couronnes, le plus simple est de réaliser des aimants trapézoïdaux de manière à ce qu'ils soient jointifs dans la couronne. Il est ensuite possible de les coller avec une colle spéciale et de les maintenir ensemble avec une résine, le tout dans la coquille en aluminium.

Cette technique n'utilise pas d'encoche pour maintenir les aimants dans des compartiments séparés. Cela augmente le volume d'aimants permanents et ne peut être que bénéfique pour la source, car le champ va augmenter légèrement. De nouvelles simulations avec aimants jointifs ont été effectuées cette fois ci avec RADIA (Fig. 22).

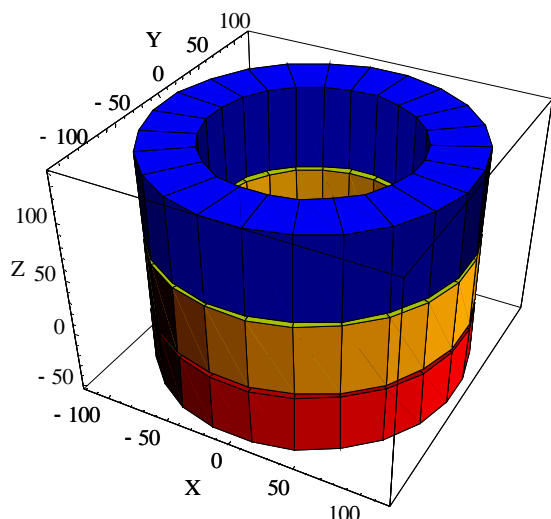


Figure 22 : Modèle RADIA de 3 couronnes octupolaires à aimants **jointifs** Les 3 couronnes sont de longueurs différentes $L=50$ mm, $L=60$ mm et $L=70$ mm

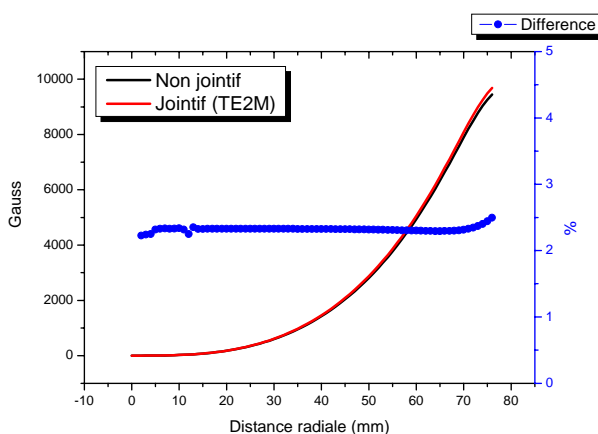


Figure 23 : Comparaison des deux modèles, jointif et non jointif. L'augmentation de l'intensité du champ est de 2,4% pour le model jointif

On peut estimer que le gain en intensité de champ est de l'ordre de 2,4%. Ainsi le calcul avec RADIA donne une zone de résonance à 875 Gauss à 34 mm (Fig. 23).

Dans le cas d'une baisse d'intensité de champ magnétique de l'ordre de 10 %, la zone de résonance se sera déplacée de 3,3% dans le cas d'un octupôle car $\frac{\Delta r}{r} = -\frac{1}{3} \frac{\Delta B}{B}$. Pour une zone estimée à $r=34$ mm, la résonance aurait lieu en réalité à $r=35,1$ mm. Cette valeur est encore satisfaisante pour une chambre de 72 mm de grand côté. Mais une chambre circulaire de grand diamètre serait plus intéressante.

Conclusions

Le début de l'étude d'une source d'ions H^- à 10. GHz avec une configuration multipolaire en aimants permanents nous a amené à la réflexion suivante : cette source est radicalement différente de la source @2.45 GHz actuellement en développement à Saclay et les limites de ses performances n'ont pas encore été atteintes.

Il semblait donc judicieux d'effectuer une étape intermédiaire en prévoyant une structure multipolaire à 2.45 GHz et observer l'influence sur le courant d'ions H^- extrait.

L'étude réalisée à cet effet a permis de comparer les 2 codes de simulation TOSCA et RADIA et d'en déduire une différence relative entre les 2 codes de 3%.

La structure multipolaire envisagée consiste en un octupôle réalisé à base de 24 aimants permanents en néodyme fer bore, assemblés en couronnes dont l'orientation magnétique suit la configuration développée par K. Halbach. Nous prévoyons 4 couronnes de longueurs différentes (40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm) de manière à réaliser différentes longueurs de zones ECR. Suivant les spécificités recherchées les 4 couronnes de longueurs différentes ont été réalisées par la société TE2M.

En parallèle une nouvelle chambre de section circulaire a été conçue mieux adaptée à la forme de la zone de résonance : elle possède un diamètre intérieur de $\varnothing 90$. De plus elle possède la caractéristique d'avoir une longueur ajustable, afin de faire varier le volume de la chambre elle-même (Voir schéma Fig. 24).

Les couronnes magnétiques vont être mesurées et qualifiées sur le banc de test de Soleil grâce à une collaboration avec ce groupe possédant une expertise internationale dans le domaine de la mesure très précise de la composante B_r . Cette mesure va être réalisée fin 2005-début 2006.

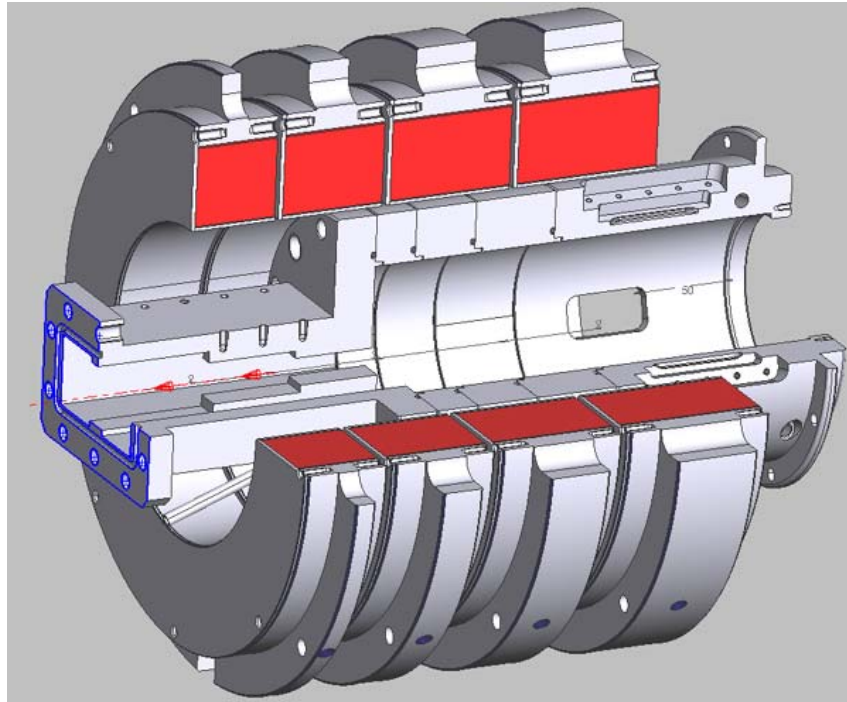


Figure 24 : Nouvelle source 2.45GHz ECRIN MULTICUSP

Références :

- [1] O. Delferrière, "Optimisation de la structure magnétique de la source d'ions D⁺ du projet SPIRAL2", EDMS-SPIRAL2 I-004594-V1
- [2] K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material", Nuclear Instruments and Methods 169 (1980), 1-10
- [3] K. Halbach, "Perturbation effects in segmented rare earth cobalt multipole magnets", Nuclear Instruments and Methods 198 (1982), 213-215
- [4] P. Elleaume, O. Chubar, J. Chavanne, "Computing 3D Magnetic Field from Insertion Devices", proc. of the PAC97 Conference May 1997, p.3509-3511.
O. Chubar, P. Elleaume, J. Chavanne, "A 3D Magnetostatics Computer Code for Insertion devices", SRI97 Conference August 1997, J. Synchrotron Rad. (1998). 5, 481-484
- [5] OPERA-3D / TOSCA reference manual – Vector-Fields Ltd – Oxford, UK