



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 : 2002/03/25

N/RÉF. : DAPNIA/SACM/IPHI2002/ 15

François SIMOENS

Alain France

Jacques GAIFFIER

Réglage d'une tension variable dans un RFQ de 2 m à l'aide des pistons d'accord

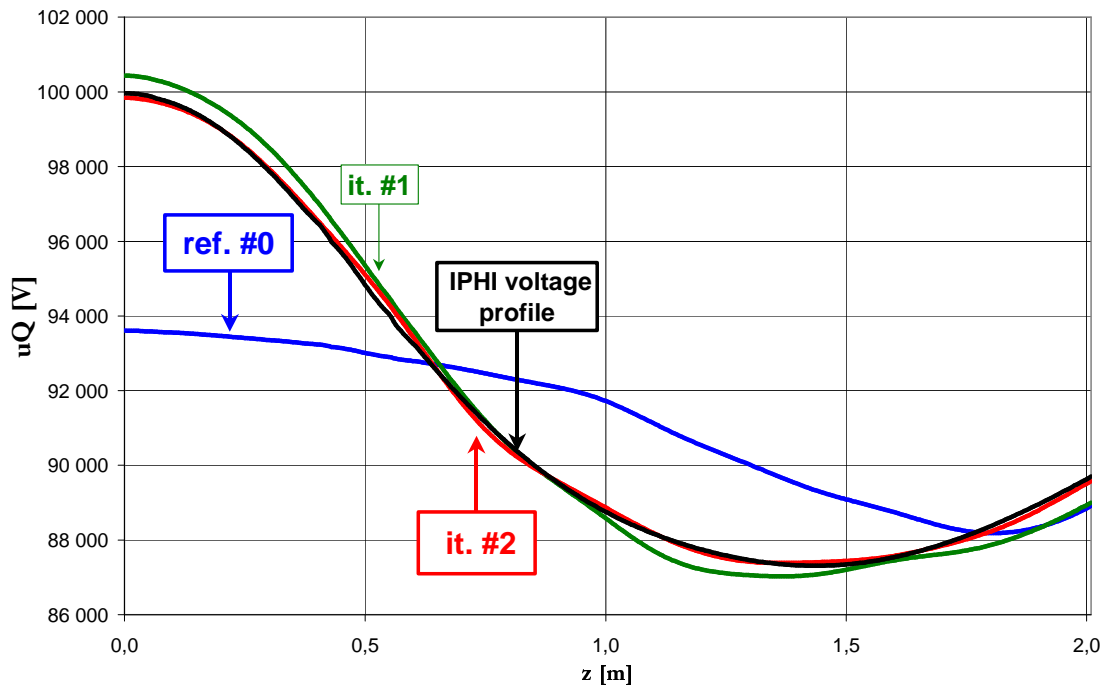


TABLE DES MATIERES

<i>Réglage d'une tension variable dans un RFQ de 2 m à l'aide des pistons d'accord</i>	<i>1</i>
1 Introduction	4
2 Conditions des tests	5
2.1 Description de la cavité	5
3 Réglage de la tension variable en 2 itérations	6
3.1 Caractéristiques du RFQ avant réglage	6
3.2 traitement du profil de RFQ 'brut' résultant des calculs 2D (Superfish)	7
3.2.1 Nécessité de traitements des données brutes	7
3.2.2 Génération du fichier du profil de tension	8
3.3 Paramètres du réglage de la tension variable	8
3.4 Evolution de la composante quadripolaire de la tension accélératrice	10
3.5 Evolution de la fréquence de résonance du mode accélérateur	11
3.6 Evolution des composantes dipolaires de la tension accélératrice	11
3.7 Evolution des écarts des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence	13
3.8 Evolution des coefficients modaux des composantes modales de la tension	14
3.9 Positions des pistons	15
3.9.1 Positions après les premiers déplacements	15
3.9.2 Positions finales des pistons après la deuxième itération	15
4 Application à la maquette de positions théoriques de pistons	16
4.1 Loi de tension de référence	16
4.2 Test 1 : Application des déplacements au RFQ à l'état brut	17
4.2.1 Caractéristiques du RFQ avant réglage	17
4.2.2 Déplacements déduits de la courbe "réponse des pistons" complète	18
4.2.3 Déplacements considérant la réponse des pistons d'après la seule pente à l'origine	19
4.2.4 Comparaison du résultat des 2 jeux de déplacements	21
4.2.5 Analyse des résultats	23
4.3 Test 2 : Application des déplacements au RFQ équilibré à 350,8 MHz	23
4.3.1 Caractéristiques du RFQ équilibré à 350,8 MHz	23
4.3.2 Déplacements appliqués	25
4.3.3 Résultat du test 2	26
4.3.4 Analyse des résultats	27
5 Conclusion	28
6 Références	29

1 Introduction

Dans le cadre de l'étude du réglage du RFQ du projet IPHI, nous avons réglé à l'aide des pistons d'accord une distribution longitudinale de tension variable dans un RFQ de 2 mètres de long présentant une électrode unique à section transverse constante.

Le profil de tension visé correspond à celui des 2 premiers mètres du RFQ du projet IPHI (figure 1). Nous avons choisi de régler cette portion de courbe décrite par la tension car elle présente les plus importantes variations d'amplitude et de dérivées premières.

Ce document expose comment tous les critères de réglage ont été atteints en 2 itérations de déplacements des pistons.

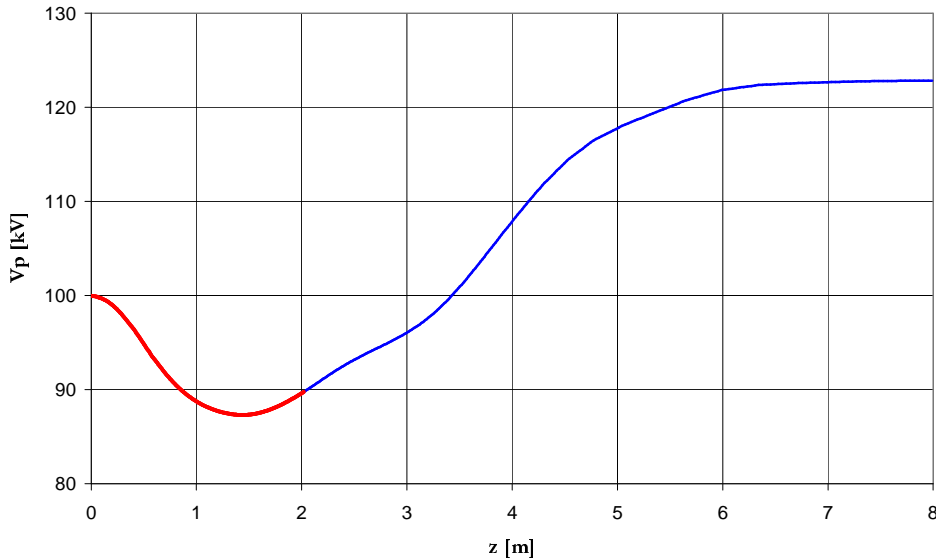


figure 1 : profil de tension du RFQ d'IPHI.

La partie rouge de la courbe correspond au profil des 2 premiers mètres réglé dans la maquette.

Des enfoncements théoriques de pistons ont été calculés à partir d'une méthode différente de réglage (référence [I]) : ils sont prédits de manière à obtenir un profil de tension variable qui coïncide avec celui du RFQ d'IPHI entre $z=0$ et $z=1,47$ m. Le résultat de ces distributions de pistons a été testé :

- D'abord directement sur la maquette de RFQ brute d'assemblage.
- Puis sur la maquette équilibrée à 350,8 MHz à l'aide des pistons en appliquant notre méthode de réglage.

2 Conditions des tests

2.1 Description de la cavité

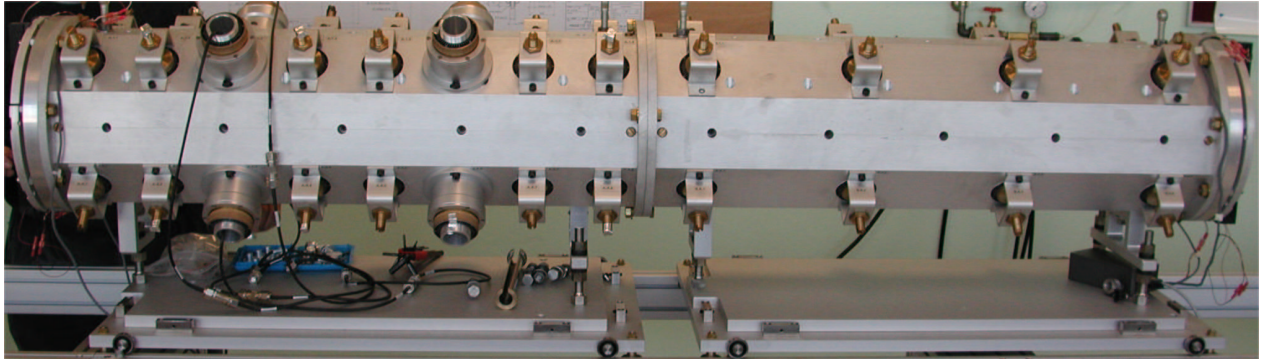


figure 2 : 2 tronçons de maquette de RFQ équipés d'électrodes continues sur 2 mètres

Deux tronçons de maquette de RFQ ont été assemblés :

- Le tronçon baptisé « A » (8 pistons par quadrant);
- Le tronçon « B » (4 pistons par quadrant).

	extrémité #1	piston A1	piston A2	piston A3	piston A4	piston A5	piston A6	piston A7	piston A8	jonction "A"- "B"	piston B1	piston B2	piston B3	piston B4	extrémité #2
position z [mm]	0	72,2	196,5	320,8	445,1	569,4	693,7	818	942,3	1004,6	1093,6	1365,8	1638	1910,2	2009,2

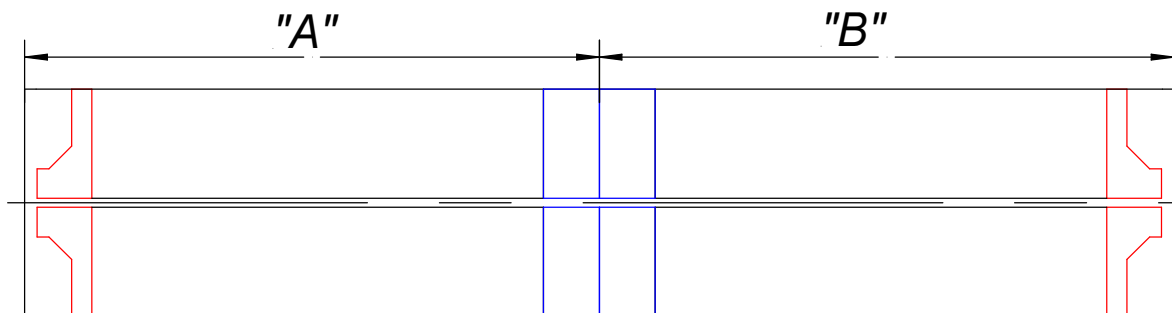


figure 3 : schéma des 2 tronçons "A" et "B" assemblés de manière à présenter une électrode unique

Les pièces principales constituant les électrodes à profil constant sont terminées de manière à présenter une électrode unique sur les 2 mètres de long de la cavité :

- Aux 2 extrémités de la structure des becs à encoche sont montés (pièces rouges de la figure 3).
- A la jonction des 2 tronçons, des becs pleins assurent la continuité des électrodes (pièces bleues de la figure 3).

Les distributions longitudinales de tension sont mesurées dans chaque quadrant par perturbation du champ sur la bissectrice à l'aide d'un objet métallique (diamètre=8 mm ; longueur=16 mm). Pour ces mesures par transmission, la cavité a été excitée à travers la matrice de distribution commutée en mode Q (référence [II]) et le signal reçu provenait de la boucle du plan transverse 6 du quadrant 1.

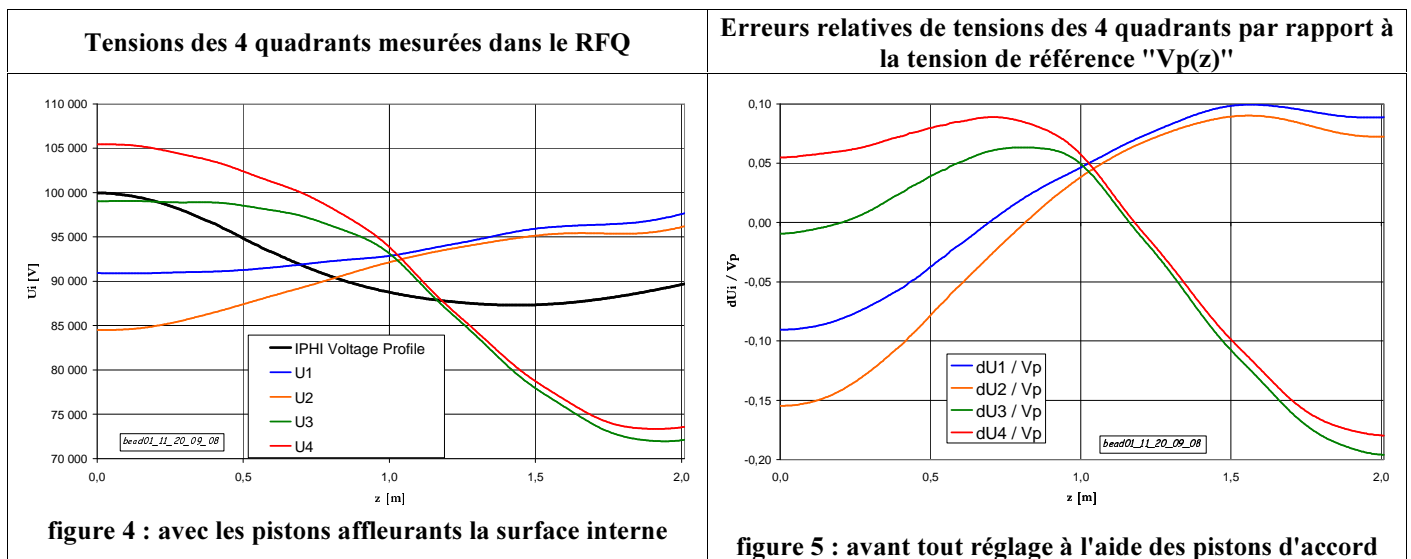
3 Réglage de la tension variable en 2 itérations

3.1 Caractéristiques du RFQ avant réglage

Initialement :

- Tous les pistons d'accord affleurent la surface interne de la cavité.
- Aucun pré-réglage n'a été appliqué.
- Les doigts de réglage des modes dipolaires sont montés sur les 2 plaques de fermeture de la cavité. Leurs longueurs ont été ajustées de manière à faire correspondre les fréquences des modes dipolaires mesurées avec celles du modèle. Cette procédure a été justifiée lors du réglage d'un profil constant dans cette même configuration de cavité résonante (référence [III]).

Dans ces conditions, on mesure une fréquence du mode accélérateur $f_Q=350,622$ MHz.



Les erreurs relatives des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence variable (3.2) varient entre $-9,9.10^{-2}$ et $-19,6.10^{-2}$ à comparer aux 10^{-2} minimum recherchés.

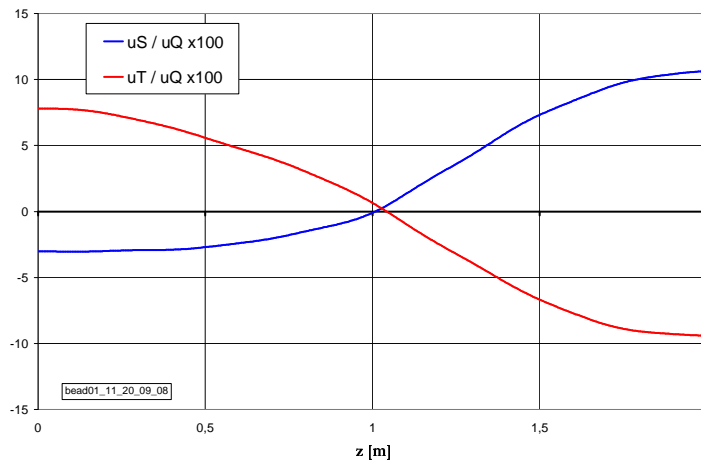


figure 6 : rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire avant réglage

	Fichier de mesure	Min(u_D / u_Q)	Max(u_D / u_Q)
Référence: pistons affleurants	Bead01_11_20_09_08	$-9,4.10^{-2}$	$10,6.10^{-2}$

On cherche à minimiser les composantes dipolaires u_S et u_T de la tension accélératrice de manière à ce que, pour tout z , $|u_D(z)/u_Q(z)| < 10^{-2}$, $u_D = u_S$ ou u_T . Avant tout réglage du RFQ de 2 mètres brut d'assemblage, u_S et u_T sont 10 fois présentes au sein de la tension accélératrice.

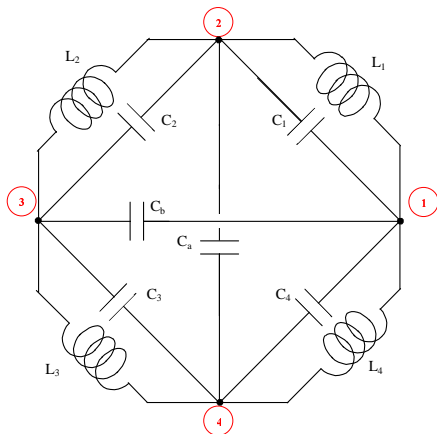
3.2 traitement du profil de RFQ 'brut' résultant des calculs 2D (Superfish)

3.2.1 Nécessité de traitements des données brutes

Le profil électrique du RFQ est défini en 611 points d'abscisse, correspondant aux 610 cellules accélératrices définies par la dynamique de faisceau (référence [IV]). Le modèle numérique utilisé pour l'analyse des mesures (estimation des erreurs longitudinales ou réglage des pistons d'accord), repose sur les paramètres suivants:

- la tension V_p entre électrodes,
- la capacité linéique parallèle C (entre électrodes adjacentes),
- la capacité linéique diagonale C_a (entre électrodes opposées),
- l'inductance linéique parallèle L (entre électrodes adjacentes).

Rappelons la définition des constantes électriques du schéma équivalent à la section transverse (figure 7).



Chaque quadrant constitue un circuit résonant L_k, C_k :

- La capacité linéique parallèle C_k (en F/m) est localisée entre les extrémités des électrodes, région qualifiée de « zone utile » pour la dynamique de faisceau. C'est là que règne principalement du champ électrique.
- Le fond du quadrant, où règne essentiellement du champ magnétique, est représenté par une inductance L_k (en H/m).

On introduit également une capacité qui représente le couplage entre 2 électrodes opposées, C_a et C_b respectivement entre les extrémités 2 et 4, 1 et 3.

Dans un RFQ parfait, pour tout $k=1$ à 4,
 $C_k=C, L_k=L, \text{ et } C_a = C_b.$

figure 7 : schéma équivalent à la section transverse du RFQ

Les fichiers de définition donnent plus ou moins directement la distribution de ces paramètres:

- V_p est une donnée d'entrée des calculs 2D,
- C et C_a sont déduits des énergies stockées, calculées à l'aide du code 2D Superfish,
- L devra être déduite de la fréquence de résonance f_Q et de la capacitance parallèle C .

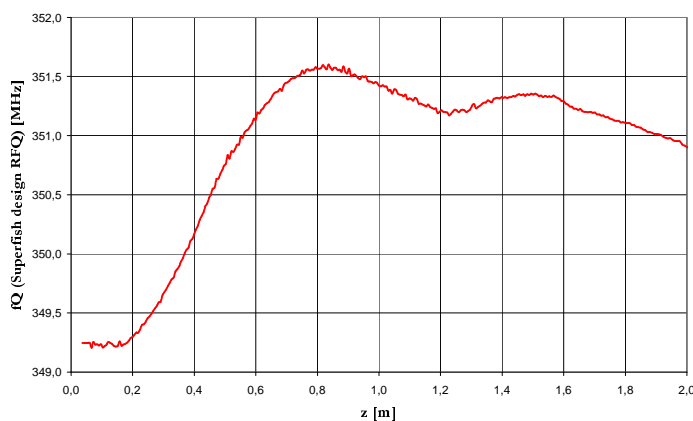


figure 8 : fréquence de résonance du mode accélérateur issu directement du calcul Superfish dans les cellules des 2 premiers mètres du RFQ d'IPHI

Sur le simple plan de l'analyse numérique, ces données brutes présentent suffisamment d'imperfections pour être inutilisables directement (exemple du profil de la fréquence du mode quadripolaire issu du calcul Superfish des cellules des 2 premiers mètres, figure 8).

Différents traitements sont appliqués afin d'améliorer le rapport signal sur bruit de ces paramètres.

3.2.2 Génération du fichier du profil de tension

Le profil de tension V_p est défini point par point, et s'avère linéaire par morceaux. Un segment linéaire comporte un nombre de points, variable selon l'abscisse, et en général de l'ordre de la dizaine. Cet échantillonnage est donc de classe C^0 au plus, ce qui ne convient pas pour représenter la solution d'un problème de Sturm-Liouville (qui est au moins de classe C^2). Le traitement s'effectue comme suit:

1. Un algorithme de détection automatique identifie les échantillons situés à la limite des segments linéaires. Le filtre lui-même estime la dérivée seconde digitale du train de données. Le détecteur est un seuil fixé arbitrairement par rapport à la moyenne des données, calculée sur un enregistrement de longueur arbitraire. Après quelques essais, on a retenu un seuil de détection à 2,4 et une longueur d'enregistrement de 10 échantillons. Ce traitement produit un ensemble de 59 échantillons, le premier échantillon étant la cellule #6 et le dernier, la cellule #610;
2. Les cellules #0 à #5 sont absentes du fichier de données brutes. La valeur de V_p pour la cellule #0 est calculée au moyen d'un estimateur quadratique, de telle sorte que la dérivée première digitale soit nulle en 0.

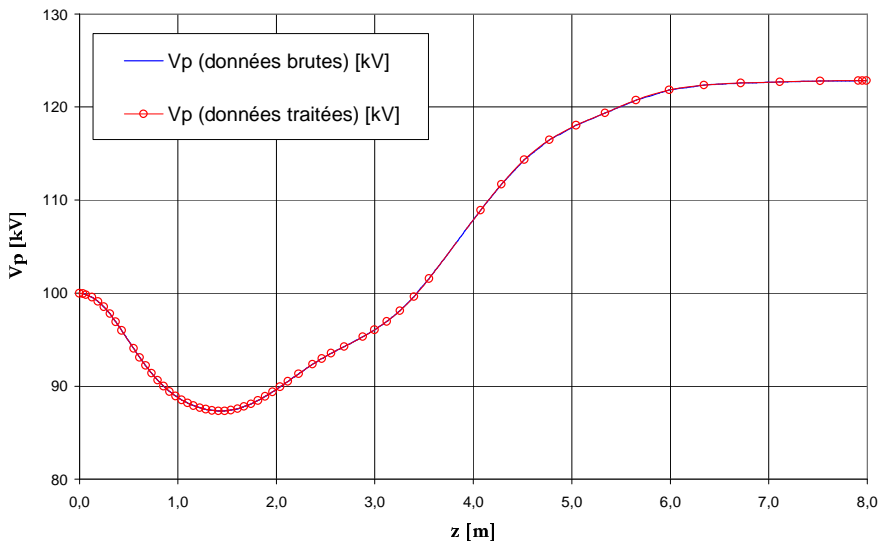


figure 9 : profils de tension brut et obtenu après traitement numérique.
Les ronds correspondent aux 60 échantillons utilisés pour l'analyse des mesures

C'est ce fichier de 60 échantillons (figure 9) qui est directement utilisé pour l'analyse des mesures (éventuellement convenablement ré-échantillonné).

3.3 Paramètres du réglage de la tension variable

Les pistons déplacés ont été choisis de manière à présenter une répartition longitudinale régulière (figure 10). En effet, avec une répartition longitudinale des pistons trop irrégulière, l'orthogonalité des fonctions de commande des pistons n'est plus respectée.

La répartition des 8 plans transverses de pistons choisis permet de commander jusqu'à 8 fonctions modales QQ, SQ ou TQ.

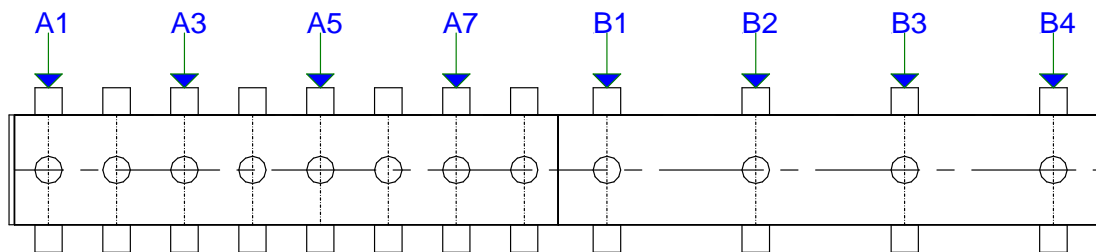
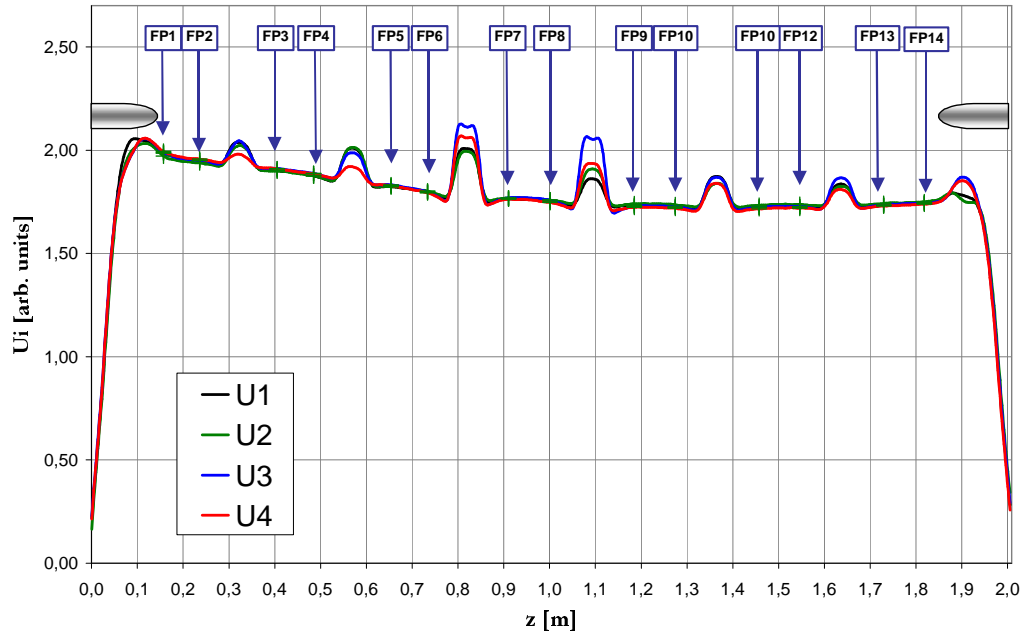


figure 10 : schéma des 8 plans transverses de pistons considérés pour le réglage de la tension variable



**figure 11 : tensions brutes mesurées dans les 4 quadrants du RFQ réglé.
14 points discrets « FPi » sont définis dans le modèle pour l'analyse des mesures.**

La distribution longitudinale de la tension est mesurée par perturbation du champ magnétique sur la bissectrice de chaque quadrant. Les points discrets utilisés pour l'analyse des mesures sont choisis entre les irrégularités mécaniques présentes au fond des quadrants. Dans notre configuration, 2 points discrets sont systématiquement placés entre 2 pistons d'accord ; ils sont situés de part et d'autre du milieu des pistons à une distance $0,2 \times dz$, dz étant la distance séparant l'extrémité des 2 pistons. On définit un total de 14 points discrets (figure 11 et Tableau 1).

Tableau 1: position longitudinale des points discrets utilisés pour le réglage du RFQ de 2 m

point discret	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11	FP12	FP13	FP14
z [mm]	156,78	236,22	405,38	484,82	653,98	733,42	910,68	1000,92	1185,26	1274,14	1457,46	1546,34	1729,66	1818,54

Les doigts de réglage dipolaire perturbent localement les lignes de champ magnétique dans la région où cet objet est guidé (référence [V]) : une augmentation locale de la tension est observée aux 2 extrémités sur toute la longueur des doigts (figure 11). Pour s'affranchir de cet effet, la plage longitudinale des données utiles est extraite entre 0,2 m et 1,83 m. Cette réduction de la plage des données utiles entraîne la perte du premier point discret (« FP1 ») défini dans le modèle pour l'analyse (figure 11).

Un filtre passe-bas numérique de type Taylor ($n=15$, 50dB) a été appliqué aux distributions longitudinales de tensions brutes avec pour fréquence passante $f_{pass}=30$ échantillons par mètre et pour fréquence de coupure $f_{stop}=70$ échantillons par mètre.

Tableau 2 : paramètres des commandes du réglage de la tension variable

		fichier de mesure
Position initiale	les pistons affleurent la surface interne	<i>Bead01_11_20_09_08</i>
Après les 1° déplacements des pistons déduits de <i>Bead01_11_20_09_08</i>	Seules les 4 premières fonctions de commande QQ, SQ et TQ ont été considérées	<i>Bead01_11_20_10_36</i>
Après les 2° déplacements des pistons déduits de <i>Bead01_11_20_10_36</i>	L'ensemble des 8 fonctions de commande QQ, SQ et TQ ainsi que celle SSTT a été considéré	<i>Bead01_11_20_11_21</i>

A chaque itération :

- Un gain de 0,8 a été appliqué aux commandes de pistons.
- La fréquence de résonance du mode accélérateur visée est 352,2 MHz.
- La distribution longitudinale de tension visée correspond aux 2 premiers mètres du profil du RFQ d'IPHI issu du traitement numérique (cf. le chapitre précédent).

3.4 Evolution de la composante quadripolaire de la tension accélératrice

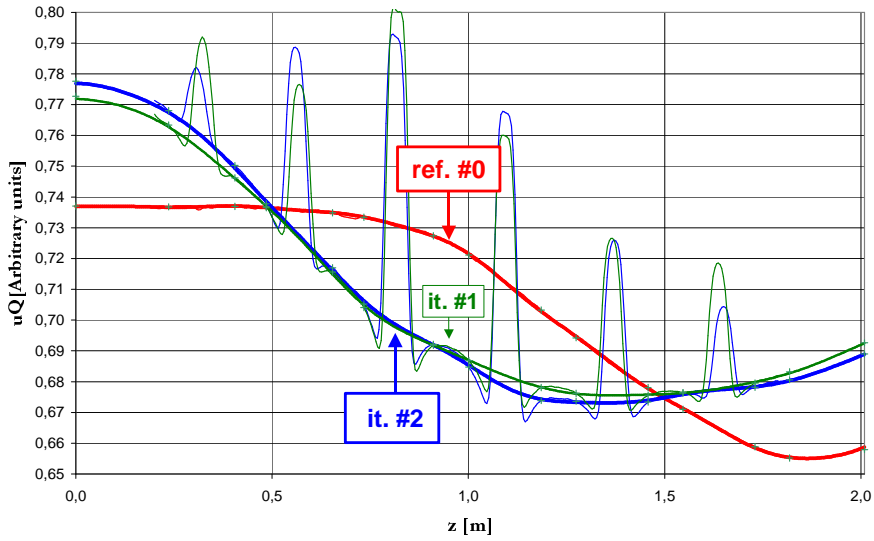


figure 12 : évolution de la composante quadripolaire uQ au cours des 2 itérations de réglage

Dès la première itération de réglage la courbe décrite par la composante quadripolaire mesurée uQ s'est approchée de la référence (figure 12).

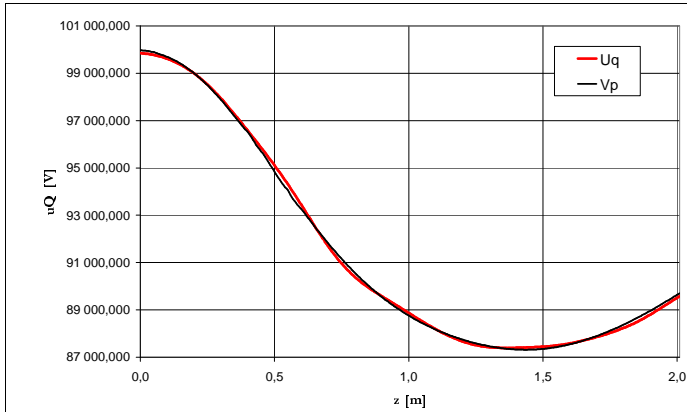


figure 13 : tension de référence Vp et composante quadripolaire mesurée uQ après les 2 itérations de réglage

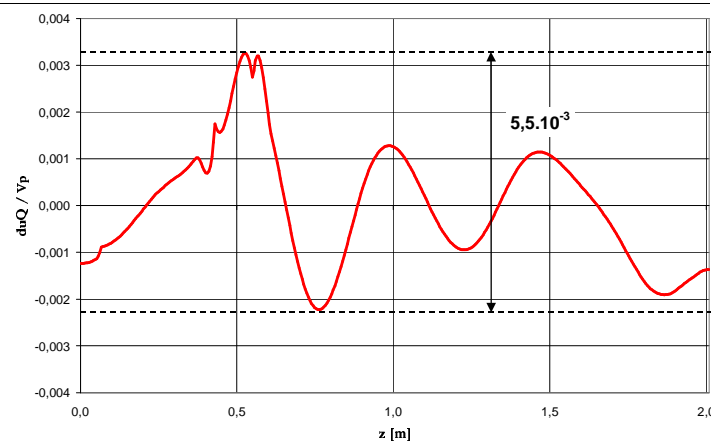
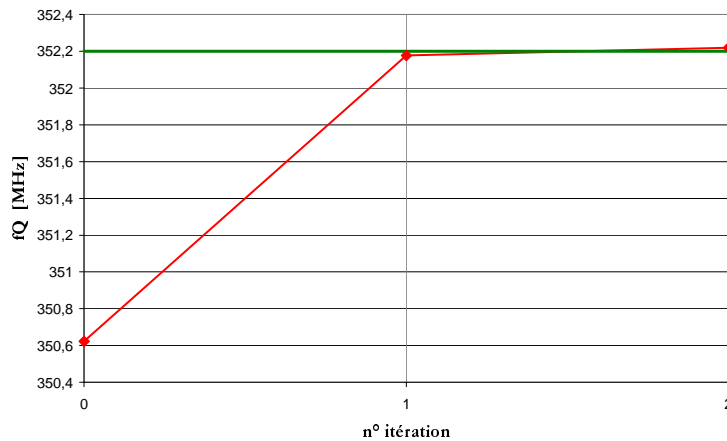


figure 14 : distribution longitudinale des écarts entre la composante quadripolaire mesurée uQ et la tension de référence Vp après les 2 itérations de réglage

Après la deuxième itération de réglage, la distribution longitudinale des écarts relatifs entre la référence et la composante quadripolaire mesurée est comprise dans une fourchette étalée entre $-2,2 \cdot 10^{-3}$ et $3,3 \cdot 10^{-3}$, soit une excursion de $5,5 \cdot 10^{-3}$ (figure 14). Le critère de réglage de ce paramètre est largement respecté, puisqu'on cherche à obtenir en toute position longitudinale z une erreur relative maximale $\max\{ |(uQ - Vp)/Vp| \} = 10^{-2}$.

3.5 Evolution de la fréquence de résonance du mode accélérateur



	fQ [MHz]
Position initiale : les pistons affleurent la surface interne	350,622
Après les 1° déplacements des pistons	352,177
Après les 2° déplacements des pistons	352,219

figure 15 : évolution de la fréquence de résonance du mode accélérateur

En 2 itérations de réglage, l'écart relatif de la fréquence du mode accélérateur par rapport aux 352,2 MHz visés est passé de $4,4 \cdot 10^{-2}$ à $6 \cdot 10^{-5}$.

3.6 Evolution des composantes dipolaires de la tension accélératrice

évolution des composantes dipolaire uS et uT de la tension accélératrice au cours des 2 itérations de réglage

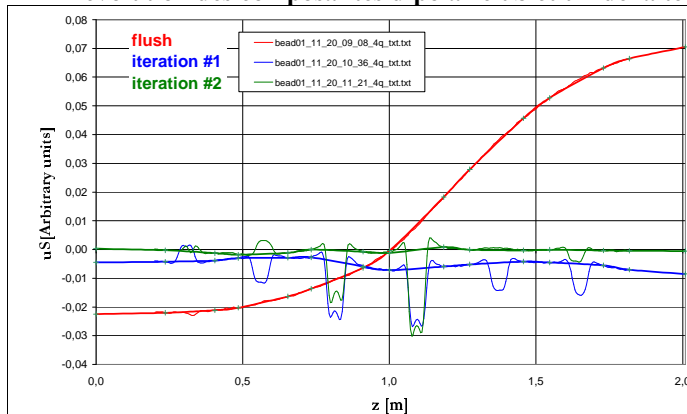


figure 16 : évolution de la composante dipolaire uS

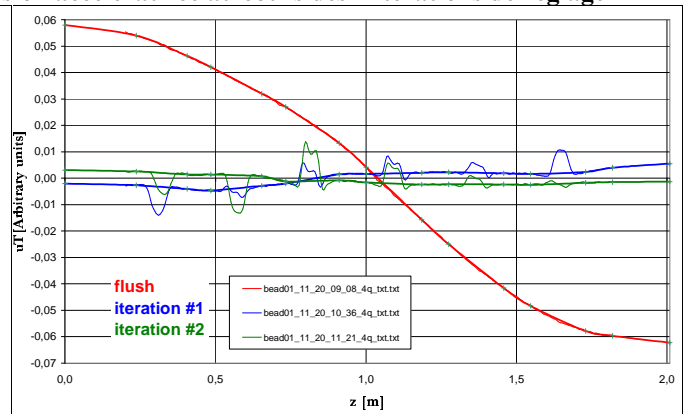


figure 17 : évolution de la composante dipolaire uT

La première itération qui n'a considéré que les 4 premiers coefficients modaux SQ et TQ a eu pour effet d'aplanir la distribution longitudinale des composantes de la tension accélératrice uS et uT (figure 16 et figure 17). On est même passé au-delà de l'équilibre pour ce qui concerne la composante uS qui se retrouve décentrée par rapport au niveau zéro. La deuxième itération a centré et aplani uS. Elle a réduit l'excursion de uT sur la longueur des 2 mètres du RFQ.

Distribution longitudinale des écarts relatifs entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice

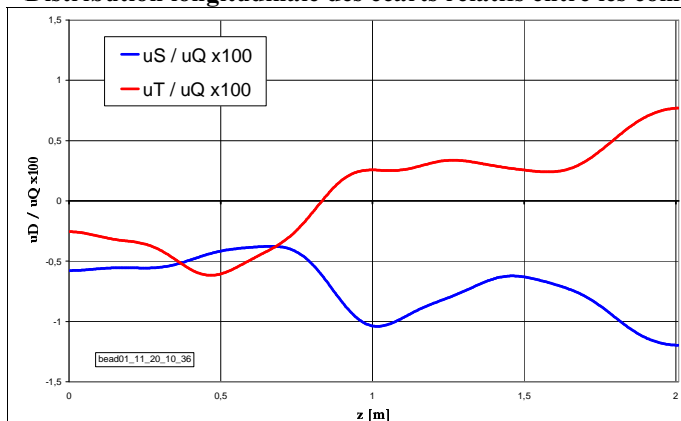


figure 18 : après la 1^{ière} itération

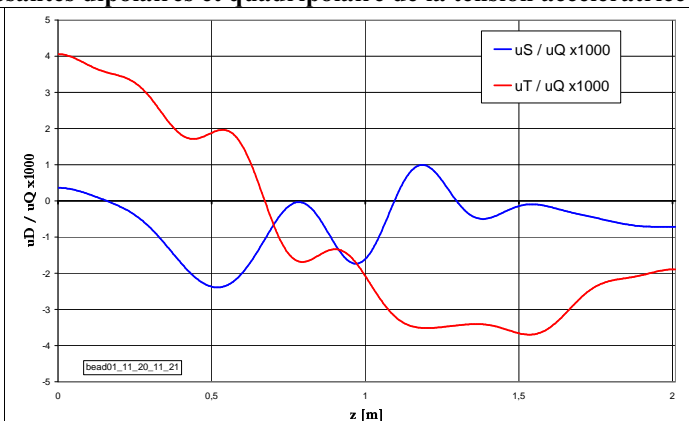


figure 19 : après les 2 itérations de réglage

	Fichier de mesure	Min(uD / uQ)	Max(uD / uQ)
Référence: pistons affleurants	Bead01_11_20_09_08	$-9,4 \cdot 10^{-2}$	$10,6 \cdot 10^{-2}$
Après la 1 ^{ière} itération	Bead01_11_20_10_36	$-1,2 \cdot 10^{-2}$	$0,77 \cdot 10^{-2}$
Après la 2 ^{ième} itération	Bead01_11_20_11_21	$-3,7 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3 : évolution du rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice au cours des 2 itérations de réglage

La première itération de réglage a permis de diminuer la présence des composantes dipolaires d'un facteur 10, le rapport entre composantes dipolaires et quadripolaire étant alors proche du 10^{-2} recherché (figure 18).

Après la deuxième itération (figure 19), le critère de réglage de ce paramètre est largement respecté :

Pour tout z , $|uD(z)/uQ(z)| < 4 \cdot 10^{-3}$.

3.7 Evolution des écarts des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence

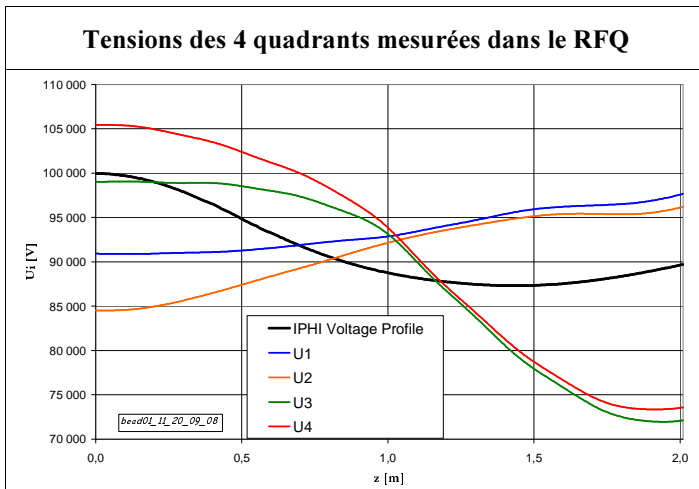


figure 20 : avec les pistons affleurants la surface interne

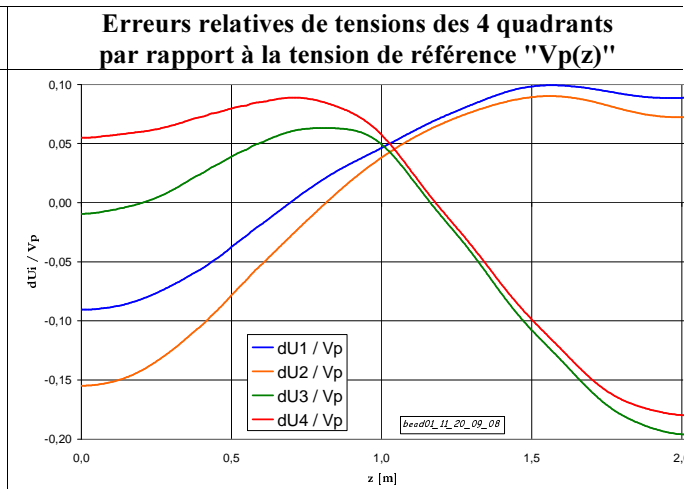


figure 21 : avant tout réglage à l'aide des pistons d'accord

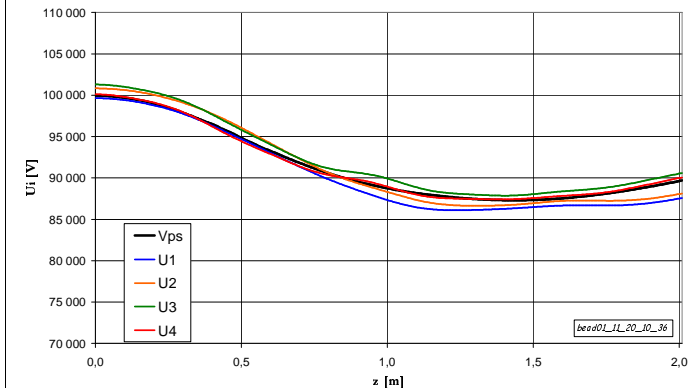


figure 22 : après la 1^{ère} itération

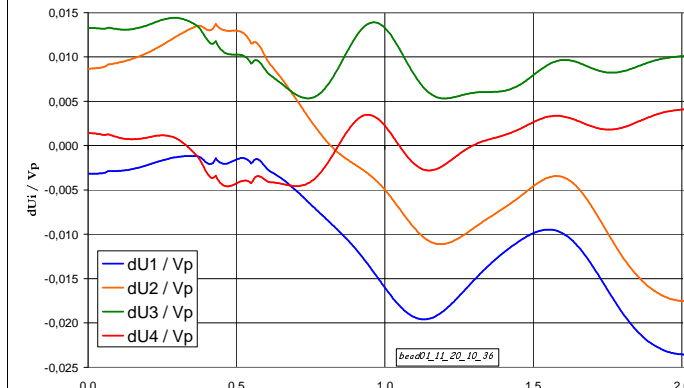


figure 23 : après la 1^{ère} itération

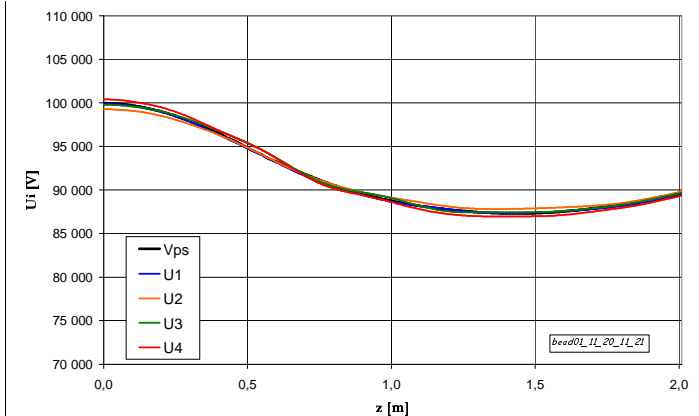


figure 24 : après la 2^{ème} itération

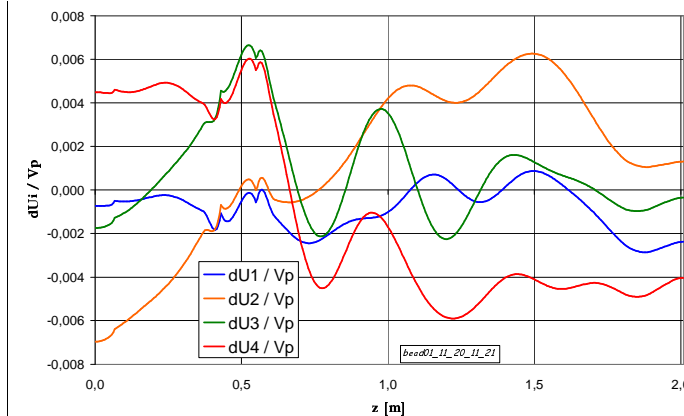


figure 25 : après la 2^{ème} itération

Avant tout réglage du RFQ, les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension longitudinale visée sont compris dans une fourchette de +10 % à -20 %.

Après la première itération de déplacement des pistons, l'excursion entre les erreurs relatives minimales et maximales a été réduite d'un facteur 10. La deuxième itération assure en toute position longitudinale et tout quadrant un écart relatif entre les tensions mesurées et la référence inférieur à $7 \cdot 10^{-3}$.

	Fichier de mesure	Min(dUi/Vp)	Max(dUi/Vp)
Référence: pistons affleurants	Bead01_11_20_09_08	$-9,9 \cdot 10^{-2}$	$19,6 \cdot 10^{-2}$
Après la 1 ^{ère} itération	Bead01_11_20_10_36	$-2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Après la 2 ^{ème} itération	Bead01_11_20_11_21	$-7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$

3.8 Evolution des coefficients modaux des composantes modales de la tension

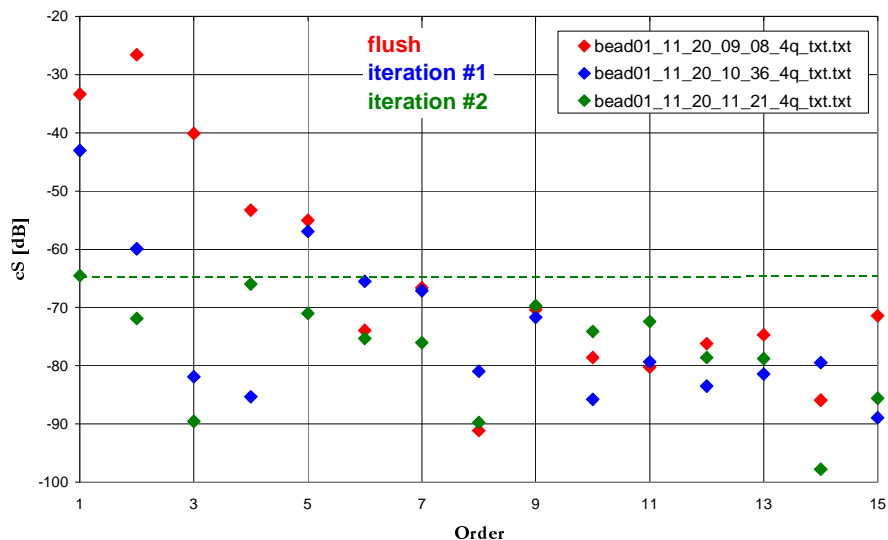


figure 26 : coefficients modaux de la composante dipolaire de tension uS

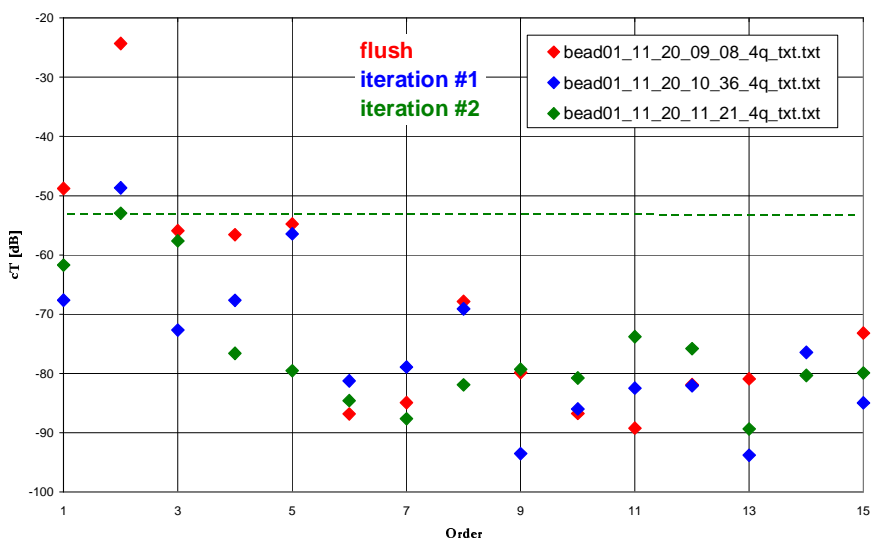


figure 27 : coefficients modaux de la composante dipolaire de tension uT

Après les 2 itérations de déplacements des pistons, tous les coefficients spectraux des composantes dipolaires de tension uS et uT sont respectivement inférieurs de plus de 65 et 53 décibels par rapport au coefficient modal de la composante quadripolaire accélératrice.

3.9 Positions des pistons

3.9.1 Positions après les premiers déplacements

	1	2	3	4	5	6	7	8
Q1	0,98	2,88	4,66	6,89	6,79	4,27	1,36	-0,30
Q2	0,91	3,40	5,97	8,86	8,55	5,15	1,53	-0,43
Q3	-2,04	1,10	6,88	11,24	11,01	6,78	4,32	2,54
Q4	-1,97	0,58	5,57	9,27	9,25	5,89	4,16	2,67

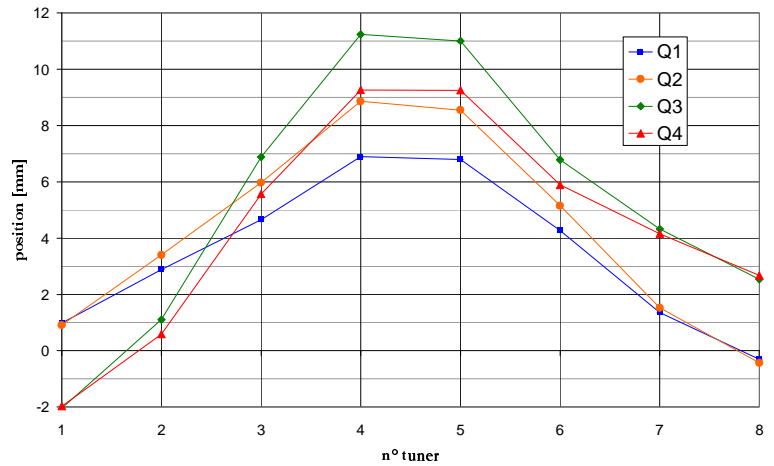


figure 28 : positions des pistons des 4 quadrants après la 1^{ère} itération de réglage

Les déplacements de la première itération sont très importants : ils varient de $-2,04$ mm vers l'extérieur à $+11,24$ mm vers l'intérieur. Les valeurs croissent quand on s'approche de la jonction entre les 2 tronçons de RFQ (située entre les pistons notés 4 et 5 dans la figure 28). La limite d'excursion des pistons vers l'intérieur prévue de 10 millimètres est dépassée.

3.9.2 Positions finales des pistons après la deuxième itération

	1	2	3	4	5	6	7	8
Q1	1,24	4,30	5,97	8,75	5,01	6,04	4,43	-1,01
Q2	-0,46	4,04	6,28	8,23	6,40	4,39	3,60	-2,38
Q3	-2,31	3,84	4,96	12,43	11,89	5,88	5,43	2,63
Q4	-2,27	1,73	2,50	10,60	7,96	5,17	3,67	1,99

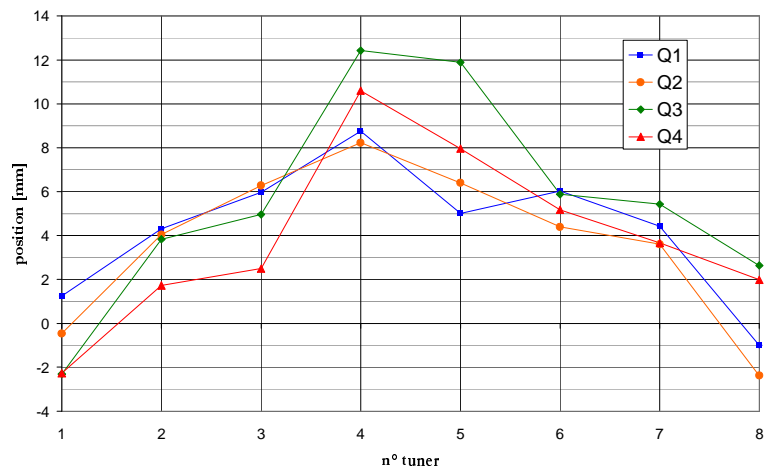


figure 29 : positions des pistons des 4 quadrants après la 2^{ème} itération de réglage

La deuxième itération a permis d'obtenir le réglage de tous les paramètres électromagnétiques visés. Les positions finales de 3 pistons ont dépassé les 10 millimètres de déplacement vers l'intérieur.

4 Application à la maquette de positions théoriques de pistons

Nous avons voulu tester des déplacements théoriques calculés par une méthode différente (référence [I]) permettant le réglage d'un profil de tension variable. La distribution des enfoncements des pistons a été générée pour la maquette de RFQ de 2 mètres de long présentant une électrode unique à profil constant.

4.1 Loi de tension de référence

La loi de tension (figure 30) que les positions des pistons prédits doivent permettre d'obtenir, coïncide avec celle du RFQ d'IPHI entre $z=0$ m et $z=1,47$ m. A partir de la valeur minimum trouvée en $z=1,47$ m, son profil est choisi constant jusqu'à l'extrémité en $z=2,0092$ m.

Cette loi de tension est définie comme étant la fonction "spline" cubique passant 8 points qualifiés de "points d'ancrage" (Tableau 4).

Tableau 4 : points d'ancrage de la loi de tension

z [m]	0	0,058	0,19	0,7	1,22	1,47	1,9	2,0092
Vp [kV]	99,93	99,849	99,094	91,824	87,675	87,32	87,225	87,225

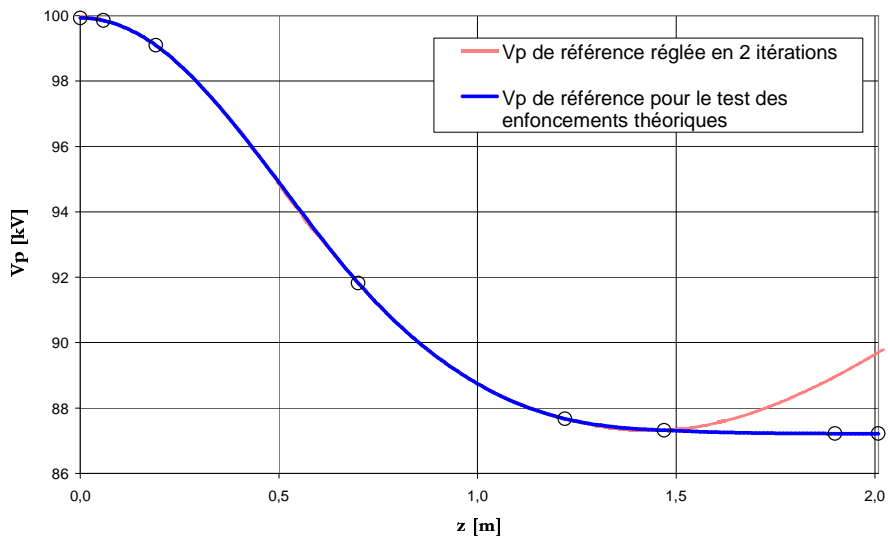


figure 30 : loi de tension de référence réglée dans le RFQ de 2 m à l'aide de notre formalisme (courbe rouge) et définie pour le test des enfoncements théoriques des pistons (courbe bleue où les ronds figurent les points d'ancrage de la fonction spline cubique)

Les enfoncements théoriques concernent les 12 plans transverses de pistons disponibles dans la maquette de RFQ constituée de l'assemblage des tronçons A et B (figure 31). Les déplacements des 4 pistons d'un même plan transverse sont identiques.

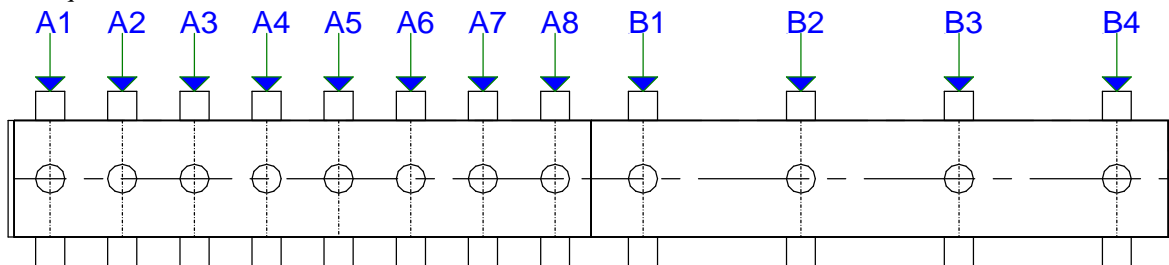


figure 31 : schéma des 12 plans transverses de pistons

Les déplacements ont été calculés :

- 1- Soit en appliquant la courbe de réponse complète du piston en fonction de l'enfoncement x .
- 2- Soit en considérant la réponse des pistons d'après la seule pente à l'origine.

Nous avons effectué ce test en partant de 2 configurations différentes de la cavité :

- **Configuration 1**

Nous avons d'abord caractérisé le résultat des enfoncements théoriques appliqués directement sur la maquette de RFQ brute d'assemblage. Les 2 jeux de déplacements prédits ont été testés.

- **Configuration 2**

Les positions théoriques sont définies comme étant les corrections à appliquer à un RFQ à profil constant idéal de manière à obtenir le profil de tension variable.

Ce RFQ idéal :

- Est équilibré transversalement et longitudinalement.
- Présente une distribution longitudinale de la tension accélératrice constante.
- Résonne à 350,8 MHz quand les pistons affleurent la surface interne.

Nous avons donc testé ces déplacements sur un RFQ préalablement réglé à l'aide de notre formalisme de façon à présenter les caractéristiques électromagnétiques les plus proches possibles de ce modèle idéal.

Nous venons de valider nos procédures de réglage à travers l'obtention d'une loi constante dans un RFQ de 2 mètres résonant à 352,2 MHz (référence [III]). En partant de cette situation nous avons réglé en 4 itérations cette même cavité à 350,8 MHz toujours avec un profil de tension constant et des déséquilibres dipolaires minimisés.

Ce RFQ réel :

- Est équilibré transversalement et longitudinalement.
- Présente une distribution longitudinale de la tension accélératrice constante.
- Résonne à 350,8 MHz avec les pistons de 8 plans transverses aux positions issues du réglage.

Aux positions des pistons obtenues après ce réglage ont été ajoutés les déplacements de pistons théoriques.

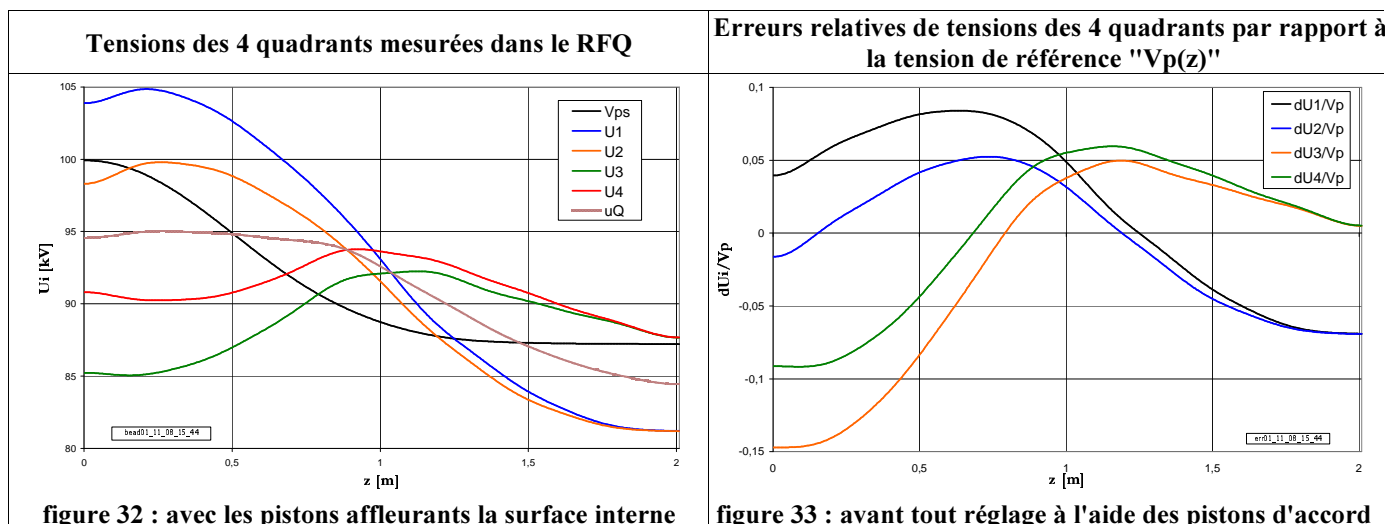
4.2 Test 1 : Application des déplacements au RFQ à l'état brut

4.2.1 Caractéristiques du RFQ avant réglage

Initialement :

- Tous les pistons d'accord affleurent la surface interne de la cavité.
- Aucun pré-réglage n'a été appliqué.
- Les doigts de réglage des modes dipolaires ne sont pas montés sur les plaques terminales.

Dans ces conditions, on mesure une fréquence du mode accélérateur $f_0=350,54$ MHz.



Les erreurs relatives des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence variable (figure 33) varient entre $-14,7 \cdot 10^{-2}$ et $8,4 \cdot 10^{-2}$.

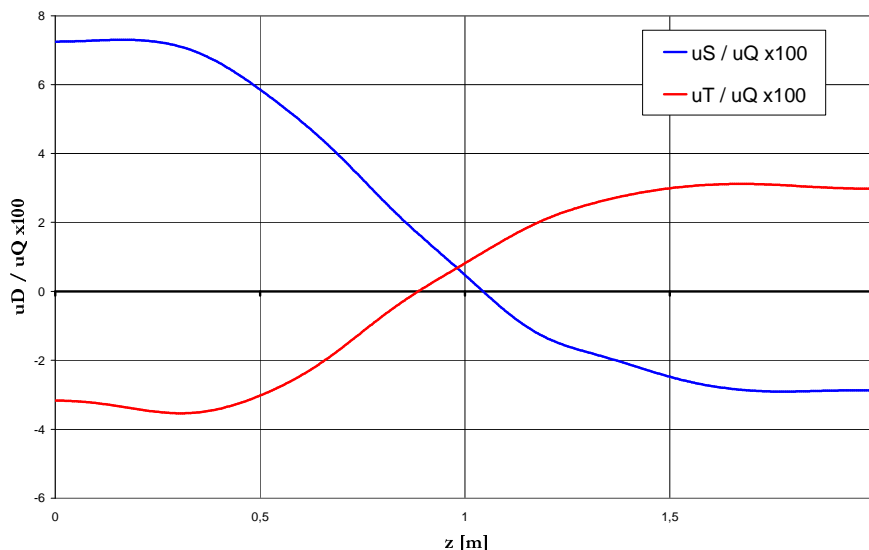


figure 34 : rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire avant réglage

	Fichier de mesure	Min(uD / uQ)	Max(uD / uQ)
Référence: pistons affleurants	Bead01_11_08_14_01	-3,5.10 ⁻²	7,3.10 ⁻²

4.2.2 Déplacements déduits de la courbe "réponse des pistons" complète

Pour tous les quadrants i=1 à 4, les enfoncements des pistons sont identiques (Tableau 5).

Tableau 5 : déplacements courbe "réponse des pistons" complète

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
Qi	-0,15	-0,02	0,9	1,87	2,77	3,54	3,61	3,52	6,14	5,17	4,55	4,45

La fréquence du mode accélérateur est passée de $f_Q = 350,54$ MHz à 352,026 MHz. Elle est donc inférieure de 174 kHz par rapport aux 352,2 MHz visés.

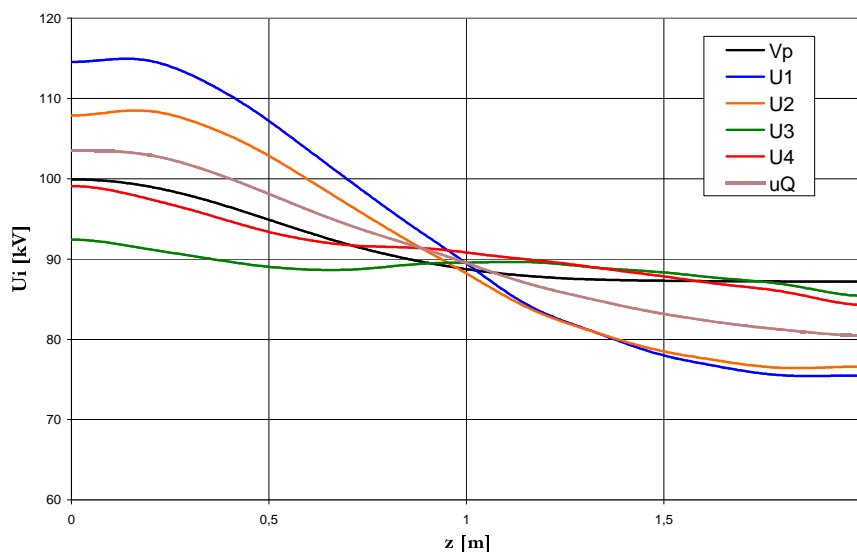


figure 35 : Tensions des 4 quadrants U_i et composante quadripolaire u_Q

Du côté "entrée faisceau" la moyenne des tensions des 4 quadrants est supérieure à la courbe de référence V_p et à mi-longueur de la cavité passe en dessous (figure 35).

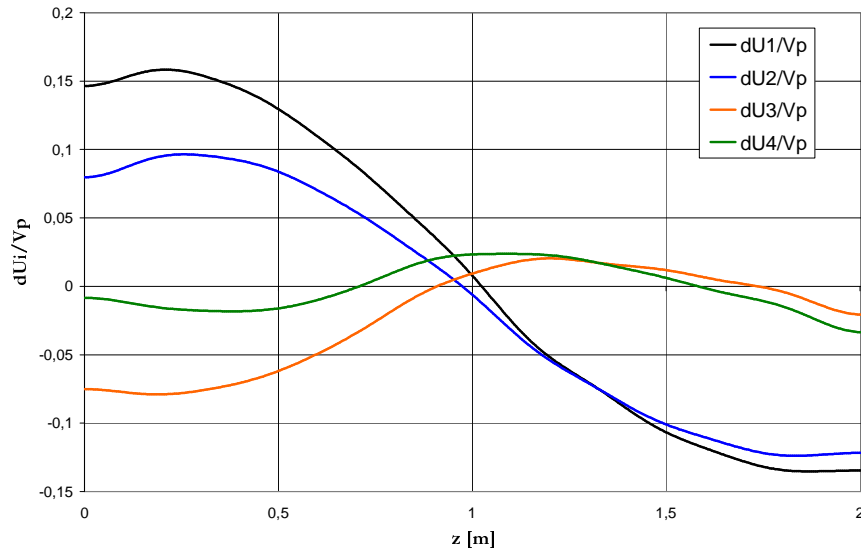


figure 36 : Ecarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence

Les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence V_p ont pour valeurs extrêmes $-13,5 \cdot 10^{-2}$ et $15,8 \cdot 10^{-2}$ (figure 36).

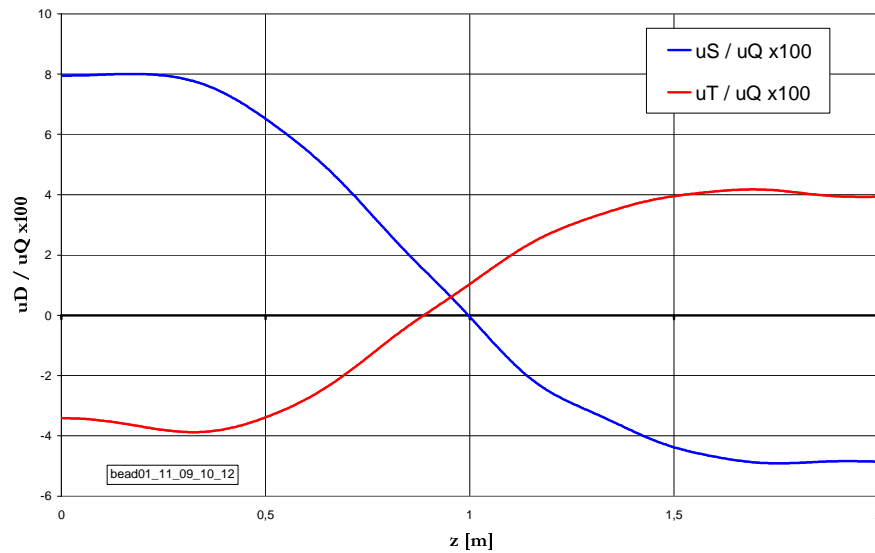


figure 37 : écarts relatifs entre les composantes dipolaires et celle quadrupolaire de la tension accélératrice après application directe des déplacements déduits de la courbe "réponse des pistons" complète

Le rapport entre les composantes dipolaires et quadrupolaire de la tension accélératrice varie entre les valeurs extrêmes de $-4,9 \cdot 10^{-2}$ et $8 \cdot 10^{-2}$ (figure 37).

4.2.3 Déplacements considérant la réponse des pistons d'après la seule pente à l'origine

Pour tous les quadrants $i=1$ à 4, les enfoncements des pistons sont identiques (Tableau 6).

Tableau 6 : Déplacements considérant la réponse des pistons d'après la seule pente à l'origine

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
Qi	-0,15	-0,02	0,95	2,06	3,18	4,19	4,29	4,16	7,93	6,48	5,6	5,46

La fréquence du mode accélérateur est $f_Q=352,378$ MHz. Elle est supérieure de 178 kHz par rapport aux 352,2 MHz visés.

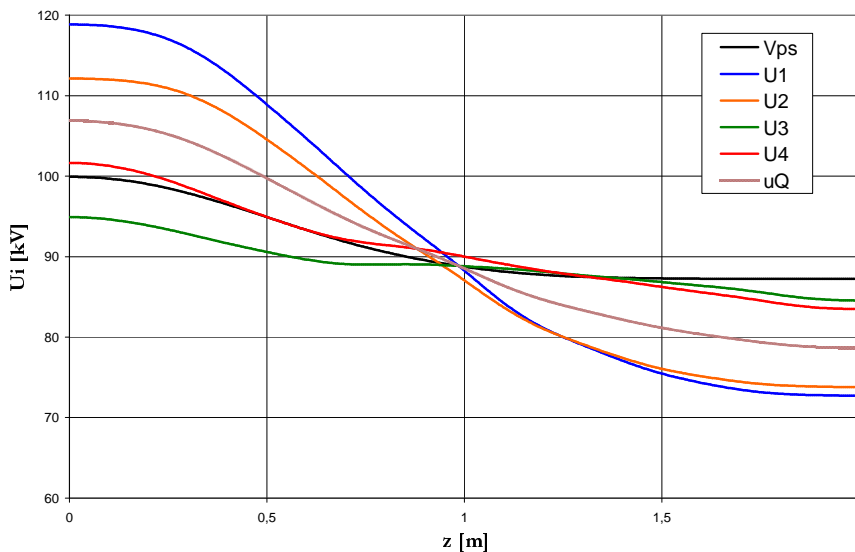


figure 38 : Tensions des 4 quadrants U_i et composante quadripolaire uQ

De même que pour les déplacements précédents, du côté "entrée faisceau" la composante quadripolaire uQ est supérieure à la tension de référence et passe en dessous à mi-longueur de la cavité (figure 39).

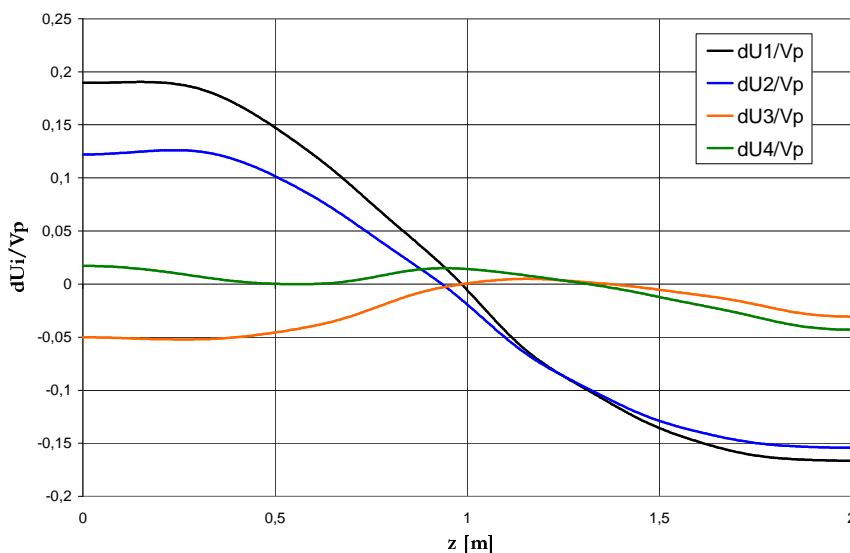


figure 39 : Ecart relatif des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence

Les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence V_p ont pour valeurs extrêmes $-16,6 \cdot 10^{-2}$ et $19 \cdot 10^{-2}$ (figure 39).

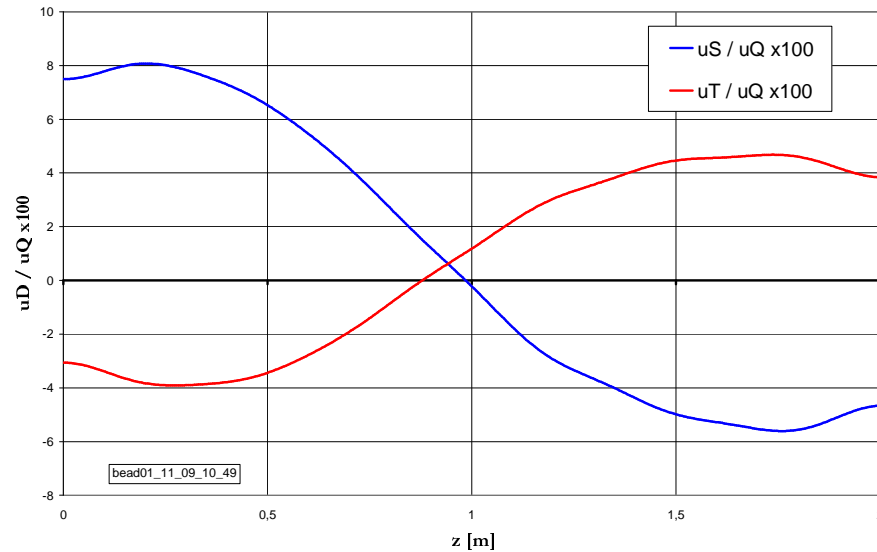


figure 40 : écarts relatifs entre les composantes dipolaires et celle quadrupolaire de la tension accélératrice après application directe des déplacements déduits de la courbe "réponse des pistons" complète

Le rapport entre composantes dipolaires et quadrupolaire varie entre les valeurs extrêmes de $-5,6 \cdot 10^{-2}$ et $8,1 \cdot 10^{-2}$ (figure 40).

4.2.4 Comparaison du résultat des 2 jeux de déplacements

	fQ [MHz]	fQ – 352,2 MHz
Référence: pistons affleurants	350,054	-2146 kHz
Enfoncements "courbe réponse des pistons complète"	352,026	-174 kHz
Enfoncements déduits de la "pente à l'origine"	352,378	178 kHz

Après application des déplacements théoriques, la fréquence du mode accélérateur est proche des 352,2 MHz visés. Pour satisfaire le réglage de ce paramètre, les enfoncements calculés d'après la pente à l'origine sont en effet surestimés (remarque de la référence [I]) ; ceux déduits de la courbe complète de réponse des pistons sont eux sous-estimés.

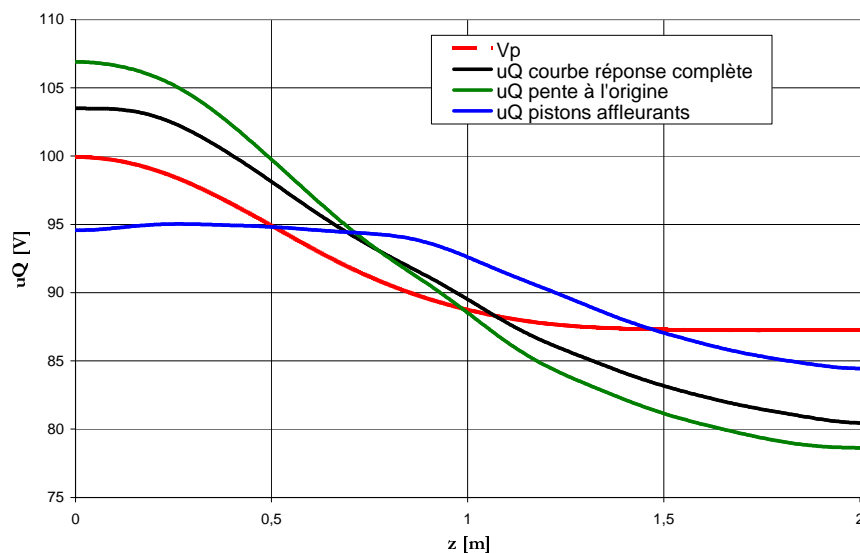


figure 41 : distributions de la composante quadrupolaire mesurées après application des 2 jeux de déplacements comparées au profil de référence

Pour les 2 jeux d'enfoncements, du côté "entrée faisceau", la composante quadrupolaire uQ est supérieure à la tension de référence et passe en dessous à mi-longueur de la cavité (figure 41).

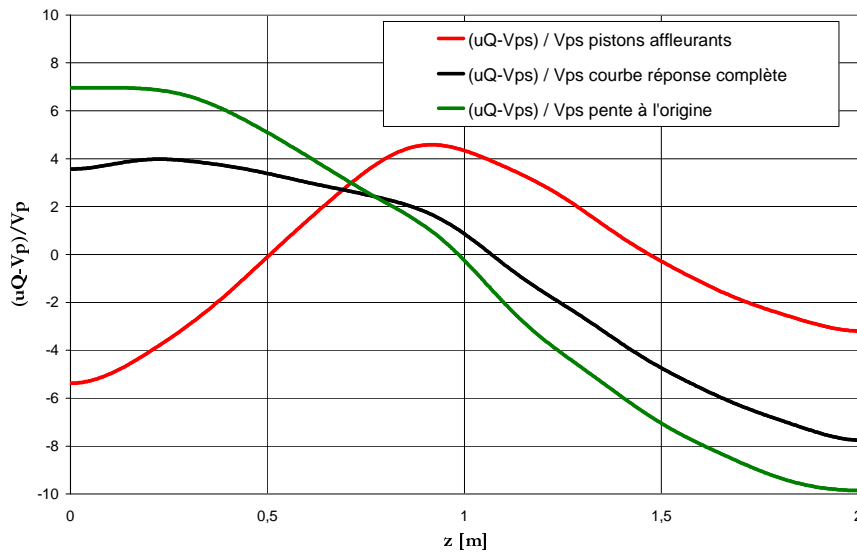


figure 42 : Erreurs relatives de la composante quadripolaire par rapport au profil de référence

	Min((uQ-Vp)/Vp)	Max((uQ-Vp)/Vp)
Référence: pistons affleurants	$-5,4 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
Enfoncements "courbe réponse des pistons complète"	$-7,8 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Enfoncements déduits de la "pente à l'origine"	$-9,9 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$

Bien que le profil de la composante quadripolaire s'est rapproché de la loi visée, les erreurs relatives de cette composante $(uQ-Vp)/Vp$ ont augmenté (figure 42).

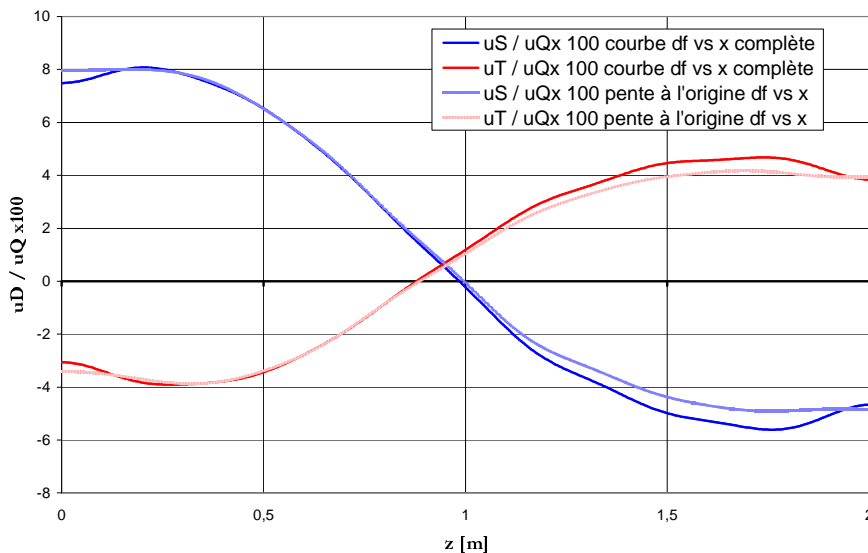


figure 43 : uD / uQ déduits de la courbe "réponse des pistons" complète et de la pente à l'origine

	Fichier de mesure	Min(uD / uQ)	Max(uD / uQ)
Référence: pistons affleurants	<i>Bead01_11_08_14_01</i>	$-3,5 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$
Enfoncements "courbe réponse des pistons complète"	<i>Bead01_11_09_10_12</i>	$-4,9 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
Enfoncements "pente à l'origine"	<i>Bead01_11_09_10_49</i>	$-5,6 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$

La proportion de composantes dipolaires au sein de la tension accélératrice a également cru.

	Min(dUi/Vp)	Max(dUi/Vp)	Excursion
Référence: pistons affleurants	-14,7.10 ⁻²	8,4.10 ⁻²	23,1.10 ⁻²
Enfoncements "courbe réponse des pistons complète"	-13,5.10 ⁻²	15,8.10 ⁻²	29,3.10 ⁻²
Enfoncements déduits de la "pente à l'origine"	-16,6.10 ⁻²	19.10 ⁻²	35,6.10 ⁻² +20% / courbe complète

Les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence Vp constituent le critère prédominant du réglage du RFQ du point de vue de la dynamique de faisceau. Après application des enfoncements théoriques, ils se sont amplifiés.

4.2.5 Analyse des résultats

- La fréquence de résonance obtenue après application des positions théoriques est proche des 352,2 MHz, présentant un écart résiduel de 170 kHz. Mais nous avons réglé à l'aide de notre formalisme cette cavité à une vingtaine de kilohertz près.
- Les positions déduites de la pente de la réponse à l'origine ont conduit à des défauts de réglage plus importants que les enfoncements calculés à partir de la courbe de réponse complète.
- Le profil de la composante quadripolaire s'est rapproché de la loi visée. Cependant les erreurs relatives de cette composante par rapport à la loi de référence ont augmenté.
- La proportion de composantes dipolaires au sein de la tension accélératrice a augmenté.
- Les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence Vp sont 15 fois supérieurs aux 10⁻² requis par la dynamique de faisceau.

4.3 Test 2 : Application des déplacements au RFQ équilibré à 350,8 MHz

4.3.1 Caractéristiques du RFQ équilibré à 350,8 MHz

Nous avons réglé ce RFQ de 2 mètres (référence [III]) à l'aide de notre formalisme de façon à :

- Etre équilibré transversalement et longitudinalement.
- Présenter une distribution longitudinale de la tension accélératrice constante.
- Résonner à 350,8 MHz.

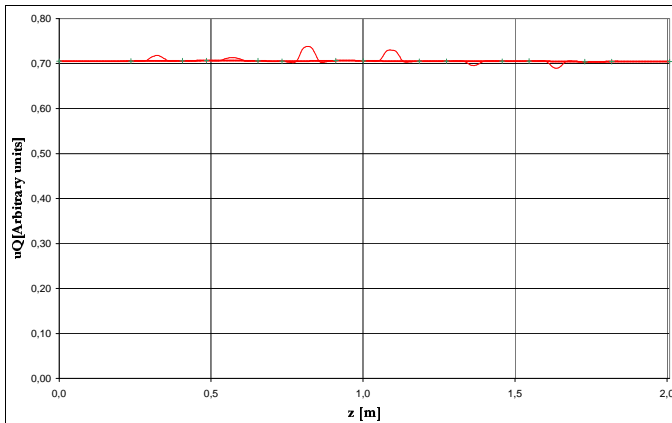


figure 44 : distribution longitudinale de la composante quadripolaire de la tension accélératrice dans le RFQ réglé à 350,8 MHz

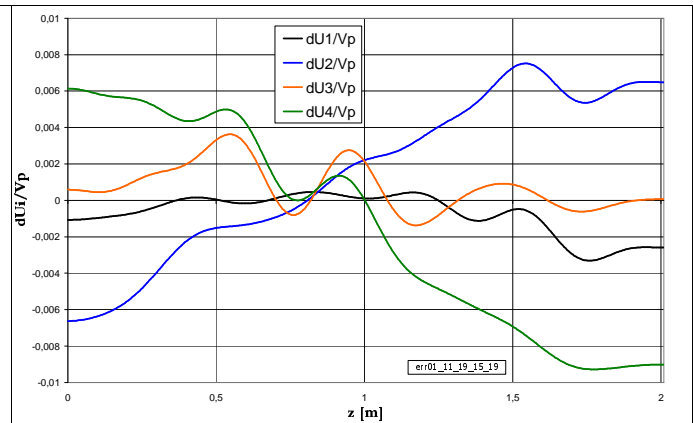


figure 45 : distribution longitudinale des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension Vp constante après réglage du RFQ à 350,8 MHz

Les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension Vp constante sont compris dans une fourchette allant de -9.10^{-3} à 8.10^{-3} (figure 45). L'erreur relative de la composante quadripolaire de la tension accélératrice par rapport au profil constant a pour valeurs extrêmes $-1,9.10^{-3}$ et $1,8.10^{-3}$.

Fichier de mesure	min(dUi/Vp)	max(dUi/Vp)
bead01_11_19_15_19	-0,009	0,008

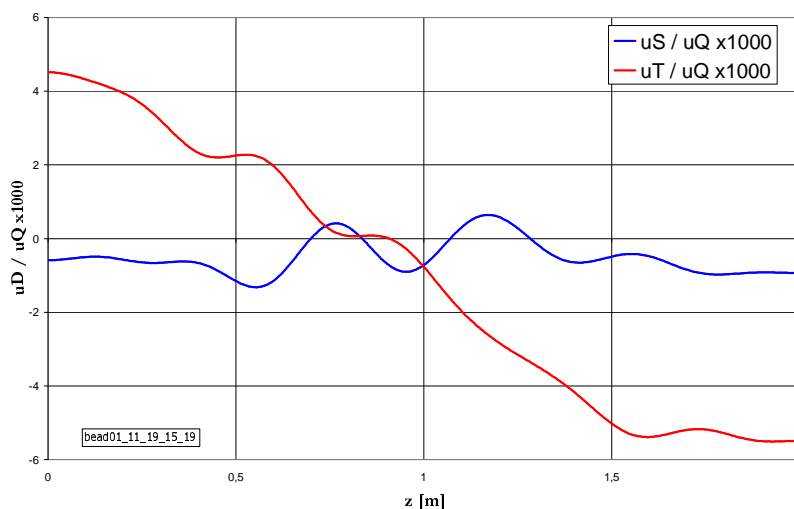


figure 46 : uS/uQ et uT/uQ en fonction de la position longitudinale z

Fichier de mesure	Min(uD / uQ)	Max(uD / uQ)
bead01_11_19_15_19	$-5,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$

Les composantes dipolaires de la tension accélératrice $uD(z)$, $uD = uS$ ou uT , sont telles que pour tout z , $|uD(z)/uQ(z)| < 5,5 \cdot 10^{-3}$.

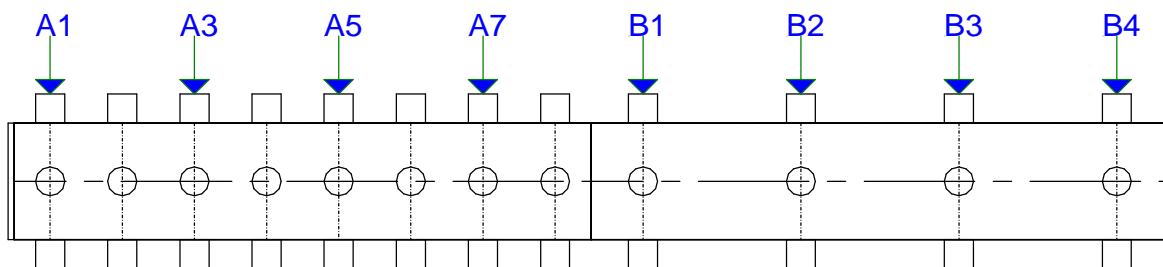


figure 47 : schéma des 8 plans transverses de pistons utilisés pour régler $uQ=Cste$ à $f_0=350,8$ MHz

Ce réglage a été obtenu en déplaçant $8 \times 4 = 32$ pistons d'accord (figure 47).

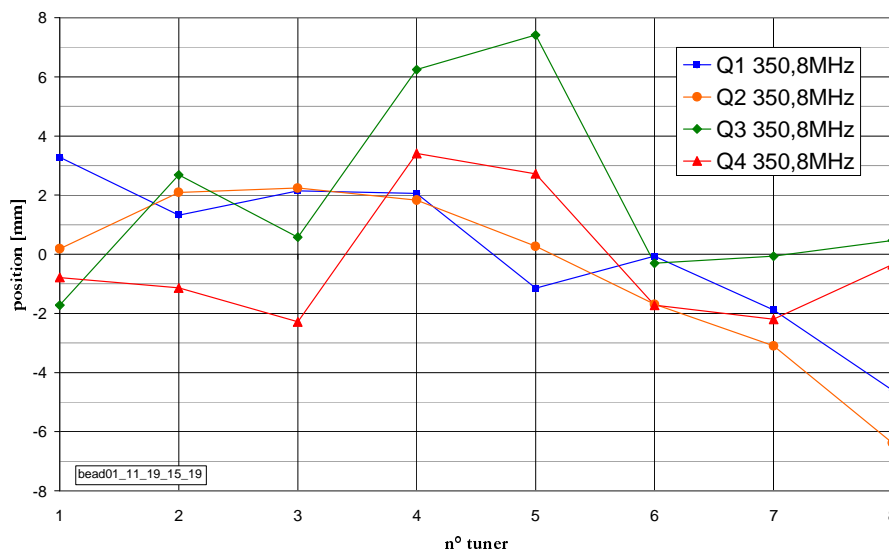


figure 48 : positions des pistons après les 4 itérations de réglage d'une loi constante ($f_0=350,8$ MHz)

Les positions finales des pistons s'étalent de $-6,39$ à $7,41$ mm, les valeurs les plus importantes correspondant au quadrant 3 à la jonction des 2 tronçons de maquette.

Tableau 7 : positions des pistons après 4 itérations de réglage d'un profil de tension constant à $f_0=350,8$ MHz

	A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
Q1	3,28	1,32	2,15	2,05	- 1,15	- 0,07	- 1,89	- 4,60
Q2	0,18	2,09	2,24	1,83	0,27	- 1,69	- 3,10	- 6,39
Q3	- 1,73	2,68	0,58	6,24	7,41	- 0,31	- 0,07	0,46
Q4	- 0,79	- 1,14	- 2,29	3,41	2,72	- 1,73	- 2,20	- 0,35

min = - 6,39

max = 7,41

moyenne = 0,29

4.3.2 Déplacements appliqués

Tous les déplacements prédits théoriquement par le calcul sont de même amplitude et direction dans chaque plan transverse de pistons. Ils considèrent l'ensemble des 12 plans transverses disponibles dans cette configuration de maquette alors que le réglage préalable a été réalisé en limitant à 8 le nombre de plans commandés. Les pistons de 2 plans transverses sont donc restés affleurants à la surface interne de la cavité.

Pour obtenir les positions à tester, nous avons additionné piston par piston les enfoncements issus du pré-réglage à 350,8 MHz réalisé à l'aide de notre formalisme à ceux prédits par le calcul (tableaux ci-dessous).

déplacements calculés à partir de la courbe de réponse complète (théoriques)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
Q1	-0,15	-0,02	0,9	1,87	2,77	3,54	3,61	3,52	6,14	5,17	4,55	4,45
Q2	-0,15	-0,02	0,9	1,87	2,77	3,54	3,61	3,52	6,14	5,17	4,55	4,45
Q3	-0,15	-0,02	0,9	1,87	2,77	3,54	3,61	3,52	6,14	5,17	4,55	4,45
Q4	-0,15	-0,02	0,9	1,87	2,77	3,54	3,61	3,52	6,14	5,17	4,55	4,45

+

Positions des pistons du RFQ de 2m équilibré (350,8 MHz)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
Q1	3,28	0	1,32	0	2,15	0	2,05	0	- 1,15	- 0,07	- 1,89	- 4,60
Q2	0,18	0	2,09	0	2,24	0	1,83	0	0,27	- 1,69	- 3,10	- 6,39
Q3	- 1,73	0	2,68	0	0,58	0	6,24	0	7,41	- 0,31	- 0,07	0,46
Q4	- 0,79	0	- 1,14	0	- 2,29	0	3,41	0	2,72	- 1,73	- 2,20	- 0,35

Positions des pistons appliqués au RFQ de 2m

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
Q1	3,13	-0,02	2,22	1,87	4,92	3,54	5,66	3,52	4,99	5,10	2,66	-0,15
Q2	0,03	-0,02	2,99	1,87	5,01	3,54	5,44	3,52	6,41	3,48	1,45	-1,94
Q3	-1,88	-0,02	3,58	1,87	3,35	3,54	9,85	3,52	13,55	4,86	4,48	4,91
Q4	-0,94	-0,02	-0,24	1,87	0,48	3,54	7,02	3,52	8,86	3,44	2,35	4,10

4.3.3 Résultat du test 2

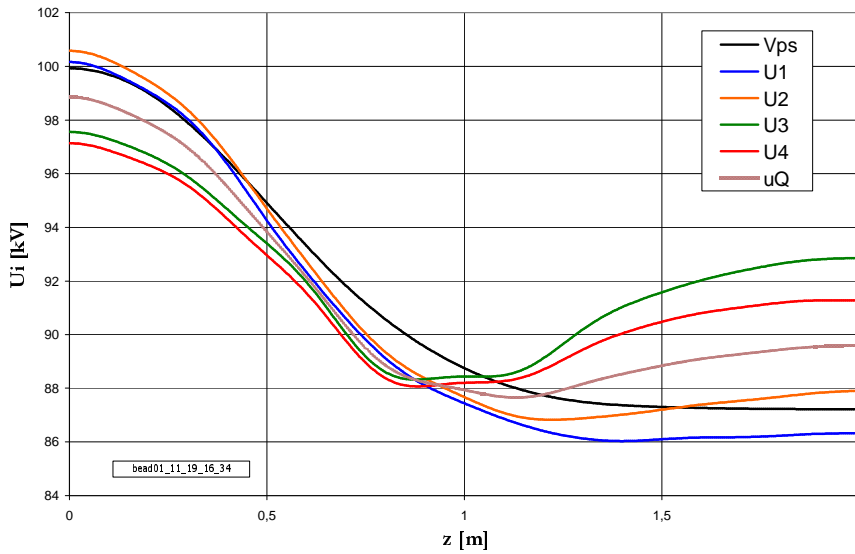


figure 49 : Tensions des 4 quadrants U_i et composante quadripolaire u_Q après application des déplacements prédits au RFQ pré-réglé à 350,8 MHz

La fréquence du mode accélérateur obtenue est $f_Q=352,3$ MHz.

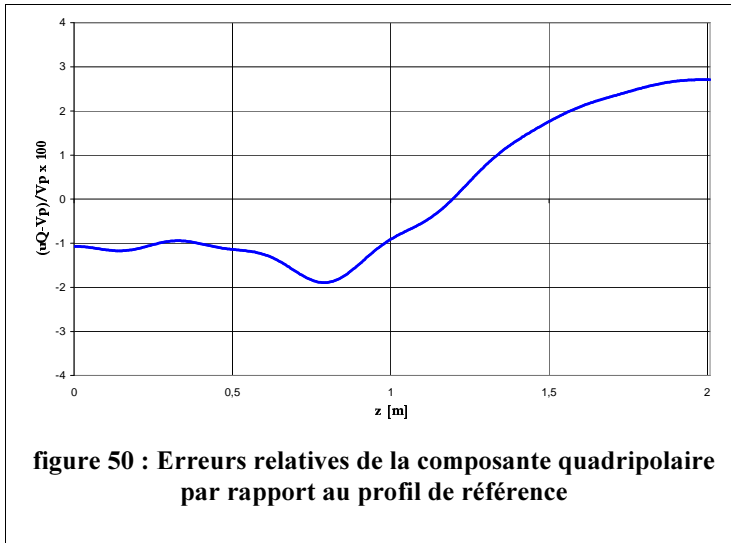


figure 50 : Erreurs relatives de la composante quadripolaire par rapport au profil de référence

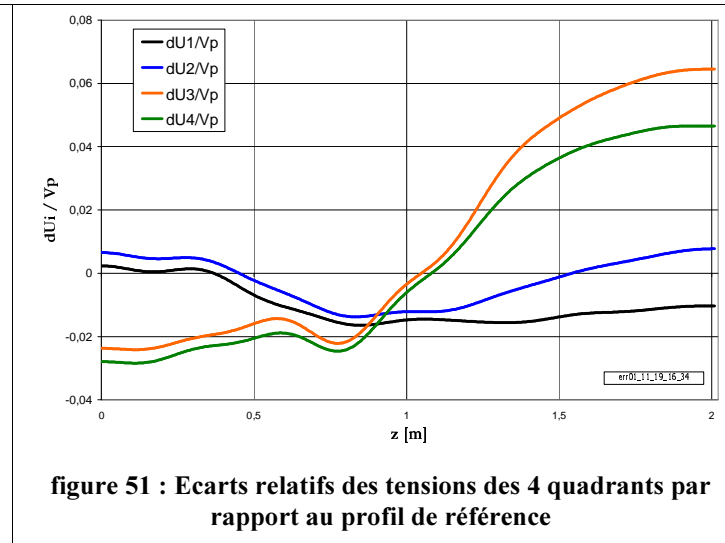


figure 51 : Ecarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport au profil de référence

L'écart relatif de la composante quadripolaire par rapport au profil de tension visée varie entre $-1,9 \cdot 10^{-2}$ à $2,7 \cdot 10^{-2}$ (figure 50). Les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport au profil de tension visée sont compris dans une fourchette allant de $-2,8 \cdot 10^{-2}$ à $6,5 \cdot 10^{-2}$ (figure 51). On est toujours supérieur au seuil recherché de 10^{-2} d'erreur relative.

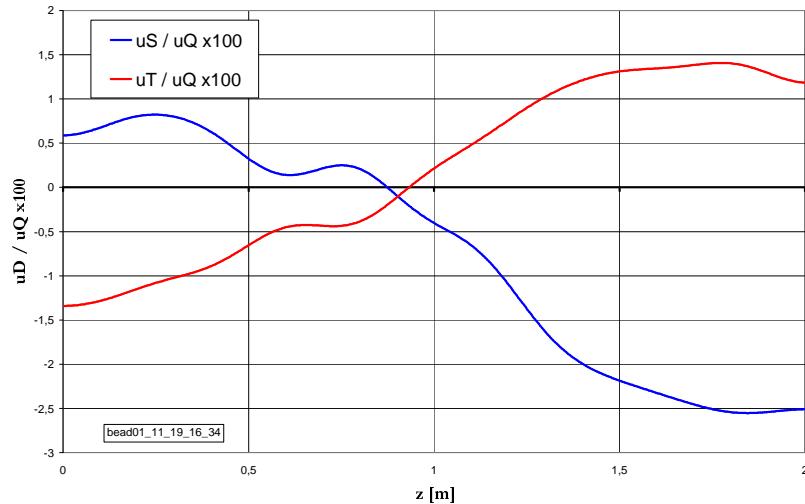


figure 52 : écarts relatifs entre les composantes dipolaires et celle quadripolaire de la tension accélératrice après application des déplacements calculés au RFQ équilibré à 350,8 MHz

Le rapport entre composantes dipolaires et quadripolaire varie entre les valeurs extrêmes de $-2,4 \cdot 10^{-2}$ et $1,4 \cdot 10^{-2}$ (figure 52). L'application des enfoncements calculés a dégradé ce paramètre qui avait été réglé de façon à être toujours inférieur à $5,5 \cdot 10^{-3}$.

4.3.4 Analyse des résultats

	RFQ équilibré à 350,8 MHz (Loi $V_p = \text{constante}$)	Valeurs de réglage demandées	Après application des enfoncements théoriques
fréquence de résonance du mode accélérateur f_Q	350,8 MHz	352,2 MHz	352,3 MHz
Erreur relative de la composante quadripolaire $(u_Q - V_p) / V_p$	min : $-1,9 \cdot 10^{-3}$ max : $+1,8 \cdot 10^{-3}$ $\Delta = 0,37 \cdot 10^{-2}$	min : -10^{-2} max : $+10^{-2}$ $\Delta = 2 \cdot 10^{-2}$	min : $-1,9 \cdot 10^{-2}$ max : $+2,7 \cdot 10^{-2}$ $\Delta = 4,6 \cdot 10^{-2}$
Rapport entre composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice u_D / u_Q	min : $-5,5 \cdot 10^{-3}$ max : $+4,5 \cdot 10^{-3}$ $\Delta = 1,05 \cdot 10^{-2}$	min : -10^{-2} max : $+10^{-2}$ $\Delta = 2 \cdot 10^{-2}$	min : $-2,4 \cdot 10^{-2}$ max : $+1,4 \cdot 10^{-2}$ $\Delta = 3,8 \cdot 10^{-2}$
Écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport au profil de tension visé dU_i / V_p	min : $-9 \cdot 10^{-3}$ max : $+8 \cdot 10^{-3}$ $\Delta = 1,7 \cdot 10^{-2}$	min : -10^{-2} max : $+10^{-2}$ $\Delta = 2 \cdot 10^{-2}$	min : $-2,8 \cdot 10^{-2}$ max : $+6,5 \cdot 10^{-2}$ $\Delta = 9,3 \cdot 10^{-2}$

- La fréquence de résonance obtenue après application des positions théoriques est supérieure de 100 kHz par rapport aux 352,2 MHz visés.
- Les erreurs relatives des tensions des 4 quadrants sont en certaines positions longitudinales 6,5 fois supérieures au seuil demandé.
- L'application des déplacements théoriques a augmenté les défauts dipolaires transverses. Or ces enfoncements sont tous d'amplitude identique dans un même plan transverse : dans le cadre de notre formalisme, ils constituent des fonctions de commandes quadripolaires. Ils ne devraient donc pas avoir d'effet sur les composantes dipolaires. C'est oublier que la fonction de transfert du RFQ n'est pas linéaire et que des déplacements importants constituent des grandes perturbations. Ces grandes perturbations dégradent le caractère bijectif de nos fonctions de commande et ont pour effet de modifier les composantes dipolaires en augmentant leur proportion au sein de la tension accélératrice.

5 Conclusion

En 2 itérations de déplacements des pistons, nous avons réglé l'ensemble des paramètres électromagnétiques du cahier des charges à l'aide des pistons d'accord dans un RFQ de 2 mètres présentant une électrode unique à section transverse constante. Le profil de tension visé correspond à celui des 2 premiers mètres du RFQ du projet IPHI.

En particulier, à l'issue du réglage, les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension longitudinale visée sont inférieurs à 7.10^{-3} à comparer aux 10^{-2} requis selon les critères « dynamique de faisceau ».

Les conditions nécessaires à la convergence d'un réglage à l'aide des pistons, qui ont été définies lors des tests du réglage d'un profil constant, permettent de régler un profil de tension variable en un nombre d'itérations très réduit.

1. Ajustement de la longueur des doigts de réglage dipolaire de manière à faire correspondre les fréquences des modes dipolaires mesurées avec celles du modèle.
2. Choix d'une distribution longitudinale autant régulière que possible des pistons d'accord déplacés.

	Valeurs de réglage demandées	Après 2 itérations de réglage déduites de notre formalisme	Après application des enfoncements théoriques au RFQ brut	Après application des enfoncements théoriques au RFQ équilibré
fréquence de résonance du mode accélérateur f_0	352,2 MHz	352,219 MHz	352,026 MHz	352,3 MHz
Erreur relative de la composante quadripolaire par rapport à la loi de tension $(uQ-Vp)/Vp$	min : -10^{-2} max : $+10^{-2}$ $\Delta = 2.10^{-2}$	min : $-0,2.10^{-2}$ max : $+0,3.10^{-2}$ $\Delta = 0,5.10^{-2}$	min : $-7,8.10^{-2}$ max : $+4.10^{-2}$ $\Delta = 15,8.10^{-2}$	min : $-1,9.10^{-2}$ max : $+2,7.10^{-2}$ $\Delta = 4,6.10^{-2}$
Rapport entre composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice uD / uQ	min : -10^{-2} max : $+10^{-2}$ $\Delta = 2.10^{-2}$	min : $-0,4.10^{-2}$ max : $+0,4.10^{-2}$ $\Delta = 0,8.10^{-2}$	min : $-4,9.10^{-2}$ max : $+8.10^{-2}$ $\Delta = 12,9.10^{-2}$	min : $-2,4.10^{-2}$ max : $+1,4.10^{-2}$ $\Delta = 3,8.10^{-2}$
Ecart relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport au profil de tension visé dUi / Vp	min : -10^{-2} max : $+10^{-2}$ $\Delta = 2.10^{-2}$	min : $-0,7.10^{-2}$ max : $+0,7.10^{-2}$ $\Delta = 1,4.10^{-2}$	min : $-13,5.10^{-2}$ max : $+15,8.10^{-2}$ $\Delta = 29,3.10^{-2}$	min : $-2,8.10^{-2}$ max : $+6,5.10^{-2}$ $\Delta = 9,3.10^{-2}$

Les enfoncements théoriques ne permettent pas d'atteindre les objectifs fixés. Qu'ils aient été appliqués au RFQ brut ou pré-équilibré à l'aide de notre formalisme,

- la fréquence de résonance du mode accélérateur est proche de celle de consigne
- mais les erreurs relatives de tous les autres paramètres sont supérieures au seuil demandé.

En particulier, les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence Vp obtenus sont pour tous les tests des enfoncements théoriques au moins 5 fois supérieurs au seuil d'erreur recherché de $\pm 10^{-2}$.

→ Malgré les bonnes caractéristiques mécaniques de la maquette, les défauts transverses ne peuvent être négligés et prédominent sur la qualité de l'équilibre du RFQ.

→ Les couplages transverses et longitudinaux doivent être considérés simultanément. On remarque à quel point les positions finales des pistons dans le RFQ réglé à 352,2 MHz sont différentes d'un quadrant à l'autre pour un même plan transverse.

→ La fonction de transfert du RFQ n'est pas linéaire et des déplacements importants constituent des grandes perturbations qui dans le cadre de notre formalisme de réglage dégradent le caractère bijectif de nos fonctions de commande. Ainsi les enfoncements théoriques que nous avons testés constituent des fonctions de commandes quadripolaires et pourtant leur application a augmenté la proportion de composantes dipolaires au sein de la tension accélératrice.

6 Références

[I] "Loi de tension pour test de la maquette du RFQ d'IPHI sur 2m", P. Balleyguier, 24/04/2001, Réf. CEA/DIF/DPTA/SPAA 59

[II] "Excitation de la cavité RFQ selon les modes transverses", F. Simoens, DAPNIA/SEA/IPHI/2000/63, 4 octobre 2000

[III]"Réglage d'un profil de tension constant dans un RFQ de 2 mètres à l'aide des pistons d'accord – Conditions de convergence", F. Simoens, A. France & J. Gaiffier, référence en cours de demande

[IV] Fichiers Superfish de définition des cellules 6 à 610, "cell006.txt" à "cell610.txt", calculés par R. Ferdinand

[V] "Effet des doigts stabilisateurs dans un tronçon de maquette de RFQ", F. Simoens, A. France & J. Gaiffier, 05/2001, référence DAPNIA/SEA-01-08