



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 : 2002/03/19

N/RÉF. : DAPNIA/SACM/IPHI2002/12

François SIMOENS

Alain FRANCE

Jacques GAIFFIER

Caractérisation d'un RFQ équipé d'électrodes au profil réel d'IPHI



TABLE DES MATIERES

<i>Caractérisation d'un RFQ équipé d'électrodes au profil réel d'IPHI</i>	<u>1</u>
1 Introduction	4
2 Configuration mécanique	6
3 Modèle du segment de RFQ	12
3.1 Réponse des pistons	12
3.1.1 Réponse des pistons et schéma électrique équivalent à la section transverse	12
3.1.2 Calcul des constantes électriques à l'aide du code « Superfish »	13
3.1.3 Réponse des pistons	15
3.2 traitement du profil de RFQ 'brut' résultant des calculs 2D (SuperFish)	16
3.2.1 Nécessité de traitements des données brutes	16
3.2.2 Génération du fichier du profil de tension	16
3.2.3 Génération des fichiers de C, Ca, f _Q et L	17
3.2.4 niveau du bruit aléatoire	18
4 Tests du segment de RFQ de 2 m	20
4.1 Spectre dans le RFQ de 2 m à profil variable	20
4.1.1 Distribution en fréquences avec les doigts à la longueur nominale	20
4.1.2 Critère d'ajustement de la longueur des doigts de réglage dipolaire	21
4.1.3 Distribution en fréquences avec les doigts raccourcis de 20 mm	22
4.2 Test de la convergence du réglage d'un profil de tension variable	24
4.2.1 Critères de convergence	24
4.2.2 Paramètres du réglage	25
4.3 Premier test : distribution longitudinale régulière des pistons	27
4.3.1 Evolution de la fréquence du mode accélérateur	29
4.3.2 Evolution des composantes modales de la tension accélératrice	30
4.3.3 Convergence des composantes modales dipolaires de la tension accélératrice (Répartition régulière des pistons)	35
4.4 Deuxième test de convergence : distribution longitudinale irrégulière des pistons	37
4.4.1 Evolution de la fréquence du mode accélérateur	38
4.4.2 Evolution des composantes modales de la tension accélératrice	39
4.4.3 Tension accélératrice sur la base de contrôle (répartition irrégulière des pistons).	44
4.5 Positions finales des pistons	46
5 Estimations des distributions des déséquilibres transverses dans un tronçon de RFQ de 1 mètre	48
6 Conclusion	51

1 Introduction

Nous avons démontré la validité de notre formalisme de réglage d'une cavité Radio-Fréquence Quadripolaire (RFQ) équipée d'électrodes à profil constant. En particulier nous avons appliqué ce formalisme pour obtenir un profil de tension constante ou variable dans un RFQ de 2 mètres, qui présentait une électrode continue sur toute la longueur (références [I] et [II]), ou constitué de l'assemblage de 2 RFQs de 1 mètre chacun réunis à travers un couplage résonant (références [III] et [IV]).

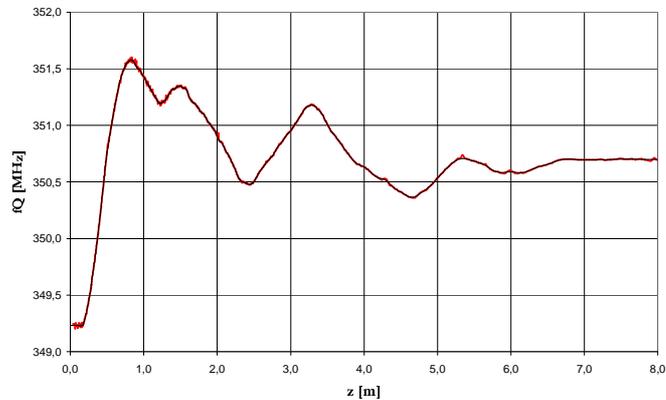


figure 1 : variation longitudinale de la fréquence de résonance des cellules accélératrices du RFQ d'IPHI

Il restait à démontrer la validité de notre formalisme appliqué au cas réel, où la section transverse des électrodes est variable et où la fréquence de résonance de la section transverse est modulée longitudinalement (figure 1). Ce cas est nettement plus complexe du point de vue du formalisme électromagnétique puisque la ligne de transmission quadrifilaire équivalente à cette cavité est alors inhomogène. En particulier, l'opérateur harmonique ne correspond pas au comportement électromagnétique de ce RFQ, et donc les fonctions propres des modes résonants ne sont plus sinusoïdales.

Les électrodes à profil variable des 2 premiers mètres du RFQ réel du projet IPHI ont été réalisées en aluminium par l'entreprise SICN. Le jeu de 8 lames a été usiné de manière à pouvoir être vissé dans 2 corps octogonaux de maquette réunis afin de reconstituer le premier segment de RFQ (figure 2).



figure 2 : 2 tronçons de maquette réunis et pourvus des lames à profil réel

▪ **Tests de notre formalisme de réglage sur un segment de RFQ identique au final**

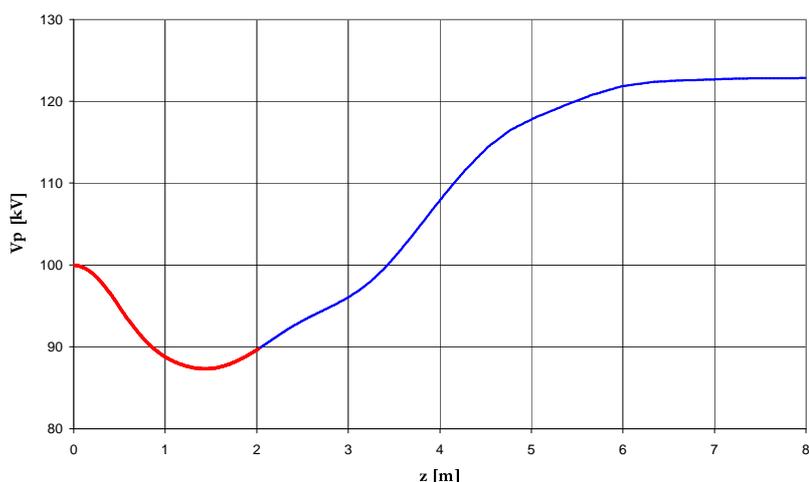


figure 3 : profil de la tension accélératrice du premier segment du RFQ d'IPHI

Dans cette configuration, nous avons testé la convergence du réglage de la distribution de tension variable correspondant au profil de la tension des 2 premiers mètres du RFQ final (portion rouge de la courbe de la figure 3).

- Lors d'un premier test, sur les 12 plans transverses de pistons disponibles, le réglage a été réalisé en n'en considérant que 8 choisis de manière à présenter une distribution longitudinale régulière.
- Un deuxième réglage a été obtenu en appliquant un nouvel algorithme de calcul des fonctions de commande qui a permis de considérer 10 plans transverses de pistons irrégulièrement répartis. Ces tests ont cherché à valider le formalisme.

▪ **Répétition des diagnostics à effectuer chez l'industriel sur chaque tronçon individuel de RFQ avant et après brasage**

La maquette a ensuite été montée dans les conditions des tests des tronçons individuels de RFQ qui seront effectués chez l'industriel avant et après brasage : un tronçon de 1 mètre pourvu des électrodes à profil variable, est terminé côté « entrée faisceau » par une plaque dotée d'une surépaisseur et fermé à l'autre extrémité par un cylindre qui isole la cavité de perturbations extérieures. Nous avons évalué la distribution longitudinale des défauts transverses avec et sans doigts de réglage des modes dipolaires.

2 Configuration mécanique

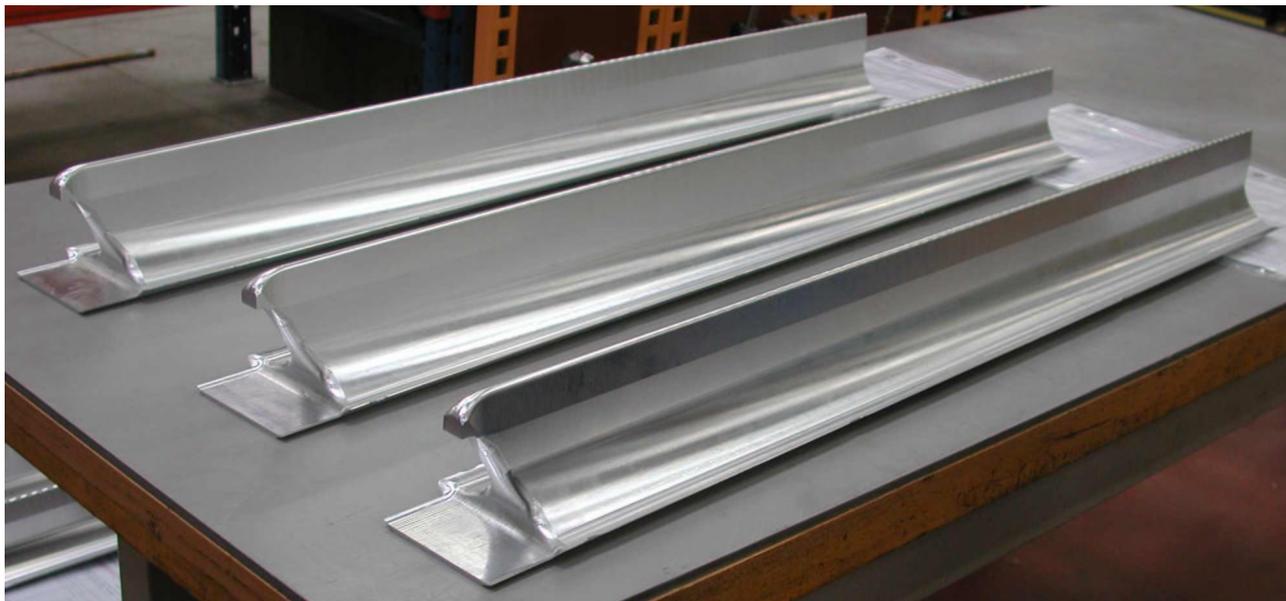


figure 4 : 3 des 4 lames à profil variable constituant le 1^{ier} mètre du premier segment côté "entrée faisceau"

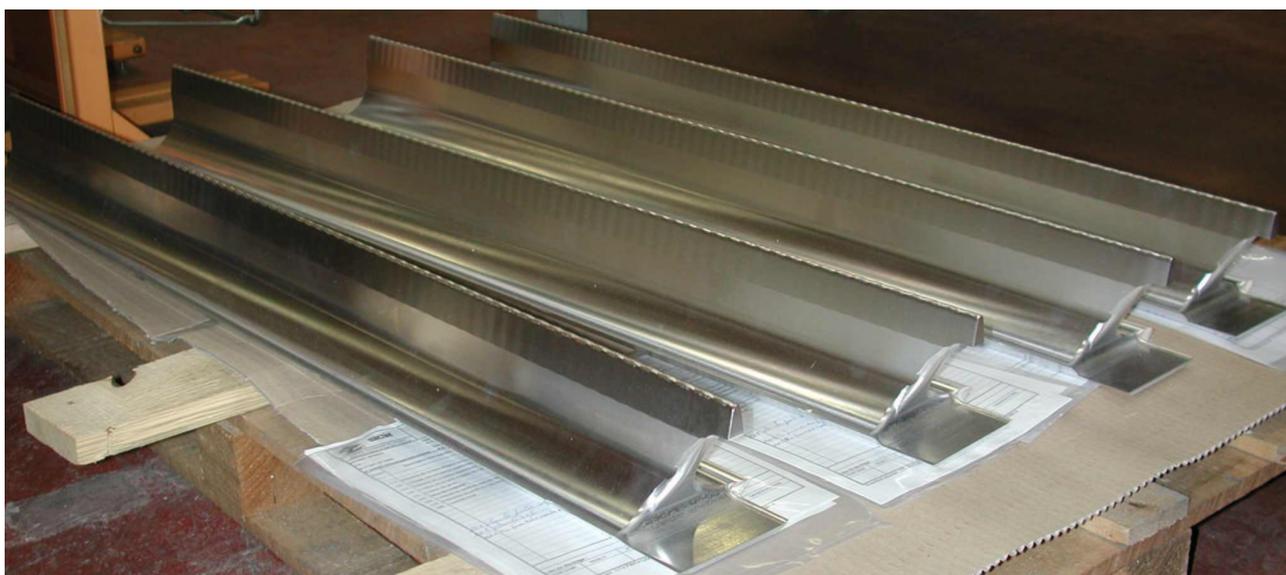


figure 5 : 4 lames à profil variable constituant le 2^{ième} mètre du premier segment

Les électrodes à profil variable des 2 premiers mètres du RFQ final du projet IPHI ont été réalisées en aluminium par l'entreprise SICN qui est l'entreprise de mécanique en charge de la fabrication de l'objet final en cuivre (figure 4 et figure 5). Leur profil est strictement identique à celui du RFQ final.

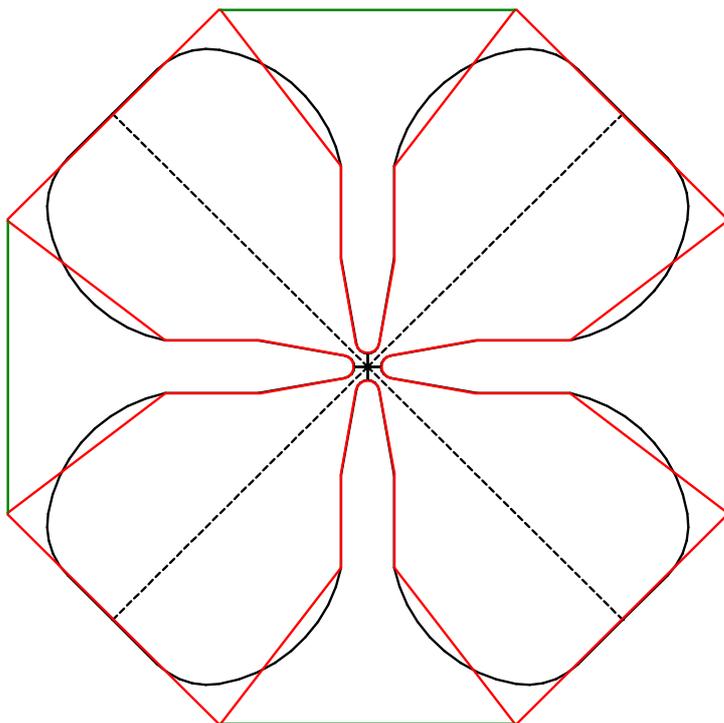


figure 6 : sections transverses des électrodes à profil constant (rouge) et de la cellule 179 du RFQ d'IPHI (noir) inscrites dans le corps octogonal de la maquette

Le jeu de 8 lames a été usiné de manière à pouvoir être rapporté dans les 2 corps octogonaux de maquette réunis afin de reconstituer le premier segment de RFQ final.

Dès l'origine de la conception de la maquette, nous avons prévu de pouvoir procéder à ce montage (référence [V]). A cette fin :

1. Les électrodes ont été conçues amovibles;
2. Une contrainte avait été donnée sur la position des côtés de l'octogone correspondant au fond des quadrants, là où se situent les pistons d'accord, les ouïes de pompage et les iris de couplage de puissance radiofréquence. Ces côtés ont été dimensionnés de manière à être compatibles avec l'octogone irrégulier que dessine la section transverse du RFQ final (figure 6).

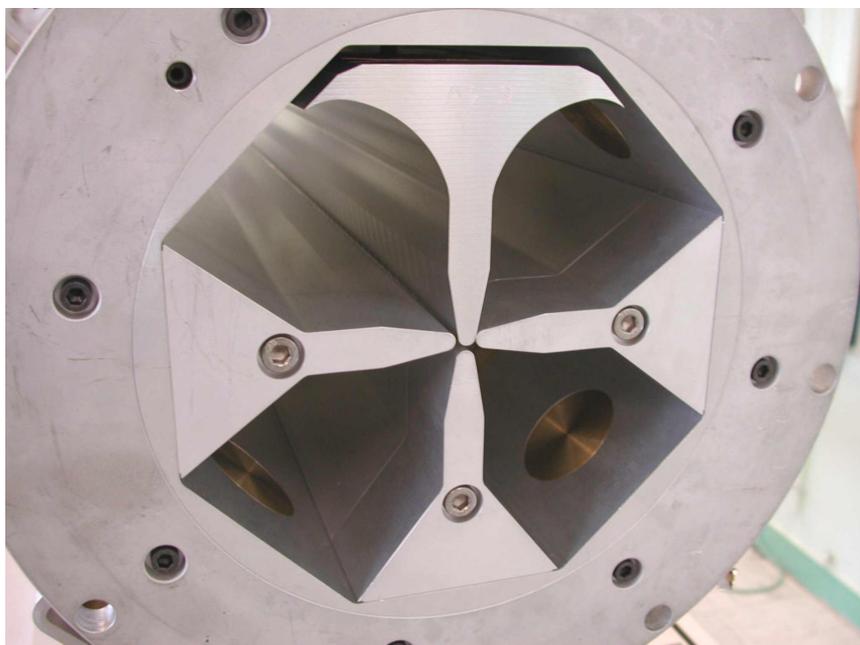


figure 7 : mise en place de l'électrode supérieure à profil variable

Les électrodes à profil constant reposent chacune sur un côté unique du corps octogonal de la maquette (3 électrodes inférieures de la figure 7). Les lames à profil réel sont en contact avec 2 côtés de l'octogone, de part et d'autre de leur base principale (électrode supérieure de la figure 7).

Un premier jeu de 4 lames correspond au premier mètre côté « entrée faisceau » (figure 8). Un deuxième jeu permet de reconstituer la fin du segment terminé par un couplage résonant (figure 9).



figure 8 : extrémité "couplage résonant".
L'extrémité de la lame dépasse du bord du tronçon de maquette (à droite sur la photographie).



figure 9 : extrémité "couplage résonant". On distingue l'entretoise nécessaire pour adapter les longueurs des lames réelles aux tronçons de maquette ainsi que les évidements de passage des pistons pratiqués sur les lames.

La longueur du premier segment du RFQ réel est supérieure à celle des 2 corps de maquette réunis. Des entretoises (figure 9) ont dû être ajoutées à chaque extrémité du segment entre les plaques de fermeture et les tronçons de maquette pour obtenir la longueur réelle (à l'extrémité "entrée faisceau" d'une épaisseur de 8,6 mm, à l'extrémité "couplage" de 5 mm).

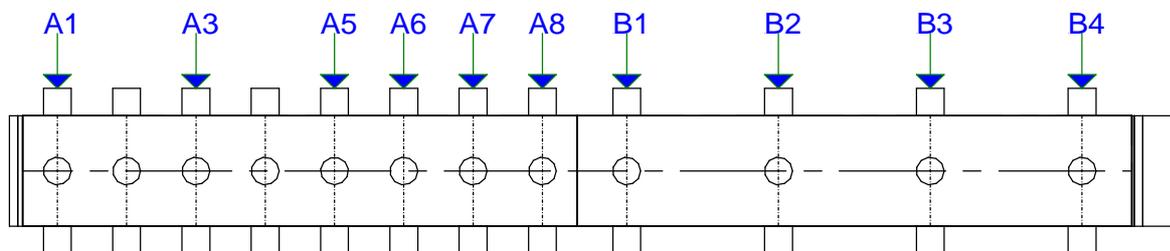


figure 10 : plans transverses des pistons considérés pour le deuxième test de réglage

Des évidements ont été réalisés sur les retours des lames en fond de cavité afin de permettre le passage des pistons (figure 9 et figure 10).

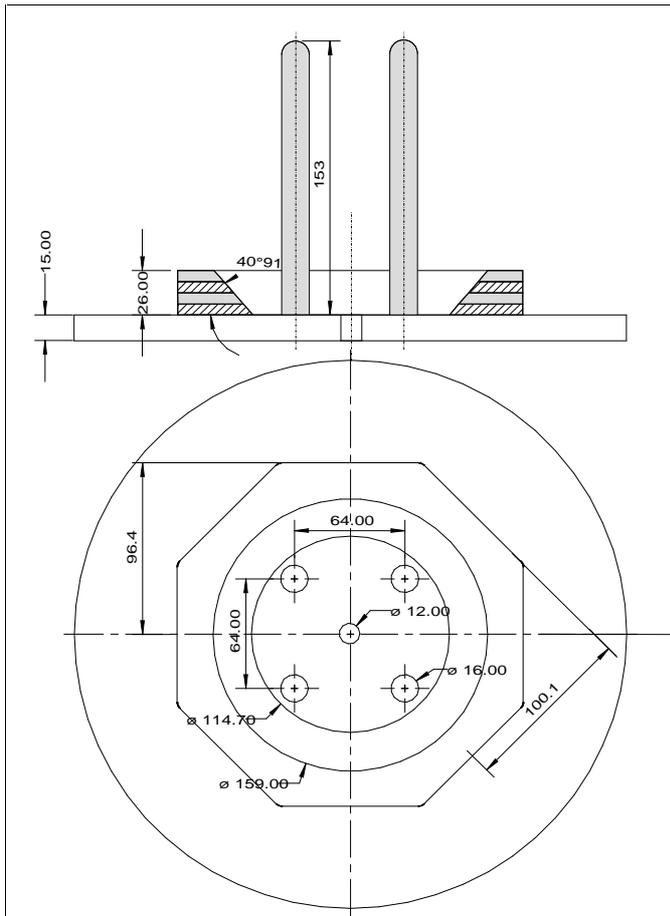


figure 11 : schéma de la plaque de fermeture du segment de RFQ côté "entrée faisceau"

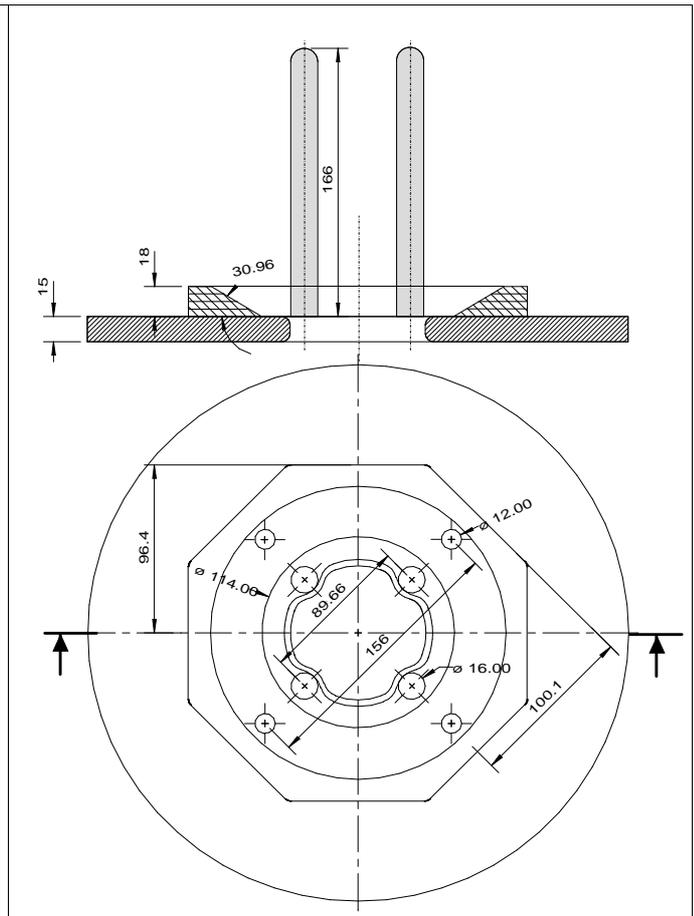


figure 12 : schéma de la plaque de couplage placée en extrémité #2 du segment de RFQ

L'extrémité du segment correspondant à l'entrée du faisceau notée #1, est fermée par une flasque (figure 13) pourvue de plaques octogonales de 6,5 mm d'épaisseur (figure 11). A l'extrémité opposée, une plaque de couplage (figure 14) est montée avec des plaques de 4,5 mm d'épaisseur côté intérieur du segment (figure 12).

Les surépaisseurs permettent l'adaptation des conditions aux limites dans les régions terminales des segments : elles ont été réglées à leurs valeurs nominales (de 13 mm côté "entrée faisceau", de 9 mm côté "couplage", référence [VI]).

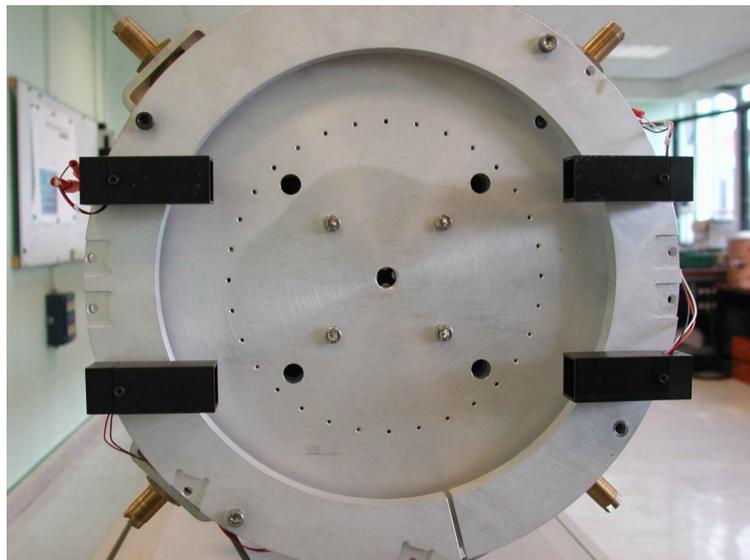


figure 13 : plaque de fermeture côté "entrée faisceau"

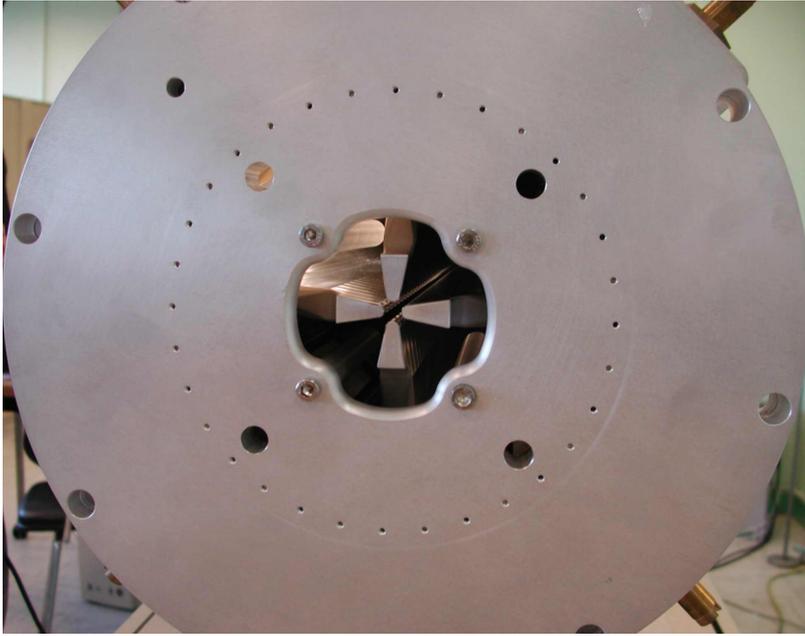


figure 14 : plaque de couplage vue depuis l'extérieur

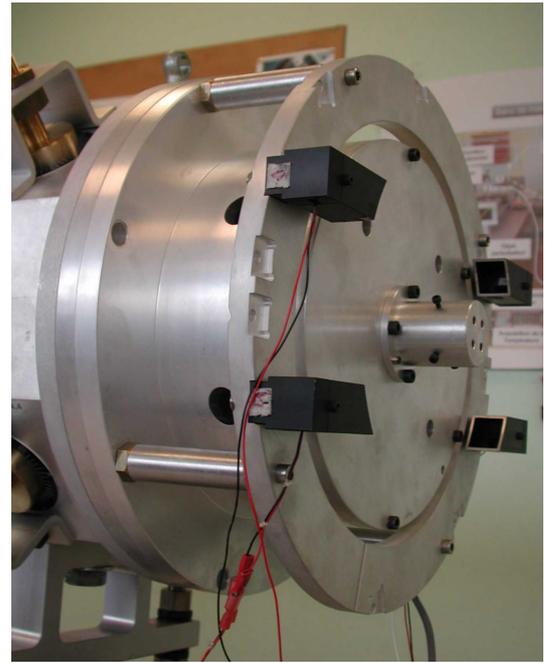


figure 15 : guide cylindrique isolant la cavité des perturbations extérieures

Un guide cylindrique fermé, monté côté extérieur du segment sur la plaque de couplage, isole la cavité des perturbations extérieures (figure 15).

Sur chaque plaque (entrée, couplage résonant et plan de fermeture du cylindre), des trous permettent le passage de l'objet perturbateur qui est guidé sur la bissectrice de chaque quadrant à 78 mm de l'axe du faisceau.

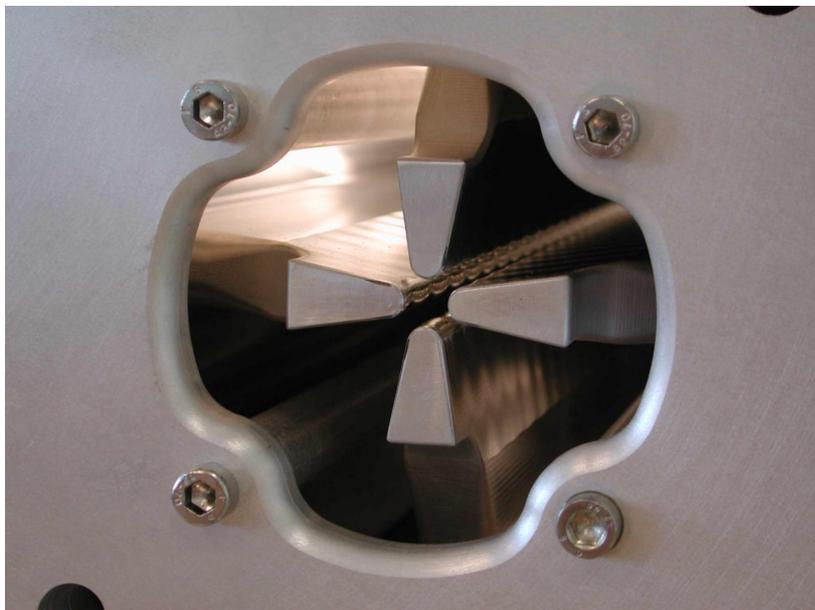
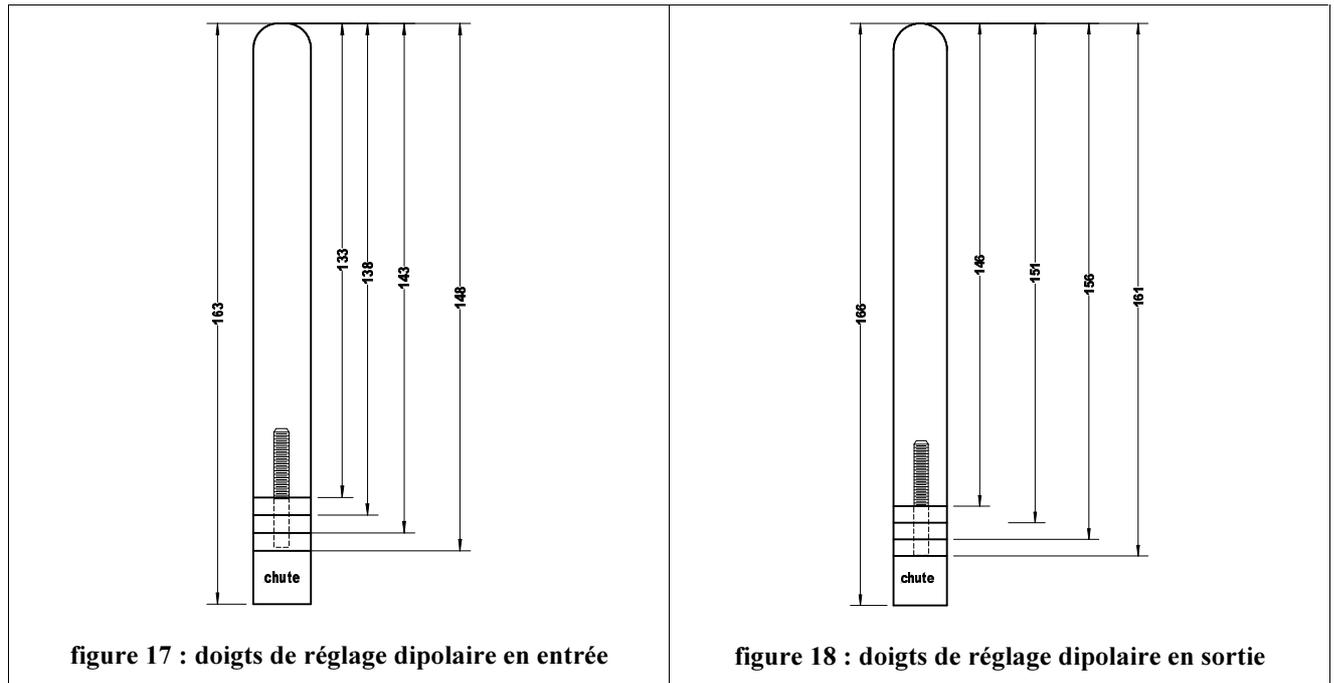


figure 16 : ouverture de la plaque de couplage. Les 4 doigts de réglage dipolaire sont montés.



Les doigts de réglage dipolaire ont été conçus de manière à pouvoir facilement ajuster leurs longueurs à l'aide d'entretoises (figure 17 et figure 18). Les longueurs nominales pour le premier segment du RFQ final sont de 153 mm à l'extrémité #1, de 166 mm à l'extrémité #2 (référence [VI]).

Nous avons mesuré après montage des lames un facteur de qualité Q très faible, de l'ordre de 450, à comparer aux 2500-3000 de la maquette pourvue des électrodes à profil constant. Le signal transmis à travers le segment de RFQ est atténué de 50 dB au lieu des 37 dB couramment mesurés. Les distributions du champ sont alors trop bruitées pour être analysées.

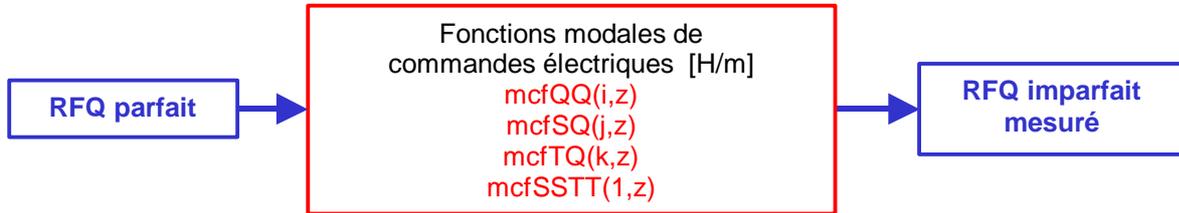
Bénéficiant de l'étude de l'amélioration du signal sur bruit avec les électrodes à profil constant (référence [VII]) nous avons cherché à assurer un bon contact entre les 2 côtés des électrodes à profil variable et le corps octogonal de la maquette en y insérant un joint.

Finalement un fil en étain d'un diamètre 0,25 mm a permis d'obtenir un facteur de qualité $Q=2700$ tout en assurant une fréquence de résonance de 350,2 MHz avec les pistons affleurants, valeur proche de celle du modèle.

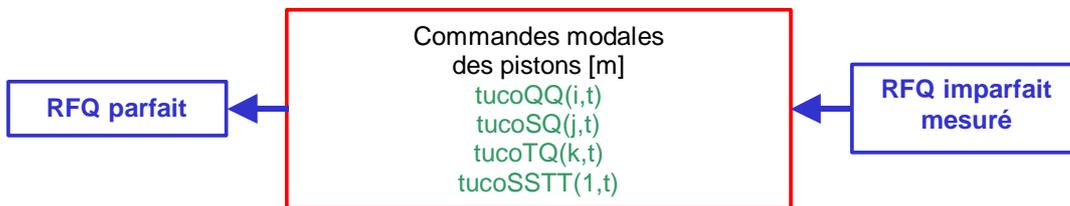
3 Modèle du segment de RFQ

3.1 Réponse des pistons

3.1.1 Réponse des pistons et schéma électrique équivalent à la section transverse

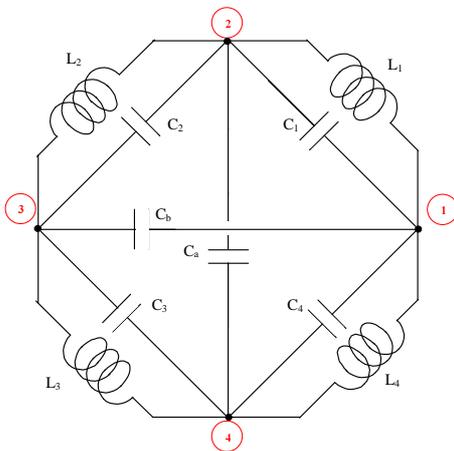


L'analyse des mesures génère des fonctions modales de commandes mcf_{QQ} , mcf_{SQ} , mcf_{TQ} et mcf_{SSTT} : ce sont les perturbations qui doivent être appliquées à un RFQ parfait pour le transformer en RFQ imparfait, tel qu'il a été mesuré. Leur unité est le « Henry par mètre ».



Pour le réglage des pistons, ces grandeurs électriques doivent être converties en déplacements mécaniques, respectivement $tucO_{QQ}$, $tucO_{SQ}$, $tucO_{TQ}$ et $tucO_{SSTT}$, en les multipliant par la réponse en inductance propre à chaque piston. Cette réponse, exprimée en H/m/m, correspond à la pente de la courbe de l'inductance du circuit résonant L,C équivalent à chaque quadrant en fonction de l'enfoncement du piston.

Rappelons le schéma électrique équivalent à la section transverse que nous utilisons (figure 19).



Chaque quadrant constitue un circuit résonant L_k, C_k :

- La capacité linéique 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, $C_k=C$, $L_k=L$, et $C_a = C_b$.

figure 19 : schéma équivalent à la section transverse du RFQ

3.1.2 Calcul des constantes électriques à l'aide du code « Superfish »

Pour construire le modèle du RFQ parfait vers lequel nos réglages doivent tendre, nous devons entrer les constantes électriques de ce schéma.

Ces constantes ont été calculées pour chaque cellule du RFQ définie par la dynamique de faisceau à l'aide du code Superfish. Nous avons écrit un code Matlab baptisé « fishtool » qui génère automatiquement des maillages Superfish de la section transverse de différents RFQs avec un certain nombre de paramètres variables. En particulier ce code génère les maillages du RFQ d'IPHI de toute cellule en ajoutant un piston à l'enfoncement variable.

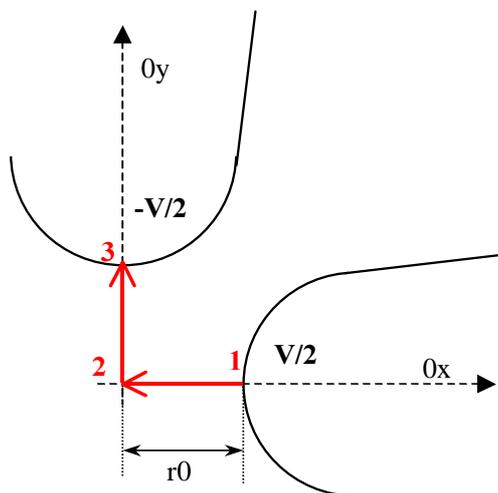


Figure 20 : définition du potentiel V

Pour rappel, la tension entre les électrodes V est définie en fonction du champ de normalisation E_0 et du rayon moyen entre électrodes r_0 par

$$V = 2 \int_{r=0}^{r=r_0} \vec{E} \cdot \vec{u}_x \cdot dx = 2 \int_0^{r_0} E_x(x,0) dx = 2 \cdot r_0 E_0$$

E_0 et r_0 sont des paramètres donnés par le design de la dynamique.

En maillant un quart de section transverse de chaque cellule, on calcule respectivement pour le mode quadripolaire et le mode dipolaire, les fréquences de résonance f_q et f_d , les énergies emmagasinées totales U_q et U_d ,

- Pour le mode quadripolaire, la tension V règne dans un quadrant entre 2 électrodes voisines ; donc V est telle

$$\text{que } \frac{U_q}{4} = \frac{1}{2} C V^2 \text{ et la fréquence de résonance } f_q = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- Dans le cas du mode dipolaire, la tension V règne entre 2 électrodes opposées. L'énergie totale emmagasinée est donc $U_d = \frac{1}{2} (C_c + (2C / 2C)) V^2 = \frac{1}{2} (C_c + C) V^2$ et la fréquence de résonance

$$f_d = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_c)}}$$

En partant des paramètres (E_0 , r_0) et des résultats de SUPERFISH f_q , f_d , U_q et U_d , on obtient les constantes :

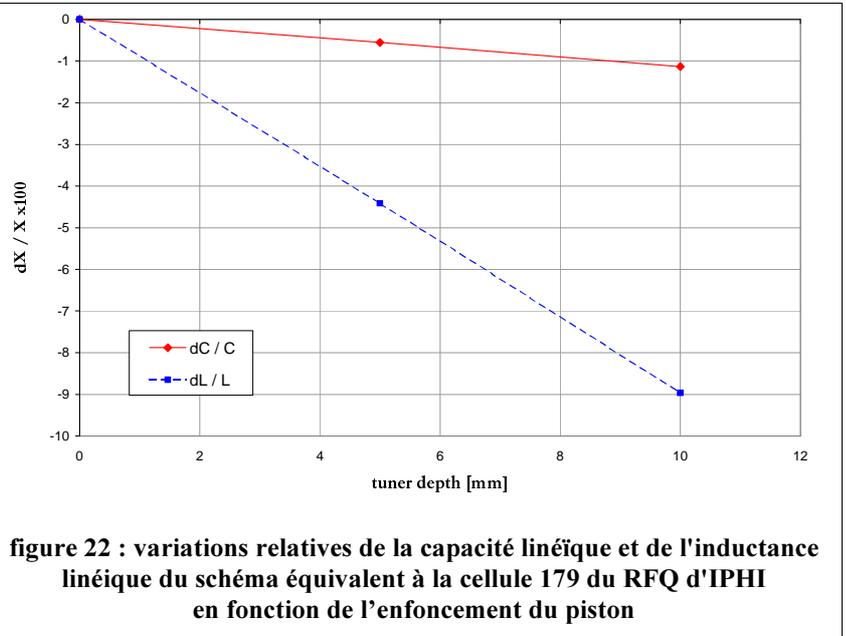
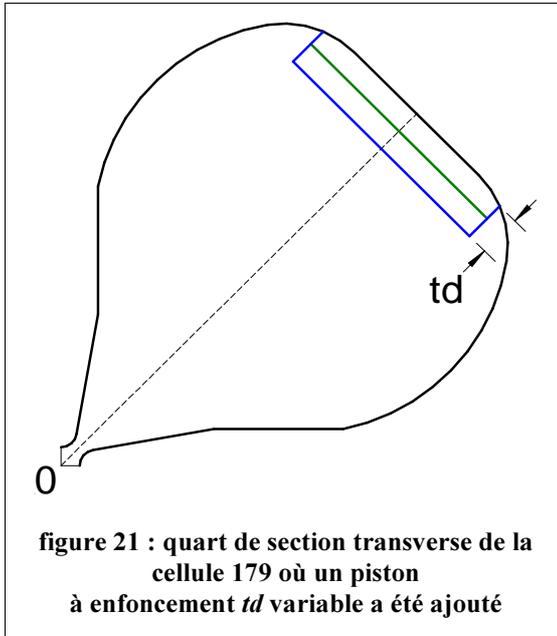
Capacité linéique [F/m]	Inductance linéique [H/m]	Capacité linéique de couplage [F/m]	
$C = \frac{2V^2}{U_q}$	$L = \frac{1}{C(2\pi f_q)^2}$	$C_c U = \frac{2U_d}{V^2} C$ à partir des énergies	$C_c f = \frac{1}{L(2\pi f_d)^2} C$ à partir des fréquences

Pour chaque cellule il faut connaître la réponse des pistons et donc mailler sa section transverse sous Superfish en ajoutant un piston dont l'enfoncement est modulé. Pour chaque enfoncement, nous calculons les fréquences de résonance f_q et f_d , les énergie emmagasinées totales U_q et U_d , et déduisons les constantes électriques L , C et C_c .

Les cellules où nous avons calculé le schéma électrique transverse correspondent à la position du milieu des pistons considérés pour les tests de convergence (en gras dans le Tableau 1).

Tableau 1 : position du milieu des 12 plans de pistons des 2 tronçons A et B réunis et cellule du design "dynamique de faisceau" correspondante

z [m]	70,8	195,1	319,4	443,7	568	692	817	941	1092	1364	1637	1909
cellule	11	32	52	73	93	114	134	155	179	223	265	303
piston	1 (A1)	2 (A2)	3 (A3)	4 (A4)	5 (A5)	6 (A6)	7 (A7)	8 (A8)	9 (B1)	10 (B2)	11 (B3)	12 (B4)



Quand l'enfoncement du piston augmente, la variation relative de l'inductance linéique L est nettement supérieure à celle de la capacité linéique C (figure 22).

Tableau 2 : rapport $(dL/L)/(dC/C)$ en fonction de l'enfoncement du piston

piston	A1	A3	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
td [mm]	cell11	cell53	cell93	cell114	cell134	Cell155	cell179	cell223	cell265	cell303
1	7,7884	7,9462	7,6768	7,8175	7,4093		7,9208	7,8954	7,8954	7,8292
2	8,1723	7,8142	8,0346		7,6505					
5		7,9656			7,7284					
10	8,0727	7,9937	7,9377	7,8921	7,8331	7,8880	7,9131	7,8973	7,8973	7,9009

Cette valeur $(dL/L)/(dC/C)$ reste proche de 8 (Tableau 2) :

1. Pour les différents enfoncements de piston td considérées.
2. Pour les différentes cellules maillées

Cela justifie le schéma électrique à constantes localisées que nous avons introduit. Nous pouvons considérer qu'un déplacement de piston ne modifie que L . On calcule :

- Quand les pistons affleurent la surface interne, position de référence pour le modèle, $L_0=1/(2\pi C f_{q0}^2)$
- Pour un enfoncement td , $L_{td}=1/(2\pi C f_{qtd}^2)$

$$\text{On a donc } L_{td}=L_0 \frac{f_{q0}^2}{f_{qtd}^2}$$

3.1.3 Réponse des pistons

La réponse en inductance "slope" des pistons à une variation de l'enfoncement est donnée par

$$slope = \frac{L_d - L_0}{td - 0} \text{ en [H/m/m]}$$

Les réponses en inductance ont été calculées pour toutes les cellules du design définitif où des pistons étaient présents dans la maquette pourvue des électrodes à profil variable (Tableau 3).

Tableau 3 : réponses « slope » exprimées en [H/m/m] des pistons de 10 plans transverses de pistons

piston	A1	A3	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
td [mm]	cell11	cell53	cell93	cell114	cell134	cell155	cell179	cell223	cell265	cell303
1	-6,852E-08	-6,763E-08	-6,477E-08	-6,303E-08	-6,171E-08		-6,788E-08	-6,772E-08	-6,772E-08	-6,771E-08
2	-6,922E-08	-6,878E-08	-6,738E-08		-6,585E-08					
5		-6,931E-08			-6,720E-08					
10	-6,925E-08	-6,919E-08	-6,895E-08	-6,879E-08	-6,867E-08	-6,857E-08	-6,851E-08	-6,844E-08	-6,844E-08	-6,861E-08

Pour éviter de sous-estimer la réponse des pistons et risquer de voir le réglage diverger, la valeur maximale de la réponse est choisie pour construire le modèle. On retient les valeurs calculées pour un enfoncement de 10 mm (valeurs en gras dans le Tableau 3).

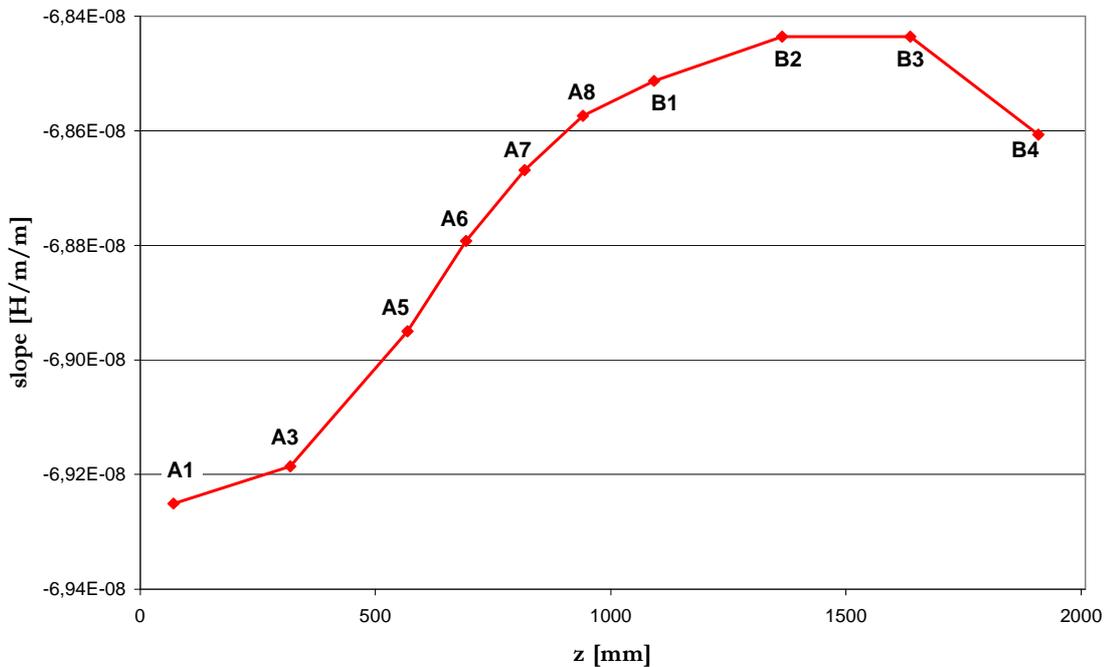


figure 23 : réponse en inductance des cellules du RFQ définitif situées au milieu des plans de pistons déplacés sur la maquette pourvue des électrodes à profil variable

$$| [max(slope) - min(slope)] / min(slope) | = 1,18.10^{-2}$$

La réponse varie de 1,2 % (figure 23) sur l'ensemble des cellules où des pistons ont été déplacés lors des tests de convergence sur la maquette pourvue des électrodes réelles.

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. 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).

Le fichier de définition donne 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 par SuperFish,
- L devra être déduite de la fréquence de résonance f_Q et de la capacitance parallèle C .

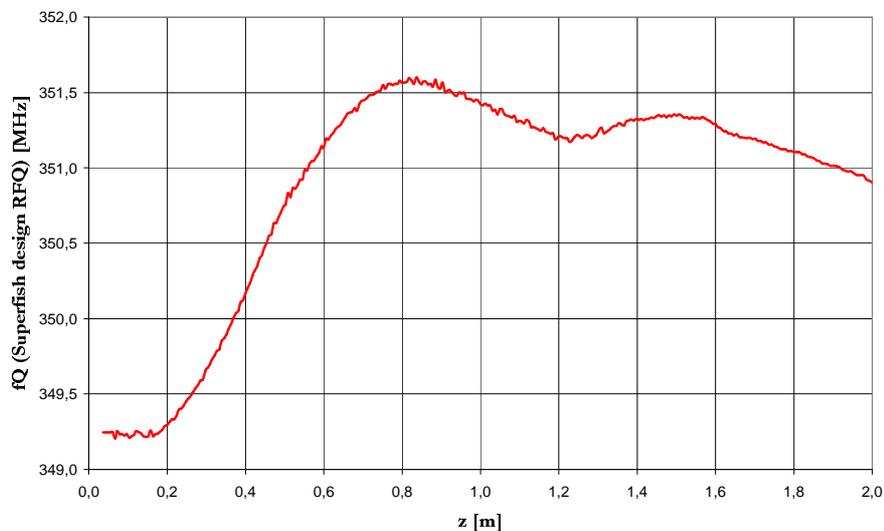


figure 24 : fréquence de résonance du mode accélérateur issu directement du calcul Superfish dans les cellules des 2 premiers mètres du RFQ d'IPHI

Sur le simple plan de l'analyse numérique, ces données brutes présentent suffisamment d'imperfections pour être inutilisables directement (figure 24). 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 C0 au plus, ce qui ne convient pas pour représenter la solution d'un problème de Sturm-Liouville (qui est au moins de classe C2). 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.

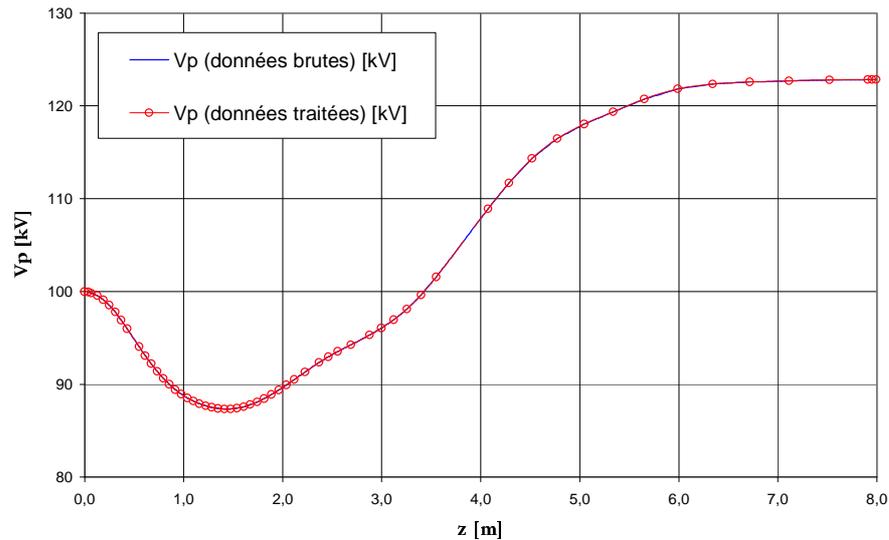


figure 25 : profils de tension brut et obtenu après traitement numérique

C'est ce fichier de 60 échantillons (figure 25) qui est directement utilisé pour l'analyse des mesures (éventuellement convenablement ré-échantillonné).

3.2.3 Génération des fichiers de C , Ca , f_Q et L

Les profils de capacitance C et Ca (figure 26 et figure 27) et de fréquence de résonance transverse f_Q (figure 28) sont ensuite (et indépendamment) traités comme suit:

- Certains échantillons isolés sortent clairement de l'échelle: il s'agit des échantillons # 79 / 141 / 144 / 162 / 179 / 199 / 200 / 313 / 534 (Ajouter 5 pour obtenir le # de cellule correspondant). Ils sont systématiquement remplacés par la moyenne des deux échantillons qui les encadrent.
- Un certain nombre d'échantillons consécutifs, situés soit au début, soit à la fin de l'enregistrement, sont également manifestement hors-échelle. Ils sont carrément supprimés; il s'agit des échantillons # 1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 7 / 605 (Ajouter 5 pour obtenir le # de cellule correspondant).
- Les données sont également manifestement bruitées aléatoirement, à des degrés divers selon l'abscisse. Des filtres passe-bas digitaux sont utilisés pour éliminer ce bruit. Le gabarit de réjection est une fonction de Taylor -30 dB, $n = 7$, qui assure une excellente réduction de bruit, virtuellement sans aucune oscillation dans la bande passante. Les caractéristiques de filtrage sont les suivantes:

	C	Ca	f_Q
fréquence digitale max. de la bande passante	0,05	0,01	0,08
fréquence digitale min. de la bande de réjection	0,10	0,02	0,14

(les fréquences indiquées sont des fréquences digitales, i.e. une fréquence de 0.1 correspond à une période égale à 10 périodes d'échantillonnage).

- Enfin, il faut régénérer les échantillons manquants:
 - ⇒ Les six premières cellules (#0 à 5), qui ne figurent pas dans le fichier de données brutes,
 - ⇒ Les échantillons hors échelle supprimés en début/fin d'enregistrement,
 - ⇒ Les échantillons situés dans les transitoires d'entrée/sortie de filtre.

Un estimateur polynomial d'ordre faible permet de restituer ces échantillons manquants.

Les caractéristiques de l'estimation sont:

	C	Ca	f_Q
longueur d'estimation	3	8	3
ordre	1	2	1

L'inductance (figure 29) est calculée simplement à partir des valeurs filtrées de la capacitance et de la fréquence de résonance transverse.

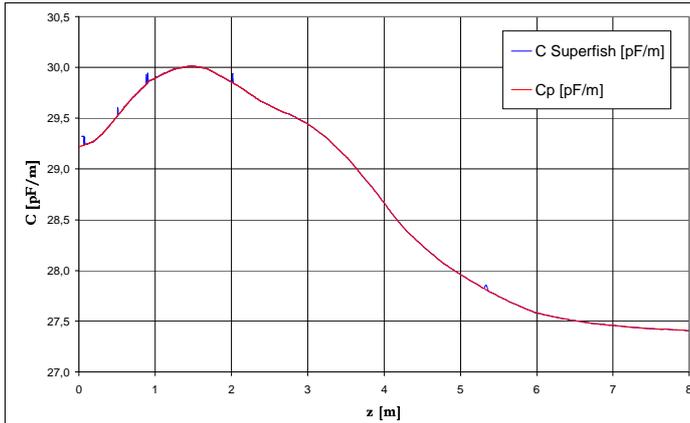


figure 26 : capacité linéique C brute et après filtrage

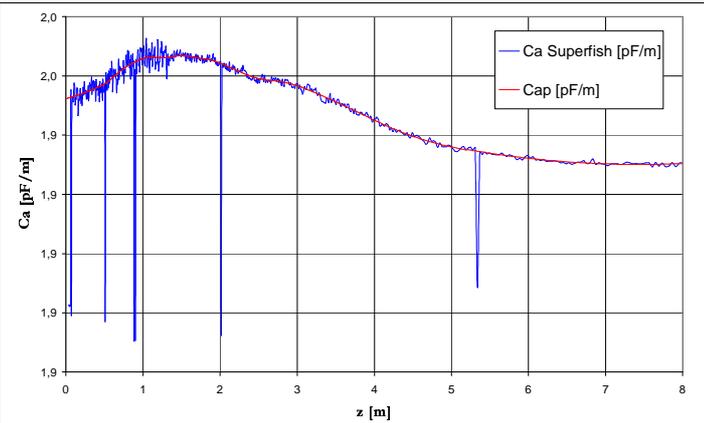


figure 27 : capacité linéique Ca brute et après filtrage

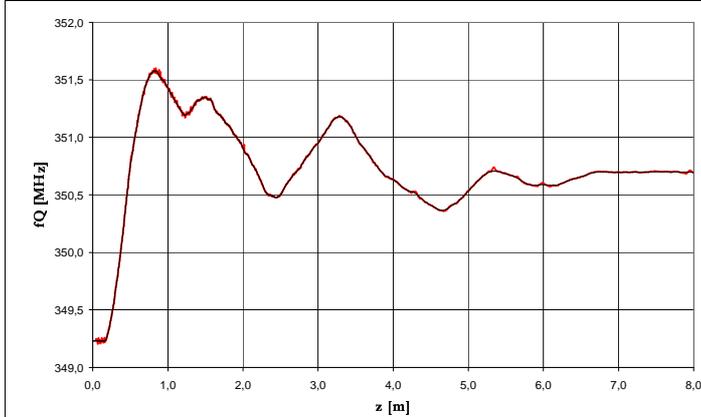


figure 28 : fréquence de résonance du mode quadripolaire

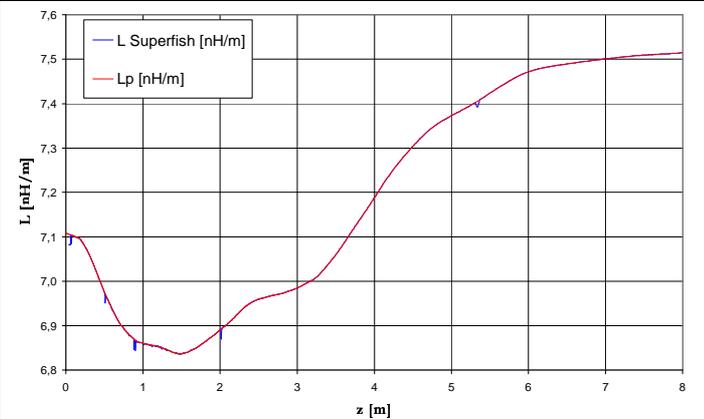


figure 29 : Inductance linéique L brute et après traitement

3.2.4 niveau du bruit aléatoire

Une estimation du niveau du bruit aléatoire rejeté par les filtres est calculée. On obtient:

- pour la capacité linéique parallèle C , qui varie entre 27 et 30 pF/m environ, un bruit rejeté d'amplitude crête à crête de 0,01 pF/m,
- pour la capacité linéique diagonale Ca , qui varie entre 1,93 et 1,97 pF/m environ, un bruit rejeté d'amplitude crête à crête de 0.02 pF/m,
- pour la fréquence de résonance transverse f_Q , qui varie entre 349 et 352 MHz environ, un bruit rejeté d'amplitude crête à crête de 10 kHz,
- pour l'inductance linéique parallèle L , qui varie entre 6,8 et 7,5 nH/m, un bruit rejeté d'amplitude crête à crête de 0,004 nH/m.

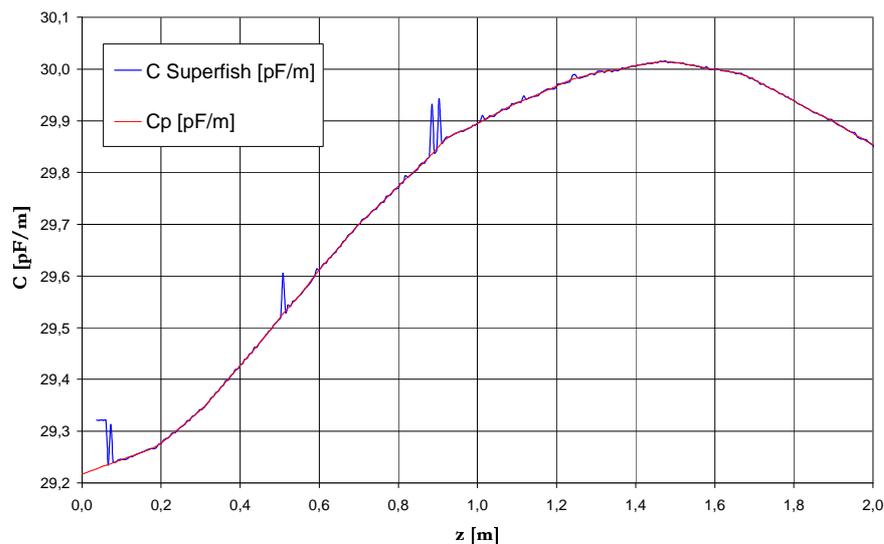


figure 30 : capacité linéique C brute et après filtrage des 2 premiers mètres du RFQ d'IPHI

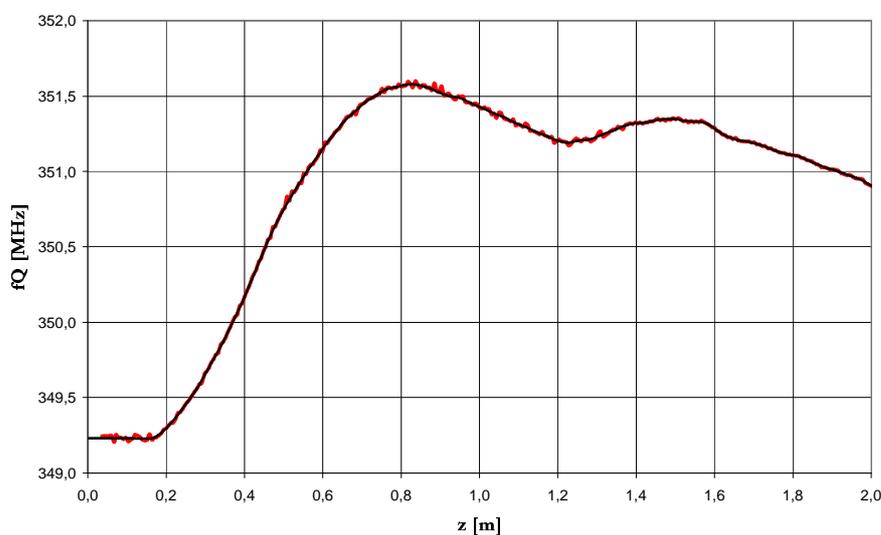


figure 31 : fréquence de résonance du mode quadripolaire des 2 premiers mètres du RFQ d'IPHI, donnée brute (rouge) et après traitement du signal (noir)

On remarque que les échantillons isolés hors-échelle présentent des erreurs bien plus importantes, de l'ordre de 0,1 pF/m sur C ou sur Ca (figure 30) et de l'ordre de 50 kHz sur f_Q (figure 31) .

L'efficacité de ces traitements est considérée comme satisfaisante : aucun bruit significatif n'est observé lors des tests d'orthogonalité des fonctions de base (calculées à partir des paramètres filtrés), ni sur le noyau de l'espace fonctionnel associé.

4 Tests du segment de RFQ de 2 m



figure 32 : maquette de RFQ de 2 mètres équipée des électrodes à profil réel

4.1 Spectre dans le RFQ de 2 m à profil variable

4.1.1 Distribution en fréquences avec les doigts à la longueur nominale

Tableau 4 : fréquences des modes résonants mesurées dans le RFQ pourvu des profils réels

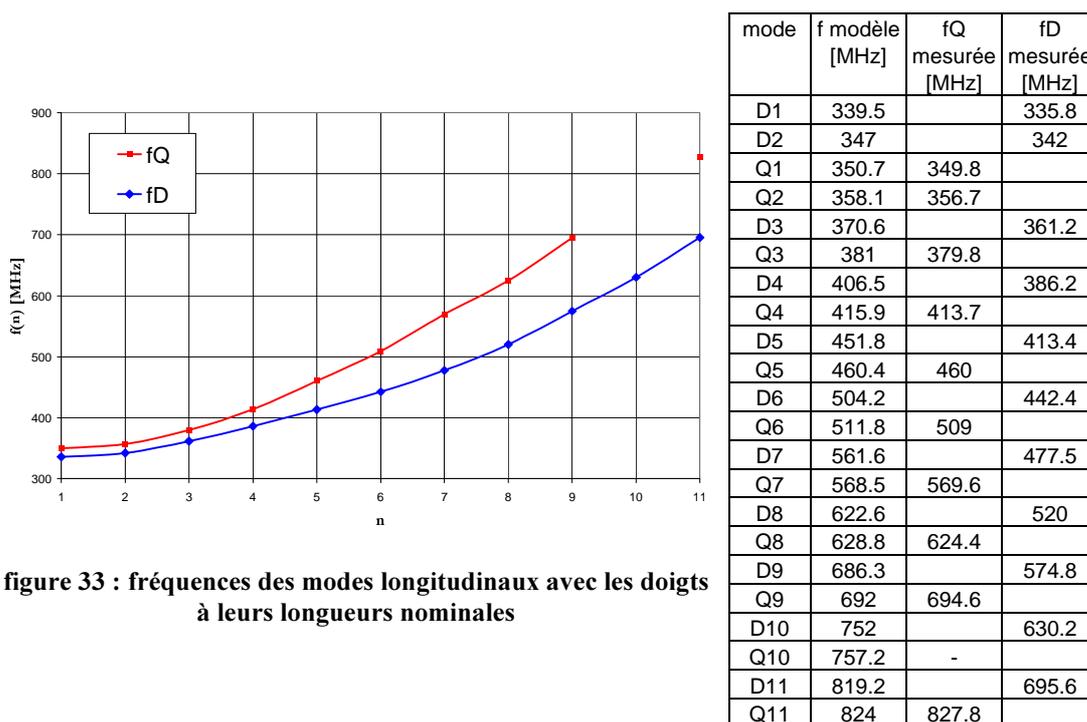


figure 33 : fréquences des modes longitudinaux avec les doigts à leurs longueurs nominales

Les doigts de réglage dipolaire ont été montés sur les 2 plaques des extrémités avec leurs longueurs nominales (153 mm à l'extrémité #1, 166 mm à l'extrémité #2). Nous avons relevé les fréquences des modes résonants quadripolaires (fQ) et dipolaires (fD) jusqu'au 11^{ième} ordre longitudinal (Tableau 4). Les modes longitudinaux ont été identifiés à l'aide de notre méthode de superposition des spectres en fréquences obtenus par différentes excitations transverses (référence [VIII]).

4.1.2 Critère d'ajustement de la longueur des doigts de réglage dipolaire

◆ Dans un RFQ non segmenté homogène de longueur L , les fréquences f_n des modes longitudinaux d'ordre n supérieur peuvent s'exprimer en fonction de la fréquence f_1 du premier mode 1 par (référence [VIII]):

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{2f_1}{c}\right)^2 + \left(\frac{n-1}{L}\right)^2} \quad \text{ou encore} \quad f_n^2 = f_1^2 + (n-1)^2 df^2.$$

On introduit $df = c/2L$, l'« écart quadratique en fréquence des modes longitudinaux ».

Dans un RFQ non segmenté homogène, c'est une constante dépendant de la longueur de la cavité

◆ Dans un RFQ non segmenté inhomogène, les fréquences des modes longitudinaux sont données par :

$$f_n^2 = f_1^2 + (n-1)^2 df(n)^2$$

où l'« écart quadratique en fréquence des modes longitudinaux » dépend également de l'ordre du mode. Cependant il peut être considéré comme étant constant pour la plupart des applications.

◆ Pour un RFQ segmenté, une relation similaire est utilisée pour définir l'écart quadratique de fréquence :

$$df(n) = \frac{\sqrt{f_n^2 - f_{nSegm}^2}}{(n - n_{Segm})}$$

- f_n est la fréquence du mode longitudinal d'ordre n
- f_{nSegm} est la fréquence du mode accélérateur.

Tableau 5 : écart quadratique en fréquence des modes longitudinaux quadripolaires et dipolaires (longueurs nominales des doigts de réglage dipolaire)

Ordre n	df(n) Quadripolaire [MHz]	df(n) Dipolaire [MHz]
1	0.00	0.00
2	69.82	64.83
3	73.97	66.53
4	73.63	63.59
5	74.68	60.28
6	73.95	57.60
7	74.92	56.58
8	73.89	56.72
9	75.01	58.31
10	75.00	59.25
11	75.03	60.92

Dans le RFQ non segmenté inhomogène long de 2,0092 m que constitue la cavité que nous avons testée, $df = c/2L = 74,94$ MHz. On retrouve cette valeur pour les modes quadripolaires ce qui signifie que la longueur électromagnétique équivalente vue par ces modes est en accord avec les 2,0092 m de la cavité.

En revanche, la distribution en fréquence des modes dipolaires correspond plutôt à un RFQ de longueur supérieure égale à $2 \times 75/61 = 2,46$ m.

Lors des tests du réglage à l'aide des pistons d'un RFQ de 2m doté des électrodes à profil constant (référence [I]), nous avons mis en évidence l'importance de l'adéquation entre la distribution en fréquences des modes dipolaires mesurée et celle du modèle. Nous avons donc ajusté la longueur des doigts de réglage dipolaire afin de rapprocher les écarts quadratiques en fréquence des modes dipolaires mesurés de 75 MHz.

4.1.3 Distribution en fréquences avec les doigts raccourcis de 20 mm

Les doigts ont finalement été raccourcis de 20 mm.

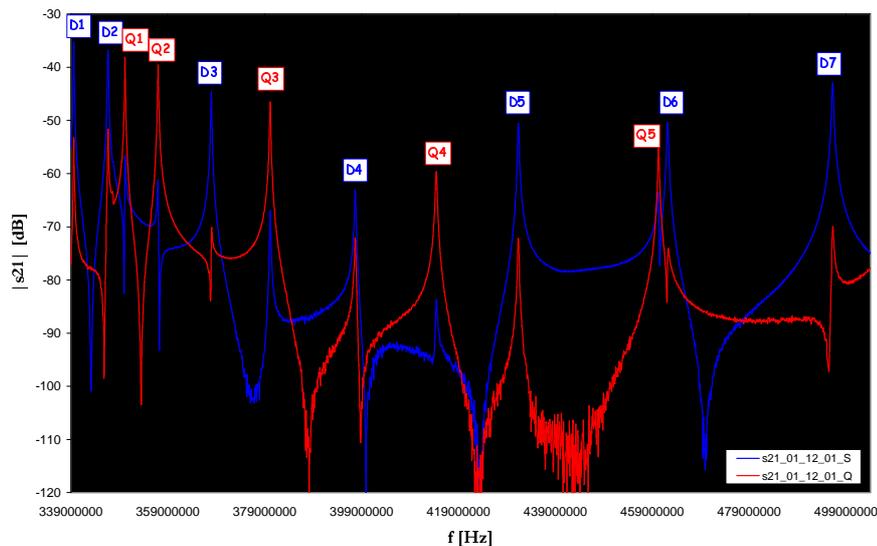


figure 34 : distribution des modes résonants du RFQ de 2m équipé des profils variables avec les doigts de réglage dipolaire de longueurs 133 mm et 146 mm respectivement aux extrémités 1 et 2

La superposition des spectres en fréquences obtenus par excitations transverses quadripolaire Q et dipolaire S suffit à identifier les 11 premiers modes longitudinaux (figure 33 et figure 34).

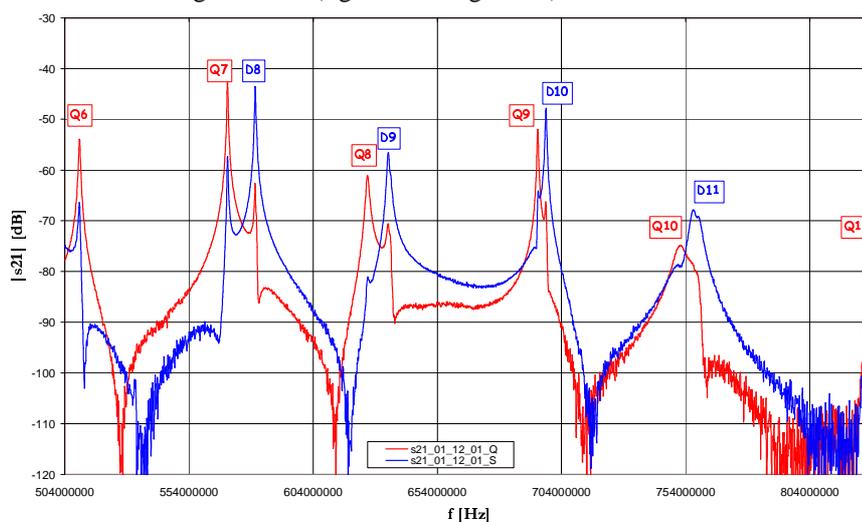


figure 35 : distribution des modes résonants du RFQ de 2m équipé des profils variables avec les doigts de réglage dipolaire de longueurs 133 mm et 146 mm respectivement aux extrémités 1 et 2

Tableau 6 : fréquences des modes résonants mesurées dans le RFQ avec les doigts raccourcis ou non

mode	f modèle [MHz]	Doigts à longueurs nominales		Doigts raccourcis de 20 mm	
		fQ mesuré [MHz]	fD mesuré [MHz]	fQ mesuré [MHz]	fD mesuré [MHz]
D1	339.5		335.8		339.578
D2	347		342		346.64
Q1	350.7	349.8		350.156	
Q2	358.1	356.7		356.985	
D3	370.6		361.2		367.974
Q3	381	379.8		380.127	
D4	406.5		386.2		397.692

Q4	415.9	413.7		414.41	
D5	451.8		413.4		431.349
Q5	460.4	460		460.276	
D6	504.2		442.4		462.16
Q6	511.8	509		509.94	
D7	561.6		477.5		496.2
Q7	568.5	569.6		569.523	
D8	622.6		520		580.697
Q8	628.8	624.4		625.878	
D9	686.3		574.8		634.247
Q9	692	694.6		694.435	
D10	752		630.2		697.746
Q10	757.2	-		751.81	
D11	819.2		695.6		757.14
Q11	824	827.8		827.68	

La modification de la longueur des doigts a peu modifié les fréquences des modes quadripolaires. Cette observation valide la position radiale des doigts choisie de manière à être neutre pour les modes quadripolaires. Avec ces nouvelles longueurs, la fréquence du premier mode dipolaire est très proche de celle du modèle de 339,5 MHz (Tableau 6).

Tableau 7 : écart quadratique en fréquence des modes longitudinaux quadripolaires et dipolaires

ordre	df(n) Quadripolaire -20mm [MHz]	df(n) Dipolaire -20mm [MHz]
1	0.00	0.00
2	69.49	69.61
3	73.97	70.87
4	73.88	69.00
5	74.68	66.50
6	74.14	62.70
7	74.86	60.30
8	74.11	67.29
9	74.96	66.96
10	73.92	67.73
11	75.00	67.67

Les écarts quadratiques en fréquence des modes dipolaires se sont rapprochés des 75 MHz correspondant à la longueur réelle de la cavité (Tableau 7 et figure 36). Si ce critère devait être absolument respecté, il faudrait encore raccourcir la longueur des doigts. En figeant les longueurs à 133 et 146 mm, on a privilégié la bonne correspondance entre la fréquence mesurée du premier mode dipolaire et celle du modèle.

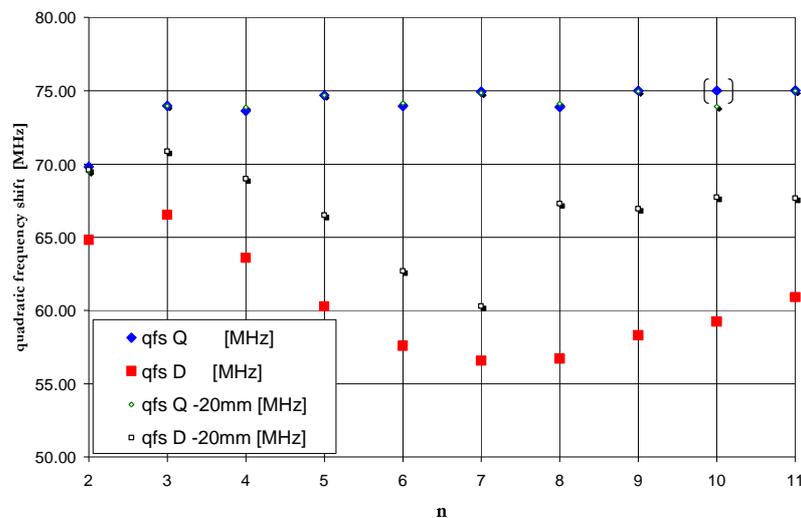


figure 36 : écarts quadratiques en fréquence ("qfs") des modes longitudinaux quadripolaires (Q) et dipolaires (D) mesurés dans un segment de RFQ de 2 mètres dotés du profil réel du projet IPHI

4.2 Test de la convergence du réglage d'un profil de tension variable

4.2.1 Critères de convergence

Nous avons testé le réglage à l'aide des pistons d'accord d'un segment de RFQ pourvu des électrodes à profil variable : la distribution de tension visée correspond au profil variable des 2 premiers mètres du RFQ final (« Vp » de la figure 37).

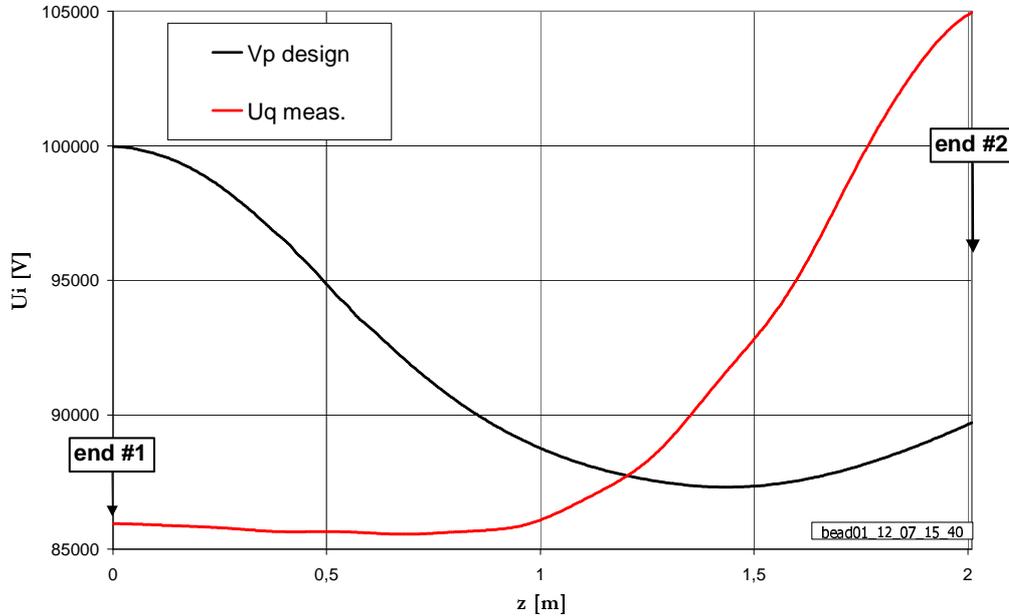


figure 37 : distribution longitudinale de la composante quadripolaire de la tension accélératrice mesurée dans le RFQ de 2 m avec les pistons affleurants la surface interne de la cavité

L'absence du segment suivant entraîne une perturbation des conditions aux limites à l'extrémité où se situe le premier couplage résonant : cela se traduit par une pente positive des tensions à l'extrémité perturbée notée #2 (figure 37). Les déplacements des pistons nécessaires pour régler le segment de RFQ sont amplifiés par cette désadaptation et ne sont donc pas représentatifs des corrections qui seront réellement nécessaires dans le RFQ de 8 mètres. Néanmoins à travers ce test nous avons voulu vérifier le bon comportement du formalisme, et en particulier la convergence des paramètres visés.

Pour visualiser la convergence des réglages, nous traçons l'évolution d'itération en itération des composantes spectrales $cQ(i)$, $cS(j)$, $cT(k)$, coefficients de la projection des composantes modales de la tension accélératrice respectivement uQ , uS et uT , sur la base de contrôle. L'abscisse de ces graphiques est constituée par la valeur de la position du piston A1 du quadrant 1, arbitrairement choisi, au cours des différentes itérations de réglage.

Rappelons que, dans un RFQ parfait, les cQ , cS , $cT \in \mathfrak{R}$ sont tels que :

$$\begin{vmatrix} uQ \\ uS \\ uT \end{vmatrix} = \sum_i cQ_i \begin{vmatrix} vQ_i \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} + \sum_j cS_j \begin{vmatrix} 0 \\ vS_j \\ 0 \end{vmatrix} + \sum_k cT_k \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ vT_k \end{vmatrix}$$

Ces coefficients sont le résultat des produits internes

$$cQ_i = \langle uQ, vQ_i \rangle, \quad cS_j = \langle uS, vS_j \rangle, \quad cT_k = \langle uT, vT_k \rangle$$

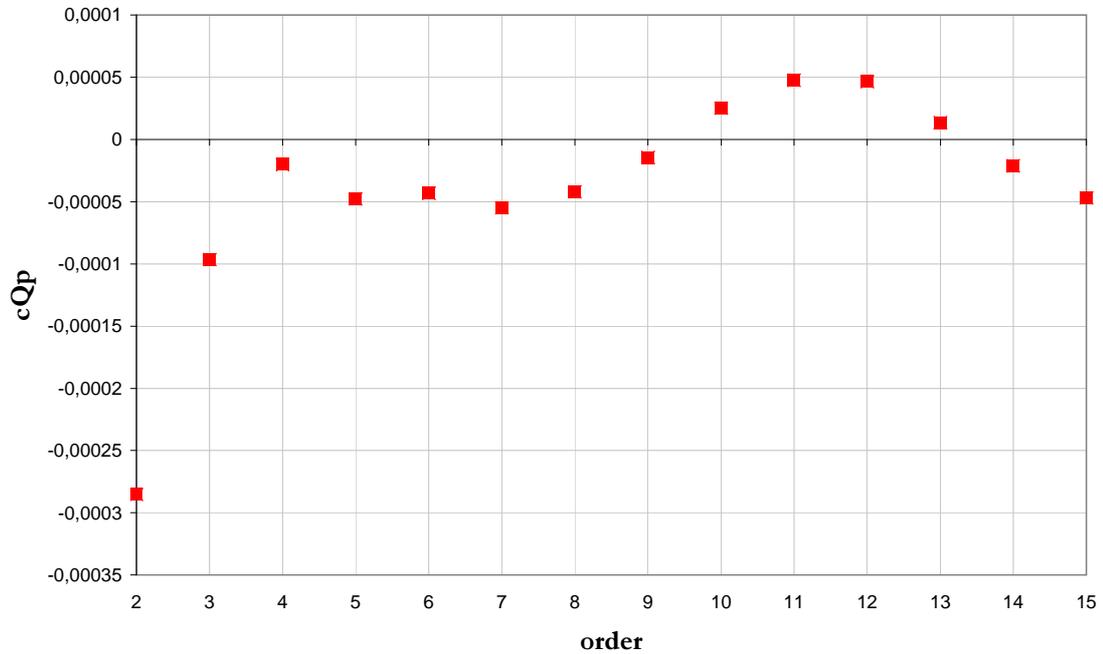
- Quand on cherche à régler un profil de tension strictement identique à celui résultant de la distribution des inductances et capacités linéiques $C(z)$ et $L(z)$, les cQ , cS et cT visés sont tous nuls sauf le premier coefficient de la projection de uQ sur la base de contrôle, c'est-à-dire $cQ(1)$.

$$cQ_i = \langle uQ, vQ_i \rangle = 0 \text{ si } i > 1, \quad cQ_1 = \langle uQ, vQ_1 \rangle = 1 \text{ puisque } uQ = vQ_1$$

$$cS_j = \langle uS, vS_j \rangle = 0, \quad cT_k = \langle uT, vT_k \rangle = 0$$

Tableau 8 : 6 premiers coefficients issus de la projection de la tension variable de référence sur la base

ordre	1	2	3	4	5	6
cQp	1	-0,000285297	-9,64735E-05	-2,01948E-05	-4,77526E-05	-4,32433E-05

**figure 38 : coefficients cQ_i correspondant à la décomposition de la tension variable de référence sur la base de contrôle**

- Pour le profil Vp de tension des 2 premiers mètres du RFQ final visé, les coefficients cQ_i des ordres supérieurs qui sont issus du résultat de la projection Vp sur les vQ_i sont petits mais non nuls (Tableau 8 et figure 38). Les coefficients cS et cT visés restent nuls puisqu'on cherche à minimiser les composantes dipolaires de la tension.

4.2.2 Paramètres du réglage

Lors d'un premier test, sur les 12 plans transverses de pistons disponibles, le réglage a été réalisé en n'en considérant que 8, choisis de manière à présenter une distribution longitudinale régulière. Un deuxième réglage a été obtenu en appliquant un nouvel algorithme de calcul des fonctions de commande qui a permis de considérer 10 plans transverses de pistons irrégulièrement répartis.

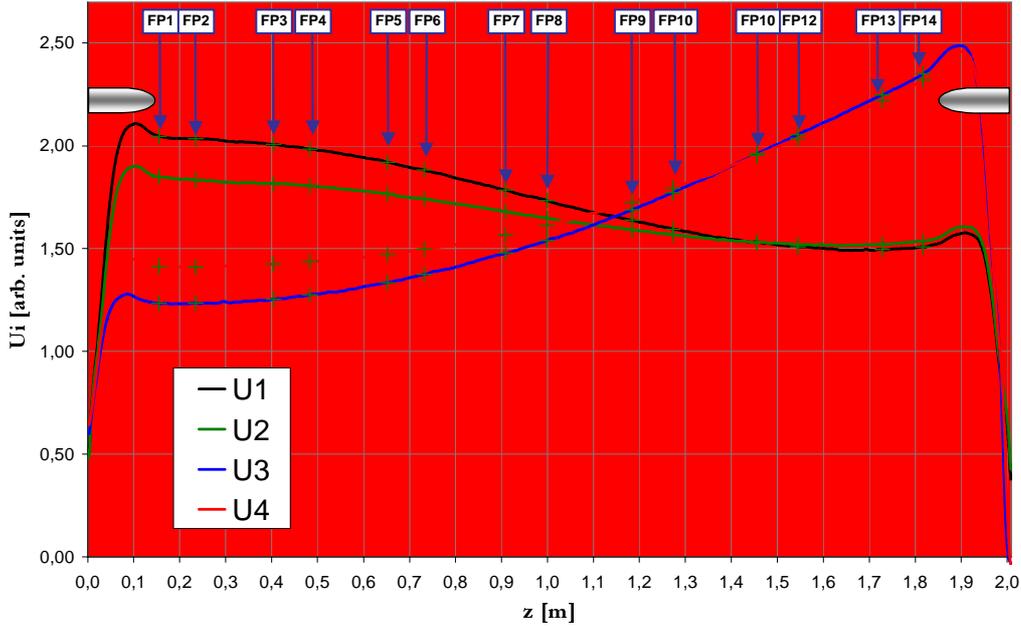


figure 39 : effet des doigts sur les tensions brutes mesurées dans les 4 quadrants. 14 points discrets « FPI » sont définis dans le modèle pour l’analyse des mesures.

La distribution longitudinale de la tension est mesurée par perturbation du champ magnétique sur la bissectrice de chaque quadrant à l'aide d'un objet métallique (titane). Les doigts de réglage dipolaire perturbent localement les lignes de champ magnétique dans la région où cet objet est guidé (référence [IX]) : une augmentation locale de la tension est observée aux 2 extrémités sur la toute longueur des doigts (figure 39). Pour s’affranchir de cet effet, la plage longitudinale des données utiles est extraite entre 0,2 m et 1,83 m. Pour ces mesures par transmission, la cavité a été excitée à travers la matrice de distribution commutée en mode Q et le signal de reçu provenait de la boucle 6 du quadrant 1.

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.

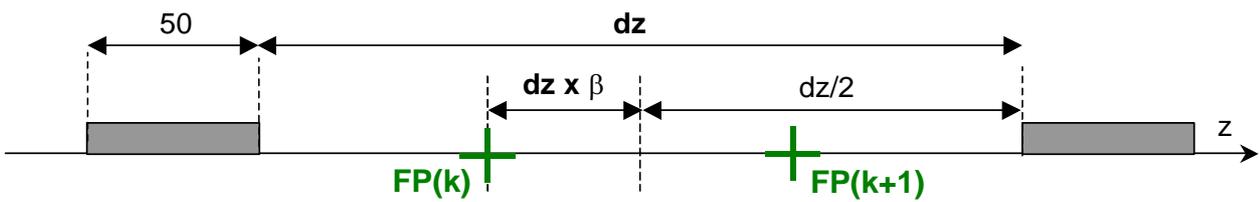


figure 40 : schéma illustrant la méthode de calcul des positions des points discrets

Les points discrets utilisés pour l'analyse des mesures sont choisis entre les irrégularités mécaniques présentes au fond des quadrants. Dans notre configuration, les points discrets se situent entre 2 pistons d'accord. Si 2 pistons consécutifs sont suffisamment éloignés, 2 points discrets "FPk" et "FP(k+1)" sont définis entre ces 2 objets mécaniques (figure 40). Les 2 points discrets sont placés de part et d'autre du milieu des pistons à une distance $dz \times \beta$

- dz étant la distance séparant l'extrémité des 2 pistons
- β un rapport choisi arbitrairement

La réduction de la plage longitudinale des données utiles rendue nécessaire par la présence des doigts de réglage dipolaire entraîne la perte du premier point discret (« FP1 ») défini dans le modèle pour l’analyse (figure 39).

4.3 Premier test : distribution longitudinale régulière des pistons

Sur les 12 plans transverse de pistons disponibles, le réglage a été réalisé en n'en considérant que 8 choisis de manière à présenter une distribution longitudinale régulière (figure 41).

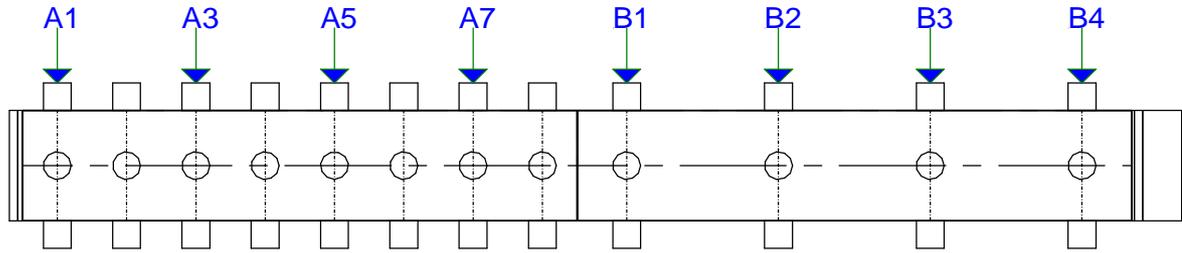
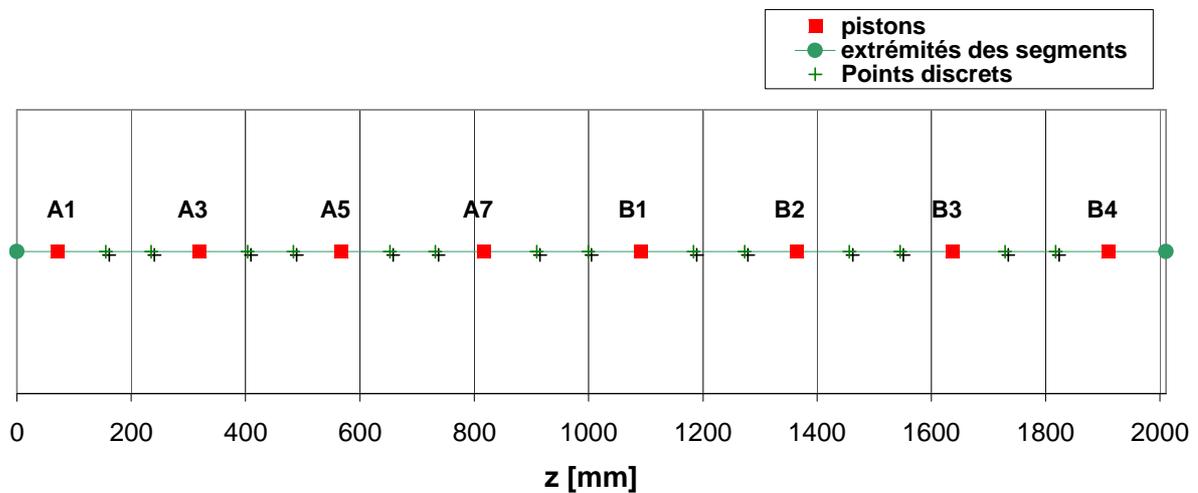


figure 41 : plans transverse des pistons considérés pour le 1^{er} test de réglage



piston	A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
z [mm]	70,8	319,4	568	816,6	1092,2	1364,4	1636,6	1908,8

point discret	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11	FP12	FP13	FP14
z [mm]	155,38	234,82	403,98	483,42	652,58	732,02	909,28	999,52	1183,86	1272,74	1456,06	1544,94	1728,26	1817,14

Pour cette répartition des pistons, 2 points discrets "FPk" et "FP(k+1)" sont systématiquement définis entre 2 pistons consécutifs. Le rapport choisi a été $\beta=0,2$.

Initialement tous les pistons d'accord affleurent la surface interne de la cavité.

La seule compensation de l'écart entre la fréquence de résonance du mode accélérateur visée de 352,2 MHz et les 350,2 MHz initialement mesurés, implique des déplacements de l'ordre de 6 mm (tableau ci-dessous). C'est la première fonction QQ qui commande ce paramètre.

Première fonction de commande QQ avec les pistons affleurants

A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
4,52	6,43	5,69	6,22	6,65	6,20	6,79	5,39

En ajoutant ces déplacements à ceux corrigeant les autres fonctions QQ, SQ et TQ, on aboutit à des positions cumulées des pistons proches de l'extrémité #2 supérieures à 10 mm. Au cours des 2 premières itérations, nous avons cherché à ne pas dépasser cette limite des 10 mm d'enfoncement des pistons (Tableau 9 et Tableau 10) : nous n'avons donc pas considéré la première fonction de commande QQ.

Tableau 9 : positions cumulées des pistons après la première itération

	A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
Q1	- 7,39	- 6,63	0,22	1,42	- 0,34	- 1,74	4,49	7,71
Q2	- 5,62	- 4,81	0,78	1,95	0,80	- 0,27	4,95	7,28
Q3	0,46	2,00	3,24	- 0,05	- 5,01	- 5,95	2,21	7,12
Q4	- 1,31	0,19	2,69	- 0,58	- 6,15	- 7,43	1,75	7,55

Max = 7,71 mm

Tableau 10 : positions cumulées des pistons après la 2^{ème} itération

	A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
Q1	-10,00	-8,98	0,22	2,21	-0,05	-2,37	4,53	8,42
Q2	-6,68	-5,25	2,00	3,87	2,26	0,21	5,82	8,42
Q3	1,47	3,74	4,99	1,66	-4,32	-6,41	0,90	5,88
Q4	-1,84	0,01	3,21	0,00	-6,63	-9,00	-0,39	5,88

Max = 8,42 mm

A partir de la 3^{ème} itération, nous avons accepté de dépasser les 10 mm d'enfoncement des pistons dans la limite mécanique qu'offre la maquette (Tableau 11). La première fonction de commande QQ a désormais été incluse dans le calcul des fonctions de commande.

Tableau 11 : positions cumulées des pistons après la 3^{ème} itération

	A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
Q1	-7,02	-4,51	4,57	7,13	5,29	2,63	10,39	13,29
Q2	-3,02	0,00	6,74	9,22	8,16	5,77	11,77	13,05
Q3	5,11	9,24	10,29	7,44	1,41	-1,46	6,58	10,63
Q4	1,11	4,73	8,12	5,35	-1,46	-4,60	5,19	10,86

Le gain appliqué aux commandes cumulées des pistons a été de 0,8 durant toutes les itérations sauf la dernière où il a été légèrement augmenté à 0,9.

Tableau 12 : paramètres du premier test de la convergence (distribution régulière des plans de pistons)

	Fichier de mesure	Gain G	Fonctions de commande considérées
Référence : tous les pistons affleurent la surface interne	<i>Bead01_12_07_15_40</i>		
Après les 1 ^{er} déplacements de pistons déduits de <i>Bead01_12_07_15_40</i>	<i>Bead01_12_07_16_22</i>	0,8	2 ^{ème} à 4 ^{ème} fonctions de commande QQ 4 premières fonctions de commande SQ et TQ SSTT = 0
Après les 2 ^{es} déplacements de pistons déduits de <i>Bead01_12_07_16_22</i>	<i>Bead01_12_10_09_07</i>	0,8	2 ^{ème} à 4 ^{ème} fonctions de commande QQ 4 premières fonctions de commande SQ et TQ SSTT = 0
Après les 3 ^{es} déplacements de pistons déduits de <i>Bead01_12_10_09_07</i>	<i>Bead01_12_10_11_19</i>	0,8	Les 4 premières fonctions de commande QQ, SQ et TQ SSTT = 0
Après les 4 ^{es} déplacements de pistons déduits de <i>Bead01_12_10_11_19</i>	<i>Bead01_12_10_11_49</i>	0,8	Toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ SSTT = 0
Après les 5 ^{es} déplacements de pistons déduits de <i>Bead01_12_10_11_49</i>	<i>Bead01_12_10_12_23</i>	0,9	Toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ SSTT = 0

4.3.1 Evolution de la fréquence du mode accélérateur

Tableau 13 : fréquences des modes quadripolaire et dipolaires de premier ordre longitudinal au cours du test

	Fréquence quadripolaire fQ [MHz]	Fréquence dipolaire fS [MHz]	Fréquence dipolaire fT [MHz]
référence	350,163	339,583	340,091
Après la 1 ^{ère} itération	350,454	339,971	340,601
Après la 2 ^{ème} itération	350,523	340,060	340,627
Après la 3 ^{ème} itération	352,171	341,606	342,111
Après la 4 ^{ème} itération	352,052	341,477	341,979
Après la 5 ^{ème} itération	352,193	341,599	342,131

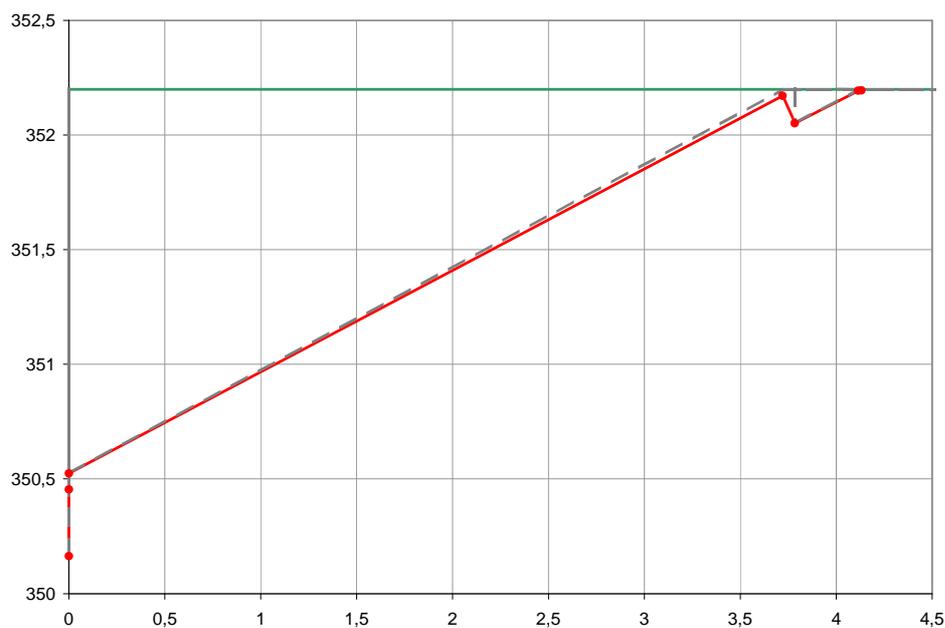


figure 42 : évolution de fQ [MHz] vs les positions cumulées du piston A1 du quadrant 1

La fréquence du mode accélérateur fQ a commencé à converger vers la valeur objectif de 352,2 MHz dès qu'on a considéré la première fonction de commande QQ, à savoir dès la 3^{ème} itération (figure 42).

4.3.2 Evolution des composantes modales de la tension accélératrice

- Composante quadripolaire uQ

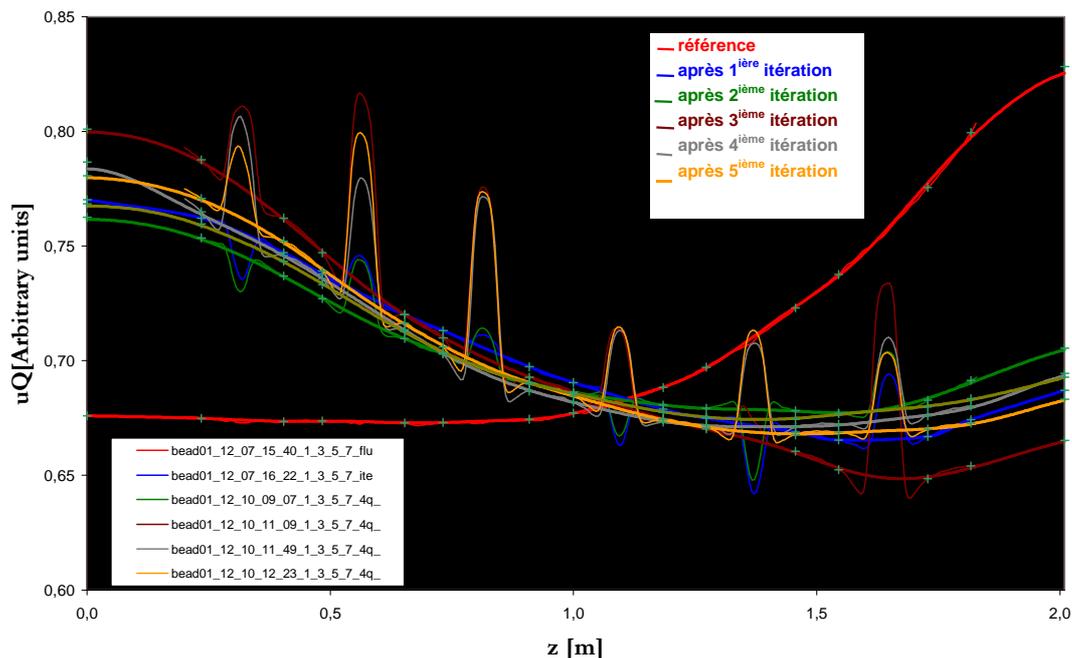


figure 43 : distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension au cours des 5 itérations du 1^{ier} test

L'allure de la distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension s'est rapprochée du profil visé dès la première itération (figure 43).

Les graphiques suivants représentent l'évolution au cours des 5 itérations de réglage des coefficients c_{Qi} , $i=2$ à 8 , en fonction de la position du piston A1 du quadrant 1.

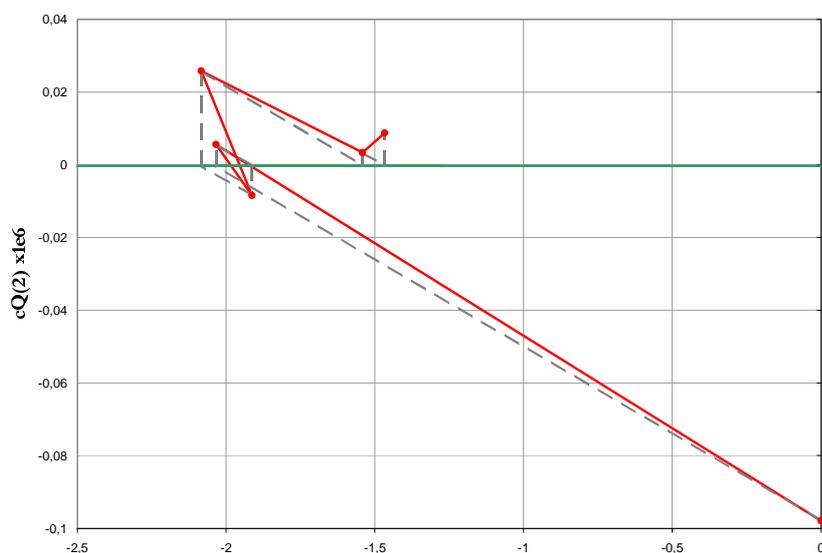
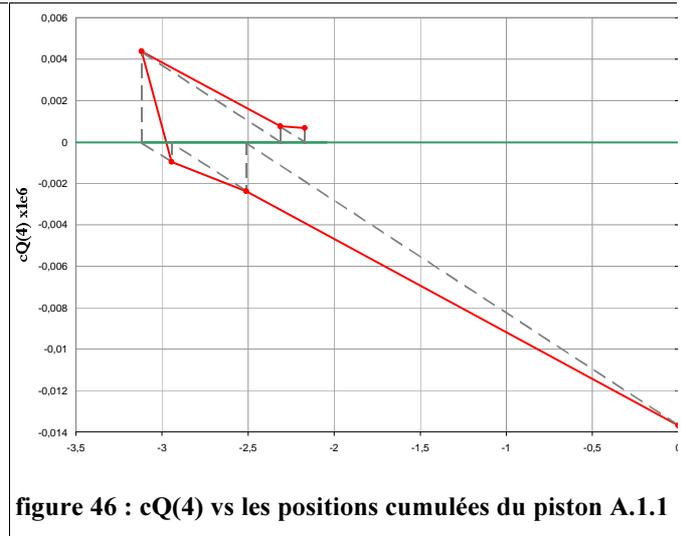
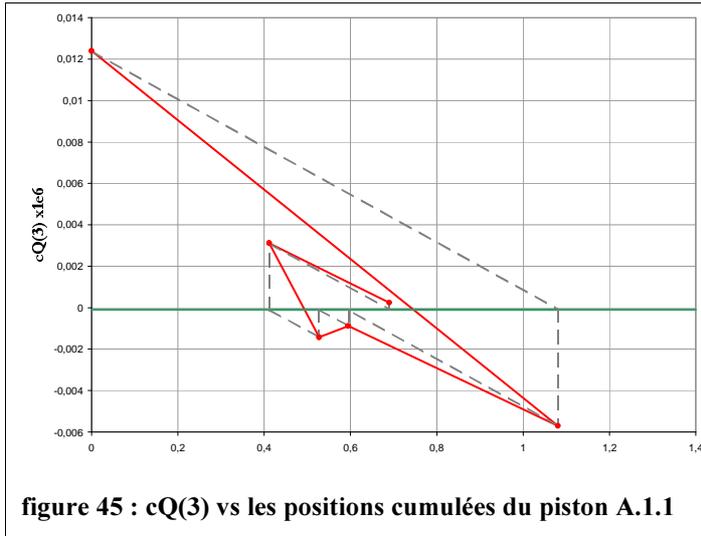
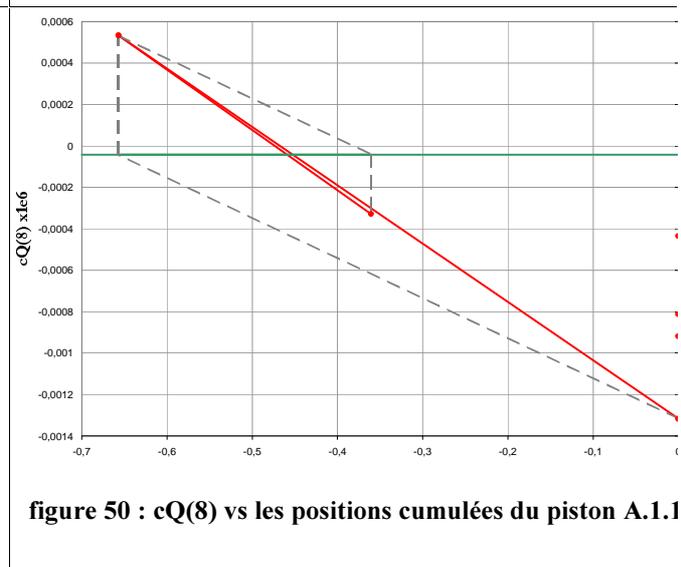
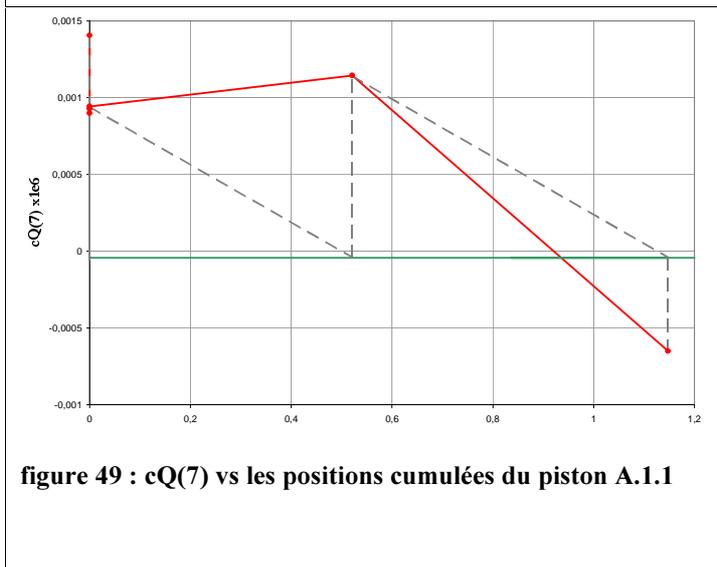
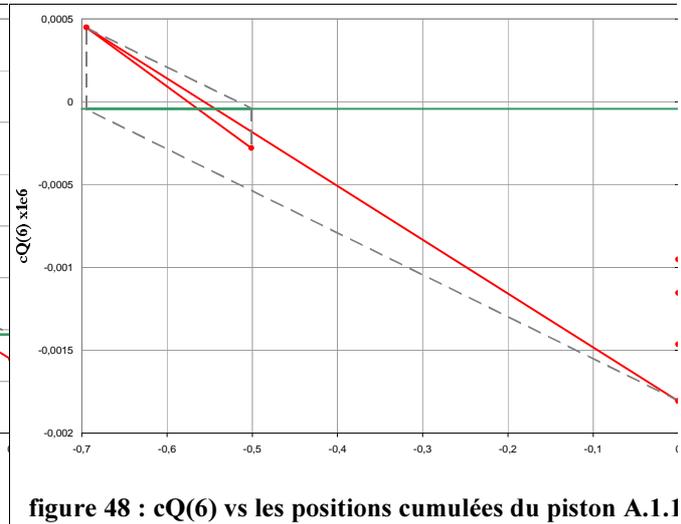
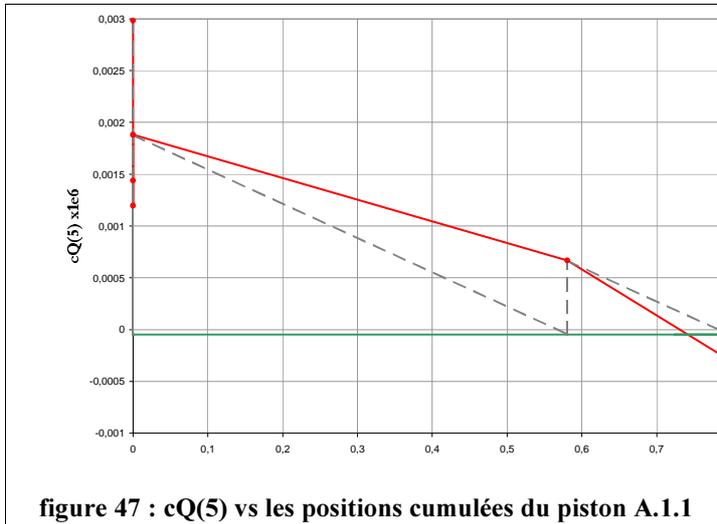


figure 44 : $cQ(2)$ vs les positions cumulées du piston A.1.1



Les $cQ(i)$, $i=2$ à 4, ont progressivement convergé vers les valeurs objectif au cours des 5 itérations de réglage (figure 44, figure 45 et figure 46).



Les fonctions de commande $QQ(i)$, $i=5$ à 8, ont été considérées à partir de la 3^{ième} itération. Les coefficients $cQ(i)$, $i=5$ à 8, ont tous montré un comportement convergeant au cours des 2 dernières itérations.

• **Composante dipolaires uS et uT**

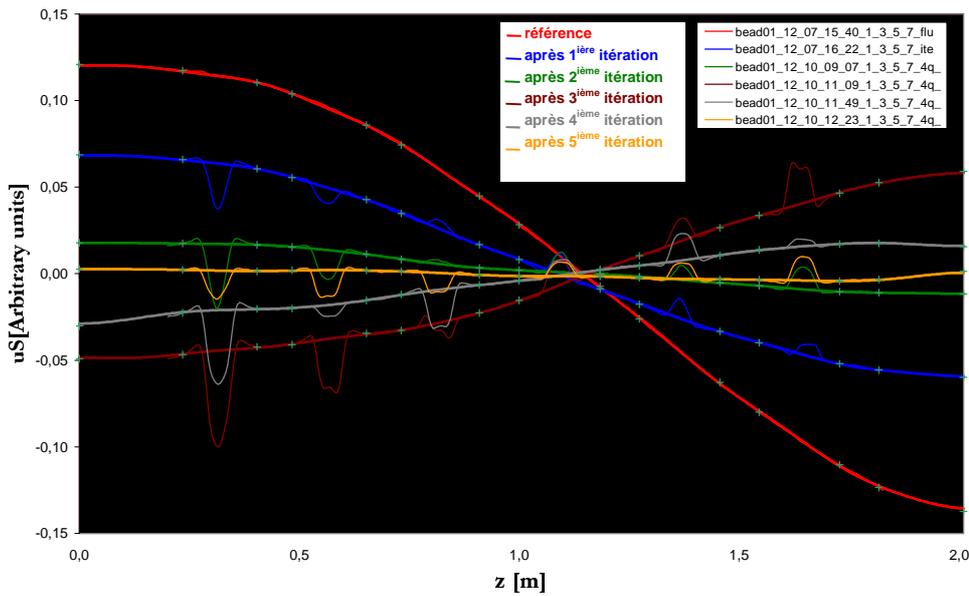


figure 51 : distribution longitudinale de la composante dipolaire uS de la tension au cours des 5 itérations

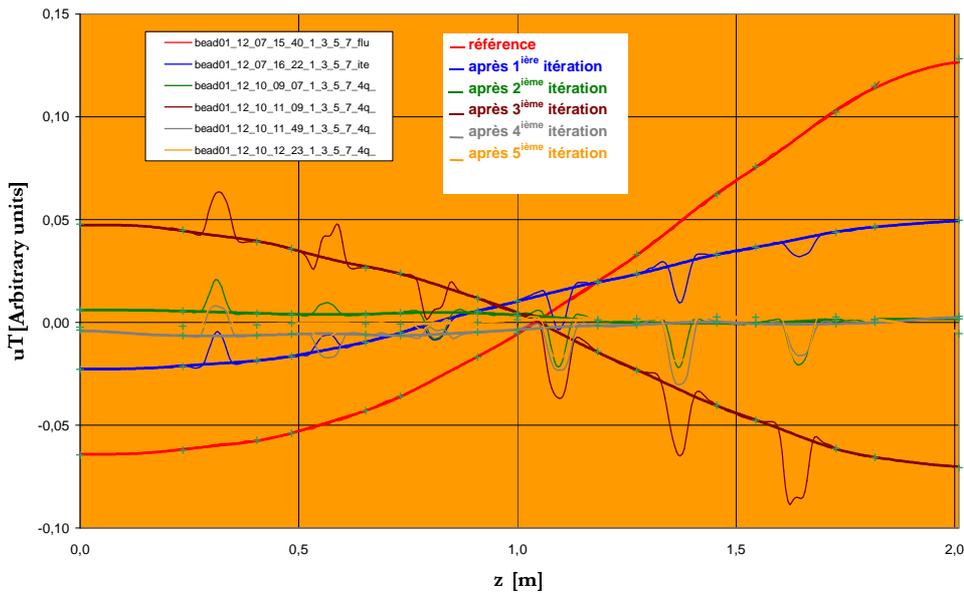


figure 52 : distribution longitudinale de la composante dipolaire uT de la tension au cours des 5 itérations

Les 2 premières itérations de réglage ont nettement minimisé les composantes dipolaires uS et uT de la tension accélératrice. Leurs distributions longitudinales se sont rapprochées d'un profil plat et se sont centrées autour de 0 (figure 51 et figure 52).

La 3^{ème} itération a dégradé le réglage de ces paramètres. Lors de cette séquence de déplacements des pistons, la fonction de commande de la fréquence du mode accélérateur a été considérée pour la première fois : elle génère des déplacements de pistons de grande amplitude. Ces corrections ne constituent plus de petites perturbations et notre formalisme, basé sur des petites perturbations de l'opérateur différentiel qui modélise le comportement de la cavité, est mis à l'épreuve. Suite à l'application des corrections, la fréquence de résonance du mode accélérateur a parfaitement commencé à converger vers la valeur objectif (paragraphe précédent 4.3.1), mais la compensation des déséquilibres dipolaires a été légèrement dégradée.

On peut observer ce comportement à travers les courbes des coefficients cS(j) et cT(k) en fonction des positions cumulées du piston A1 (chapitre 4.3.3).

- **Rapports entre les composantes dipolaires u_S et u_T et quadripolaire u_Q de la tension accélératrice**

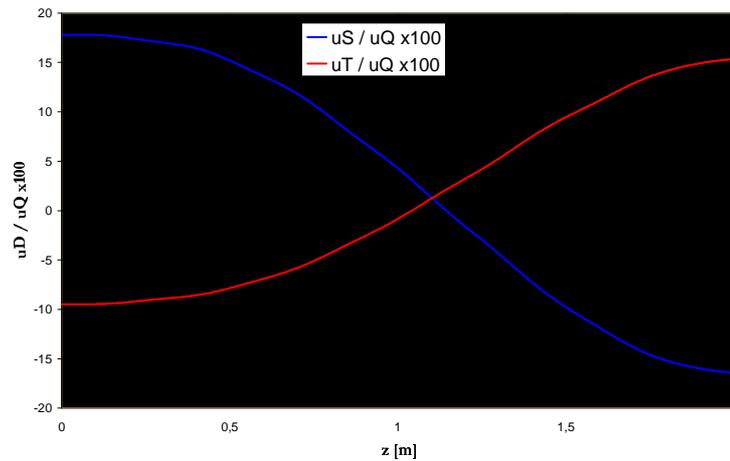


figure 53 : rapports entre les composantes dipolaires u_S et u_T et quadripolaire u_Q de la tension accélératrice avant tout réglage

Initialement, la tension accélératrice du segment de RFQ présente un fort déséquilibre dipolaire : le rapport entre les composantes dipolaires u_S et u_T et quadripolaire u_Q de la tension accélératrice atteint des valeurs extrêmes de $17 \cdot 10^{-2}$ (figure 53).

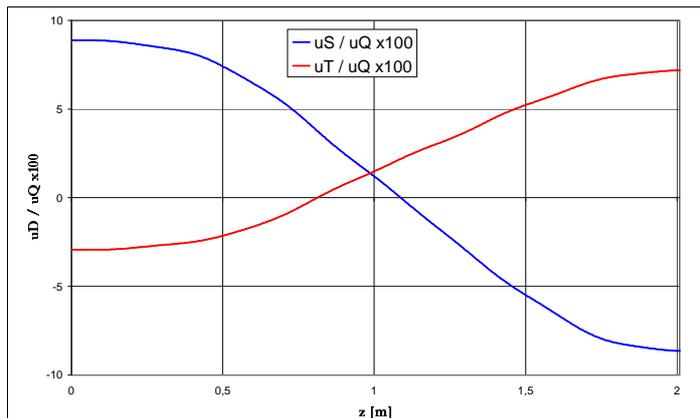


figure 54 : rapports entre les composantes dipolaires u_S et u_T et quadripolaire u_Q de la tension accélératrice après la 1^{ère} itération de réglage

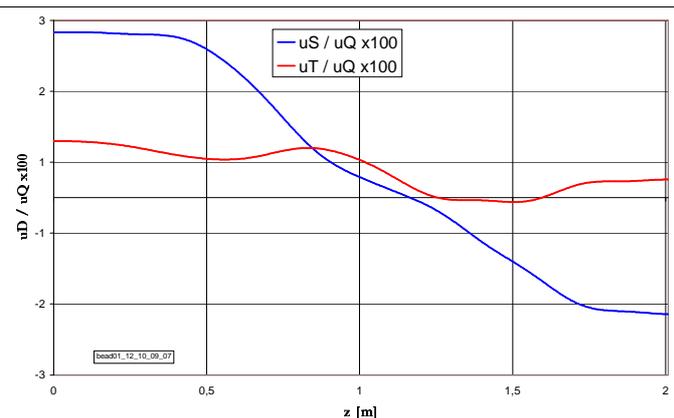


figure 55 : rapports entre les composantes dipolaires u_S et u_T et quadripolaire u_Q de la tension accélératrice après la 2^{ème} itération de réglage

Les 2 premières itérations de réglage ont permis de diviser par 5 l'écart entre les valeurs extrêmes de uD/uQ (figure 54 et figure 55).

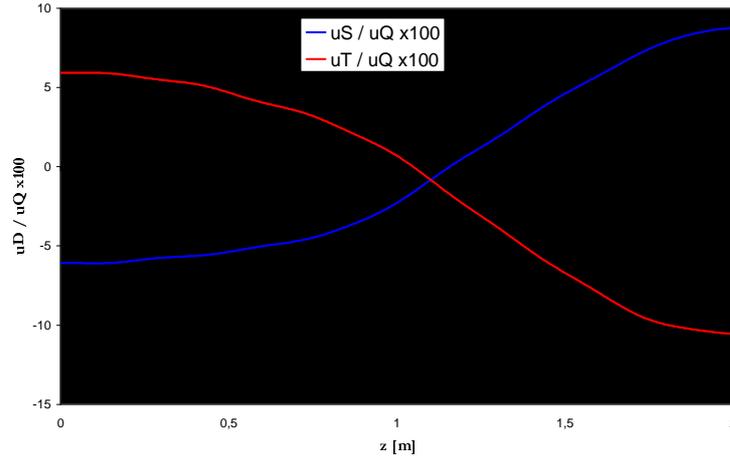


figure 56 : rapports entre les composantes dipolaires uS et uT et quadripolaire uQ de la tension accélératrice après la 3^{ème} itération de réglage

Comme nous l’avons commenté précédemment, pour la 3^{ème} itération, la considération du réglage de la fréquence du mode accélérateur a provoqué une augmentation de la présence des composantes dipolaires au sein de la tension accélératrice (figure 56).

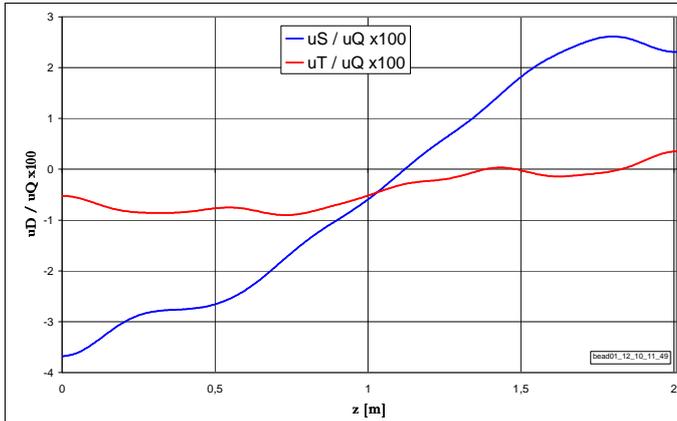


figure 57 : rapports entre les composantes dipolaires uS et uT et quadripolaire uQ de la tension accélératrice après la 4^{ème} itération de réglage

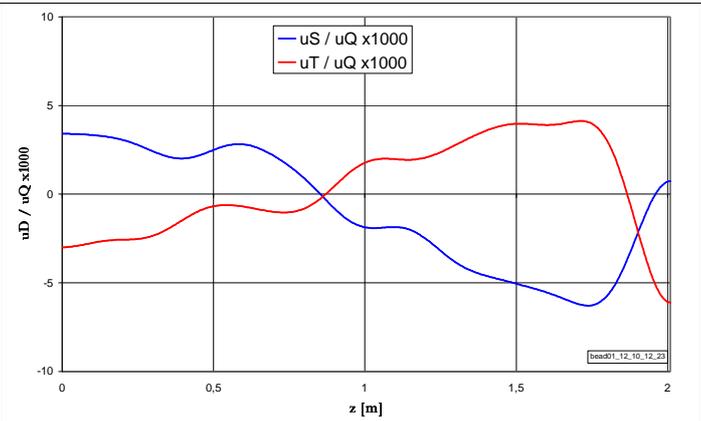
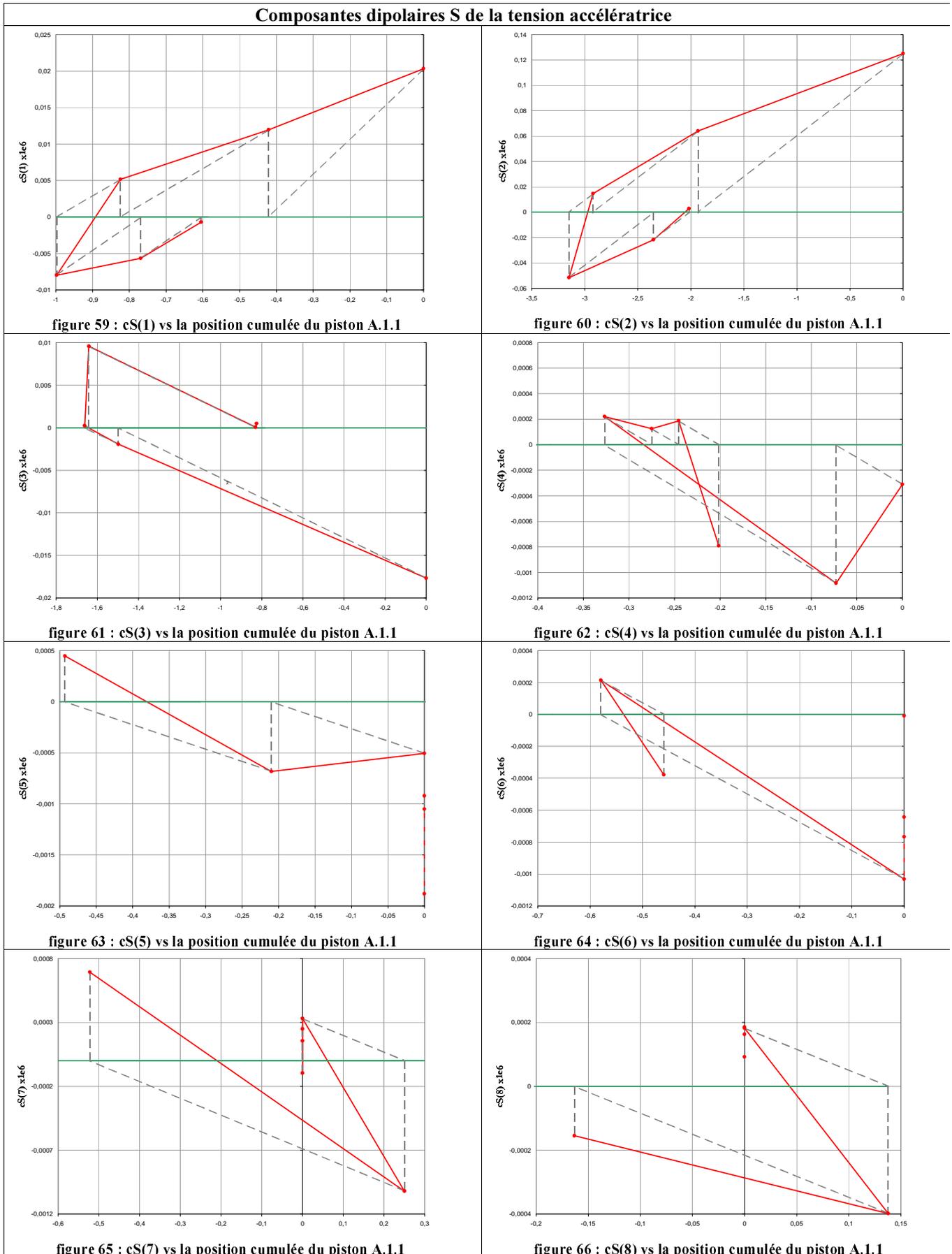


figure 58 : rapports entre les composantes dipolaires uS et uT et quadripolaire uQ de la tension accélératrice après la 5^{ème} itération de réglage

	Fichier de mesure	Min(uD/uQ)	Max(uD/uQ)
Référence : pistons affleurants	Bead01_12_07_15_40	-16,43.10 ⁻²	17,80.10 ⁻²
Après la 1 ^{ère} itération	Bead01_12_07_16_22	-8,65.10 ⁻²	8,89.10 ⁻²
Après la 2 ^{ème} itération	Bead01_12_10_09_07	-1,64.10 ⁻²	2,33.10 ⁻²
Après la 3 ^{ème} itération	Bead01_12_10_11_09	-10,55.10 ⁻²	8,76.10 ⁻²
Après la 4 ^{ème} itération	Bead01_12_10_11_49	-3,67.10 ⁻²	2,61.10 ⁻²
Après la 5 ^{ème} itération	Bead01_12_10_12_23	-0,63.10 ⁻²	0,41.10 ⁻²

Suite à la 3^{ème} itération, les valeurs extrêmes des distributions longitudinales des rapports entre les composantes dipolaires uS et uT et la composante quadripolaire uQ ont diminué jusqu’à passer sous le seuil requis pour le réglage de $\pm 10^{-2}$.

4.3.3 Convergence des composantes modales dipolaires de la tension accélératrice (Répartition régulière des pistons)



Composantes dipolaires T de la tension accélératrice

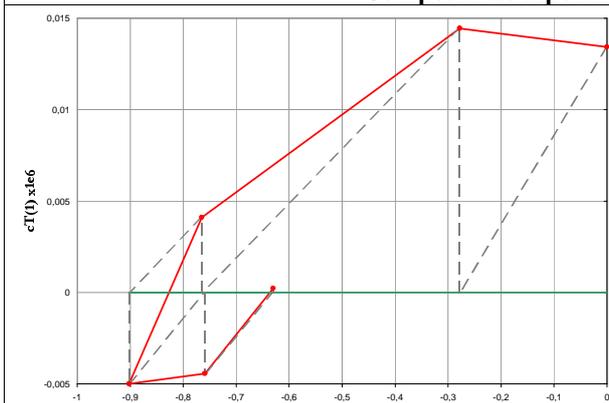


figure 67 : cT(1) vs la position cumulée du piston A.1.1

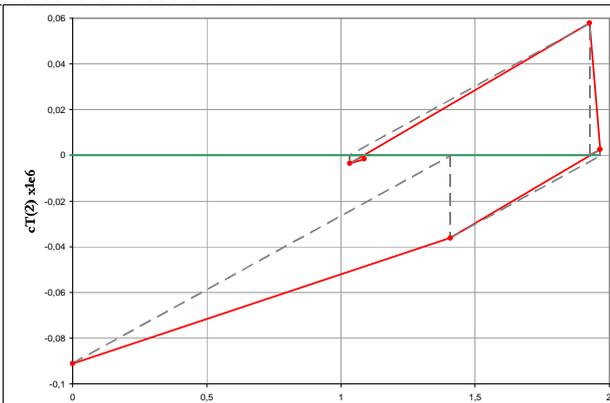


figure 68 : cT(2) vs la position cumulée du piston A.1.1

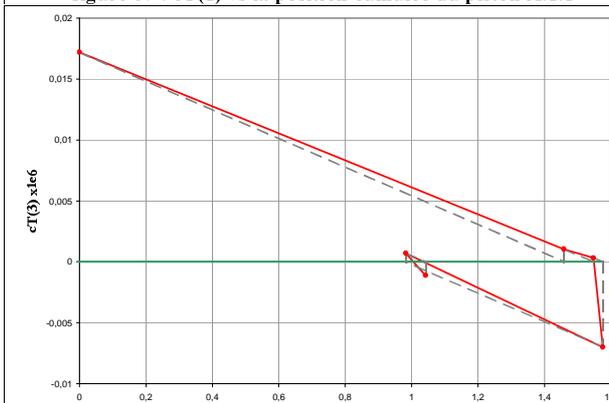


figure 69 : cT(3) vs la position cumulée du piston A.1.1

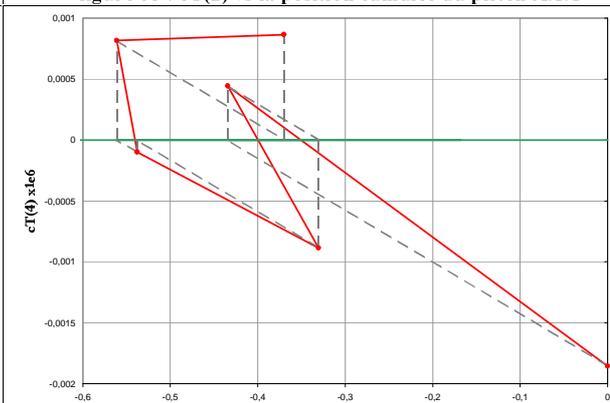


figure 70 : cT(4) vs la position cumulée du piston A.1.1

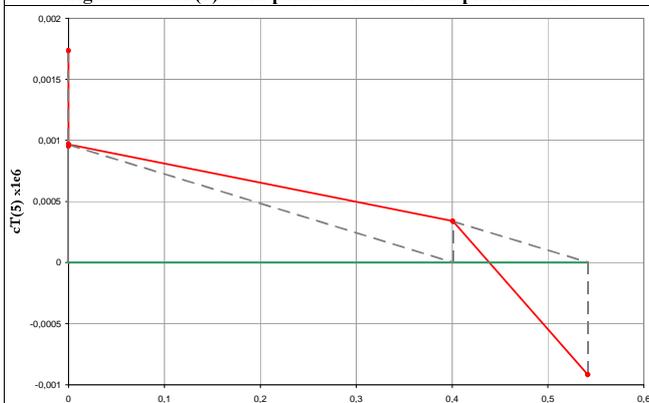


figure 71 : cT(5) vs la position cumulée du piston A.1.1

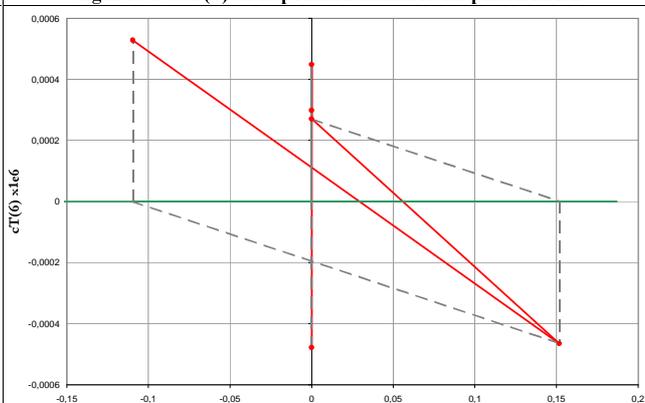


figure 72 : cT(6) vs la position cumulée du piston A.1.1

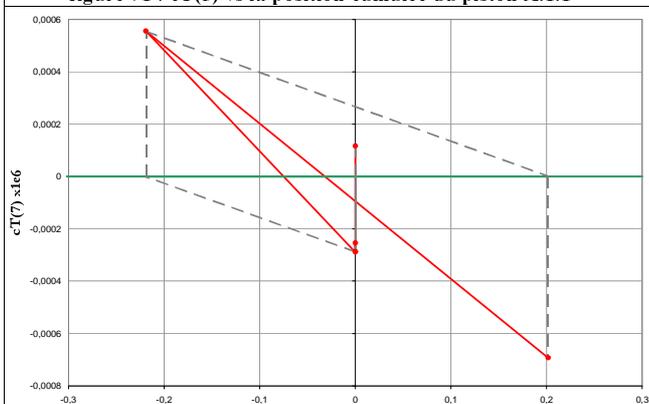


figure 73 : cT(7) vs la position cumulée du piston A.1.1



figure 74 : cT(8) vs la position cumulée du piston A.1.1

4.4 Deuxième test de convergence : distribution longitudinale irrégulière des pistons

Le deuxième réglage a été obtenu en appliquant un nouvel algorithme de calcul des fonctions de commande qui a permis de considérer 10 plans transverses de pistons irrégulièrement répartis (figure 75).

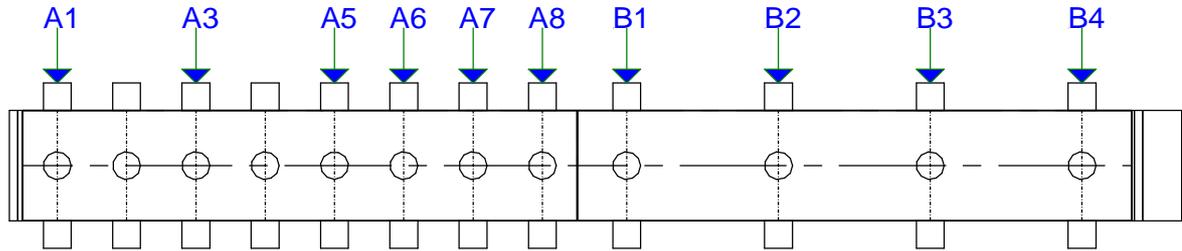
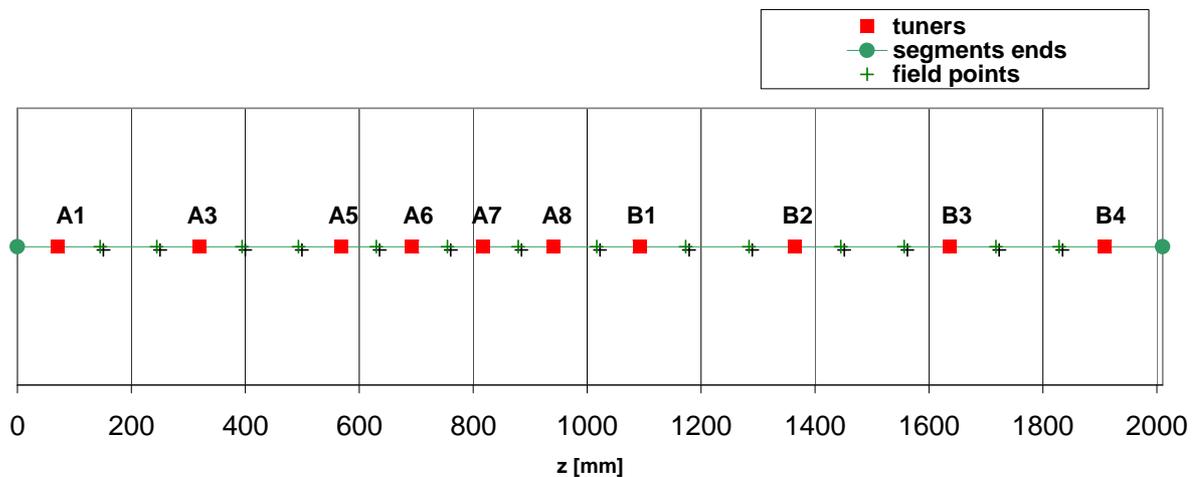


figure 75 : plans transverses des pistons considérés pour le deuxième test de réglage



piston	A1	A3	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
z [mm]	70,8	319,4	568	692,3	816,6	940,9	1092,2	1364,4	1636,6	1908,8

point discret	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11	FP12	FP13	FP14
z [mm]	145,45	244,75	394,05	493,35	630,15	754,45	878,75	1016,55	1172,75	1283,85	1444,95	1556,05	1717,15	1828,25

Pour la répartition irrégulière de pistons, 2 points discrets "FPk" et "FP(k+1)" sont systématiquement définis entre 2 pistons consécutifs éloignés de plus de 125 mm. Le rapport choisi a été $\beta=0,25$.

Un seul point discret a été défini au milieu des pistons rapprochés, c'est-à-dire au milieu de A5, A6, A7 et A8.

Après 2 itérations de réglage où tous les paramètres ont parfaitement convergé vers les valeurs visées, nous n'avons pas pu déplacer un piston d'accord à la position calculée de 10,82 mm à l'intérieur de la cavité (valeur en rouge dans le Tableau 14). Il s'agit d'un piston muni d'une boucle de mesure qui s'est trouvé en butée mécanique pour un enfoncement de 9 mm.

Tableau 14 : positions cumulées des pistons après la 2^{ème} itération

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q1	-3,08	1,66	3,26	3,88	-0,12	3,62	4,24	7,62	3,42	14,77
Q2	-0,58	4,39	5,31	5,29	0,57	4,69	5,29	9,60	5,27	14,26
Q3	3,82	10,82	4,98	3,92	3,55	4,82	1,74	3,73	2,27	12,27
Q4	1,32	8,09	2,93	2,50	2,87	3,75	0,69	1,75	0,42	12,77

Afin d'obtenir au final des positions de pistons moins importantes, nous avons diminué la fréquence du mode quadripolaire visée de 352,2 MHz à 351,5 MHz.

On considère donc le réglage à partir des positions issues des 2 itérations de réglage à 352,2 MHz.

Tableau 15 : paramètres du deuxième test de la convergence (distribution irrégulière des plans de pistons)

	Fichier de mesure	Gain G	Fonctions de commandes considérées
Pistons aux positions issues d'un test précédent	Bead01_12_17_15_00		
Après les 1° déplacements de pistons déduits de Bead01_12_17_15_00	Bead01_12_17_15_44	0,8	Toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ SSTT = 0
Après les 2° déplacements de pistons déduits de Bead01_12_17_15_44	Bead01_12_17_16_15	0,8	Toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ SSTT = 0
Après les 3° déplacements de pistons déduits de Bead01_12_17_16_15	Bead01_12_10_16_46	0,9	Toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ SSTT = 0
Après les 4° déplacements de pistons déduits de Bead01_12_17_16_46	Bead01_12_17_17_16	0,9	Toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ SSTT = 0

A chaque itération l'ensemble des 8 fonctions de commande QQ, SQ et TQ a été considéré. Le gain initial de 0,8 a été augmenté à 0,9 pour les 2 dernières itérations.

Dans les courbes illustrant la convergence des coefficients cQ, cS et cT au cours des réglages, le "#0" indique l'itération de référence à partir de laquelle la fréquence visée est 352,2 MHz.

4.4.1 Evolution de la fréquence du mode accélérateur

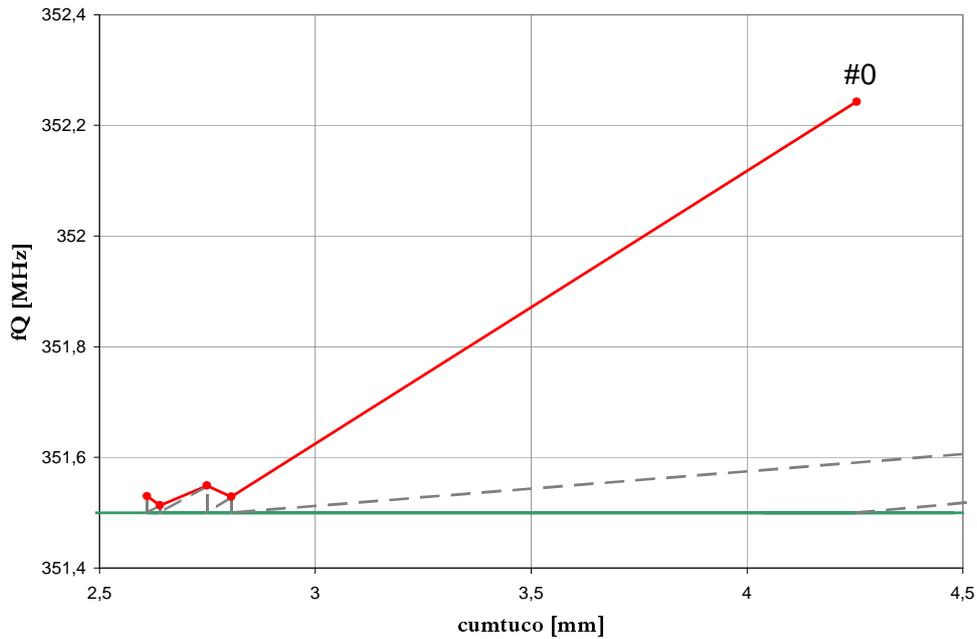


figure 76 : évolution de fQ [MHz] vs les positions cumulées du piston A1 du quadrant 1

	Fréquence quadripolaire fQ [MHz]	Fréquence dipolaire fS [MHz]	Fréquence dipolaire fT [MHz]
référence	352,243	341,644	342,188
Après les 1° déplacements de pistons	351,529	340,979	341,506
Après les 2° déplacements de pistons	351,549	341,003	341,554
Après les 3° déplacements de pistons	351,513	340,960	341,518
Après les 4° déplacements de pistons	351,530	340,980	341,539

La fréquence du mode accélérateur fQ a correctement convergé vers la valeur objectif de 351,5 MHz (figure 76).

4.4.2 Evolution des composantes modales de la tension accélératrice

- **Composante quadripolaire uQ**

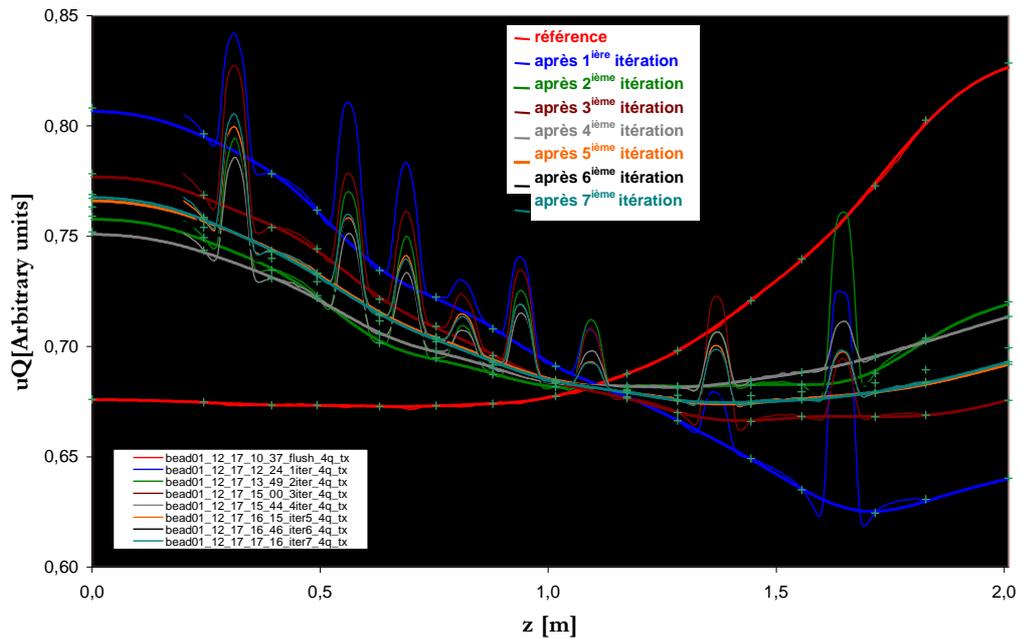


figure 77 : distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension au cours des 7 itérations comprenant le réglage initial à 352,2 MHz

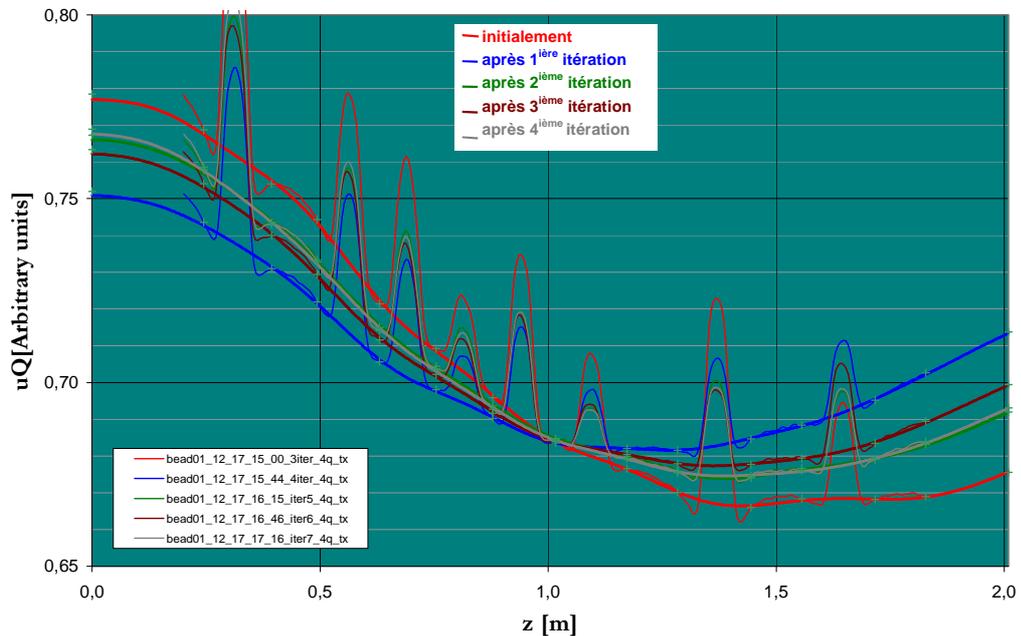


figure 78 : distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension au cours des 4 itérations à 351,5 MHz

Les premières itérations de réglage où la fréquence de résonance est égale à 352,2 MHz ont permis de nettement rapprocher la distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension accélératrice vers le profil visé (figure 77). Les 4 itérations où la fréquence du mode accélérateur a été diminuée à 351,5 MHz ont eu pour effet d'affiner ce réglage (figure 78).

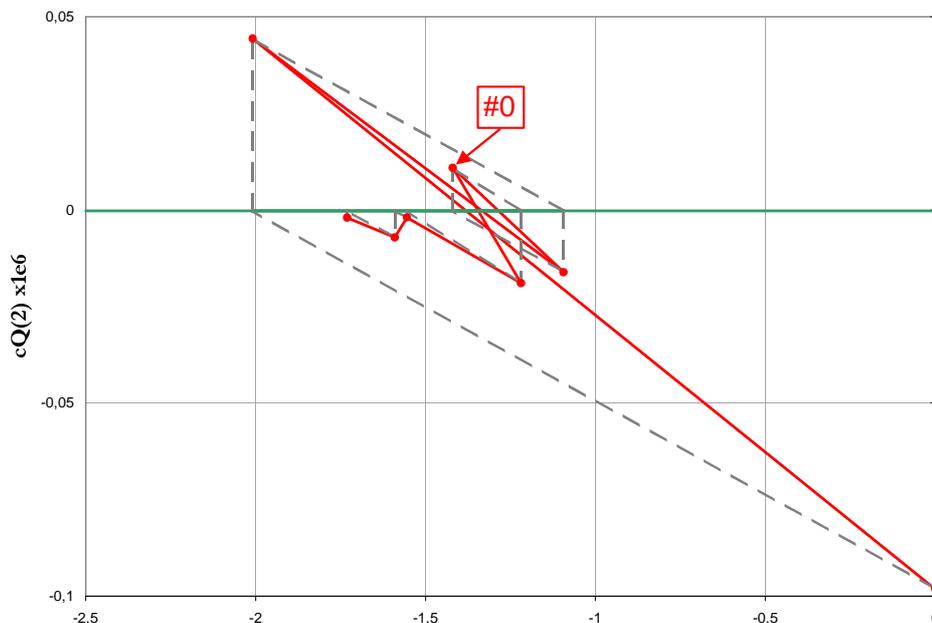


figure 79 : $cQ(2)$ vs les positions cumulées du piston A.1.1 à partir du réglage à 352,2 MHz

Cette observation peut être faite vis à vis de l'ensemble des coefficients $cQ(i)$. Les 3 premières itérations de réglage à 352,2 MHz ont rapproché les $cQ(i)$ des valeurs visées (par exemple figure 79).

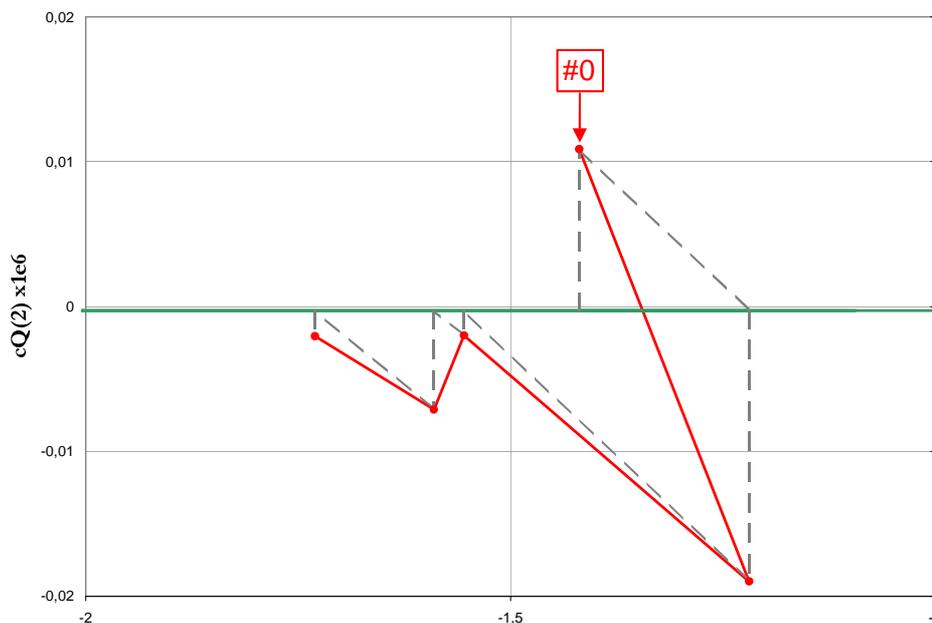


figure 80 : $cQ(2)$ vs les positions cumulées du piston A1 du quadrant 1 à partir du choix de $fQ_{goal}=351,5$ MHz

Les 4 itérations où la fréquence du mode accélérateur visée $fQ_{goal} = 351,5$ MHz ont permis de poursuivre la convergence de ces coefficients spectraux (figure 80).

Les figures suivantes présentent l'évolution des composantes quadripolaires d'ordre 3 à 8.

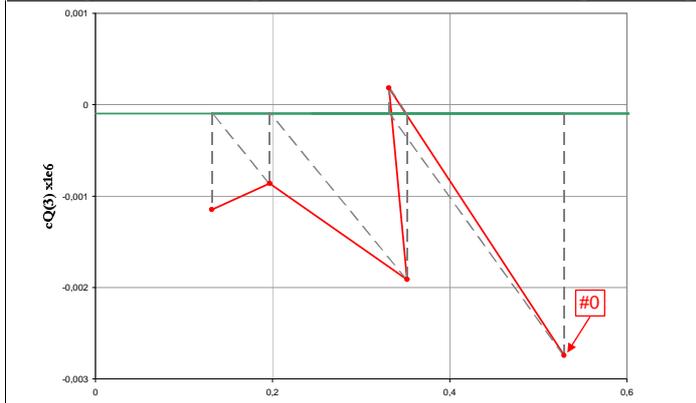


figure 81 : cQ(3) à partir du choix de fQgoal=351,5 MHz

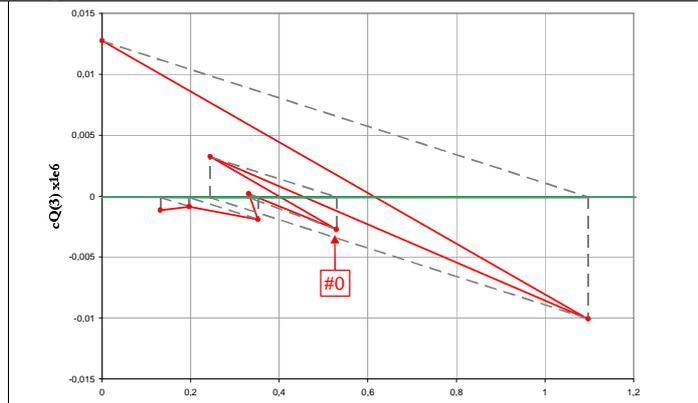


figure 82 : cQ(3) à partir du réglage à 352,2 MHz

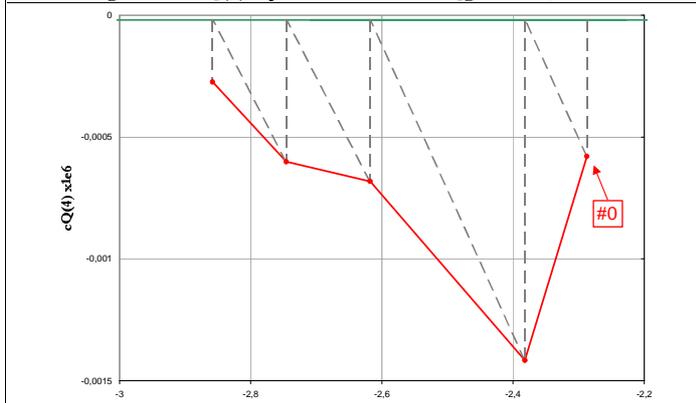


figure 83 : cQ(4) à partir du choix de fQgoal=351,5 MHz

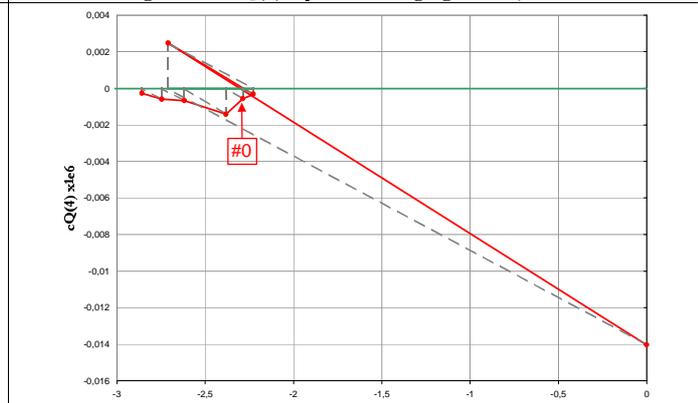


figure 84 : cQ(4) à partir du réglage à 352,2 MHz

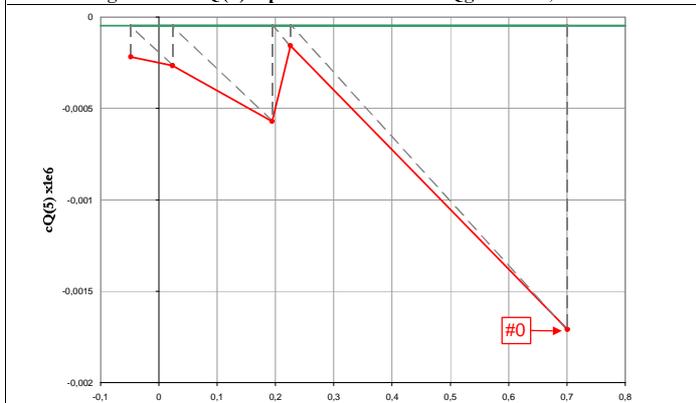


figure 85 : cQ(5) vs les positions cumulées du piston A.1.1 à partir du choix de fQgoal=351,5 MHz

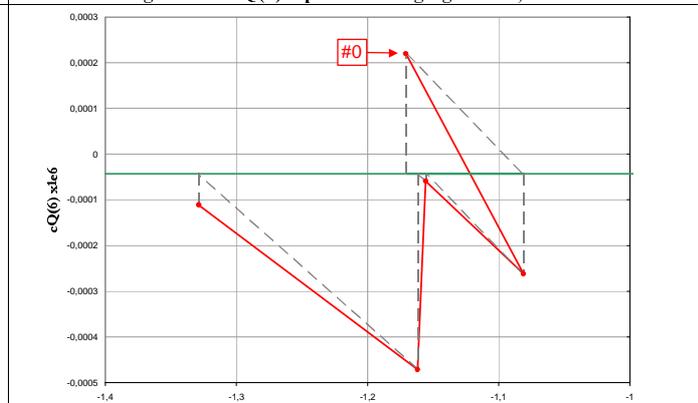


figure 86 : cQ(6) vs les positions cumulées du piston A.1.1 à partir du choix de fQgoal=351,5 MHz



figure 87 : cQ(7) vs les positions cumulées du piston A.1.1 à partir du choix de fQgoal=351,5 MHz



figure 88 : cQ(8) vs les positions cumulées du piston A.1.1 à partir du choix de fQgoal=351,5 MHz

• **Composante dipolaires uS et uT**

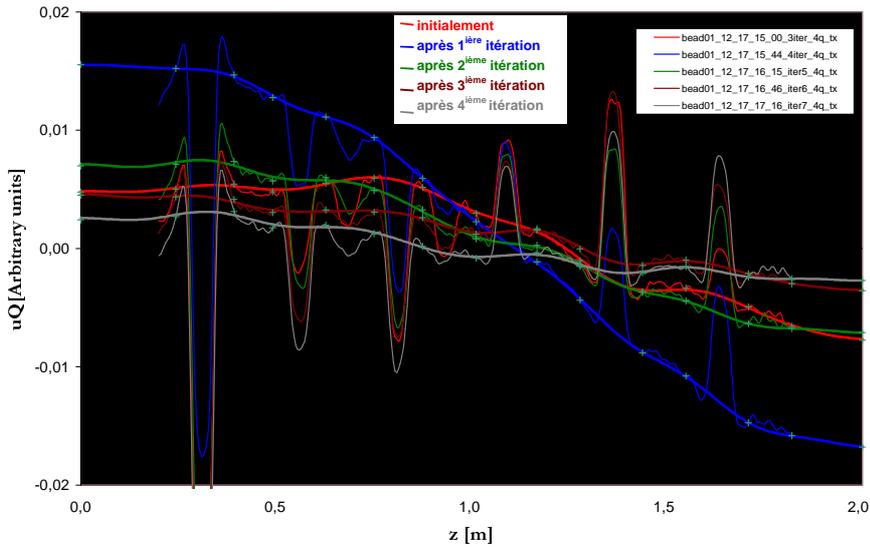


figure 89 : distribution longitudinale de la composante dipolaire uS de la tension au cours des 4 itérations

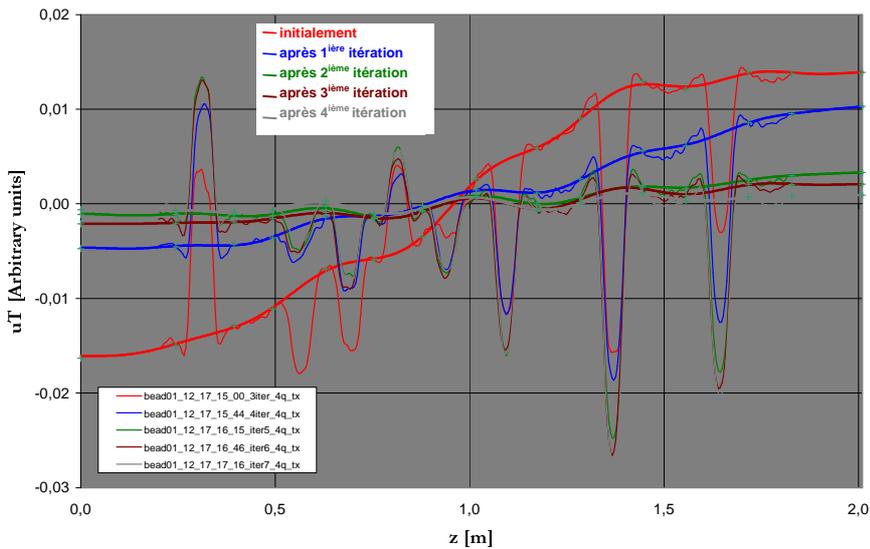


figure 90 : distribution longitudinale de la composante dipolaire uT de la tension au cours des 4 itérations

Chaque itération a rapproché la distribution longitudinale des composantes dipolaires uS et uT vers un profil constant et nul (figure 89 et figure 90).

Tableau 16: évolution du rapport entre les composantes dipolaires uS et uT et quadripolaire uQ de la tension accélératrice lors du réglage à 352,2 MHz

	Fichier de mesure	Min(uD/uQ)	Max(uD/uQ)
Référence : pistons affleurants	bead01_12_17_10_37	-16,05.10 ⁻²	17,76.10 ⁻²
Après la 1 ^{ère} itération	bead01_12_17_12_24	-2,92.10 ⁻²	3,30.10 ⁻²
Après la 2 ^{ème} itération	bead01_12_17_13_49	-2,09.10 ⁻²	2,12.10 ⁻²
Après la 3 ^{ème} itération	bead01_12_17_15_00	-2,07.10 ⁻²	2,09.10 ⁻²

Malgré l'impossibilité d'appliquer l'ensemble des corrections demandées pour la 2^{ème} itération de réglage à 352,2 MHz, à l'issue de cette première série de déplacements, les composantes dipolaires ont été divisées par 8 (figure 91).

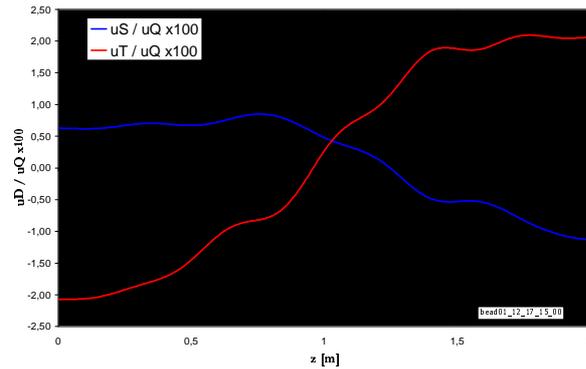


figure 91 : rapports entre les composantes dipolaires uS et uT et quadripolaire uQ de la tension accélératrice existant avant la première itération de réglage vers 351,5 MHz

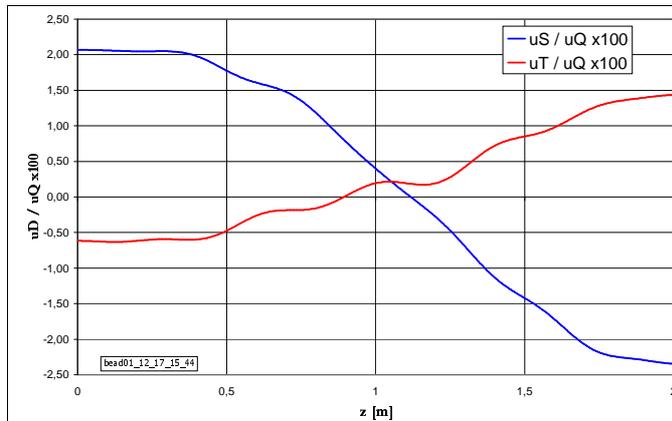


figure 92 : après la 1^{ère} itération de réglage à 351,5 MHz

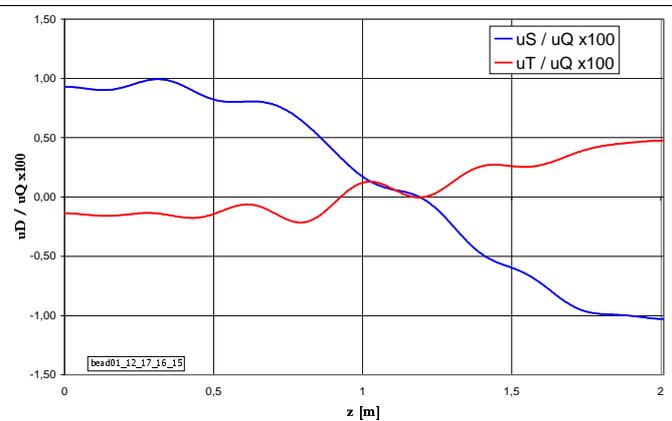


figure 93 : après la 2^{ème} itération de réglage à 351,5 MHz

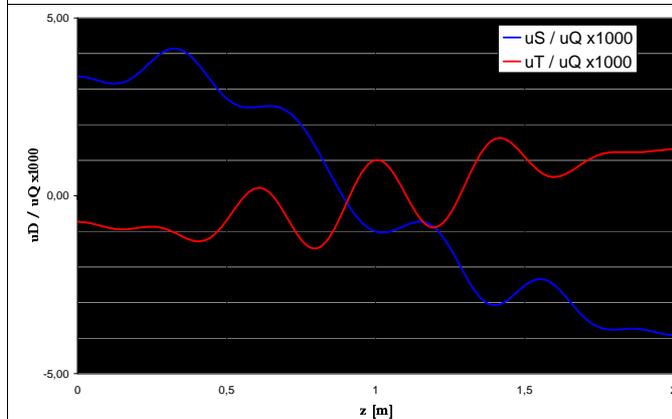


figure 94 : après la 4^{ème} itération de réglage à 351,5 MHz

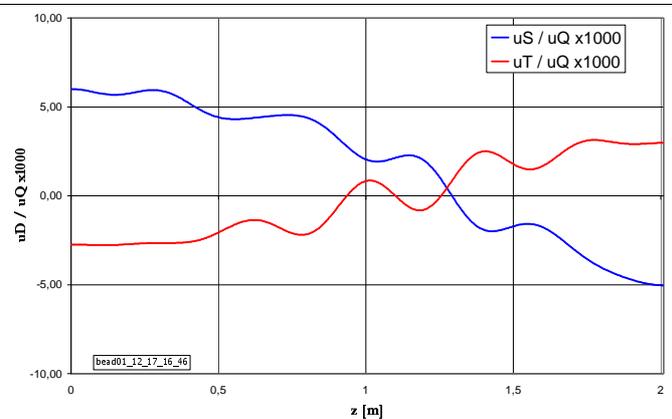


figure 95 : après la 3^{ème} itération de réglage à 351,5 MHz

	Fichier de mesure	Min(uD/uQ)	Max(uD/uQ)
Positions initiales	bead01_12_17_15_00	$-2,07 \cdot 10^{-2}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$
Après la 1 ^{ère} itération	bead01_12_17_15_44	$-2,35 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$
Après la 2 ^{ème} itération	bead01_12_17_16_15	$-1,03 \cdot 10^{-2}$	$0,99 \cdot 10^{-2}$
Après la 3 ^{ème} itération	bead01_12_17_16_46	$-0,50 \cdot 10^{-2}$	$0,60 \cdot 10^{-2}$
Après la 4 ^{ème} itération	bead01_12_17_17_16	$-0,39 \cdot 10^{-2}$	$0,42 \cdot 10^{-2}$

Les 4 itérations de réglage à 351,5 MHz ont progressivement corrigé les composantes dipolaires uS et uT jusqu'à les rendre inférieures au seuil requis pour le réglage de $\pm 10^{-2}$. Les coefficients cS et cT ont parfaitement convergé vers les valeurs visées (voir en annexe 4.3.3).

4.4.3 Tension accélératrice sur la base de contrôle (répartition irrégulière des pistons).

Coefficients de la composante dipolaire S de la tension

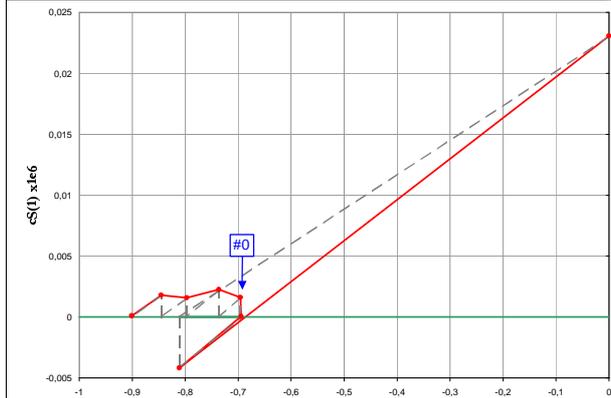


figure 96 : cS(1) vs la position cumulée du piston A.1.1

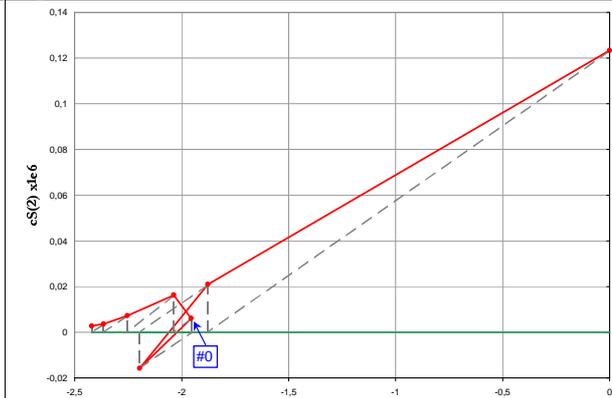


figure 97 : cS(2) vs la position cumulée du piston A.1.1

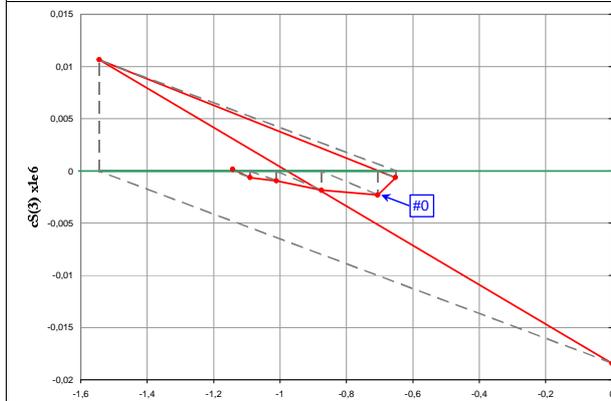


figure 98 : cS(3) vs la position cumulée du piston A.1.1

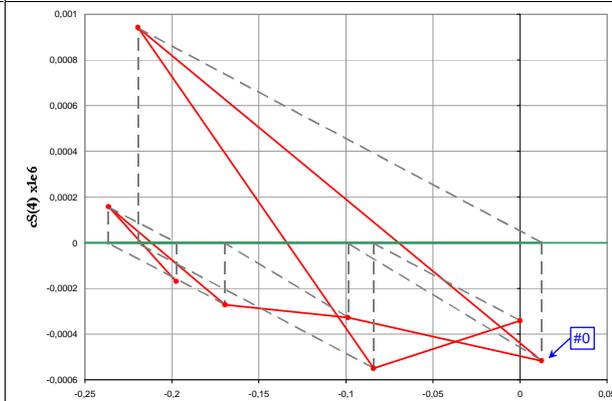


figure 99 : cS(4) vs la position cumulée du piston A.1.1

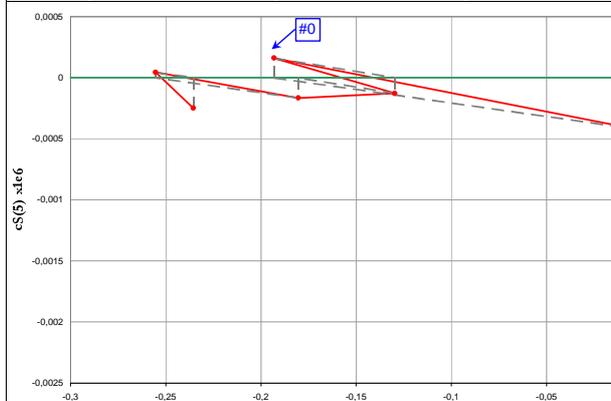


figure 100 : cS(5) vs la position cumulée du piston A.1.1

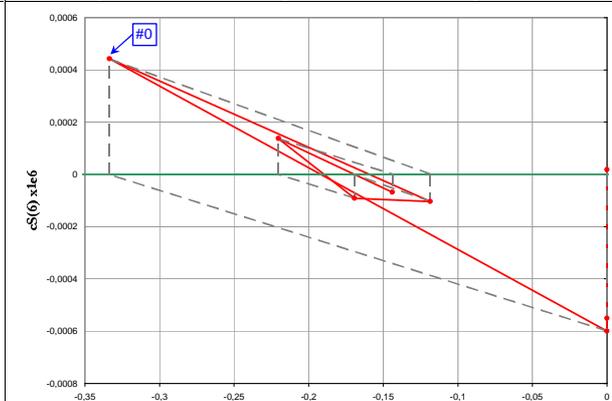


figure 101 : cS(6) vs la position cumulée du piston A.1.1

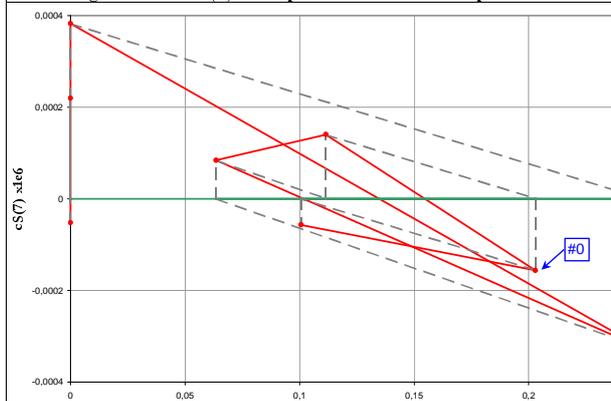


figure 102 : cS(7) vs la position cumulée du piston A.1.1

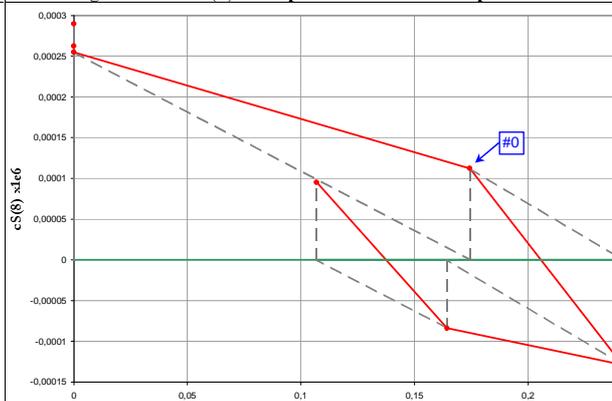


figure 103 : cS(8) vs la position cumulée du piston A.1.1

Coefficients de la composante dipolaire T de la tension

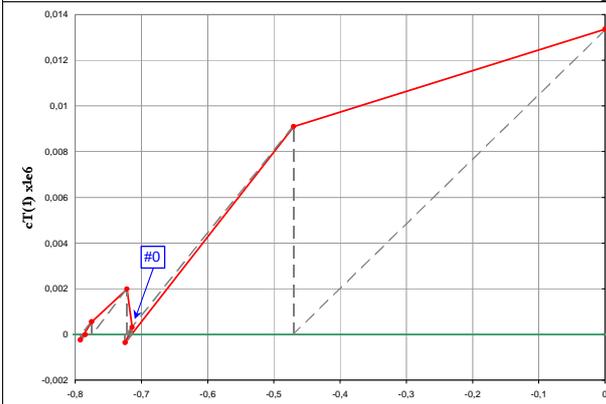


figure 104 : cT(1) vs la position cumulée du piston A.1.1

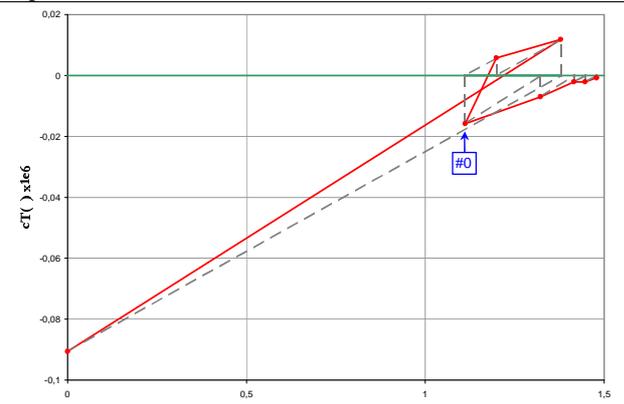


figure 105 : cT(2) vs la position cumulée du piston A.1.1



figure 106 : cT(3) vs la position cumulée du piston A.1.1

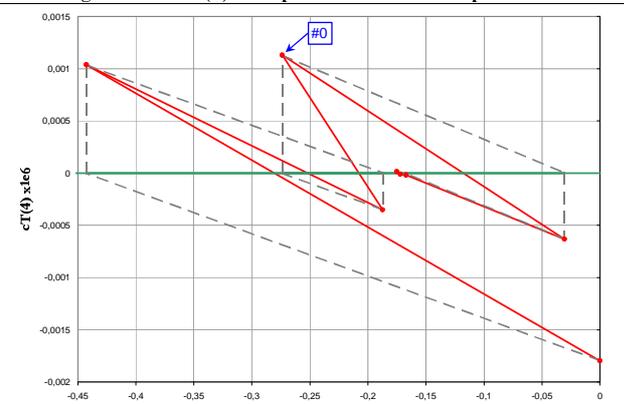


figure 107 : cT(4) vs la position cumulée du piston A.1.1

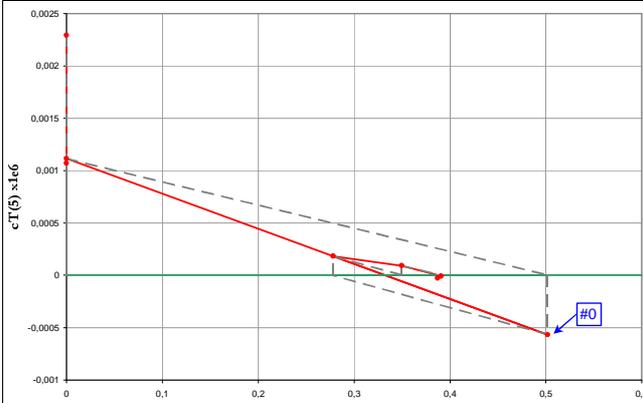


figure 108 : cT(5) vs la position cumulée du piston A.1.1

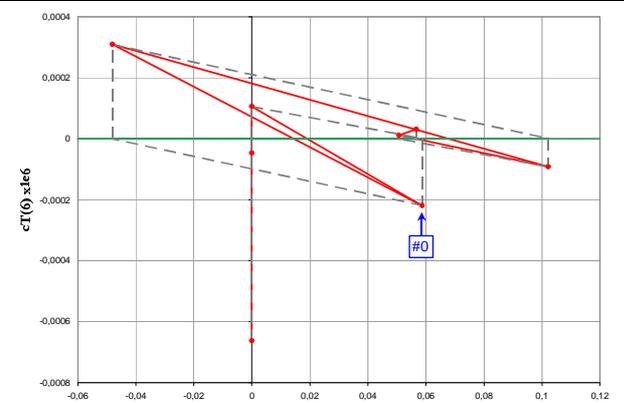


figure 109 : cT(6) vs la position cumulée du piston A.1.1

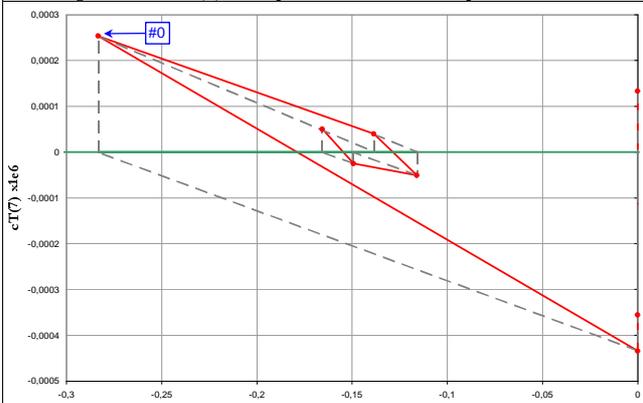


figure 110 : cT(7) vs la position cumulée du piston A.1.1

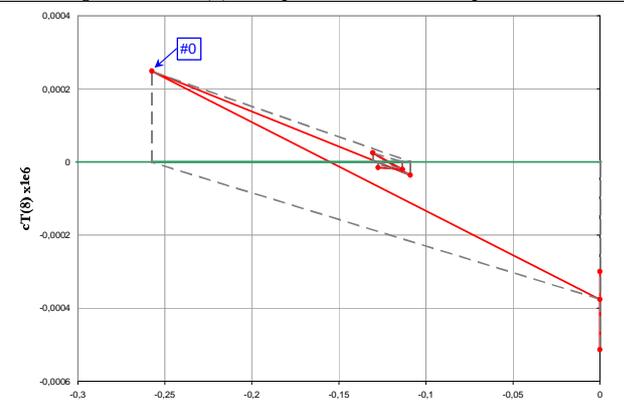


figure 111 : cT(8) vs la position cumulée du piston A.1.1

4.5 Positions finales des pistons

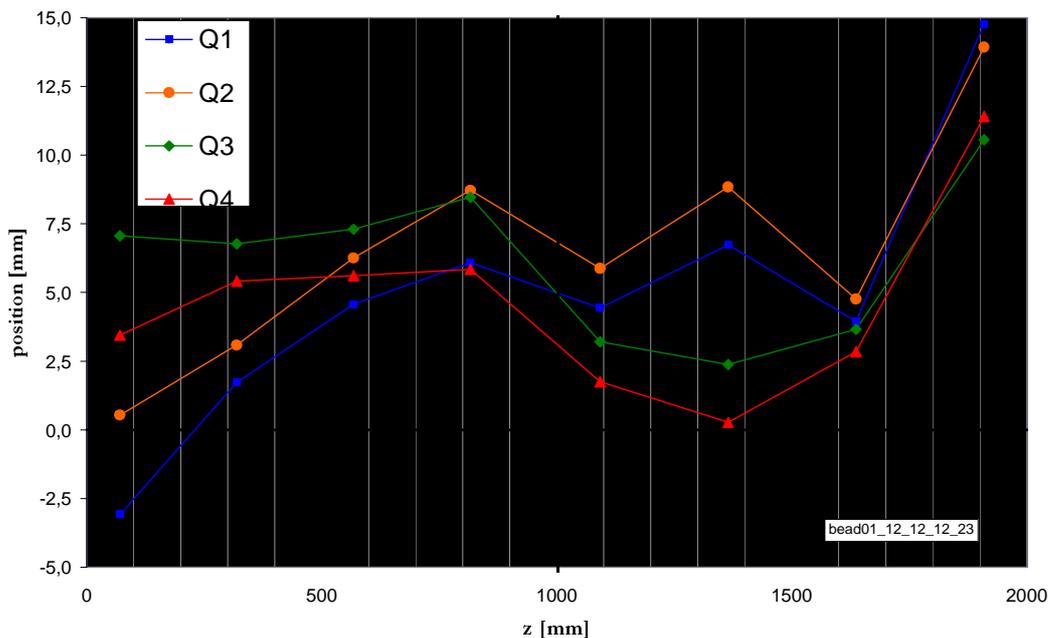


figure 112 : positions cumulées des pistons après les 5 itérations de réglage à 352,2 MHz avec la distribution régulière des pistons

Avec la distribution régulière, les pistons sont notablement plus enfoncés du côté de la plaque de couplage (figure 112). Ces fortes amplitudes compensent la désadaptation que représente cette extrémité de couplage sans électrodes du segment suivant.

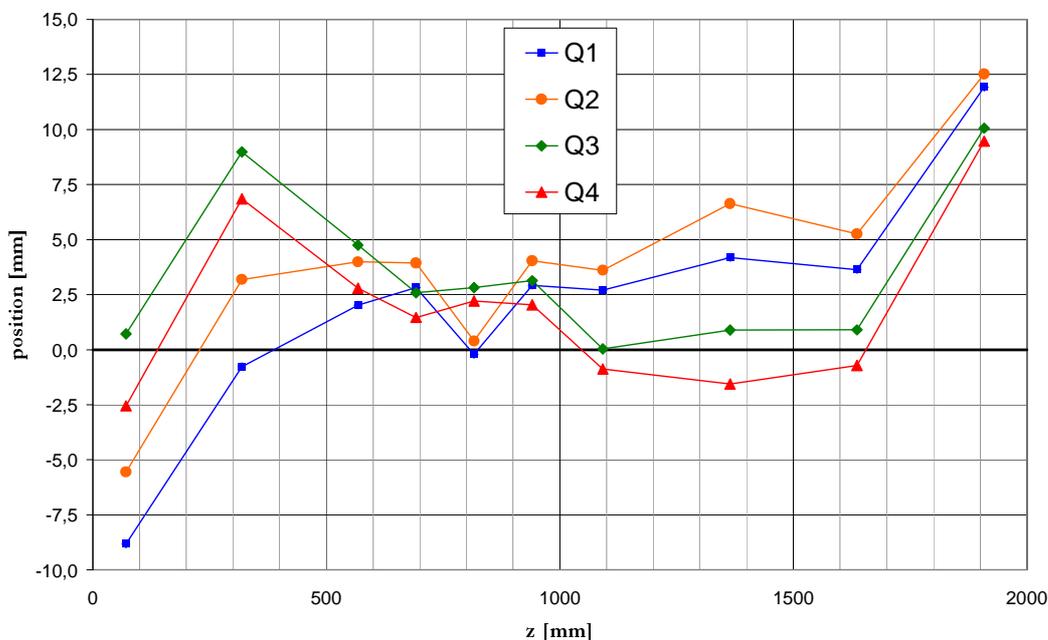


figure 113 : positions des pistons après la 4^{ème} itération de réglage à 351,5 MHz avec la distribution irrégulière des pistons

Comme pour le test avec la distribution régulière, les pistons sont notablement plus enfoncés du côté de la plaque de couplage (figure 113). En revanche, les valeurs extrêmes atteintes du côté entrée faisceau sont plus importantes malgré une fréquence de résonance visée inférieure.

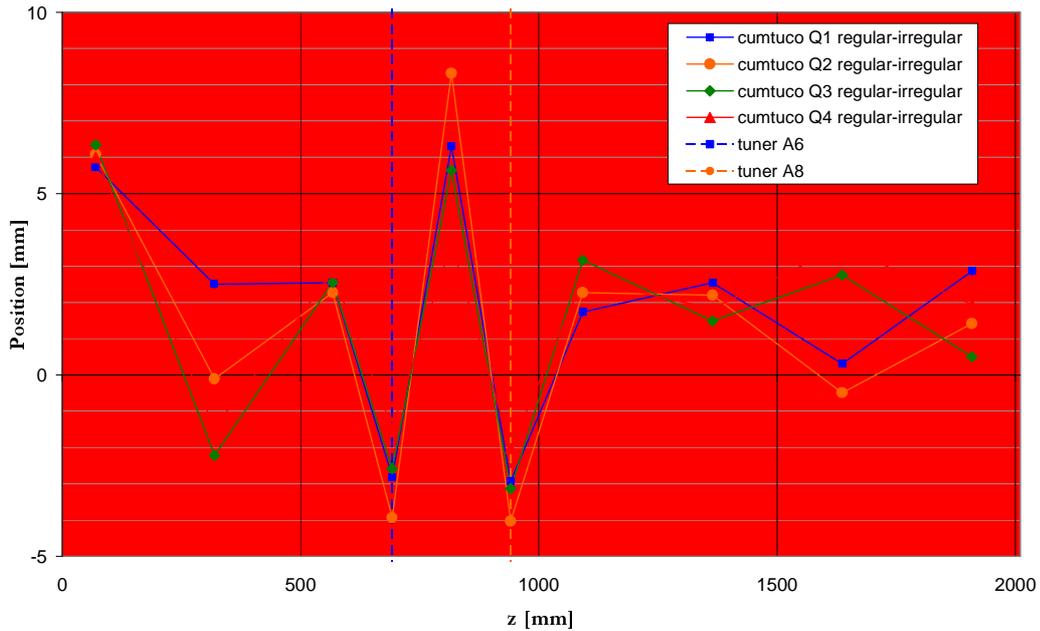


figure 114 : différences entre les positions cumulées des pistons après réglage dans le cas d'une distribution régulière (352,2 MHz) et celui d'une distribution irrégulière (351,5 MHz)

La fréquence du mode quadripolaire visée est supérieure dans le cas de la distribution régulière (352,2 MHz) par rapport à celui de la distribution irrégulière (351, MHz). Il est donc tout à fait normal que les pistons sont globalement plus enfoncés dans le premier cas que dans le second (figure 114). On observe cependant à l'extrémité « entrée faisceau » des amplitudes plus importantes.

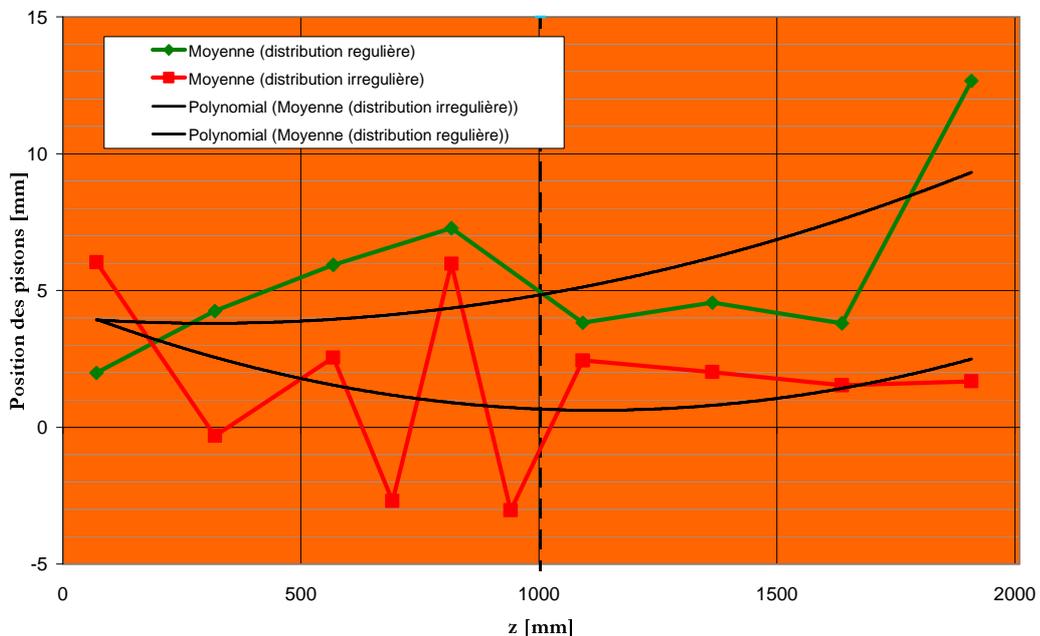


figure 115 : Moyennes des positions de pistons comparées selon la distribution régulière et irrégulière

L'ajout de 2 pistons supplémentaires a modifié les fonctions de commandes. Cette modification se traduit par des oscillations autour d'une valeur moyenne dans la région où les pistons sont plus resserrés (figure 115).

5 Estimations des distributions des déséquilibres transverses dans un tronçon de RFQ de 1 mètre

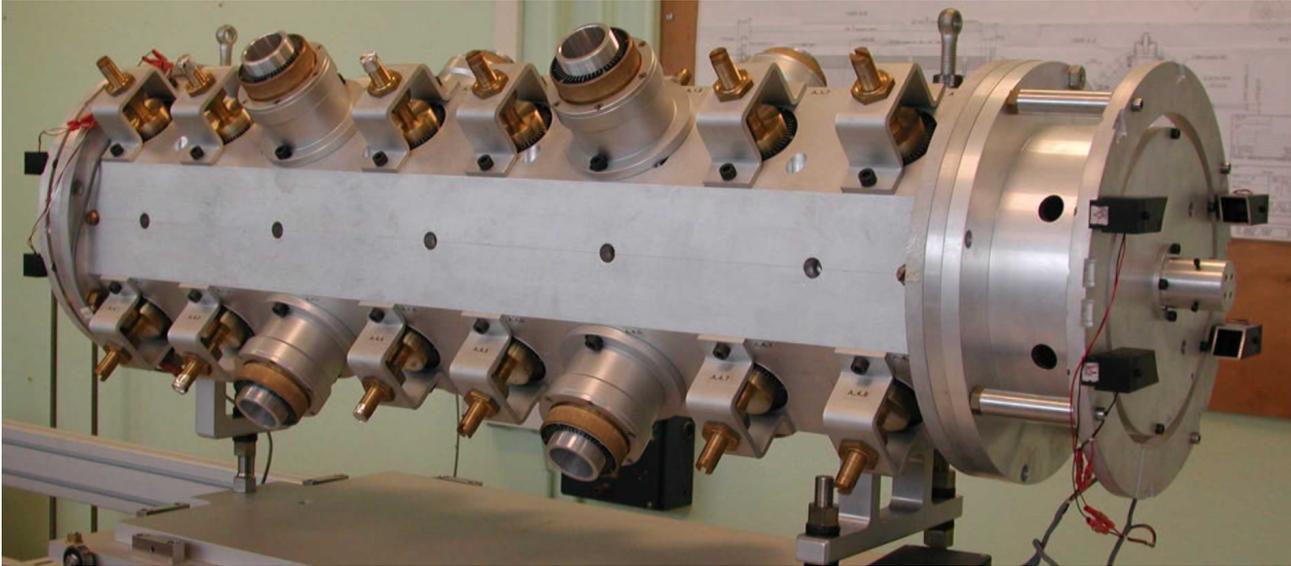


figure 116 : tronçon de maquette de RFQ monté dans la configuration des tests chez l'industriel

La maquette a été montée dans la configuration des tests des tronçons individuels de RFQ qui seront effectués chez l'industriel avant et après brasage (figure 116) : un tronçon de 1 mètre pourvu des électrodes à profil variable, est terminé :

- côté « entrée faisceau » par une plaque dotée d'une surépaisseur
- à l'autre extrémité par un cylindre qui isole la cavité de perturbations extérieures.

Nous avons évalué la distribution longitudinale des défauts transverses, diagnostic qui sera réalisé sur chaque tronçon individuel du RFQ d'IPHI..

Deux séries de mesures ont été effectuées ; avec et sans doigts de réglage des modes dipolaires montés à l'extrémité « entrée faisceau » (longueur de 133 mm).

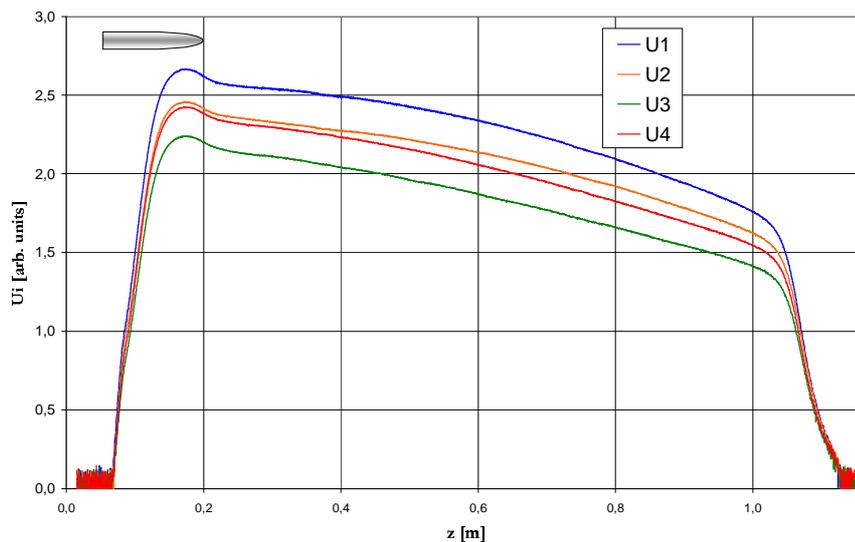
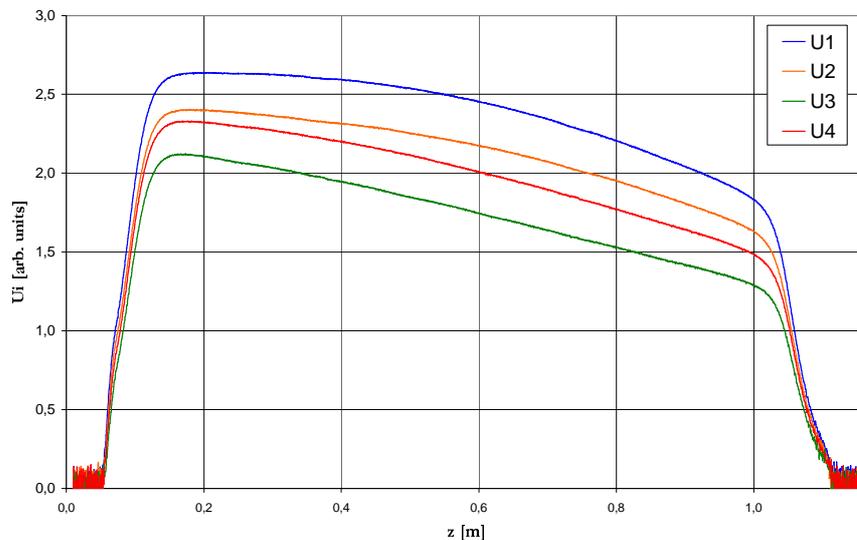


figure 117 : tensions brutes des 4 quadrants dans le tronçon doté des doigts à l'extrémité « entrée faisceau »

Tableau 17 : Mesures dans un tronçon de RFQ de 1 mètre avec les doigts montés à l'extrémité 1

Fichier de mesure	Fréquence du mode accélérateur fQ	f1 Excitation S Excitation T	f2 Excitation S Excitation T
Bead01_12_18_13_38	352,530 MHz Q=2033 (-34,14 dB)	fS = 343,291 MHz (-43,41 dB) 343,258 MHz (-53,47 dB)	344,839 MHz (-51,47 dB) fT=344,85 MHz (-32,19 dB)
Bead01_12_18_13_54	352,531 MHz	fS = 343,292 MHz (-43,41 dB) idem	Idem fT=344,846 MHz (-32,2 dB)
Bead01_12_18_14_06	352,5305 MHz	idem	idem

**figure 118 : tensions brutes des 4 quadrants dans le tronçon sans doigts****Tableau 18 : Mesures dans le tronçon de RFQ de 1 mètre sans les doigts**

Fichier de mesure	Fréquence du mode accélérateur fQ	f1 Excitation S Excitation T	f2 Excitation S Excitation T
Bead01_12_19_09_17	352,524 MHz Q=2056 (-34,29 dB)	fS = 346,207 MHz (-42,81 dB) petit	347,851 MHz (-54,49 dB) fT=347,866 MHz (-30,95 dB)
Bead01_12_19_09_31	352,525 MHz	idem	idem
Bead01_12_19_09_45	352,524 MHz Q=2053	fS = 346,207 MHz (-42,83 dB) petit (-52,42 dB)	347,853 MHz (-54,5 dB) fT=347,867 MHz (-30,94 dB)
Bead01_12_19_09_59	352,524 MHz	idem	idem

Notre formalisme permet d'estimer des défauts capacitifs entre quadrants indépendamment des conditions aux limites. Les pentes terminales des tensions sont liées à la charge terminale équivalente. Lors de l'analyse des mesures, ces pentes sont estimées par le code des déséquilibres transverses des régions principales des électrodes. On en déduit les perturbations aux limites du RFQ mesuré et les applique au modèle théorique du RFQ parfait. Ces désadaptations sont ainsi soustraites des défauts transverses estimés entre quadrants.

L'insertion des doigts de réglage dipolaire constitue une perturbation des conditions aux limites côté « entrée faisceau qui doit pouvoir être soustraite de l'estimation des déséquilibres.

distribution longitudinale des défauts capacitifs

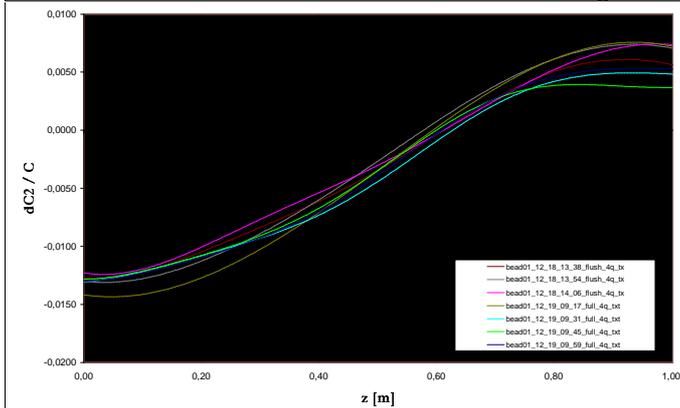


figure 119 : dans le quadrant 2

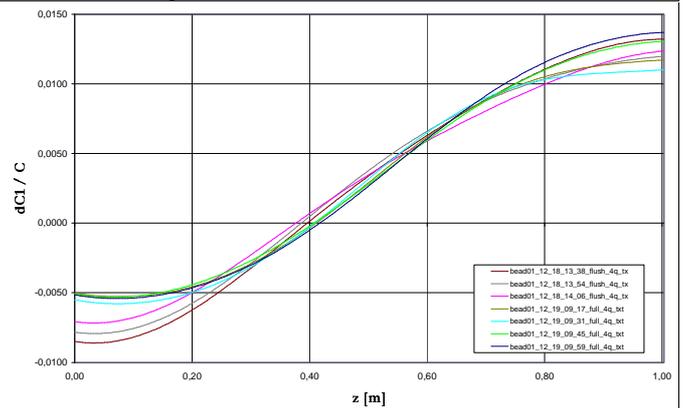


figure 120 : dans le quadrant 1

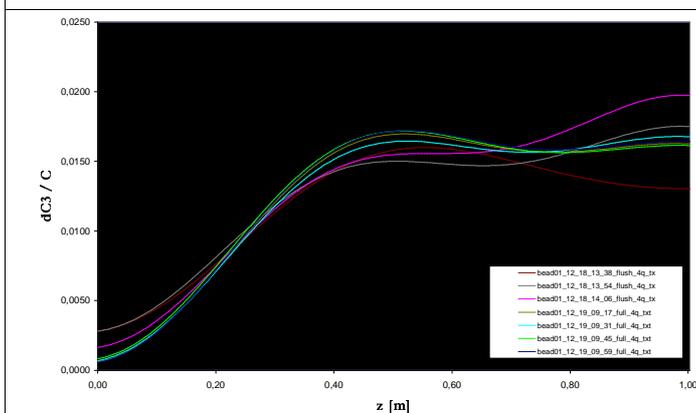


figure 121 : dans le quadrant 3

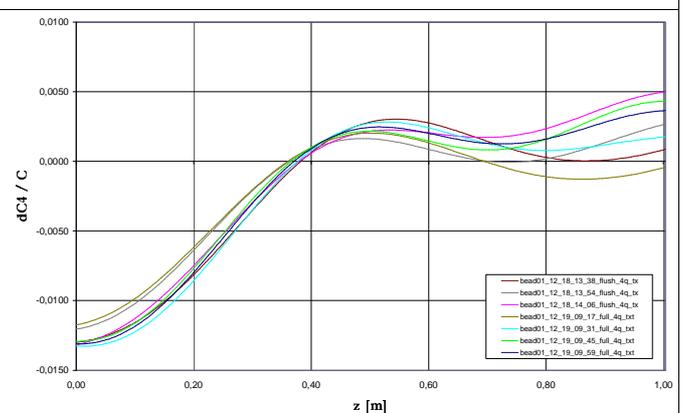


figure 122 : dans le quadrant 4

On constate que les distributions longitudinales des défauts capacitifs des quadrants 1 à 4 se superposent pour l'ensemble des mesures, avec ou sans doigts de réglage dipolaire.

- Les mesures par perturbation présente un signal sur bruit et une répétitivité tout à fait satisfaisants pour ce diagnostic. Le bloc cylindrique de fermeture du tronçon joue parfaitement son rôle.
- Les méthodes d'alignement des mesures pour cette configuration mécanique sont validées.
- Notre estimation des pentes de la tension aux extrémités permet de correctement estimer les déséquilibres transverses des électrodes indépendamment des conditions aux limites.

6 Conclusion

Pour les deux distributions des plans transverses de pistons testées, le réglage de tous les paramètres a parfaitement convergé en 4 itérations.

Ces tests valident :

- Le modèle de ligne inhomogène quadrifilaire chargée aux extrémités que nous avons construit pour pouvoir régler le RFQ d'IPHI.
- Les calculs des réponses des pistons effectués à l'aide de Superfish piloté depuis un code Matlab.

Le formalisme de réglage des pistons d'accord s'applique parfaitement à un segment de RFQ réel, même s'il n'est pas suivi du segment suivant et donc présente une désadaptation à l'extrémité « couplage résonant ».

La méthode de calcul des commandes de pistons qui permet de même considérer une distribution irrégulière des pistons a été validée.

Les mesures sur le tronçon individuel de RFQ constituent une excellente répétition des diagnostics qui seront effectués chez l'industriel avant et après brasage.

Les distributions longitudinales des défauts capacitifs des quadrants 1 à 4 se superposent pour l'ensemble des mesures, avec ou sans doigts de réglage dipolaire.

- Les mesures par perturbation présente un signal sur bruit et une répétitivité tout à fait satisfaisants pour ce diagnostic. Le bloc cylindrique de fermeture du tronçon joue parfaitement son rôle.
- Les méthodes d'alignement des mesures pour cette configuration mécanique sont validées.
- Notre estimation des pentes de la tension aux extrémités permet de correctement estimer les déséquilibres transverses des électrodes indépendamment des conditions aux limites.

Références :

-
- [I] « Réglage d'une tension constante dans un RFQ de 2 m », F. Simoens, A. France, J. Gaiffier, référence en cours de demande
 - [II] « Réglage d'une tension variable dans un RFQ de 2 m », F. Simoens, A. France, J. Gaiffier, référence en cours de demande
 - [III] « Réglage d'une tension constante dans un RFQ segmenté de 2x1m », F. Simoens, A. France, J. Gaiffier, référence en cours de demande
 - [IV] « Réglage d'une tension variable dans un RFQ segmenté de 2x1m », F. Simoens, A. France, J. Gaiffier, référence en cours de demande
 - [V] « Justification d'une maquette de RFQ au niveau RFQ pour le projet IPHI », F. Simoens, P. Balleyguier, M. Desmons, A. France, 15 janvier 1999, DAPNIA/SEA/IPHI99/01
 - [VI] « Nouvelles plaques de couplages et terminales du RFQ d'IPHI », P. Balleyguier, 19 octobre 2000, CEA/DIF/DPTA/SPAA 148
 - [VII] « Facteur de qualité de la maquette de RFQ », F. Simoens, A. France, J. Gaiffier, 17 septembre 2001, DAPNIA/SEA/IPHI2001/ 53, DAPNIA
 - [VIII] « Distribution des modes de résonance d'un RFQ. Modèle et expérimentations », F. Simoens, A. France, J. Gaiffier, 9 octobre 2001, DAPNIA/SEA/IPHI2000/ 61
 - [IX] "Effet des doigts stabilisateurs dans un tronçon de maquette de RFQ", F. Simoens, A. France & J. Gaiffier, 05/2001, référence DAPNIA/SEA-01-08