

dapnia



saclay

COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DÉPARTEMENT D'ASTROPHYSIQUE DE PHYSIQUE DES PARTICULES  
DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DE L'INSTRUMENTATION ASSOCIÉE.

N°REF:DAPNIA-05-26  
DAPNIA/SACM/IPHI

Olivier Piquet  
Michel Desmons  
Alain France

Date: 07/02/20005

## **Entrées RF du RFQ d'IPHI**

## Entrées RF du RFQ d'IPHI

### Introduction

Pour alimenter le RFQ, Il s'agira de réaliser le transfert de la puissance RF des sources vers la cavité. Tout d'abord, il faudra d'assurer la transition d'un guide d'onde de type WR2300 demi hauteur (584\*146mm) vers un piquage rectangulaire de bien plus faibles dimensions (178\*25mm). Il faut donc réaliser une transition entre le guide et la cavité RFQ en limitant au maximum la réflexion de la puissance vers la source. Dans une seconde partie, il s'agira ensuite de contrôler le couplage vers le RFQ à l'aide d'une plaque fendue appelé iris et de trous assurant le passage du champ magnétique. Ce rapport présente les études théoriques et expérimentales de cet accès RF qui sera couplé sur la maquette du RFQ.

### I Transition Guide-RFQ

#### 1) Sifflet de transition

Dans un premier temps, la transition retenue [1] est un "sifflet", qui permet de passer progressivement des dimensions du guide WR2300 vers les dimensions du piquage. Ce dispositif doit permettre de transférer la puissance sur une large bande. Afin de conserver une fréquence de coupure constante égale à celle du guide, un ridge est réalisé pour augmenter la capacité linéique. Le dispositif réalisé est décrit sur la figure suivante.

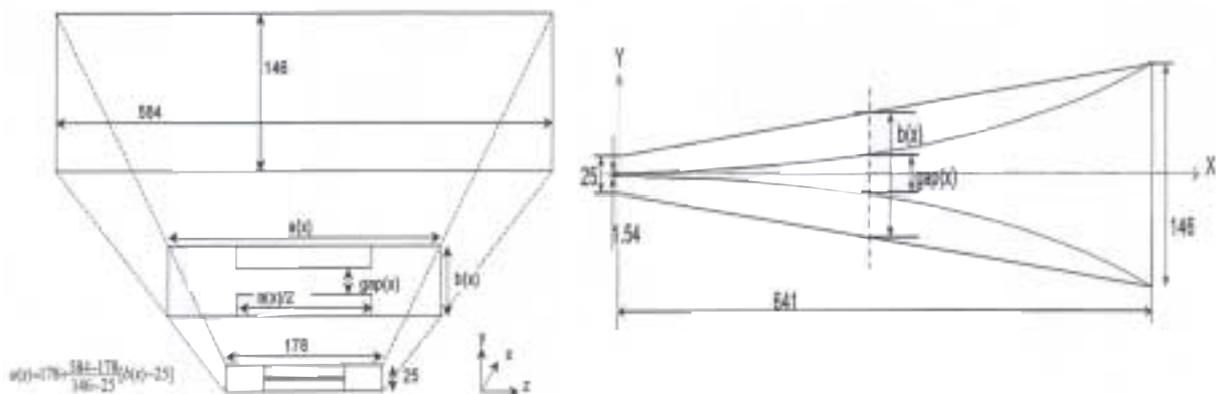


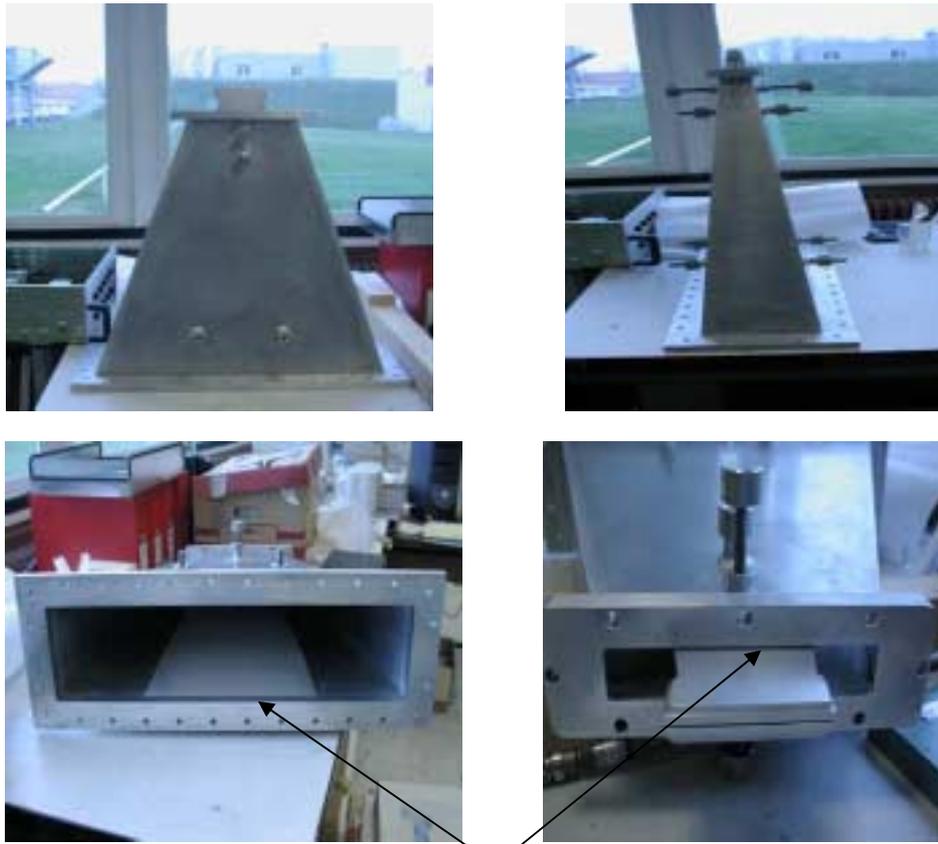
Figure 1: Dimension de la transition (ou sifflet)

Ce dispositif est ensuite connecté à une section de guide d'onde WR2300 et au RFQ par une plaque de couplage que nous décrirons plus précisément par la suite. Les mesures réalisées sur la maquette à l'aide d'un analyseur de réseaux n'ont pas permise de visualiser un couplage entre la section de guide d'onde WR2300 et le RFQ.

Cette impossibilité à coupler correctement peut s'expliquer par les deux raisons suivantes:

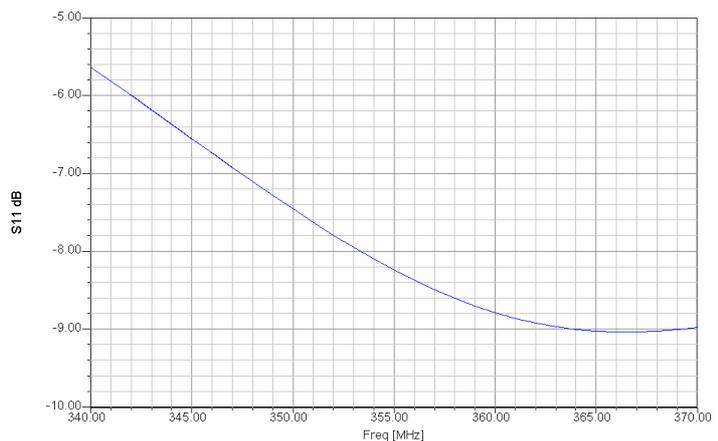
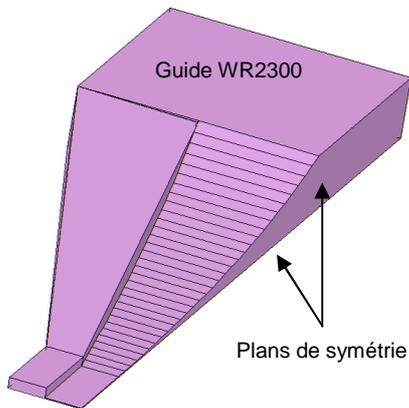
- Des problèmes de contact RF, pouvant entraîner des champs de fuite, au niveau des différents éléments constituant le sifflet peuvent expliquer cette impossibilité que nous avons eu à coupler correctement la cavité (Figure 2).

- En outre, le calcul du coefficient de réflexion (Figure 3) à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique HFSS d'ANSOFT [2] montre qu'environ 10% de la puissance incidente est réfléchi.



Problèmes de contact RF

**Figure 2 : Transition en forme de sifflet**



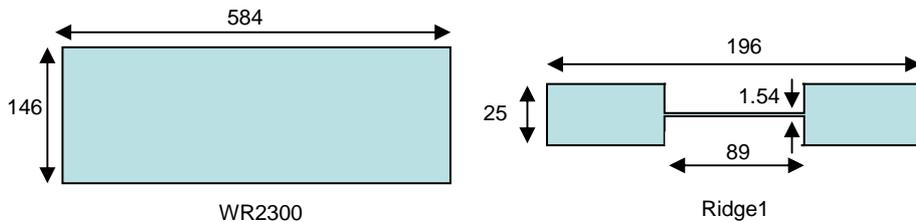
**Figure 3 : Transition réalisée en forme de sifflet et simulée sous HFSS  
Et coefficient de réflexion du sifflet**

En effet, pour qu'une transition progressive soit efficace, il faut que celle-ci soit beaucoup plus longue, de l'ordre de plusieurs longueurs d'onde. Or celle-ci est de l'ordre de 1.25 mètres, ce qui limite l'utilisation de ce type de transition du fait de l'encombrement. Une autre méthode pour améliorer la transmission du sifflet serait de modifier le design de la fente de couplage, afin d'adapter la sortie de la transition et de diminuer la réflexion. Mais, à ce moment là, on aurait un couplage entre l'élément transitif et le coupleur, ce qui nécessiterait d'ajuster simultanément les deux dispositifs lorsqu'on réglerait le couplage avec la cavité.

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé de changer le dispositif permettant d'assurer la transition entre le guide WR2300 et le piquage rectangulaire que l'on peut réaliser sur le RFQ, afin de décorréler le dispositif d'adaptation avec celui de couplage du RFQ.

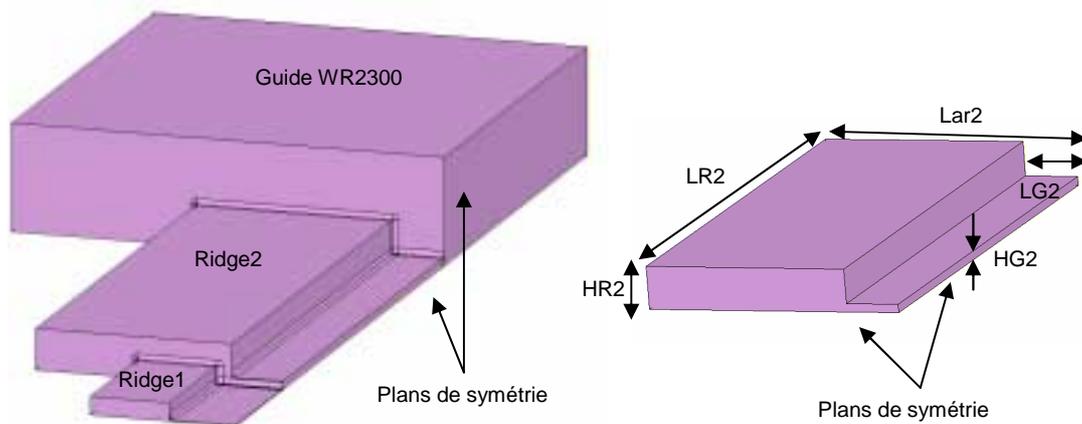
## 2) Résonateur $\frac{1}{4}$ onde

Le dispositif retenu est de type résonateur quart d'onde qui permet d'adapter, sur une certaine bande passante, la transmission de la RF du guide d'onde WR2300 vers le piquage sur le RFQ (Figure 4). Ce système joue le rôle de transformateur d'impédance. Par ailleurs, nous avons conservé les dimensions de l'iris qui ont permis de faire les premiers calculs du couplage [1].



**Figure 4 : Dimensions du guide WR2300 et dimensions finales avant couplage en mm**

Les dimensions du résonateur (appelé par la suite ridge2) sont optimisées à l'aide du logiciel HFSS. Le dispositif est optimisé pour présenter une transmission maximale à 352.2 MHz, fréquence de fonctionnement du RFQ. La longueur initiale (LR2) est définie par la longueur d'onde divisée par 4 (soit environ 311mm), d'où le nom de résonateur  $\frac{1}{4}$  d'onde. Pour des raisons de réalisation technique, des arrondis (de rayon 4mm) au niveau des différents éléments constituant la transition ont été pris en compte lors des calculs HFSS (Figure 5). Par la suite, le guide d'onde ridgé qui fait la transition entre le ridge 2 et la pièce de couplage sera appelé ridge1



**Figure 5 : Transition RF et dimensions du ridge2 à optimiser**

Après optimisation des dimensions du ridge 2, nous obtenons le coefficient de réflexion de la transition (Figure 6). La transmission maximale est à 352.2 MHz tandis que la bande passante à -20 dB est de l'ordre de 3.7 MHz, ce qui est suffisant compte tenu du réglage du RFQ d'IPHI à l'aide des pistons d'accord [3]. Les paramètres du ridge 2 sont donnés dans le tableau ci-dessous.

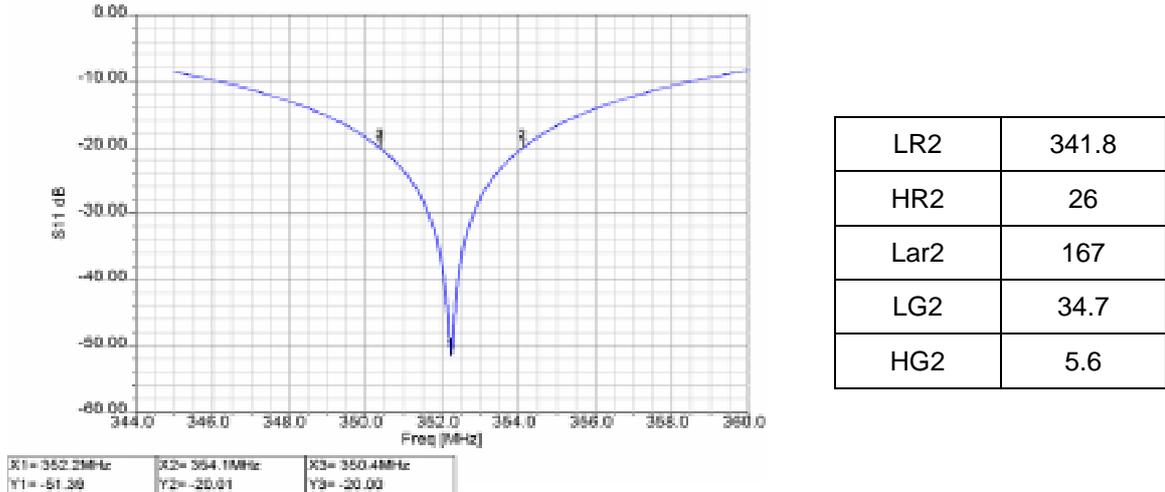


Figure 6 : Coefficient de réflexion et paramètres géométriques optimums en mm

### 3) Etude des tolérances

Dans le but d'étudier les tolérances mécaniques du système, différents calculs ont été effectués avec HFSS pour évaluer la sensibilité du coefficient de réflexion en fonction des dimensions géométriques des ridges 1 et 2.

#### a) Tolérance pour le ridge2

Les 3 paramètres essentiels de ce ridge sont sa longueur LR2, le gap et l'épaisseur du gap. Les courbes suivantes présentent le coefficient de réflexion S11 de la transition RF en fonction des variations géométriques définies.

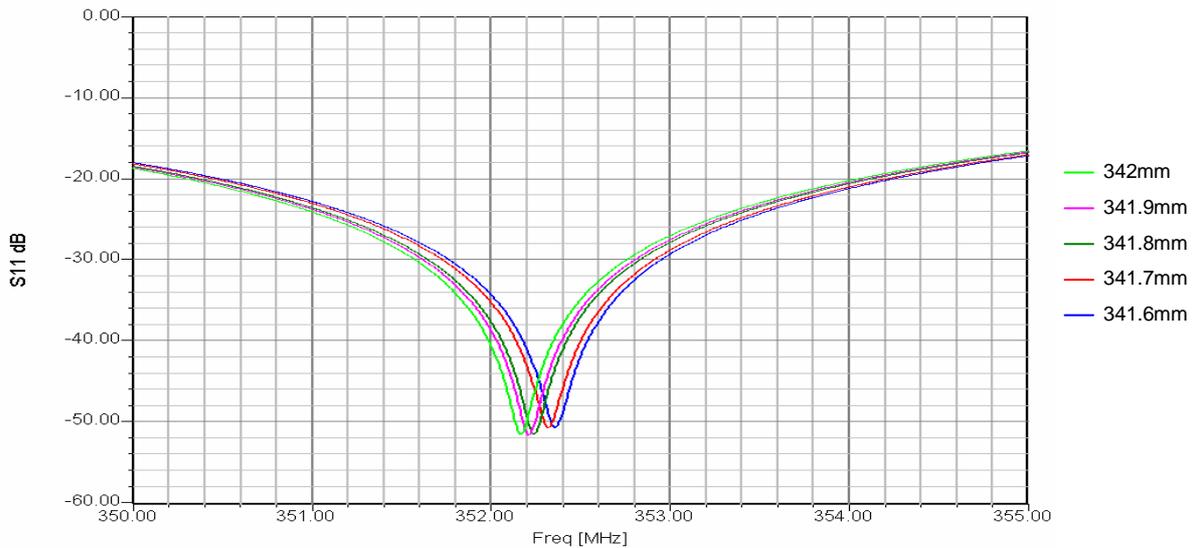


Figure 7 : Coefficient de réflexion en fonction de LR2

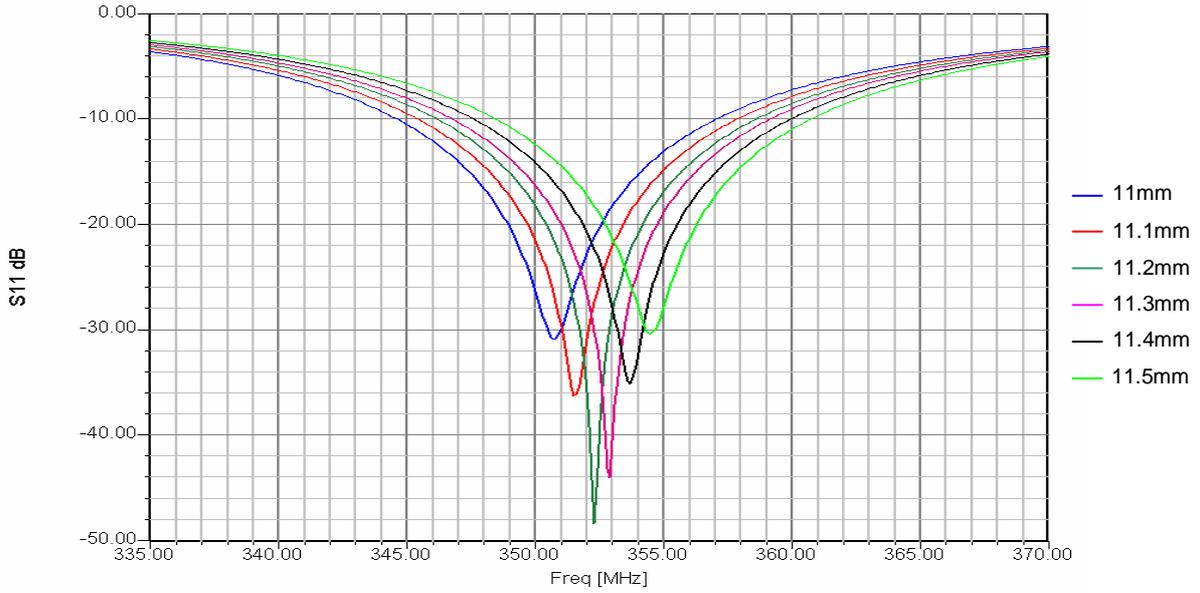


Figure 8 : Coefficient de réflexion en fonction du gap du ridge 2 (2\*HG2)

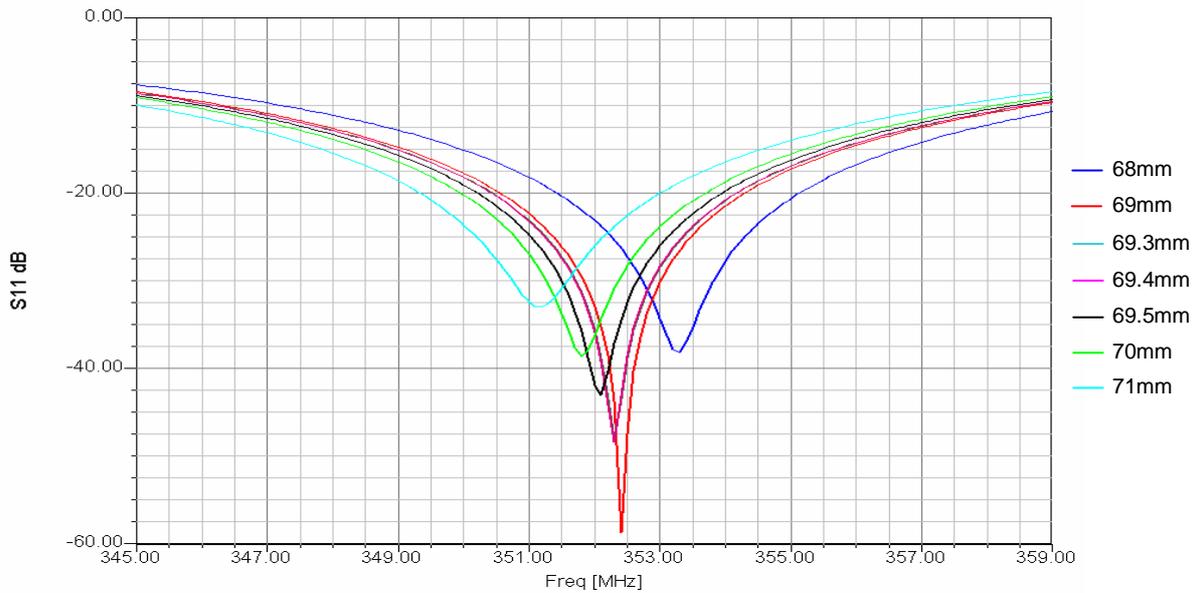
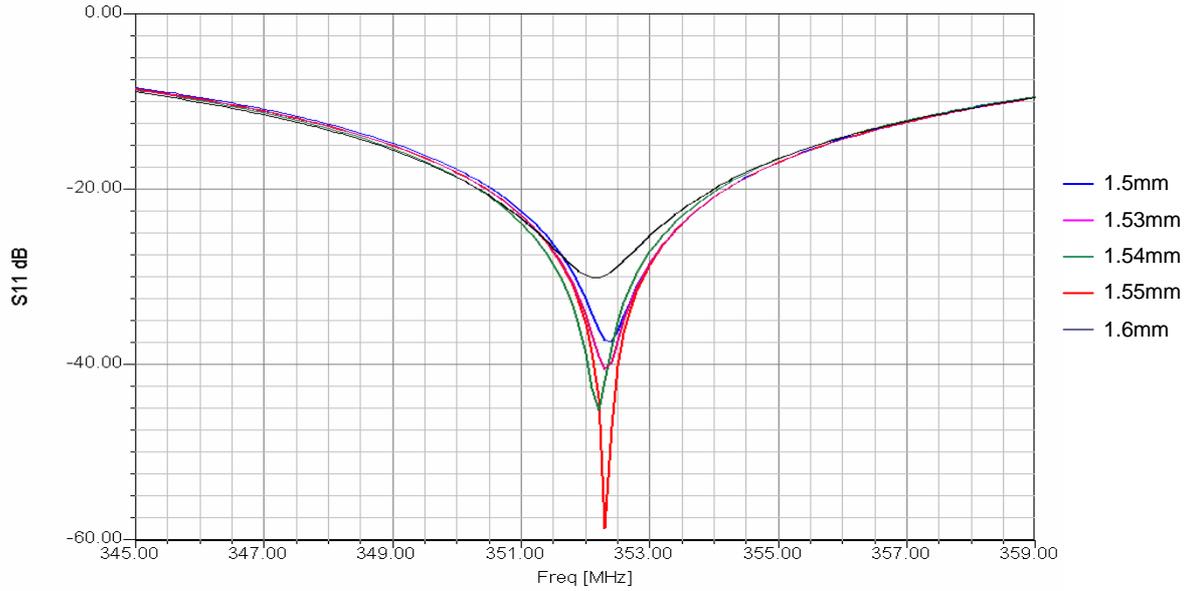


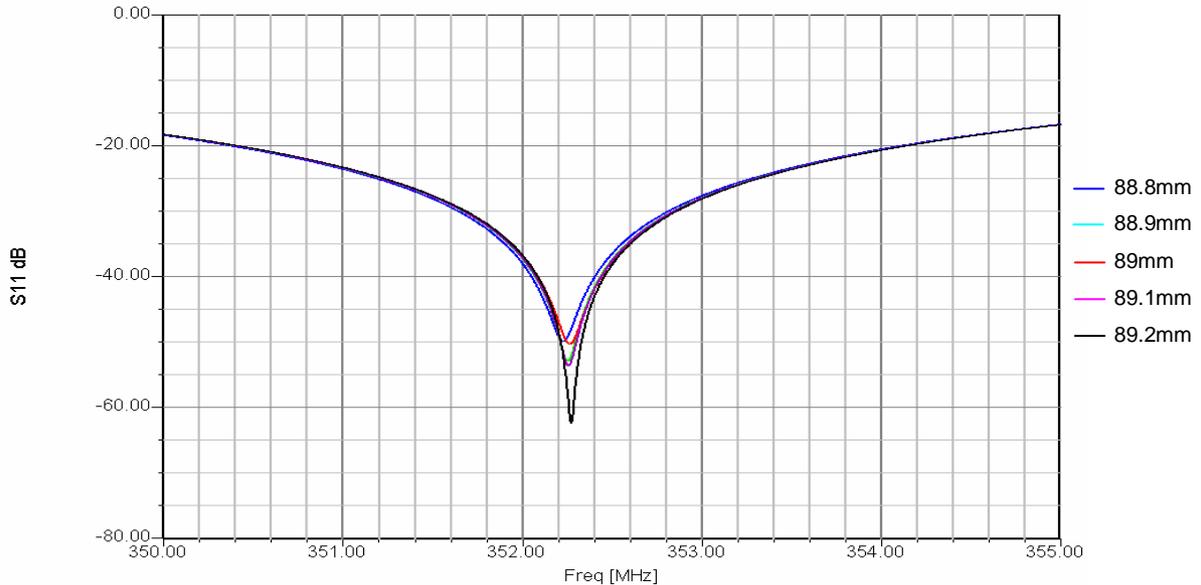
Figure 9 : Coefficient de réflexion en fonction de la largeur du gap du ridge 2 (2\*LG2)

b) Tolérance pour le ridge1

Pour le ridge1, les valeurs critiques concernent le gap, en particulier sa hauteur et sa largeur. La sensibilité à ces deux dimensions géométriques est présentée sur les Figure 10 et Figure 11.



**Figure 10 : Coefficient de réflexion en fonction du gap du ridge 1 (HR1)**



**Figure 11 : Coefficient de réflexion en fonction de la largeur du gap du ridge 1 (LG1)**

### c) Conclusions

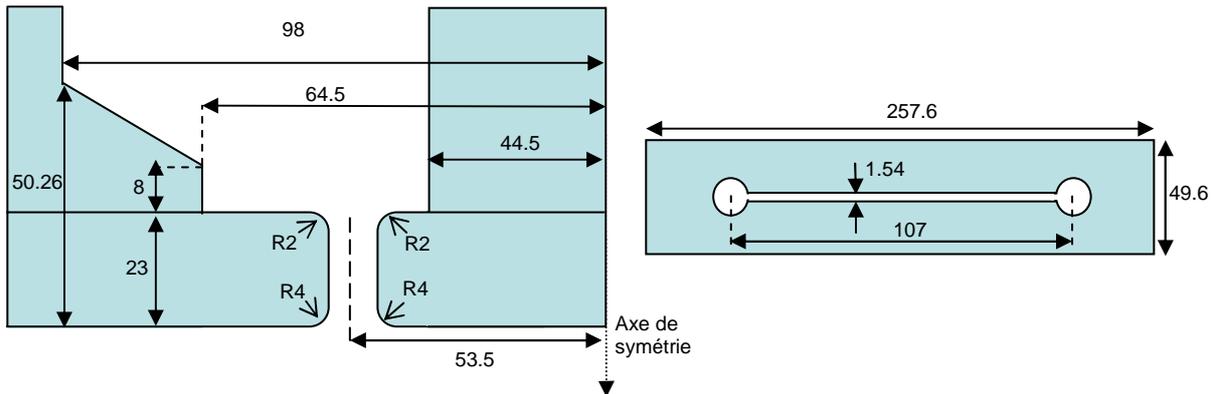
Ces résultats font apparaître que la dimension la plus critique pour la réalisation de la transition est le gap du ridge 1. Les erreurs sur celle-ci devront être de l'ordre du centième. Compte tenu de la large bande passante, les tolérances sur les autres pièces pourront être du dixième de millimètre.

## II Calculs et Mesures du couplage

### 1) Structure de référence

Le dispositif de couplage entre la transition et le RFQ est le même que celui prévu lors de l'étude précédente [1]. Il est constitué d'une plaque sur laquelle un iris de même épaisseur que le gap (1.54mm) est réalisé. Le couplage magnétique est assuré par la présence de trous situés aux extrémités de l'iris. Leurs diamètres permettront d'ajuster le couplage à la valeur désirée. L'extrémité du ridge 1 est modifiée par la présence d'un "sabot" qui permet d'améliorer la conduction thermique

entre l'iris et les canaux de refroidissement. Les différents bords des pièces seront arrondis. La Figure 12 présente le dispositif de couplage décrit précédemment.

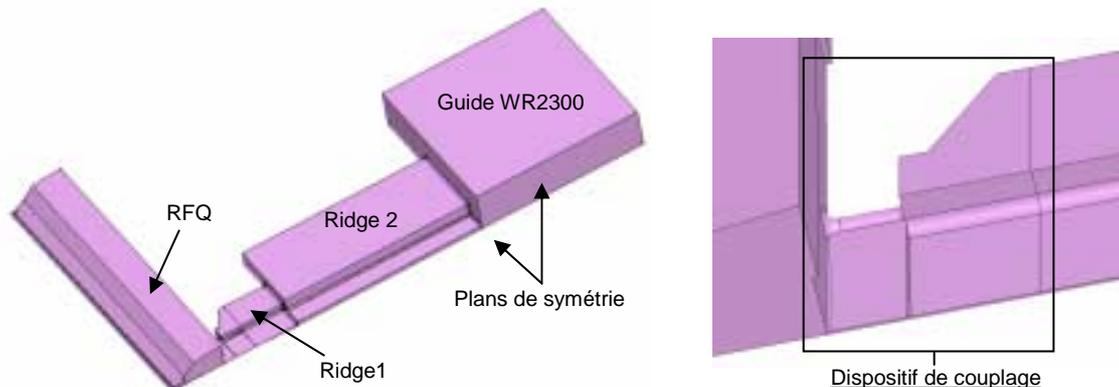


**Figure 12 : Dimensions du dispositif de couplage en mm**

L'iris de couplage pénètre de 1.5mm dans le RFQ afin de compenser le désaccord en fréquence causé par la présence de l'entrée RF. Cette pénétration dans la cavité pourra être aussi ajustée par la suite.

Compte tenu des différentes symétries présentes, le dispositif étudié avec le logiciel HFSS est représenté sur la Figure 13. Les simulations sont réalisées sur un demi quadrant et sur un demi tronçon du RFQ. Avec les symétries, cela représente un couplage complet par quadrant et par tronçon de 1 mètre. Pour les 6 mètres du RFQ, cela correspond à 24 entrées alors qu'en pratique, seule 3 entrées RF seront présentes. D'après les estimations des pertes cuivre et de la puissance faisceau [1], le facteur de qualité externe optimal du RFQ ( $Q_{ext}$ ) doit être de l'ordre de 6075. L'objectif des calculs avec HFSS est donc d'obtenir un  $Q_{ext}$  de l'ordre de:  $6075 \cdot 3 / 24 = 760$ .

Différentes valeurs de couplage ont été calculées en fonction de différentes valeurs de diamètres pour les trous. Tous les arrondis présents sur les pièces réelles ont été pris en compte dans les calculs, en particulier l'arrondi de 1mm du gap de l'iris.



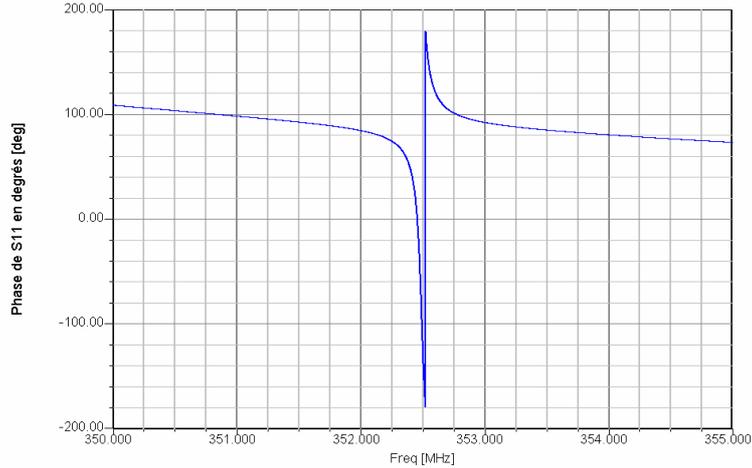
**Figure 13: Modélisation de la transition et du coupleur**

Le calcul avec HFSS, sans pertes, permet d'obtenir le coefficient de réflexion au niveau de l'entrée du guide WR2300. Le facteur de qualité externe peut être obtenu à l'aide de la formule suivante prenant en compte la phase du paramètre S11:

$$Q_{ext} = \frac{f_{0|\varphi_0}}{|f_{|\varphi_0-90^\circ} - f_{|\varphi_0+90^\circ}|}$$

Où  $f_0$  est la fréquence de résonance du RFQ (qui peut être déterminée lorsque l'énergie emmagasinée est maximale).

Un exemple de résultat est présenté sur la Figure 14.



**Figure 14 : Exemple de la phase du coefficient de réflexion autour de la fréquence de résonance du RFQ**

Nous présentons les différentes valeurs du facteur de qualité externe en fonction du diamètre des trous de couplage sur le Tableau 1. Le  $Q_{ext}$  à obtenir étant de l'ordre de 715, nous pouvons en déduire que le diamètre du trou sera compris entre 9 et 10 mm.

Diamètre du trou (mm)	$F_0$ (MHz)	$Q_{ext}$
4	352.473	3264
6	352.417	1784
7	352.379	1340
8	352.339	1012
9	352.29	786
10	352.156	613

**Tableau 1 :  $Q_{ext}$  en fonction du diamètre des trous**

## 2) Caractérisation expérimentale

La transition et le dispositif de couplage ont été réalisés pour pouvoir être testés sur la maquette. Préalablement, celle-ci a été configurée en deux fois deux mètres et réglée pour présenter une loi de tension constante à 352 MHz [3] avec la transition et le dispositif de couplage enfoncé de 3mm dans le RFQ au lieu de 1.5mm prévu initialement. L'accès RF, avec un diamètre de trou de 4mm, est situé au niveau du quadrant 1 du tronçon 3 (Figure 15 et Figure 16). Compte tenu que le couplage est magnétique et que le champ H est maximal dans le fond du quadrant, l'augmentation de l'enfoncement se traduit par une diminution du couplage et donc par une augmentation du  $Q_{ext}$ .



**Figure 15 : Vue d'ensemble du RFQ 2\*2m et de l'entrée RF**



**Figure 16 : Ridge 1 et plaque de couplage**

a) Mesure du coefficient de couplage pour un trou de 4mm

De nouveaux calculs avec le logiciel HFSS ont permis d'estimer le facteur de qualité externe pour cette pénétration de 3 mm dans la cavité. La valeur du  $Q_{ext}$  obtenu est de l'ordre de 3370.

Une boucle de mesure, très faiblement couplée, est placée dans un quadrant du tronçon 2 du RFQ et permet de mesurer la transmission et le facteur de qualité en charge  $Q_L$  du RFQ.

Ensuite, la mesure du coefficient de réflexion au niveau du guide d'onde WR2300 permet de calculer le coefficient de couplage  $\beta$  du mode désiré, puis de remonter à la valeur de  $Q_{ext}$ . Cette valeur correspond à un accès pour 4 mètres de RFQ. Pour obtenir une valeur comparable avec celle obtenue par les calculs HFSS, correspondant à 1 couplage par quadrant et par tronçons (soit 16 entrées pour 4 mètres), il faudra diviser la valeur mesurée par 16. Ce résultat pourra alors être comparé alors avec celui obtenu par le calcul électromagnétique.

Pour le trou de diamètre 4mm, nous avons obtenu d'après les mesures un facteur de qualité externe de l'ordre de 53908. Ce résultat est ensuite divisé par 16 pour obtenir une valeur comparable à celle des simulations HFSS (Tableau 2).

Les résultats expérimentaux présentent alors un très bon accord avec le résultat obtenu par simulation électromagnétique.

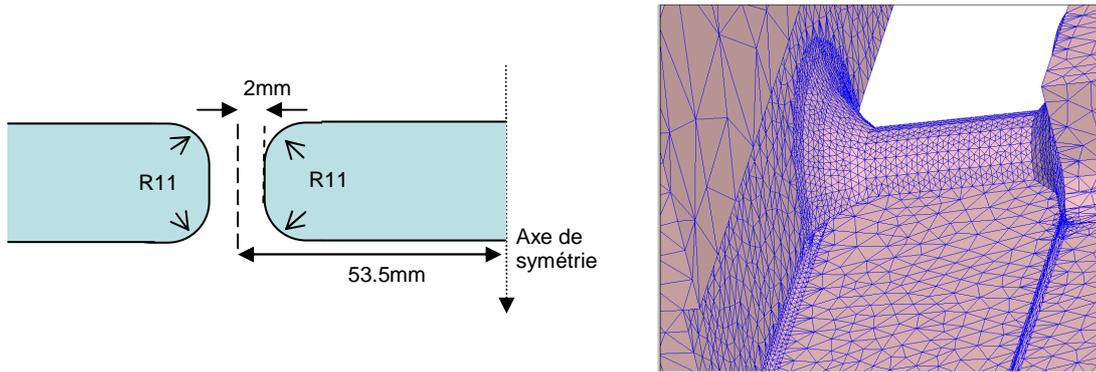
Diamètre du trou (mm)	Mesures		Calculs HFSS
	$F_0$ (MHz)	$Q_{ext}$	$Q_{ext}$
4mm	351.962	3369	3393

**Tableau 2 : Résultat pour un trou de diamètre de 4mm**

b) Modification du dispositif de couplage

Pour faciliter l'usinage de la pièce de couplage et ainsi diminuer les coûts, quelques modifications ont été apportées sur l'iris de couplage. Les différents arrondis au niveau du trou ont été modifiés de façon à limiter le nombre d'opération de reprise à chaque agrandissement des trous. Les arêtes arrondies auront un rayon initial de 11mm et ne seront plus modifiées entre chaque mesure de couplage (Figure 17). Seul le diamètre du trou, à partir de la valeur initiale de 4mm, sera ajusté et les angles apparaissant seront cassés.

Pour prendre en compte ces modifications géométriques qui entraînent une augmentation du couplage (donc une diminution du facteur de qualité externe), de nouveaux calculs sont effectués à l'aide du logiciel HFSS.

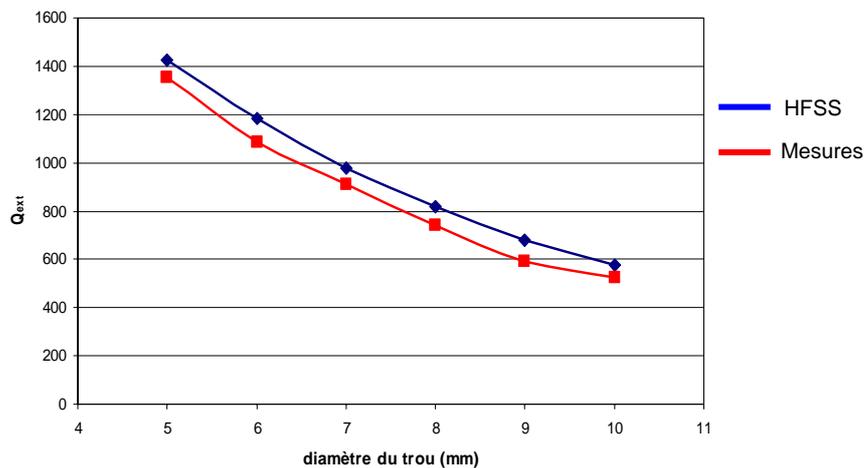


**Figure 17 : Nouvelles dimensions des trous de couplages et maillage du couplage avec HFSS**

Les résultats des simulations HFSS et des mesures effectuées sont donnés dans le tableau suivant:

Diamètre du trou (mm)	Mesures		Calculs HFSS
	$F_0$ (MHz)	$Q_{ext}$	$Q_{ext}$
4			1589
5	351.951	1355	1412
6	351.938	1086	1184
7	351.921	913	980
8	351.935	739	816
9	351.952	593	680
10	351.955	525	574

**Tableau 3 : Résultats des mesures et des calculs en fonction du diamètre des trous**



**Figure 18 : Comparaison mesures et calculs HFSS**

L'un des points essentiels de la caractérisation de l'entrée RF est de s'assurer de bons contacts RF entre les différents éléments, et en particulier entre la plaque de couplage et le RFQ. La non réalisation de cette condition peut entraîner des champs de fuites et des difficultés à réaliser un couplage "propre" entre l'entrée RF et le RFQ.

Les différences entre les calculs et la caractérisation expérimentale (Figure 18) peuvent s'expliquer en partie par le "cassage" des angles apparents au niveau des trous de couplages lors de leurs agrandissements successifs. Cette manipulation n'est pas prise en compte lors de la réalisation

du maillage sous HFSS. Ainsi cette opération augmente légèrement le trou de couplage, ce qui peut expliquer les valeurs plus faibles des coefficients de qualité externe mesurés par rapports à ceux obtenus par le calcul.

## Conclusion

Nous avons donc décrit un nouveau type de transition entre le guide d'onde WR 2300 et le piquage sur le RFQ. Cette transition est de type transformateur d'impédance qui permet la transmission de la puissance sur une bande passante de l'ordre de 3.7 MHz autour de la fréquence de travail de 352.2 MHz. Ce dispositif a permis de décorrélérer l'adaptation de la transition avec le réglage de l'iris de couplage au niveau de la cavité.

Ce dispositif a été ensuite testé sur la maquette du RFQ, configurée en 2\*2 mètres, pour différents diamètres de trous de couplage. Ces tests ont été validés par des comparaisons réalisées avec le logiciel de simulation électromagnétique HFSS. L'un des points essentiels pour la bonne réalisation du couplage est de s'assurer de bons contacts RF entre les différents éléments constituant la transition, et en particulier entre la plaque de couplage et le RFQ.

Enfin, les mesures du champ magnétique dans la maquette ont permis de vérifier que la présence du dispositif de couplage, puis l'agrandissement du diamètre des trous ne dégradait pas le profil constant de la tension.

**Références :**

- [1] P. Balleyguier, "Entrées de puissance RF dans le RFQ d'IPHI", 25/03/2002
- [2] M. Luong et M. Desmons, "Transition guide rectangulaire-Guide ridgé à fréquence de Coupure Constante pour l'alimentation du RFQ d'IPHI ", 16/07/2002
- [3] F. Simoens, A. France et J. Gaiffier, "Réglage d'une tension constante dans un RFQ d'IPHI de 2m à l'aide des ses pistons d'accord", 17/03/2002