



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

DSM - DAPNIA

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Service des Accélérateurs
de Cryogénie et de Magnétisme

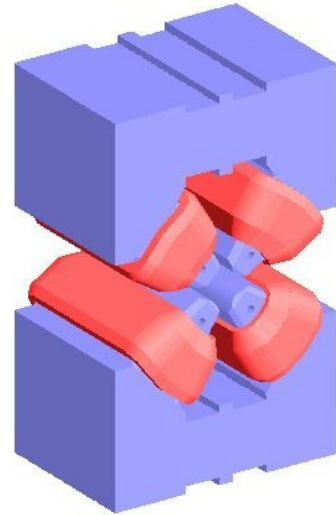
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE - CEA/SACLAY
DSM/DAPNIA/SACM bât. 130
91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX

O. DELFERRIERE – D. DE MENEZES



Olivier DELFERRIERE : odelferriere@cea.fr

Denis De MENEZES : ddemenezes@cea.fr



LES QUADRIPOLES DE L'ANNEAU DE SOLEIL

OPTIMISATION MAGNETOSTATIQUE 3D

Olivier DELFERRIERE
Denis DE MENEZES

Diffusion :

Jean-Marc FILHOL
Marie-Paule LEVEL
Antoine DAËL
Amor NADJI
Murielle CORLIER
Pascale BRUNELLE
Fabrice MARTEAU
Alexandre LOULERGUE
Chamseddine BENABDERRAHMANE
Oleg CHUBAR

I° -INTRODUCTION

Les quadripôles de l'anneau de stockage du projet SOLEIL avaient été partiellement étudiés durant la période 1997-1998 pour l'APD SOLEIL¹. On distinguait 2 types de quadripôle (QP), à savoir 128 QP courts et 32 QP longs, la section transversale du circuit magnétique étant conservée. A cause du pompage latéral à travers les quadripôles et du passage des lignes de lumière, la configuration du circuit magnétique est en « figure de 8 ». Le cercle de gorge est fixé à R=33 mm pour une zone utile de ± 30 mm. Afin d'atteindre la tolérance requise sur l'homogénéité de l'intégrale de gradient dans la zone utile ($[\int Gdl - G_0dl] / G_0dl < 5.10^{-4}$), on agit sur l'enfoncement d'un chanfrein d'extrémité à 45°. Les calculs 3D effectués avec le code *TOSCA* avaient permis de trouver une valeur de profondeur de chanfrein de 13 mm pour laquelle la zone utile était maximale dans le plan horizontal (≈ 30 mm).

Pour la reprise d'APD, nous approfondissons cette étude en effectuant en plus une décomposition harmonique du champ intégré de manière à comparer les résultats avec les tolérances requises pour chacun des multipôles.

II° -RESULTATS OBTENUS LORS DE L'APD EN 1998 :

L'étude magnétique effectuée lors de l'APD concernait uniquement le quadripôle court dont le gradient était de 18 Tm^{-1} . Les principales caractéristiques demandées étaient les suivantes (Table I) :

Zone utile X,Y	$\pm 30 \text{ mm} / \pm 12.5 \text{ mm}$
Rayon de gorge	33 mm
homogénéité des intégrales de gradient	$3. 10^{-3}$
Longueur de gradient	320 mm
Longueur de fer	320 mm
Ampères-tours nominaux	8000 At
Densité de courant maximale	4.9 A/mm^2
Gradient nominal	18 Tm^{-1}

Table I : Paramètres quadripôle anneau de stockage de SOLEIL

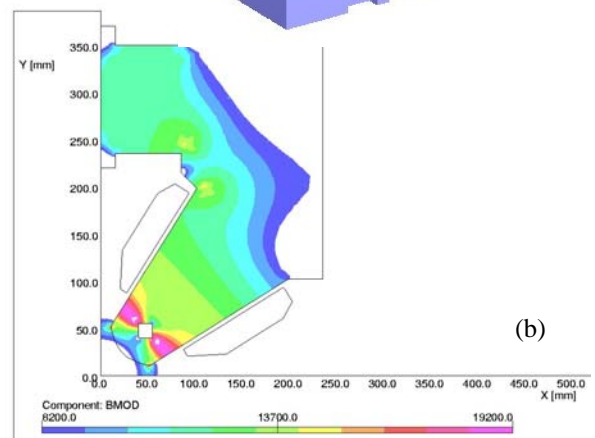
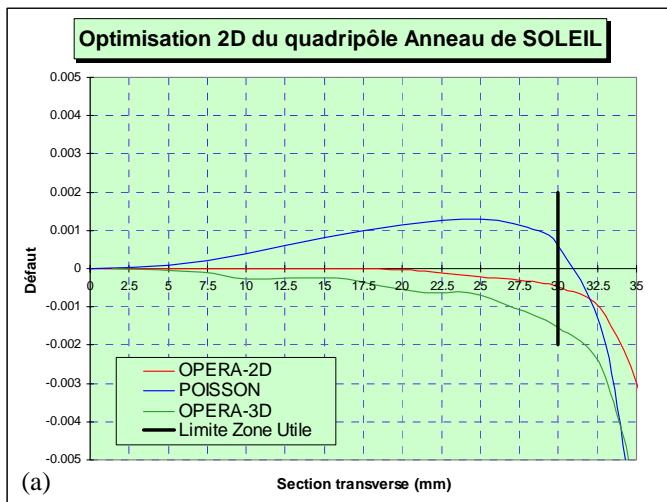
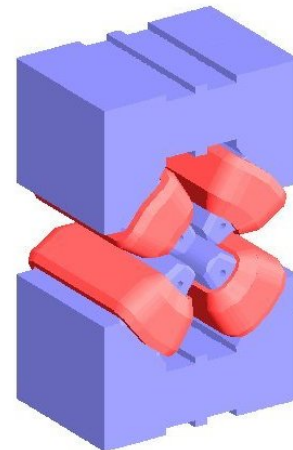


Figure 1 : Optimisation 2D du quadripôle anneau de stockage de SOLEIL

(a) $[\int Gdl - G_0dl] / G_0dl$, (b) Isovaleurs de B dans la section courante

L'optimisation 2D avait été effectuée pour une large part avec le code *POISSON*, et poursuivie ensuite avec le code *OPERA-2D*. L'étude 3D avait été menée avec le code *TOSCA*. On remarquait alors une incertitude de $1.5 \cdot 10^{-3}$ entre les résultats *POISSON* & *OPERA-2D* (Fig. 1).

L'étude 3D avait porté sur la recherche d'un profil d'extrémité satisfaisant à la fois le critère $L_m=L_{fer}$ et l'homogénéité des intégrales de gradient de $3 \cdot 10^{-3}$. L'option retenue était d'effectuer un simple chanfrein à 45° dont on faisait varier la profondeur. Les valeurs d'enfoncement allaient de 6.5 mm à 23 mm. Les résultats obtenus ont montré qu'avec un enfoncement du chanfrein de 13 mm (Fig. 3), l'homogénéité des intégrales de gradient était dans la tolérance, pour une zone utile de ± 30 mm en horizontal et de ± 25.8 mm en vertical. Le gradient obtenu était de 18.41 T.m^{-1} . Dans cette configuration, il n'avait pas été possible d'égaliser la longueur magnétique à la longueur fer (Fig. 4). Avec un chanfrein à une seule pente, il aurait fallu effectuer une découpe de l'ordre de 30 mm pour obtenir $L_m=L_{fer}$. Mais dans ce cas l'homogénéité des intégrales de gradient était largement hors de la tolérance.

PROFONDEUR DU CHANFREIN (mm)	$\frac{\int G dl}{G_0}$ (mm)	ZONE UTILE (mm) AVEC TOLERANCE $< 3 \cdot 10^{-3}$
6.5	351.4	V 26.8 ; H 23.7
10	347.7	V 28.9 ; H 23.8
13	343.6	V 25.8 ; H 30.0
16	339.9	V 21.5 ; H 25.2
23	329.4	V 20.8 ; H 22.6

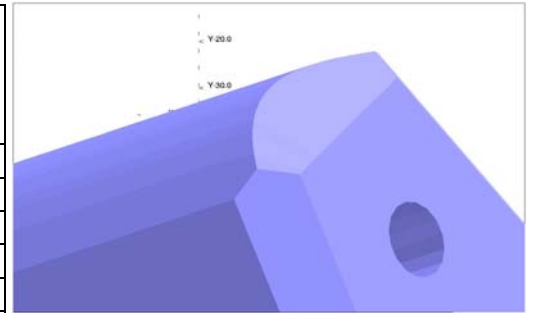


Table II : Résultats de l'optimisation du chanfrein à 45°

Figure 3: Chanfrein d'extrémité à 45° de 13 mm

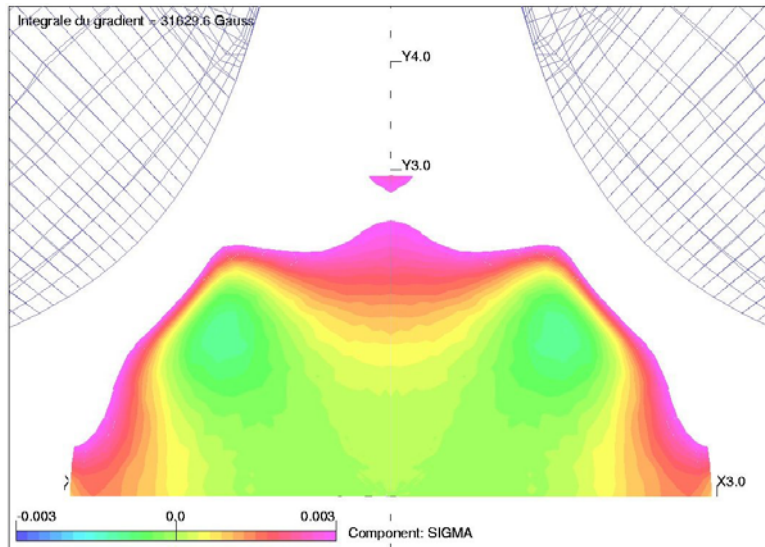


Figure 2 : Zone utile pour un chanfrein à 45° de 13 mm de profondeur

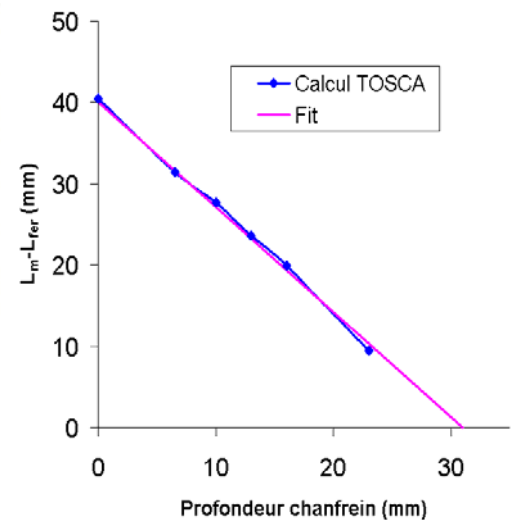


Figure 4: Longueur magnétique fonction de la profondeur du chanfrein

Remarque : Tous les calculs avaient été effectués avec un matériau dont les caractéristiques magnétiques correspondent à celles de l'ARMCO. D'autre part, l'aimant avait été considéré massif (packing factor=1).

III° - LE QUADRIPOLE DE L'ANNEAU DE SOLEIL - REPRISE D'APD:

1° - Définition de la section courante :

Au départ de l'étude, la section courante a été reprise identique à celle de l'APD, telle que définie figure 5. L'aimant est en « figure de 8 » avec une coupure de la culasse dans le plan médian pour un pompage latéral à travers le quadripôle, et pour le passage des lignes de lumière. Les techniques d'assemblage ayant été modifiées, le trou à travers les pôles permettant le serrage des tôles a été éliminé. Afin de permettre le montage des bobines, les 2 culasses haute et basse sont coupées en 2 par le plan d'antisymétrie vertical. Les 2 demi culasses sont ensuite amenées en contact pour refermer le circuit magnétique.

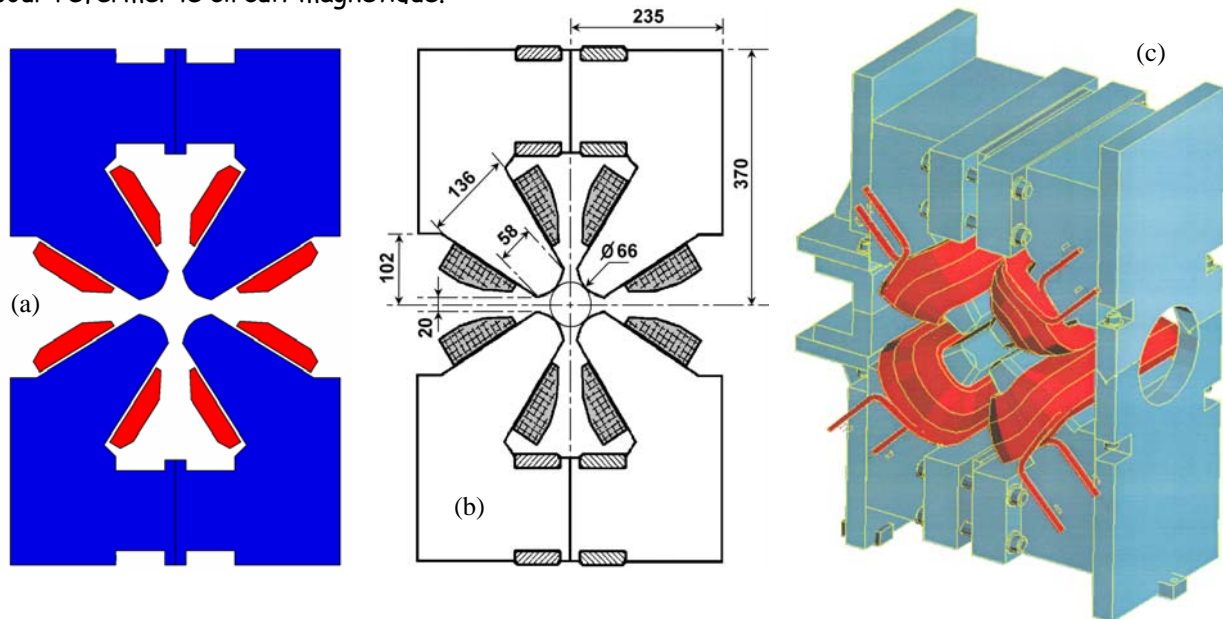


Figure 5 : Section courante, (a) modèle TOSCA, (b) Dimensions principales, (c) Assemblage proposé pour l'APD

2° - Tolérances :

Les tolérances demandées par SOLEIL sont maintenant exprimées à partir des composantes multipolaires du champ (Table III). La zone utile a été étendue à ± 35 mm pour un rayon de gorge de 33 mm. L'assemblage par contact des 2 parties de chacune des culasses haute et basse ne sera jamais parfait. Il pourra engendrer des composantes dipolaires et hexapolaires parasites.

Zone utile horizontale	± 35 mm
Rayon de gorge	33 mm
Tolérance sur octupôle (saturation)	$3 \cdot 10^{-4}$
Tolérance sur dodécapôle	$5 \cdot 10^{-4}$
Tolérance sur "20 pôles"	$-3 \cdot 10^{-4}$
Gradient QP court/QP long	19 T.m ⁻¹ /23 T.m ⁻¹

Table III : Tolérances requises et paramètres principaux

3° - Définition des bobines :

Les bobines définies lors de l'APD (Fig. 6), sont constituées de 4 couches de conducteurs, avec un nombre de spires différent entre le quadripôle court et le quadripôle long. Les caractéristiques principales sont résumées dans la table IV.

Au niveau de la modélisation dans TOSCA, les bobines sont constituées d'une succession de « briques à 20 nœuds » permettant de définir des conducteurs ayant une forme quelconque dans l'espace. Ici, on choisit l'enveloppe de l'ensemble des conducteurs définis figure 6b, qui s'appuie sur le pôle conique, et qui, en extrémité, tourne autour du pôle, mais aussi autour de l'axe z (faisceau).

	QP court	QP long
Ampère Tours maximum	35000 At	43000 At
Intensité nominale	250 A	250 A
Nombre de spires	34	40
Dimension du conducteur carré	8x8 mm	8x8 mm
Φ trou intérieur	4 mm	4 mm

Table IV : Paramètres principaux des bobines

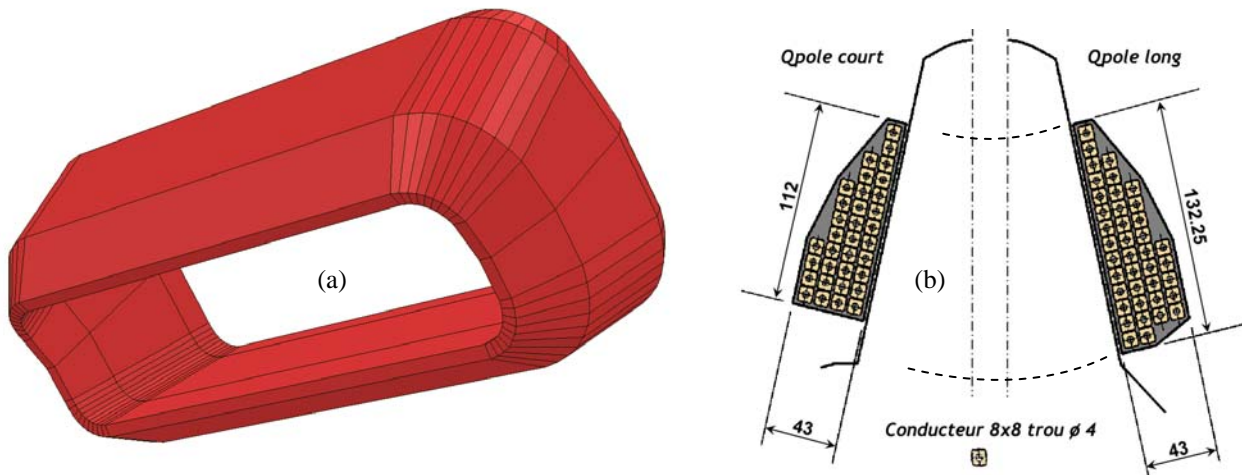


Figure 6 : Géométrie des bobines, (a) modélisation TOSCA, (b) plan bureau d'étude

4° - Matériau :

Le matériau utilisé correspond au matériau préconisé par SOLEIL, du type « ESRF » dont la courbe de perméabilité est représentée figure 7. L'aimant est un aimant feuilleté et on estime le coefficient de foisonnement des tôles à 0.98 (packing factor).

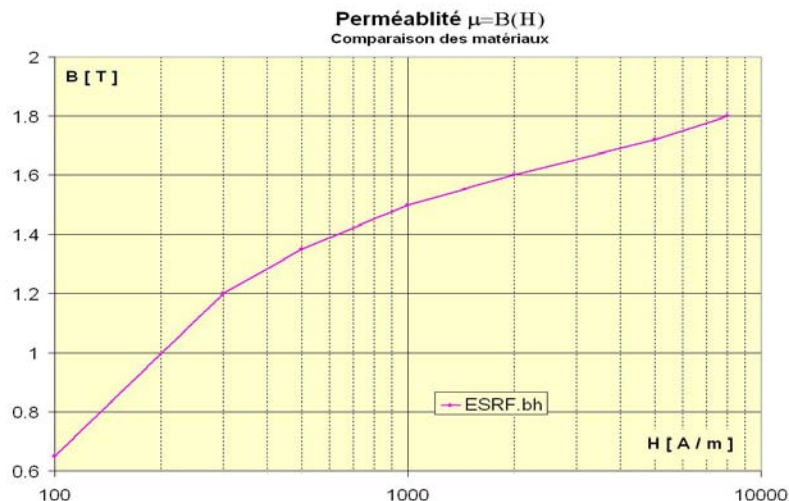


Figure 7 :
Courbe de perméabilité du
matériau type « ESRF »

III° - DESCRIPTION DE L'ETUDE 3D REALISEE AVEC LE CODE TOSCA® :

1° - Modèle et Paramètres de calcul :

Le modèle aux éléments finis est construit avec le pré-processeur OPERA-3D de Vector-Fields. Il s'agit de l'ancien modèle utilisé lors de l'APD. Le matériau correspondant aux trous dans les pôles a été modifié et remplacé par le matériau de l'aimant. Un huitième de l'aimant est modélisé, soit un quart dans la section transverse, c'est à dire 1 pôle (Fig.7).

Type de quadripôle	Figure 8
Cercle de gorge	Φ 66 mm
Tolérance sur $ Gd $	$2 \cdot 10^{-4}$
Quadripôle court	
Densité de courant	2.75 A/mm^2
Ampères-tours	8400. At
Valeur nominale du gradient	19 Tm^{-1}
Longueur fer QP court	320 mm
Longueur magnétique	349.4 mm
Quadripôle long	
Densité de courant	3.5 A/mm^2
Ampères-tours	10300. At
Valeur nominale du gradient	23 Tm^{-1}
Longueur fer	460 mm
Longueur magnétique	480.6 mm

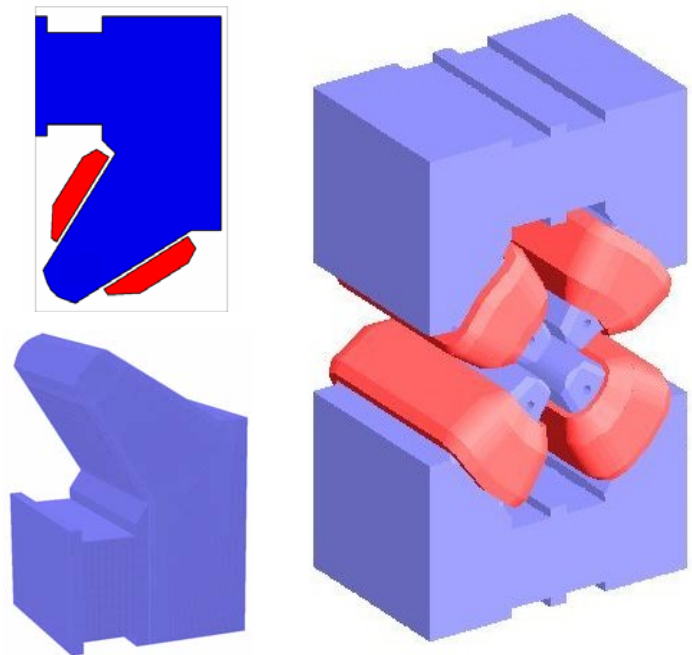


Tableau 1 : cahier des charges pour calcul du quadripôle

Figure 7: Modèle TOSCA

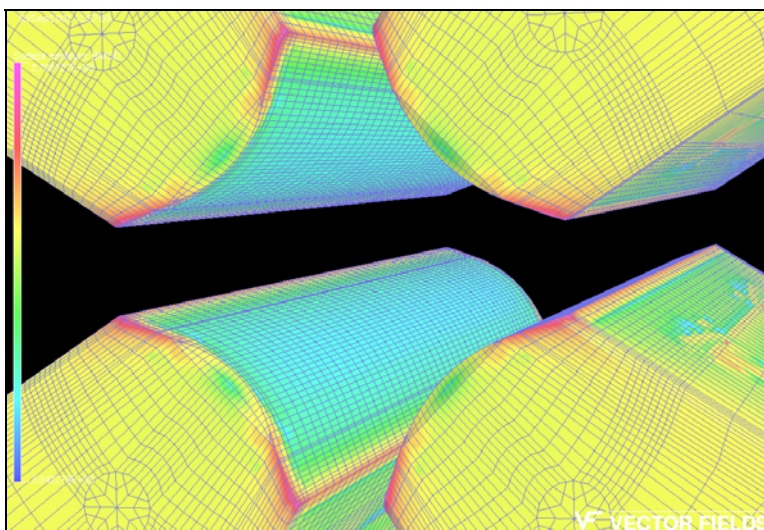


Figure 6 : Iso valeurs du module du champ magnétique dans l'aimant

Caractéristiques calcul TOSCA

- Conducteur : type succession de BR20
- Section : 3050 mm^2

Quadripôle court :

- Ampères-tours : NI=8692 At
- $G_{\max}=19.7 \text{ Tm}^{-1}$

Quadripôle long :

- Ampères-tours : NI=10675 At
- $G_{\max}=23.8 \text{ Tm}^{-1}$

- Matériau type ESRF
- Packing factor 0.98
- Convergence : $1 \cdot 10^{-4}$

2° - Zone utile et homogénéité des intégrales de champ et de gradient :

On calcule les intégrales de champ dans la zone utile horizontale de ± 35 mm de part et d'autre de la trajectoire de référence: $\int B(x,z)dz$. On effectue 50 intégrales au pas de 0.7 mm.

A partir de ces résultats, on calcule ensuite l'intégrale de gradient que l'on définit par :

$$\frac{\int B(x_2,z)dz - \int B(x_1,z)dz}{x_2 - x_1} = \int G(x)dz$$

Puis on examine l'homogénéité des intégrales de gradient : $\frac{\int Gdl - \int G_0 dl}{\int G_0 dl}$ où G_0 est le gradient au

centre du quadripôle.

On regarde aussi l'homogénéité des intégrales de champ localement en faisant :

$$\frac{\int B(x_n,z)dz - n \cdot \int B(x_1,z)dz}{\int B(x_n,z)dz}, \text{ où } x_n = n \cdot x_1$$

Remarque : On rappelle que le gradient n'est pas une variable connue dans TOSCA

3° - Développement harmonique du champ intégré :

On réalise la décomposition harmonique du champ intégré à l'intérieur d'un cylindre de rayon $r_0=30$ mm, centré sur l'axe magnétique de l'aimant, et de longueur 300 mm depuis le centre de l'aimant. Les coefficients A_n du champ intégré (termes droits) sont calculés de la manière suivante pour la composante du champ magnétique B_r par exemple⁽¹⁾ :

$$A_n = \frac{1}{\pi r^n 2 L_m} \int_{-L}^{+L} \int_0^{2\pi} B_r(r, \theta) \sin(n\theta) d\theta dz, \text{ où } L_m \text{ est la longueur magnétique.}$$

A partir du développement harmonique 3D obtenu avec TOSCA, on peut reconstruire le champ en tout point. En particulier, on vérifie (Fig. 8) que la décomposition effectuée sur le cercle d'analyse permet bien de recalculer les intégrales de champ obtenues sur l'axe des x.

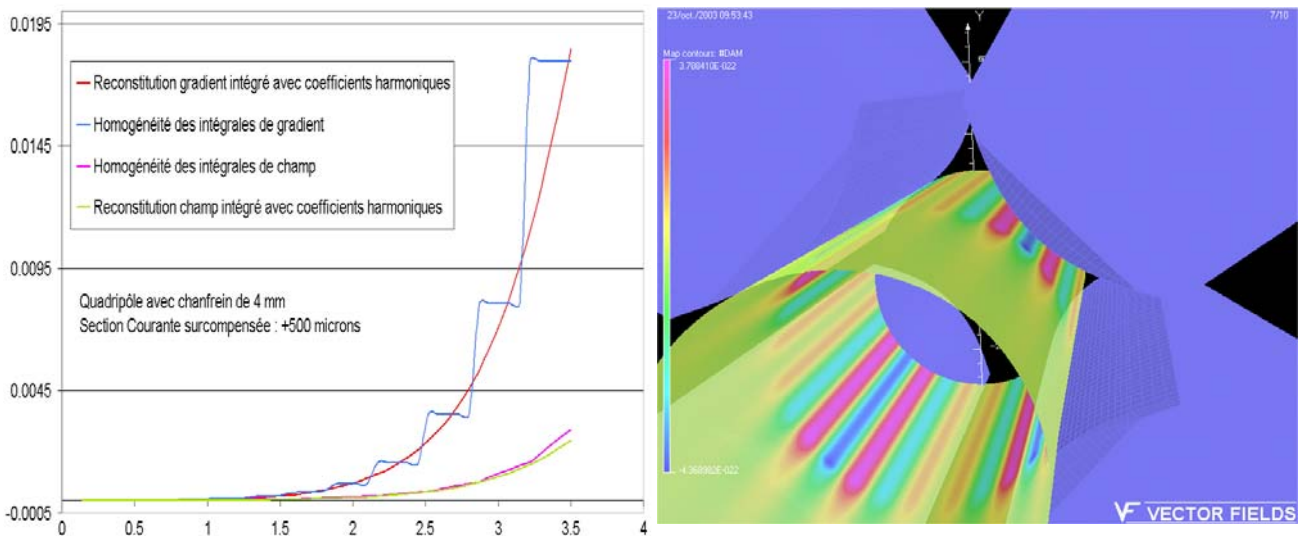
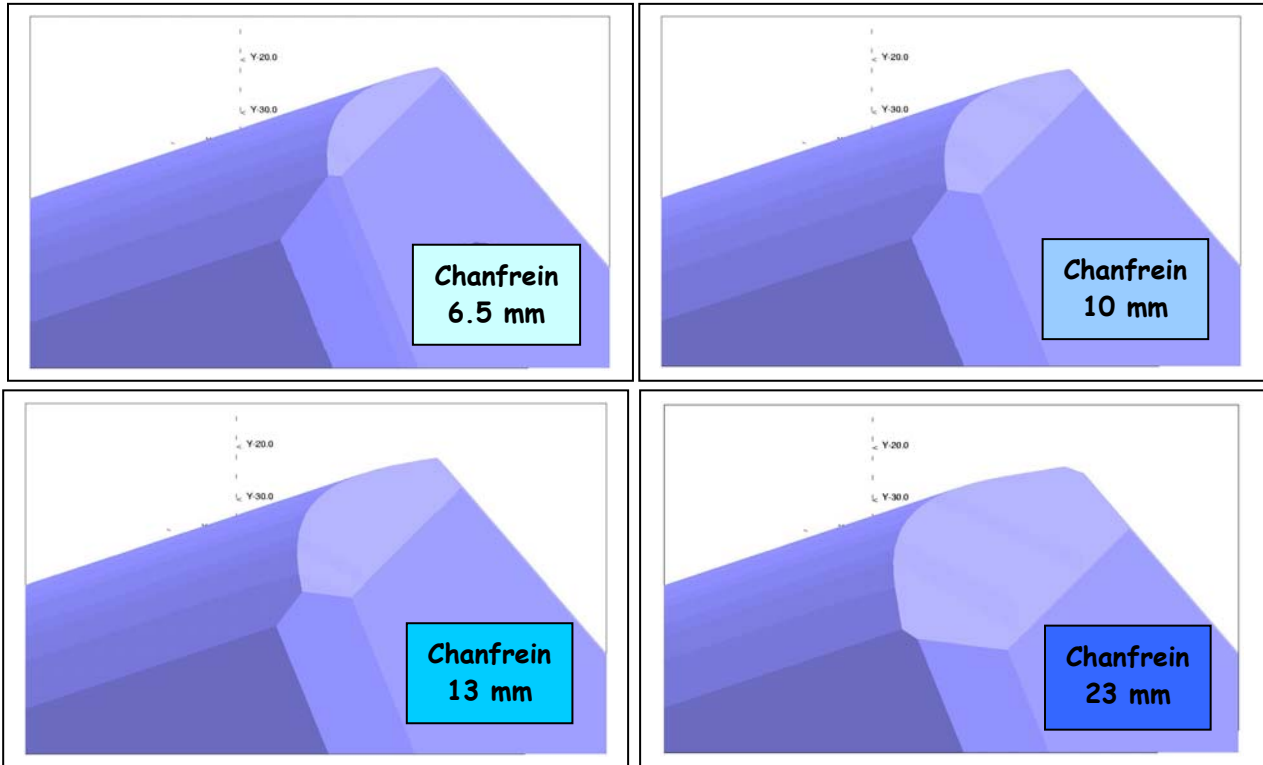


Figure 8: Reconstitution des intégrales de champ et de gradient par les coefficients harmoniques intégrés

(1) Dans TOSCA l'intégration se fait en $r.d\theta$ et non en θ

4° - Optimisation du chanfrein d'extrémité en fonction du taux d'harmoniques:



Comparaison quadripôle court anneau
G=19.7 T/m
Optimisation de la profondeur du chanfrein d'extrémité à 45°

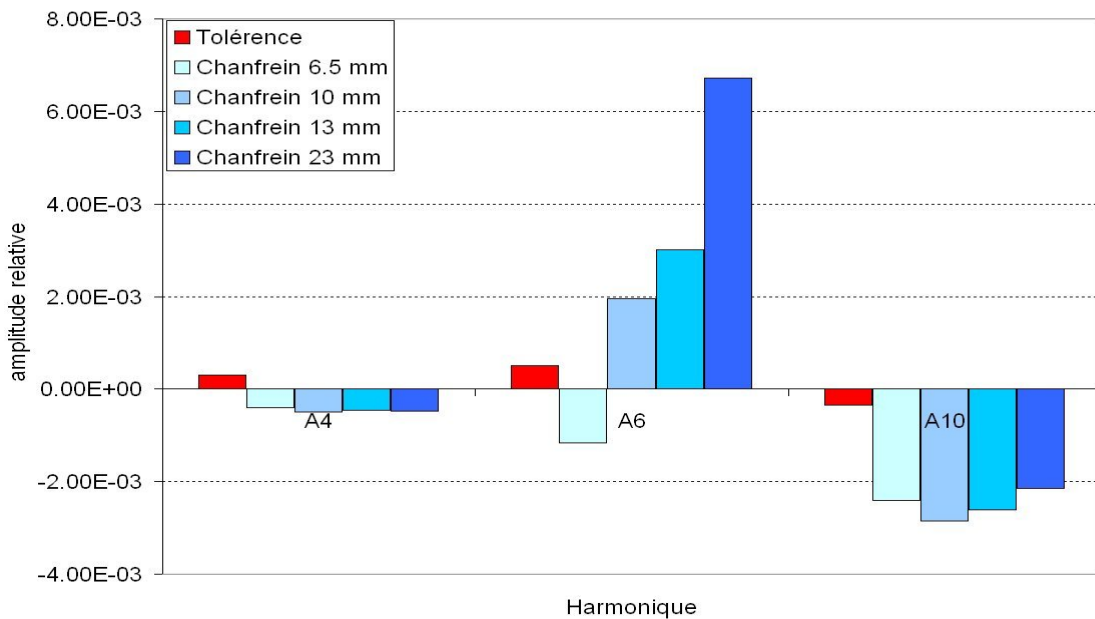


Figure 9: Exemple d'évolution des harmoniques en fonction du chanfrein d'extrémité – Reprise étude APD

On choisit d'optimiser le taux d'harmonique en réglant l'enfoncement d'un chanfrein à 45° en extrémité du quadripôle. On peut trouver un chanfrein pour lequel le terme intégré dodécapolaire négatif s'annule avec la compensation positive due au chanfrein (Fig. 9). Cependant, il y a apparition d'un terme "20 pôles" négatif. Nous verrons par la suite comment régler à la fois le dodécapôle et le terme "20 pôles", par une modification du profil de la section transverse.

IV° - RESULTATS SUR L'OPTIMISATION DU QUADRIPOLE :

On obtient un gradient de $G = 19.7 \text{ Tm}^{-1}$ pour le quadripôle court avec $NI=8692 \text{ At}$ par bobine et respectivement 23.8 Tm^{-1} avec $NI=10675 \text{ At}$ pour le quadripôle long. Le quadripôle est en limite de saturation dans le circuit magnétique avec $B_{\max} = 1.7 \text{ T}$ dans l'évasement du pôle aux extrémités (Fig. 10). Le reste du circuit n'est pas saturé.

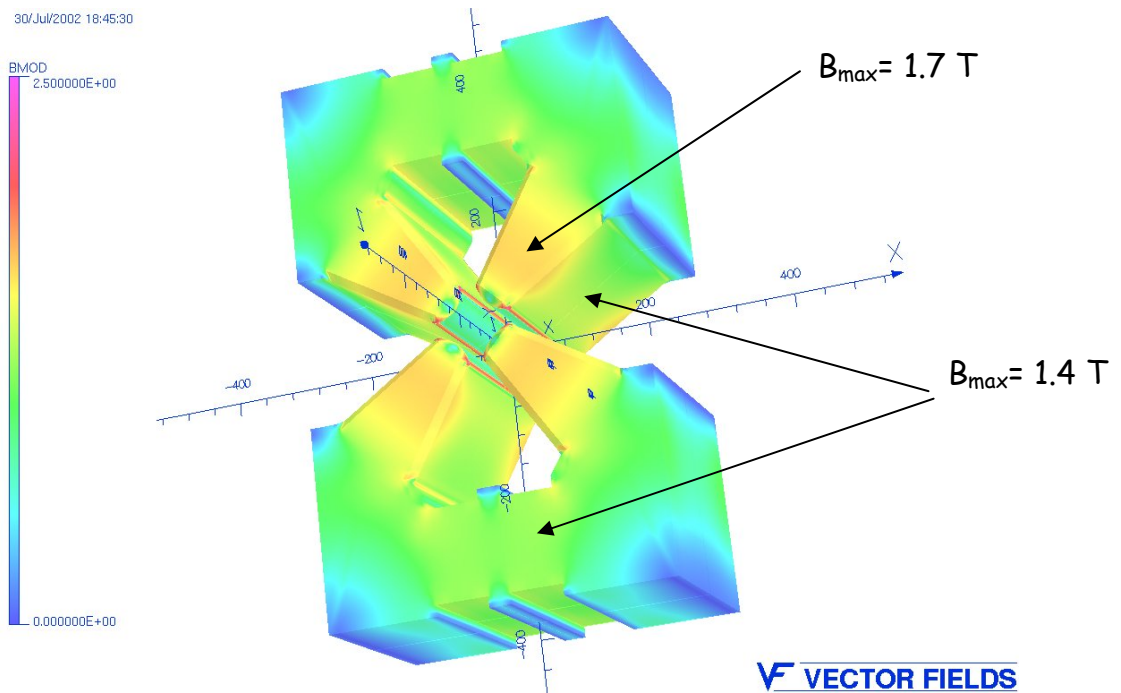


Figure 10: Iso valeurs du champ magnétique dans le quadripôle

1° - Zone utile initiale:

On présente ici l'évolution de la section courante (Fig. 11) en fonction de la profondeur du chanfrein d'extrémité. Il est assez facile d'obtenir une homogénéité des intégrales de gradient de l'ordre de quelques 10^{-4} dans une zone de $\pm 30 \text{ mm}$. Un chanfrein de 11 à 12 mm de profondeur le permet, et le "20 pôles" est compensé par le dodécapôle. Par contre, pour obtenir une zone utile de $\pm 35 \text{ mm}$, il faut faire une découpe d'au moins 13 mm et dans ce cas l'homogénéité du gradient passe par un maximum d'au moins $2 \cdot 10^{-3}$.

Exprimées en taux d'harmoniques B_n/B_2 , où B_2 est le champ quadripolaire, on voit que pris individuellement, les termes dodécapolaires et "20 pôles" sont largement hors tolérances ($A_6 = +3.4 \cdot 10^{-3}$, $A_{10} = -0.4 \cdot 10^{-3}$). On peut éliminer le terme A_6 avec un chanfrein de l'ordre de 8 mm, mais le terme A_{10} est quasiment constant quelles que soient les découpes (Fig. 12).

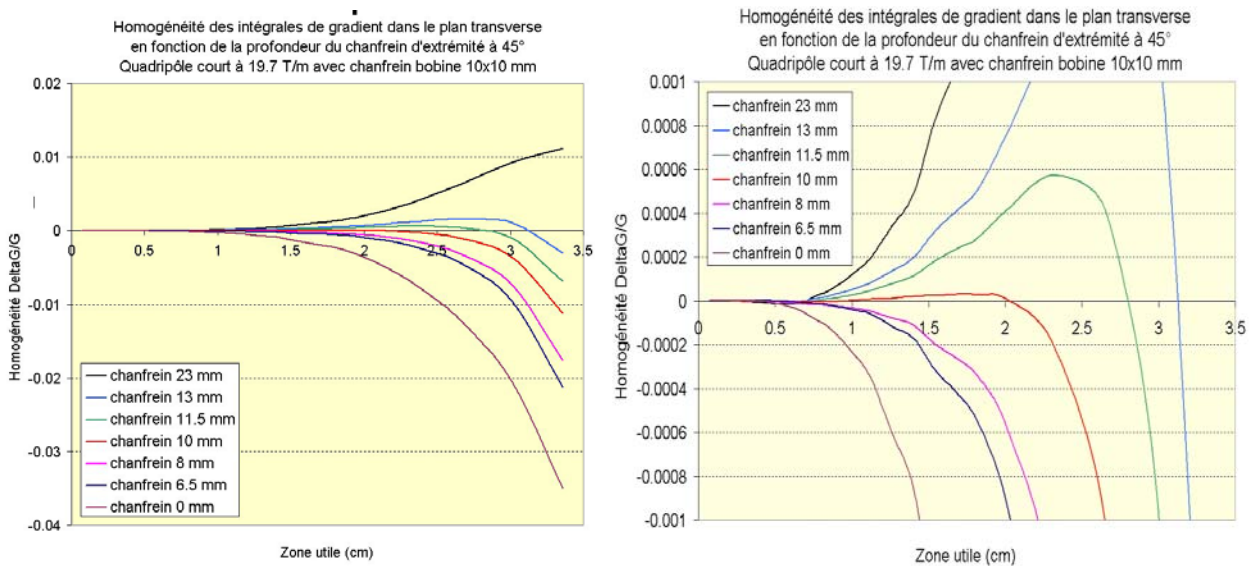


Figure 11: Zone utile du quadripôle en fonction de la profondeur du chanfrein d'extrémité à 45°

Comparaison quadripôle court anneau
pour $G=19.7$ T/m avec chanfrein bobine de 10x10 mm
Optimisation de la profondeur du chanfrein d'extrémité à 45°

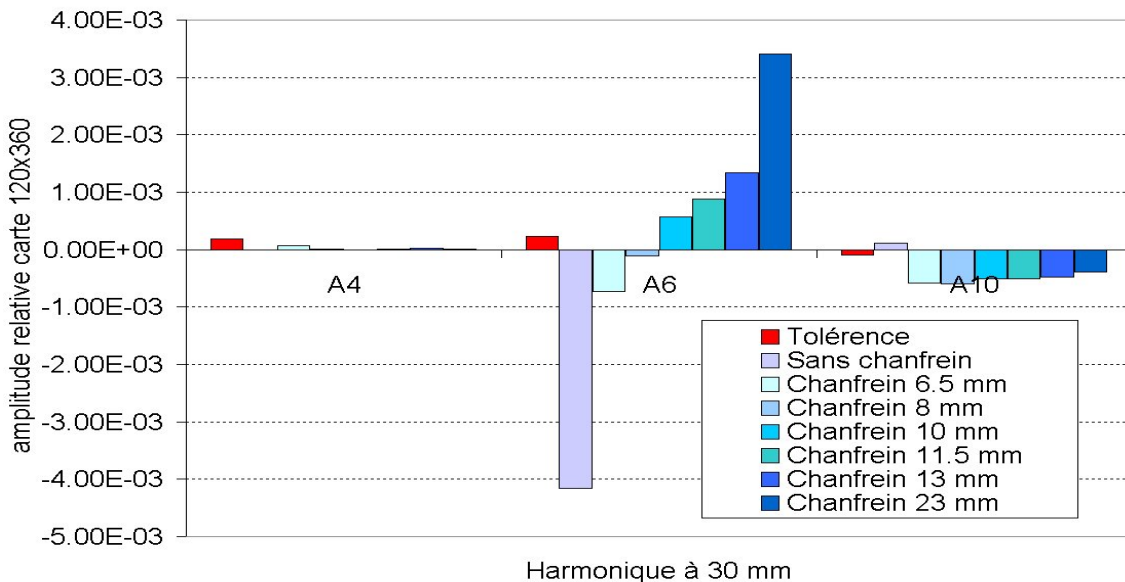


Figure 12: Développement harmonique du champ intégré sur un cylindre de rayon $R=30$ mm en fonction de la profondeur du chanfrein d'extrémité à 45°

2° - Élargissement de la zone utile:

On voit (Fig. 11) qu'il est difficile d'obtenir les tolérances requises à 35 mm. Or si on examine la géométrie du quadripôle directement issu de l'APD, on voit que le chanfrein de dégagement pour la bobine intervient pour une part importante dans la découpe de l'extrémité du pôle. Une des premières propositions pour élargir la zone utile a été de réduire ce chanfrein de 10x10 mm à 2x2 mm (Fig.13).

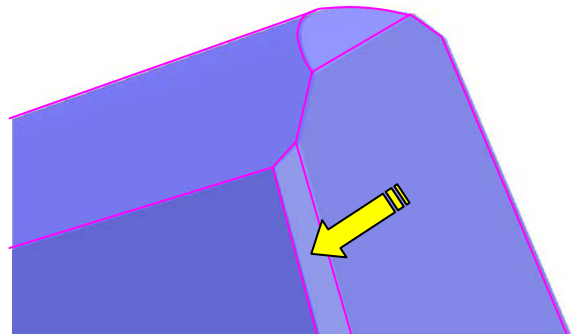
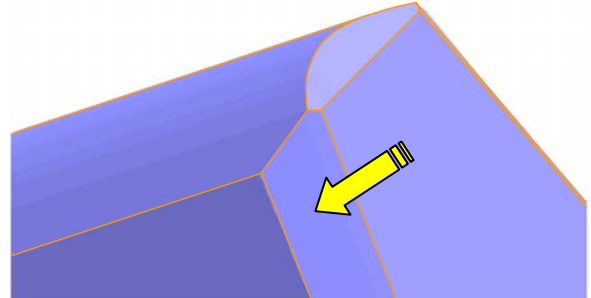
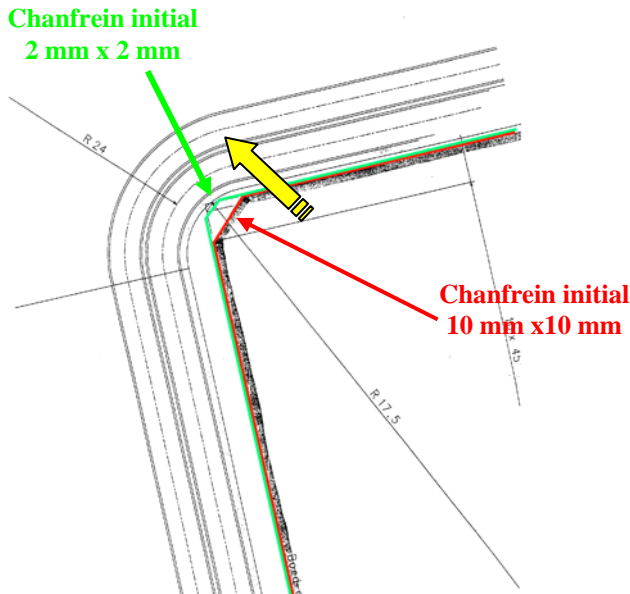


Figure 13: Réduction du chanfrein de dégagement des bobines

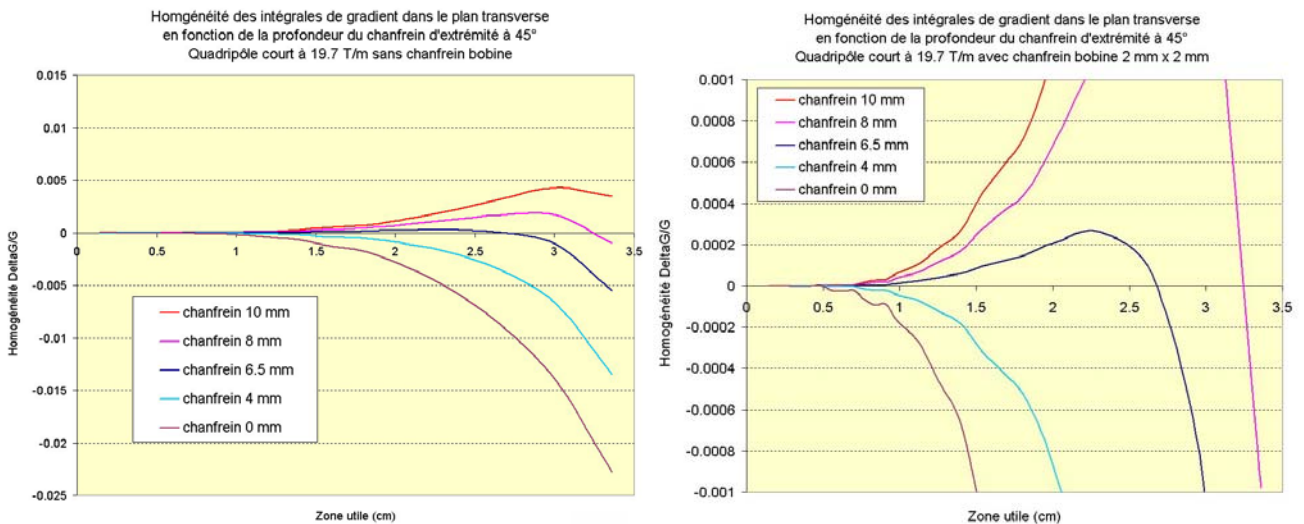


Figure 14: Effet de la réduction du chanfrein de dégagement pour les bobines sur l'homogénéité du gradient intégré

Avec un chanfrein de dégagement des bobines de 10 x 10 mm, l'hyperbole est tronquée, ce qui engendre un défaut important sur l'homogénéité des intégrales. Quand on réduit ce chanfrein à 2 x 2 mm (Fig. 14), la zone utile pour une même tolérance est allongée de 5 à 10 mm.

Cette configuration de chanfrein qui laisse toujours la place nécessaire à l'introduction de la bobine a donc été définitivement adoptée. Les taux d'harmoniques ont été largement diminués (Fig. 15).

On voit maintenant qu'une profondeur de chanfrein entre 4 mm et 6.5 mm permet d'éliminer le terme dodécapolaire.

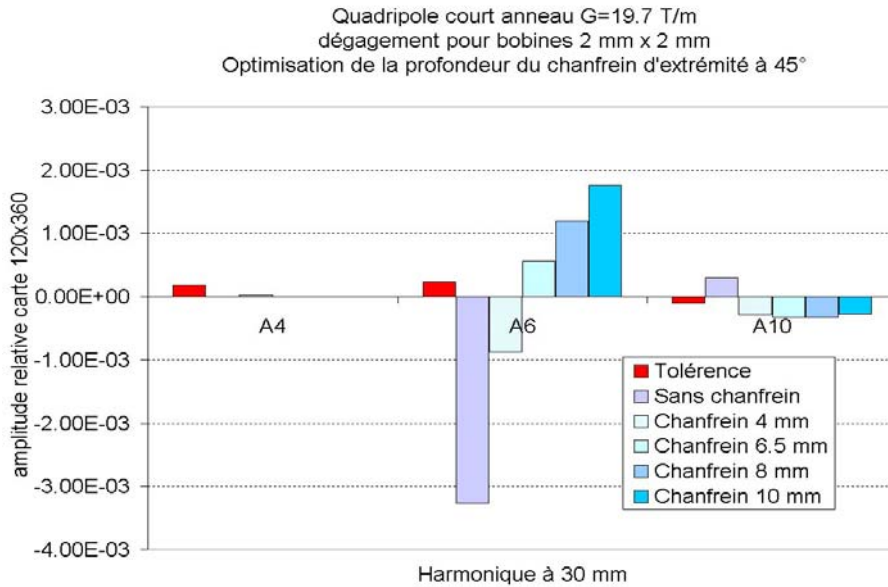


Figure 15: Réduction du taux d'harmoniques en passant à un dégagement de bobine de $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$

3° - Correction dans la section courante :

Pour corriger le terme "20 pôles" négatif qui apparaît avec la découpe du chanfrein d'extrémité, une solution consiste à obtenir une surcompensation positive de ce terme en 2D en retouchant le profil de la section courante. L'effet recherché est obtenu en rapprochant les « cornes » des pôles (Fig. 15) de quelques centaines de microns. Plusieurs types de modifications ont été envisagés et sont représentés sur la figure 16.

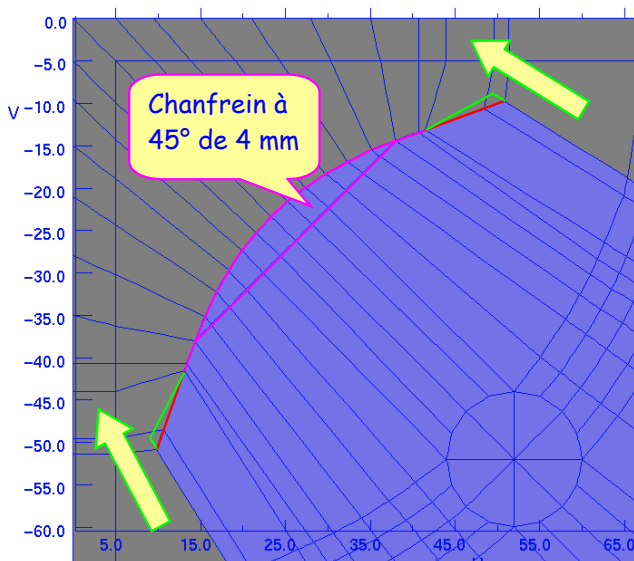


Figure 15: Modification de la section courante

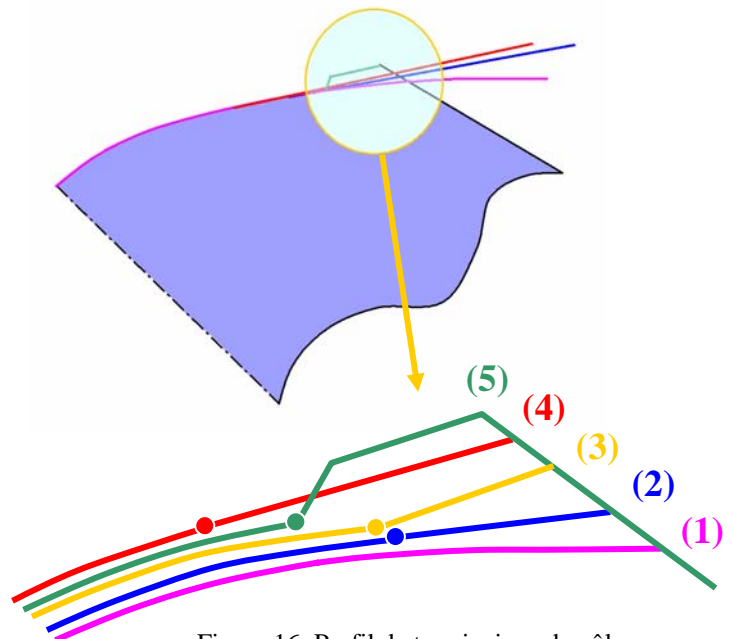


Figure 16: Profil de terminaison de pôle

Le profil (1) correspond à l'hyperbole parfaite jusqu'au bord du pôle. Le profil (2) est le profil de base actuel avec une hyperbole suivie d'une tangente à cette hyperbole pour rejoindre le bord du pôle. Le profil (3) consiste à s'articuler sur le point de tangence précédent pour rajouter du fer en extrémité de pôle. Avec un profil de type (4), on essaye de remplacer le profil de type (3) en reculant le point de tangence sur l'hyperbole de manière à éviter une découpe concave de la tôle élémentaire. Le profil (5) est une sorte de shim rapporté.

L'effet d'un profil de type (5) en 2D est représenté sur la figure 17. Selon l'épaisseur du shim, on contrôle l'amplitude du défaut induit, "12 pôles" et "20 pôles". L'ajustement de l'épaisseur est obtenu après contrôle de l'amplitude des 2 termes intégrés en 3D.

La procédure consiste d'abord à éliminer le terme "20 pôles" en ajustant l'extrémité de la section courante, puis à rechercher la valeur de la profondeur du chanfrein d'extrémité à 45° qui permet d'éliminer le terme dodécapolaire. En effet, la variation de la profondeur du chanfrein n'influe pas sur l'amplitude du terme "20 pôles".

Une épaisseur d'environ 500 μm serait nécessaire pour parvenir à la tolérance requise dans la version du profil (5). Ce profil conviendrait dans la mesure ou il est rapporté sur le pôle et ne fait pas partie de la tôle élémentaire. Il impose dans de cas de shimer indépendamment tous les quadripôles, ce qui complique l'assemblage.

Pour la découpe, il serait plus simple d'envisager un profil de type (4). Cependant, le fait de rapprocher le point de tangence du centre du pôle ne permet pas d'obtenir la tolérance requise.

Le profil de type (3) induit le même effet qu'un profil de type (5). Différentes valeurs de translation du point d'extrémité du pôle dans la section courante ont été envisagées. On constate que la correction est beaucoup plus efficace. En choisissant une surépaisseur de 500 μm , on a créé un défaut positif de $5.5 \cdot 10^{-2}$ avec un profil de type (3) alors qu'un profil de type (5) ne nous donne qu'un défaut de $2.5 \cdot 10^{-2}$. Les résultats obtenus en 2D avec le profil de type (3) sont résumés sur la figure 18.

Le profil retenu sera donc un profil du type (3).

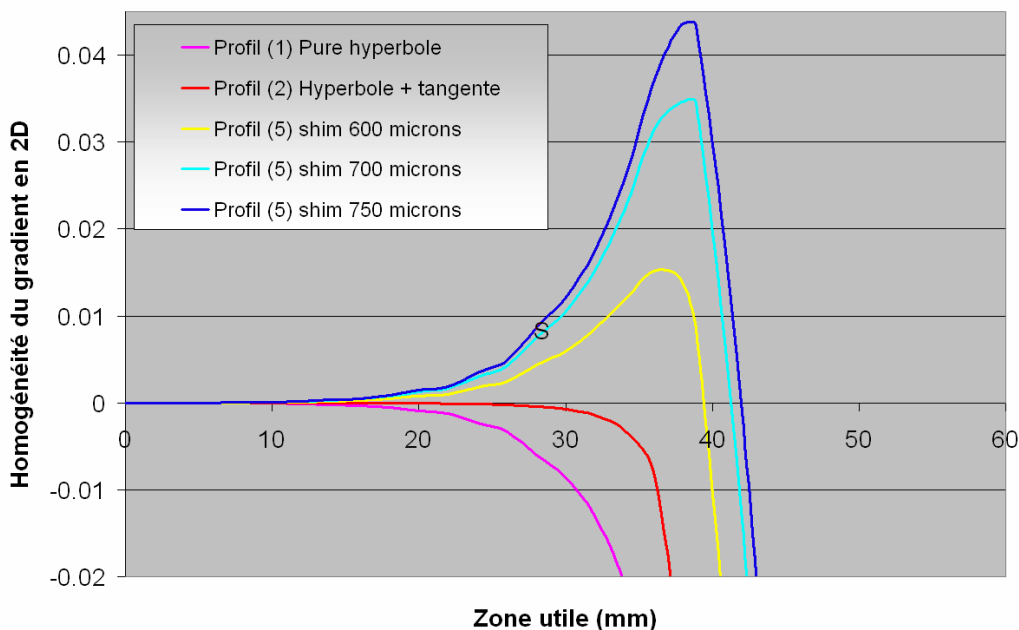


Figure 17: Effet d'un shim en extrémité de pôle dans la section courante (Profil de type 5)

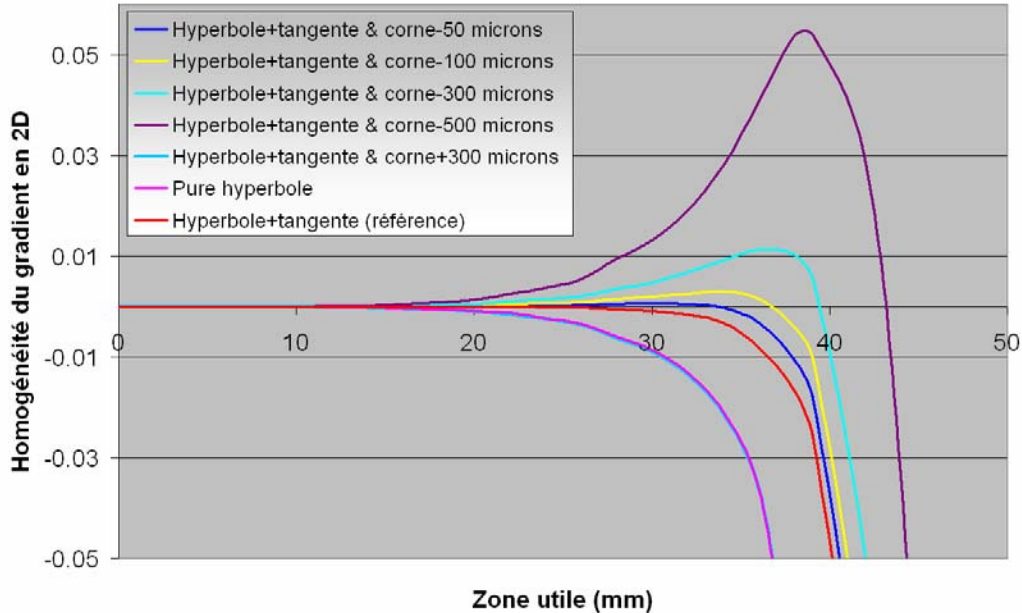


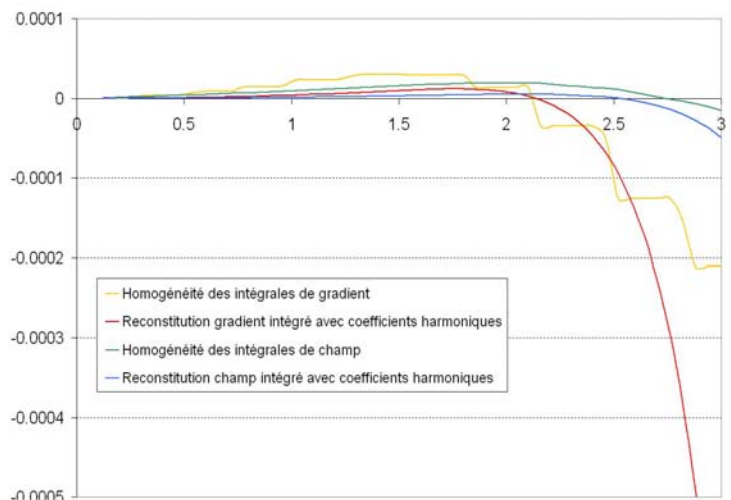
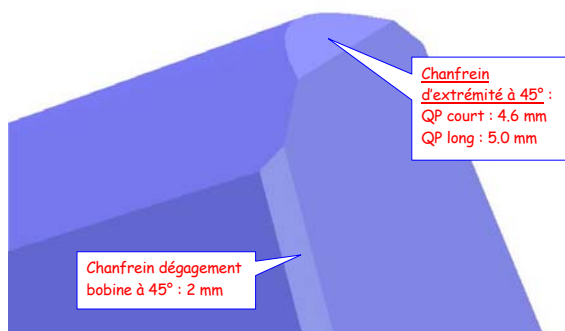
Figure 18: Effet d'un déplacement de l'extrémité du pôle (corne) dans la section courante (Profil de type 3)

4° - Géométrie définitive pour le quadripôle court:

Nous commençons d'abord par ajuster en 3D le terme "20 pôles" en choisissant comme point de départ une géométrie d'extrémité avec une profondeur de chanfrein de 4 mm. Nous observons sur la figure 20 que l'élimination du terme "20 pôles" est obtenue par un rapprochement des cornes polaires de 200 μm . Mais le terme dodécapolaire est hors tolérance, de l'ordre de $-4 \cdot 10^{-4}$. Il est nécessaire de chanfreiner d'avantage l'extrémité.

Nous reprenons donc l'étude en fixant le rapprochement des cornes polaires de 200 μm , et en faisant varier la profondeur du chanfrein entre 4 mm et 6 mm (Fig. 21). L'ajustement final pour éliminer le dodécapole nous donne un enfoncement du chanfrein d'extrémité de 4.6 mm (Fig. 19).

Figure 19: Quadripôle final
Géométrie et zone utile



Anneau de stockage de SOLEIL - Etude extrémité du quadripôle court pour $G=19.7 \text{ T/m}$

Décomposition harmonique à $R=30 \text{ mm}$

Optimisation de la profondeur du chanfrein d'extrémité à 45° - Dégagement bobines $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$

Optimisation du 20 pôles par ajustement de la section courante (SC)-Rapprochement des cornes polaires de $2 \times 200 \mu\text{m}$

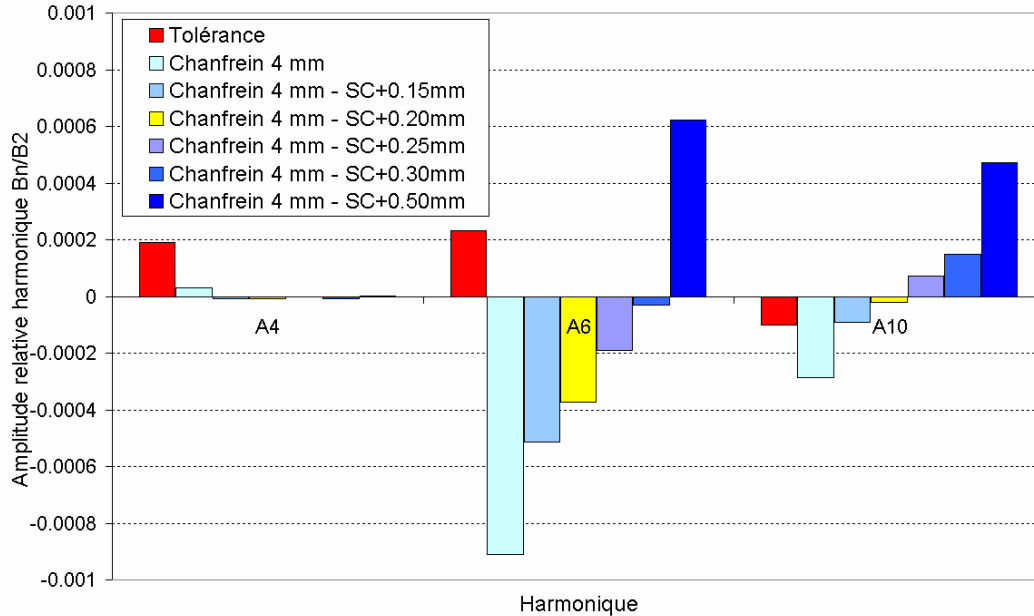


Figure 20: Evolution du taux d'harmonique en fonction du rapprochement des cornes polaires sur une géométrie avec un chanfrein d'extrémité de 4 mm

Anneau de stockage de SOLEIL - Etude extrémité du quadripôle court pour $G=19.7 \text{ T/m}$

Décomposition harmonique à $R=30 \text{ mm}$

Optimisation de la profondeur du chanfrein d'extrémité à 45° - Dégagement bobines $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$

Optimisation du 20 pôles par ajustement de la section courante (SC)-Rapprochement des cornes polaires de $2 \times 200 \mu\text{m}$

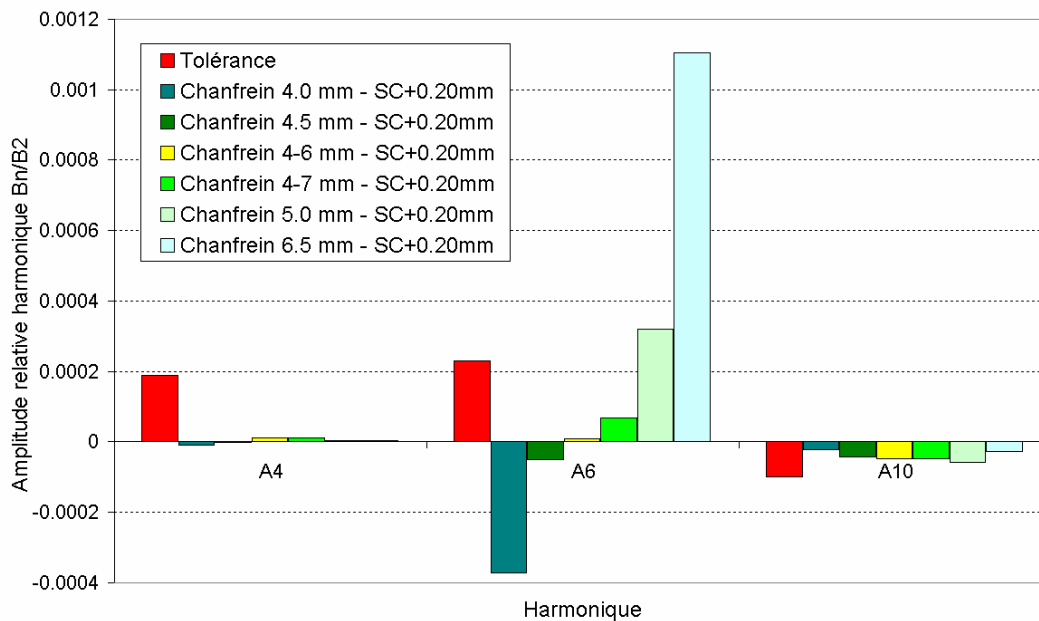


Figure 21: Elimination du terme dodécapolaire par réglage de l'enfoncement du chanfrein d'extrémité sur une géométrie avec un rapprochement des cornes polaires de $200 \mu\text{m}$

5° - Comparaison quadripôle long - quadripôle court:

La géométrie retenue pour le quadripôle court présente les caractéristiques suivantes :

- chanfrein d'extrémité à 45° avec un enfoncement de 4.6 mm
- Dégagement pour les bobines de 2 mm x 2 mm
- Rapprochement des cornes de pôle de 200 μm (espace entre 2 cornes diminué de 400 μm)

Si nous ne changeons ni la géométrie d'extrémité, ni la section courante, le simple allongement du quadripôle nous donne un terme dodécapolaire négatif de $-2 \cdot 10^{-4}$, et un terme "20 pôles" positif de $4 \cdot 10^{-5}$ (courbe bleu Fig. 22). En valeur absolue, le quadripôle reste toujours dans la tolérance pour une zone utile de 30 mm.

Il est cependant possible de réduire considérablement le terme dodécapolaire en effectuant une découpe de 5 mm au lieu de 4.6 mm (courbe verte Fig. 22).

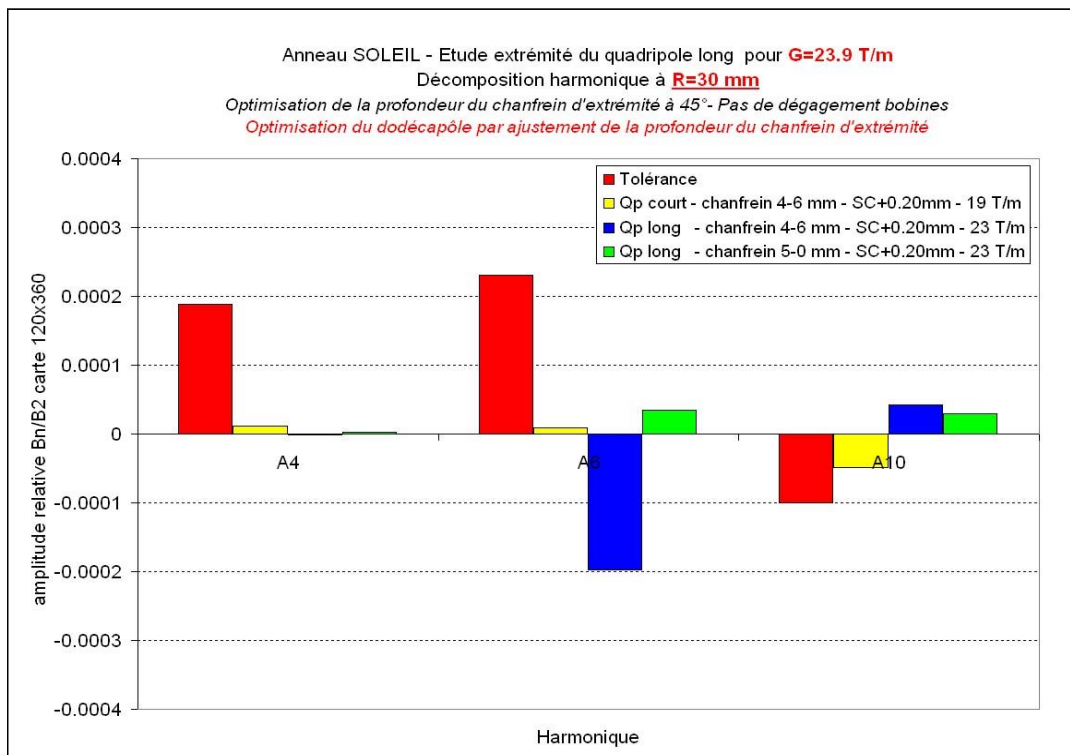


Figure 22: Comparaison quadripôle court / quadripôle long

V° - CONCLUSIONS :

Le quadripôle de l'Anneau de stockage du synchrotron SOLEIL a été modélisé avec TOSCA.

Les différentes études réalisées ont permis d'optimiser à la fois la section courante et la géométrie d'extrémité de l'aimant en minimisant les taux d'harmoniques néfastes pour l'optique - dodécapôle et "20 pôles".

Les développements harmoniques « 2D intégrés » ont été effectués sur un rayon de 30 mm. Nous ne donnons pas de valeurs pour l'extension horizontale de la zone utile à 35 mm. Pour observer la zone utile à 35 mm, des cartes de champ seront fournies à l'équipe SOLEIL qui effectuera une décomposition harmonique par un fit polynomial.

Le profil de la section courante est composé d'une hyperbole terminée par une portion de droite initialement tangente à l'hyperbole. L'extrémité de cette portion de droite, correspondant à la corne polaire, est décalée de 200 µm de manière à réduire l'espace inter-cornes.

Le chanfrein d'extrémité est un chanfrein à 45° dont la profondeur est de 4.6 mm pour le quadripôle court.

Cette géométrie est applicable au quadripôle long, mais l'influence de l'extrémité par rapport à la partie centrale est plus faible, ce qui a pour conséquence une modification de la décomposition harmonique du champ intégré. Un enfoncement plus important de 5 mm au lieu de 4.6 mm permet de retrouver un contenu harmonique largement à l'intérieur de la tolérance tout en conservant la même section courante.