



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

DSM - DAPNIA

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DEPARTEMENT D'ASTROPHYSIQUE, DE PHYSIQUE DES PARTICULES,
DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DE L'INSTRUMENTATION ASSOCIÉE
SERVICE D'ÉTUDE DES ACCÉLÉRATEURS

DATE : 14 juin 2001

N° RÉF. : DAPNIA/SEA/PH 2001/37

Pascal BALLEYGUIER, pascal.balleyguier@cea.fr

François SIMOENS, fsimoens@cea.fr

Explication de l'écart entre les réglages déduits d'une mesure
par perturbation du champ électrique et du champ magnétique

TABLE DES MATIERES

Explication de l'écart entre les réglages déduits d'une mesure par perturbation du champ électrique et du champ magnétique _____

1. Problème : écart entre les positions des pistons réglés selon le type de champ perturbé	4
2. Mesures comparatives après le réglage déduit de la perturbation du champ électrique	6
2.1. Mesure électrique / mesure magnétique	6
2.2. Ecart entre les positions des pistons	7
2.3. Variations de la phase dues à la perturbation des objets utilisés	8
3. Simulations Mafia	9
3.1. Description	9
3.2. Interprétation des simulations	12
4. Interprétation des mesures	13
4.1. Ecart relatif entre les champs réels et les champs obtenus par perturbation	13
4.2. Effet des perturbateurs sur la courbure de la tension	17
5. Conclusion	18

1. Problème : écart entre les positions des pistons réglés selon le type de champ perturbé

Le réglage d'un tronçon de maquette de RFQ à l'aide des pistons a été testé à partir de la perturbation des champs en 2 positions transverses différentes (référence [1]) :

1. sur la bissectrice de chaque quadrant, ce qui équivaut à perturber le champ magnétique à l'aide d'une ogive métallique (cercles jaunes de la figure 1);
2. près de l'axe de passage du faisceau, en guidant une sphère diélectrique de diamètre 7 mm en appui sur l'extrémité des électrodes (cercles verts de la figure 1): la variation de phase mesurée est alors proportionnelle au champ électrique.

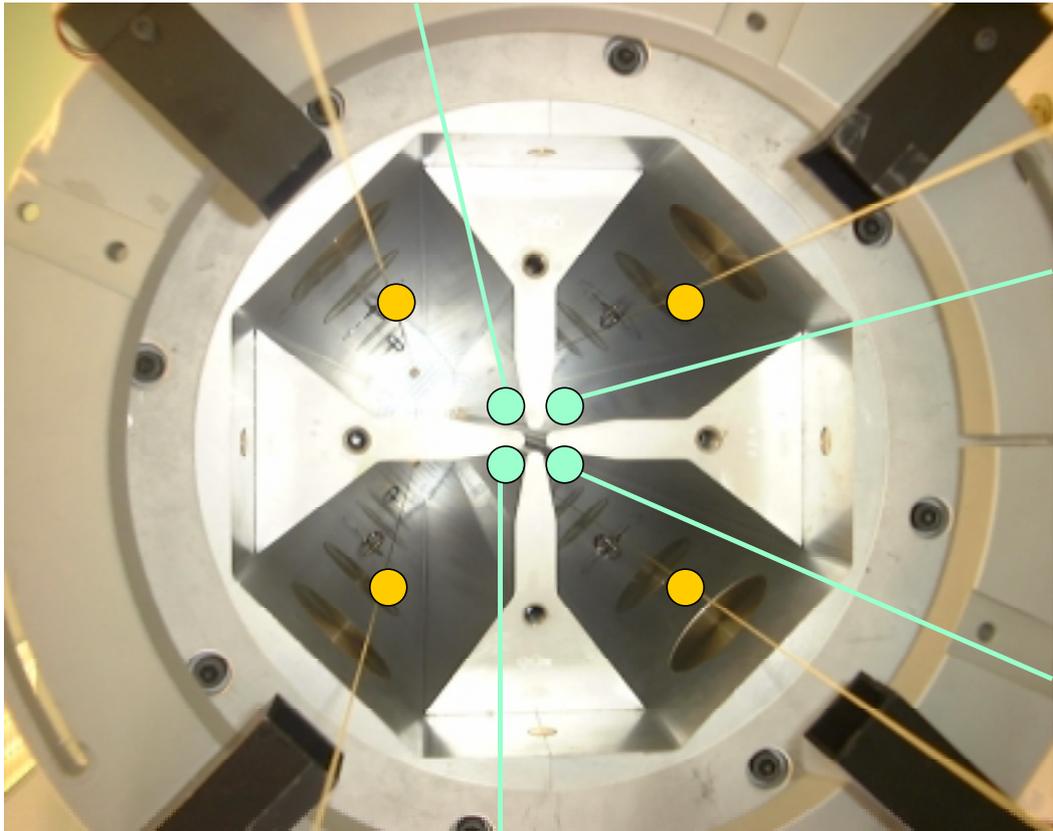


figure 1: photographie de la maquette montrant les 2 positions transverses testées

A l'issue de 3 itérations de réglage, les valeurs suivantes ont été obtenues:

	Perturbation de E	Perturbation de H	Objectif
f_Q	352,198 MHz	352,199 MHz	352,2 MHz
$\Delta U_Q(z)$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	= cste $\Delta < 10^{-2}$
$\Delta U_S(z)$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$< 10^{-2}$
$\Delta U_T(z)$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$< 10^{-2}$

- Que les commandes soient déduites d'une mesure par perturbation du champ électrique ou magnétique, en 3 itérations:
 1. La fréquence de résonance du mode quadripolaire est égale aux 352,2 MHz visés;
 2. Les variations de la composante quadripolaire de la tension accélératrice sont inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$;
 3. Les composantes dipolaires S et T de la tension accélératrice sont au moins inférieures à $7 \cdot 10^{-3}$.

Cependant, comme l'illustrent les 2 tableaux suivants, les positions finales obtenues diffèrent selon le type de champ qui a été perturbé.

Positions finales des pistons déduites d'une mesure par perturbation du CHAMP MAGNETIQUE SUR LA BISSECTRICE:

	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	2.90	2.16	2.18	1.97	1.99	1.71	1.26	1.09
Q 2	2.89	2.78	3.46	3.64	3.46	2.90	2.16	2.14
Q 3	2.30	2.76	3.40	3.45	3.45	3.98	3.80	4.34
Q 4	1.72	1.65	1.58	1.27	1.46	2.25	2.41	2.72

max = 4,34 mm min = 1,09 mm
moyenne = 2,54 mm

Positions finales des pistons déduites d'une mesure par perturbation du CHAMP ELECTRIQUE:

	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	3.85	2.09	1.84	1.77	1.47	0.99	1.21	2.94
Q 2	5.39	2.19	1.87	2.73	2.96	2.03	1.92	4.28
Q 3	5.84	2.21	1.71	2.75	3.07	2.72	3.33	7.16
Q 4	3.67	1.57	1.10	1.23	1.02	1.11	2.07	5.21

min = 0,99 mm max = 7,16 mm
moyenne = 2,67 mm

On peut calculer l'écart entre les positions finales des pistons (voir le tableau ci-dessous).

Tableau des différences entre les positions finales après les 3 itérations de réglage déduites d'une perturbation de H moins celles déduites d'une perturbation de E

	1	2	3	4	5	6	7	8
Q1	-0.96	0.07	0.34	0.21	0.52	0.71	0.05	-1.85
Q2	-2.50	0.59	1.60	0.91	0.50	0.88	0.24	-2.14
Q3	-3.54	0.54	1.69	0.70	0.38	1.26	0.47	-2.82
Q4	-1.95	0.08	0.48	0.04	0.45	1.14	0.34	-2.49

Cette note donne une explication de ces différences basée sur la confrontation entre des résultats de simulations sous Mafia et des mesures expérimentales sur la maquette de RFQ.

2. Mesures comparatives après le réglage déduit de la perturbation du champ électrique

2.1. Mesure électrique / mesure magnétique

Après le réglage des pistons déduit de la perturbation du champ électrique, nous avons effectué des mesures par perturbation du champ magnétique sur la bissectrice sans modifier quoi que ce soit du point de vue mécanique.

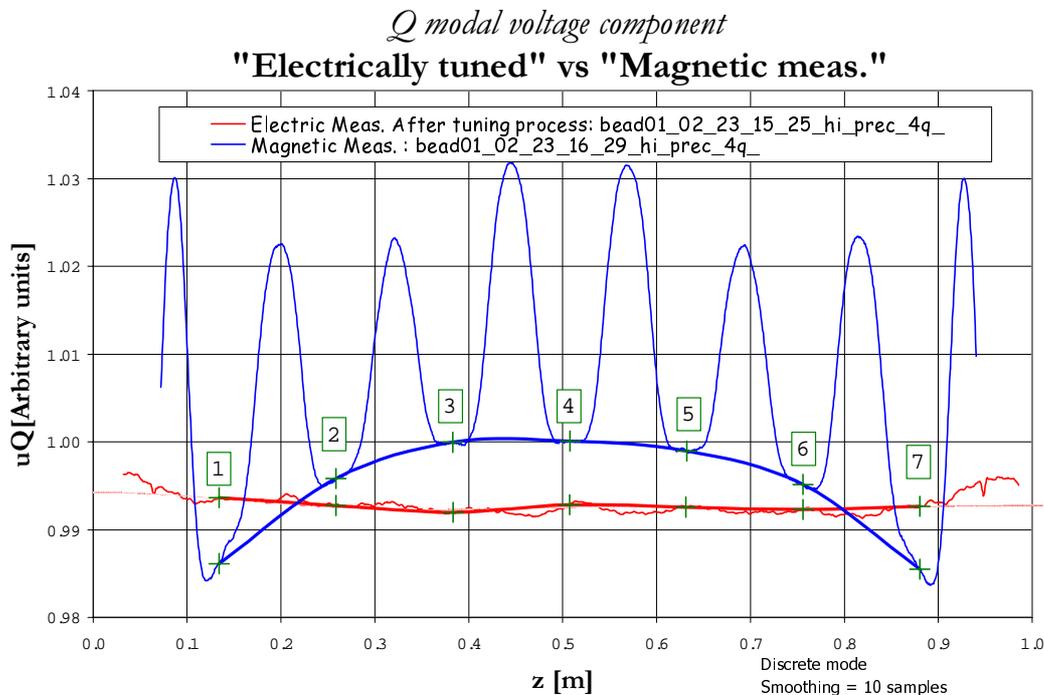


figure 2: composante quadripolaire de la tension mesurée après le réglage des pistons déduit de E superposée à celle mesurée par perturbation du champ magnétique

Comme le montre la courbe rouge de la figure 2, la composante quadripolaire obtenue après le réglage déduit de la perturbation de E est constante (rapport entre la valeur maximum et minimum $< 10^{-3}$).

La courbe bleue en trait fin consiste en la composante quadripolaire déduite d'une mesure par perturbation du champ magnétique avec les pistons aux positions identiques. Sélectionnés sur cette mesure répartis longitudinalement entre les pistons, les 7 points discrets dessinent une courbe:

1. constante entre les 3 points centraux numérotés 3, 4 et 5.
2. décroissante aux 2 extrémités.

2.2. Ecart entre les positions des pistons

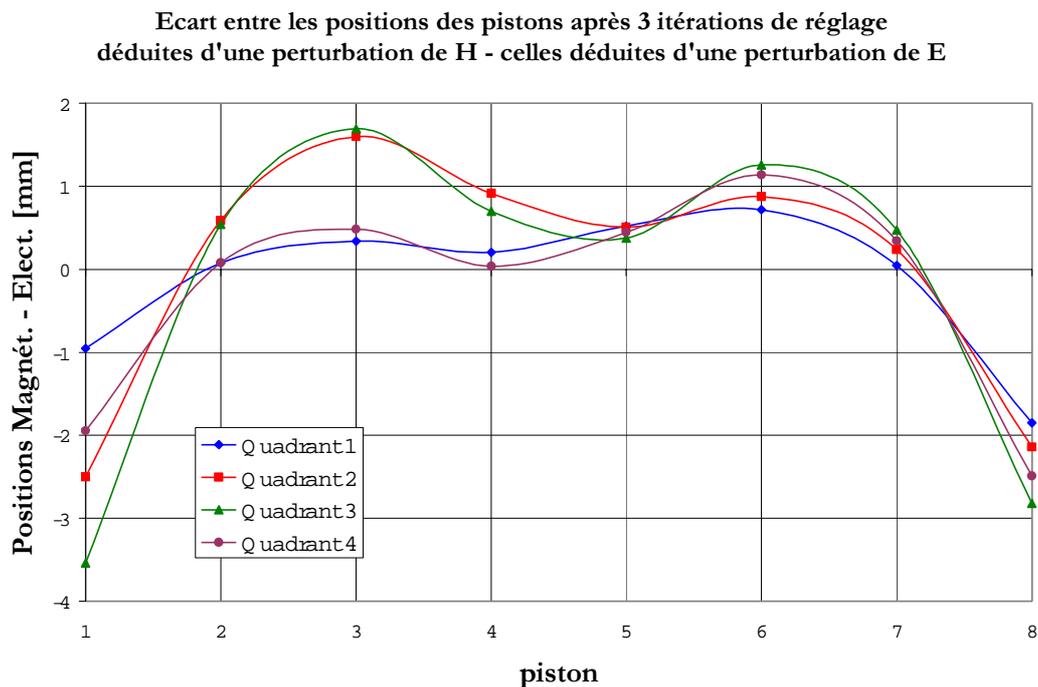


figure 3: différences entre les positions finales après les 3 itérations de réglage déduites d'une perturbation de H moins celles déduites d'une perturbation de E

On retrouve cette allure sur les courbes des différences entre les positions finales déduites d'une mesure par perturbation de H et celles générées à partir de la mesure de E (figure 3).

2.3. Variations de la phase dues à la perturbation des objets utilisés

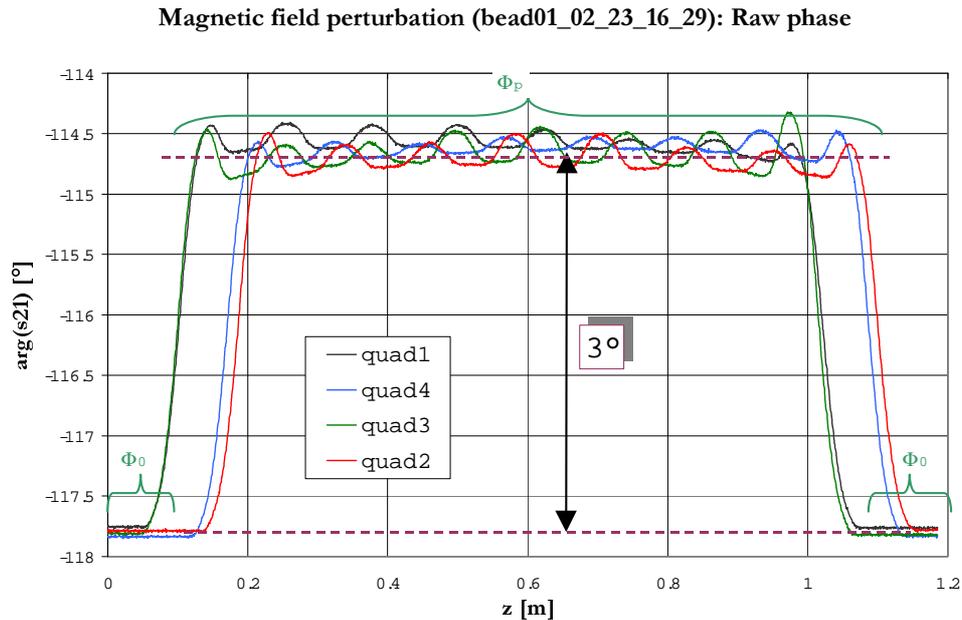


figure 4: phases brutes mesurées par perturbation du champ magnétique

Pour la mesure par perturbation du champ magnétique, une ogive métallique en titane a été utilisée: elle est constituée d'un cylindre de hauteur 8 mm et rayon 4 mm, terminé sur ses 2 faces par une demi-sphère de rayon 4 mm (volume $V_{\text{mag}} = 469 \text{ mm}^3$).

L'introduction de cet objet perturbateur a provoqué une augmentation de la phase d'environ **3 degrés** (figure 4).

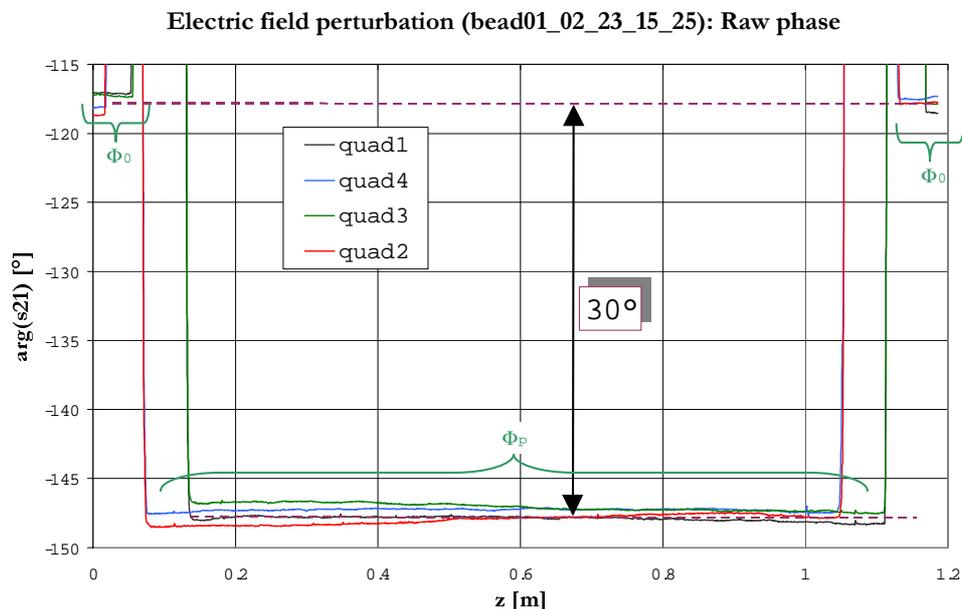


figure 5: phases brutes mesurées par perturbation du champ électrique

La mesure par perturbation du champ électrique a été réalisée à l'aide d'une sphère diélectrique en delrin de rayon 3,5 mm (volume $V_{\text{élec}} = 179,6 \text{ mm}^3$).

L'introduction de cette sphère a provoqué une diminution de la phase d'environ **30 degrés** (figure 5), soit une variation absolue 10 fois plus importante que pour la mesure par perturbation du champ magnétique.

3. Simulations Mafia

3.1. Description

La méthode de mesure des champs électrique et magnétique par perturbateur a été simulée avec MAFIA. Une cavité RFQ complète de 1 m a été maillée. On a d'abord calculé la fréquence de coupure en 2D de la section du RFQ avec le même maillage transverse: $f_{\text{coup}}=350,517$ MHz. Ensuite, les extrémités du modèle 3D ont été ajustées (en jouant sur la profondeur de l'encoche) pour conserver cette fréquence de résonance, de sorte que la fréquence effective de la cavité 3D f_{forc} soit exactement égale à la fréquence de coupure. Appelons f_0 cette fréquence commune: $f_{\text{coup}}=f_{\text{forc}}=f_0$. Comme on pouvait s'y attendre, cela se traduit par des champs électriques et magnétiques parfaitement constant en z, sauf dans les régions d'extrémité (figure 6).

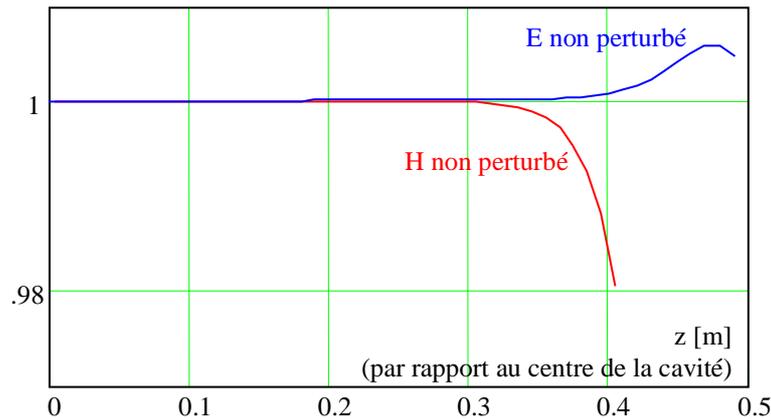


figure 6: Champs électriques et magnétiques dans la cavité de 1m simulée, sans perturbateur. Les champs sont quasiment constants dans toute la zone centrale: jusqu'à 0,33 m du centre pour H, et 0,40 m du centre pour E.

On a ensuite simulé un perturbateur métallique de 1 cm^3 dans un quadrant du RFQ, dans une zone de champ magnétique de cette cavité (figure 7 et figure 8) . En faisant plusieurs calculs, on a simulé pas à pas le déplacement du perturbateur parallèlement à l'axe Z, depuis le centre du RFQ jusqu'à son extrémité. Notons que, contrairement aux simulations habituelles où les symétries permettent de ne simuler qu'un huitième du RFQ, ici les quatre quadrants et les deux côtés du RFQ (par rapport au plan central) ont été simulés afin de reproduire les dissymétries transverses et longitudinales dues à l'objet perturbateur qui rompt la symétrie.

On a répété les simulations avec deux autres perturbateurs. Les objets perturbateurs simulés ont donc été successivement:

- n°1: perturbateur métallique ($10 \times 10 \times 10 = 1000 \text{ mm}^3$), dans la zone de champ magnétique (figure 8),
- n°2: perturbateur métallique plus important ($19,3 \times 19,3 \times 10 = 3700 \text{ mm}^3$), toujours dans la zone de champ magnétique (figure 9),
- n°3: perturbateur diélectrique $\epsilon_r=3$, ($3,75 \times 3,75 \times 10 = 140 \text{ mm}^3$), dans la zone de champ électrique (figure 10).

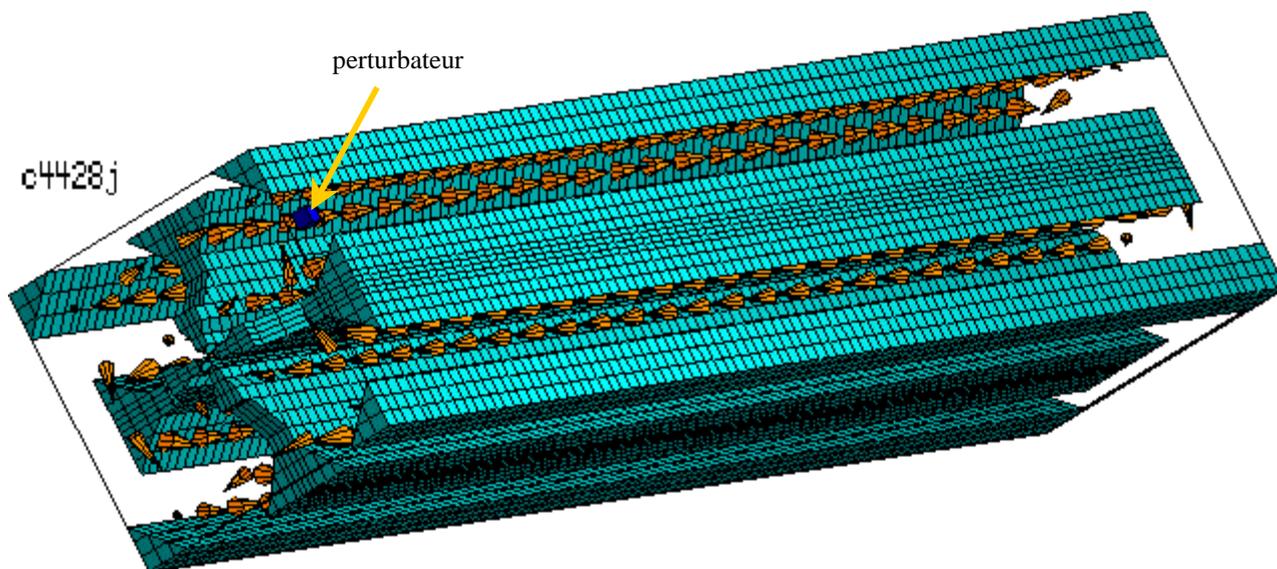


figure 7: Simulation de la cavité de 1m avec perturbateur n°1 (métallique 10 x 10 x 10 dans la zone magnétique)

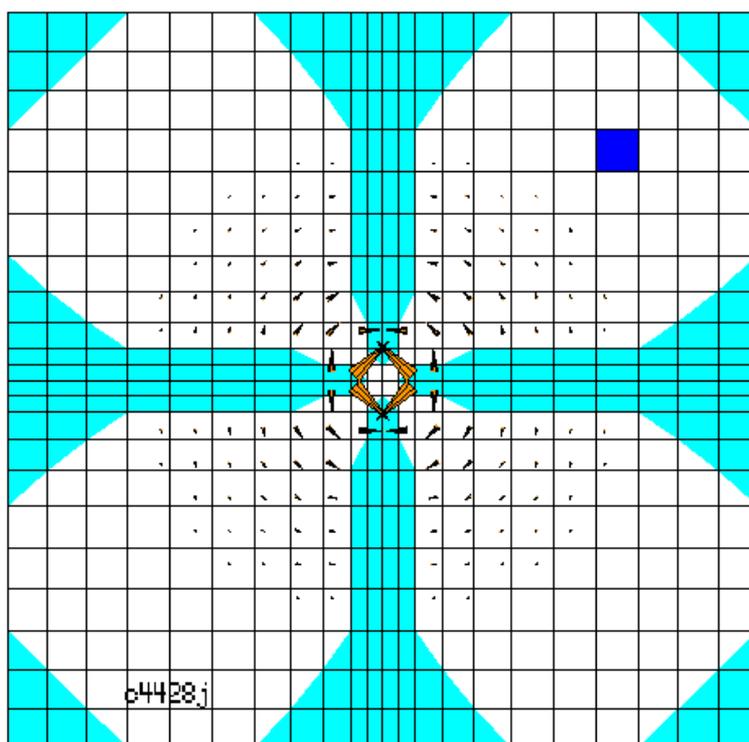


figure 8 : vue en coupe du perturbateur n°1: métallique 10 x 10 x 10 dans la zone magnétique.

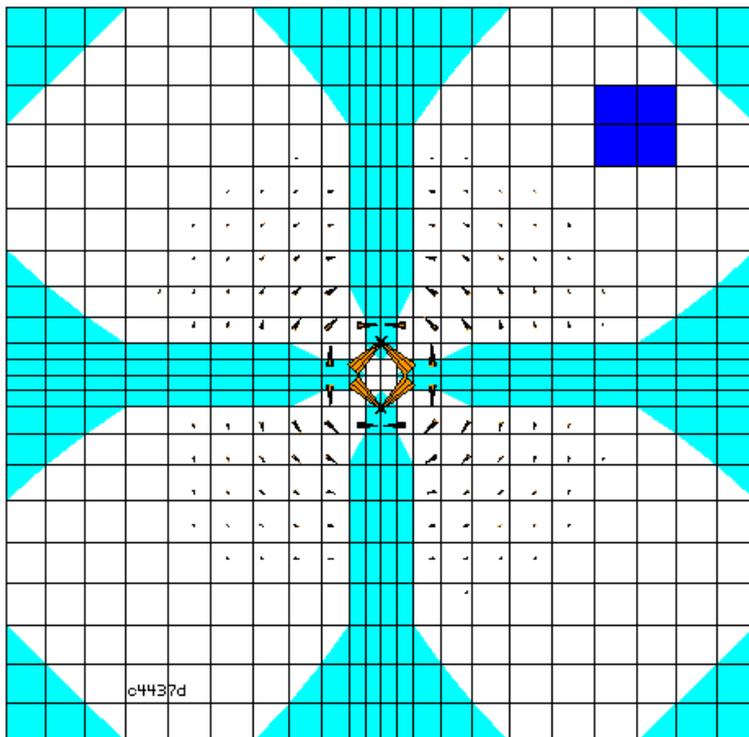


figure 9 : vue en coupe, perturbateur n°2: métallique 19,3 x 19,3 x 10 dans la zone magnétique

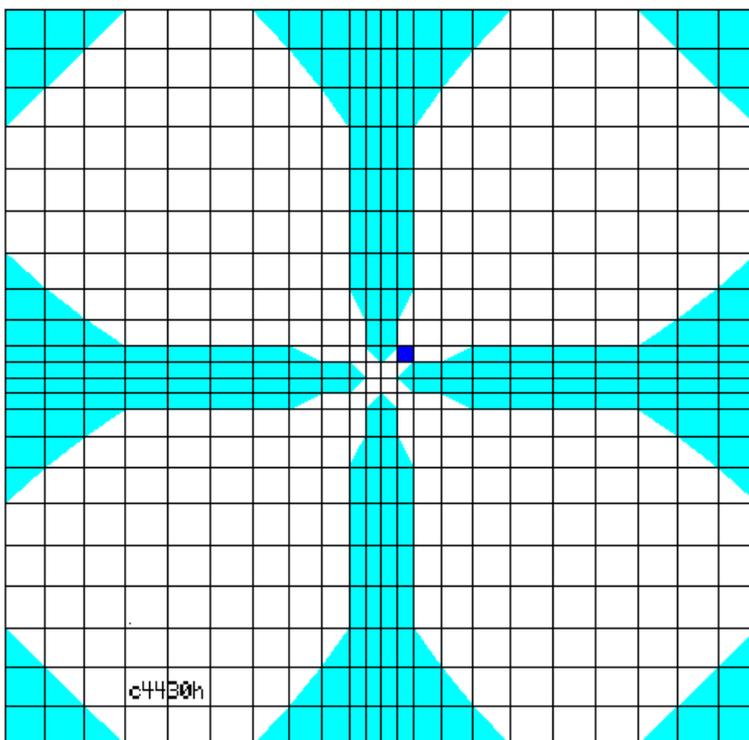


figure 10 : vue en coupe, perturbateur n°3 : diélectrique 3,75 x 3,75 x 10 dans la zone électrique

Pour chaque perturbateur et chaque position, on a relevé la variation de fréquence de résonance due à la présence du perturbateur, et on en a déduit le champ en utilisant la formule de perturbation de Slater en $\sqrt{\Delta f}$ (figure 11). Pour chaque position on a également relevé la valeur du champ sans objet perturbateur.

3.2. Interprétation des simulations

On constate que les courbes de champs ne sont pas constantes: l'estimation du champ par la méthode de perturbation a introduit une courbure dans l'amplitude du champ. Cette courbure peut être exprimée sous forme d'un désaccord en fréquence virtuel Δf_{virt} , avec la formule désormais classique

$$\frac{\Delta f_{virt}}{f_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{V''}{V} \quad (1)$$

Par ailleurs, chaque objet perturbateur modifie la fréquence effective de la cavité qui devient $f_{pert} = f_0 + \Delta f_{pert}$. Donc, il introduit une variation appelée $\Delta f_{réel}$ de la fréquence de coupure 2D f_{coup} par rapport à la fréquence forcée de la cavité:

$$\Delta f_{réel} = f_{coup} - f_{pert} = -\Delta f_{pert}$$

On constate alors que le désaccord virtuel calculé par (1) est bien proportionnel et dans le même sens que $\Delta f_{réel}$. Néanmoins il est notablement plus important: un facteur 6 environ (figure 12). On interprète ceci comme un effet du second ordre du perturbateur. A défaut d'en donner une explication satisfaisante, on s'assurera que cet effet est conforme aux mesures sur la maquette, et que l'on peut le rendre négligeable en choisissant un perturbateur suffisamment peu sensible.

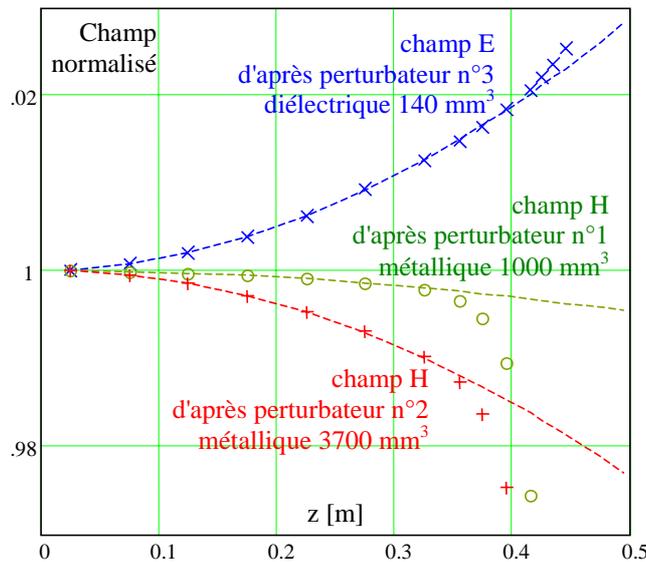


figure 11: Champs déduits des Δf obtenus par simulation des perturbations. Les lignes en pointillés sont des paraboles reproduisant la courbure des courbes de champ.

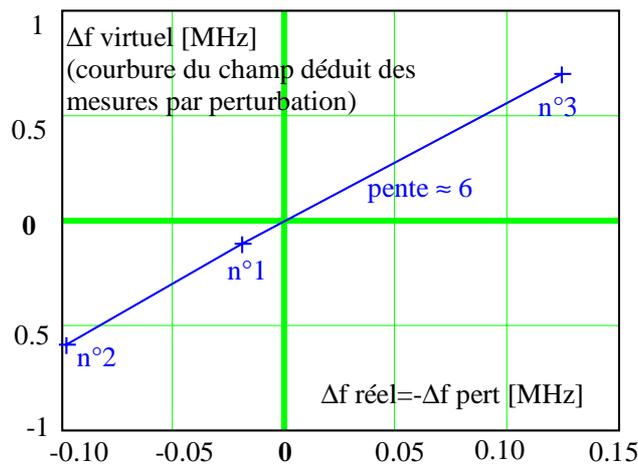


figure 12: Lien linéaire entre la courbure apparente du champ déduit de la formule en dérivée seconde (exprimée par un désaccord virtuel), et le décalage en fréquence introduit par le perturbateur simulé

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques pour les 3 objets perturbateurs simulés.

Le Δf virtuel est le désaccord en fréquence équivalent à la courbure de la loi de champ obtenue en appliquant la relation entre la dérivée seconde de la tension et la fréquence.

Le Δf « réel » est le désaccord en fréquence calculé par Mafia lorsque l'objet perturbateur est au centre du tronçon de cavité.

Objet perturbateur				Δf			
n°	matériau	Champ perturbé	volume	perturb.	"réel"	virtuel (courbure)	rapport
1	métal	H	1000 mm ³	+19 kHz	-19 kHz	-122 kHz	6.1
2	métal	H	3700 mm ³	+98 kHz	-98 kHz	-600 kHz	6.3
3	diélectrique $\epsilon_r = 3$	E	140 mm ³	-124 kHz	+124 kHz	+690 kHz	5.6

4. Interprétation des mesures

4.1. Ecart relatif entre les champs réels et les champs obtenus par perturbation

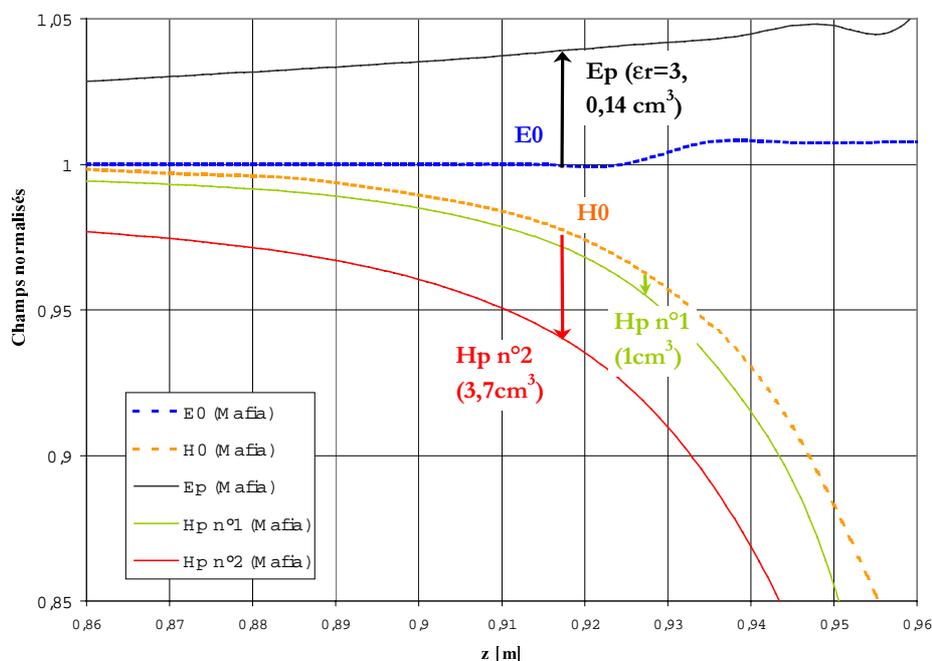


figure 13: Amplitudes des champs électriques et magnétiques simulés sous Mafia avec et sans perturbation

Les champs simulés et mesurés ont été interpolés et normalisés par rapport à leur valeur au milieu de la cavité (en $z=1,0146$ m/2). En première observation qualitative, on constate que :

- le champ électrique E_p perturbé simulé est supérieur à celui non perturbé E_0
- A l'inverse, le champ magnétique perturbé H_p est inférieur à celui relevé sans l'objet perturbateur H_0 .

L'application de la méthode par perturbation génère donc une estimation des champs mesurés où l'écart entre le champ magnétique et le champ électrique est accentué dans le sens d'une diminution relative de H par rapport à E.

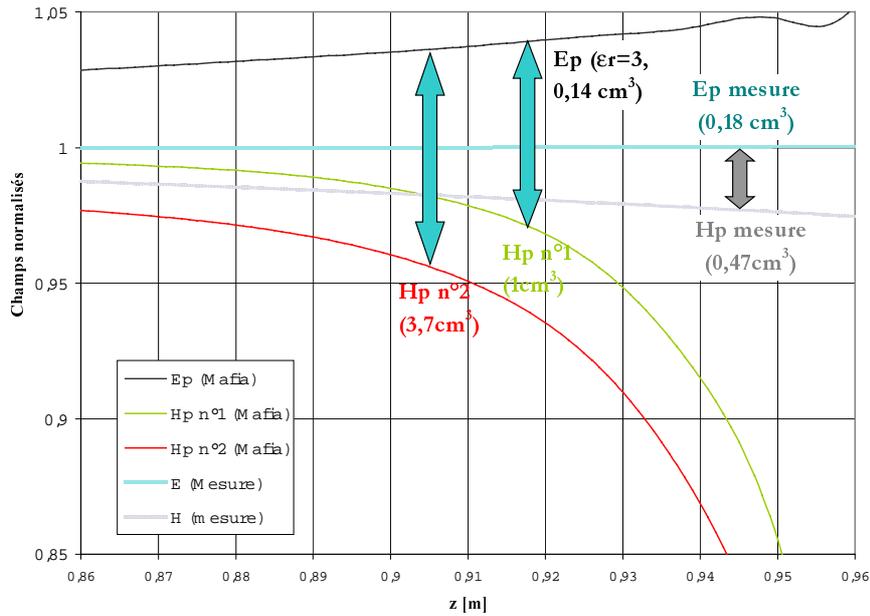


figure 14 : Ecart entre les champs magnétiques et électriques

En effet, au champ électrique mesuré constant après réglage des pistons correspond un champ magnétique mesuré de valeur relative inférieure (figure 14). L'écart relatif entre ces 2 grandeurs est logiquement moindre que ceux obtenus par les simulations puisque les polarisabilités des objets perturbateurs utilisés pour les mesures sont plus faibles. C'est ce même critère qui explique pourquoi l'écart relatif entre Ep et Hp est plus grand avec l'objet perturbateur simulé numéro 2 que le numéro 1.

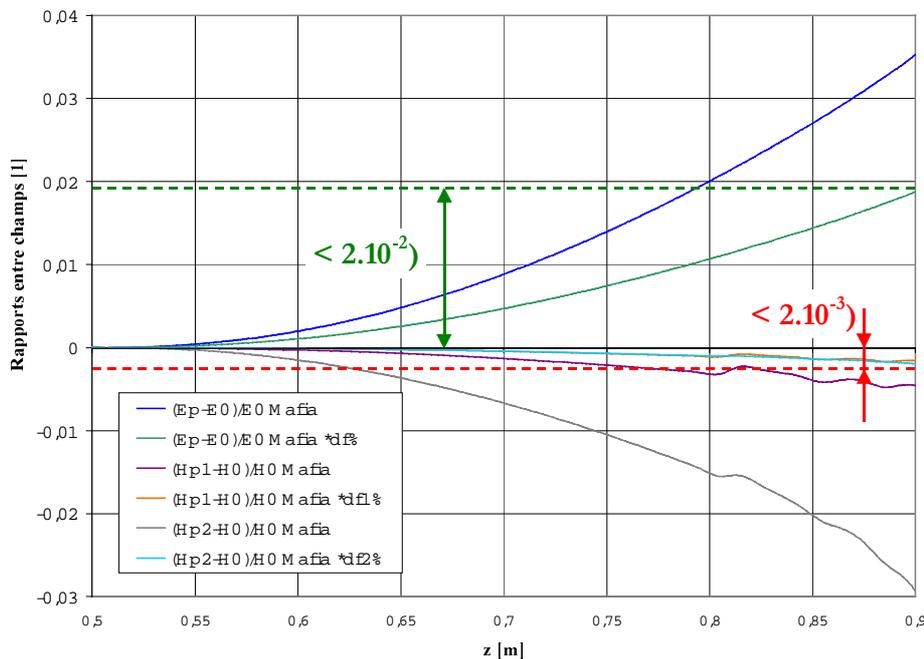


figure 15 : rapports entre les champs perturbés et non perturbés déduits des simulations.

La figure 15 représente les rapports entre champ non perturbé et champ perturbé déduits des simulations. Pour évaluer les variations relatives qui ont modifié les champs mesurés, il faut compenser les différences de polarisabilités des objets perturbateurs entre les simulations et les mesures. Cela consiste à multiplier les écarts entre champs par le quotient

$\Delta f_{mesure} / \Delta f_{mafia}$ (courbes « *df% » de la figure 15). On remarque que :

- Les variations du champ électrique ($<10^{-2}$) sont 10 fois plus importante que celles du champ magnétique ($<10^{-3}$).
- Les variations relatives du champ magnétique déduites des simulations sont identiques une fois la compensation des différences de polarisabilités effectuées.

Ces corrections peuvent être appliquées aux champs mesurés électrique et magnétique.

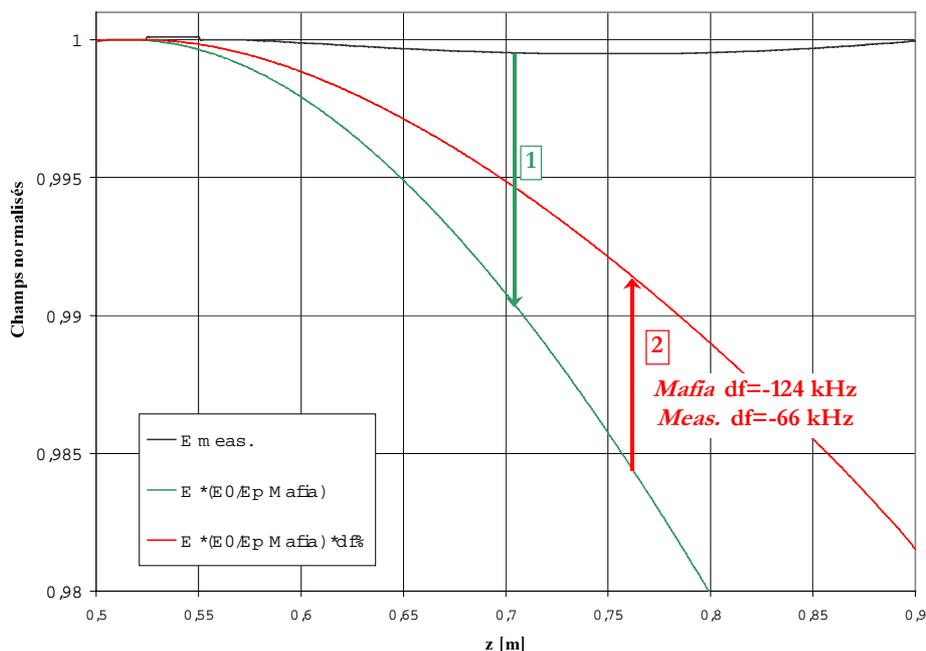


figure 16 : correction du champ électrique mesuré

Le champ électrique régnant effectivement est donc parabolique de courbure négative (figure 16).

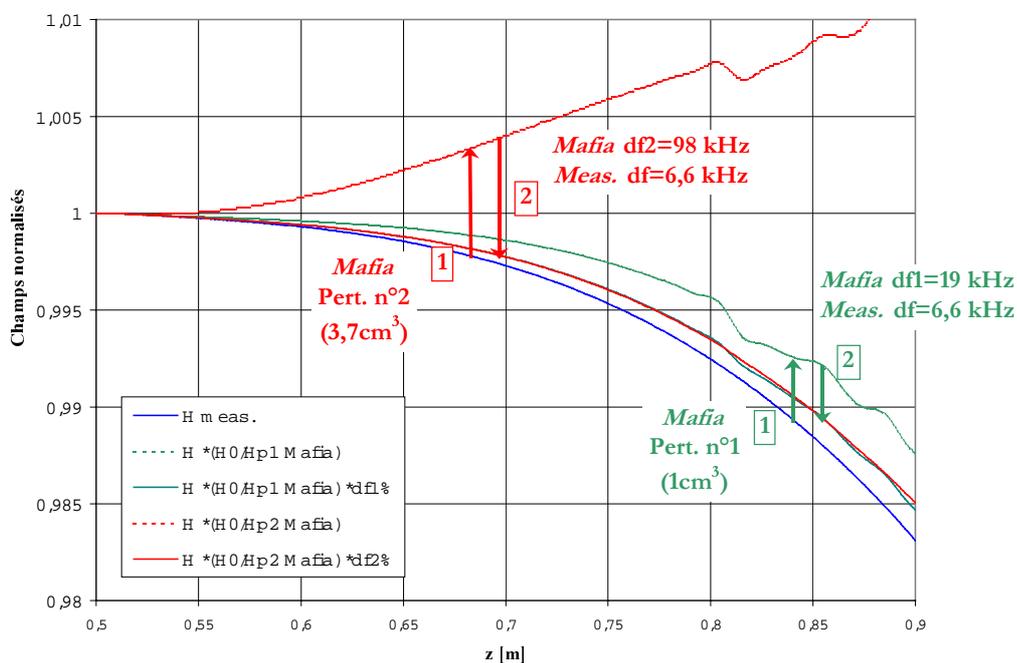


figure 17 : correction du champ magnétique mesuré

Le champ magnétique régnant effectivement est légèrement supérieur à celui mesuré (courbes verte et rouge de la figure 17).

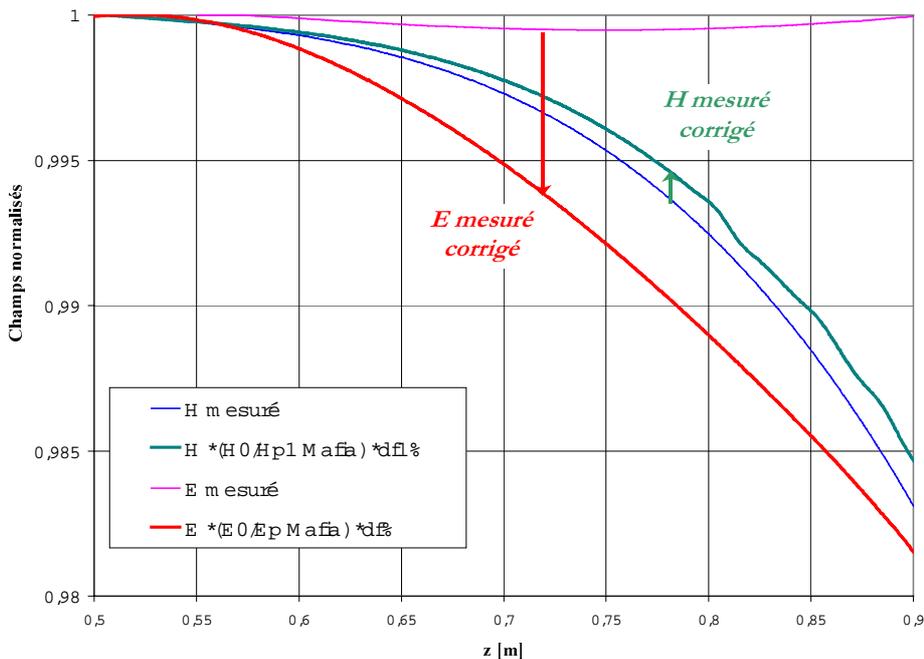


figure 18 : champs électrique et magnétique mesurés avant et après correction

Les champs électrique et magnétique mesurés devraient après corrections déduites des simulations être superposés sur la majeure partie de la longueur de la cavité. En effet, l'écart entre ces 2 grandeurs est très faible (figure 18).

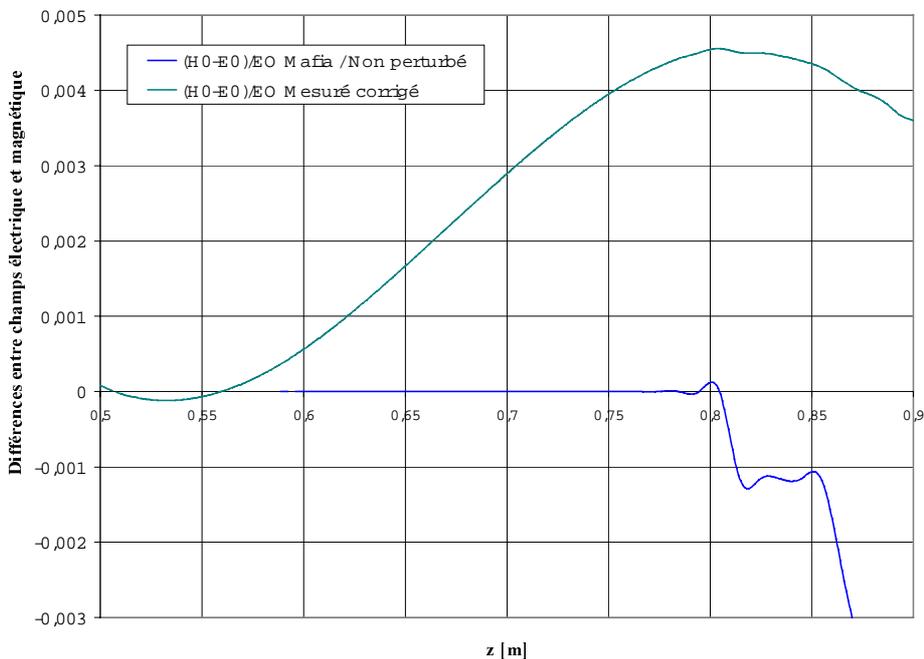


figure 19 : différences entre le champ magnétique et électrique « non perturbés simulés » (Mafia) et mesurés (corrigés)

Une autre manière de comparer les champs consiste à calculer l'écart relatif entre ces grandeurs (figure 19). Il reste inférieur à 5.10^{-3} au lieu d'être égal à zéro jusqu'à 200 mm de l'extrémité de la cavité. Cette erreur résiduelle négligeable confirme la validité de la corrélation entre les mesures et les simulations.

4.2. Effet des perturbateurs sur la courbure de la tension

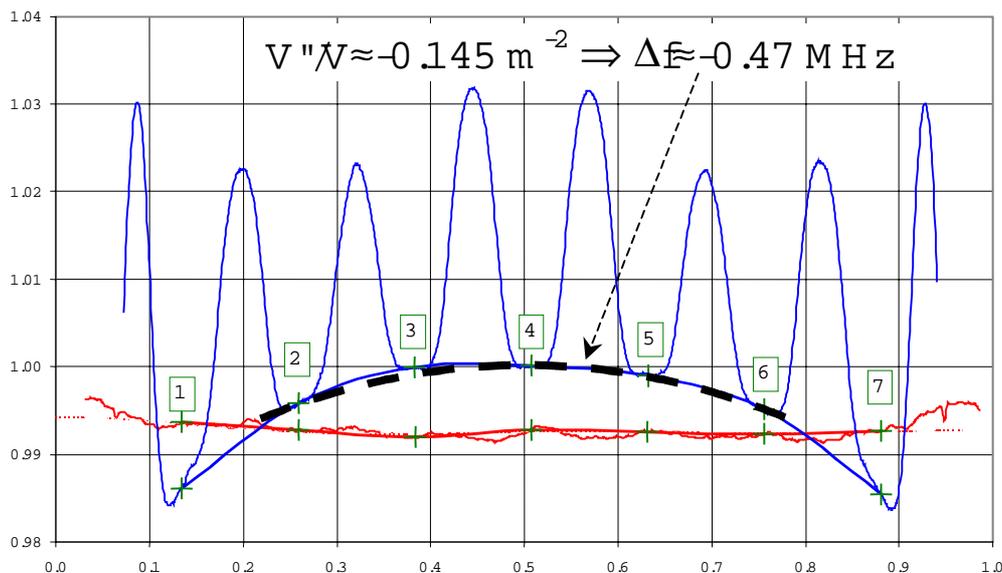
On calcule la perturbation en fréquence par: $\Delta f = \Delta\phi \times f / 2Q$ où $Q=1400$. On en déduit la courbure attendue dans les mesures en appliquant le coefficient 6.

Objet perturbateur				perturbation			
n°	matériau	Champ perturbé	volume	$\Delta\phi$ mesuré	$\Delta f_{pert} = \Delta\phi \times f / 2Q$	$\Delta f_{réel}$	Δf virtuel attendu
m1	métal	H	469 mm ³	+3° 52 mrad	+6.6 kHz	-6.6 kHz	-39.5 kHz
m2	diélectrique	E	180 mm ³	-30° 520 mrad	-66 kHz	+66 kHz	+395 kHz

Comme le champ a été réglé en se basant sur la mesure du perturbateur électrique, la courbe de tension réelle doit présenter la courbure opposée à celle due au perturbateur électrique, qui va s'ajouter à la courbure due au perturbateur magnétique. On déduit que la courbure attendue sur la mesure magnétique de la cavité réglée par mesure électrique est équivalente à un Δf virtuel de:

$$-(+395 \text{ kHz}) + (-39 \text{ kHz}) = -434 \text{ kHz}.$$

Par ailleurs, on déduit des mesures magnétique une courbure -0.145 m^{-2} , équivalente à $\Delta f = -470 \text{ kHz}$, ce qui est cohérent avec la valeur prédite.



5. Conclusion

- La différence constatée entre les mesures par perturbation du champ électrique et du champ magnétique s'explique par le fait que cette méthode suppose l'hypothèse de petites perturbations. Or pour notre application, au champ qui règne effectivement sans perturbation s'ajoute à la mesure une erreur du deuxième ordre liée aux objets perturbateurs. Ce phénomène a été confirmé par les simulations.
- L'écart entre le champ qui règne et celui mesuré par perturbation est important pour le perturbateur électrique utilisé (de l'ordre de 10^{-2}). On pourrait envisager une sphère diélectrique de taille inférieure, mais une limite inférieure est imposée par le fait que cet objet est guidé en étant en appui sur les extrémités des électrodes
- L'erreur liée au perturbateur magnétique utilisé est négligeable vis à vis de l'objectif fixé pour le réglage du RFQ. Pour minimiser cette erreur, il faut veiller à utiliser un perturbateur suffisamment petit tout en assurant un signal mesuré suffisant.

Référence :

[1] « Réglage d'un tronçon de maquette de RFQ à l'aide de ses pistons », F. Simoens, A. France & J. Gaiffier, référence Dapnia : DAPNIA/SEA-01-06, 04/2001