



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 : 03 avril 2001

N° RÉF. : DAPNIA/SEA/PH 2001/19

François SIMOENS, fsimoens@cea.fr

Ahân FRANCE, afrance@cea.fr

Jacques GAFFIER, jgaiffier@cea.fr

Réglage d'un tronçon de maquette de RFQ

à l'aide de ses pistons



**TABLE DES MATIERES**

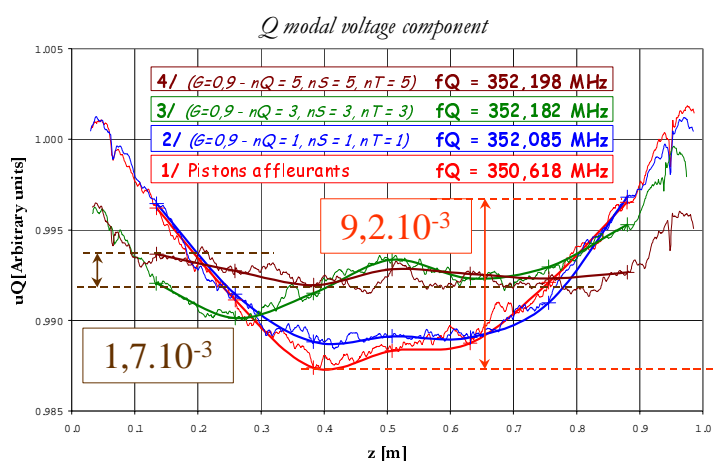
<b>Table des matières</b>	<b>3</b>
<b>Résumé</b>	<b>5</b>
<b>1 Conditions et formalisme du réglage</b>	<b>6</b>
1.1 Configuration de l'expérience	6
1.2 Itération de réglage	8
1.3 Principe général de l'asservissement des pistons	8
1.4 Originalité et puissance de notre formalisme de réglage	9
1.5 Paramètres à atteindre à l'issue du test de réglage	10
1.6 Exemple de commandes de pistons	10
1.7 Discrétisation des points de mesure à considérer pour le réglage des pistons	11
1.7.1 Plage de données exploitables pour une mesure Electrique / Magnétique	11
1.7.2 Définition de points de données discrètes	12
<b>2 Essais et résultats</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Réglage déduit de la perturbation du champ magnétique</b>	<b>13</b>
2.1.1 Situation initiale: mesure de H avec les pistons affleurants	13
2.1.1.1 Composante quadripolaire (pistons affleurants)	13
2.1.1.2 Composantes dipolaires (pistons affleurants)	14
2.1.2 Commandes de pistons calculées après la mesure pistons affleurants	15
2.1.2.1 Valeurs de commande de pistons	15
2.1.2.2 Remarques concernant les commandes de pistons	15
2.1.3 Après la première itération	16
2.1.3.1 Composante quadripolaire (1 <sup>ère</sup> itération)	16
2.1.3.2 Composantes dipolaires (1 <sup>ère</sup> itération)	17
2.1.4 Commandes de pistons calculées après la 1 <sup>ère</sup> itération	18
2.1.4.1 Valeurs de commande de pistons	18
2.1.4.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la deuxième itération	18
2.1.5 Après la deuxième itération	19
2.1.5.1 Composante quadripolaire (2 <sup>ème</sup> itération)	19
2.1.5.2 Composantes dipolaires (2 <sup>ème</sup> itération)	20
2.1.6 Commandes de pistons calculées après la 2 <sup>ème</sup> itération	21
2.1.6.1 Valeurs de commande de pistons	21
2.1.6.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la troisième itération	21
2.1.7 Après la troisième itération	22
2.1.7.1 Composante quadripolaire (3 <sup>ème</sup> itération)	22
2.1.7.2 Composantes dipolaires (3 <sup>ème</sup> itération)	23
<b>2.2 Test du réglage déduit de la perturbation du champ électrique</b>	<b>24</b>
2.2.1 Situation initiale: mesure de E avec les pistons affleurants	24
2.2.1.1 Composante quadripolaire (pistons affleurants)	24
2.2.1.2 Composantes dipolaires (pistons affleurants)	25
2.2.2 Commandes de pistons calculées après la mesure avec les pistons affleurants	26
2.2.2.1 Valeurs de commande de pistons	26
2.2.2.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la première itération	26
2.2.3 Après la première itération	27
2.2.3.1 Composante quadripolaire (1 <sup>ère</sup> itération)	27
2.2.3.2 Composantes dipolaires (1 <sup>ère</sup> itération)	27
2.2.4 Commandes de pistons calculées pour la 2 <sup>ème</sup> itération	28
2.2.4.1 Valeurs de commande de pistons	28
2.2.4.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la deuxième itération	28
2.2.5 Après la deuxième itération	29

2.2.5.1	Composante quadripolaire (2 <sup>ème</sup> itération)	29
2.2.5.2	Composantes dipolaires (2 <sup>ème</sup> itération)	29
2.2.6	Commandes de pistons calculées pour la 3 <sup>ème</sup> itération	30
2.2.6.1	Valeurs de commande de pistons	30
2.2.6.2	Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la troisième itération	30
2.2.7	Après la troisième itération	31
2.2.7.1	Composante quadripolaire (3 <sup>ème</sup> itération)	31
2.2.7.2	Composantes dipolaires (3 <sup>ème</sup> itération)	32
<b>3</b>	<b><i>Synthèse des résultats</i></b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Tableau récapitulatif du réglage déduit de la perturbation du champ magnétique</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Tableau récapitulatif du réglage déduit de la perturbation du champ électrique</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Comparaison entre les positions finales de pistons</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b><i>Conclusion</i></b>	<b>36</b>

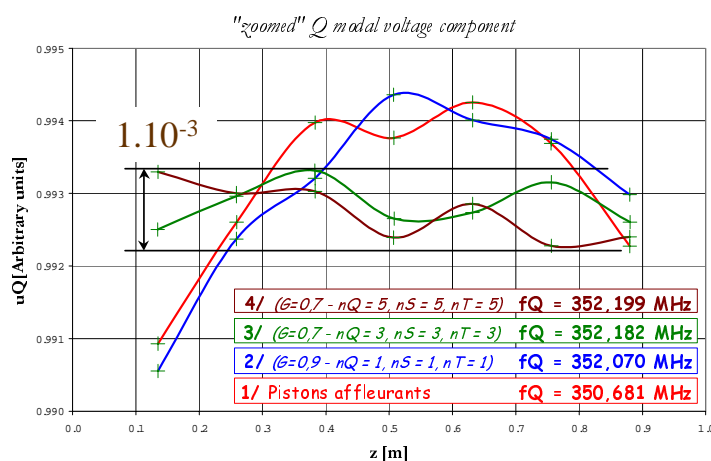
## Résumé

Ce rapport décrit comment en 3 itérations de déplacements correctifs des pistons tous les paramètres électromagnétiques d'un RFQ d'un mètre ont été simultanément réglés.

Le résultat démontre la validité et la puissance du formalisme de réglage que nous avons mis au point.



MESURE PAR PERTURBATION DE E



MESURE PAR PERTURBATION DE H

# 1 Conditions et formalisme du réglage

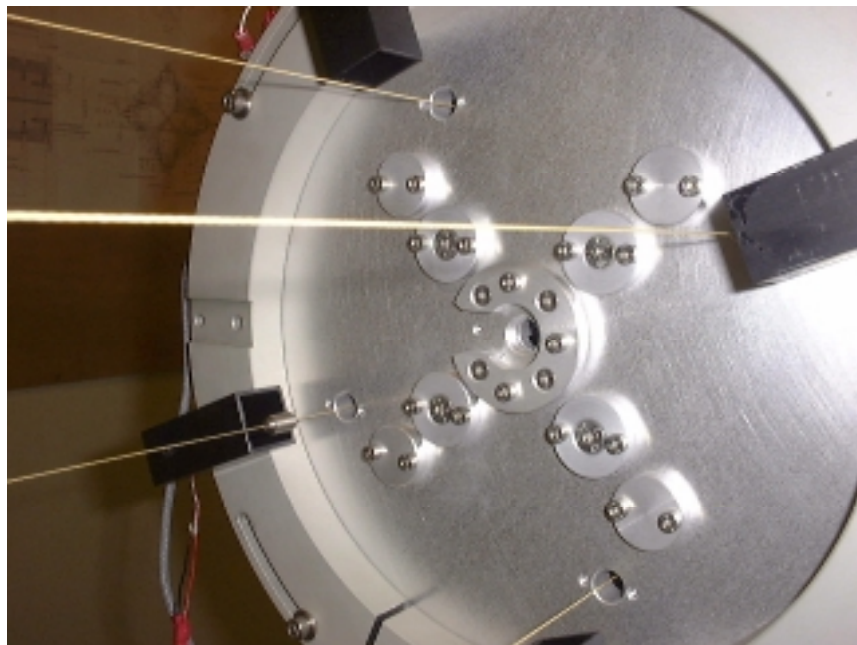
## 1.1 Configuration de l'expérience



**figure 1: tronçon de maquette de l'expérience**

Conditions de réglage d'un tronçon de RFQ :

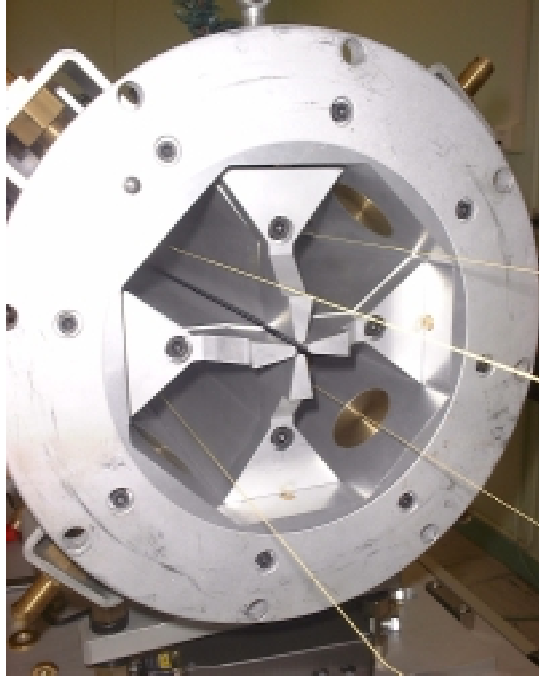
- de longueur d'1 mètre doté de 8 pistons par quadrant (figure 1).



**figure 2: plaque d'extrémité**

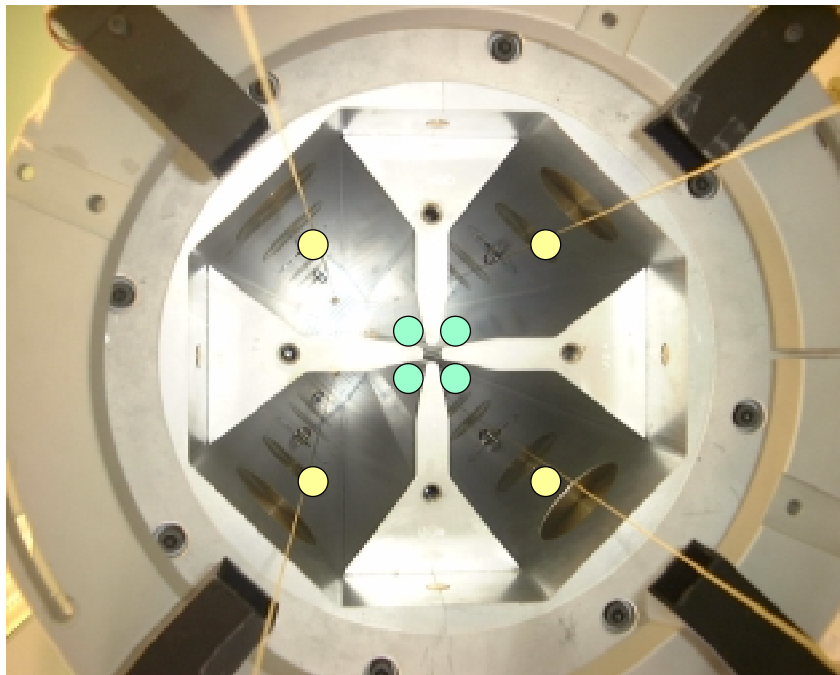
- fermé aux 2 extrémités par des plaques dotées de 12 orifices de passage des objets perturbateurs<sup>1</sup> ; les trous non utilisés sont obturés par des bouchons amovibles (figure 2) ;

<sup>1</sup> Ces nouvelles plaques, réalisées par AMAFA, ont été réceptionnées fin janvier 2001.



**figure 3: régions d'extrémité dotées des becs à encoches avant fermeture**

- équipé dans les régions d'extrémité des becs à encoches (figure 3) ;
- la position d'origine de tous les pistons est affleurante à la surface interne de la cavité (figure 4)



**figure 4: photographie de la maquette montrant les 2 positions transverses testées**

- mesures à partir de la perturbation des champs en 2 positions transverses différentes :
  1. sur la bissectrice de chaque quadrant, ce qui équivaut à perturber le champ magnétique H à l'aide d'une ogive métallique (ainsi que sont placés les cercles jaunes de la figure 4);
  2. près de l'axe de passage du faisceau, ce qui équivaut à perturber le champ électrique E, à l'aide d'une sphère diélectrique de diamètre 7 mm en appui sur l'extrémité des électrodes (illustré par les cercles verts sur la figure 4).

## 1.2 Itération de réglage

Une itération de réglage consiste en :

- 1- **Une mesure par perturbation** pilotée depuis un programme Labview, où l'objet perturbateur est déplacé successivement à travers les 4 quadrants :  
cette mesure génère un jeu de 4 phases perturbées en fonction de la position longitudinale  $\{\phi_1(z), \phi_2(z), \phi_3(z), \phi_4(z)\}$ .
- 2- **L'analyse des données** de mesures sous le code « rfqtunetool » écrit sous Matlab :  
le code génère les commandes individuelles de déplacements des pistons en mm.
- 3- **Un déplacement mécanique des pistons**, obtenu avec une précision de 0,01 millimètre.

## 1.3 Principe général de l'asservissement des pistons

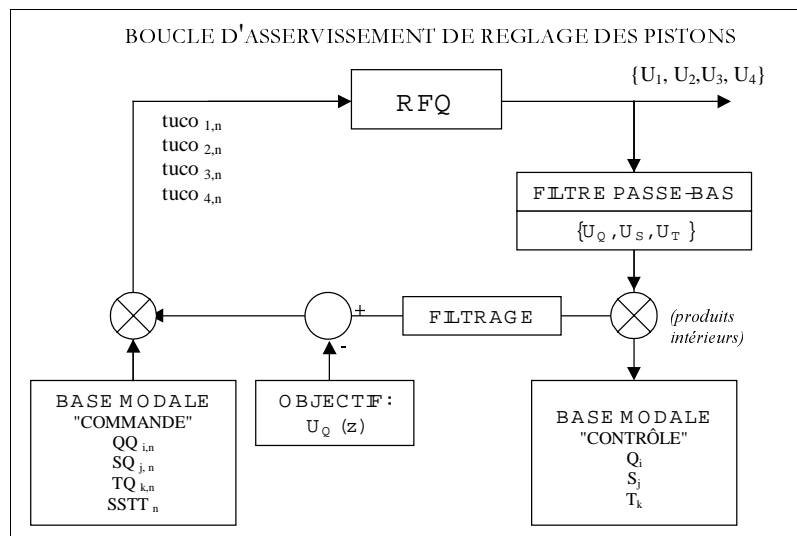


figure 5: schéma général de la boucle d'asservissement de réglage des pistons

On peut considérer la procédure de réglage des pistons comme une boucle d'asservissement. Nous décrivons les étapes en suivant la chronologie de la boucle (figure 5).

### Données à asservir

Les phases perturbées mesurées sont converties en 4 tensions longitudinales  $\{U_1, U_2, U_3, U_4\}$  (en unité arbitraire), à raison d'une tension par quadrant. Ces variables constituent le paramètre mesuré.

### Filtrage, Projection

Ces données expérimentales subissent un *filtrage du premier ordre*, qui est ici un lissage par moyenne glissante. Les tensions sont ensuite *projetées dans une base canonique de vecteurs*  $\{\vec{Q}, \vec{S}, \vec{T}, \vec{O}\}$ . Comme le champ magnétique est conservateur, la 4<sup>ème</sup> composante doit être nulle: et ainsi les systèmes d'équations que nous avons à résoudre sont réduits à 3 dimensions dont les données sont  $\{U_Q, U_S, U_T\}$ .

### Projection sur la base modale de contrôle: analyse spectrale

L'étape suivante consiste à projeter les 3 composantes de tension longitudinale sur la *base modale de contrôle*.

- Le RFQ parfait est modélisé par une ligne de transmission quadrifilaire couplée et chargée à ses extrémités; l'espace de contrôle est celui décrit par  $\{U_Q, U_S, U_T\}$ . Cet espace peut être muni d'un produit intérieur hermitien tel que l'opérateur différentiel décrivant cette ligne (équation des lignes) soit auto-adjoint sur un domaine de l'espace de contrôle. Ce domaine est déterminé par les conditions aux limites, représentant physiquement les charges de la ligne.
- Le spectre de l'opérateur est discret: les vecteurs propres sont les modes de résonance de la ligne chargée, et les valeurs propres sont les fréquences de résonance; les vecteurs propres forment une base bi-orthonormée pour le produit intérieur



associé à l'opérateur différentiel.

- L'analyse spectrale consiste à calculer les composantes de la tension mesurée sur la base spectrale: l'amplitude de chaque composante est égale au produit intérieur de la tension mesurée et du vecteur propre correspondant.
- Les modes peuvent être calculés pour une ligne non-homogène (dont les paramètres varient en fonction de l'abscisse, ce qui est le cas du RFQ du projet IPHI).
- La même approche théorique est effectuée pour un RFQ segmenté.

### **Filtrage**

L'opérateur choisit de considérer un nombre déterminé d'ordres modaux  $n_Q, n_S, n_T$ . Plus le nombre d'ordres modaux considérés est important, plus la courbe reconstruite à partir des distributions longitudinales des vecteurs propres s'approche de la courbe expérimentale.

### **Objectif**

L'objectif consiste à régler une loi de distribution longitudinale donnée, loi de référence  $U_Q(z)$ . On retranche cette loi à la composante quadripolaire de la tension reconstruite avec  $n_Q$  ordres quadripolaires.

Cette loi de référence peut être choisie différente de la distribution longitudinale du premier ordre modal quadripolaire de la base de contrôle.

### **Projection sur la base modale de commande**

- Les commandes du dispositif à asservir sont les inductances linéiques des sections de ligne correspondant aux pistons de réglage (dans le cas d'IPHI, ces sections ont une longueur de 50 mm); l'espace de commande est celui décrit par ces commandes  $\{tuc_{1,n}, tuc_{2,n}, tuc_{3,n}, tuc_{4,n}\}$ .
- Le traitement de l'opérateur différentiel ci-dessus par une méthode de perturbation permet de construire une application linéaire (perturbation au premier ordre) et bijective entre l'espace de commande et l'espace de contrôle; de plus, le théorème de Riesz permet de construire dans l'espace de commande la base bi-orthonormée associée à la base de l'espace de contrôle. Chaque vecteur de l'espace de commande consiste en une distribution particulière des inductances de chaque section de réglage, et correspond à un et un seul mode dans l'espace des tensions.
- Chaque amplitude spectrale dans l'espace de contrôle est ainsi associée à une amplitude spectrale dans l'espace de commande: ces nombres décrivent comment le RFQ parfait doit être perturbé pour correspondre au RFQ réel; on en déduit immédiatement les corrections nécessaires.
- Les commandes sont transformées en déplacements mécaniques en utilisant la pente de réglage déduite des calculs en 2-D (valeur moyenne pour la gamme de réglage: par exemple, 7.38 H/m/m pour le segment (a) de la maquette d'IPHI); la forme circulaire du piston est prise en compte par un coefficient correcteur (Slater).
- Un coefficient de gain peut être introduit dans la boucle d'asservissement; une valeur, inférieure à 1, est ajustée pour obtenir un fonctionnement convergent dans tous les cas: un certain nombre d'itérations est ainsi indispensable.

## **1.4 Originalité et puissance de notre formalisme de réglage**

L'originalité et la puissance de notre formalisme de réglage résident en ce qu'à travers un jeu de commandes de pistons, nous réglons simultanément :

- 1- la fréquence de résonance du mode accélérateur  $f_Q$
- 2- la distribution longitudinale de la tension accélératrice  $U_Q(z)$
- 3- la minimisation de la présence des composantes dipolaires  $U_S(z)$  et  $U_T(z)$  de la tension du mode quadripolaire accélérateur ;
- 4- l'écart  $\Delta f_d$  entre les fréquences des 2 modes dipolaires « fondamentaux » (1° ordre), qui est nul dans le cas d'un RFQ où les paires de quadrants opposés sont parfaitement équilibrées.

### 1.5 Paramètres à atteindre à l'issue du test de réglage

Pour les 2 tests réalisés, on a cherché à obtenir :

- 1- Une fréquence de résonance du mode accélérateur égale à  $f_0 = 352,2 \text{ MHz}$  . C'est la fréquence de fonctionnement des klystrons du projet IPHI.

$$f_0 = 352,2 \text{ MHz}$$

- 2- Une distribution longitudinale de la composante quadripolaire de la tension accélératrice constante  $U_Q(z) = cte$  . Aussi bien pour le RFQ du projet LEDA que celui du projet SNS, ce paramètre est réglé avec une erreur inférieure à 1% du design nominal. Est-ce  $\pm 1\%$  ou  $\pm 0,5\%$  ? Pour ce test, nous retiendrons  $\pm 0,5\%$ , et donc un rapport entre la valeur maximale sur la valeur minimale de la tension inférieure au pour cent.

$$U_Q(z) = cte, \quad \frac{\max[U_Q(z)]}{\min[U_Q(z)]} < 10^{-2}$$

- 3- des composantes dipolaires de la tension du mode quadripolaire accélérateur inférieures à  $10^{-2}$  de la composante quadripolaire.

$$U_S(z) < 10^{-2} \quad U_T(z) < 10^{-2}$$

- 4- un écart entre les fréquences des 2 modes dipolaires inférieur à 150 kHz. Ce dernier paramètre n'est pas, à notre connaissance, couramment retenu. Mais il nous semble pertinent et peut être ciblé vu le nombre de degrés de liberté que nous possédons.

$$\Delta f_d < 150 \text{ kHz}$$

### 1.6 Exemple de commandes de pistons

bead01\_02\_27\_14\_32\_hi\_ S/O T/O Q/352.19872 >> 352.2 MHz G/0.7

piston =>	1	2	3	4	5	6	7	8
quadrant 1 =>	0.28	0.12	0.03	- 0.03	0.01	0.00	- 0.04	- 0.13
quadrant 2 =>	0.17	- 0.06	- 0.13	- 0.10	- 0.09	- 0.19	- 0.19	- 0.10
quadrant 3 =>	- 0.18	- 0.10	- 0.05	0.01	- 0.02	- 0.02	0.02	0.12
quadrant 4 =>	- 0.06	0.08	0.11	0.07	0.08	0.17	0.17	0.08
QQ ( + + + + ) commands:								
nQ = 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
nQ = 2	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	- 0.01	- 0.01	- 0.02
nQ = 3	0.02	0.00	- 0.01	- 0.01	- 0.01	- 0.01	0.00	0.02
nQ = 4	0.01	0.00	- 0.01	- 0.01	0.01	0.01	0.00	- 0.01
nQ = 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SQ ( + 0 - 0 ) commands:								
nS = 1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
nS = 2	0.12	0.09	0.07	0.02	- 0.02	- 0.07	- 0.09	- 0.12
nS = 3	0.03	0.01	- 0.01	- 0.03	- 0.03	- 0.01	0.01	0.03
nS = 4	0.05	- 0.02	- 0.05	- 0.03	0.03	0.05	0.02	- 0.05
nS = 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TQ ( 0 - 0 + ) commands:								
nT = 1	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09
nT = 2	- 0.09	- 0.06	- 0.05	- 0.01	0.01	0.05	0.06	0.09
nT = 3	- 0.06	- 0.02	0.02	0.05	0.05	0.02	- 0.02	- 0.06
nT = 4	- 0.02	0.01	0.02	0.01	- 0.01	- 0.02	- 0.01	0.02
nT = 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSTT ( + - + - ) commands:								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

figure 6: commandes des piston générés par "rfqtunetool"

Le code "rfqtunetool" écrit sous Matlab génère un tableau de déplacements relatifs des pistons exprimés en millimètres. Sous les intitulés QQ(++++) , SQ(+0-0) et TQ (0-0+) de la figure 6, chaque i-ième ligne correspond à la commande de la i-ième composante modale, respectivement quadripolaire, dipolaire S, dipolaire T. Ainsi sur l'exemple proposé, l'opérateur a demandé le calcul des commandes en considérant les 5 premiers ordres modaux de chaque composante.

Sur la figure 6,

1. En rouge, la première ligne de commande sous QQ règle la fréquence de résonance du mode accélérateur  $f_Q$ .
2. En bleu, les lignes de commandes font converger la distribution longitudinale de la tension accélératrice vers la loi objectif  $U_Q(z)$ .
3. En vert, les déplacements minimisent la présence des composantes dipolaires  $U_S(z)$  et  $U_T(z)$  de la tension accélératrice.
4. En marron, la ligne sous l'intitulé "SSTT (+--+)" règle l'écart  $\Delta f_d$ .

Des combinaisons linéaires spécifiques permettent de calculer les commandes à appliquer à chaque piston de manière à assurer le réglage simultané des paramètres visés. Chaque ligne de valeurs écrites en noir et en gras sur la figure 6 correspond à un quadrant, chaque colonne à un numéro de piston.

### 1.7 Discrétisation des points de mesure à considérer pour le réglage des pistons

#### 1.7.1 Plage de données exploitables pour une mesure Electrique / Magnétique

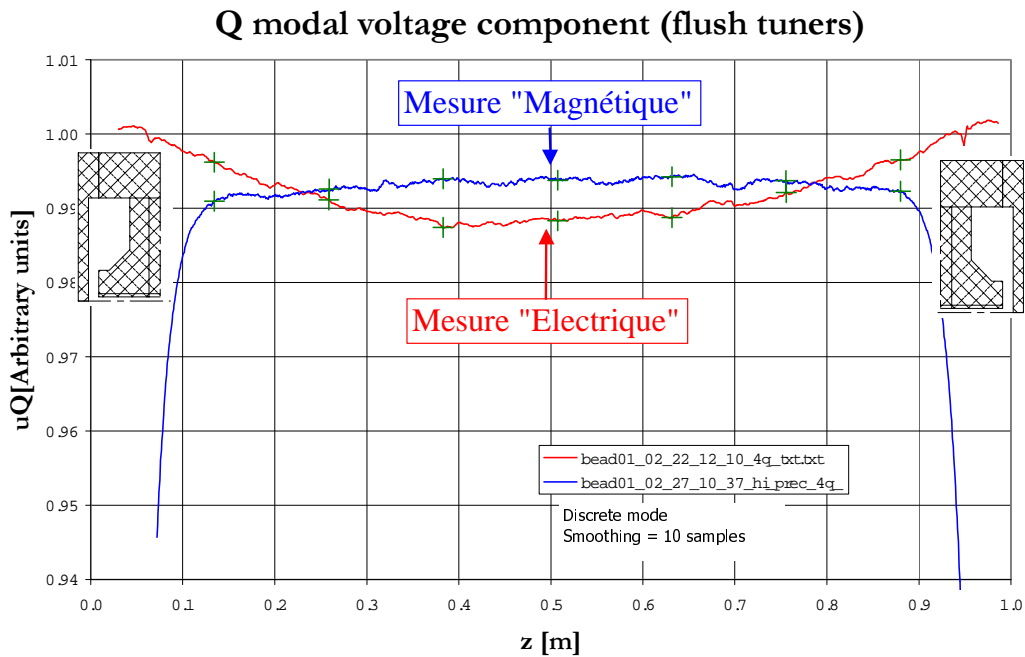


figure 7: plage de données exploitables

En premier lieu, remarquons que les mesures par perturbation du champ magnétique génèrent des données exploitables sur une plage plus restreinte que celles par perturbation du champ électrique. Dans les régions d'extrémité, à l'approche de la région où le champ magnétique commence à tourner d'un quadrant au voisin, le champ mesuré s'écroule brutalement. Le champ électrique, lui, continue à suivre les électrodes, et on peut le mesurer jusqu'à la fin de l'électrode<sup>2</sup>. C'est ce qu'illustrent les 2 courbes de mesure de la figure 7.

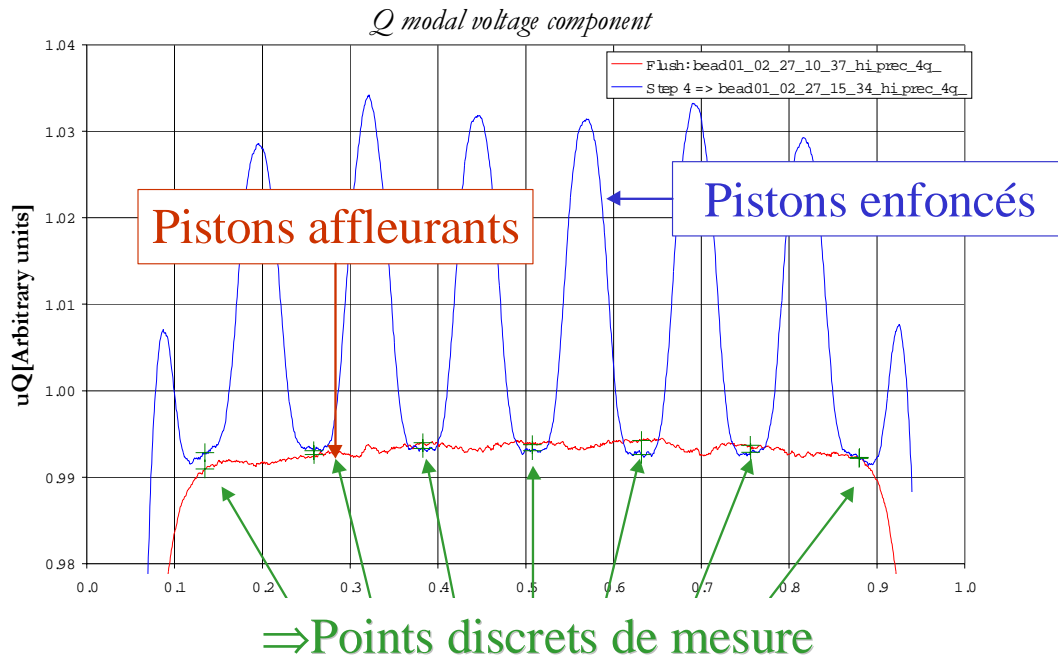
On doit donc déduire les données des régions d'extrémité obtenues par perturbation du champ magnétique.

<sup>2</sup> En réalité certaines "aberrations" existent sur le champ électrique mesuré par perturbation par rapport à celui qui règne sans perturbation: cet aspect sera développé dans un document qui compare les mesures électriques et magnétiques.

### 1.7.2 Définition de points de données discrètes

On voudrait pouvoir considérer l'intégralité des données centrales. Quand les pistons sont affleurants (exemple de la courbe rouge de la figure 8), nous pouvons estimer les défauts capacitifs à partir de l'intégralité de ces points. Ces défauts électriques équivalents traduisent les déséquilibres entre quadrants et entrent dans le cadre de l'analyse continue des données. Ce sont les tests qui seront appliqués sur les tronçons du RFQ avant et après brasage.

L'objet de ce document est le réglage des pistons qui est déduit d'une analyse discrète des données.



**figure 8: positions des points discrets de mesure**

Dès que les pistons sont déplacés,

1. les lignes de champ magnétiques sont modifiées
2. apparaît un effet image entre l'objet perturbateur métallique et la surface des pistons.

Comme l'illustre la courbe bleue de la figure 8, des pics apparaissent au voisinage des pistons: on peut repérer les 8 pistons du tronçon étudié. Nous ne devons considérer qu'un nombre discret de points choisis répartis longitudinalement entre les irrégularités mécaniques. Ces points sont repérés par des croix vertes sur la figure 8.

Un réglage des pistons consiste en un asservissement de la courbe décrite par les points discrets choisis par l'opérateur.

## 2 Essais et résultats

### 2.1 Réglage déduit de la perturbation du champ magnétique

Comme nous allons le voir, au cours des 2 tests (perturbation de H et celle de E), 3 itérations ont suffi pour satisfaire le cahier des charges:

- 1- pour la première itération, seuls les premiers ordres modaux ont été considérés dans la boucle d'asservissement. Cela doit se traduire par le réglage de  $f_Q$  et le centrage du niveau moyen des composantes dipolaires autour de 0 **sans modifier** l'allure des distributions longitudinales des différentes composantes.
- 2- en seconde itération les commandes de pistons appliquées ont été déduites des 3 premiers ordres modaux des composantes Q, S et T. Tous les paramètres ont dû converger, en particulier, les distributions longitudinales ont dû se redresser.
- 3- enfin, pour la troisième itération, 5 ordres modaux ont été pris en compte.

Le choix d'augmenter à chaque itération le nombre d'ordre modaux a découlé de la volonté de vérifier le comportement du système d'asservissement en accord avec notre formalisme.

#### 2.1.1 Situation initiale: mesure de H avec les pistons affleurants

##### 2.1.1.1 Composante quadripolaire (pistons affleurants)

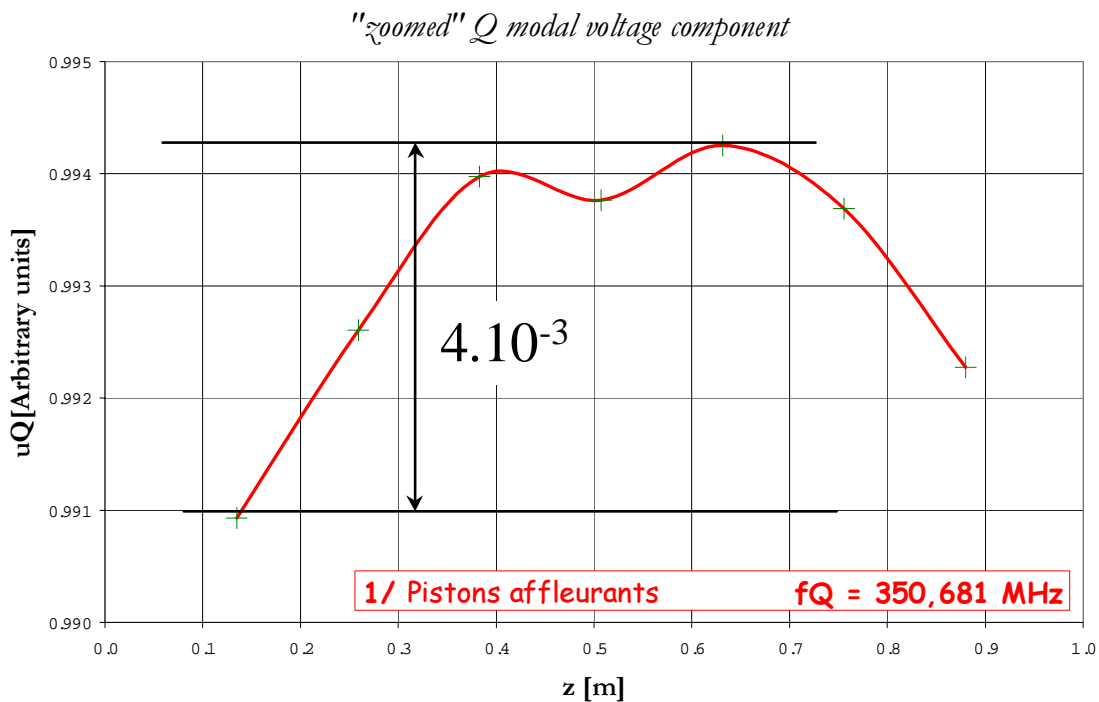
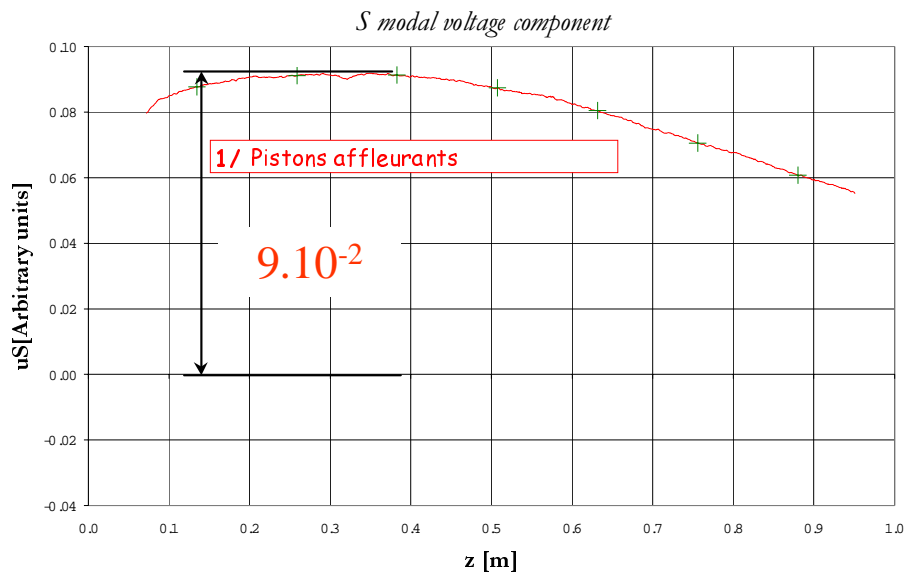


figure 9: courbe de la composante quadripolaire décrite par les points discrets de la mesure par perturbation de H

La fréquence de résonance du mode quadripolaire  $f_Q = 350,681 \text{ MHz}$ . Cette valeur est à comparer aux 350,7 MHz simulés sous Superfish (valeur évidemment obtenue dans la configuration des pistons affleurants). Le tronçon est donc très proche de la valeur de conception pour ce qui concerne la composante quadripolaire comme le confirme l'écart min - max de  $4 \cdot 10^{-3}$  sur la distribution de champ (figure 9). Cela valide les simulations 2d sous Superfish, 3d sous Mafia et la bonne qualité de l'objet mécanique de précision que constitue cette maquette de RFQ.

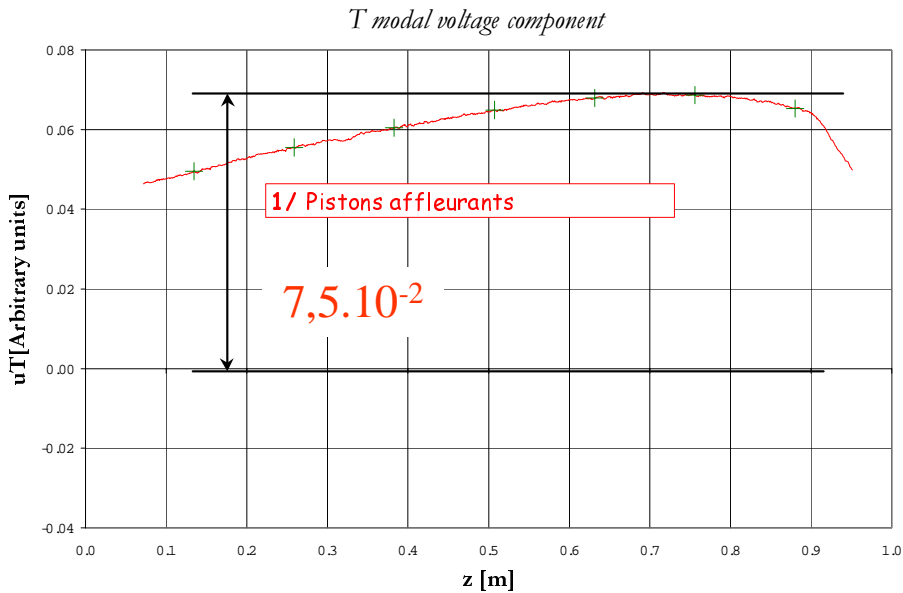
L'écart min - max de  $4 \cdot 10^{-3}$  sur la distribution de champ valeur est déjà inférieur à la valeur objectif fixée. Cependant ce test va montrer que notre système permet de réduire encore les variations du champ.

### 2.1.1.2 Composantes dipolaires (pistons affleurants)



**figure 10: composante dipolaire S mesurée par perturbation de H**

Les composantes dipolaires sont supérieures aux valeurs à obtenir:  $\max[U_S(z)] = 9.10^{-2}$  et  $\max[U_T(z)] = 7,5.10^{-2}$ . L'équilibre entre paires de quadrants opposés est donc nettement améliorable.



**figure 11: composante dipolaire T mesurée par perturbation de H**

Pour ce qui concerne le quatrième paramètre (voir le chapitre 1.5), l'écart entre les fréquences des 2 modes dipolaires est déjà inférieur à 150 kHz:  $\Delta f_d = 132 \text{ kHz}$ . Nous ne détaillerons pas l'évolution de  $\Delta f_d$ , mais nous contenterons de vérifier qu'il ne se dégrade pas au cours des itérations successives.

## 2.1.2 Commandes de pistons calculées après la mesure pistons affleurants

### 2.1.2.1 Valeurs de commande de pistons

bead01\_02\_27\_10\_37\_4q S/346.54975 T/346.7069 Q/350.6807 >> 352.2 MHz G/0.9

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	1.88	1.59	1.73	1.67	1.67	1.73	1.59	1.88
Q 2	3.08	2.61	2.83	2.74	2.74	2.84	2.61	3.09
Q 3	3.56	3.02	3.28	3.17	3.17	3.28	3.02	3.57
Q 4	1.80	1.53	1.65	1.60	1.60	1.66	1.52	1.80

QQ ( + + + + ) com m ands:

2.58	2.19	2.37	2.29	2.29	2.38	2.19	2.58
------	------	------	------	------	------	------	------

SQ ( + 0 - 0 ) com m ands:

-0.84	-0.72	-0.78	-0.75	-0.75	-0.78	-0.72	-0.84
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

TQ ( 0 - 0 + ) com m ands:

-0.64	-0.54	-0.59	-0.57	-0.57	-0.59	-0.54	-0.64
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

SSTT ( + - + - ) com m ands:

0.14	0.12	0.13	0.12	0.12	0.13	0.12	0.14
------	------	------	------	------	------	------	------

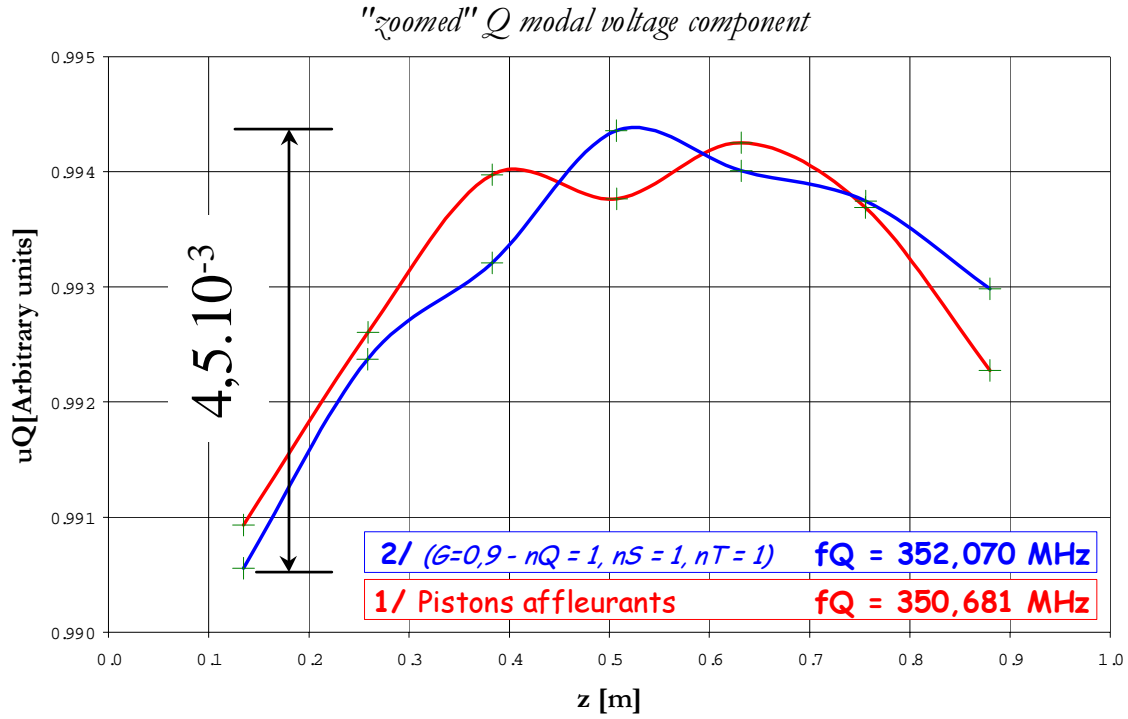
Pour la première itération, seuls les premiers ordres modaux sont considérés dans la boucle d'asservissement.

### 2.1.2.2 Remarques concernant les commandes de pistons

- Les déplacements corrigeant la fréquence du mode quadripolaire sont de l'ordre de 2,5 mm vers l'intérieur (ligne de commande QQ).
- La minimisation des composantes dipolaires nécessite des mouvements de pistons de l'ordre de 0.6 à 0.8 mm (vers l'intérieur de la cavité dans un quadrant, vers l'extérieur dans le quadrant opposé); les signes des lignes SQ et TQ sont liés au signe 'moyen' des composantes US et UT (et aussi aux conventions utilisées dans les calculs).
- L'écart  $\Delta f_d$  implique des corrections 5 fois moins importantes que le réglage des présences de composantes dipolaires (ligne de commande SSTT).
- Les déplacements résultant de la correction de l'ensemble des paramètres varient entre 1,52 et 3,57 mm.

### 2.1.3 Après la première itération

#### 2.1.3.1 Composante quadripolaire (1<sup>o</sup> itération)



**figure 12: courbe de la composante quadripolaire décrite par les points discrets de la mesure par perturbation de H après la 1<sup>ère</sup> itération**

Conformément à notre formalisme,

- la fréquence  $f_Q$  s'est approchée des 352,2 MHz visés;
- **sans modifier** l'allure de la distribution longitudinale.

Notons que  $\Delta f_d = -145$  kHz



2.1.3.2 Composantes dipolaires (1<sup>ère</sup> itération)

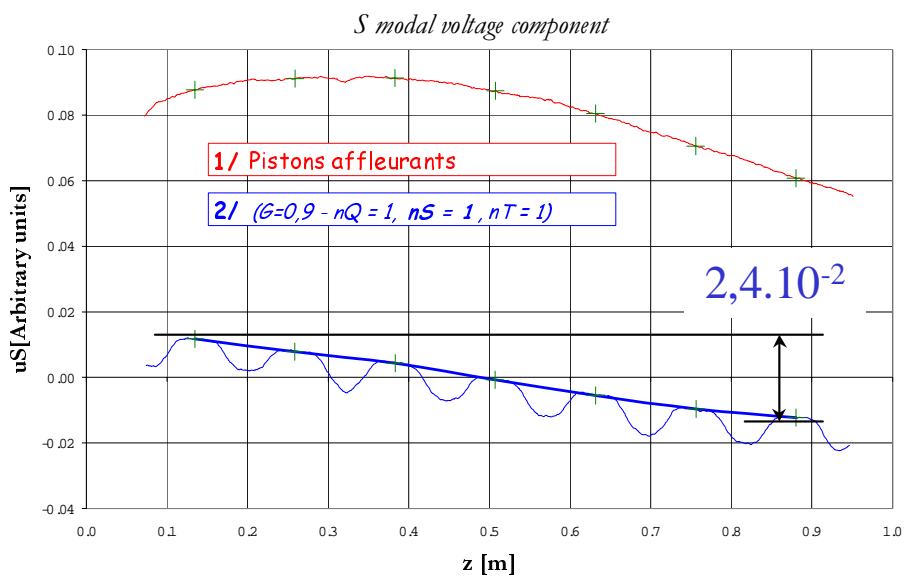


figure 13: composante dipolaire S mesurée par perturbation de H après la 1<sup>ère</sup> itération

Comme le montrent la figure 13 et la figure 14, le niveau moyen des composantes dipolaires s'est centré autour de 0 sans modifier notablement la pente de la distribution longitudinale.

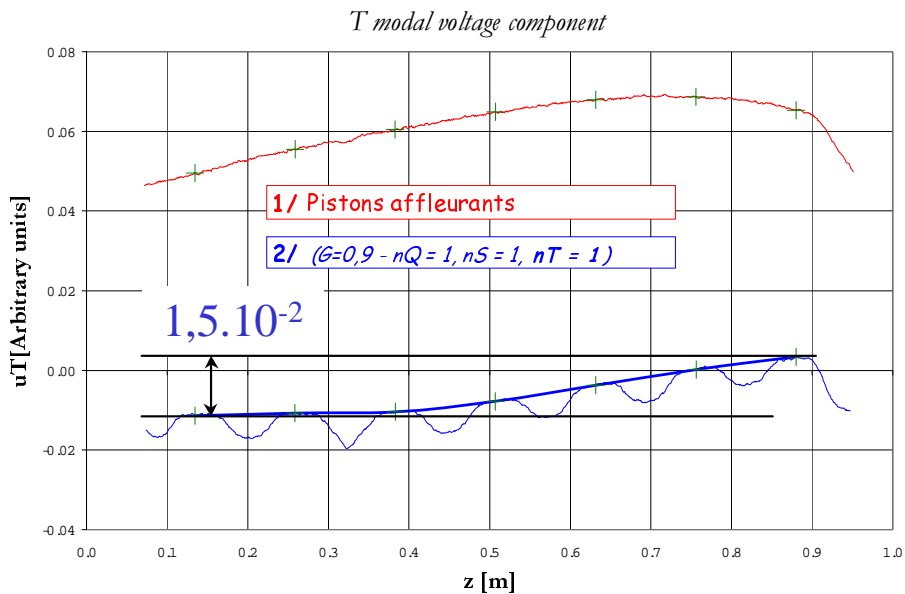


figure 14: composante dipolaire T mesurée par perturbation de H après la 1<sup>ère</sup> itération

## 2.1.4 Commandes de pistons calculées après la 1<sup>ère</sup> itération

### 2.1.4.1 Valeurs de commande de pistons

En seconde itération, les commandes de pistons appliquées ont été déduites des 3 premiers ordres modaux des composantes Q, S et T. Tous les paramètres doivent converger, y compris les distributions longitudinales qui ont du se redresser.

bead01\_02\_27\_11\_24\_4q S/347.9862 T/347.8654 Q/352.07024 >> 352.2 MHz G/0.7

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	0.39	0.35	0.40	0.30	0.17	-0.11	-0.30	-0.55
Q 2	-0.17	0.19	0.60	0.85	0.78	0.31	-0.19	-0.72
Q 3	-0.72	-0.39	-0.15	0.21	0.37	0.48	0.40	0.43
Q 4	0.18	0.06	-0.04	-0.04	0.06	0.37	0.58	0.93

QQ ( + + + + ) com m ands:

0.17	0.15	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.17
-0.05	-0.04	-0.03	-0.01	0.01	0.03	0.04	0.05
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SQ ( + 0 - 0 ) com m ands:

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.52	0.36	0.29	0.07	-0.07	-0.29	-0.36	-0.52
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TQ ( 0 - 0 + ) com m ands:

0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
-0.32	-0.22	-0.18	-0.04	0.04	0.18	0.22	0.32
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SSTT ( + - + - ) com m ands:

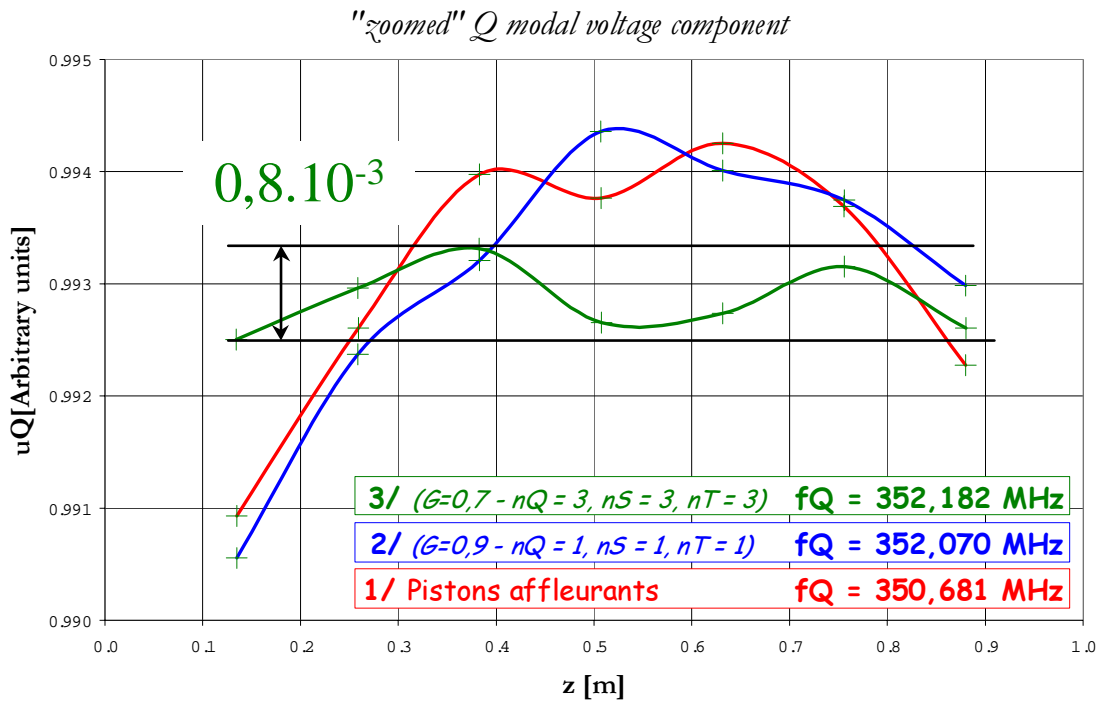
-0.08	-0.07	-0.08	-0.07	-0.07	-0.08	-0.07	-0.08
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

### 2.1.4.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la deuxième itération

- Les commandes à appliquer pour la deuxième itération sont toutes inférieures à celles de la première itération.
- L'écart résiduel de 130 kHz entre la fréquence du mode quadripolaire mesurée et les 352,2 MHz visés se traduit par des déplacements de l'ordre de 0, 15 mm vers l'intérieur (première ligne de commande QQ).
- Les lignes commandes réglant une distribution constante de tension accélératrice sont faibles.
- La minimisation de présence des composantes dipolaires implique principalement un redressement des pentes des distributions longitudinales (2<sup>o</sup> ordre des lignes de commandes SQ et ST).
- De l'écart  $\Delta f_d$  découle des commandes de pistons toujours vers l'extérieur de la cavité et plus faibles que pour la première itération (ligne de commande SSTT).
- Les déplacements relatifs résultant de la correction de l'ensemble des paramètres varient entre -0,72 et 0,93 mm.

## 2.1.5 Après la deuxième itération

### 2.1.5.1 Composante quadripolaire (2<sup>ème</sup> itération)

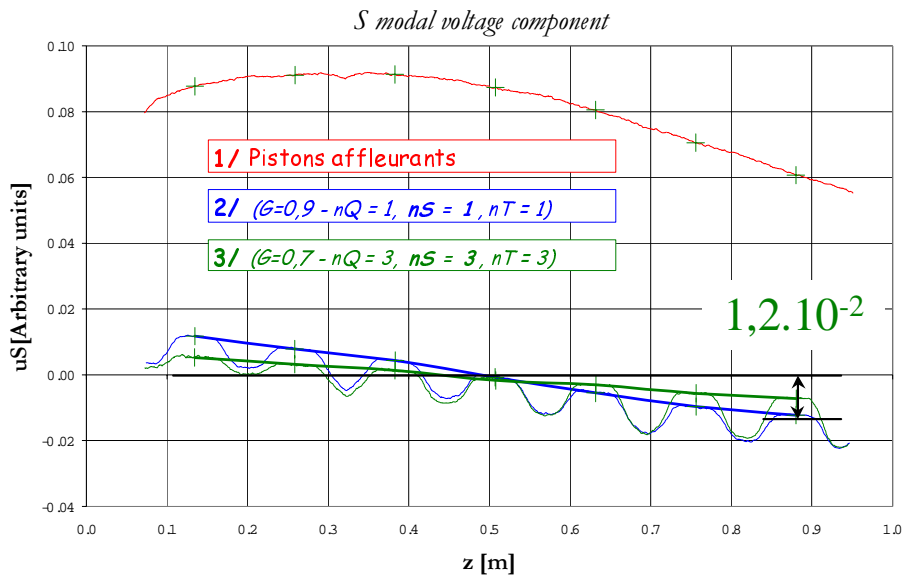


**figure 15: courbe de la composante quadripolaire décrite par les points discrets de la mesure par perturbation de H après la 2<sup>ème</sup> itération**

Conformément à ce qu'assure notre formalisme,

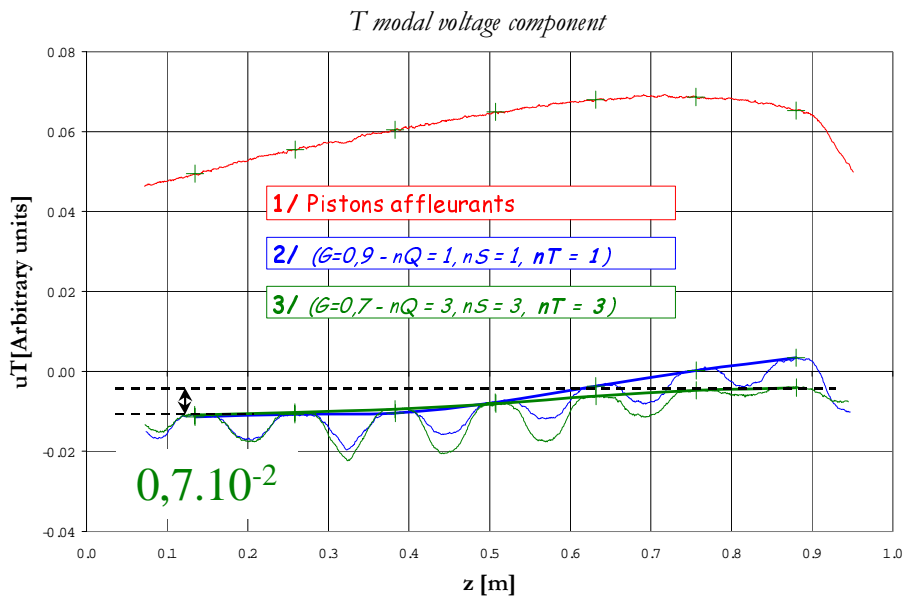
- $f_Q$  a continué de s'approcher des 352,2 MHz visés;
- la distribution longitudinale s'est nettement redressée: de  $4 \cdot 10^{-3}$ , l'écart est passé à  $0,8 \cdot 10^{-3}$ , c'est-à-dire moins qu'un mille. L'objectif concernant ce paramètre est atteint.
- ♦  $\Delta f_d = 127$  kHz

2.1.5.2 Composantes dipolaires (2<sup>ème</sup> itération)



**figure 16: composante dipolaire S mesurée par perturbation de H après la 2<sup>ème</sup> itération**

Le fait de redresser les distributions longitudinales des composantes dipolaires a divisé par deux les écarts minimum - maximum: on obtient  $1,2 \cdot 10^{-2}$  à comparer à  $2,4 \cdot 10^{-2}$  pour  $U_S(z)$ ,  $0,7 \cdot 10^{-2}$  au lieu de  $1,5 \cdot 10^{-2}$  pour  $U_T(z)$ . On peut également considérer que l'objectif est atteint.



**figure 17: composante dipolaire T mesurée par perturbation de H après la 2<sup>ème</sup> itération**

## 2.1.6 Commandes de pistons calculées après la 2<sup>ème</sup> itération

### 2.1.6.1 Valeurs de commande de pistons

Pour la troisième (et dernière) itération, les 5 premiers ordres modaux des composantes Q, S et T ont été considérés.

bead01\_02\_27\_13\_19\_4q S/348.0835 T/348.2108 Q/352.18218 >> 352.2 MHz G/0.7

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	0.63	0.22	0.05	0.00	0.15	0.09	-0.03	-0.23
Q 2	-0.02	-0.02	0.03	0.05	-0.05	-0.24	-0.27	-0.23
Q 3	-0.54	0.12	0.27	0.07	-0.08	0.22	0.38	0.35
Q 4	-0.25	0.06	-0.03	-0.29	-0.20	0.22	0.31	-0.01

QQ ( + + + + ) com m ands:

0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SQ ( + 0 - 0 ) com m ands:

0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0.27	0.19	0.15	0.04	-0.04	-0.15	-0.19	-0.27	
0.05	0.01	-0.02	-0.05	-0.05	-0.02	0.01	0.05	
0.17	-0.06	-0.17	-0.11	0.11	0.17	0.06	-0.17	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TQ ( 0 - 0 + ) com m ands:

0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	
-0.16	-0.11	-0.09	-0.02	0.02	0.09	0.11	0.16	
0.06	0.02	-0.02	-0.06	-0.06	-0.02	0.02	0.06	
0.04	-0.02	-0.05	-0.03	0.03	0.04	0.02	-0.04	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SSTT ( + - + - ) com m ands:

0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	
------	------	------	------	------	------	------	------	--

### 2.1.6.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la troisième itération

- Le petit écart résiduel de 18 kHz entre la fréquence du mode quadripolaire mesurée et les 352,2 MHz visés se traduit par des déplacements identiques pour tous les pistons de 0,02 mm vers l'intérieur (première ligne de commande QQ).
- Les lignes commandes réglant la distribution de champ accélérateur constante sont nulles: en réalité elles ne sont pas strictement nulles mais l'écart entre le minimum et le maximum de tension inférieur à  $10^{-3}$  implique des corrections inférieures au centième de millimètre. Cette précision est supérieure à celle de notre système mécanique.
- Ce sont les 2° et 4° ordres modaux de la composante dipolaire S qui nécessitent encore des corrections.
- C'est pratiquement uniquement le 2° ordre modal de la composante dipolaire T qui doit être corrigé.
- Les déplacements relatifs résultant de la correction de l'ensemble des paramètres varient entre -0,54 et 0,63 mm.

## 2.1.7 Après la troisième itération

### 2.1.7.1 Composante quadripolaire (3<sup>ème</sup> itération)

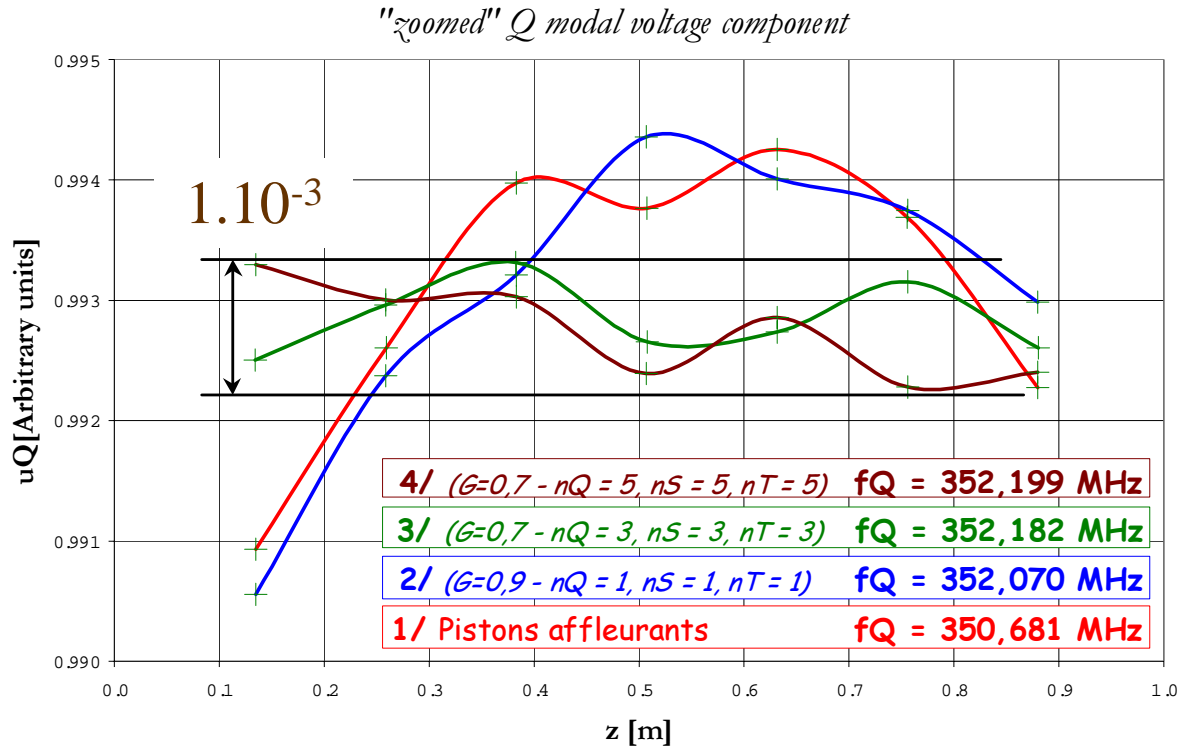


figure 18: courbe de la composante quadripolaire décrite par les points discrets de la mesure par perturbation de H après la 3<sup>ème</sup> itération

- $f_Q$  est égale aux 352,2 MHz visés;
  - la distribution longitudinale ne s'est pas améliorée, restant dans une fourchette de l'ordre de  $10^{-3}$ . Le niveau de bruit de mesure empêche l'amélioration de ce paramètre.
- ◆ On a mesuré  $\Delta f_d = -127 \text{ kHz}$

2.1.7.2 Composantes dipolaires (3<sup>ème</sup> itération)

Les distributions longitudinales des composantes dipolaires se sont encore redressées: les écarts minimum – maximum ont à nouveau été divisés par deux on obtient  $6,1 \cdot 10^{-3}$  à comparer à  $1,2 \cdot 10^{-2}$  pour  $U_S(z)$ ,  $6,6 \cdot 10^{-3}$  au lieu de  $0,7 \cdot 10^{-2}$  pour  $U_T(z)$ .

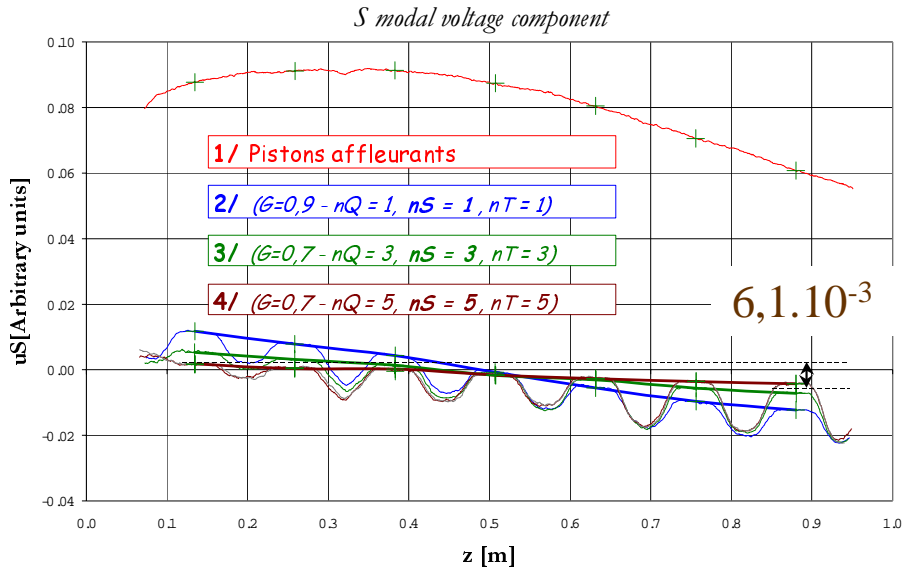


figure 19: composante dipolaire S mesurée par perturbation de H après la 3<sup>ème</sup> itération

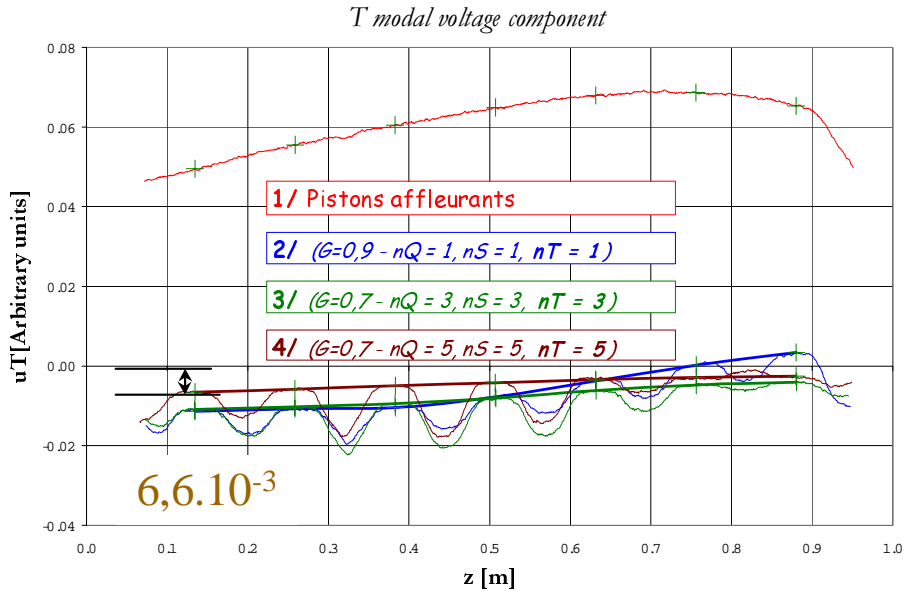


figure 20: composante dipolaire T mesurée par perturbation de H après la 3<sup>ème</sup> itération

## 2.2 Test du réglage déduit de la perturbation du champ électrique

Ce test est justifié car nous avons voulu vérifier que le formalisme permettait au réglage de converger quelle que soit la nature du champ mesuré. Ceci dit, si on considère ce système comme un asservissement, il était très improbable que le réglage ne converge pas.

De plus, ce test a permis de mettre en œuvre un des atouts majeurs de la maquette: elle autorise des mesures par perturbation à différentes positions de la section transverse.

### 2.2.1 Situation initiale: mesure de E avec les pistons affleurants

#### 2.2.1.1 Composante quadripolaire (pistons affleurants)

La fréquence de résonance du mode quadripolaire  $f_Q = 350,618 \text{ MHz}$ . La différence par rapport au  $f_0 = 350,681 \text{ MHz}$  mesurés lors du test du réglage à partir de la perturbation de H s'explique par le fait que le fil diélectrique perturbe le champ électrique. Rappelons l'expression que donne Slater entre la fréquence non perturbée  $f_0$  et celle perturbée  $f_p$ :

$$\frac{f_p^2 - f_0^2}{f_0^2} \approx (K_E \|E\|^2 - K_H \|H\|^2) \approx 2 \frac{(f_p - f_0)}{f_0}$$

où  $K_E$  et  $K_H$  sont les coefficients de polarisabilité de l'objet perturbateur respectivement par rapport au champ électrique  $E$  et au champ magnétique  $H$

En accord avec Slater, quand on enfonce un piston, la fréquence du mode quadripolaire augmente. Inversement quand on place un fil diélectrique dans la zone électrique, la fréquence du mode quadripolaire diminue.

Si on considère l'ensemble des points mesurés (et non uniquement la courbe décrite par les points discrets), l'écart min - max de  $1,4 \cdot 10^{-2}$  sur la distribution de champ est légèrement supérieur à la valeur objectif fixée (figure 21).

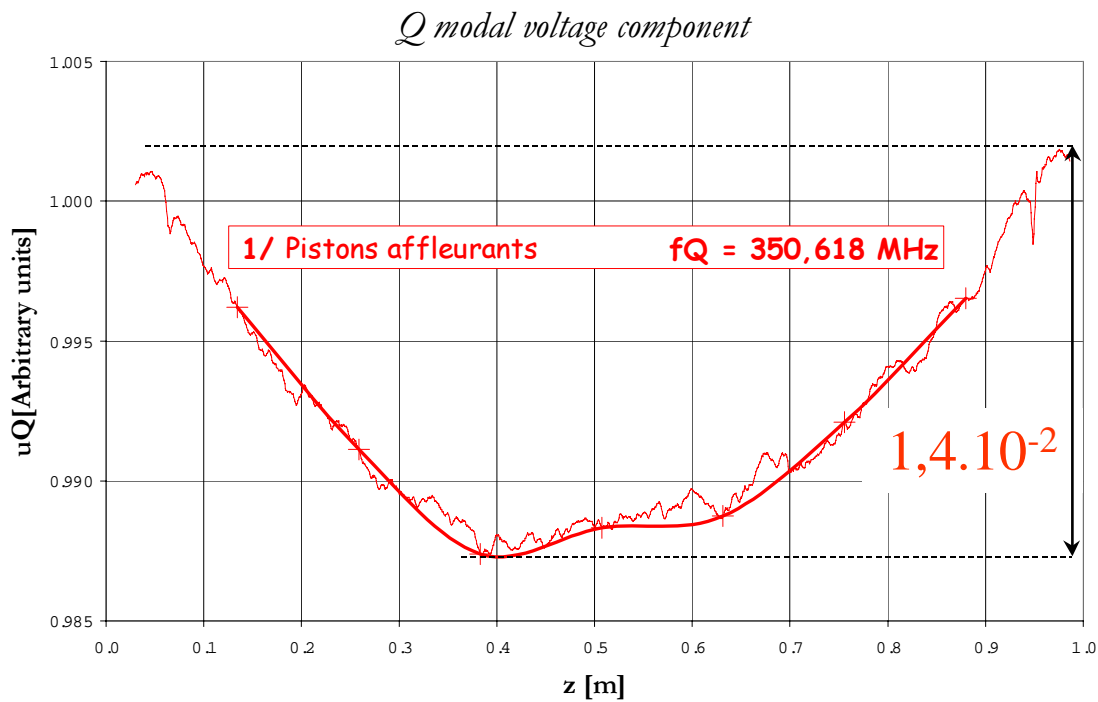


figure 21: composante quadripolaire mesurée en perturbant le champ électrique

On a mesuré  $\Delta f_d = -164 \text{ kHz} > 150 \text{ kHz}$ . On vérifiera comment ce paramètre a évolué après la 1<sup>ère</sup> itération.



2.2.1.2 Composantes dipolaires (pistons affleurants)

Nous ne présenterons pas les courbes des composantes dipolaires à chaque itération. Les composantes dipolaires initiales sont:

$$\max[U_S(z)] = 8.10^{-2} \qquad \max[U_T(z)] = 4,5.10^{-2} .$$

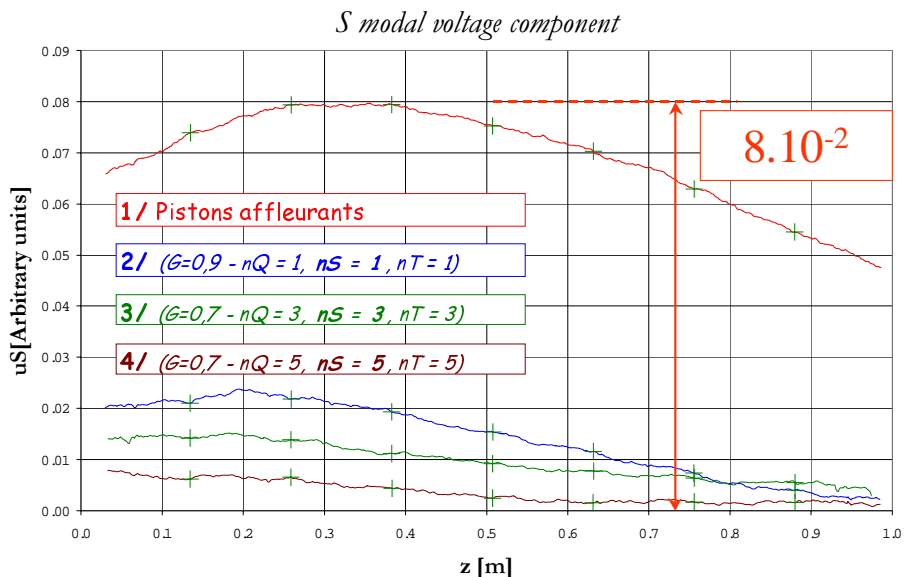


figure 22: composante dipolaire S mesurée par perturbation de E

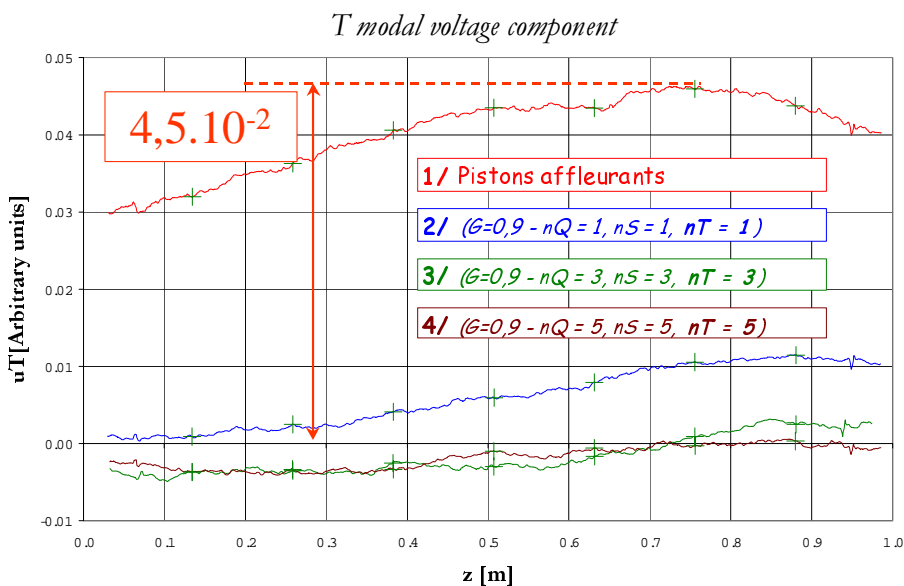


figure 23: composante dipolaire T mesurée par perturbation de E

## 2.2.2 Commandes de pistons calculées après la mesure avec les pistons affleurants

### 2.2.2.1 Valeurs de commande de pistons

bead01\_02\_22\_12\_10\_4q S/346.4838 T/346.6485 Q/350.61778 >> 352.2 MHz

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	2.13	1.76	1.90	1.84	1.86	1.98	1.85	2.30
Q 2	2.86	2.47	2.70	2.64	2.64	2.75	2.52	2.97
Q 3	3.54	3.05	3.31	3.19	3.18	3.24	2.95	3.37
Q 4	2.23	1.84	1.98	1.88	1.87	1.93	1.78	2.13

QQ ( + + + + ) com m ands:

2.69	2.28	2.47	2.39	2.39	2.47	2.28	2.69
------	------	------	------	------	------	------	------

SQ ( + 0 - 0 ) com m ands:

-0.70	-0.64	-0.70	-0.68	-0.66	-0.63	-0.55	-0.54
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

TQ ( 0 - 0 + ) com m ands:

-0.31	-0.32	-0.36	-0.38	-0.39	-0.41	-0.37	-0.42
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

SSTT ( + - + - ) com m ands:

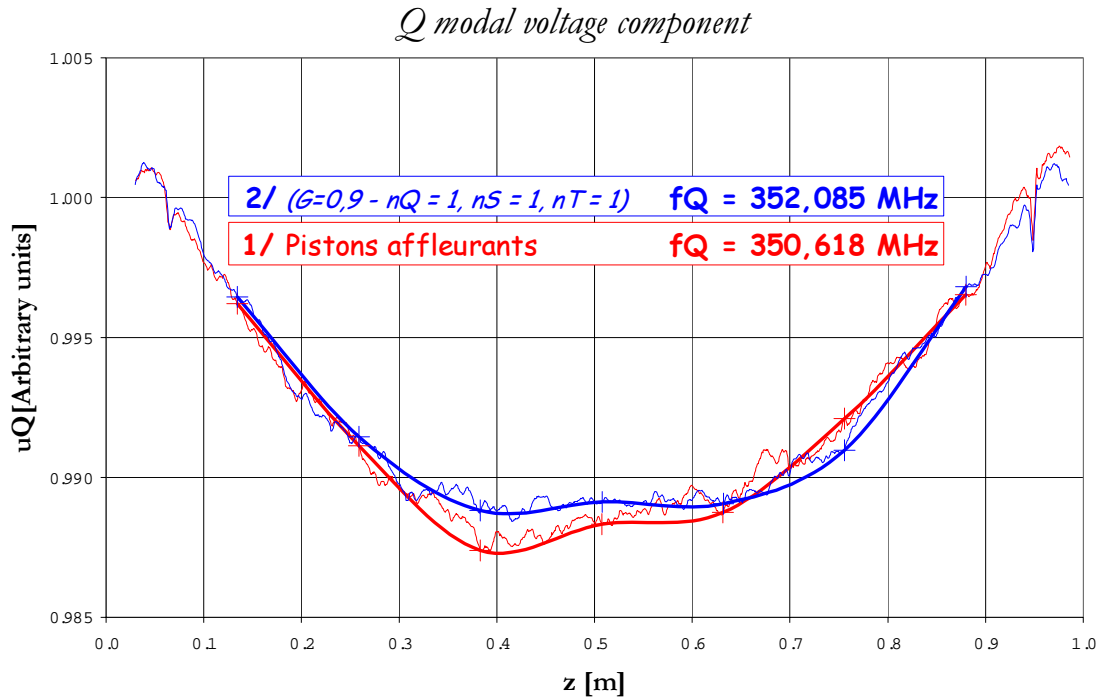
0.15	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14
------	------	------	------	------	------	------	------

### 2.2.2.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la première itération

- Les déplacements corrigeant la fréquence du mode quadripolaire sont de l'ordre de 2,5 mm vers l'intérieur (ligne de commande QQ): ils sont du même ordre de grandeur que pour le réglage déduit de la perturbation de H.
- La minimisation des composantes dipolaires nécessite des mouvements de pistons de l'ordre de 0,31 à 0,70 mm (vers l'intérieur de la cavité dans un quadrant, vers l'extérieur dans le quadrant opposé).
- L'écart  $\Delta f_d$  implique des corrections 3 fois moins importantes que le réglage des présences de composantes dipolaires (ligne de commande SSTT).
- Les déplacements résultant de la correction de l'ensemble des paramètres varient entre 1,76 et 3,54 mm (à comparer avec 1,52 et 3,57 mm pour la mesure magnétique).

## 2.2.3 Après la première itération

### 2.2.3.1 Composante quadripolaire (1<sup>ère</sup> itération)



**figure 24: : composante quadripolaire mesurée en perturbant le champ électrique (après la 1<sup>ère</sup> itération)**

De même que lors du réglage déduit des mesures par perturbation du champ magnétique, conformément à notre formalisme,

- $f_Q$  s'est approchée des 352,2 MHz visés;
- **sans modifier** l'allure de la distribution longitudinale.

Après la 1<sup>o</sup> itération,  $\Delta f_d = -119$  kHz < 150 kHz . Ce paramètre a correctement évolué.

### 2.2.3.2 Composantes dipolaires (1<sup>ère</sup> itération)

Le niveau moyen des composantes dipolaires s'est rapproché du niveau 0 sans nettement rectifier la pente de la distribution longitudinale (voir les courbes bleues de la figure 22 et de la figure 23).

## 2.2.4 Commandes de pistons calculées pour la 2<sup>ème</sup> itération

### 2.2.4.1 Valeurs de commande de pistons

bead01\_02\_23\_11\_53\_4q S/348.04205 T/347.92285 Q/352.08466 >> 352.2 MHz G/0.9

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	0.95	0.46	0.08	-0.37	-0.50	-0.45	-0.21	-0.03
Q 2	1.63	0.78	0.11	-0.56	-0.64	-0.21	0.37	1.05
Q 3	1.25	0.27	-0.67	-1.32	-1.19	-0.13	0.94	2.24
Q 4	0.99	0.31	-0.30	-0.76	-0.68	0.02	0.72	1.59

QQ ( + + + + ) com m ands:

0.20	0.17	0.18	0.17	0.17	0.18	0.17	0.20
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SQ ( + 0 - 0 ) com m ands:

-0.10	-0.08	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.08	-0.10
0.49	0.34	0.27	0.07	-0.07	-0.27	-0.34	-0.49
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TQ ( 0 - 0 + ) com m ands:

-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
-0.30	-0.20	-0.16	-0.04	0.04	0.16	0.20	0.30
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SSTT ( + - + - ) com m ands:

-0.11	-0.09	-0.10	-0.09	-0.09	-0.10	-0.09	-0.11
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

### 2.2.4.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la deuxième itération

- Toutes les lignes de commandes ont vu leurs valeurs diminuer par rapport à la première itération déduite d'une situation où les pistons étaient affleurants.
- L'écart résiduel de 115 kHz entre la fréquence du mode quadripolaire mesurée et les 352,2 MHz visés se traduit par des déplacements de l'ordre de 0,18 mm vers l'intérieur (première ligne de commande QQ).
- Les 2 lignes de commandes qui règlent la distribution constante sont nulles jusqu'au centième de millimètre.
- La minimisation de présence des composantes dipolaires fait principalement intervenir les 2<sup>o</sup> ordres modaux S et T.
- Les déplacements relatifs résultant de la correction de l'ensemble des paramètres varient entre -1,32 et 2,24 mm.

## 2.2.5 Après la deuxième itération

### 2.2.5.1 Composante quadripolaire (2<sup>ème</sup> itération)

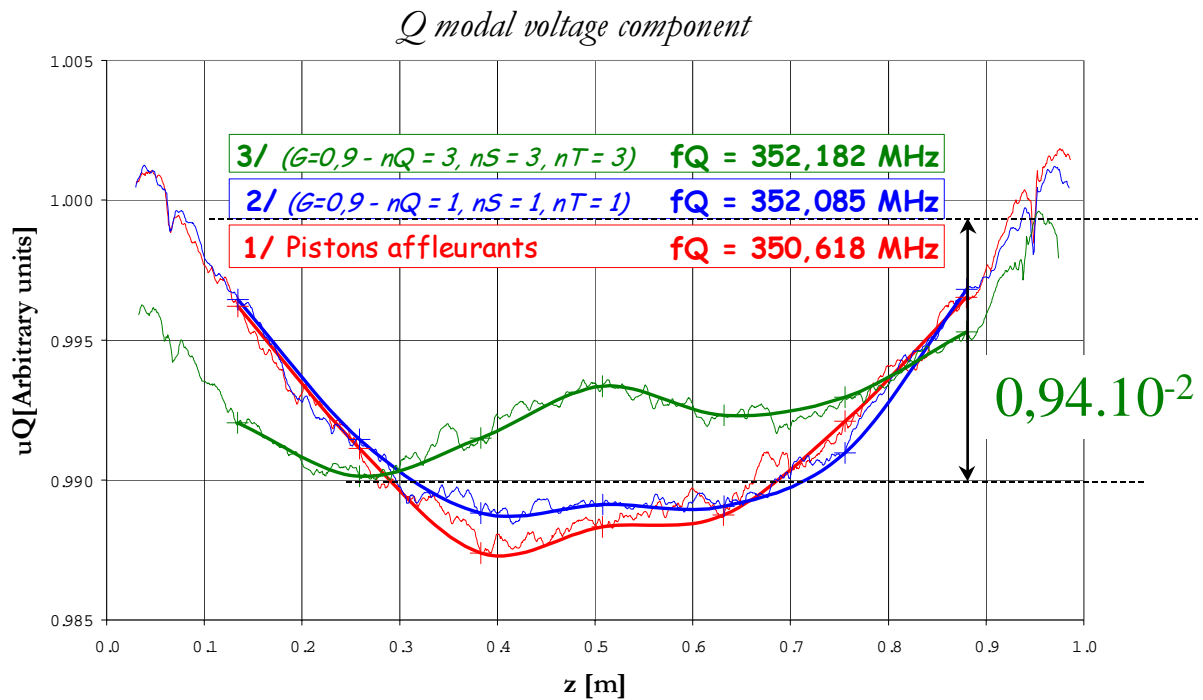


figure 25: : composante quadripolaire mesurée en perturbant le champ électrique (après la 2<sup>ème</sup> itération)

- $f_Q$  a continué de s'approcher des 352,2 MHz visés;
- la distribution longitudinale s'est nettement redressée: en considérant l'ensemble des points mesurés, de  $1,4 \cdot 10^{-2}$ , l'écart est passé à  $0,94 \cdot 10^{-2}$ , c'est-à-dire à moins d'un pour cent. L'objectif concernant ce paramètre est atteint.

Après la 2<sup>o</sup> itération,  $\Delta f_d = 131 \text{ kHz}$ . Ce paramètre reste inférieur aux 150 kHz maximum acceptés.

### 2.2.5.2 Composantes dipolaires (2<sup>ème</sup> itération)

Le fait de redresser les distributions longitudinales des composantes dipolaires a divisé par deux les écarts minimum - maximum:  $U_S(z) < 1,5 \cdot 10^{-2}$ ,  $U_T(z) < 1,5 \cdot 10^{-2}$ .

## 2.2.6 Commandes de pistons calculées pour la 3<sup>ème</sup> itération

### 2.2.6.1 Valeurs de commande de pistons

bead01\_02\_23\_14\_22\_4q S/348 T/348.1318 Q/352.18162 >> 352.2 MHz G/0.9

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	0.77	-0.14	-0.15	0.30	0.12	-0.54	-0.43	0.67
Q 2	0.90	-1.05	-0.94	0.65	0.96	-0.51	-0.97	0.26
Q 3	1.05	-1.10	-0.93	0.88	1.08	-0.38	-0.57	1.55
Q 4	0.45	-0.58	-0.58	0.10	-0.18	-0.84	-0.42	1.49

QQ ( + + + + ) commandes:

0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
-0.09	-0.06	-0.05	-0.01	0.01	0.05	0.06	0.09
0.19	0.05	-0.07	-0.17	-0.17	-0.07	0.05	0.19
-0.01	0.00	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SQ ( + 0 - 0 ) commandes:

-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.07
0.25	0.17	0.14	0.03	-0.03	-0.14	-0.17	-0.25
0.07	0.02	-0.02	-0.06	-0.06	-0.02	0.02	0.07
-0.10	0.03	0.10	0.06	-0.06	-0.10	-0.03	0.10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TQ ( 0 - 0 + ) commandes:

0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
-0.16	-0.11	-0.09	-0.02	0.02	0.09	0.11	0.16
0.32	0.09	-0.12	-0.30	-0.30	-0.12	0.09	0.32
-0.26	0.09	0.26	0.17	-0.17	-0.26	-0.09	0.26
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SSTT ( + - + - ) commandes:

0.12	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.10	0.12
------	------	------	------	------	------	------	------

### 2.2.6.2 Remarques concernant les commandes de pistons à appliquer pour la troisième itération

- Le petit écart résiduel de 18 kHz entre la fréquence du mode quadripolaire mesurée et les 352,2 MHz visés se traduit par des déplacements identiques pour tous les pistons de 0,03 mm vers l'intérieur (première ligne de commande QQ).
- Les lignes de commandes réglant la distribution constante sont non négligeables pour le 3<sup>o</sup> ordre modal.
- C'est principalement le 2<sup>o</sup> ordre modal de la composante dipolaire S qui nécessite encore des corrections.
- Ce sont surtout les 3<sup>o</sup> et 4<sup>o</sup> ordres modaux de la composante dipolaire T qui doivent être corrigés: la pente moyenne est pratiquement plate.
- Les déplacements relatifs résultant de la correction de l'ensemble des paramètres varient entre -1,10 et 1,55 mm.

2.2.7 Après la troisième itération

2.2.7.1 Composante quadripolaire (3<sup>ème</sup> itération)

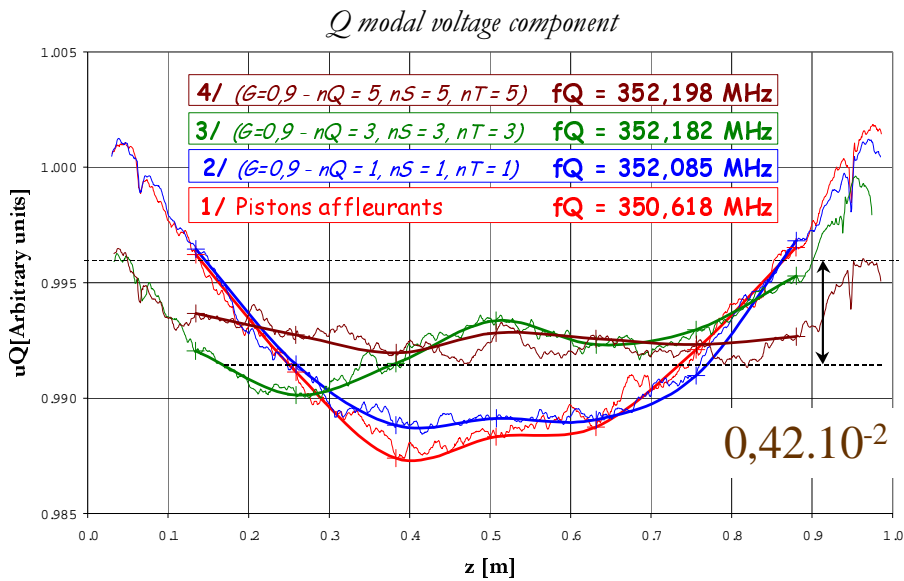


figure 26: : composante quadripolaire mesurée en perturbant le champ électrique (après la 3<sup>ème</sup> itération)

- $f_Q$  est égale aux 352,2 MHz visés;
- la distribution longitudinale s'est encore approchée d'une loi constante. En considérant l'ensemble des points de mesure, l'écart entre le minimum et le maximum est de l'ordre de  $4,2 \cdot 10^{-3}$  (figure 26).

Comme expliqué dans le chapitre 1.7, le réglage n'asservit que la courbe décrite par les points discrets. En ne considérant que ces points, la figure 27 montre que:

1. les variations de la distribution longitudinale répondaient déjà au cahier des charges avant la procédure de réglage;
2. les oscillations sont après les 3 itérations de réglage inférieures à  $2 \cdot 10^{-3}$ .

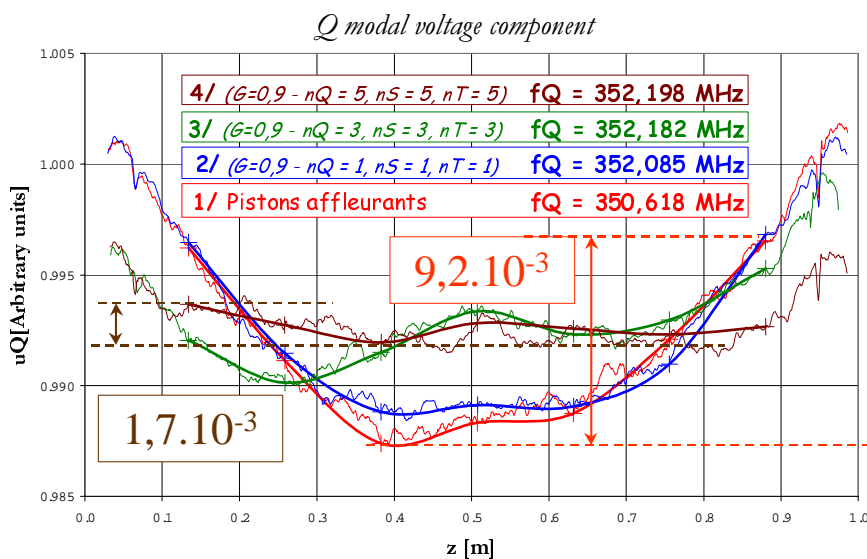


figure 27: : écarts minimum – maximum de la composante quadripolaire mesurée en perturbant le champ électrique en considérant les points discrets (après la 3<sup>ème</sup> itération)

Après cette dernière itération,  $\Delta f_d = -141 \text{ kHz}$ . Ce paramètre est resté inférieur aux 150 kHz maximum acceptés.

2.2.7.2 Composantes dipolaires (3<sup>ème</sup> itération)

Les distributions longitudinales des composantes dipolaires se sont encore redressées: les écarts minimum – maximum ont à nouveau été réduits. On obtient  $6,5 \cdot 10^{-3}$  pour  $U_S(z)$ ,  $3,7 \cdot 10^{-3}$  pour  $U_T(z)$ .

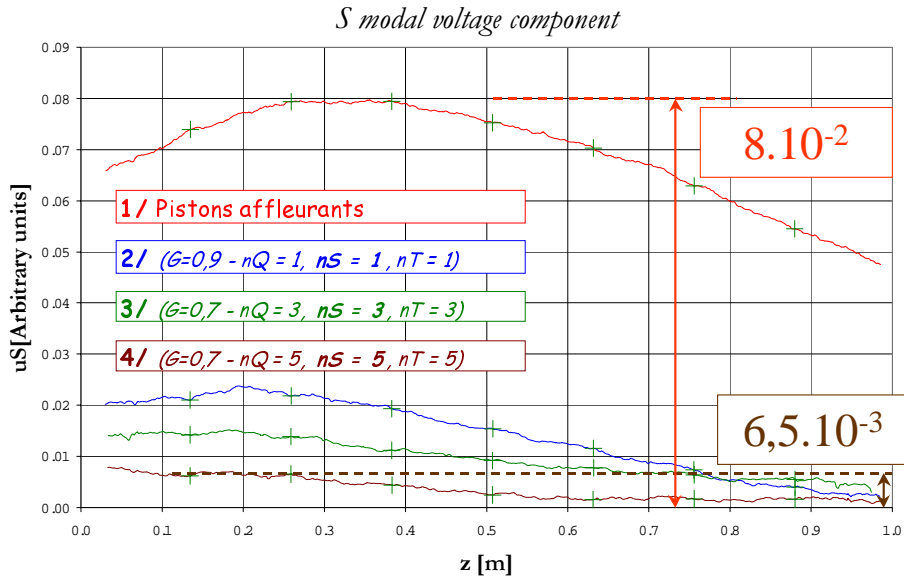


figure 28: composante dipolaire S mesurée par perturbation de E

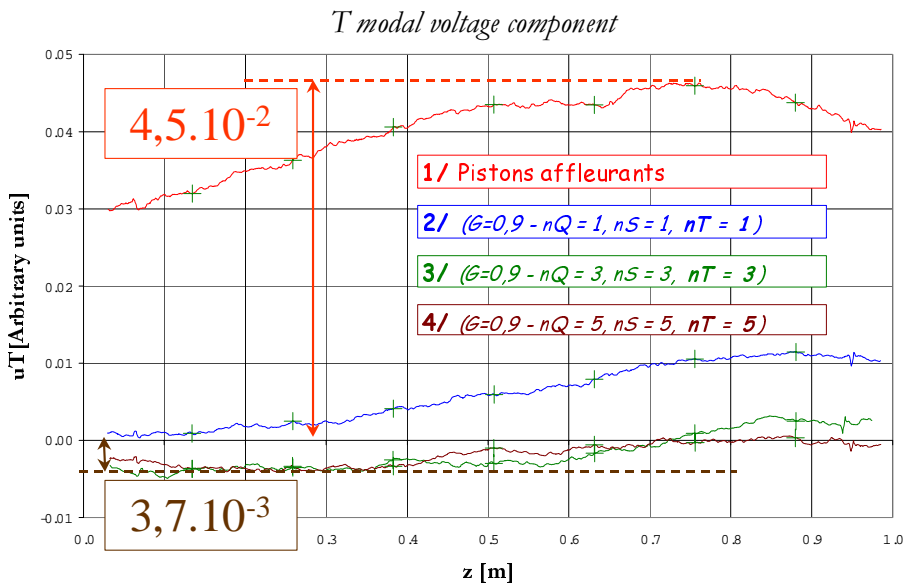


figure 29: composante dipolaire T mesurée par perturbation de E



### 3 Synthèse des résultats

#### 3.1 Tableau récapitulatif du réglage déduit de la perturbation du champ magnétique

	Départ: pistons affleurants	Après 3 itérations
$f_Q$	350,680 MHz	352,199 MHz
$\Delta U_Q(z)$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$\Delta U_S(z)$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
$\Delta U_T(z)$	$9 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$

En 3 itérations,

1. la fréquence de résonance du mode quadripolaire est parfaitement réglée;
2. Les variations de tension quadripolaire sont de l'ordre de  $10^{-3}$ , soit 10 fois plus faibles que l'objectif qu'on s'était donné;
3. Les composantes dipolaires sont inférieures à  $7 \cdot 10^{-3}$ .

Les positions finales des pistons<sup>3</sup> sont données par le tableau suivant:

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	2.90	2.16	2.18	1.97	1.99	1.71	1.26	1.09
Q 2	2.89	2.78	3.46	3.64	3.46	2.90	2.16	2.14
Q 3	2.30	2.76	3.40	3.45	3.45	3.98	3.80	4.34
Q 4	1.72	1.65	1.58	1.27	1.46	2.25	2.41	2.72
	max = 4,34 mm		min = 1,09 mm		moyenne = 2,54 mm			

#### 3.2 Tableau récapitulatif du réglage déduit de la perturbation du champ électrique

	Départ: pistons affleurants	Après 3 itérations
$f_Q$	350,618 MHz	352,198 MHz
$\Delta U_Q(z)$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
$\Delta U_S(z)$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
$\Delta U_T(z)$	$8 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$

En 3 itérations,

1. la fréquence de résonance du mode quadripolaire est parfaitement réglée;
2. Les variations de tension quadripolaire sont de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-3}$ , soit 5 fois plus faibles que l'objectif qu'on s'était donné;
3. Les composantes dipolaires S et T sont inférieures à  $7 \cdot 10^{-3}$ .

Les positions finales des pistons<sup>4</sup> sont données par le tableau suivant:

n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	3.85	2.09	1.84	1.77	1.47	0.99	1.21	2.94
Q 2	5.39	2.19	1.87	2.73	2.96	2.03	1.92	4.28
Q 3	5.84	2.21	1.71	2.75	3.07	2.72	3.33	7.16
Q 4	3.67	1.57	1.10	1.23	1.02	1.11	2.07	5.21
	min = 0,99 mm		max = 7,16 mm		moyenne = 2,67 mm			

<sup>3</sup> Commandes: bead01\_02\_27\_10\_37 + bead01\_02\_27\_11\_24 + bead01\_02\_27\_13\_19

<sup>4</sup> Commandes: bead01\_02\_22\_12\_10\_4q + bead01\_02\_23\_11\_53\_4q + bead01\_02\_23\_14\_22\_4q

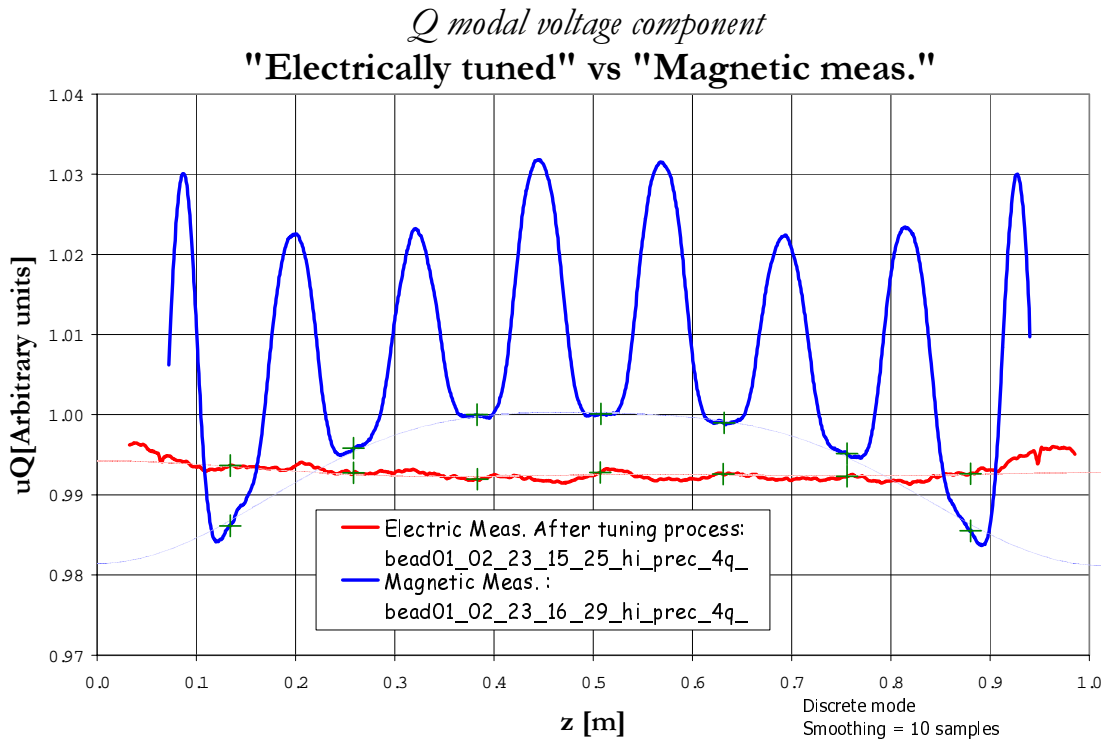
### 3.3 Comparaison entre les positions finales de pistons

Après 3 itérations de réglage, les différents paramètres à régler ont atteint des valeurs du même ordre de grandeur pour les 2 types de champ électromagnétique perturbé. Malgré cela, on note un écart entre les positions finales des pistons (voir le tableau ci-dessous).

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

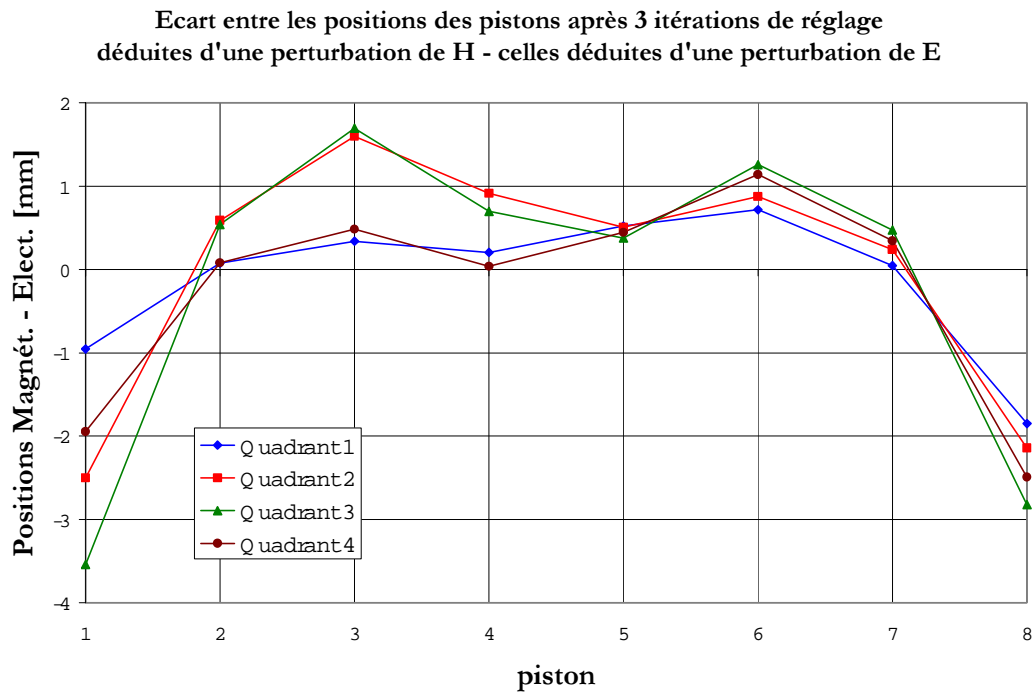
n° piston	1	2	3	4	5	6	7	8
Q 1	-0.96	0.07	0.34	0.21	0.52	0.71	0.05	-1.85
Q 2	-2.50	0.59	1.60	0.91	0.50	0.88	0.24	-2.14
Q 3	-3.54	0.54	1.69	0.70	0.38	1.26	0.47	-2.82
Q 4	-1.95	0.08	0.48	0.04	0.45	1.14	0.34	-2.49

Au cours des tests, après le réglage déduit de la perturbation du champ électrique, nous avons effectué une mesure par perturbation du champ magnétique sur la bissectrice sans modifier quoi que ce soit du point de vue mécanique.



**figure 30: composante quadripolaire de la tension mesurée après le réglage des pistons déduit de E (courbe rouge plate) superposée à celle mesurée par perturbation du champ magnétique**

Comme le montre la figure 30, la composante quadripolaire obtenue après le réglage déduit de la perturbation de E est constante. Avec les pistons aux mêmes positions, cette composante de la tension déduite d'une mesure par perturbation du champ magnétique est également constante pour les 3 points centraux mais décroissante aux extrémités.



**figure 31: différences entre les positions finales après les 3 itérations de réglage déduites d'une perturbation de H moins celles déduites d'une perturbation de E**

On retrouve évidemment cet écart entre les positions finales déduites d'une mesure par perturbation de H et celles générées à partir de la mesure de E (figure 31).

En collaboration avec Pascal Balleyguier qui a réalisé des simulations à l'aide du code de simulations électromagnétiques "Mafia", nous avons trouvé une explication à ces différences. Elles seront exposées dans une note.

## 4 Conclusion

Ces tests ont donc démontré la validité, l'originalité et la puissance de notre système de réglage ( maquette modulable de test - banc de mesure automatisé – formalisme basé sur l'analyse spectrale des opérateurs déduits des schémas électriques équivalents ).

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

- Que les commandes soient déduites d'une mesure par perturbation du champ électrique ou magnétique, en 3 itérations:
  1. la fréquence de résonance du mode quadripolaire est parfaitement réglée;
  2. Les variations de tension quadripolaire sont inférieures à  $2 \cdot 10^{-3}$ , soit plus de 5 fois plus faible que l'objectif qu'on s'était donné;
  3. Les composantes dipolaires S et T de la tension accélératrice sont au moins inférieures à  $7 \cdot 10^{-3}$ .
- A chaque itération les paramètres électromagnétiques ont tous convergé vers les valeurs visées.
- Une itération dure environ 20 minutes pour le réglage d'un tronçon.

Les différences entre les positions finales après les 3 itérations de réglage déduites d'une perturbation de H et celles déduites d'une perturbation de E ont été expliquées.

Si le RFQ n'était pas segmenté, il est clair que nous serions en mesure de régler n'importe quel RFQ.

Le prochain test expérimental consistera à tester ce système d'asservissement sur un RFQ de 2 mètres: la loi de tension objectif sera d'abord constante, puis variable.

Comme on peut le voir sur la figure 26, malgré le réglage des pistons qui a rendu constante la composante quadripolaire de la tension accélératrice, les pentes de cette composante aux extrémités n'ont pas été modifiées. Cela confirme notre approche qui considère les susceptances équivalentes des régions d'extrémité du RFQ indépendantes de la fréquence de résonance globale. La prochaine étape consiste donc à étudier le réglage des conditions aux limites, c'est-à-dire des régions d'extrémité du RFQ (épaisseur des plaques + doigts dits de stabilisation dipolaire).

L'étape suivante, que nous avons déjà commencée au niveau formalisme, sera d'intégrer au processus de réglage la segmentation du RFQ engendrée par les plaques dite de couplage résonant.