



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 : 30/11/2001

N/RÉF. : DAPNIA/SEA/IPHI2001/ 69

François SIMOENS  
Pascal BALLEYGUIER  
Alain FRANCE  
Jacques GAIFFIER

## Mode local du couplage résonant dans une cavité RFQ Effet des fentes de la plaque

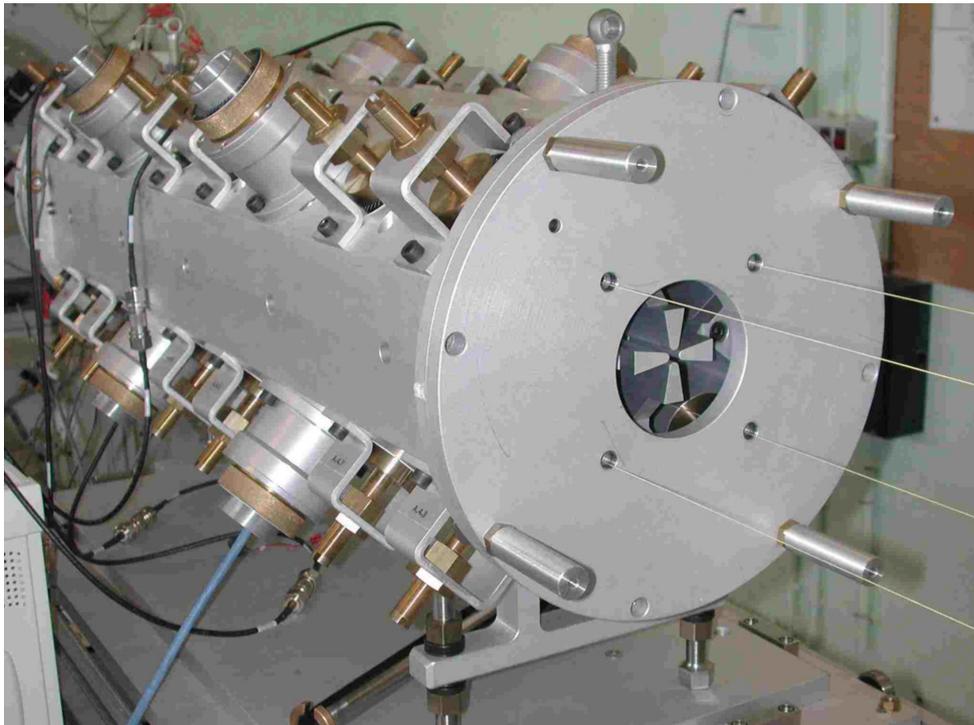


figure 1: couplage résonant monté en extrémité du tronçon de maquette de RFQ



**TABLE DES MATIERES**

<b><i>Mode local du couplage résonant dans une cavité RFQ</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>Effet des fentes de la plaque</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>1 Introduction</i></b>	<b><i>4</i></b>
<b><i>2 Description du couplage résonant</i></b>	<b><i>4</i></b>
<b><i>3 Mesures du mode de couplage résonant</i></b>	<b><i>6</i></b>
<b><i>3.1 Condition des tests</i></b>	<b><i>6</i></b>
3.1.1 Configuration de la maquette	6
3.1.2 Excitation du mode	7
<b><i>3.2 Spectres en fréquences</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b><i>3.3 Distribution longitudinale de tension</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b><i>3.4 Facteur de qualité du mode résonant à 489 MHz</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b><i>4 Simulations du mode local de couplage résonant (MAFIA)</i></b>	<b><i>12</i></b>
<b><i>4.1 Fréquences de résonances des 2 premiers modes</i></b>	<b><i>12</i></b>
4.1.1 Mode pour lequel le champ magnétique tourne dans le même sens de part et d'autre de la plaque.	12
4.1.2 Mode pour lequel le champ magnétique tourne en sens opposé de part et d'autre de la plaque.	12
4.1.3 Comparaison entre les fréquences mesurées et simulées	13
<b><i>4.2 Distribution longitudinale du champ magnétique</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b><i>5 Effet des fentes dans la plaque de couplage sur le mode local de couplage résonant</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b><i>5.1 Fréquences de résonance</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b><i>5.2 Distribution longitudinale de tension</i></b>	<b><i>16</i></b>
<b><i>6 Conclusion</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b><i>7 Annexe</i></b>	<b><i>18</i></b>

## 1 Introduction

La cavité Radio Fréquence Quadripolaire (RFQ) du projet IPHI de 8 mètres de long est constituée de l'assemblage de 4 RFQs réunis à travers des couplages dits "résonants" (références [I], [II], [III], [IV]). La segmentation longitudinale du RFQ, principe introduit par Lloyd Young du Los Alamos National Laboratory (référence [V], [VI]), améliore la stabilité longitudinale de cette cavité. En contrepartie, ce dispositif introduit des modes longitudinaux supplémentaires (référence [VII]). Il s'accompagne également de l'apparition d'un mode local dit de couplage résonant existant dans les régions avoisinant ces coupures (page 4 de [VIII]). Ce mode de nature Transverse Magnétique peut présenter une source de dégradation du transport du faisceau et sa fréquence constitue un paramètre de design et de réglage d'un RFQ couplé (référence [IX]).

Ce document présente les caractéristiques de ce mode résonant simulées et mesurées dans un RFQ constituée de 2 segments de 1 mètre, chacun réuni à travers un couplage résonnant. Les doigts de stabilisation dipolaires solidaires des plaques de couplage n'ont pas été considérés.

## 2 Description du couplage résonant

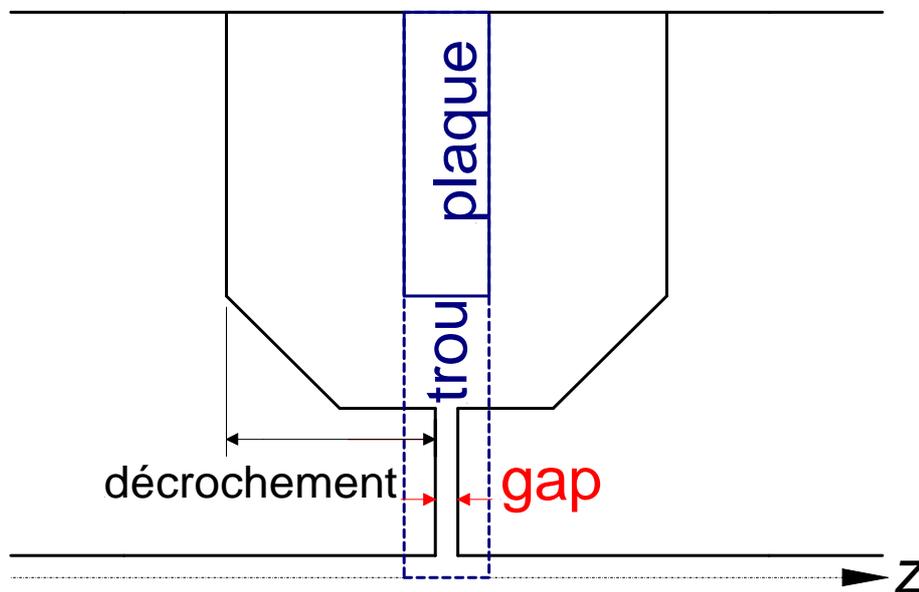
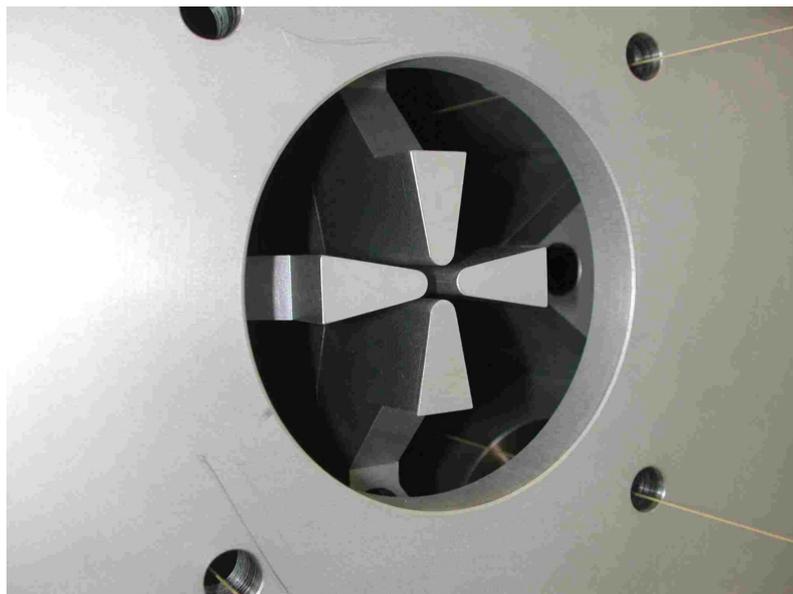


figure 2 : coupe longitudinale d'un couplage résonant

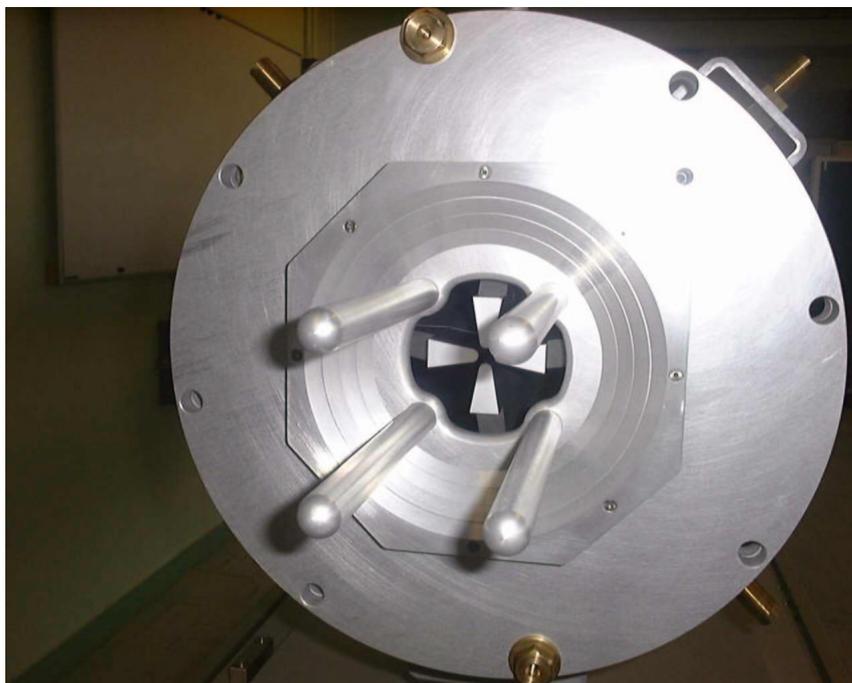
Les couplages résonants consistent en l'interruption longitudinale des électrodes : leurs extrémités sont alors séparées par une distance –on parle couramment de gap- de l'ordre de quelques millimètres (figure 2). Cet espace entre extrémités opposées constitue une capacité dont la valeur est un paramètre d'ajustement de la distribution des modes (références [X] et [XI]).



**figure 3 : extrémité des électrodes s'avancant à travers l'ouverture de la plaque de couplage résonant**

Une plaque est placée au niveau de chaque coupure d'électrode. Elle présente une large ouverture centrale circulaire à travers laquelle les extrémités des électrodes en vis à vis s'étendent partiellement. Ces plaques, présentes à chaque interruption, supportent des barres de stabilisation dipolaire de part et d'autre du couplage (figure 4). Les tests présentés dans ce document ont été effectués sans ces barres.

Des décrochements (figure 2) du type de ceux d'entrée et sortie du faisceau sont aménagés à l'extrémité des électrodes. La plaque empêche un grand nombre de lignes de champ magnétique  $B$  de progresser dans le segment suivant et les force ainsi à tourner autour de l'électrode à travers les décrochements dans les quadrants adjacents.



**figure 4 : plaque de couplage résonant telle que celle qui sera située entre les 2 premiers segments du RFQ d'IPHI. Elle supporte des barres stabilisatrices du mode dipolaire.**

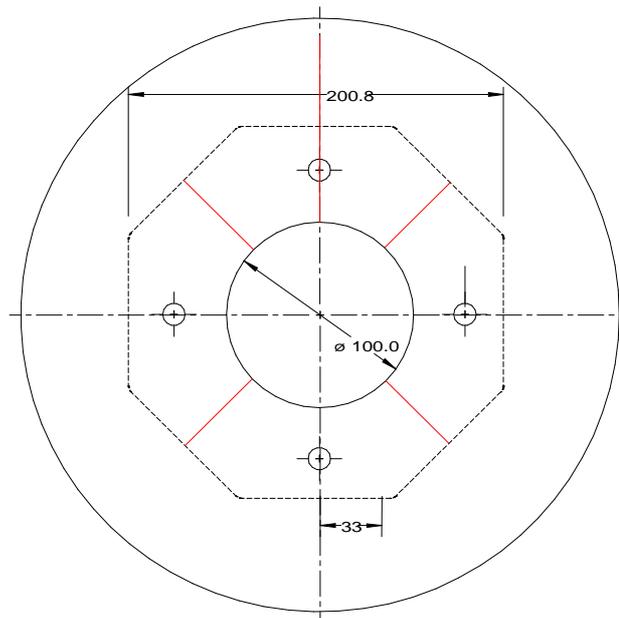
### 3 Mesures du mode de couplage résonant

#### 3.1 Condition des tests

##### 3.1.1 Configuration de la maquette

2 tronçons de maquette de RFQ (figure 6), baptisés "A" (8 pistons par quadrant) et "B" (8 pistons par quadrant), ont été réunis :

- avec les becs adaptés des régions "entrée / sortie faisceau" et les plaques de fermeture aux 2 extrémités de l'ensemble;
- pourvus des becs de type "couplage résonant" au milieu des 2 tronçons (dimensions données en annexe, chapitre 7);
- couplés à travers une plaque percée de 4 trous de passage de l'objet perturbateur pour les mesures (figure 1) et sans doigts stabilisateurs du mode dipolaire.



**figure 5 : schéma transverse de la plaque de couplage résonant**

Pour relâcher des contraintes mécaniques, il est prévu de pratiquer des rainures sur les plaques de couplage, et nous voulons vérifier leur effet sur les modes résonants. On a caractérisé les modes de couplage résonant avec deux plaques de couplage différentes. Une des deux a été pourvue de 4 fentes orientées parallèlement à la bissectrice de chaque quadrant (figure 5). Elles partent du bord de l'orifice circulaire jusqu'au sommet du corps octogonal de la maquette. Leur largeur est de 0,3 mm.



**figure 6 : 2 tronçons "A" et "B" couplés**

### 3.1.2 Excitation du mode

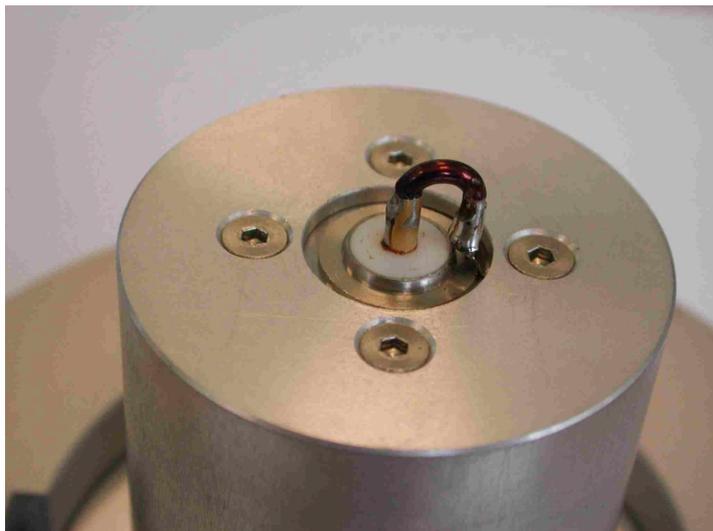


figure 7 : boucle de mesure en extrémité de piston

Le couplage du signal à l'intérieur de la cavité RFQ est effectué à travers des boucles. Réalisées à l'aide de fil métallique reliant l'âme centrale d'un connecteur N à la masse, elles sont placées à l'extrémité de 8 pistons évidés (figure 7). Le couplage étant de nature magnétique, il a fallu monter ces boucles de mesure de manière à respecter la configuration du champ magnétique du "mode de couplage résonant".



figure 8 : dispositif d'excitation du mode de 'Gap'.  
Emission à travers la matrice de commutation dans le tronçon "B" (à droite).  
Réception dans le tronçon "A" (à gauche).

➤ Le mode de couplage résonant qui est de nature TM ne peut se propager à travers la région principale du RFQ, il est évanescent : très vite en s'éloignant de la région de couplage résonant, il est atténué.

Les boucles de mesure ont été placées dans les plans transverses les plus proches possibles de la plaque de couplage (figure 8) :

- en émission dans plan numéroté 1 du tronçon "B".
- en réception, à travers une unique boucle située dans le plan 8 du tronçon "A".

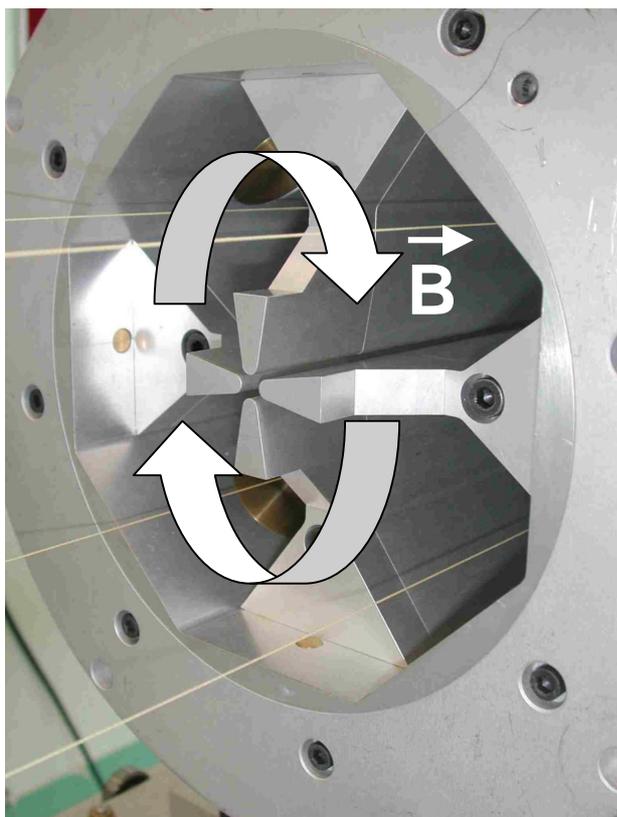


figure 9 : orientation transverse du champ magnétique

➤ Le champ magnétique  $\vec{B}$  circule transversalement près de la plaque de couplage (figure 9). Il passe d'un quadrant au suivant à travers les espaces libérés par les encoches des extrémités longitudinales des électrodes.

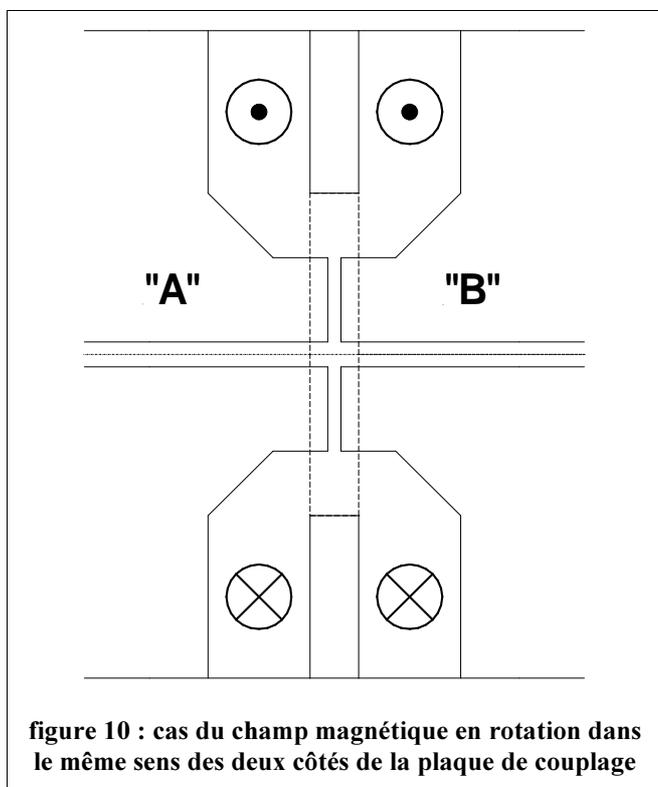


figure 10 : cas du champ magnétique en rotation dans le même sens des deux côtés de la plaque de couplage

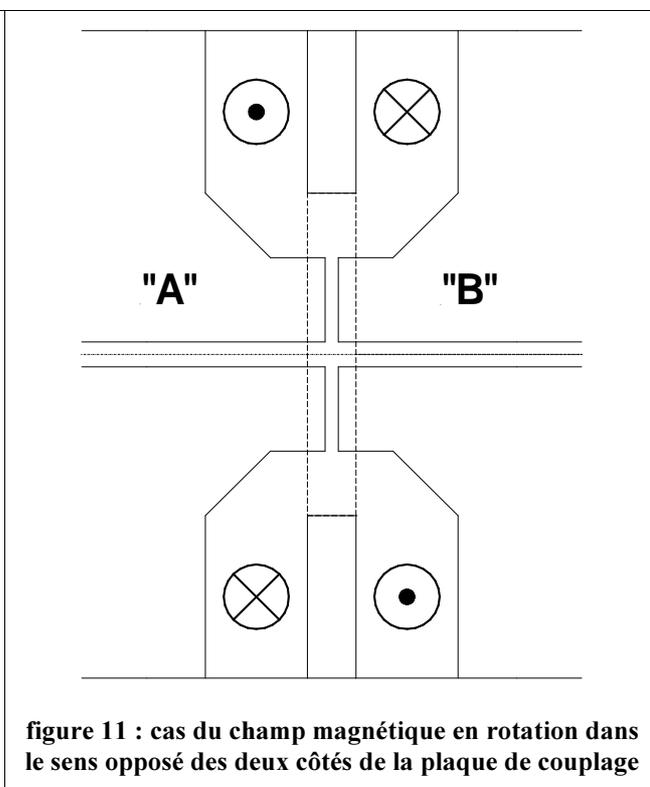


figure 11 : cas du champ magnétique en rotation dans le sens opposé des deux côtés de la plaque de couplage

Deux cas de figures peuvent se présenter :

1. le champ magnétique tourne dans le même sens des deux côtés de la plaque de couplage (figure 10)
2. le champ magnétique tourne dans le sens opposé d'un côté de la plaque de couplage à l'autre (figure 11).

Dans les 2 cas, les flux générés par les boucles doivent être transverses. Les plans décrits par les boucles, qui étaient perpendiculaires à l'axe longitudinal pour les mesures des modes "classiques" longitudinaux du RFQ, ont été tournés de 90 degrés.

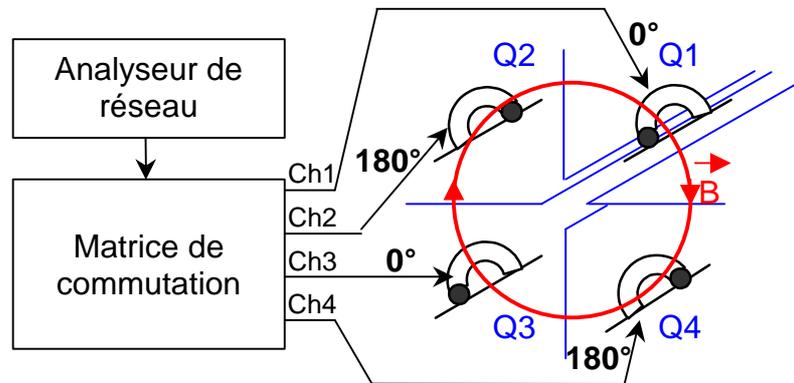


figure 12: génération de flux de même sens de rotation circulaire dans le plan transverse

- Les courants générés doivent être en phase d'un quadrant au suivant.  
 Ne disposant pas d'un dispositif assurant une telle distribution des phases, la solution retenue a consisté à appliquer en entrée de chaque quadrant le signal issu de la matrice de commutation en mode "Q". Les 4 signaux sont alors en opposition de phase d'un quadrant au suivant. Le sens des flux circulaires transverses est rendu homogène en alternant l'orientation âme - masse des boucles d'un quadrant au suivant. Nous avons ainsi réalisé une excitation que nous noterons [1,2,3,4]. Le signal est reçu à travers le piston "A.1.8" du quadrant 1 du tronçon "A"; le plan de sa boucle a été orienté parallèlement à l'axe longitudinal. Des mesures de référence – qu'on référencera par la notation "90deg" – ont été effectuées avec cette même boucle orientée perpendiculairement à l'axe longitudinal. Nous avons également testé une excitation –notée [1,4]- à travers 2 quadrants seulement qui assure des flux dans le plan transverse orientés dans le même sens.

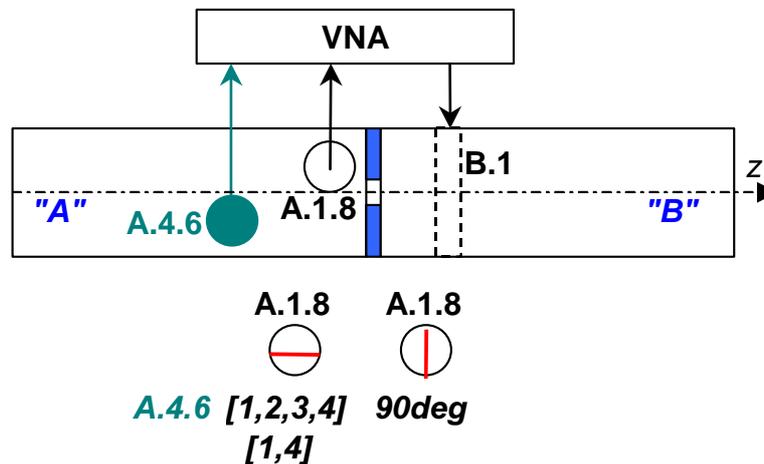


figure 13: plans où le mode de couplage résonant a été excité

Afin de constituer une autre référence de spectres où le mode de couplage résonant est absent, des spectres en fréquence ont été acquis en réalisant une excitation [1,2,3,4] dans le tronçon "B" et en réceptionnant le signal dans une boucle du tronçon "A" éloignée du couplage résonant –boucle référencée "A.4.6" (figure 13).

### 3.2 Spectres en fréquences

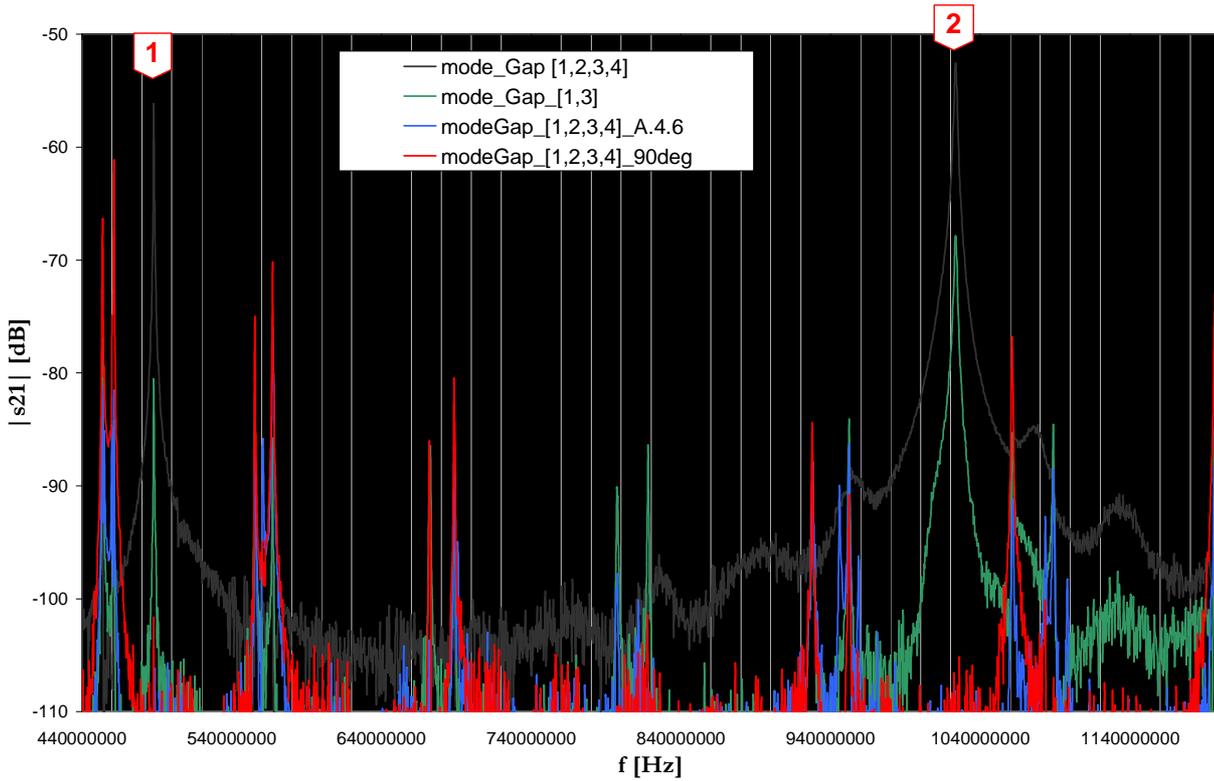


figure 14 : spectres en fréquence acquis dans les 2 RFQs couplés. Différentes excitations ont été testées

Entre 440 et 1200 MHz (figure 14), on voit apparaître 2 pics résonants lorsque la cavité est excitée:

- 1- selon la distribution notée [1,2,3,4] où un flux transverse du champ magnétique est favorisé dans la région du couplage résonant;
- 2- selon la distribution notée [1,3], où les quadrants 1 et 3 ont été alimentés en opposition de phase : les flux sont transverses mais on n'a pas respecté la répartition des phases du mode de couplage résonant. Cela s'est traduit par un niveau du pic de 24 dB inférieur à celui obtenu avec la distribution [1,2,3,4] (figure 15).

Ces 2 pics, de fréquences respectives  $f_1=487,95\text{ MHz}$  et  $f_2=1023,3\text{ MHz}$ , correspondent effectivement au mode recherché puisqu'ils disparaissent lorsqu'en réception :

- la mesure est pratiquée dans un plan trop éloignée de la plaque de couplage ("modeGap [1,2,3,4]\_A.4.6")
- le plan décrit par la boucle de mesure est perpendiculaire aux lignes de champ magnétique ("modeGap [1,2,3,4]\_90deg")

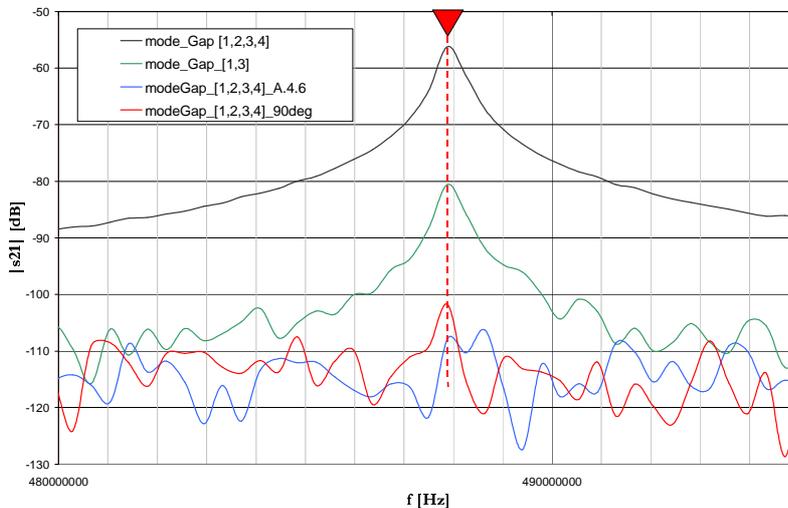


figure 15 : premier mode de couplage résonant

### 3.3 Distribution longitudinale de tension

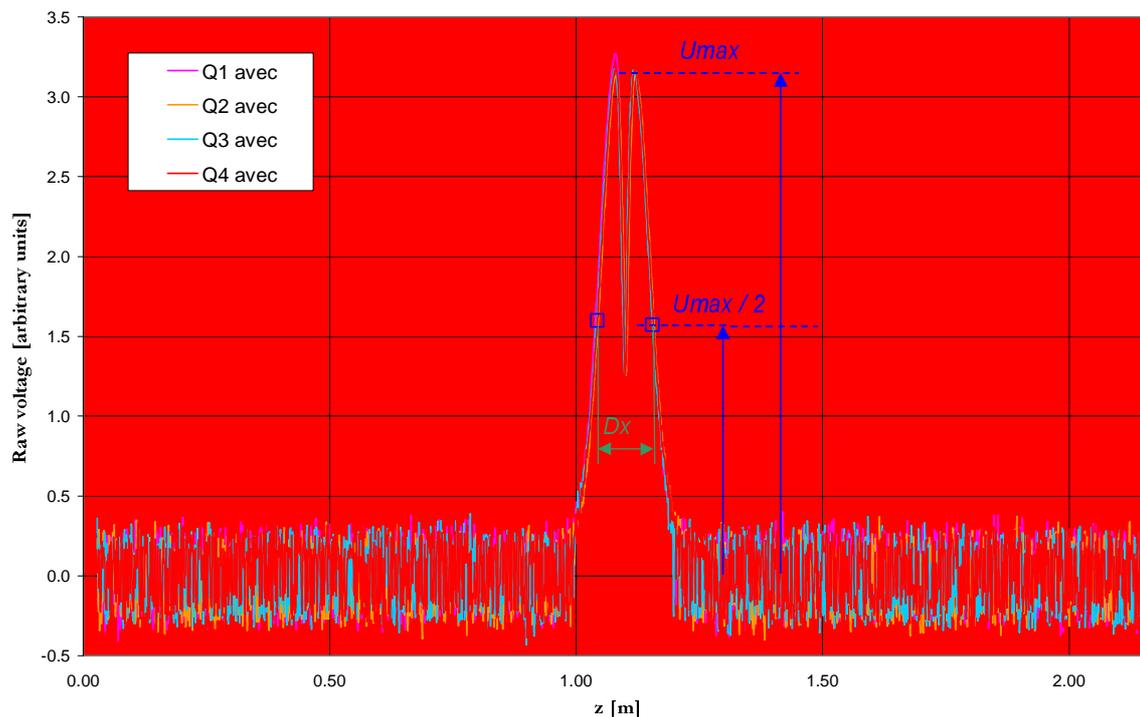


figure 16 : distribution longitudinale de la tension du mode local de couplage résonant mesurée dans chaque quadrant

La distribution du champ a été mesurée à l'aide du banc de mesure par perturbation à la fréquence fixe de  $488,95 \text{ MHz}$  du premier mode repéré. L'objet perturbateur, une ogive métallique, a été guidé sur la bissectrice à travers les 4 quadrants.

Ce mode est effectivement évanescent. Son amplitude reste supérieure à la moitié de sa valeur maximale sur une distance totale de part et d'autre de la plaque de couplage de longueur  $Dx \approx 11 \text{ cm}$  (figure 16).

### 3.4 Facteur de qualité du mode résonant à 489 MHz

Nous avons mesuré le coefficient de réflexion complexe  $s_{11}$  d'une antenne plongée dans une ouverture libérée par un piston proche de la plaque de couplage. L'antenne consistait en une grosse boucle soudée sur une embase de type "N". Lors des tests du traitement de surface de la maquette (référence [XII]) nous avons développé un code Matlab d'extraction du facteur de qualité à vide du circuit résonant R,L,C équivalent. L'analyse des mesures a fourni une valeur moyenne  $Q_0 = 1220$ .

## 4 Simulations du mode local de couplage résonant (MAFIA)

### 4.1 Fréquences de résonances des 2 premiers modes

#### 4.1.1 Mode pour lequel le champ magnétique tourne dans le même sens de part et d'autre de la plaque.

Pour exciter le mode local où le champ magnétique tourne dans le même sens de part et d'autre de la plaque de couplage, on impose une condition limite de type "mur électrique" dans le plan de couplage (figure 17, simulation c4745b).

Le code MAFIA trouve pour fréquence de résonance de ce mode  $f = 468,796$  MHz et un facteur de qualité  $Q=5761$ . Cette simulation bénéficie du nouvel algorithme, où les parois sont spécifiées en cuivre.

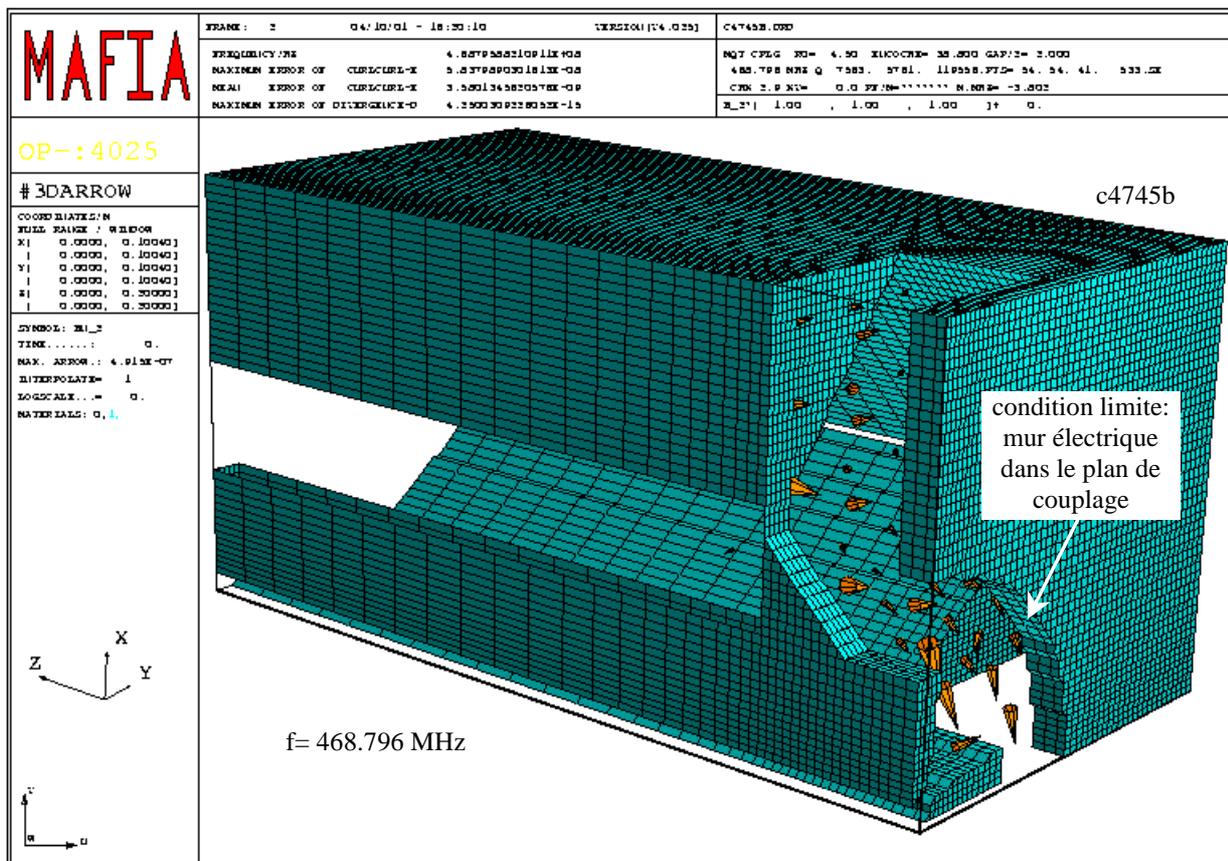


figure 17 : mode locale résonant où le champ magnétique tourne dans le même sens de part et d'autre de la plaque de couplage

#### 4.1.2 Mode pour lequel le champ magnétique tourne en sens opposé de part et d'autre de la plaque.

Pour exciter le mode local où le champ magnétique tourne en sens opposé de part et d'autre de la plaque de couplage, on impose une condition limite de type "mur magnétique" dans le plan de couplage (figure 18, simulation c4745a)

La fréquence de ce mode est  $f = 1013,619$  MHz pour un facteur de qualité  $Q=9647$

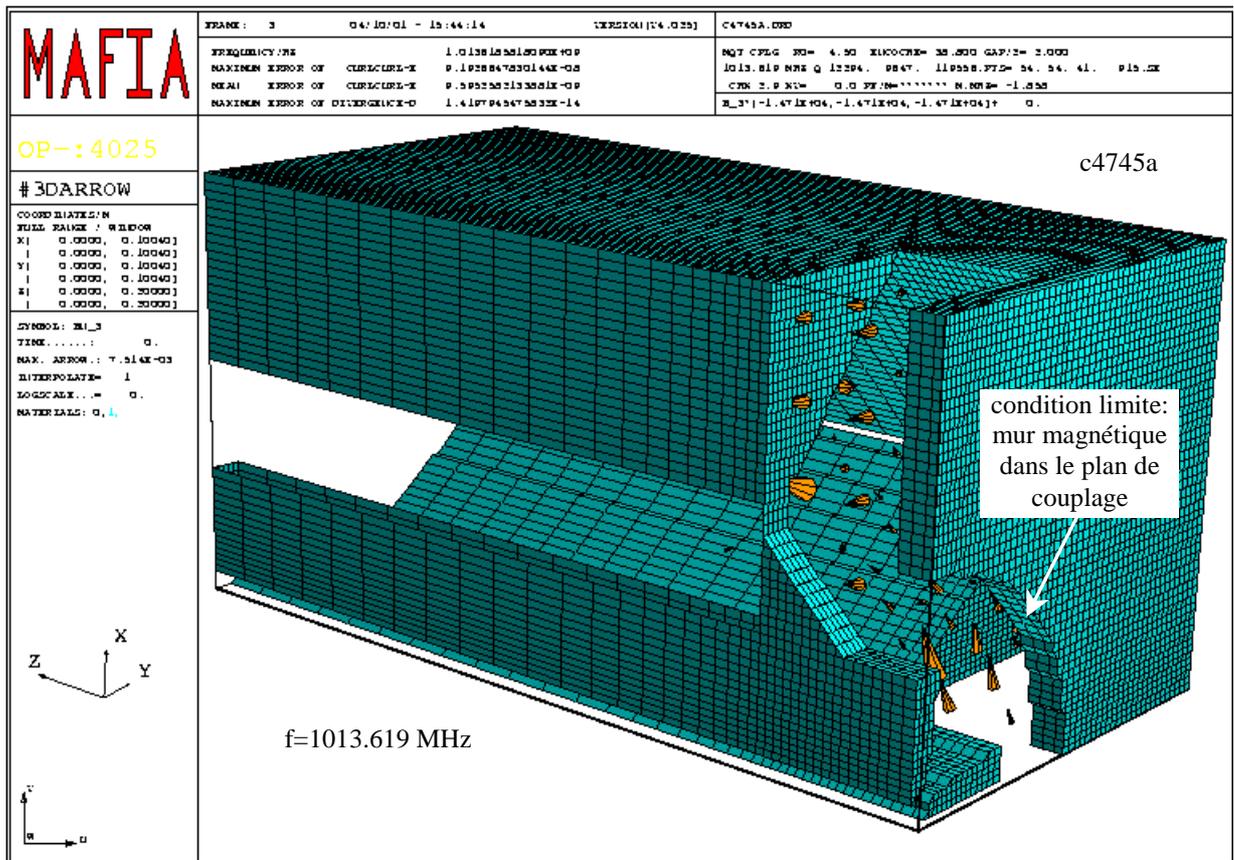


figure 18 : mode locale résonant où le champ magnétique tourne en sens opposé de part et d'autre de la plaque de couplage

### 4.1.3 Comparaison entre les fréquences mesurées et simulées

	Mesure dans la maquette	Simulation (MAFIA)	Ecart relatifs
f1 1° mode	487,95 MHz	468,796 MHz	$3,9 \cdot 10^{-2}$
f2 2° mode	1023,3 MHz	1013,619 MHz	$0,9 \cdot 10^{-2}$

Les valeurs simulées diffèrent des fréquences mesurées d'un maximum de 4 pour cent. La simulation permet donc une bonne prévision de la fréquence de ce mode local.

## 4.2 Distribution longitudinale du champ magnétique

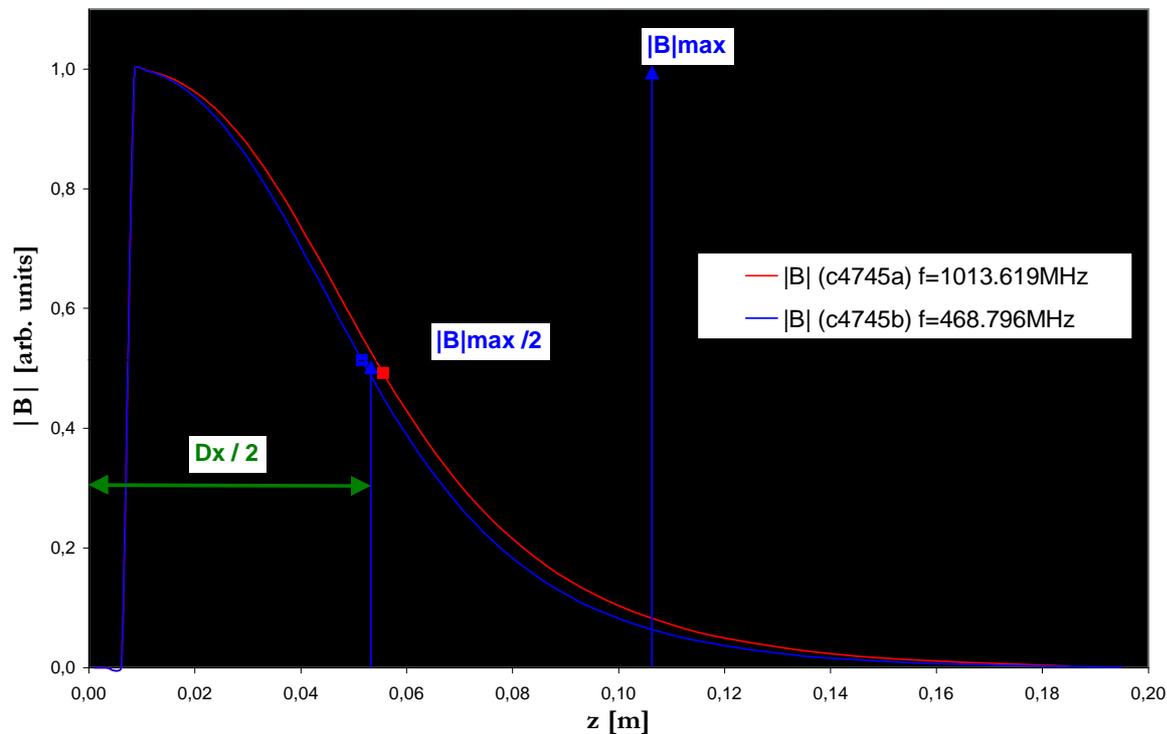


figure 19 : module du champ magnétique en fonction de  $z$  ( $a=x=y=55.4\text{mm}$ ) unités arbitraires pour les 2 premiers modes résonnants locaux

La distribution longitudinale de l'amplitude du champ magnétique  $B$  a été calculée par la simulation à la position transverse où l'objet perturbateur est guidé à travers les quadrants du RFQ. L'amplitude de  $B$  reste supérieure à la moitié de sa valeur maximale sur une distance totale de part et d'autre de la plaque de couplage de longueur  $Dx \approx 11\text{ cm}$ . Cette distance simulée est en parfait accord avec la mesure.

## 5 Effet des fentes dans la plaque de couplage sur le mode local de couplage résonant

### 5.1 Fréquences de résonance

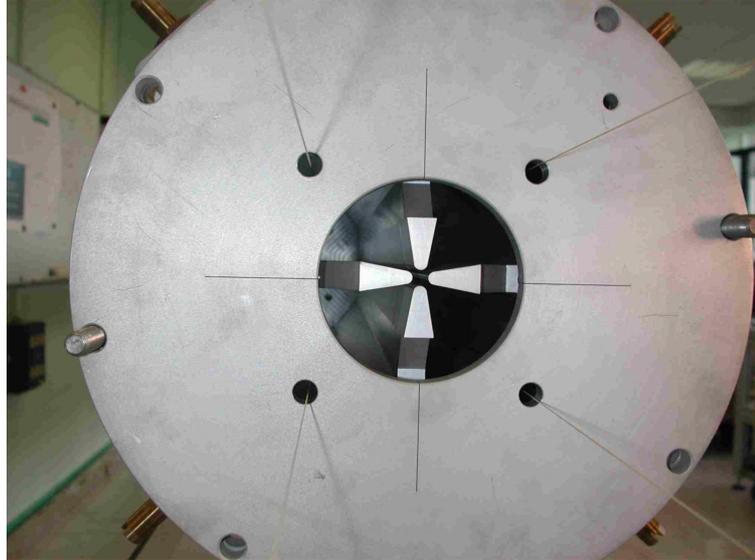


figure 20 : plaque de couplage résonant fendue

Avec la plaque de couplage fendue, on retrouve les 2 pics résonants identifiés avec la plaque dépourvue de fentes. Les fentes ont pour effet d'augmenter faiblement les fréquences des 2 pics observés entre 440 et 1200 MHz (figure 21 et figure 22).

	sans fentes	avec fentes	Ecart
1° pic résonnant	487,95 MHz	488,95 MHz	1 MHz
2° pic résonnant	1023,30 MHz	1023,68 MHz	380 kHz

Tableau 1: variations des fréquences des 2 modes résonants

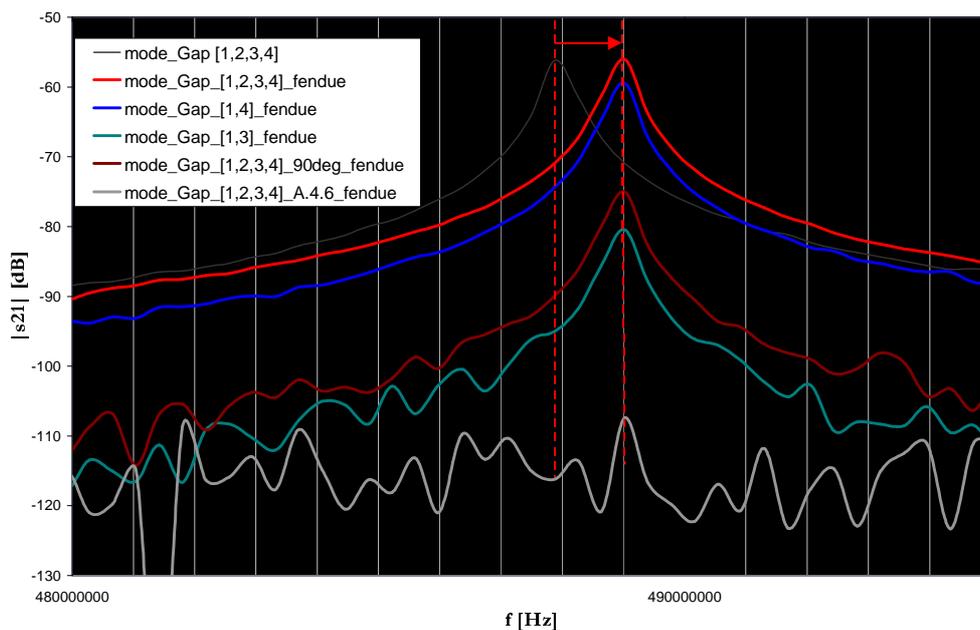


figure 21 : effet des fentes de la plaque sur le premier pic du mode de couplage résonant local

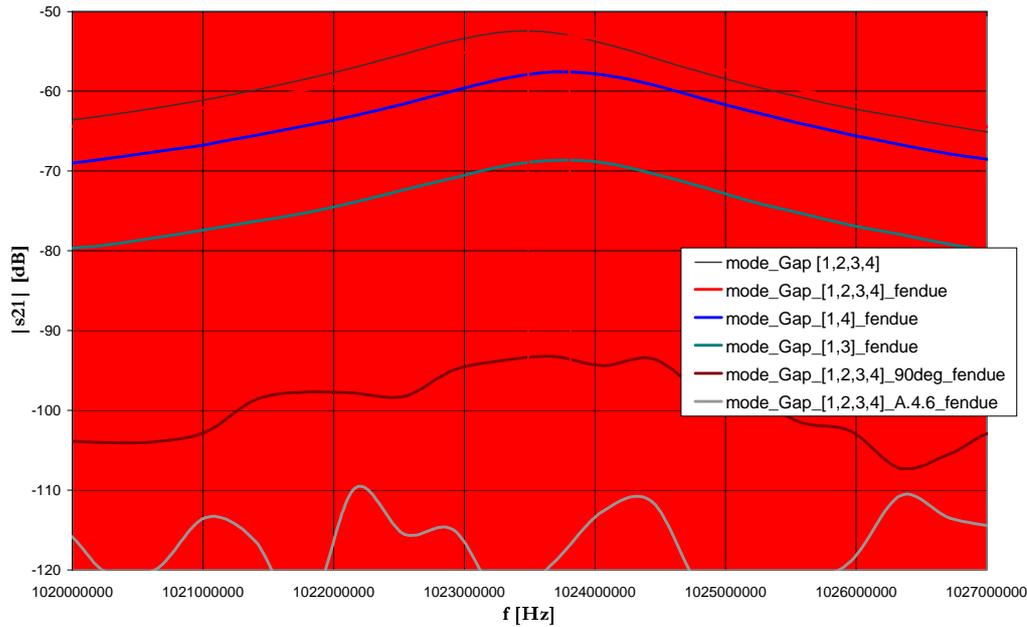


figure 22 : effet des fentes de la plaque sur le deuxième pic du mode de couplage résonant local

La distribution notée [1,4] à travers 2 quadrants seulement excite les modes à un niveau comparable à celui obtenu en alimentant les 4 quadrants.

En revanche, le niveau mesuré avec la boucle de réception tournée à 90° est notablement moins atténué que lors des tests avec la plaque sans fentes. Ceci est particulièrement vrai pour le premier pic résonant autour de 490 MHz (figure 21).

## 5.2 Distribution longitudinale de tension

La distribution longitudinale de tension du mode local de couplage à 490 MHz n'est pas modifiée par l'introduction des fentes dans la plaque de couplage résonant (figure 23).

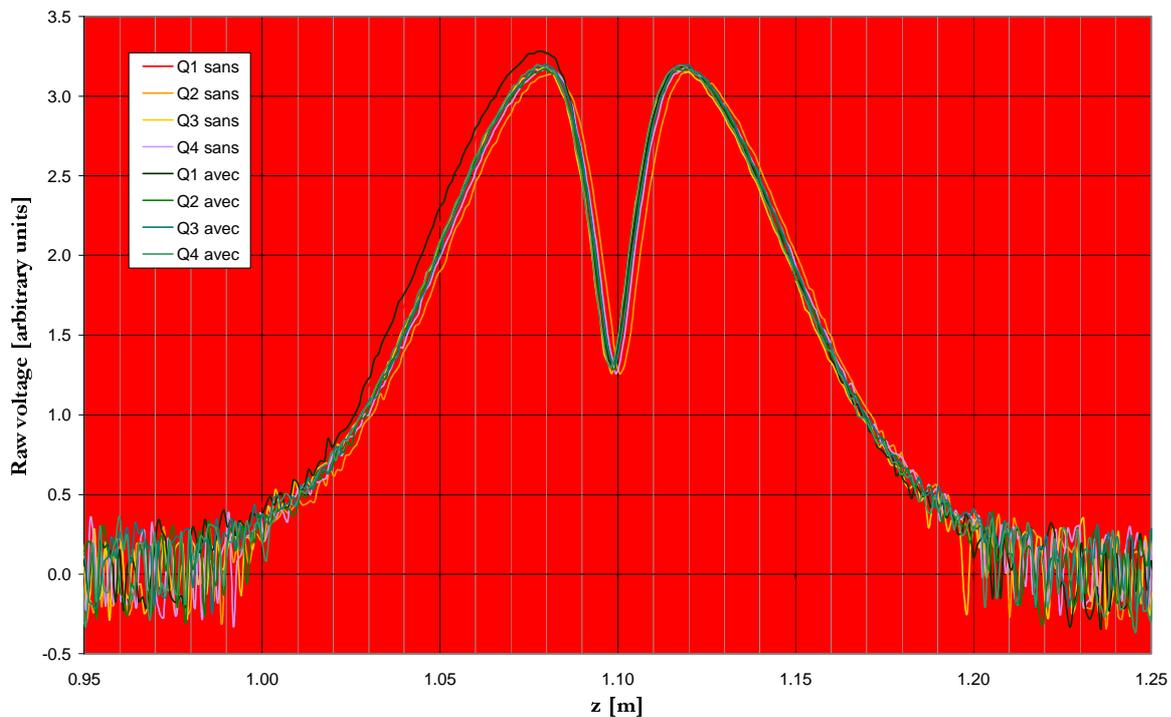


figure 23 : superposition des distributions longitudinales de tension de mode de couplage résonant

## avec et sans fentes dans la plaque

## 6 Conclusion

- ◆ Ces tests ont permis de mettre en évidence expérimentalement l'existence du mode local du couplage résonant prédite par la théorie et les simulations.
- ◆ Sa nature Transverse Magnétique et évanescente implique un dispositif d'excitation spécifique relativement lourd à mettre en place.  
Entre 440 et 1200 MHz, nous avons identifié 2 résonances de cette nature : un premier à 490 MHz et un second à 1023 MHz.  
La distribution longitudinale de la tension du premier mode résonant a été acquise à l'aide du banc de mesure par perturbation. L'amplitude de la tension reste supérieure à la moitié de sa valeur maximale sur une distance totale de part et d'autre de la plaque de couplage de longueur  $Dx \approx 11$  cm
- ◆ Les simulations électromagnétiques effectuées à l'aide du code MAFIA présentent :
  - Un bon accord des fréquences des 2 premiers modes locaux
  - Une parfaite adéquation quant à la distribution longitudinale du champ magnétique à la position transverse où l'objet perturbateur est guidé.
- ◆ L'effet de l'usinage de fentes placées en face de la bissectrice de chaque électrode a été testé. Les fréquences de résonances sont faiblement augmentées. La distribution longitudinale de la tension n'est pas affectée.
  
- ◆ Ces tests ont été effectués sans les doigts "stabilisateurs" des modes dipolaires. Leur insertion s'accompagnera d'une altération de ce mode local en constituant l'âme d'une ligne coaxiale quart d'onde.  
L'évolution de la fréquence du mode local de couplage résonant sera testée dans des structures plus longues et avec des doigts stabilisateurs.

## 7 Annexe

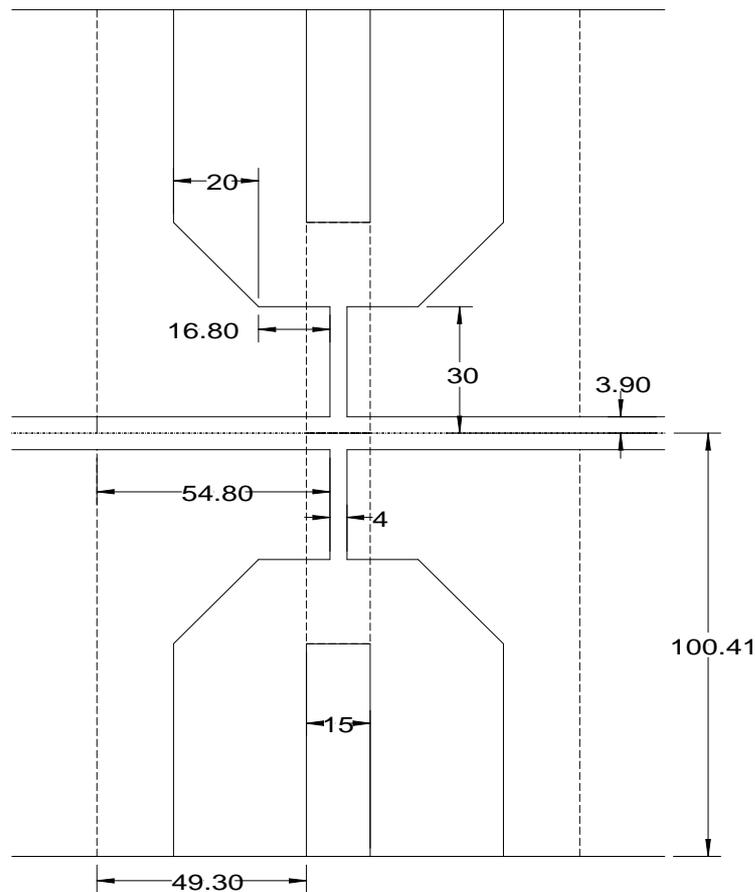


figure 24 dimensions des extrémités de couplage résonnant de la maquette de RFQ

## Références

- [I] « Etude d'une structure RFQ couplée », V. Nibart, Rapport TRISPAL-IPHI, Thomson-CSF, HEA/SLH/206/97-vn, 1997
- [II] « Etude d'une structure RFQ couplée avec 2 ou 3 couplages résonnants », V. Nibart, Rapport TRISPAL-IPHI, Thomson-CSF, HEA/SLH/156/98-vn, 1998
- [III] « Loi de champ et couplages résonnants dans le RFQ d'IPHI », Pascal Balleyguier, SP2A 115/99, 23 juin 99
- [IV] « Study of Coupling Gap Effects on Beam Dynamics in Favor of RFQ IPHI Design », Romuald Duperrier, R. Ferdinand, P. Mattei, CEA/DSM/DAPNIA/SEA/IPHI/2000/07, October 27, 1999
- [V] « Coupled Radio-Frequency Quadrupoles As Compensated Structures », M. J. Browman and L. Young, pp. 70-72, LINAC 1990
- [VI] « An 8-meter Long Coupled Cavity RFQ Linac », M. Jean Browman & Lloyd Young, LANL, pp. 70-72, LINAC 1990
- [VII] « Modes des RFQ à Segments Couplés », M. Promé, Rapport interne, Janvier 1998
- [VIII] « Etude des doigts de stabilisation du RFQ d'IPHI », Pascal Balleyguier, CEA/DIF/SP2A, 6/2000,
- [IX] « Segmented Resonantly Coupled Radio-Frequency Quadrupole (RFQ) », L. Young, pp. 3136-3138, PAC 1993
- [X] « Equivalent Lumped Circuit Study for the Field Stabilization of a Long Four-Vane RFQ », A. Pisent, R. Celentano and R. Zennaro, INFN (Legnaro), LINAC 98
- [XI] « Nouvelles plaques de couplage et terminales du RFQ d'IPHI », Pascal Balleyguier, CEA/DIF/SP2A DO 48, 19/10/00, 00RRNC000045
- [XII] « Facteur de qualité de la maquette de RFQ », F. Simoens, A. Aspart, A. France & J. Gaiffier, DAPNIA/SEA/IPHI2001/53