



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 : 2002/03/27

N/RÉF. : DAPNIA/SACM/IPHI2002/17

François SIMOENS

Alain FRANCE

Jacques GAIFFIER

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

Conditions de convergence

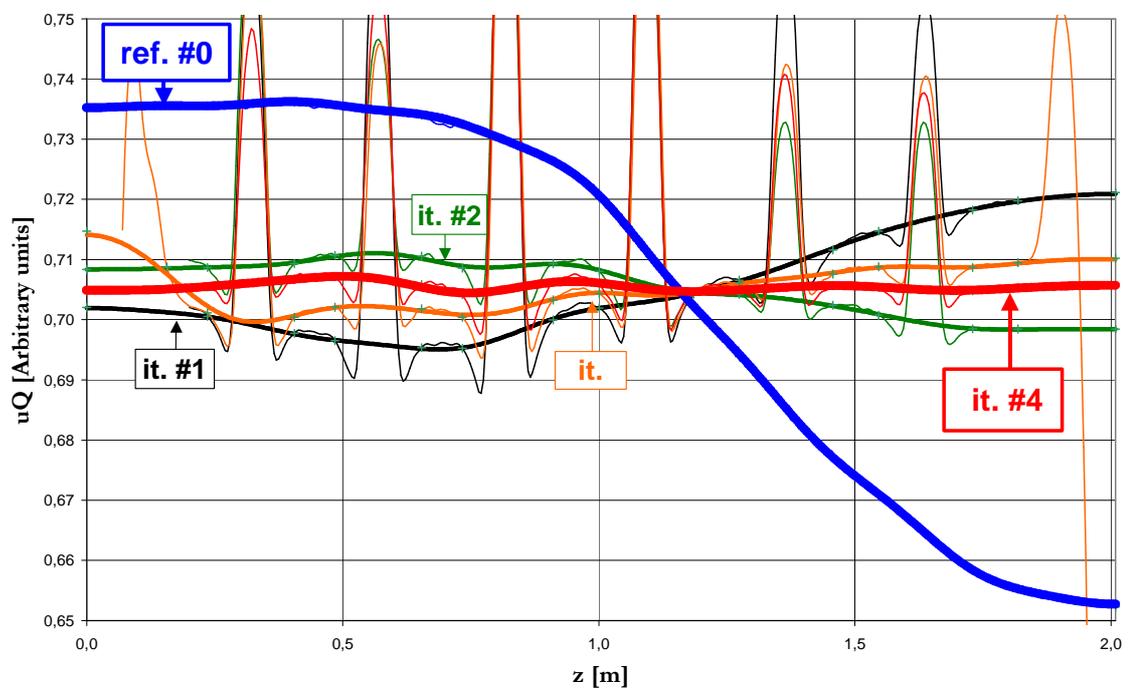


TABLE DES MATIERES

<i>Réglage d'une tension constante dans un RFQ de 2 m à l'aide des pistons d'accord</i>	<i>1</i>
Conditions de convergence	1
1 Introduction	4
2 Conditions des tests	4
2.1 Description de la cavité	4
2.2 Conditions initiales du RFQ	5
3 Divergence des premiers tests	6
3.1 Premier test : considération de toutes les composantes modales	6
3.2 Deuxième test : test restreint aux composantes dipolaires	11
3.3 Troisième test : test restreint aux composantes quadripolaires	15
4 Origines de la divergence des premiers tests	19
4.1 Distribution longitudinale irrégulière des pistons	19
4.1.1 Echantillonnage irrégulier	19
4.1.2 Test avec des pistons régulièrement répartis	20
4.2 Désadaptation des modes dipolaires	22
4.2.1 Ecart entre le modèle et le RFQ testé	22
4.2.2 Perturbation au premier ordre de l'opérateur	22
4.2.3 Mesure du mode dipolaire	24
4.2.4 Insertion et ajustement de la longueur des doigts	25
5 Obtention du réglage	27
5.1 Réglage d'un profil constant à 352,2 MHz	27
5.1.1 Paramètres du réglage	27
5.1.2 Evolution de la fréquence du mode accélérateur	27
5.1.3 Composante quadripolaire de la tension accélératrice	28
5.1.4 Distribution longitudinales des composantes dipolaires de la tension accélératrice	29
5.1.5 Rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice	30
5.1.6 Ecart relatif des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil constant	32
5.1.7 Positions finales des pistons d'accord	33
5.2 Réglage d'une loi constante à 350,8 MHz	34
5.2.1 Fréquence du mode accélérateur	35
5.2.2 Composantes quadripolaire et dipolaires de la tension accélératrice	35
5.2.3 Rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice	37
5.2.4 Ecart relatif des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil constant	38
5.2.5 Positions finales des pistons	39
5.3 Comparaison des positions finales des pistons dans le RFQ réglé à 352,2 MHz et à 350,8 MHz	40
6 Importance du gain	43
6.1 Gains 0,5 et 0,95	43
6.2 Gains 1 / 0,8	45
6.3 Synthèse vis à vis de l'effet du gain	47
7 Conclusion	48
8 Annexe	49
8.1 Points discrets choisis dans le cas de la répartition régulière des pistons	49

1 Introduction

Nous avons réalisé le réglage d'une distribution longitudinale de tension constante dans un RFQ de 2 mètres de long présentant une électrode unique à profil constant.

Cette étude a été menée après avoir réglé un profil de tension constant puis variable dans un RFQ segmenté constitué de 2 RFQs de 1 mètre de long réunis à travers un couplage résonant. Cette dernière configuration réunissait tous les différents types de régions électromagnétiques que comporte le RFQ final et donc validait leur modélisation au sein de notre formalisme.

Malgré la plus grande simplicité de la configuration testée, les premiers tests ont divergé :

- On a d'abord soupçonné un problème d'orthogonalité de la base de fonctions de commande, lié à la distribution fortement irrégulière des pistons d'accord (8 par mètre sur le tronçon A, 4 par mètre sur le tronçon B). Un test avec 4 pistons par mètre sur les 2 tronçons, et une base parfaite, n'a pas résolu le problème (accessoirement, cette expérience a permis de concevoir un algorithme plus robuste pour calculer les fonctions de base) ;
- La divergence du réglage provenait en fait d'un trop grand écart entre le modèle et le RFQ réel, écart particulièrement visible sur la distribution des fréquences de résonance des modes dipolaires et quadripolaires. L'algorithme utilisé suppose en effet que le RFQ réel est une « petite perturbation » du RFQ modèle vers lequel on doit tendre. Il y avait à ce stade deux remèdes possibles : ou bien introduire dans le modèle les conditions aux limites mesurées sur le RFQ réel, ou bien régler les conditions aux limites du RFQ réel. On a choisi la seconde solution (réglage des doigts) pour deux raisons : d'une part, l'extraction des paramètres décrivant les conditions aux limites est une opération lourde nécessitant plusieurs mesures, et d'autre part, le réglage des modes dipolaires est indispensable dans le cas d'un RFQ segmenté.

Après avoir ainsi défini les conditions de convergence, deux réglages d'un profil de tension constante respectivement à 352,2 MHz et à 350,8 MHz ont été obtenus en 4 itérations.

2 Conditions des tests

2.1 Description de la cavité

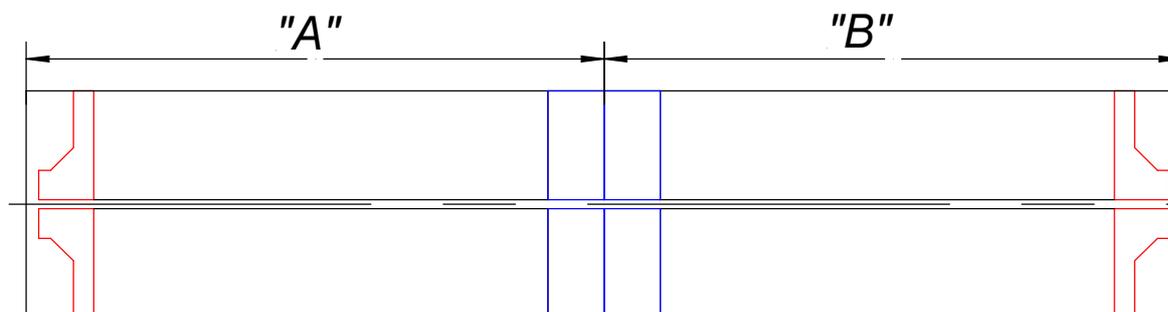


figure 1 : schéma des 2 tronçons "A" et "B" assemblés de manière à présenter une électrode unique

2 tronçons de maquette de RFQ sont réunis :

- 1- le tronçon baptisé "A" possède 8 pistons par quadrant;
- 2- le "B" présente 4 pistons par quadrant.

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

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

- Aux 2 extrémités de la structure des becs à encoche sont montées (pièces rouges de la figure 1);
- A la jonction des 2 tronçons, des blocs pleins assurent la continuité des électrodes (pièces bleues de la figure 1).

2.2 Conditions initiales du RFQ

Initialement :

- Tous les pistons d'accord sont affleurants à la surface interne de la cavité.
- Aucun pré-réglage n'a été appliqué

Lors des premiers tests les doigts de réglage des modes dipolaires ne sont pas insérés.

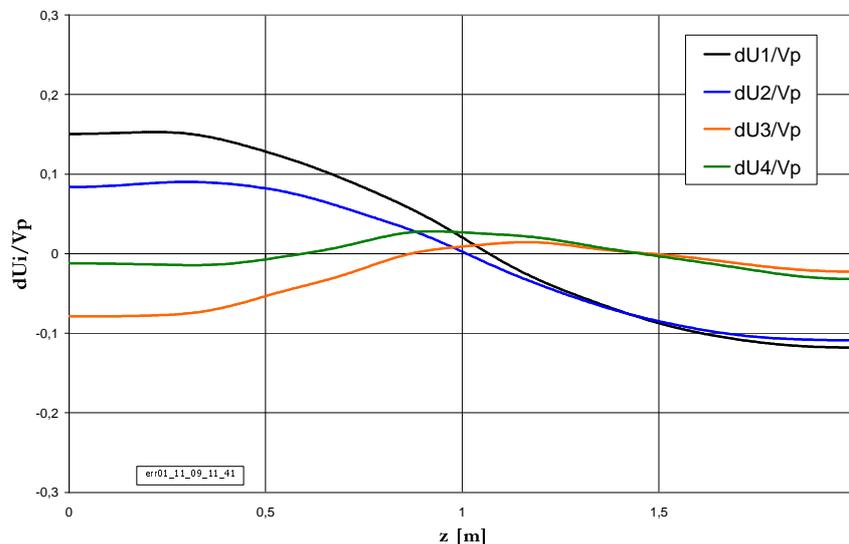


figure 2 : distribution longitudinale des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension V_p constante dans le RFQ de 2 m brut d'assemblage

dU1 / Vp		dU2 / Vp		dU3 / Vp		dU4 / Vp	
min	max	min	max	min	max	min	max
-0,118	0,153	-0,109	0,090	-0,079	0,015	-0,032	0,028

Les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants normalisés par rapport à l'énergie totale sont compris dans une fourchette allant de $-11,8 \cdot 10^{-2}$ à $+15,3 \cdot 10^{-2}$. On cherche à obtenir, pour tout quadrant $k=1 \dots 4$, $|dU_i/V_p| < 10^{-2}$.

3 Divergence des premiers tests

Lors des premiers tests, les doigts de réglage des modes dipolaires n'étaient pas insérés aux extrémités de la cavité. Nous avons cherché à obtenir un profil de tension constante à l'aide du déplacement de tous les pistons, soit au total 48 pistons.

Les tests présentés dans ce chapitre ont montré une divergence systématique du réglage des composantes dipolaires. L'intérêt de leur description réside en ce qu'ils ont permis de mettre en évidence des principes à désormais considérer lors de tout réglage.

3.1 Premier test : considération de toutes les composantes modales

A chaque itération :

1. L'ensemble des commandes modales a été considéré.
2. Un gain de 1 a été systématiquement appliqué.
3. La fréquence visée était 350,8 MHz, valeur théorique quand les pistons sont affleurants.
4. La distribution de tension visée était constante sur les 2,0092 m de la cavité.

Tableau 1 : description du premier test de réglage

Fichier de mesure	Fréquence du mode quadripolaire fQ	f1 Excitation S Excitation T	f2 Excitation S Excitation T
Mesure de référence avec les pistons affleurants Bead01_11_09_11_41	350,550 MHz Q=3210 (-34,9 dB)	fS = 342,287 MHz (-35,33 dB) 342,300 MHz (-37,34 dB)	342,687 MHz (-36,7 dB) fT = 342,672 MHz (-37,5 dB)
Après les 1° déplacements des 48 pistons Bead01_11_09_13_22	350,922 MHz	342,649 MHz (-42,7 dB) fT=342,676 MHz (-39,34 dB)	fS=343,151 MHz (-32,15 dB) 343,144 MHz (-39,44 dB)
Après les 2° déplacements des 48 pistons Bead01_11_09_14_03	350,796 MHz Q = 3170 (-35,15 dB)	fS = 342,588 MHz (-35,07 dB) 342,602 MHz (-37,33 dB)	342,986 MHz (-36,85 dB) fT = 342,967 MHz (-37,51 dB)
Après les 3° déplacements des 48 pistons Bead01_11_09_14_50	350,840 MHz Q=3165 (-35,13 dB)	342,619 MHz (-42,42 dB) fT=342,637 MHz (-39,16 dB)	fS=343,112 MHz (-32,39 dB) 343,105 MHz (-39,33 dB)

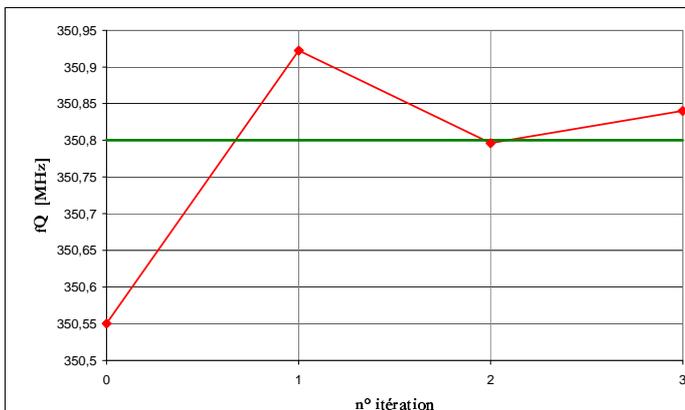


figure 3 : évolution de la fréquence de résonance du mode quadripolaire lors du premier test

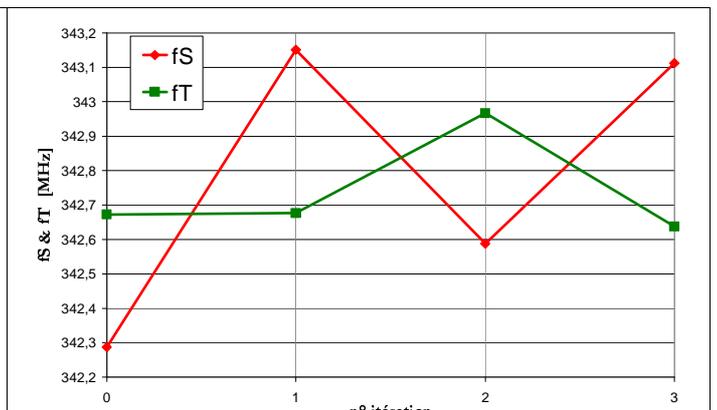


figure 4 : évolution de la fréquence de résonance des modes dipolaires de premier ordre lors du premier test

La fréquence de résonance du mode quadripolaire converge vers la consigne malgré un gain à l'évidence trop élevé (figure 3). Les 2 résonances dipolaires de premier ordre changent de type de distribution transverse privilégié "S" ou "T" à chaque itération (figure 4). Les modes dipolaires tournent dans l'espace des solutions.

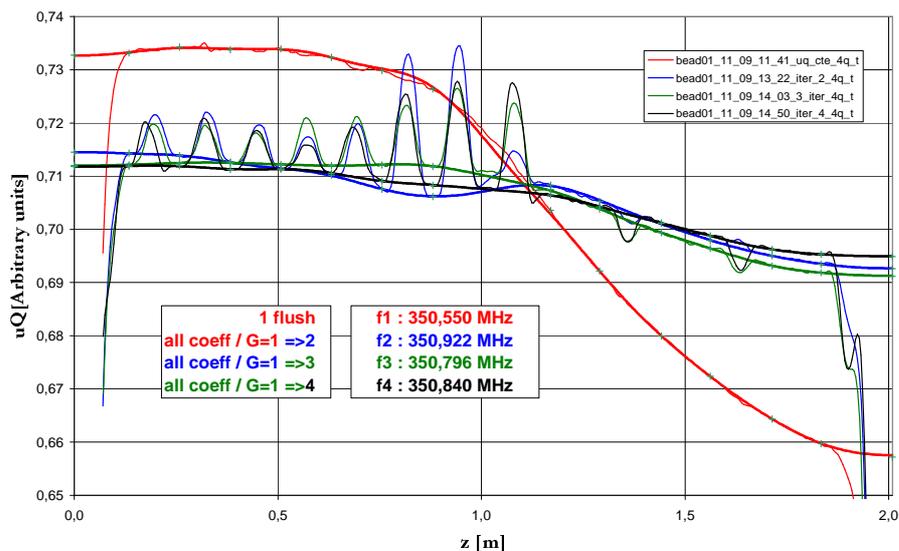


figure 5 : évolution de la composante quadripolaire uQ de la tension accélératrice lors du 1^{ier} test

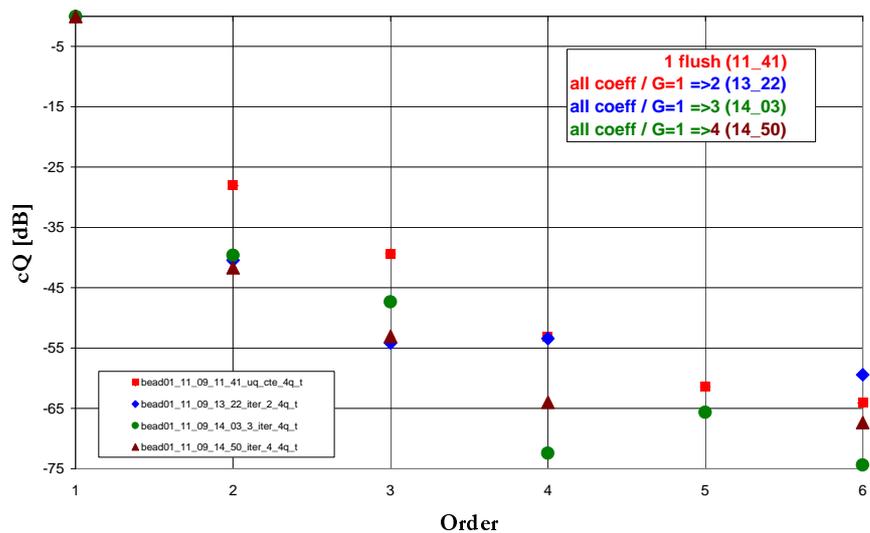


figure 6 : composantes spectrales cQ au cours du 1^{ier} test

Les composantes spectrales quadripolaires cQ(2) et cQ(3) diminuent avec difficulté.

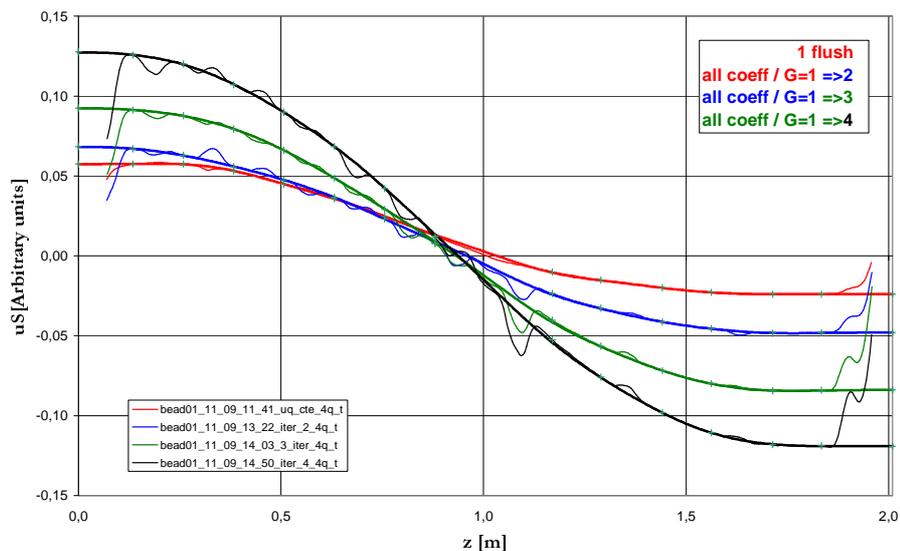


figure 7 : évolution de la composante dipolaire uS de la tension accélératrice lors du 1^{ier} test

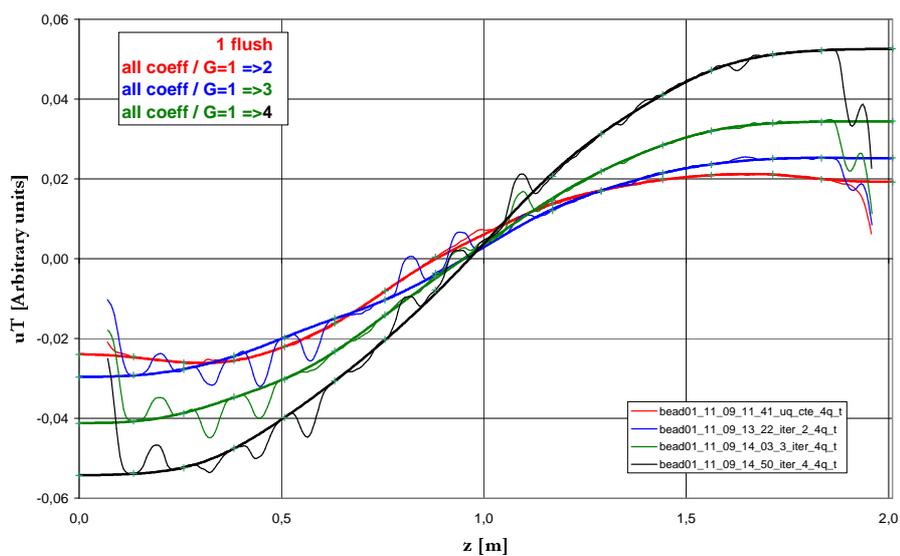


figure 8 : évolution de la composante dipolaire uT de la tension accélératrice lors du 1^{ier} test

Les profils des composantes dipolaires de la tension accélératrice basculent de plus en plus à chaque itération (figure 7 et figure 8).

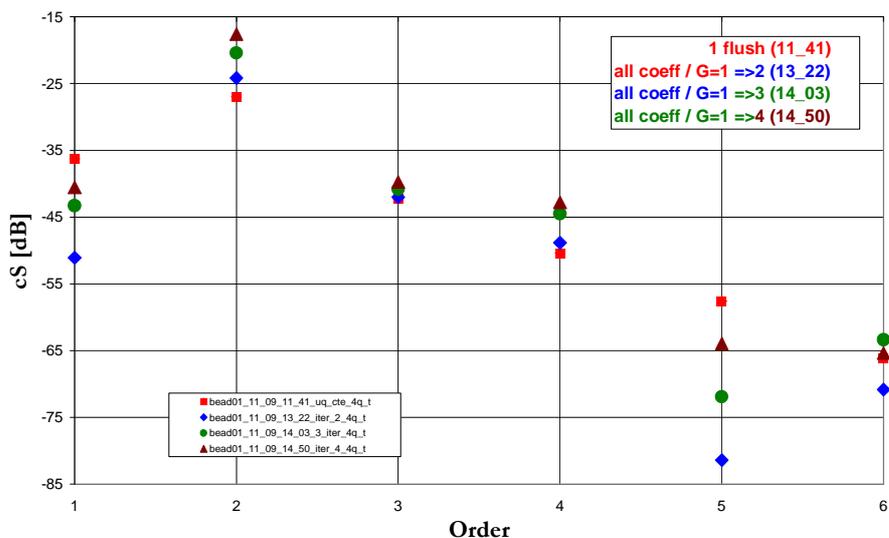


figure 9 : composantes spectrales cS au cours du 1^{ier} test

La deuxième composante spectrale cS(2) augmente à chaque itération.
 La composante spectrale cS(3) ne varie pas.

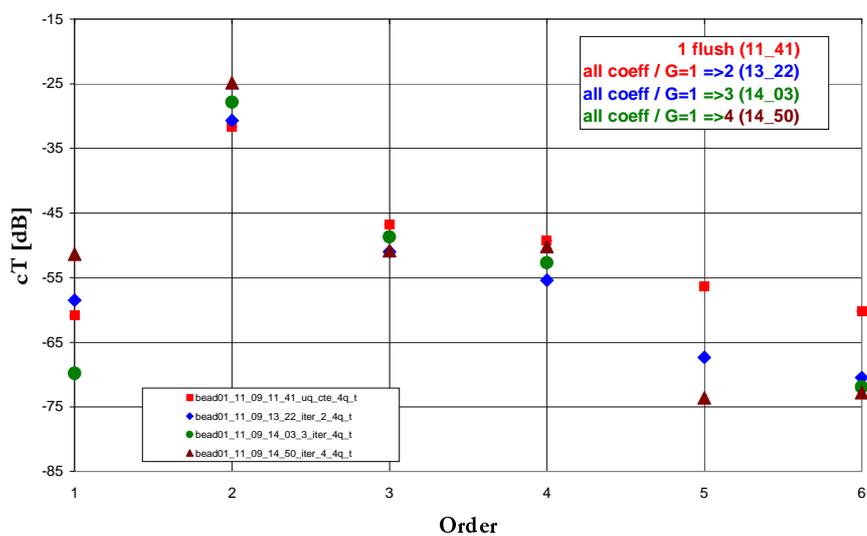


figure 10 : composantes spectrales cT au cours du 1^{ier} test

La deuxième composante spectrale cT(2) augmente à chaque itération.

distribution longitudinale des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension V_p constante

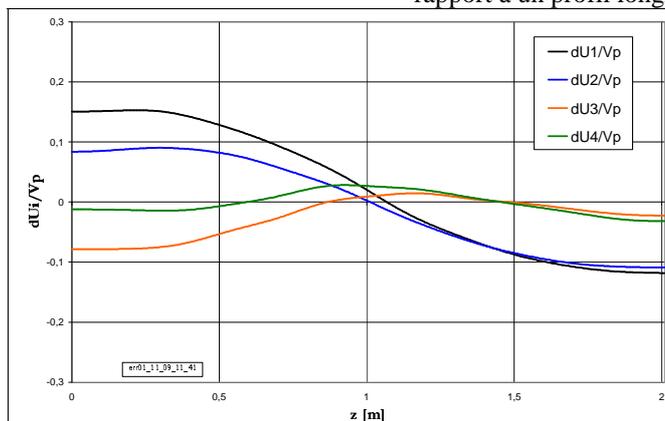


figure 11 : dans le RFQ de 2 m brut d'assemblage

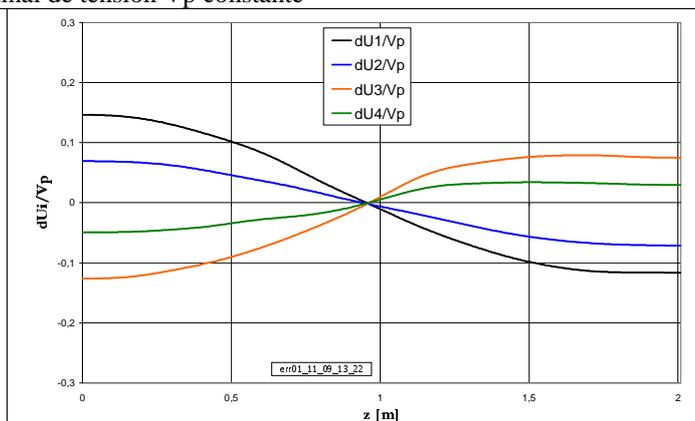


figure 12 : après la 1^{ère} itération

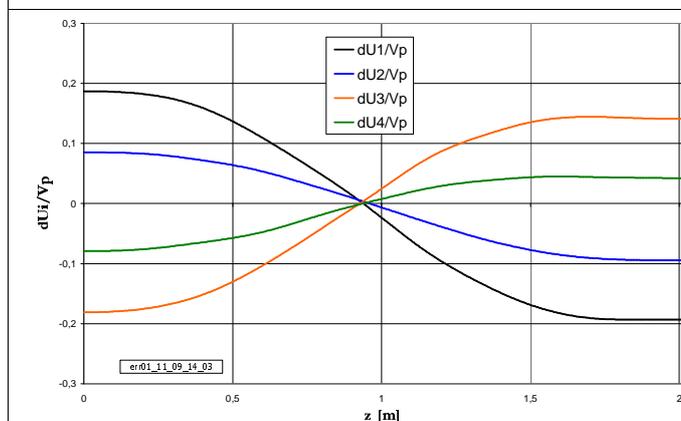


figure 13 : après la 2^{ème} itération

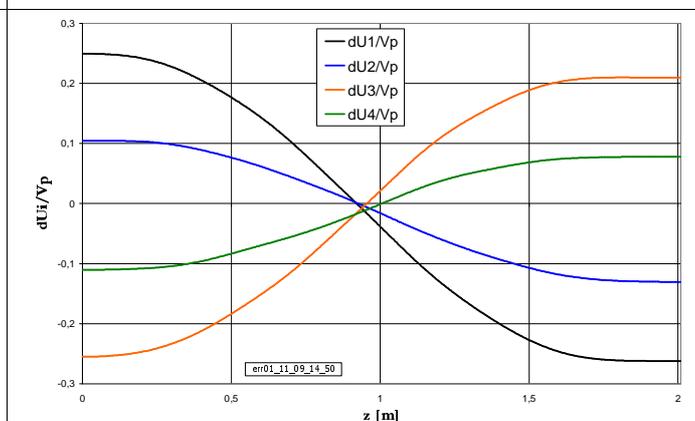


figure 14 : après la 3^{ème} itération

	Min(dUi/Vp)	Max(dUi/Vp)
Mesure de référence avec les pistons affleurants	-0,118	0,153
Après les 1 ^{er} déplacements des 48 pistons	-0,126	0,146
Après les 2 ^{es} déplacements des 48 pistons	-0,193	0,187
Après les 3 ^{es} déplacements des 48 pistons	-0,262	0,250

Tableau 2 : minima et maxima des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil de tension constante.

Bien que l'allure de la distribution longitudinale de la composante quadripolaire semble s'être redressée après la première itération, la contribution des composantes dipolaires augmente dans de telles proportions que les profils des tensions normalisées des 4 quadrants s'écartent de plus en plus d'une distribution constante.

⇒ A la suite de ce test, les hypothèses suivantes de l'origine de la divergence ont été envisagées :

- Trop de composantes modales ont été considérées alors qu'elles contiennent plus de bruit que d'information.
- Le gain est trop élevé à l'image de l'évolution de la fréquence de résonance du mode accélérateur.

3.2 Deuxième test : test restreint aux composantes dipolaires

Ce test a cherché à vérifier le comportement des composantes dipolaires indépendamment des autres.

A chaque itération :

1. Afin d'éviter de considérer des composantes modales supérieures trop bruitées, seules les 6 premières fonctions de commande dipolaires SQ et TQ ont été considérées.
2. Le gain a été réduit à 0,95.
3. La fréquence du mode quadripolaire visée était inchangée par rapport à celle mesurée à chaque itération.
4. Aucune commande des composantes quadripolaires ni SSTT n'a été considérée.

Fichier de mesure	Fréquence du mode quadripolaire fQ	f1 Excitation S Excitation T	f2 Excitation S Excitation T
Mesure de référence avec les pistons affleurants Bead01_11_09_11_41	350,55 MHz Q=3210 (-34,9 dB)	fS = 342,287 MHz (-35,33 dB) 342,300 MHz (-37,34 dB)	342,687 MHz (-36,7 dB) fT = 342,672 MHz (-37,5 dB)
Après les 1° déplacements des 48 pistons Bead01_11_09_15_57	350,557 MHz Q=3200 (-34,9 dB)	fS=342,303 MHz (-35,7 dB) 342,317 MHz (-37,13 dB)	342,698 MHz (-35,94 dB) fT=342,685 MHz (-37,27 dB)
Après les 2° déplacements des 48 pistons Bead01_11_09_16_36	350,542 MHz Q=3184 (-35 dB)	fS = 342,301 MHz (-35,88 dB) 342,316 MHz (-37,19 dB)	342,698 MHz (-35,91 dB) fT = 342,681 MHz (-37,37dB)

Tableau 3 : description du deuxième test de réglage

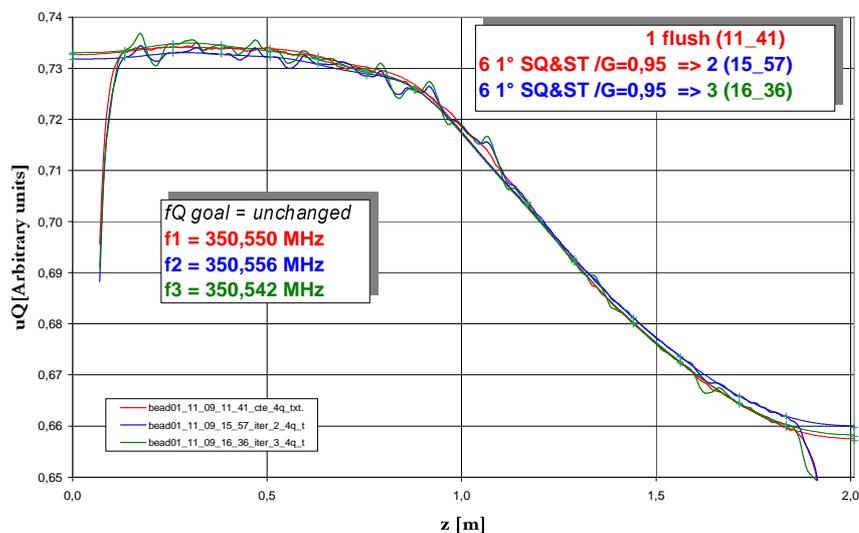


figure 15 : évolution de la distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension lors du 2^{ème} test

Ni la distribution longitudinale de la composante quadripolaire de la tension accélératrice (figure 15), ni la fréquence du mode quadripolaire (Tableau 3) ne sont affectées par les déplacements des pistons. On a donc bien des fonctions de commandes dipolaires qui sont orthogonales à celles des composantes quadripolaires QQ.

Comme on n'a pas considéré la fonction de commande SSTT, les 2 résonances dipolaires n'ont pas tourné dans l'espace des solutions.

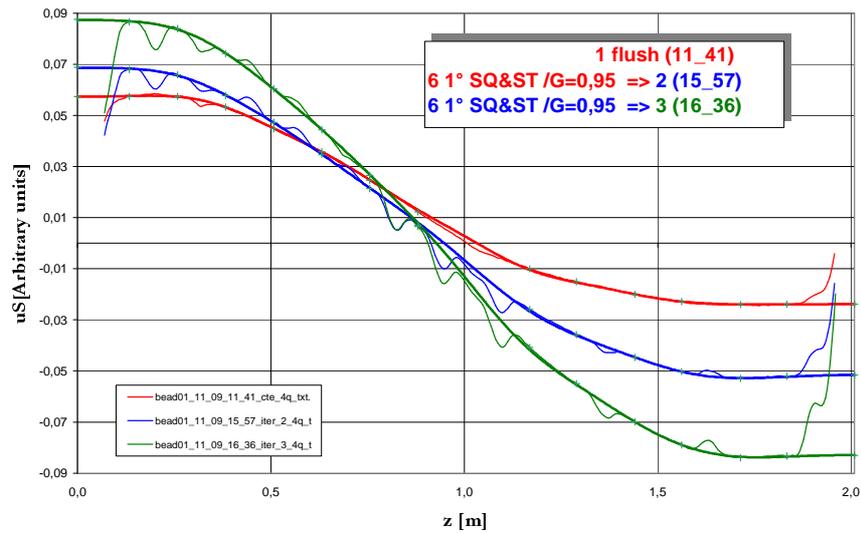


figure 16 : évolution de la composante dipolaire uS de la tension accélératrice lors du 2^{ème} test

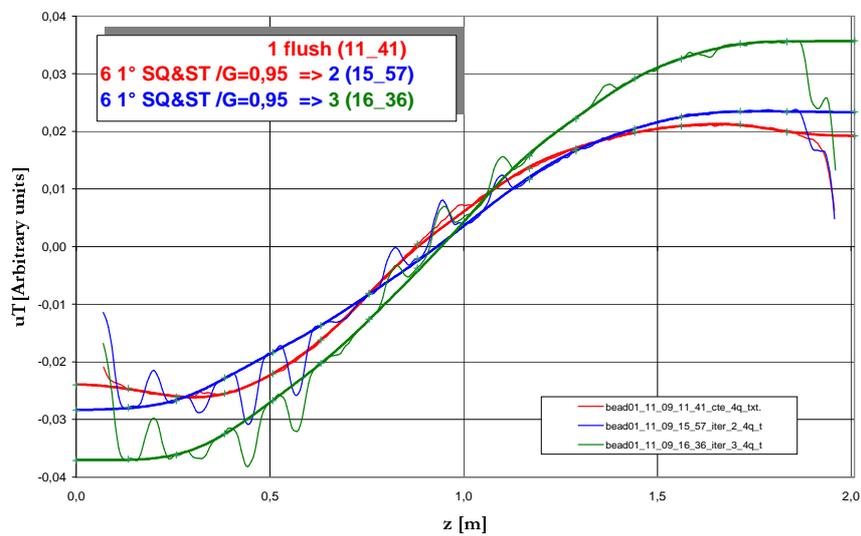


figure 17 : évolution de la composante dipolaire uT de la tension accélératrice lors du 2^{ème} test

Les composantes dipolaires de la tension accélératrice ont divergé dès la première itération (figure 16 et figure 17). Comme lors du test précédent, la pente initiale s'est accentuée à chaque itération.

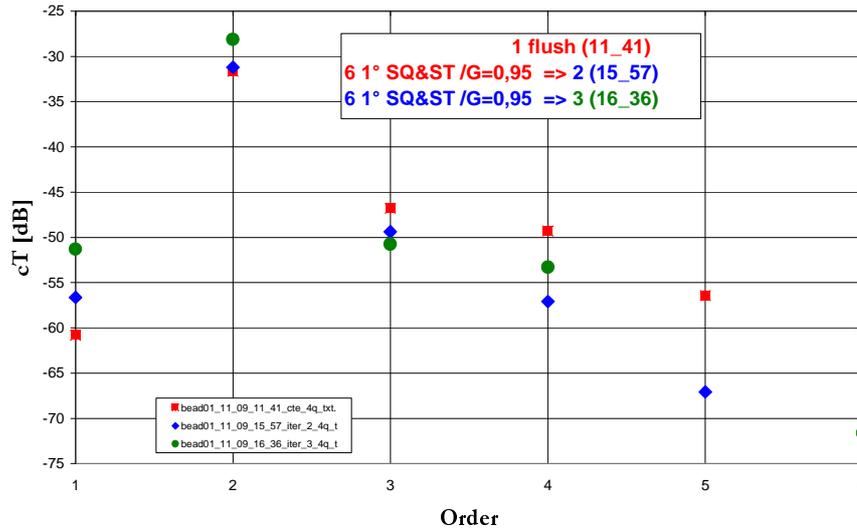


figure 18 : composantes spectrales cT au cours du deuxième test

Les 2 premières composantes spectrales dipolaires cT(1) et cT(2) ont systématiquement augmenté à chaque itération. cT(3) et cT(5) se sont correctement comportés en diminuant à chaque itération. Les 4^{ème} et 6^{ème} composantes ont été réduites après la 1^{ère} itération mais ont cru après la 2^{ème}.

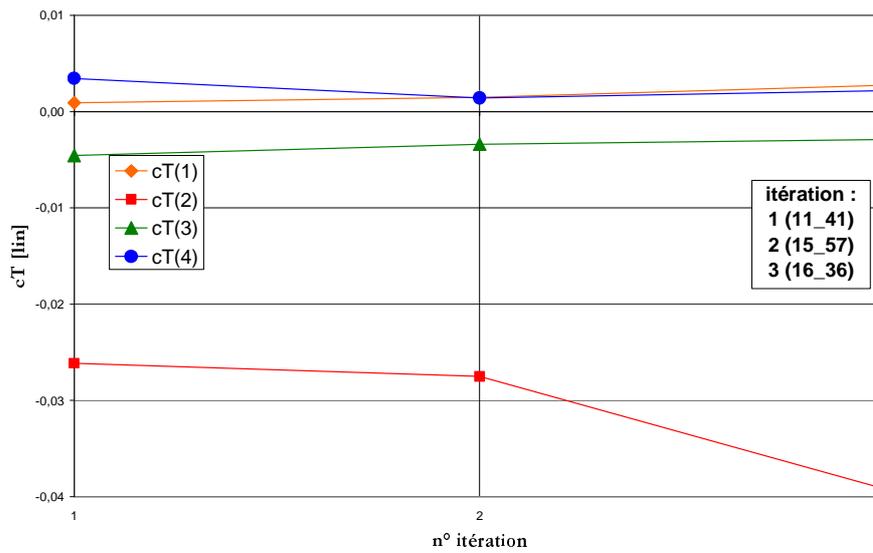


figure 19 : 4 premières composantes spectrales cT en échelle linéaire au cours du 2^{ème} test

On vérifie en échelle linéaire que les composantes spectrales cT ne changent pas de signe à chaque itération. Leur valeur oscillerait alors autour du réglage. Cette représentation confirme bien que les 2 premières composantes divergent uniformément.

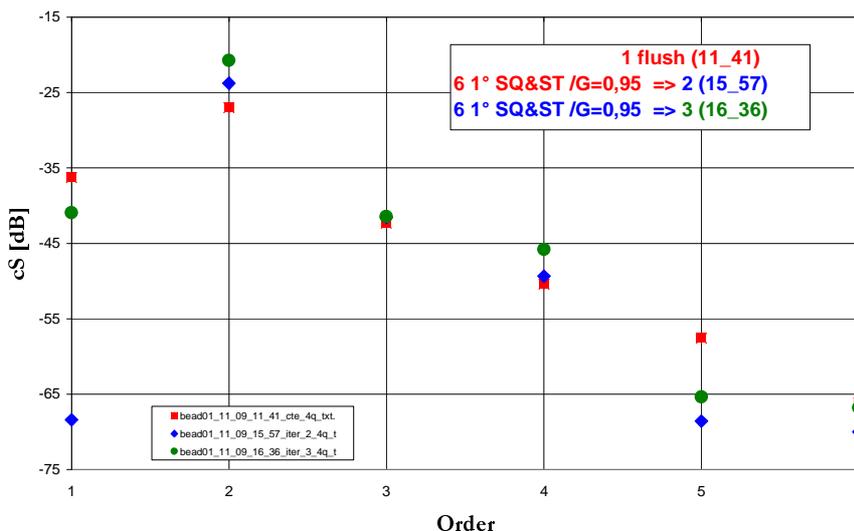


figure 20 : composantes spectrales cS au cours du deuxième test

Les composantes spectrales cS(2) et cS(4) ont systématiquement augmenté à chaque itération. cS(3) n'a pas varié. Les composantes cS(1), cS(5) et cS(6) ont d'abord diminué après la 1^{ière} itération puis ont augmenté après la 2^{ième} à un niveau toutefois inférieur à celui initial.

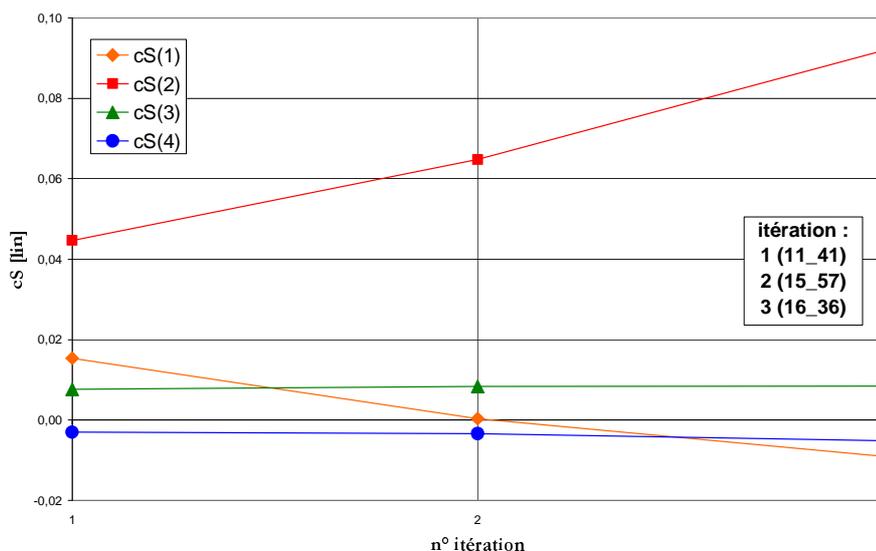


figure 21 : 4 premières composantes spectrales cS en échelle linéaire au cours du 2^{ième} test

La représentation en échelle linéaire de l'évolution des composantes spectrales cS (figure 21) confirme que les 2 premières composantes divergent d'une façon monotone sans osciller d'une valeur négative à positive.

⇒ Le comportement des 2 composantes dipolaires a en commun de voir le deuxième ordre croître à chaque itération. Cette divergence du réglage se traduit par une pente de la tension en fonction de la position longitudinale de plus en plus prononcée à chaque itération à l'image de la distribution longitudinale de cet ordre.

3.3 Troisième test : test restreint aux composantes quadripolaires

Ce troisième test a consisté à régler la composante quadripolaire de la tension sans considérer les composantes dipolaires. Deux itérations ont été effectuées en :

- ne considérant que les 6 premières commandes quadripolaires QQ
- appliquant un gain de 0,5.

Comme le réglage divergeait, nous avons vérifié si cette divergence n'était pas liée à un trop grand déséquilibre dipolaire en appliquant uniquement des commandes sur les 6 premières fonctions dipolaires SQ et TQ.

Tableau 4 : description du troisième test de réglage

	Fichier de mesure	Fréquence du mode quadripolaire fQ	f1 Excitation S Excitation T	f2 Excitation S Excitation T
Mesure de référence avec les pistons affleurants	Bead01_11_13_10_31	350,537 MHz	fS = 342,273 MHz (-35,36 dB) 342,288 MHz (-37,5 dB)	342,672 MHz (-36,9 dB) fT = 342,656 MHz (-37,53 dB)
Après 1° déplacements des pistons déduits de "Bead01_11_13_10_31" avec G= 0,5 Uniquement les 6 premières fonctions de commande QQ	Bead01_11_13_12_20	351,216 MHz Q=3142	fS=342,951 MHz (-34,89 dB) 342,963 MHz (-37,55 dB)	343,352 MHz (-37,39 dB) fT = 343,334 MHz (-37,67 dB)
Après 2° déplacements des pistons déduits de "Bead01_11_13_12_20" avec G= 0,5 Uniquement les 6 premières fonctions de commande QQ	Bead01_11_13_14_03	351,601 MHz Q=3123	fS = 343,335 MHz (-35,39 dB) 343,349 MHz (-37,48 dB)	343,735 MHz (-36,74 dB) fT = 343,720 MHz (-37,63dB)
Après 3° déplacements des pistons déduits de "Bead01_11_12_14_38" avec G= 0,5 Uniquement les 6 premières fonctions de commande SQ et TQ	Bead01_11_13_15_02	351,611 MHz Q=3132	fS = 343,352 MHz (-35,18 dB) 343,364 MHz (-37,43 dB)	343,749 MHz (-36,84 dB) fT = 343,739 MHz (-37,58dB)

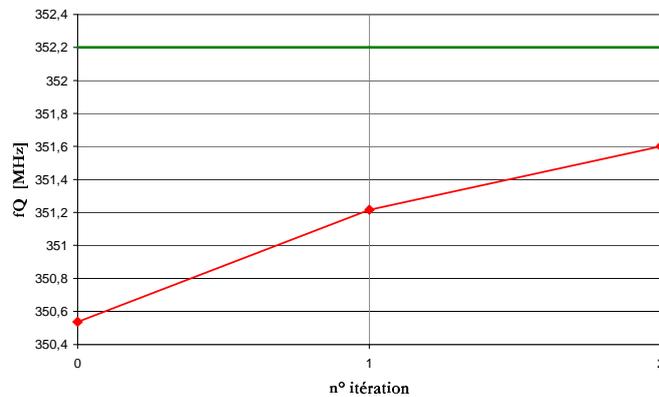


figure 22 : évolution de la fréquence de résonance du mode quadripolaire au cours des 2 itérations de réglage considérant les fonctions QQ avec G=0,5

La fréquence du mode quadripolaire converge vers la valeur de consigne 352,2 MHz. Le faible gain explique la relative lenteur de cette convergence.

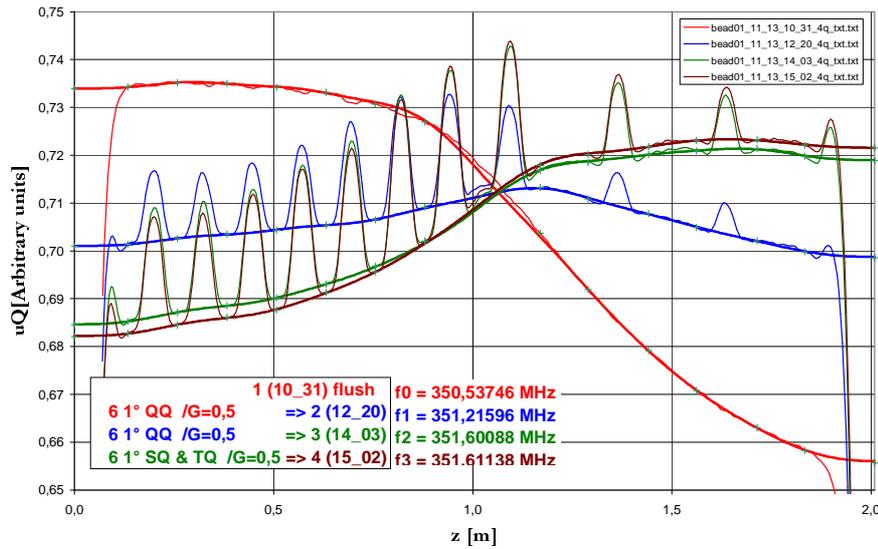


figure 23 : évolution de la distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension accélératrice lors du 3^{ème} test

Alors que la première itération avec un gain de 0,5 avait amélioré la distribution longitudinale de la composante quadripolaire de la tension accélératrice, la deuxième itération fait basculer le profil de cette composante avec une pente inversée par rapport à celle de référence (figure 23).

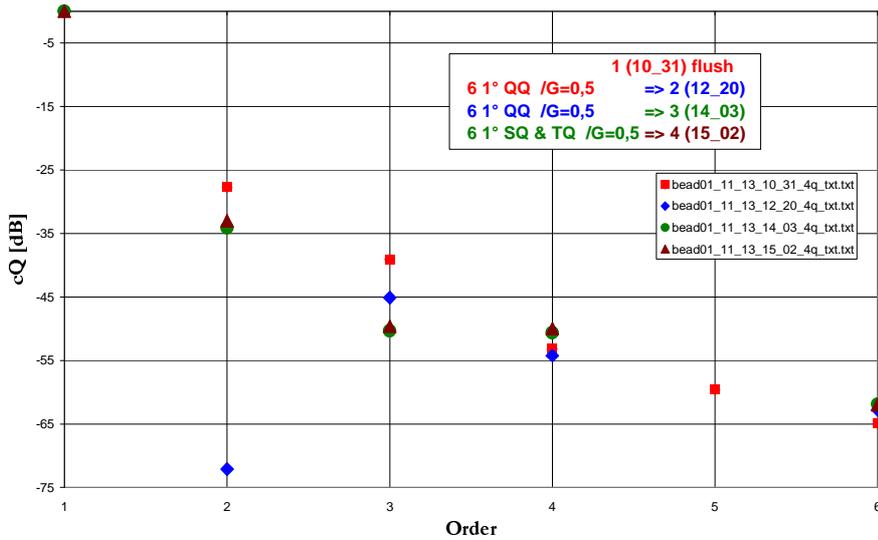


figure 24 : composantes spectrales cQ au cours du 3^{ème} test

La divergence du réglage de la composante uQ lors de la 2^{ème} itération peut s'observer à travers l'augmentation de la 2^{ème} composante spectrale $cQ(2)$. La 3^{ème} itération qui n'a considéré que des commandes dipolaires a peu affecté la composante quadripolaire.

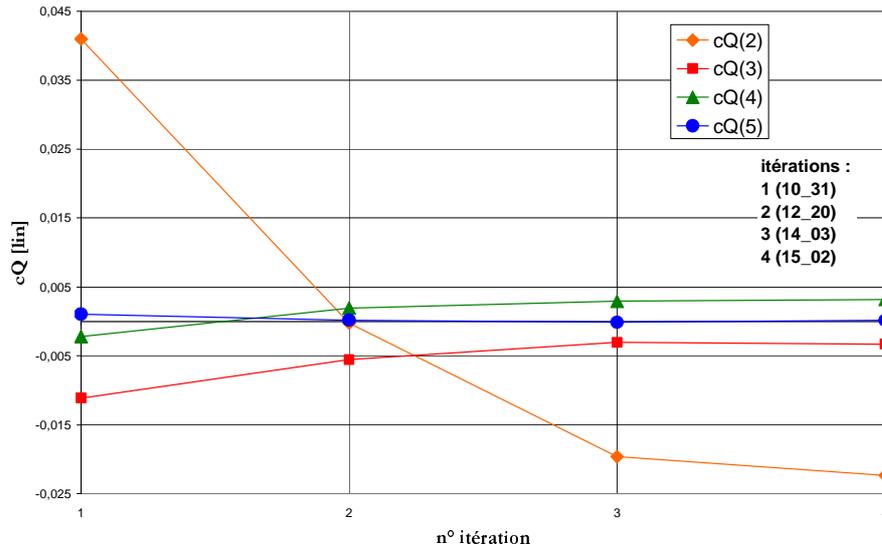


figure 25 : composantes spectrales cQ en échelle linéaire au cours du 3^{ème} test

La représentation en échelle linéaire confirme que la 2^{ème} composante modale cQ(2) est devenue négative après la 3^{ème} itération (figure 25).

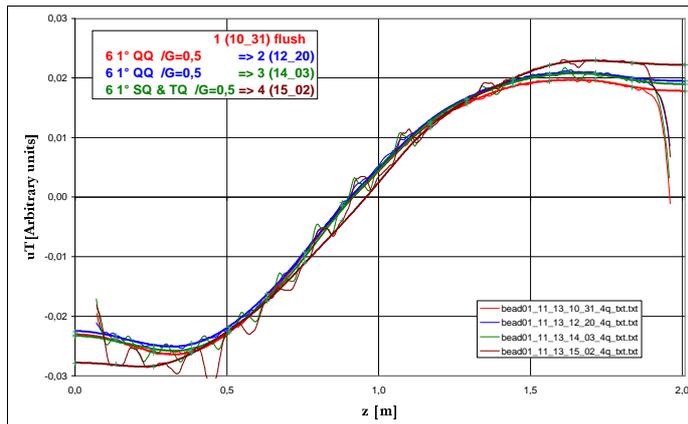


figure 26 : évolution de la distribution longitudinale de la composante dipolaire uS de la tension accélératrice lors du 3^{ème} test

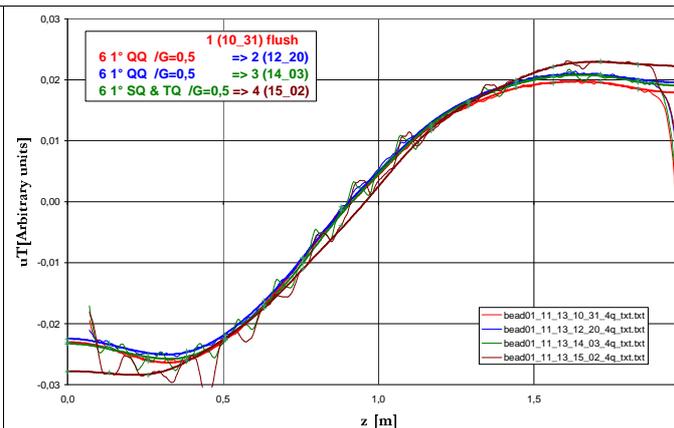


figure 27 : évolution de la distribution longitudinale de la composante dipolaire uT de la tension accélératrice lors du 3^{ème} test

Tant que ne sont considérées que des fonctions de commandes QQ, la distribution des composantes dipolaires de la tension change peu (figure 26 et figure 27). Dès que seules les fonctions de commande SQ et TQ sont appliquées, la pente du profil de ces tensions s'accroît : le réglage diverge.

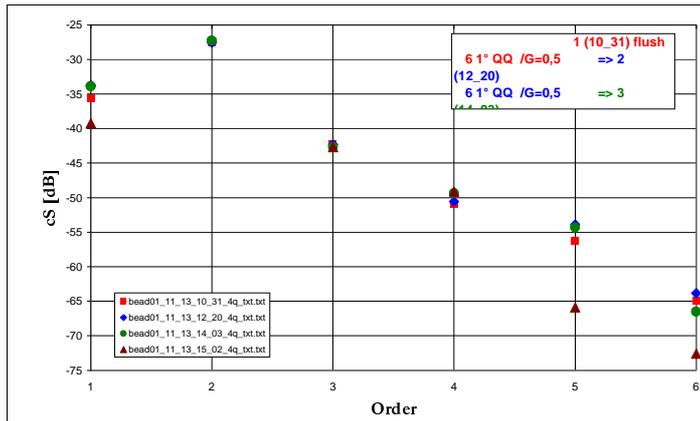


figure 28 : composantes spectrales cS au cours du 3^{ème} test

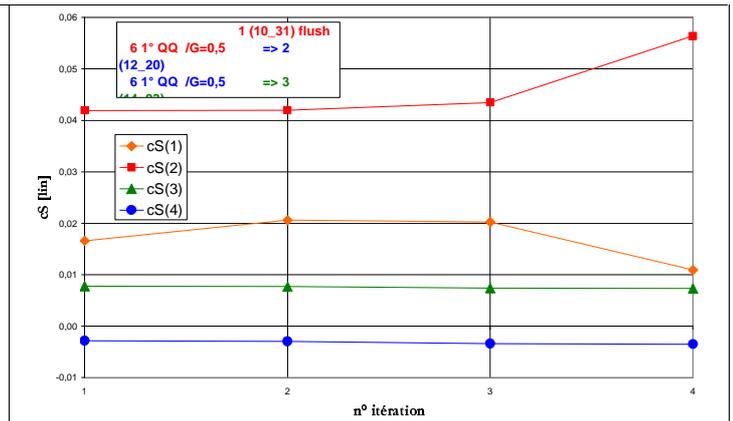


figure 29 : 4 premières composantes spectrales cS en échelle linéaire au cours du 3^{ème} test

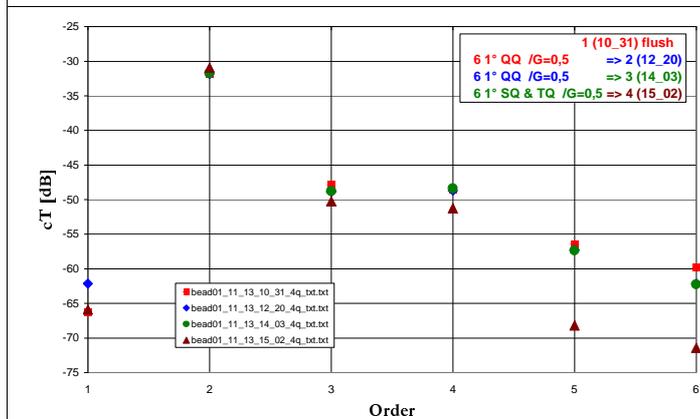


figure 30 : composantes spectrales cT au cours du 3^{ème} test

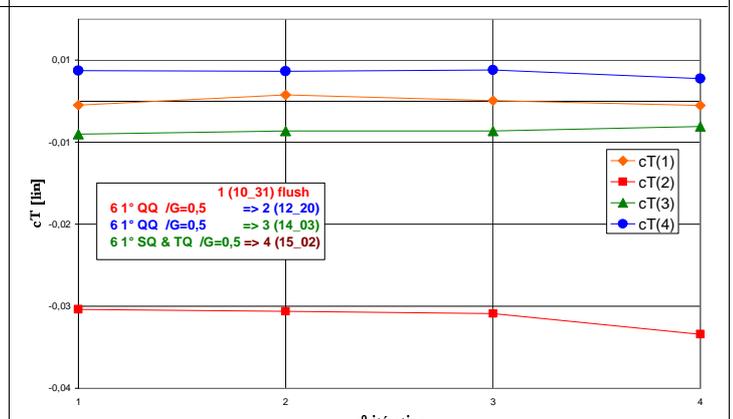


figure 31 : 4 premières composantes spectrales cT en échelle linéaire au cours du 3^{ème} test

On vérifie en échelle linéaire que les composantes spectrales cS et cT ne changent pas de signe.

4 Origines de la divergence des premiers tests

4.1 Distribution longitudinale irrégulière des pistons

4.1.1 Echantillonnage irrégulier

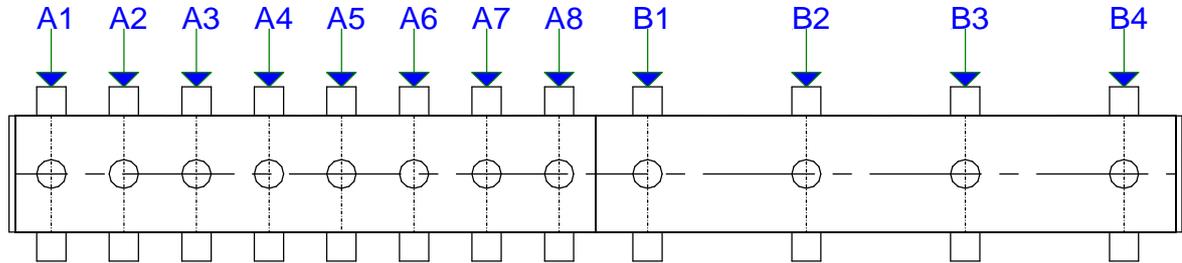


figure 32 : schéma des 12 plans transverses de pistons considérés pour les premiers tests de réglage

Pour ces tests nous avons déplacé l'intégralité des pistons d'accord disponibles, c'est-à-dire les $4 \times 8 = 32$ pistons du tronçon "A" et les $4 \times 4 = 16$ pistons du tronçon "B". Cette distribution longitudinale des plans transverses où les fonctions de commande discrètes sont appliquées est très irrégulière. Les pistons du segment B sont 1,8 fois plus espacés que ceux du tronçon A.

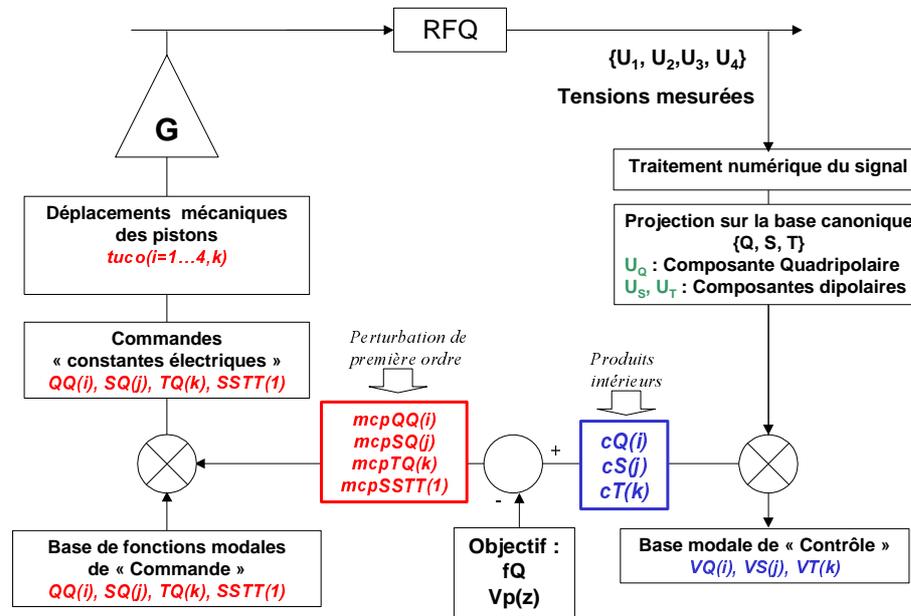


figure 33 : schéma général du formalisme de réglage des pistons

Pour le réglage des pistons d'accord, on dispose de 4 fonctions continues mesurées, les 4 tensions $\{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ auxquelles il faut associer de manière biunivoque ici 48 positions de pistons $tuco(i,k)$, paramètres discrets. Pour ceci, on construit une application linéaire obtenue par la méthode de perturbation de l'opérateur différentiel. Elle permet de relier terme à terme les coefficients modaux des tensions dans la base de contrôle, les $cQ(i)$, $cS(j)$ et $cT(k)$, avec les coefficients des fonctions de commande $cbfQQ(i)$, $cbfSQ(j)$, $cbfTQ(k)$ et $cbfSST(1)$, dans un espace dual de l'espace de contrôle. Ces fonctions de commande sont chacune une distribution particulière des enfoncements des pistons qui correspond à un unique mode de l'espace des tensions.

En calculant des fonctions de commande discrètes, on effectue un échantillonnage. Comme tout échantillonnage, il doit obéir à un critère proche de Shannon, quoique différent puisque les pistons constituent des fonctions continues par morceau. Cela explique qu'il doit exister une relation entre le nombre maximum de modes qu'on peut contrôler lors du réglage et le pas en position longitudinale des pistons d'accord. Dans le cas du réglage testé, l'échantillonnage n'est pas régulier et le critère d'échantillonnage doit prendre une forme restreignant encore plus la largeur spectrale accessible, c'est-à-dire le nombre de composantes spectrales qu'on peut contrôler.

En effet on a pu constater qu'avec le nombre de modes qu'on avait considéré lors des premiers tests, l'orthogonalité des fonctions de commande dans leur espace vectoriel n'était plus respectée.

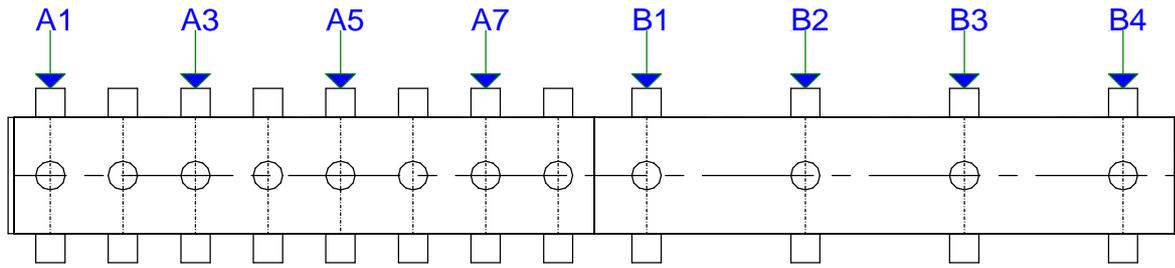


figure 34 : schéma des 8 plans transverses de pistons choisis pour leur répartition plus homogène

piston	A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
z [mm]	72,2	320,8	569,4	818	1093,6	1365,8	1638	1910,2

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

Nous avons donc décidé de ne considérer qu'un piston sur 2 dans le tronçon "A" en assurant ainsi une répartition plus régulière de l'échantillonnage (figure 34).

On a vérifié qu'alors les fonctions de commande des pistons étaient orthogonales les unes par rapport aux autres.

4.1.2 Test avec des pistons régulièrement répartis

A chaque itération :

1. Les 4 premières fonctions de commande quadripolaires QQ et dipolaires SQ et TQ ont été considérées.
2. Le gain appliqué a été $G=1$.
3. La fréquence du mode quadripolaire objectif était 350,8 MHz.
4. La commande SSTT n'a pas été considérée.

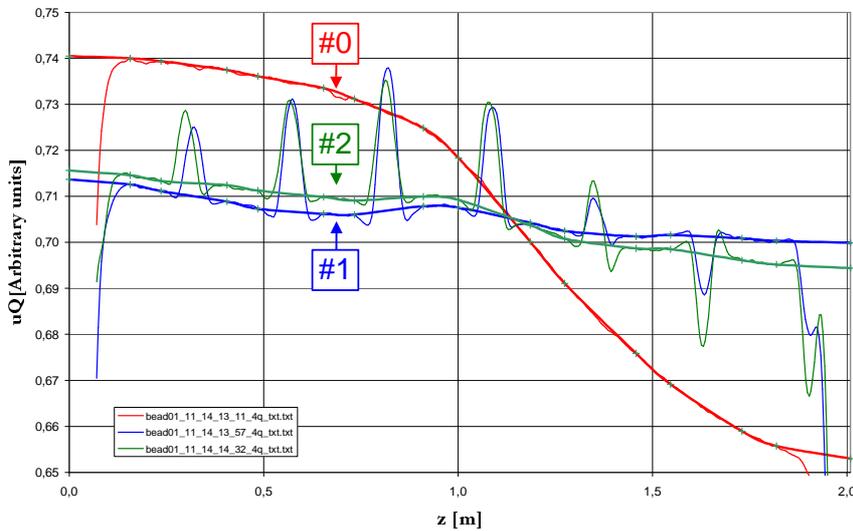


figure 35 : évolution de la distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension accélératrice lors du test avec une distribution régulière des pistons et sans doigts

La distribution longitudinale de la composante quadripolaire uQ de la tension accélératrice tend vers un profil constant (figure 35).

	Fichier de mesure	Fréquence du mode quadripolaire fQ	Fréquence du mode dipolaire fS	Fréquence du mode dipolaire fT
Mesure de référence avec les pistons affleurants	Bead01_11_14_13_11	350,513 MHz	342,256 MHz	342,658 MHz
Après les 1° déplacements des pistons déduits de "Bead01_11_14_13_11"	Bead01_11_14_13_57	350,875 MHz	342,696 MHz	343,090 MHz
Après les 2° déplacements des pistons déduits de "Bead01_11_13_10_31"	Bead01_11_14_14_32	350,826 MHz	343,089 MHz	342,686 MHz

La fréquence de résonance évolue progressivement vers la valeur visée de 350,8 MHz.

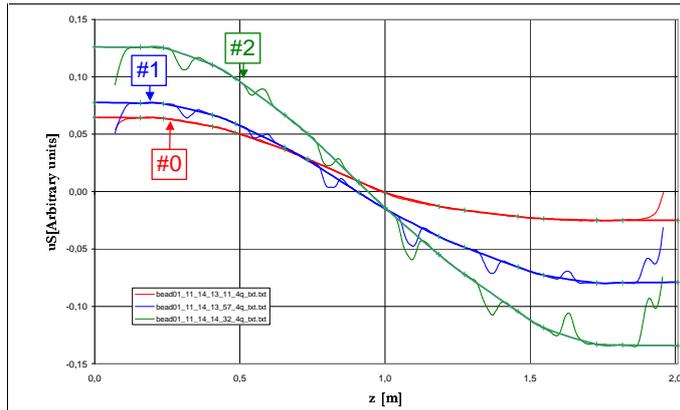


figure 36 : évolution de la distribution longitudinale de la composante dipolaire u_S de la tension accélératrice lors du test avec une distribution régulière des pistons et sans doigts

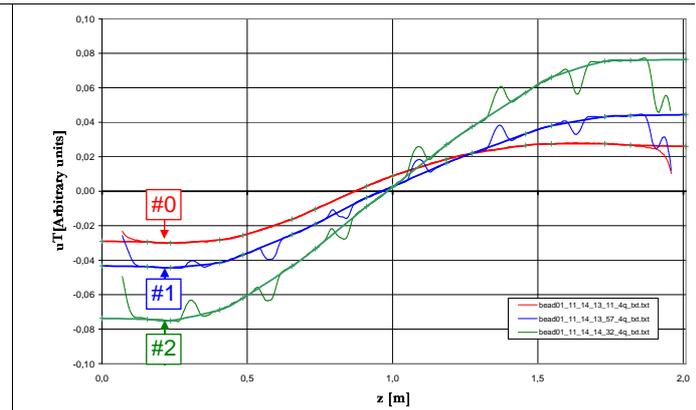


figure 37 : évolution de la distribution longitudinale de la composante dipolaire u_T de la tension accélératrice lors du test avec une distribution régulière des pistons et sans doigts

En revanche, dès la première itération, le réglage de la distribution longitudinale des composantes dipolaires de la tension accélératrice diverge (figure 36 et figure 37). La deuxième itération continue d'accentuer la pente générale de ces courbes. On observe le même comportement que lors des tests précédents où les plans des pistons n'étaient pas distribués régulièrement ; dès que les corrections données par les fonctions de commande dipolaires sont considérées, les composantes dipolaires augmentent.

Le non-respect de l'orthogonalité des fonctions de commande lié à la distribution longitudinale irrégulière des pistons ne suffit pas à expliquer la divergence des réglages. Comme nous avons observé que les premières composantes spectrales dipolaires divergeaient systématiquement, nous nous sommes intéressés à la distribution en fréquence des modes dipolaires.

4.2 Désadaptation des modes dipolaires

4.2.1 Ecart entre le modèle et le RFQ testé

Dans le RFQ de 2 mètres sans les doigts, on mesure par ordre croissant le mode dipolaire D1, suivi du mode quadripolaire accélérateur Q1, puis du deuxième ordre dipolaire D2 (Tableau 5).

Or le modèle prévoit une alternance des modes dans l'ordre des fréquences croissantes où les deux premiers modes sont les dipolaires D1 et D2 avant de rencontrer le mode accélérateur Q1 et son premier harmonique Q2.

	fréquence D1 [MHz]	fréquence Q1 [MHz]	fréquence D2 [MHz]	fréquence Q2 [MHz]
sans doigts	342,25	350,5065	354,0915	358,495
modèle	339,1	350,8	347,2	358,6
avec les doigts à la longueur nominale	337,3	350,6	342,4	358,55

Tableau 5 : fréquences mesurées et calculées dans un RFQ de 2 mètres

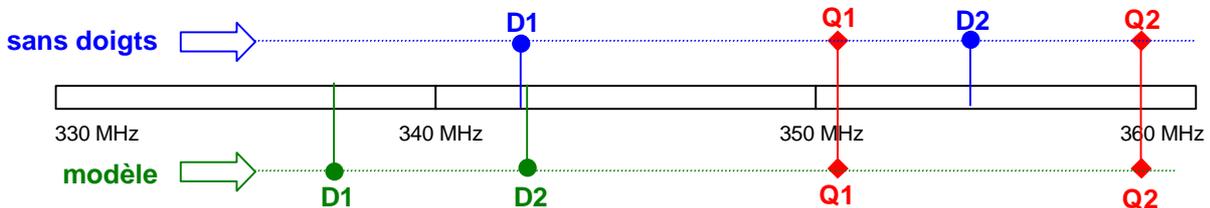


figure 38 : schéma de la distribution en fréquence des premiers modes résonants mesurée sans doigt comparée à celle du modèle

Le modèle de ligne quadrifilaire d'un RFQ obéit à l'équation :

$$M.V = -\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 V \text{ où } V = \begin{pmatrix} uQ \\ uS \\ uT \end{pmatrix} \text{ et}$$

M est une matrice qui comprend un opérateur différentiel et les conditions aux limites.

Pour un RFQ parfait, les solutions de cette équation correspondent à 3 sous-espaces indépendants dont les vecteurs

propres sont $\begin{pmatrix} V_{Qi}(z) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} 0 \\ V_{Sj}(z) \\ 0 \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V_{Tk}(z) \end{pmatrix}$, et les valeurs propres associées f_{Qi} , f_{Sj} et f

Pour calculer les paramètres de commandes modales $mcpQQ$, $mcqSQ$, $mcpTQ$ et $mcpSSTT$ (figure 33), on applique la méthode de perturbation au premier ordre à l'opérateur M.

4.2.2 Perturbation au premier ordre de l'opérateur

Soit un opérateur linéaire $M:E \rightarrow E$

Le système non perturbé est tel que : $Mu_k = \lambda_k u_k$,

celui perturbé : $M u_k = \lambda_k u_k$

En écrivant un développement au premier ordre des variables perturbées:

$$M = M + \Delta M, \quad u_k = u_k + \Delta u_k, \quad \lambda_k = \lambda_k + \Delta \lambda_k$$

l'équation du système se simplifie au premier ordre par $M \Delta u_k + \Delta M u_k - \lambda_k \Delta u_k - \Delta \lambda_k u_k = 0$

On effectue le développement suivant : $\Delta u_k = u_{ker(M)} + \sum \alpha_i u_i$

Le vecteur perturbé u_k peut alors être exprimé en fonction des vecteurs u_i à l'aide de l'expression

$$u_k = u_k + \frac{P_{ker(M)}(\Delta M u_k)}{\lambda_k} + \sum_{j \neq k} \frac{\langle \Delta M u_k, u_j \rangle}{(\lambda_k - \lambda_j) \langle u_j, u_j \rangle} \cdot u_j$$

Appliqué à notre problème de RFQ, le mode quadripolaire non perturbé est $\bar{V}_{Q1} = \begin{pmatrix} V_{Q1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

On considère ensuite une perturbation au premier ordre des paramètres de ligne. Les inductances L_q , $q = 1 \dots 4$, sont considérées comme fonction de l'abscisse z et d'un certain nombre de paramètres de commande φ_α :

$$L_q = L_q(z, \varphi_1, \varphi_2, \dots).$$

Les paramètres de commande peuvent être des nombres sans dimension, des positions de piston, etc. En se limitant au 1^{er} ordre (en φ_α) :

$$L_q(z, \varphi_1, \varphi_2, \dots) = L_0(z) + \sum_{\alpha} \xi_{q\alpha}(z) \varphi_\alpha$$

D'où on obtient:

$$\Delta \bar{M} = \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_\alpha} \right) \Delta \varphi_\alpha = \left\{ \sum_q \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial L_q} \right) \xi_{q\alpha}(z) \right\} \Delta \varphi_\alpha \quad (q = 1 \dots 4)$$

On peut montrer que le mode perturbé quadripolaire est représenté par la série suivante:

$$\begin{aligned} \bar{V}'_{Q1} = & \bar{V}_{Q1} \textcircled{1} + \sum_{i=2}^{N_Q} \sum_{\alpha=1}^{N_p} \frac{\left\langle \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_\alpha} \Delta \varphi_\alpha \bar{V}_{Q1}, \bar{V}_{Qi} \right\rangle}{-\frac{1}{c^2} (\omega_{Q1}^2 - \omega_{Qi}^2)} \bar{V}_{Qi} \textcircled{2} \\ & + \sum_{j=1}^{N_S} \sum_{\alpha=1}^{N_p} \frac{\left\langle \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_\alpha} \Delta \varphi_\alpha \bar{V}_{Q1}, \bar{V}_{Sj} \right\rangle}{-\frac{1}{c^2} (\omega_{Q1}^2 - \omega_{Sj}^2)} \bar{V}_{Sj} \textcircled{3} + \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{\alpha=1}^{N_p} \frac{\left\langle \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_\alpha} \Delta \varphi_\alpha \bar{V}_{Q1}, \bar{V}_{Tk} \right\rangle}{-\frac{1}{c^2} (\omega_{Q1}^2 - \omega_{Tk}^2)} \bar{V}_{Tk} \textcircled{4} \end{aligned}$$

et les $\xi_{q\alpha}$ et φ_α sont choisis de telle sorte que chaque terme des séries soit non nul pour un α et un seul. On construit ainsi trois sous-suites QQ_i, SQ_j et TQ_k. Par exemple, pour φ_{QQ_i} , on a:

$$\left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_{QQ_i}} \right)_{QQ} \neq 0, \quad \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_{QQ_i}} \right)_{SQ} = 0, \quad \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_{QQ_i}} \right)_{TQ} = 0$$

$$\begin{aligned} \left\langle V_{Qn}, \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varphi_{QQ_i}} \right) V_{Q1}, \Delta \varphi_{QQ_i} \right\rangle &= \Delta \varphi_{QQ_i} \quad \text{si } n = i \\ &= 0 \quad \text{si } n \neq i \end{aligned}$$

On remarque que le mode perturbé est égal à la somme :

1. du vecteur non perturbé,
2. des perturbations quadripolaires
3. des perturbations dipolaires S
4. des perturbations dipolaires T

Le dénominateur de chaque contribution modale X d'ordre n contient la différence entre la fréquence au carré du mode quadripolaire d'ordre 1 f_{Q1} et la fréquence f_{Xn} au carré du mode X

- La fréquence du mode quadripolaire d'ordre 1 f_{Q1} considérée dans les calculs est celle du mode accélérateur mesurée.
- La fréquence f_{Xn} est la valeur propre du n-ième mode X calculée à partir du modèle théorique parfait.

Il est évident que si le RFQ mesuré présente des fréquences de résonance trop éloignées du RFQ parfait, les corrections des composantes modales correspondantes liées aux dénominateurs sont erronées.

Par rapport à notre problème du réglage d'un RFQ de 2 mètres, nous observons une différence entre les fréquences des modes dipolaires du modèle et celles mesurées. Dans le modèle, $\omega_{Q1}^2 - \omega_{S2}^2 < 0$ et $\omega_{Q1}^2 - \omega_{T2}^2 < 0$ alors que dans le RFQ mesuré sans les doigts, $\omega_{Q1}^2 - \omega_{S2}^2 > 0$ et $\omega_{Q1}^2 - \omega_{T2}^2 > 0$. De plus, la forte désadaptation des extrémités implique que les V_{Sj} et V_{Tk} calculés sont suffisamment éloignés des V_{Sj} et V_{Tk} réels pour que la représentation ci-dessus soit en défaut : une partie non négligeable du mode perturbé n'est plus dans l'espace engendré par la base, et n'est pas contrôlée convenablement par les pistons.

Cette non-adéquation entre le modèle et le RFQ réel explique la divergence systématique du réglage des composantes dipolaires de la tension accélératrice jusque là observée. Dans le RFQ mesuré, les modes dipolaires sont trop fortement désadaptés aux extrémités. Il faut donc avant de commencer le réglage des pistons corriger les modes dipolaires de manière à rapprocher leur distribution en fréquences de celle du modèle.

4.2.3 Mesure du mode dipolaire

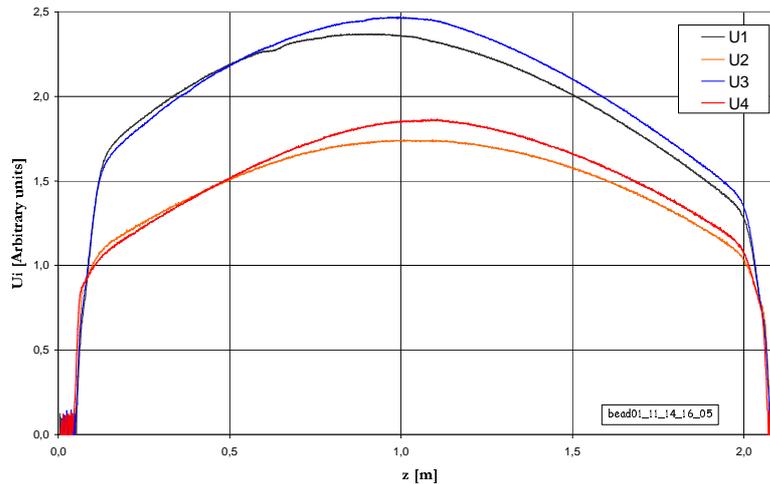


figure 39 : distribution longitudinale des tensions mesurées dans les 4 quadrants du premier mode dipolaire dans le RFQ de 2 m sans doigts

La mesure par perturbation du profil de tension du premier mode dipolaire longitudinal confirme que ce mode était désadapté aux extrémités (figure 39). Au lieu d'être nulles dans le cas de l'adaptation, les pentes des 4 tensions à l'extrémité :

- #1 sont positives : $s_1 = \frac{1}{U_1} \frac{\partial U_1}{\partial z} > 0$;
- #2 sont négatives : $s_2 = \frac{1}{U_2} \frac{\partial U_2}{\partial z} < 0$.

En se référant au schéma électrique équivalent que nous avons introduit, les susceptances terminales équivalentes $S_{L,k}$ sont reliées aux pentes des tensions s_k par :

- à l'extrémité #1, $S_{L,1} = -\frac{1}{\omega L_S} s_1$
- à l'extrémité #2, $S_{L,2} = -\frac{1}{\omega L_S} s_2$

Le premier mode dipolaire avait été caractérisé dans la maquette de RFQ mesurant 1 mètre avec et sans doigt (référence [I]). Sans doigt, le premier mode dipolaire était situé à 346,9 MHz, valeur supérieure à celle donnée par Superfish de 339,8 MHz.

Dans le RFQ de 2 mètres étudié dans ce document, la fréquence du premier mode dipolaire située à 342,25 MHz est également supérieure à celle du modèle.

Pour les 2 longueurs de RFQ testées, $s_1 > 0$ et $s_2 < 0$ et donc $S_{L1} < 0$ et $S_{L2} < 0$. Les charges terminales équivalentes sont donc inductives. Les doigts diminuent la composante inductive des charges terminales et permettent ainsi de redresser les pentes des tensions aux extrémités.

4.2.4 Insertion et ajustement de la longueur des doigts

Une fois les doigts insérés dans la maquette de RFQ de 2 mètres présentant une électrode unique, les fréquences des modes dipolaires se sont toutes déplacées vers des valeurs inférieures. Les longueurs nominales calculées par simulations électromagnétiques sous Mafia (référence [II]) sont de 150 mm.

Pour ces longueurs de doigts, les fréquences des modes dipolaires sont inférieures à celles du modèle. Nous avons ajusté ces longueurs de manière à rapprocher les fréquences mesurées et théoriques (Tableau 6).

	fréquence D1 [MHz]	fréquence D2 [MHz]	fréquence Q1 [MHz]	fréquence Q2 [MHz]	fréquence D3 [MHz]	fréquence Q3 [MHz]	fréquence D4 [MHz]
modèle	339,1	347,2	350,8	358,6	370,4	381,2	406,3
longueur nominale	337,3	342,4	350,6	358,55	361,15	381	387,3
-5 mm	338,3	344,3	350,6	358,6	363,5	381	391
-10 mm	338,8	345,4	350,6	358,6	364,9	381	393,2
-20 mm	339,7	347,5	350,6	358,6	367,8	381	398

Tableau 6 : fréquences des premiers modes dipolaires et quadripolaires en fonction de la longueur des doigts

Avec une réduction de la longueur des doigts de 20 mm, la fréquence des 2 premiers modes dipolaires D1 et D2 sont légèrement supérieures à celles du modèle (figure 40 et figure 41). C'est un compromis choisi de manière à rapprocher les fréquences des 2 modes dipolaires suivants du modèle (figure 42 et figure 43).

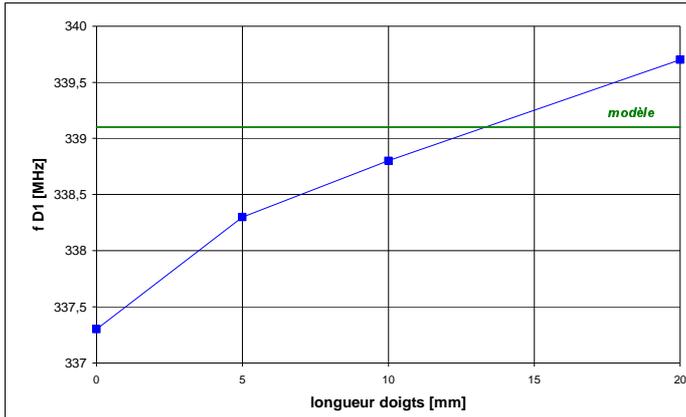


figure 40 : fréquence du premier mode dipolaire en fonction de la longueur retirée aux doigts

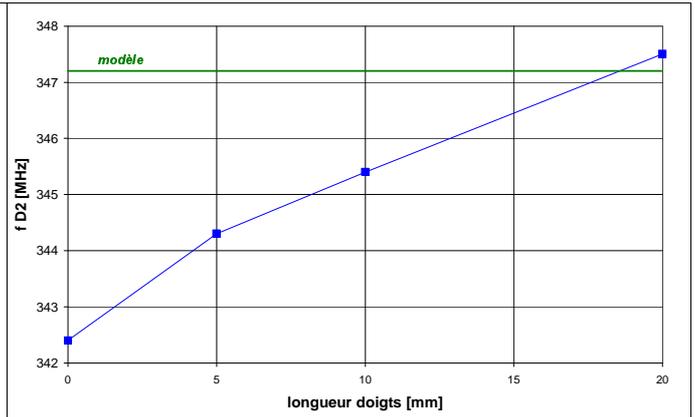


figure 41 : fréquence du deuxième mode dipolaire en fonction de la longueur retirée aux doigts

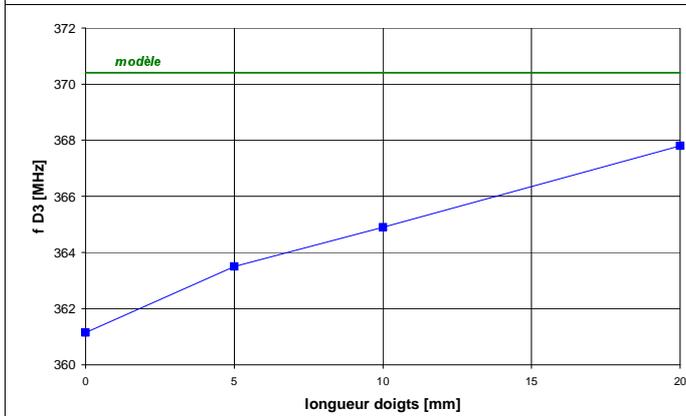


figure 42 : fréquence du troisième mode dipolaire en fonction de la longueur retirée aux doigts

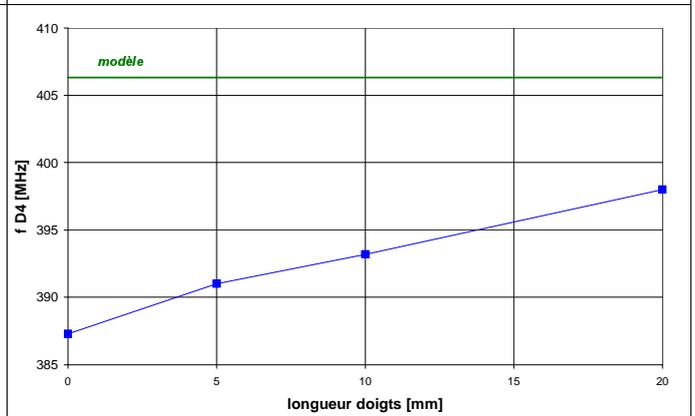


figure 43 : fréquence du quatrième mode dipolaire en fonction de la longueur retirée aux doigts

Nous avons mesuré la distribution longitudinale des tensions dans les 4 quadrants du 1^{ier} mode dipolaire avec les doigts raccourcis de 20 mm (figure 44). On constate que les pentes des tensions se sont nettement redressées. A l'extrémité #1, elles sont pratiquement nulles. Il subsiste une certaine pente négative à l'extrémité #2. Cette dissymétrie est due aux déséquilibres de la région principale du RFQ qui n'ont pas été compensés à l'aide des pistons d'accord. En ajustant la longueur des doigts de manière à faire correspondre les fréquences des modes dipolaires mesurés avec celles du modèle, on a donc réglé les charges terminales équivalentes vues par les premiers modes dipolaires.

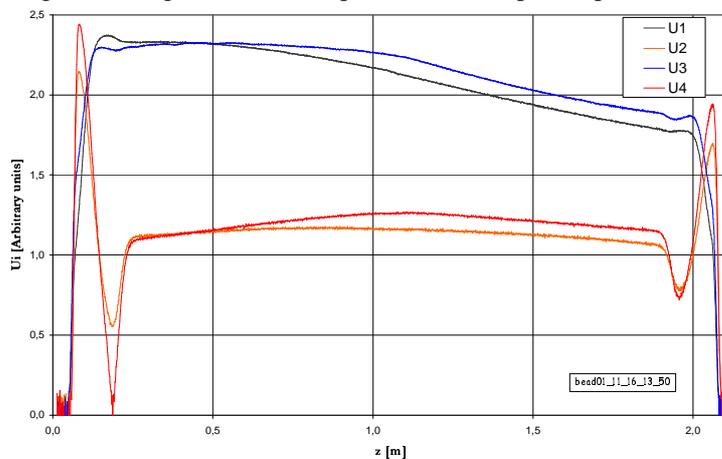


figure 44 : distribution longitudinale des tensions mesurées dans les 4 quadrants du premier mode dipolaire dans le RFQ de 2 m avec les doigts aux longueurs ajustées

5 Obtention du réglage

Deux tests du réglage d'un profil constant ont été réalisés :

1. Le premier avait comme consigne de fréquence du mode accélérateur $fQ=352,2$ MHz, celle du cahier des charges du projet IPHI.
2. Le deuxième réglage à $fQ=350,8$ MHz a permis d'équilibrer le RFQ à la fréquence calculée théoriquement quand les pistons affleurent la surface interne. Cette configuration a permis de tester des déplacements théoriques calculés pour l'obtention d'une loi variable (référence [III]).

5.1 Réglage d'un profil constant à 352,2 MHz

5.1.1 Paramètres du réglage

Pour ce réglage :

1. Les doigts de réglage des modes dipolaires étaient insérés aux 2 extrémités, avec une longueur diminuée de 20 mm par rapport au nominal.
2. 32 pistons ont été déplacés l'ensemble des pistons du tronçon "B", les plans transverses de pistons 1, 3, 5 et 7 du tronçon "A".
3. La fréquence du mode quadripolaire visée était 352,2 MHz.
4. Chaque itération a considéré l'ensemble des fonctions de commande QQ, SQ et TQ.
5. Le gain unitaire systématiquement appliqué a été baissé à 0,5 lors de la dernière itération.

Tableau 7 : paramètres du réglage du profil constant à 352,2 MHz

	Fonctions de commande considérées	Gain G	Fichier de mesure
Pistons affleurants			<i>Bead01_11_16_14_15</i>
Après les 1 ^o déplacements des pistons déduits de <i>Bead01_11_19_14_15</i>	4 premières fonctions de commande QQ, SQ et TQ	1	<i>Bead01_11_16_14_58</i>
Après les 2 ^o déplacements des pistons déduits de <i>Bead01_11_16_14_58</i>	toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ	1	<i>Bead01_11_16_15_51</i>
Après les 3 ^o déplacements des pistons déduits de <i>Bead01_11_16_15_51</i>	toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ	1	<i>Bead01_11_19_09_46</i>
Après les 4 ^o déplacements des pistons déduits de <i>Bead01_11_19_09_46</i>	toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ et SSTT	0,5	<i>Bead01_11_19_11_18</i>

5.1.2 Evolution de la fréquence du mode accélérateur

Tableau 8 : évolution des fréquences de résonance des modes quadripolaire Q et dipolaires S et T

Fichier de mesure	Fréquence du mode accélérateur fQ	Fréquence du mode dipolaire fS	Fréquence du mode dipolaire fT
Pistons affleurants	350,625 MHz	339,765 MHz	340,156 MHz
Après la 1 ^{ière} itération	352,545 MHz	341,565 MHz	341,914 MHz
Après la 2 ^{ième} itération	352,075 MHz	341,132 MHz	341,49 MHz
Après la 3 ^{ième} itération	352,075 MHz	341,289 MHz	341,638 MHz
Après la 4 ^{ième} itération	352,199 MHz	341,278 MHz	341,609 MHz

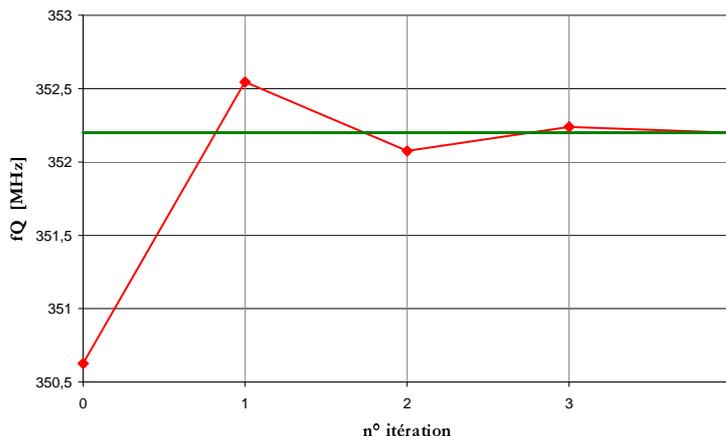


figure 45 : évolution de la fréquence de résonance du mode accélérateur au cours des 4 itérations de réglage

La fréquence de résonance du mode accélérateur a parfaitement convergé vers les 352,2 MHz visés (figure 45).

5.1.3 Composante quadripolaire de la tension accélératrice

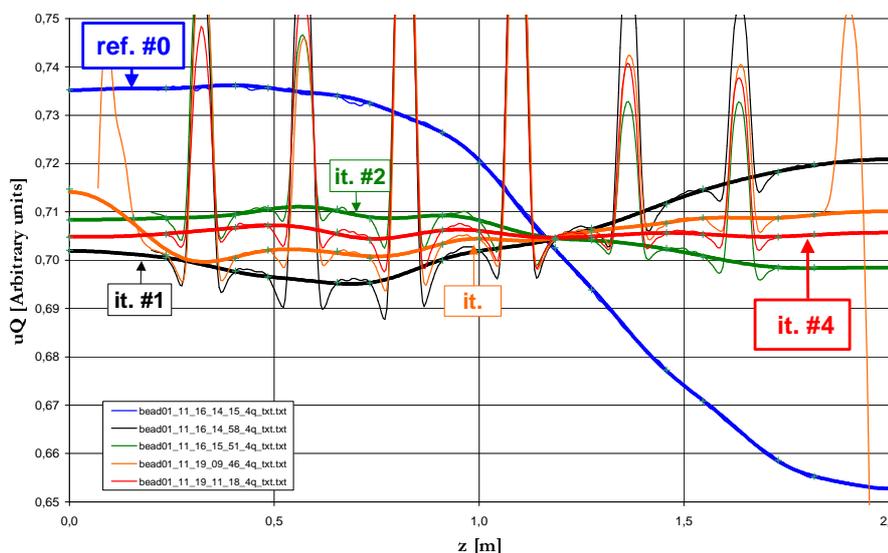


figure 46 : évolution de la distribution longitudinale de tension uQ au cours des 4 itérations de réglage

Chaque itération a rapproché la distribution longitudinale de la composante quadripolaire de la tension accélératrice d'un profil constant (figure 46).

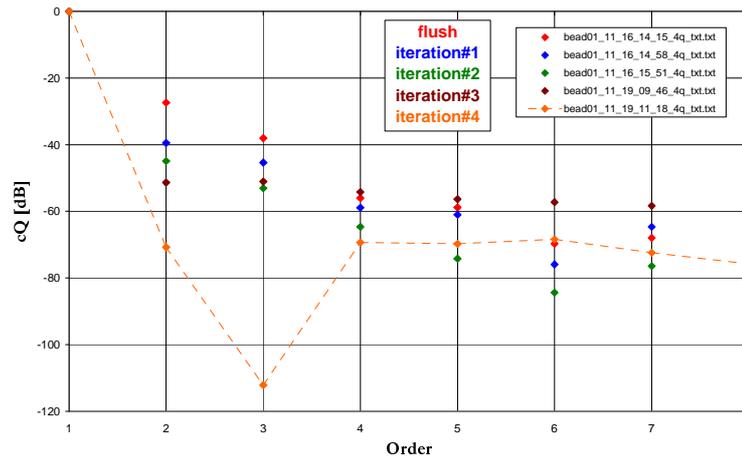


figure 47 : composantes spectrales cQ

A chaque itération de réglage, les différents coefficients modaux $cQ(i)$ de la projection de la composante quadripolaire de la tension sur la base de contrôle ont diminué (figure 47). Après les derniers déplacements de pistons, tous les coefficients d'ordre supérieur à 1 sont à -70 dB par rapport au premier ordre modal, le mode accélérateur.

5.1.4 Distribution longitudinales des composantes dipolaires de la tension accélératrice

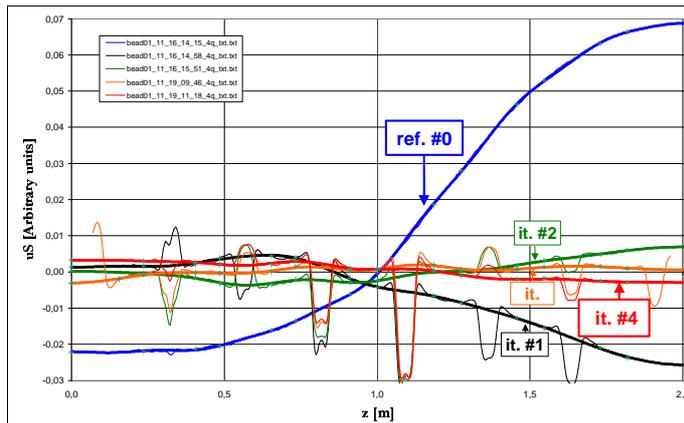


figure 48 : évolution de la distribution longitudinale de tension uS au cours des 4 itérations de réglage

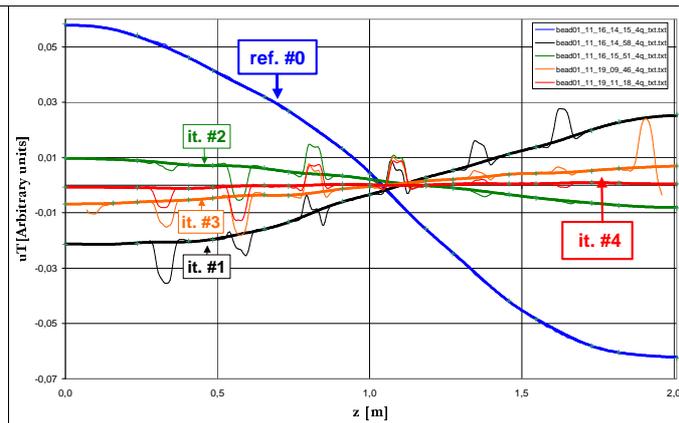


figure 49 : évolution de la distribution longitudinale de tension uT au cours des 4 itérations de réglage

A chaque itération de réglage, les distributions longitudinales des composantes dipolaires uS et uT de la tension accélératrice se sont rapprochés d'un profil constant et nul (figure 48 et figure 49).

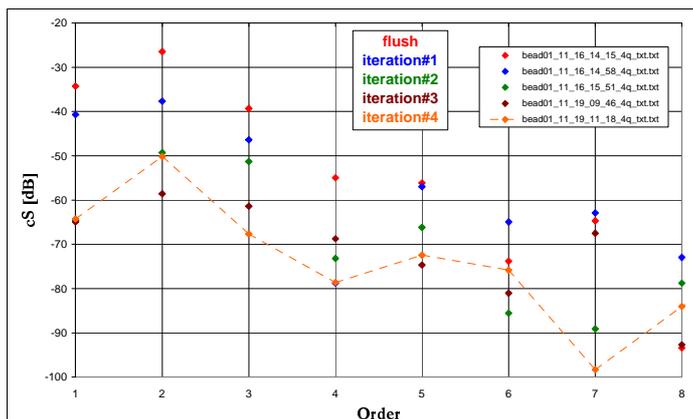


figure 50 : composantes spectrales cS

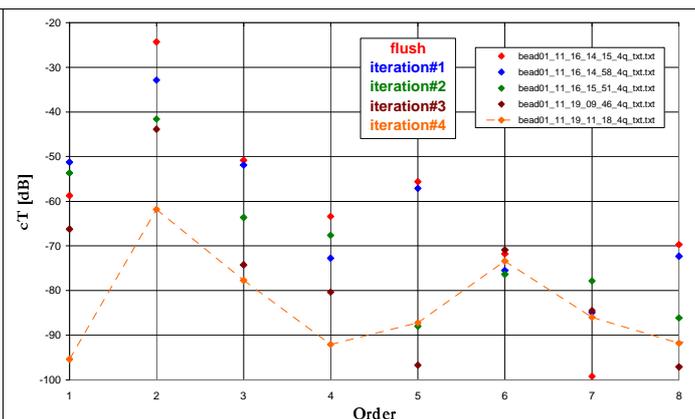


figure 51 : composantes spectrales cT

5.1.5 Rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice

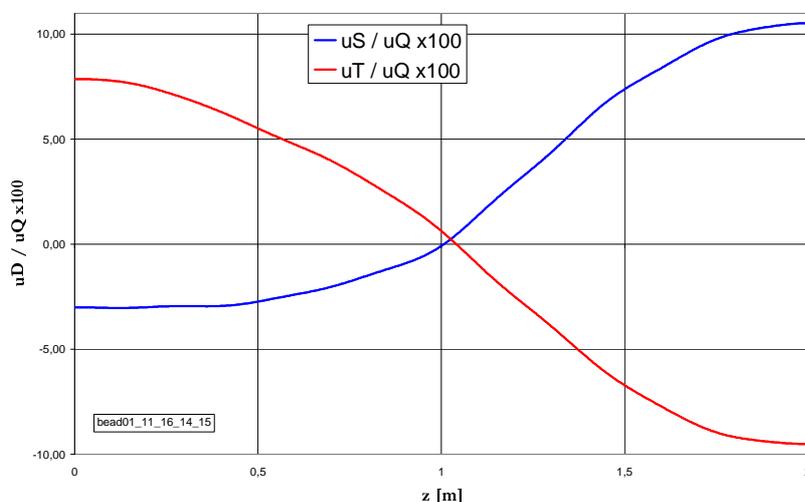


figure 52 : distribution longitudinale du rapport entre les composantes dipolaires S et T et la composante quadripolaire de la tension accélératrice avec les pistons affleurants

Initialement les rapports entre composantes dipolaires et quadripolaires atteignent des valeurs extrêmes de $\pm 10 \cdot 10^{-2}$.

Tableau 9 : évolution du rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice

	Fichier de mesure	Min(uD / uQ)	Max(uD / uQ)
Référence: pistons affleurants	Bead01_11_16_14_15	$-9,5 \cdot 10^{-2}$	$10,5 \cdot 10^{-2}$
Après la 1 ^{ière} itération	Bead01_11_16_14_58	$-3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Après la 2 ^{ième} itération	Bead01_11_16_15_51	$-1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Après la 3 ^{ième} itération	Bead01_11_19_09_46	$-9,5 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$
Après la 4 ^{ième} itération	Bead01_11_19_11_18	$-4,1 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$

Chaque itération diminue la présence des composantes dipolaires dans la tension accélératrice. Au bout de 3 itérations, on est passé en deçà du seuil de $\pm 10^{-2}$. Après la 4^{ième} itération, en toute position longitudinale $|uD / uQ| < 5 \cdot 10^{-3}$.

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

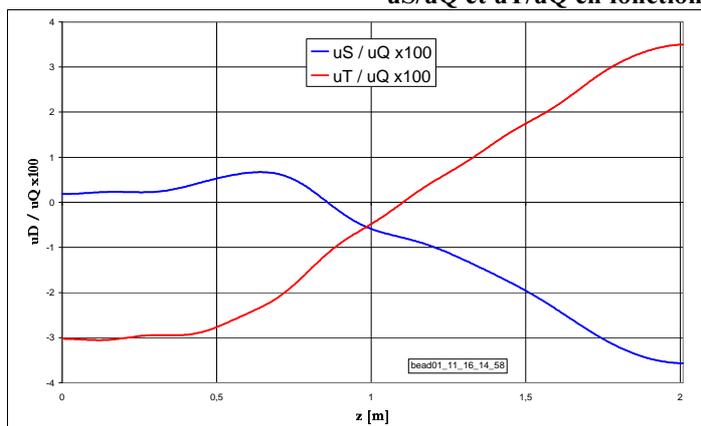


figure 53 : après la 1^{ière} itération

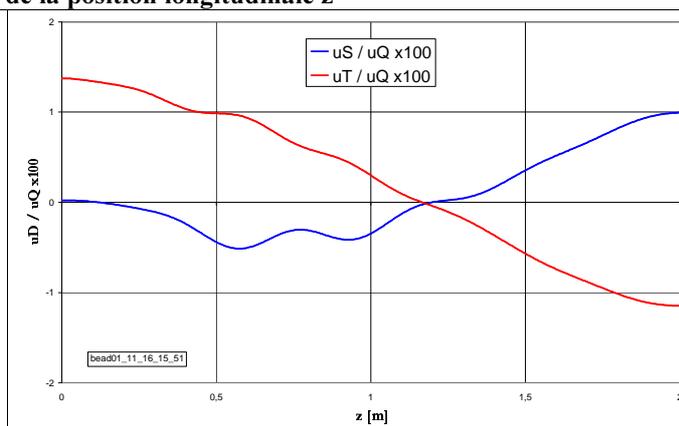


figure 54 : après la 2^{ième} itération

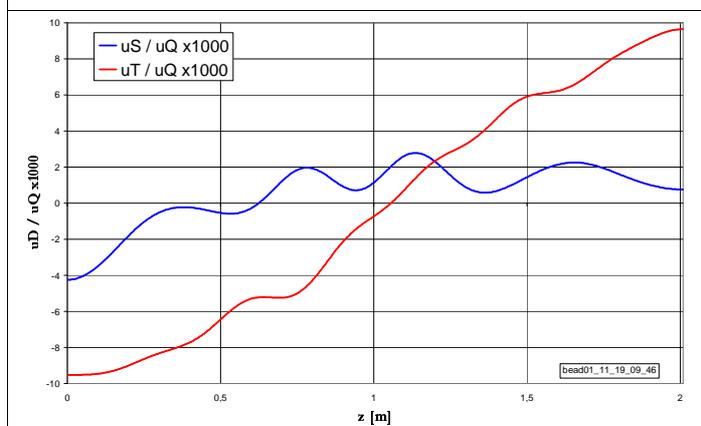


figure 55 : après la 3^{ième} itération

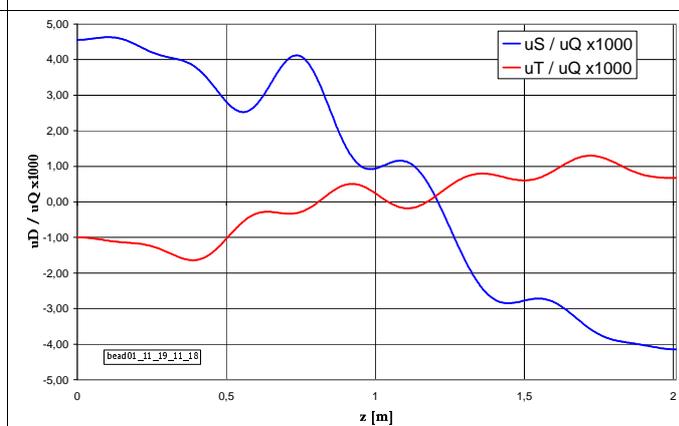


figure 56 : après la 4^{ième} itération

5.1.6 *Écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil constant*

distribution longitudinale des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension Vp constante au cours du réglage

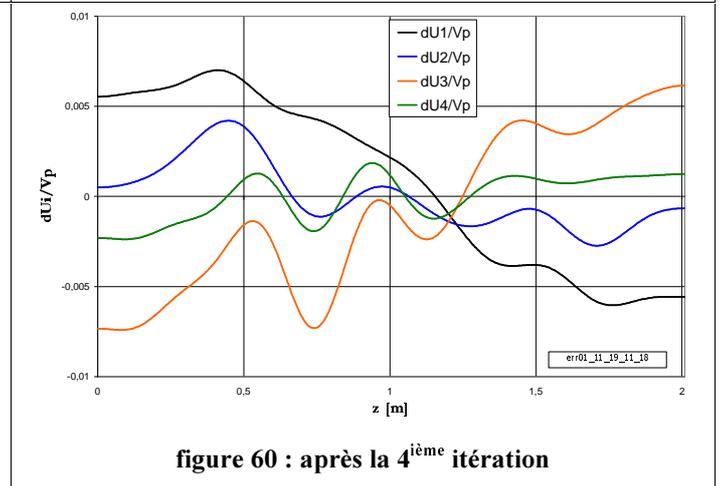
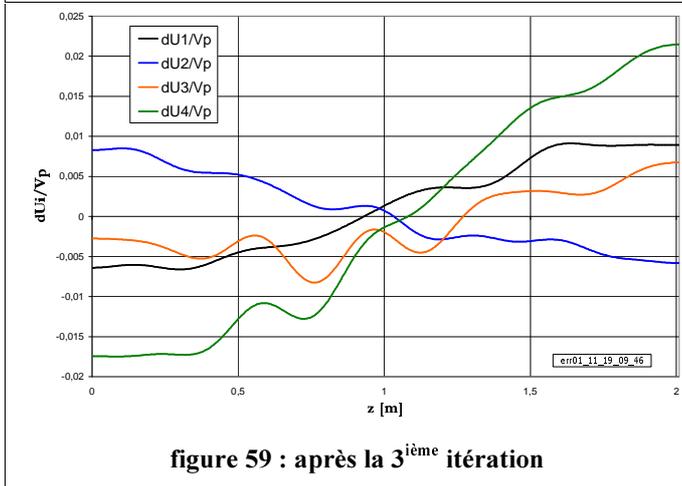
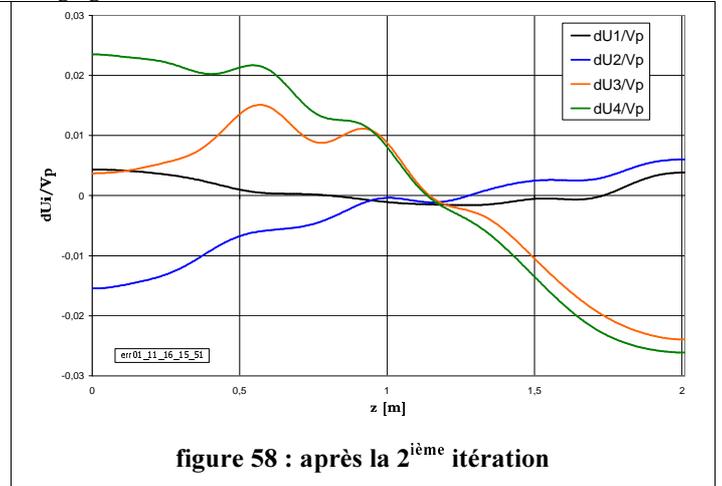
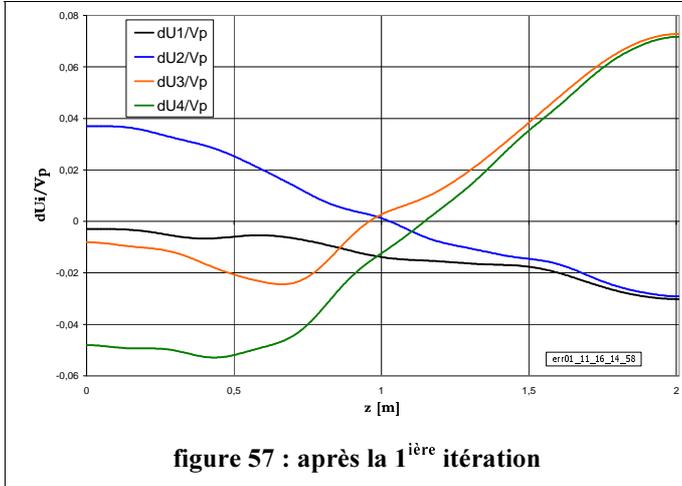


Tableau 10 : Evolution des valeurs extrêmes des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension Vp constante au cours du réglage

	Fichier de mesure	Min(dUi/Vp)	Max(dUi/Vp)
référence	Bead01_11_16_14_15	-21,6.10 ⁻²	15,3.10 ⁻²
Après la 1 ^{ère} itération	Bead01_11_16_14_58	-5,3.10 ⁻²	7,3.10 ⁻²
Après la 2 ^{ème} itération	Bead01_11_16_15_51	-2,6.10 ⁻²	2,4.10 ⁻²
Après la 3 ^{ème} itération	Bead01_11_19_09_46	-1,7.10 ⁻²	2,1.10 ⁻²
Après la 4 ^{ème} itération	Bead01_11_19_11_18	-0,7.10 ⁻²	0,7.10 ⁻²

Les tensions des 4 quadrants ont été calculées à partir des composantes modales uQ, uS et uT en normalisant par rapport à l'énergie totale emmagasinée. Les 4 itérations de réglage ont permis d'obtenir un écart relatif entre les tensions des 4 quadrants et un profil constant inférieur à 0,7.10⁻² en tout point du RFQ.

5.1.7 Positions finales des pistons d'accord

Tableau 11 : positions des pistons après les 4 itérations de réglage

	1	2	3	4	5	6	7	8
Q1	6,92	4,05	5,66	5,54	3,24	4,27	2,98	0,74
Q2	4,93	4,86	6,17	6,11	5,10	3,14	3,20	- 0,41
Q3	2,85	4,83	4,41	9,60	10,53	3,78	4,40	3,94
Q4	3,93	2,72	2,72	7,73	7,28	3,61	2,76	3,98

min = -0,41 max = 10,53 moyenne = 4,55

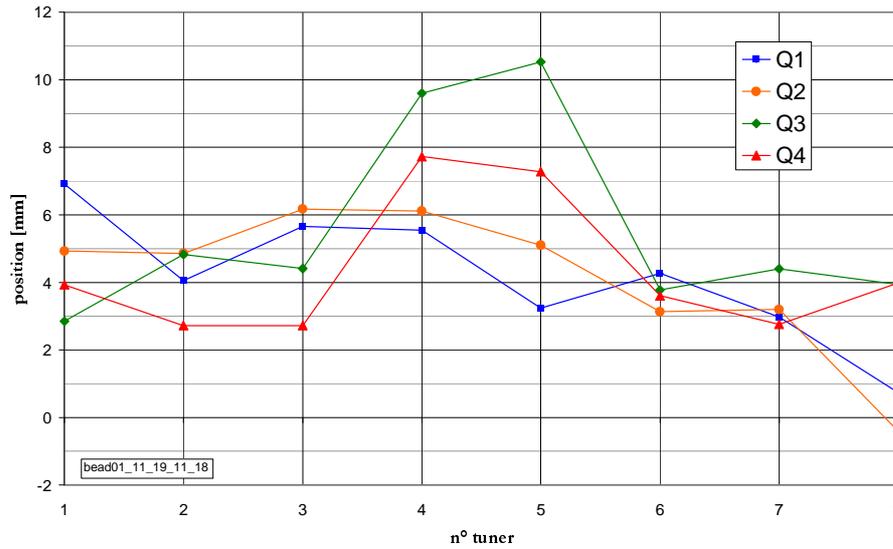


figure 61 : positions des pistons après les 4 itérations de réglage d'une loi constante (fQ=352,2 MHz)

La moyennes des positions des pistons obtenues après les 4 itérations de réglage est de 4,55 mm. On observe des valeurs nettement plus importantes pour les 4^{ième} et 5^{ième} plan de pistons déplacés des quadrants 3 et 4 (pistons A7 et B1 de la figure 62).

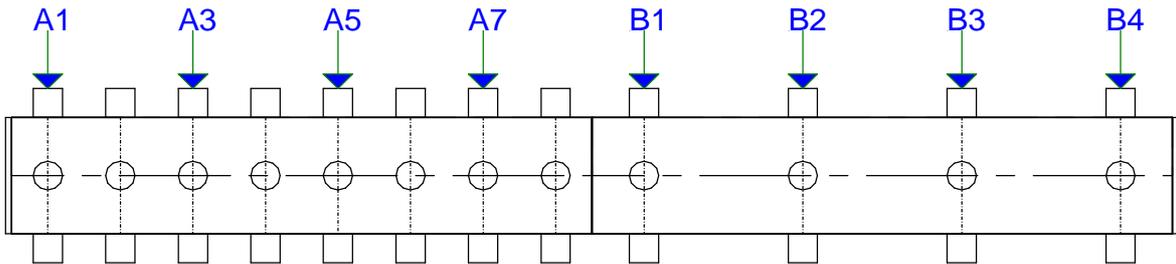


figure 62 : distribution des plans de pistons déplacés

5.2 Réglage d'une loi constante à 350,8 MHz

Pour ce réglage :

1. Les pistons sont initialement aux positions issues du réglage du RFQ à 352,2 MHz.
2. Les doigts de réglage des modes dipolaires étaient insérés aux 2 extrémités, avec une longueur diminuée de 20 mm par rapport au nominal.
3. 32 pistons ont été déplacés l'ensemble des pistons du tronçon "B", les plans transverses de pistons 1, 3, 5 et 7 du tronçon "A".
4. La fréquence du mode quadripolaire visée était 350,8 MHz.
5. Chaque itération a considéré l'ensemble des fonctions de commande QQ, SQ et TQ sauf la première qui n'a commandé que la fréquence du mode quadripolaire.
6. Le gain a été de 0,8 sauf pour la dernière itération où il a été baissé à 0,5.

Tableau 12 : paramètres du réglage du profil constant à 350,8 MHz

	Fonctions de commande considérées	Gain G	Fichier de mesure
RFQ réglé à 352,2 MHz			<i>Bead01_11_19_11_18</i>
Après les 1° déplacements des pistons déduits de Bead01_11_19_11_18	première fonctions de commande QQ uniquement	0,8	<i>Bead01_11_19_12_07</i>
Après les 2° déplacements des pistons déduits de Bead01_11_19_12_07	toutes les fonctions de commande QQ, SQ, TQ et SSTT	0,8	<i>Bead01_11_19_12_41</i>
Après les 3° déplacements des pistons déduits de Bead01_11_19_12_41	toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ et SSTT	0,8	<i>Bead01_11_19_14_30</i>
Après les 4° déplacements des pistons déduits de Bead01_11_19_14_30	toutes les fonctions de commande QQ, SQ et TQ et SSTT	0,5	<i>Bead01_11_19_15_19</i>

5.2.1 Fréquence du mode accélérateur

Tableau 13 : évolution des fréquences de résonance des modes quadripolaire Q et dipolaires S et T

Fichier de mesure	Fréquence du mode accélérateur fQ	Fréquence du mode dipolaire fS	Fréquence du mode dipolaire fT
Bead01_11_16_14_15	350,894 MHz	340,065 MHz	340,395 MHz
Bead01_11_16_14_58	350,844 MHz	339,997 MHz	340,404 MHz
Bead01_11_16_15_51	350,820 MHz	340,000 MHz	340,332 MHz
Bead01_11_19_09_46	350,812 MHz	339,976 MHz	340,366 MHz
Bead01_11_19_11_18	350,844 MHz	339,997 MHz	340,404 MHz

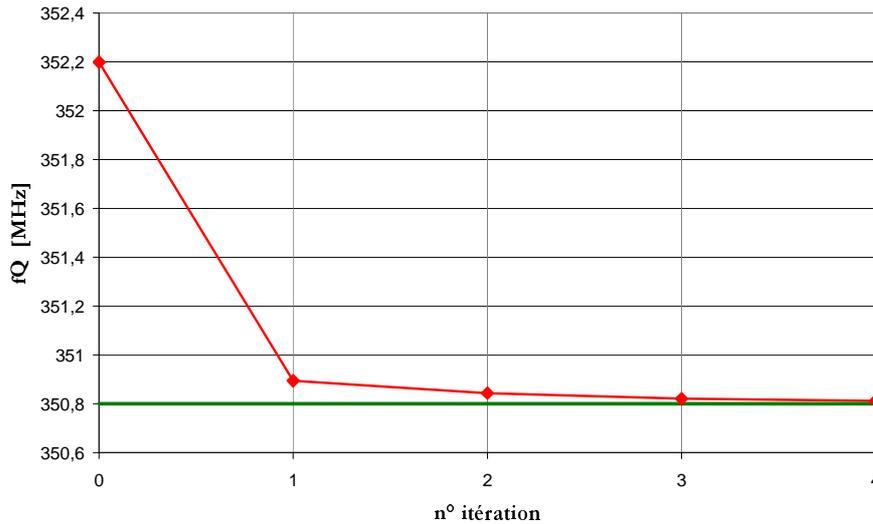


figure 63 : évolution de la fréquence de résonance du mode accélérateur au cours du réglage

5.2.2 Composantes quadripolaire et dipolaires de la tension accélératrice

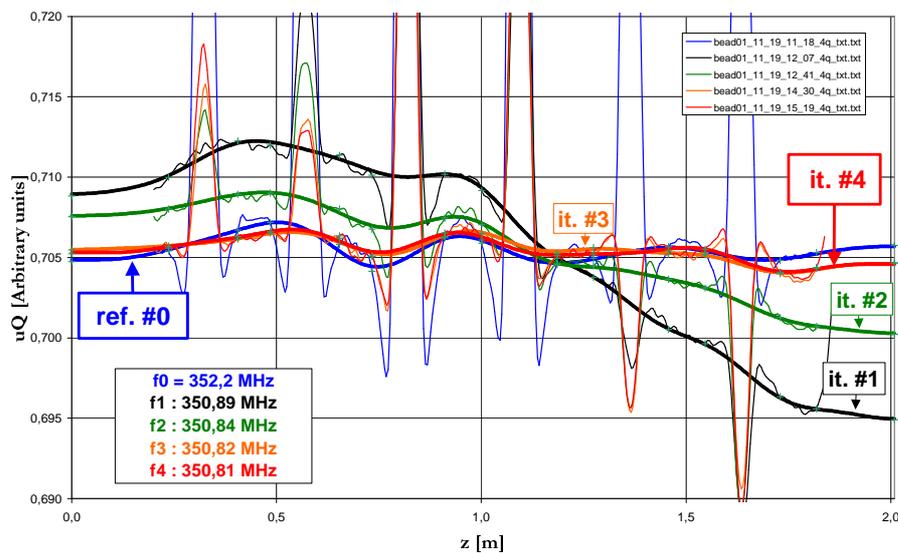


figure 64 : évolution de la distribution longitudinale de composantes de tension uQ au cours des 4 itérations de réglage à 350,8 MHz

Les premiers déplacements qui n'ont considéré que le réglage de la fréquence du mode accélérateur ont dégradé le profil des composantes quadripolaire (figure 64) et dipolaires (figure 65 et figure 66) de la tension accélératrice. Les 3 itérations suivantes ont permis de retrouver un profil constant de ces paramètres.

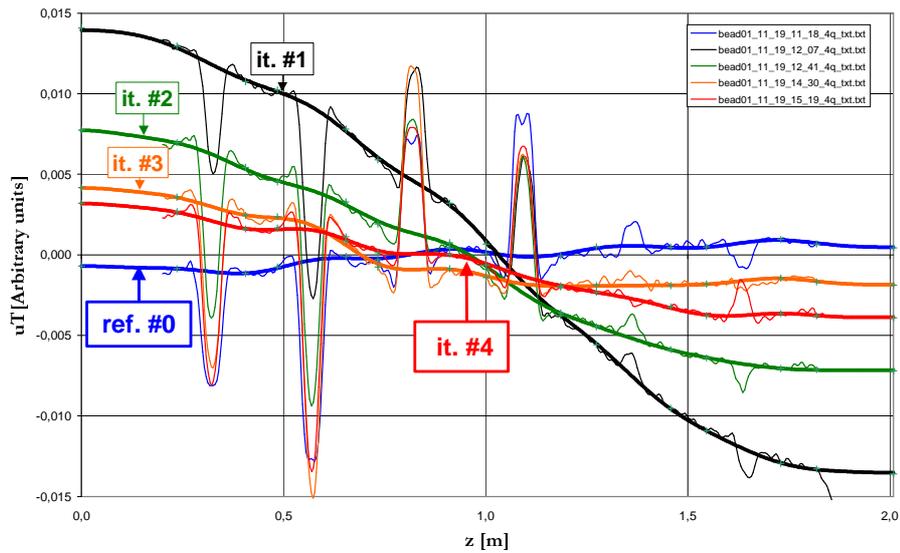


figure 65 : évolution de la distribution longitudinale de la composante de tension uT au cours des 4 itérations de réglage à 350,8 MHz

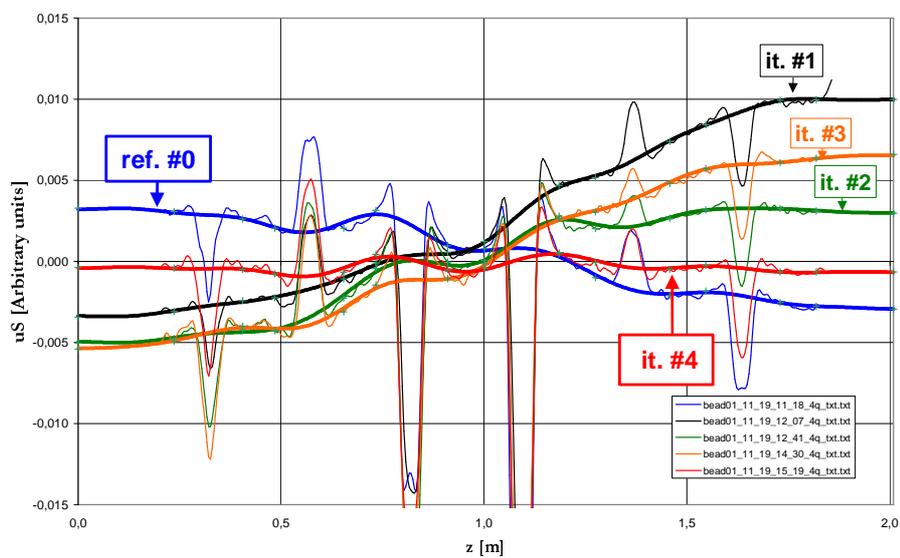


figure 66 : évolution de la distribution longitudinale de composantes de tension uS au cours des 4 itérations de réglage à 350,8 MHz

5.2.3 Rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice

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

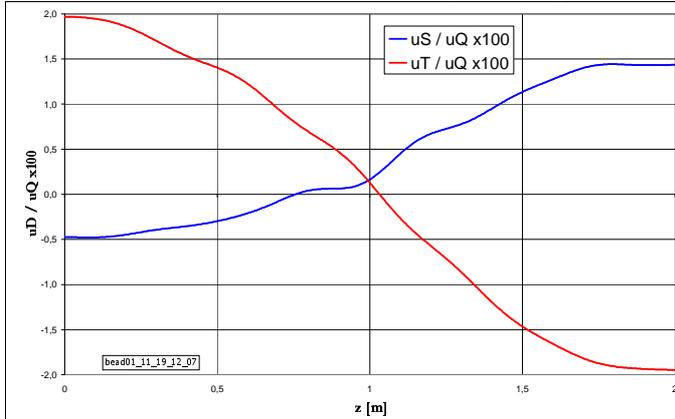


figure 67 : après la 1^{ère} itération

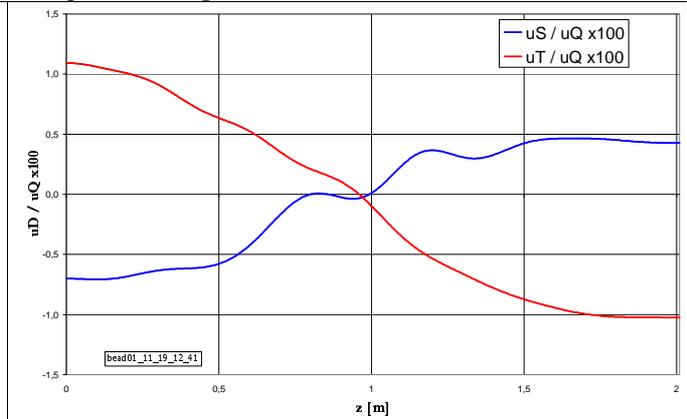


figure 68 : après la 2^{ème} itération

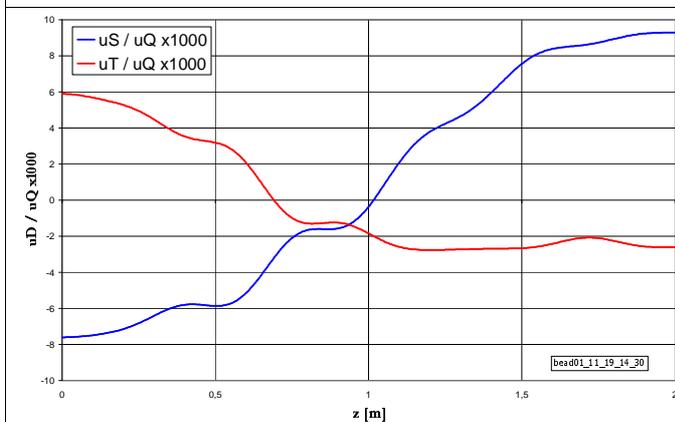


figure 69 : après la 3^{ème} itération

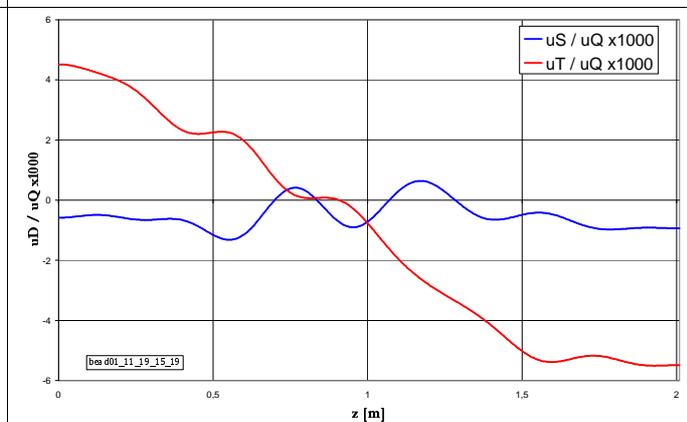


figure 70 : après la 4^{ème} itération

	Fichier de mesure	Min(uD / uQ)	Max(uD / uQ)
Référence: pistons affleurants	bead01_11_19_11_18	-4,1.10 ⁻³	4,6.10 ⁻³
Après la 1 ^{ère} itération	bead01_11_19_12_07	-1,95.10 ⁻²	1,97.10 ⁻²
Après la 2 ^{ème} itération	bead01_11_19_12_41	-1,02.10 ⁻²	1,09.10 ⁻²
Après la 3 ^{ème} itération	bead01_11_19_14_30	-0,76.10 ⁻²	0,93.10 ⁻²
Après la 4 ^{ème} itération	bead01_11_19_15_19	-0,55.10 ⁻²	0,45.10 ⁻²

Tableau 14 : évolution du rapport entre les composantes dipolaires et quadripolaire de la tension accélératrice au cours des 4 itérations de réglage à 350,8 MHz

Les premiers déplacements ont dégradé la minimisation de présence des composantes dipolaires au sein de la tension accélératrice qu'on avait obtenue lors du test précédent. 3 itérations ont suffi à satisfaire le critère $|uD / uQ| < 10^{-2}$.

5.2.4 Ecarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil constant

distribution longitudinale des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension Vp constante au cours du réglage à 350,8 MHz

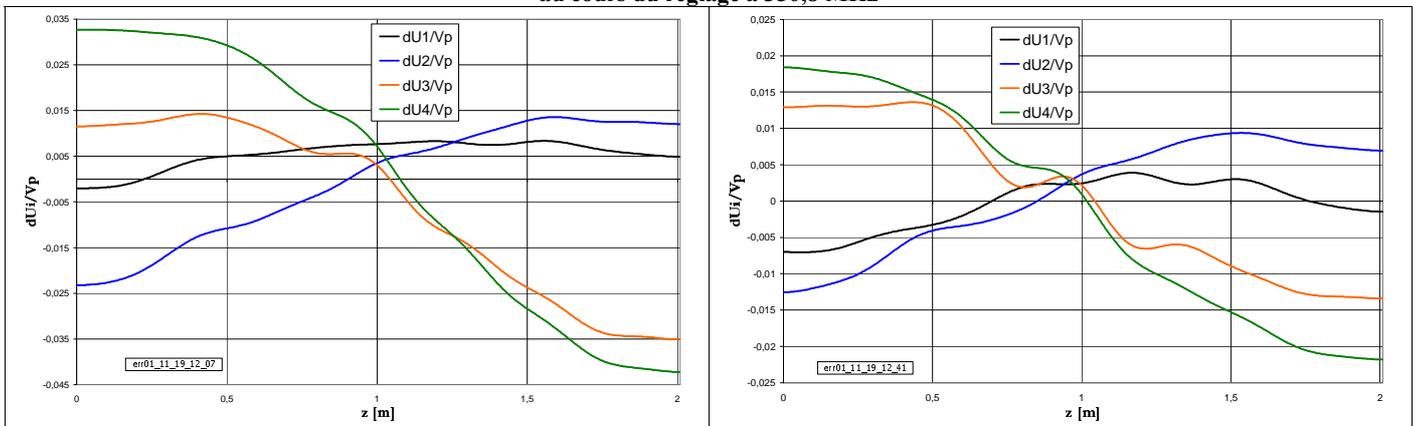


figure 71 : après la 1^{ère} itération

figure 72 : après la 2^{ème} itération

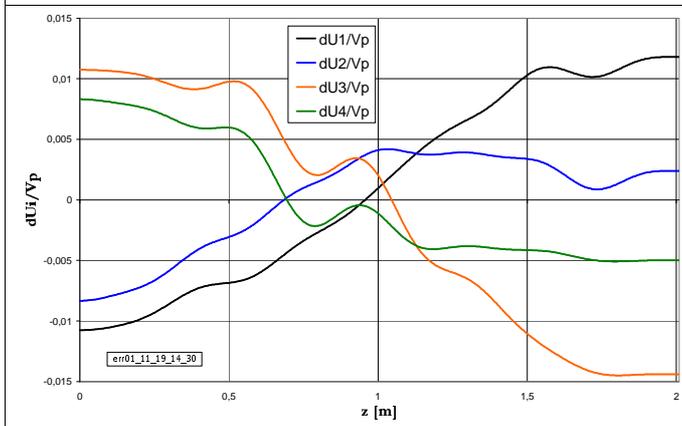


figure 73 : après la 3^{ème} itération

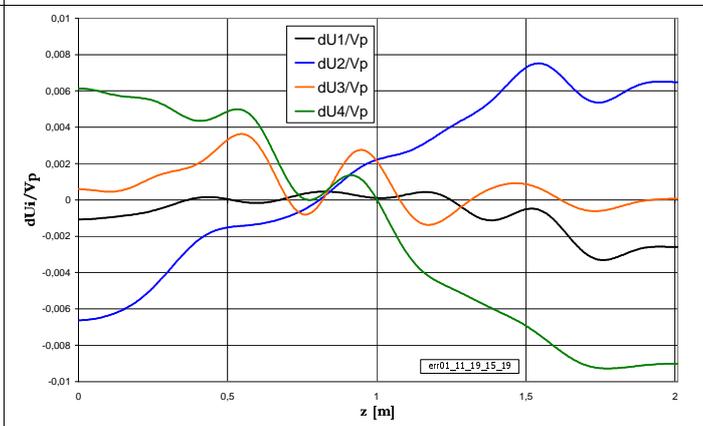


figure 74 : après la 4^{ème} itération

Tableau 15 : Evolution des valeurs extrêmes des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension Vp constante au cours du réglage à 350,8 MHz

	Fichier de mesure	min(dUi/Vp)	max(dUi/Vp)
RFQ réglé à 352,2 MHz	bead01_11_19_11_18	-0,007	0,007
Après la 1 ^{ère} itération	bead01_11_19_12_07	-0,042	0,033
Après la 2 ^{ème} itération	bead01_11_19_12_41	-0,022	0,018
Après la 3 ^{ème} itération	bead01_11_19_14_30	-0,014	0,012
Après la 4 ^{ème} itération	bead01_11_19_15_19	-0,009	0,008

Les 4 itérations de réglage ont permis d'obtenir un écart relatif entre les tensions des 4 quadrants et un profil constant inférieur à $0,9 \cdot 10^{-2}$ en tout point du RFQ.

5.2.5 Positions finales des pistons

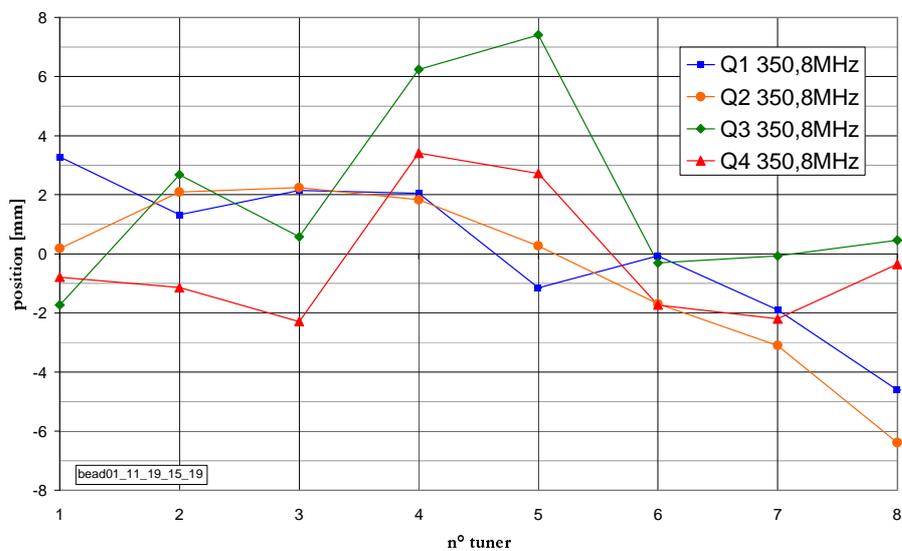


figure 75 : positions des pistons après les 4 itérations de réglage d'une loi constante ($f_Q=350,8$ MHz)

Tableau 16 : positions des pistons après 4 itérations de réglage d'un profil de tension constant à $f_Q=350,8$ MHz

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

min = - 6,39

max = 7,41

moyenne = 0,29

La moyenne des positions des pistons obtenues après les 4 itérations de réglage est de 0,29 mm. De même que pour le réglage à 352,2 MHz, les positions des 4^{ème} et 5^{ème} plans de pistons déplacés prennent des valeurs nettement plus importantes dans les quadrants 3 et 4.

5.3 Comparaison des positions finales des pistons dans le RFQ réglé à 352,2 MHz et à 350,8 MHz

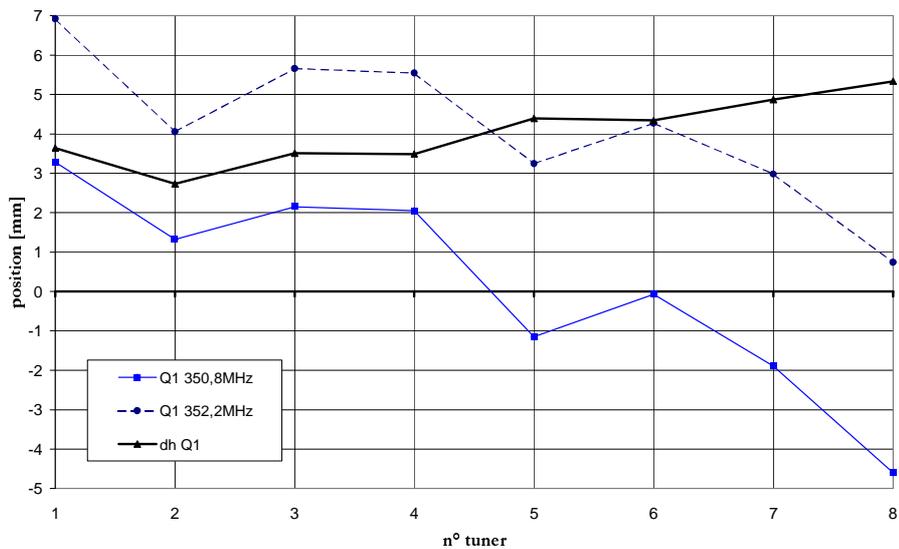


figure 76 : quadrant 1

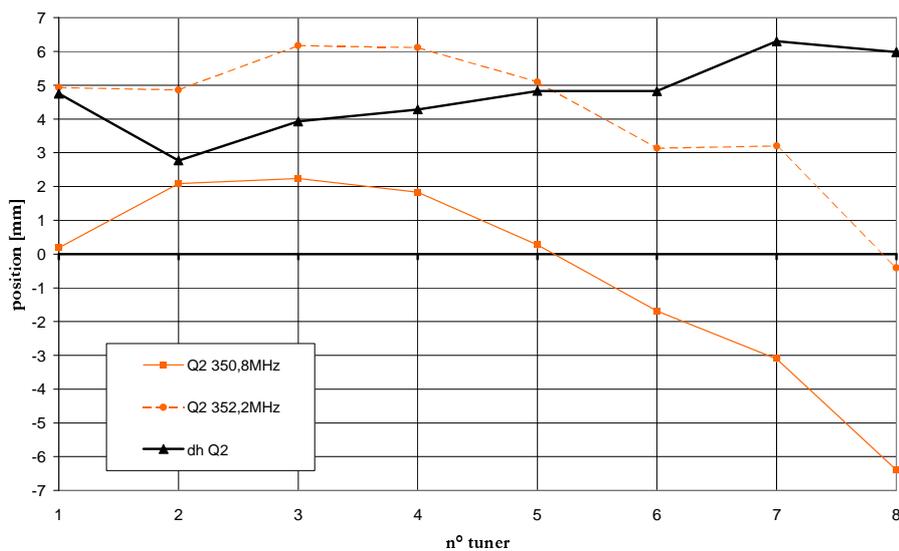


figure 77 : quadrant 2

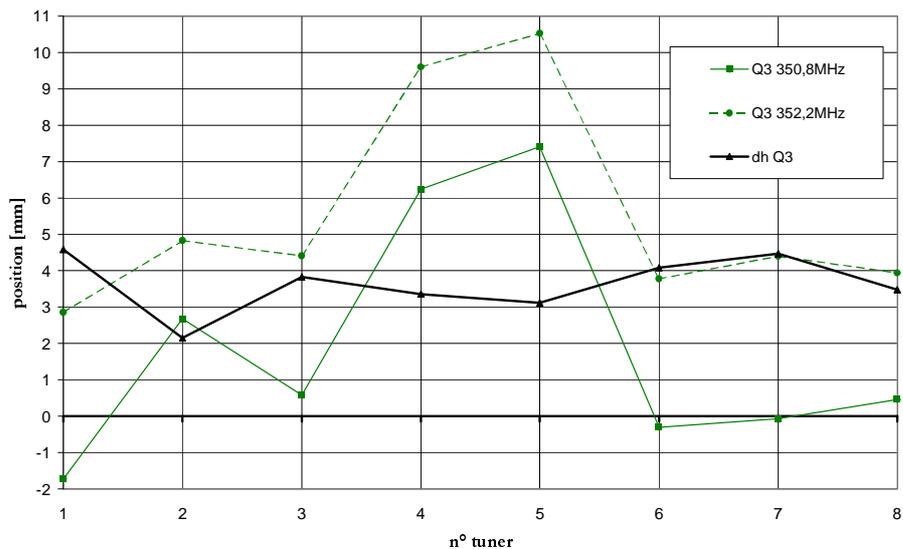


figure 78 : quadrant 3

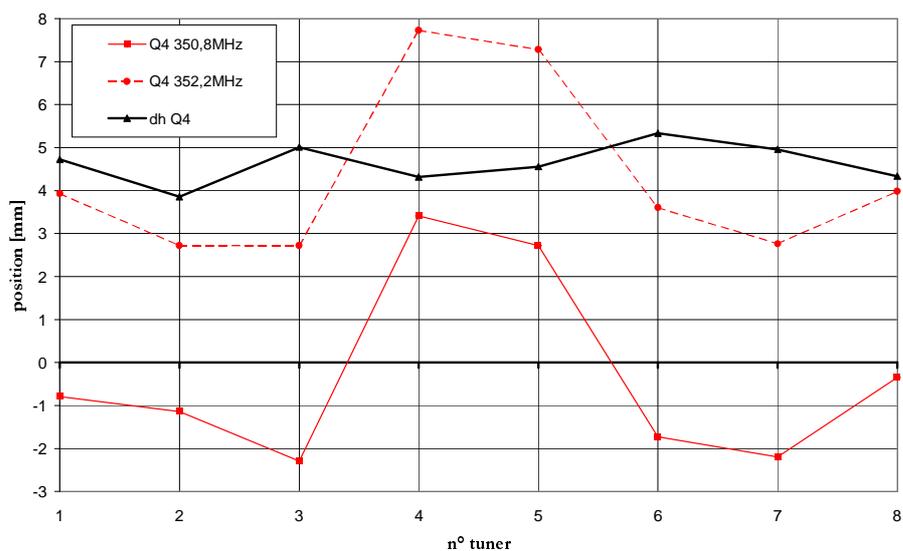


figure 79 : quadrant 4

Les positions finales des pistons issues du réglage à 352,2 MHz sont globalement les images par translation de 4,25 mm vers l'intérieur de la cavité de celles issues du réglage à 351,5 MHz (figure 76 à figure 79).

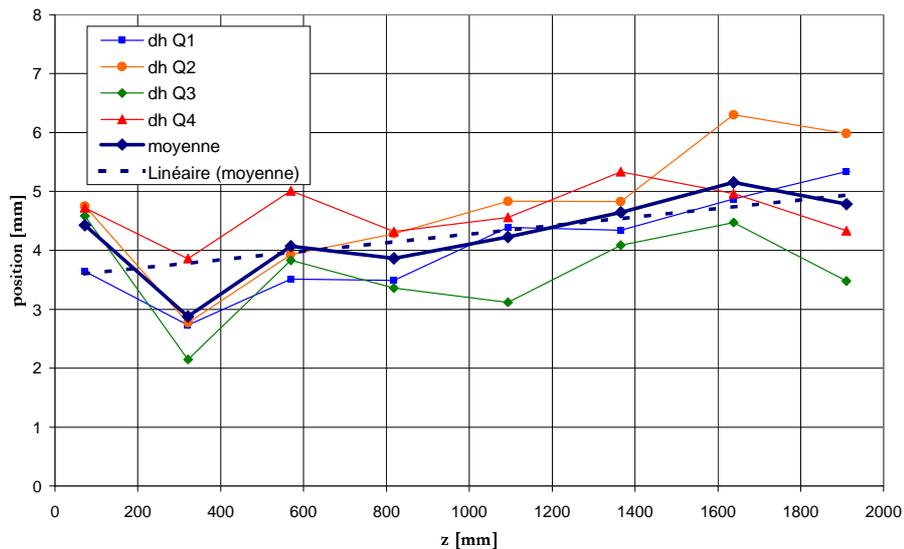


figure 80 : différences par quadrant des positions finales à 352,2 MHz et 350,8 MHz

Quadrant	écart-type [mm]
Q1	0,85
Q2	1,12
Q3	0,79
Q4	0,47

On observe cependant une dispersion entre les écarts des positions finales plus ou moins prononcée selon les quadrants (tableau ci-dessus). Cette dispersion s'explique par les non-linéarités du problème: premièrement, il s'agit d'un problème aux valeurs propres et deuxièmement, l'opérateur dépend de façon non-linéaire des principaux paramètres de réglage (les inductances de ligne).

6 Importance du gain

Un gain G choisi par l'opérateur est appliqué à l'ensemble des déplacements des pistons issus de l'analyse (figure 81). Il est généralement choisi inférieur à l'unité afin d'éviter que le réglage ne diverge.

Nous avons réalisé 2 tests de déplacement des pistons qui illustrent l'importance de G dans la boucle d'asservissement que représente la procédure de réglage (figure 81).

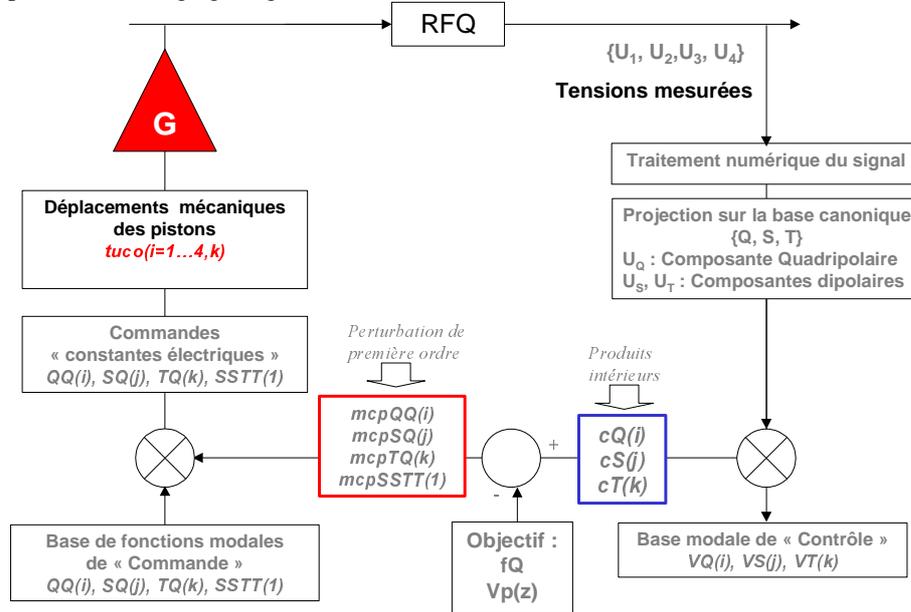


figure 81 : ajustement du gain de la boucle d'asservissement du réglage des pistons

Les commandes de pistons de réglage d'une loi de tension constante ont été déduites de mesures de référence où tous les pistons sont affleurants.

6.1 Gains 0,5 et 0,95

Pour ce test, seules les 6 premières fonctions de commande QQ ont été considérées.

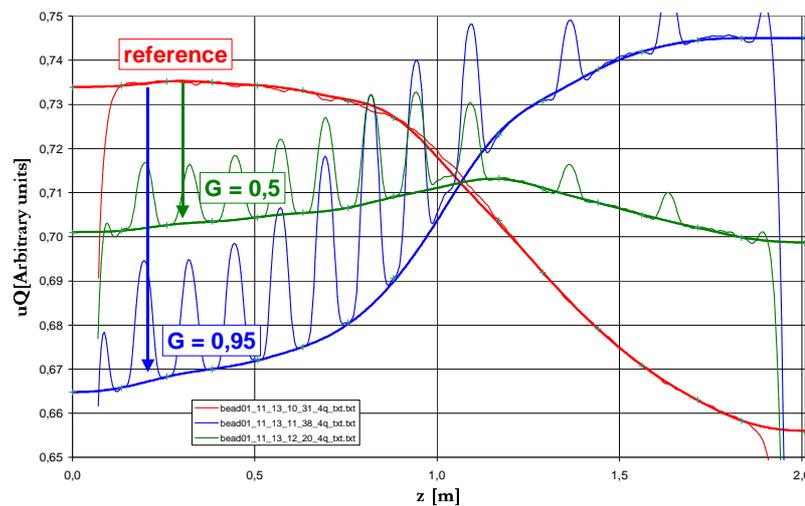


figure 82 : profils longitudinaux des composantes quadripolaires de tensions après une itération de réglage déduite d'une mesure de référence avec un gain 0,95 ou 0,5

La distribution de la composante quadripolaire s'est rapproché d'un profil constant avec le gain de 0,5 (figure 82). Le gain de 0,95 est notablement trop important : la distribution de la composante quadripolaire a basculé au-delà d'un profil constant.

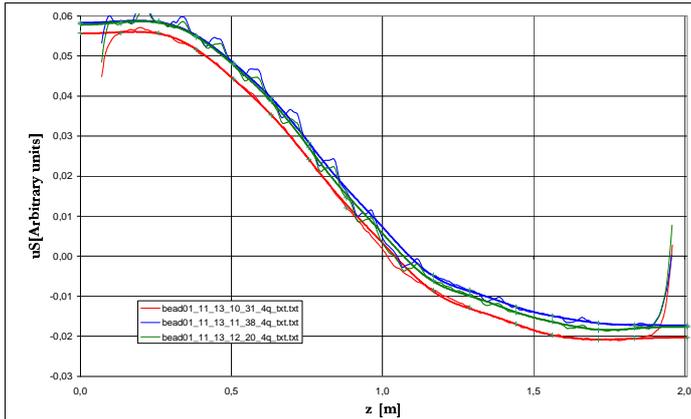


figure 83 : uS après une itération de réglage déduite d'une mesure de référence avec un gain 0,95 ou 0,5

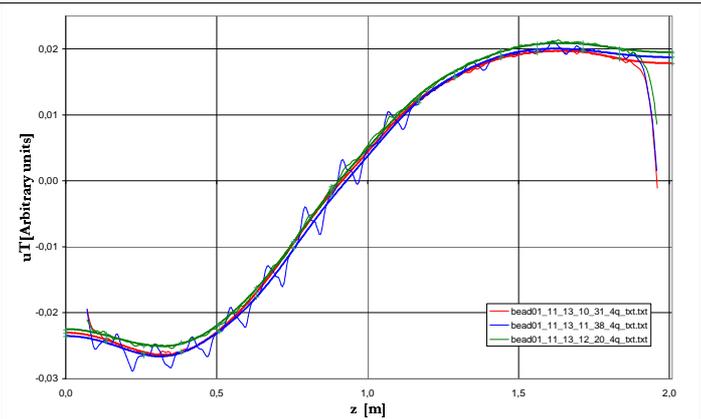


figure 84 : uT après une itération de réglage déduite d'une mesure de référence avec un gain 0,95 ou 0,5

Les distributions longitudinales des composantes dipolaires de la tension accélératrice n'ont pas été modifiées par les déplacements de pistons. En effet on n'a considéré pour ce test que les fonctions de commandes modales quadripolaires.

distribution longitudinale des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil longitudinal de tension Vp constante

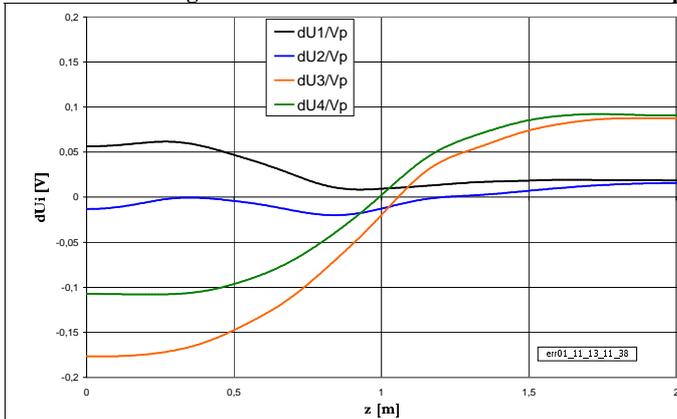


figure 85 : après une itération de réglage avec G = 0,95

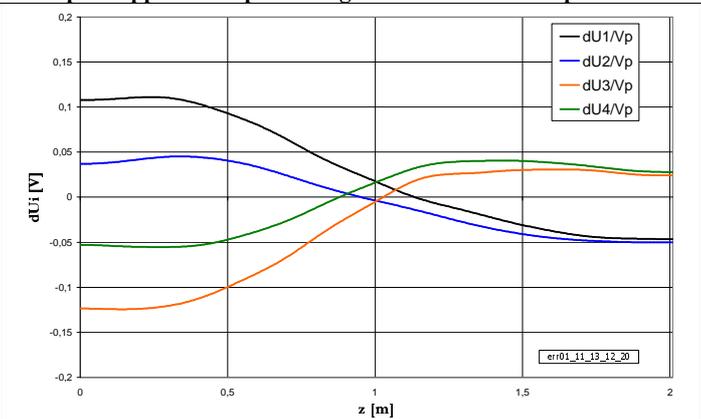


figure 86 : après une itération de réglage avec G = 0, 5

	Min(dUi/Vp)	Max(dUi/Vp)	Fichier de mesure
Mesure de référence avec les pistons affleurants	-0,113	0,151	Bead01_11_13_10_31
Gain G = 0,95	-0,177	0,092	Bead01_11_13_11_38
Gain G = 0,5	-0,124	0,111	Bead01_11_13_12_20

Tableau 17 : minima et maxima des écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil de tension constante.

Initialement, avec les pistons affleurants, les écarts relatifs des tensions des 4 quadrants par rapport à un profil constant variaient sur une plage de $26,4 \cdot 10^{-2}$ (Tableau 5).

Le réglage avec un gain de 0,5 a peu diminué l'excursion des défauts, la réduisant à $23 \cdot 10^{-2}$ alors que la distribution de la composante quadripolaire s'est rapproché d'un profil constant. La contribution des déséquilibres des composantes dipolaires prédomine sur l'obtention du réglage des 4 tensions.

⇒ Pour satisfaire le cahier des charges défini selon des critères de dynamique de faisceau, il n'est pas suffisant de vérifier la distribution de la composante quadripolaire de la tension.

6.2 Gains 1 / 0,8

Pour ce test, les 4 premières fonctions de commande QQ, SQ et TQ ont été considérées : toutes les composantes modales de la tension doivent être modifiées. Seul le gain appliqué à l'ensemble des valeurs de déplacements des pistons a varié.

Mesure de référence pistons affleurants	Gain	Mesures après les déplacements des pistons	fQ [MHz]	fS [MHz]	fT [MHz]
Bead01_11_16_14_15	1	Bead01_11_16_14_58	352,545	341,565	341,914
Bead01_11_20_09_08	0,8	Bead01_11_20_10_10	352,108	341,166	341,522

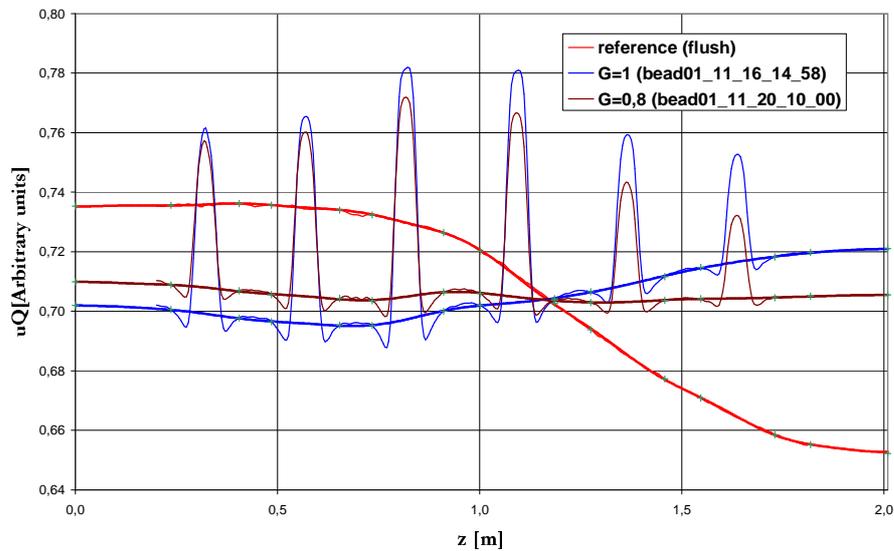


figure 87 : évolution de la composante quadripolaire après une itération de réglage obtenue en appliquant un gain de 1 ou de 0,8

La distribution de la composante quadripolaire est plus proche d'un profil constant avec le gain de 0,8 que de 1 (figure 87).

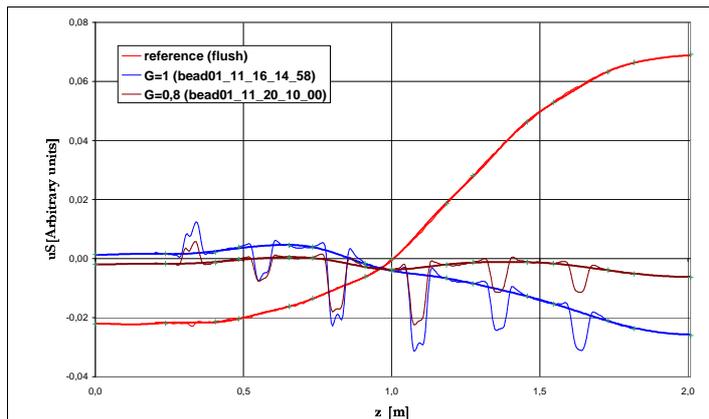


figure 88 : évolution de la composante dipolaire S après une itération de réglage obtenue en appliquant un gain de 1 ou de 0,8

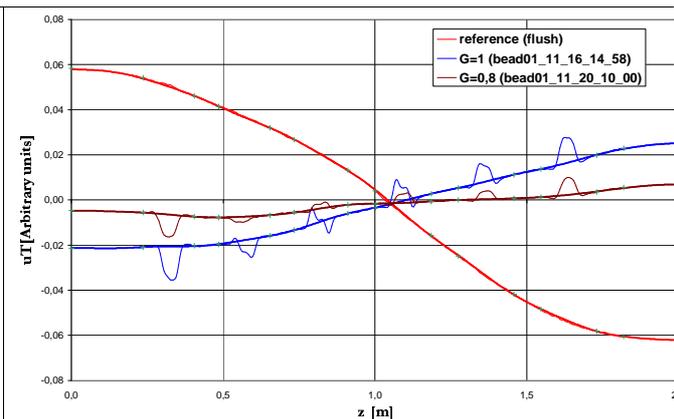


figure 89 : évolution de la composante dipolaire T après une itération de réglage obtenue en appliquant un gain de 1 ou de 0,8

Le gain de 0,8 a entraîné une meilleure minimisation des composantes dipolaires que le gain de 1 (figure 88 et figure 89).

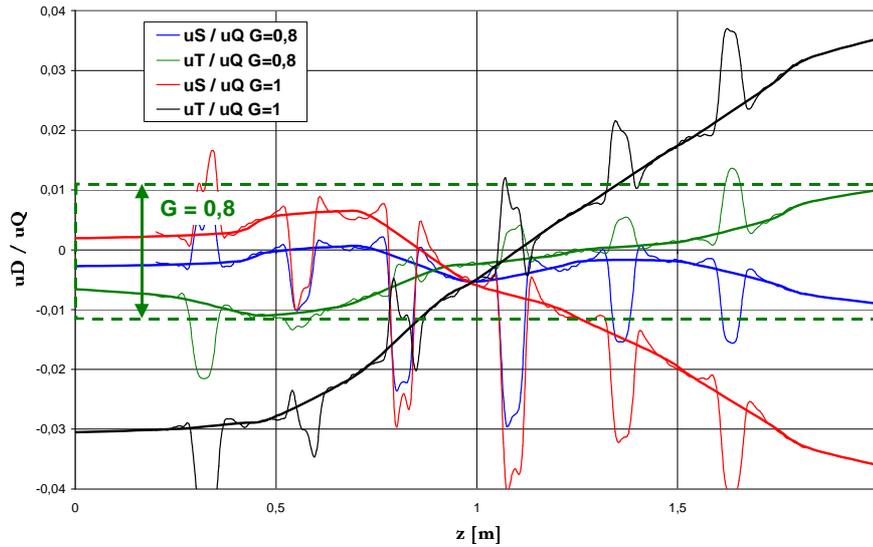
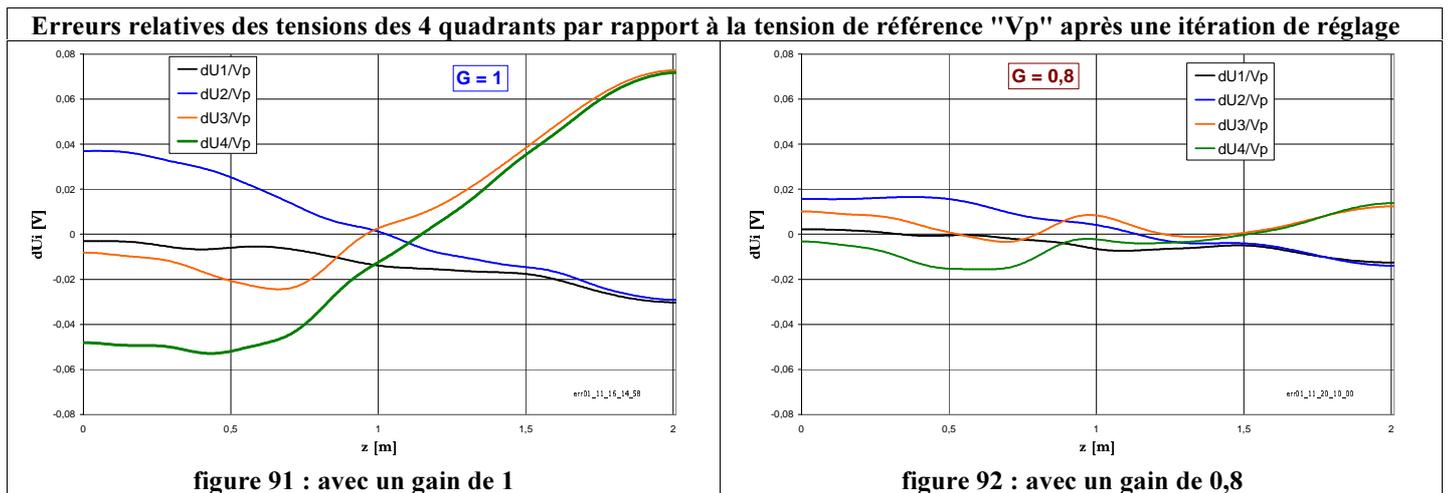


figure 90 : distribution longitudinale des écarts relatifs entre les composantes dipolaires et celle quadrupolaire de la tension accélératrice après une itération de réglage obtenue en appliquant un gain de 1 ou de 0,8

La réduction du gain à 0,8 permet d'obtenir en une unique itération de réglage des composantes dipolaires inférieures à 10^{-2} fois la composante quadrupolaire sur toute la longueur de la structure (figure 90).



Gain	Mesures après le 1° déplacements des pistons	Min(dUi/Vp)	Max(dUi/Vp)
1	Bead01_11_16_14_58	-0,05	0,07
0,8	Bead01_11_20_10_10	-0,02	0,02

L'estimation des erreurs relatives des tensions des 4 quadrants par rapport à la tension de référence "Vp" permet de considérer à la fois l'amélioration du réglage des composantes quadrupolaire et dipolaires de la tension. A travers ce test, on observe que l'ajustement du gain à 0,8 a permis d'obtenir une excursion entre les valeurs extrêmes des défauts relatifs 3 fois plus faible qu'avec un gain unitaire.

6.3 Synthèse vis à vis de l'effet du gain

L'ajustement du gain appliqué à l'ensemble des commandes de pistons permet d'optimiser la vitesse de convergence du réglage. Avec l'expérience acquise au cours des différents tests de réglage, on constate qu'un gain de 0,8 permet de compenser les non-linéarités entraînées par les grands déplacements inhérents aux premières itérations de réglage. Cette valeur peut être conservée au cours des itérations suivantes si on augmente le nombre de composantes modales commandées .

Lors du test de l'effet des gains comparés de 0,5 par rapport à 0,95, on n'avait pas encore résolu le problème de la divergence du réglage. Les grands défauts dipolaires non compensés expliquent que dans ce cas le faible gain de 0,5 est préférable.

7 Conclusion

⇒ Nous avons réalisé deux réglages d'un profil de tension constante en 4 itérations de déplacements des pistons d'accord.

Ces essais ont été réalisés après avoir validé le réglage d'un profil de tension constant puis variable dans un RFQ segmenté constitué de 2 RFQs de 1 mètre de long réunis à travers un couplage.

Malgré la plus grande simplicité de configuration que présente un RFQ non segmenté, les premiers tests ont divergé.

- On a d'abord soupçonné un problème d'orthogonalité de la base de fonctions de commande, lié à la distribution fortement irrégulière des pistons. Un test avec 4 pistons par mètre sur les 2 tronçons, et une base parfaite, n'a pas résolu le problème;
- La divergence du réglage provenait en fait d'un trop grand écart entre le modèle et le RFQ réel, écart particulièrement visible sur la distribution des fréquences de résonance des modes dipolaires et quadripolaires. L'algorithme utilisé suppose en effet que le RFQ réel est une « petite perturbation » du RFQ modèle vers lequel on doit tendre. Il y avait à ce stade deux remèdes possibles : ou bien introduire dans le modèle les conditions aux limites mesurées sur le RFQ réel, ou bien régler les conditions aux limites du RFQ réel. On a choisi la seconde solution (réglage des doigts) pour deux raisons : d'une part, l'extraction des paramètres décrivant les conditions aux limites est une opération lourde nécessitant plusieurs mesures, et d'autre part, le réglage des modes dipolaires est indispensable dans le cas d'un RFQ segmenté.

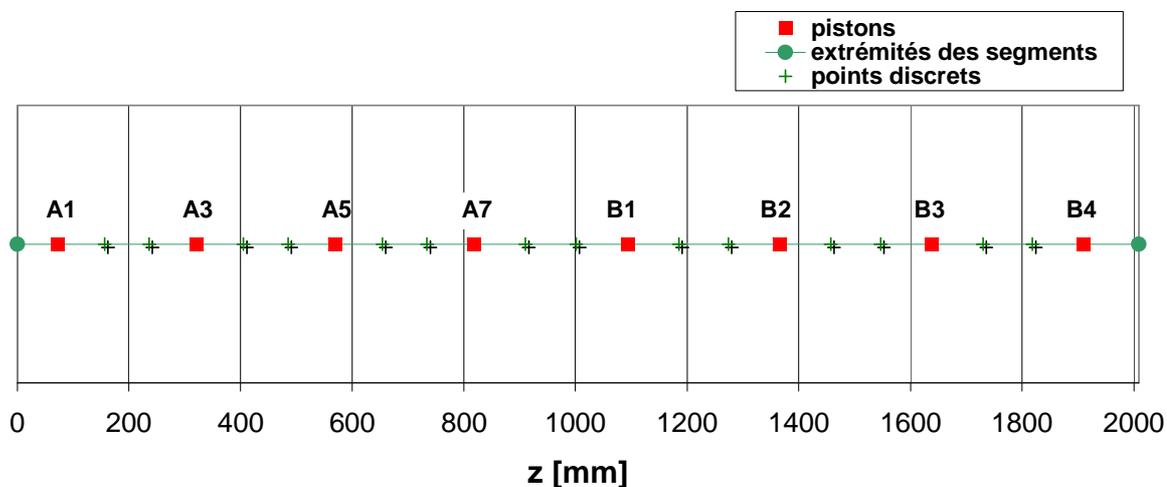
⇒ Cette expérience a permis de définir les conditions de convergence.

⇒ Le réglage de l'ensemble des paramètres électromagnétiques a été validé pour 2 fréquences de résonance distinctes, (352,2 MHz et à 350,8 MHz). Ce résultat démontre la capacité du formalisme à obtenir le réglage à une fréquence donnée par l'opérateur.

L'ajustement du gain appliqué à l'ensemble des commandes de pistons permet d'optimiser la vitesse de convergence du réglage. Avec l'expérience acquise au cours des différents tests de réglage, on constate qu'un gain de 0,8 permet de compenser les non-linéarités entraînées par les grands déplacements inhérents aux premières itérations de réglage. Cette valeur peut être conservée au cours des itérations suivantes si on augmente le nombre de composantes modales commandées .

8 Annexe

8.1 Points discrets choisis dans le cas de la répartition régulière des pistons



piston	A1	A3	A5	A7	B1	B2	B3	B4
z [mm]	72,2	320,8	569,4	818	1093,6	1365,8	1638	1910,2

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

[I] « Schémas électriques équivalents d'un RFQ, section transverse, région principale, régions d'extrémité », F. Simoens & A. France, DAPNIA/SEA-01-29

[II] « Etude des doigts stabilisateurs du RFQ d'IPHI », P. Balleyguier, CEA/DIF/DPTA/SP2A n° 6/2000

[III] « Régulation d'une tension variable dans un RFQ de 2 m à l'aide des pistons d'accord », F. Simoens, A. France & J. Gaiffier, DAPNIA/SACM/IPHI2002/15