



dapnia

cea

saclay

Date d'émission:	24 janvier 2005	SPIRAL2/linac supra
Auteurs :	Pierre-Emmanuel Bernaudin , Pierre Bosland , Guillaume Devanz , Frédéric Michel (DSM/DAPNIA/SACM) Philippe Hardy (DSM/DAPNIA/SIS)	
Vérificateur :	Stéphane Chel	
Objet :	Rapport d'APD pour le cryomodule A de SPIRAL 2	
Réf :	DAPNIA-05-15 EDMS I-004545	

Rapport d'A.P.D.

Projet *SPIRAL 2*

« Cryomodule A »

||
ced
||



SOMMAIRE

Introduction

1^{ère} partie - Etude et conception de la cavité SPIRAL 2 à $\beta = 0,07$

1.	Introduction	12
2.	Généralités	12
2.1.	Conventions	12
2.2.	Cahier des charges	12
2.3.	Description de la cavité	12
3.	Optimisation RF de la cavité.....	13
3.1.	Codes de calcul.....	13
3.2.	Accord de la cavité	13
3.2.1.	Obtention du β optimal	13
3.2.2.	Accord en fréquence	14
3.3.	Minimisation des champs de surface.....	14
3.3.1.	Minimisation du champ électrique de surface.....	14
3.3.2.	Minimisation du champ magnétique de surface	15
3.4.	Autres géométries considérées	15
3.5.	Augmentation du diamètre du tube faisceau	15
3.6.	Compensation de la composante dipolaire.....	15
3.7.	Sensibilité aux erreurs.....	17
3.8.	Minimisation des pertes	18
3.9.	Couplage	18
3.10.	Récapitulatifs.....	21
4.	Calculs mécaniques	22
4.1.	Codes de calcul.....	22
4.2.	Système d'accord en fréquence	23
4.3.	Sensibilité à la pression	25
4.4.	Vibrations	26
4.5.	Fond de la cavité.....	29
5.	Conclusions	30

2^{ème} partie - Réalisation et essais d'une cavité prototype

6.	Introduction	36
7.	Réalisation d'une cavité prototype	36
8.	Réception de la cavité prototype	38
9.	Préparation de la cavité SPIRAL 2.....	39



9.1.	Chimie	39
9.1.1.	Rinçage ultra sons	40
9.1.2.	Chimie FNP	40
9.2.	Rinçage haute pression	44
9.2.1.	Conception	44
9.2.2.	Rinçage	47
9.2.3.	Préparation de la cavité	47
10.	Essais RF de la cavité SPIRAL 2	48
10.1.	Mesures de fréquence	48
10.2.	Mesures de champ et de Q_0	49
11.	Conclusion	50
11.1.	Protocole de préparation.....	50
11.2.	Fréquence	50
11.3.	Champ et pertes.....	51
Annexe 1 – Modifications à apporter au système de traitement chimique.....		52
Annexe 2 – Modifications à apporter au système de rinçage haute pression.....		53

3^{ème} partie - Etude et conception du cryomodule

12.	Principes généraux.....	56
13.	Géométrie et encombrement.....	56
14.	Pompage	58
14.1.	Vide d'isolation	58
14.2.	Vide cavité.....	58
15.	Support et alignement	59
15.1.	Maintien de la cavité	59
15.2.	Alignement	61
16.	Cryogénie	63
16.1.	Introduction	63
16.2.	Les apports thermiques sur l'écran à 65 K	63
16.2.1.	Les apports de chaleur par rayonnement.....	64
16.2.2.	Les apports de chaleur par conduction	64
16.2.3.	Récapitulatif des apports à 65 K.....	66
16.3.	Les apports thermiques à 4 K	66
16.3.1.	Les apports de chaleur par rayonnement.....	67
16.3.2.	Les apports de chaleur par conduction	67
16.3.3.	Les apports par dissipations RF	68



16.3.4.	Récapitulatif des apports à 4 K.....	68
16.4.	Les études particulières	68
16.4.1.	Mise en froid	68
16.4.2.	Enceinte hélium	69
16.4.3.	Thermosiphon.....	69
16.4.4.	Tresses	70
16.5.	Conclusion	71
17.	Système d'accord.....	71
18.	Blindage magnétique.....	74
19.	Instrumentation.....	75
19.1.	Cryogénie.....	76
19.2.	Vide	76
19.3.	Autres.....	76
20.	Interfaces.....	78
21.	Assemblage du cryomodule	78

Conclusion

Annexe 1 : participants à l'activité « Cryomodule A » de l'APD SPIRAL 2.

Annexe 2 : liste des publications.

Annexe 3 : cahier des charges de la cavité prototype.

Annexe 4 : plans de détail de la cavité prototype.

Annexe 5 : plans de détails des outillages de préparation de la cavité prototype.



Liste des figures

Figure 1 – Coupe de la cavité quart d'onde (88 MHz, β 0,07) retenue pour le cryomodule A.	13
Figure 2 – Définition des rayons des tubes de glissement.....	14
Figure 3 – Evolution du paramètre D_y avec l'angle d'inclinaison des tubes de glissement.....	16
Figure 4 – Evolution du paramètre g avec l'angle d'inclinaison des tubes de glissement.....	17
Figure 5 – Variation du Q_{ext} en fonction de la pénétration de l'antenne et de sa position radiale.	19
Figure 6 – Module du champ électrique pour le couplage nominal	20
Figure 7 – Acceptance en β de la cavité	21
Figure 8 – Applicateur du système d'accord en fréquence.....	24
Figure 9 – Répartition des contraintes générées par le système d'accord en fréquence.....	24
Figure 10 – Renforts considérés pour contrer les effets de pression.	26
Figure 11 - Vue schématique en coupe du fond de la cavité.....	30
Figure 12 – Déformation du cône constaté (<i>schéma pas à l'échelle</i>).	36
Figure 13 – Eléments du prototype de cavité.....	37
Figure 14 – Cavité SPIRAL 2 β 0,07 à réception, 10 novembre 2004.....	38
Figure 15 – Couvercle en niobium - titane.	39
Figure 16 – schéma de principe du traitement chimique FNP.	40
Figure 17 – système conçu pour le traitement chimique.....	41
Figure 18 – Traitement chimique FNP de la cavité.	42
Figure 19 – Détail des connexions avec vannes.....	43
Figure 20 – Système de rinçage HPR ; vue d'ensemble.	45
Figure 21 – Vue du système d'entraînement.	46
Figure 22 –Orientation des perçages de la buse HPR.....	46
Figure 23 – Support pour le séchage.	47
Figure 24 – La cavité sur son insert lors de son positionnement dans le cryostat vertical.	48
Figure 25 – Mesure du Q_0 en fonction du champ accélérateur.....	49
Figure 26 – Vues générales du cryomodule.	56
Figure 27 – Implantation de la zone de l'axe faisceau entre la vanne d'isolement (à gauche) et l'axe de symétrie de la cavité (à droite).	57
Figure 28 – Déformées et contraintes sur l'enceinte du cryomodule sous l'effet de 1 bar de pression statique.	58
Figure 29 – Rétreints thermiques.	59
Figure 30 – Tirants supportant la cavité.	60
Figure 31 – Report de l'axe faisceau pour alignement.....	61
Figure 32 – Usinages de référence en V et positionnement de l'outil de report d'axe.	62



Figure 33 – Interface cryogénique.....	64
Figure 34 – Ecran thermique en cuivre.	65
Figure 35 – Système de refroidissement du fond de la cavité.	70
Figure 36 – Vue générale du système d'accord.....	71
Figure 37 – Profil du bras.	72
Figure 38 – Transmission moteur (cas où le moteur est hors du cryomodule).....	73
Figure 39 – Blindage magnétique.	75
Figure 40 – Raccordements de l'instrumentation du cryomodule.....	77
Figure 41 – Assemblage des tirants sur le cryomodule.	79

Liste des tableaux

Tableau 1 – Influence du diamètre de tube faisceau sur les performances RF de la cavité.	15
Tableau 2 – Influence des cotes mécaniques sur la fréquence de résonance.....	17
Tableau 3 – dimensions de la cavité.....	21
Tableau 4 – caractéristiques de la cavité.....	22
Tableau 5 – Efficacité du système d'accord en fréquence.....	25
Tableau 6 – Sensibilité de la cavité aux variations de pression.....	26
Tableau 7 – Premiers modes de vibration mécanique de la cavité.	27
Tableau 8 – Caractéristiques RF des cavités optimisées pour le linac supraconducteur du projet SPIRAL 2.....	33
Tableau 9 – Effets des diverses opérations sur la fréquence de la cavité.....	49
Tableau 10 – Apports thermiques à 65 K.....	66
Tableau 11 – Apports thermiques à 4 K.....	68
Tableau 12 – Caractéristiques mécaniques du bras du système d'accord.....	73
Tableau 13 – Pertes en fonction du champ magnétique résiduel.....	74
Tableau 14 – Effets du blindage magnétique.....	74

||
ced
||



Introduction

Le projet d'accélérateur d'ions exotiques SPIRAL 2 comprend un linac composé d'un quadripôle radiofréquence (RFQ) et de deux familles de cavités supraconductrices type quart d'onde. A l'issue des études de dynamique faisceau, les deux familles retenues sont :

- ∇ une cavité résonant à 88 MHz et de β géométrique 0,07 ;
- ∇ une cavité résonant à 88 MHz et de β géométrique 0,12.

Le DAPNIA a été chargé de l'étude et de la conception d'un cryomodule complet pour la première famille de cavités, avec réalisation et essai d'une cavité prototype.

La présente note finale résume l'ensemble du travail effectué dans ce cadre au cours des deux années d'Avant-Projet Détaillé (2003-2004).

Elle se divise en trois parties.

La première décrit l'étude et la conception de cavité proprement dite sur les plans RF et mécaniques. La seconde fait le bilan de la réalisation et des essais du prototype de cavité. La troisième partie décrit en détail le cryomodule conçu pour ce type de cavité.

||
ced
||



1^{ère} partie

Etude et conception de la cavité SPIRAL 2 à $\beta = 0,07$



1 Introduction

Cette première partie décrit l'optimisation de la cavité β 0,07, sur les plans hyperfréquence et mécanique. Noter que cette cavité diffère légèrement de la cavité prototype, principalement sur la partie basse (fond démontable et bride associée) et sur l'épaisseur de niobium utilisée.

2 Généralités

2.1 Conventions

Dans ce document, l'orientation des axes est prise comme suit (voir Figure 1) :

- ∇ axe z : axe faisceau, orienté positivement dans le sens de propagation du faisceau ;
- ∇ axe y : axe vertical, orienté positivement vers le haut.

Le champ accélérateur est défini comme la composante accélératrice (E_z) du champ électrique sur l'axe faisceau intégrée sur toute la longueur la cavité et divisée par $\beta\lambda$:

$$E_{acc} = \frac{\left| \int E_z(z) e^{i\alpha z/\beta c} dz \right|}{\beta\lambda}$$

2.2 Cahier des charges

La cavité demandée doit avoir les caractéristiques suivantes :

Fréquence de résonance 88 MHz ;

- ∇ β optimal 0,07 ;
- ∇ champ accélérateur 8 MV/m (pour une utilisation à 6,5 MV/m) ;
- ∇ champ électrique de surface maximum 40 MV/m ($E_{pic}/E_{acc} < 5$) ;
- ∇ pertes RF inférieures à 7 W à 6,5 MV/m de champ accélérateur ;
- ∇ champ magnétique de surface maximum 80 mT ($B_{pic}/E_{acc} < 10$ mT/[MV/m]).

Sur le plan mécanique :

- ∇ sensibilité aux variations de pression du bain d'hélium inférieure ou égale à 1/10^e de bande passante ;
- ∇ système d'accord en fréquence dans une bande de 20 kHz ;
- ∇ maximisation de la fréquence de vibration la plus basse.

2.3 Description de la cavité

Une cavité quart d'onde (Figure 1) se compose schématiquement d'un guide d'onde coaxial tronqué à une longueur $\lambda/4$ et traversé radialement par le tube faisceau. Une forme plus élaborée (figure) incorpore des tubes de glissement qui permettent d'ajuster localement les champs de surface



sur le conducteur central, de régler la longueur de la section accélératrice et le β optimal indépendamment du diamètre de la cavité, voire de compenser les composantes défectives de ce type de cavité.

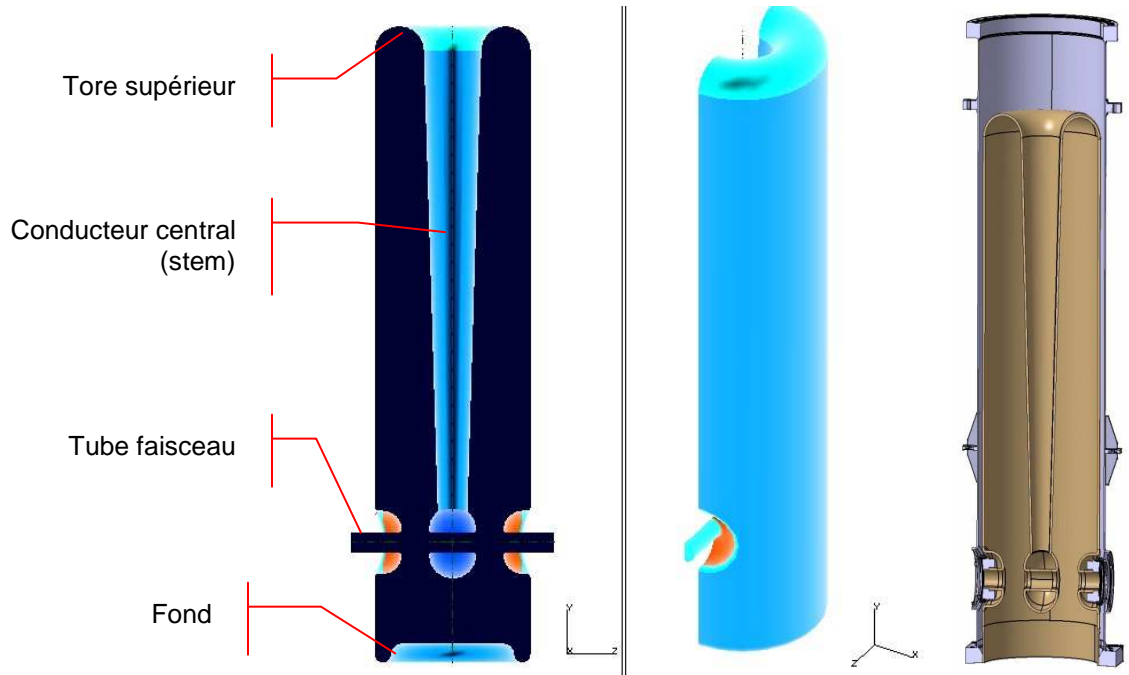


Figure 1 – Coupe de la cavité quart d'onde (88 MHz, β 0,07) retenue pour le cryomodule A.

3 Optimisation RF de la cavité

3.1 Codes de calcul

Trois codes de calcul 3D ont été utilisés pour les calculs RF : *SOPRANO* v8.7 [1], *GDFIDL* [2] et *HFSS* v8.5 [3]. Ce dernier code permet d'utiliser des maillages plus denses et est plus précis en fréquence (maillage adaptatif), mais *SOPRANO*, grâce à la possibilité d'optimiser le maillage plus finement au moyen du code de CAO/mécanique *IDEAS* [4], donne des champs de surface plus réalistes et surtout moins bruités. Quant à *GDFIDL*, il a servi à accorder en fréquence et en β .

3.2 Accord de la cavité

3.3 Obtention du β optimal

Le β optimal de la cavité ne dépend au premier ordre que de la distance entre le centre des deux espaces accélérateurs situés de part et d'autre du tube de glissement central.



La cavité quart d'onde la plus simple se compose de deux cylindres coaxiaux, percés au niveau de l'axe faisceau, et liés au sommet par un disque. Toutefois, dans cette géométrie, le β optimal de la cavité ne peut pas être réglé indépendamment des dimensions des cylindres. Ceci conduit à l'adjonction de tubes de glissement, qui permettent de le régler indépendamment du diamètre externe de la cavité. De même, l'ajout à l'extrémité du stem d'un « tube de glissement » permet d'ajuster le β optimal indépendamment du diamètre du stem. Un autre avantage lié à l'utilisation de ces tubes de glissement est que le diamètre du stem n'est plus dépendant du diamètre du tube faisceau.

3.4 Accord en fréquence

Au terme de la procédure d'optimisation, une fois que le β optimal a été obtenu et les champs de surface minimisés, la fréquence de résonance de la cavité est ajustée grâce au dernier paramètre indépendant, la hauteur totale de la cavité. Plus exactement, la hauteur de la cavité mesurée à partir de l'axe faisceau est seule réellement significative, la distance entre l'axe faisceau et le fond (bride du bas) influant peu sur la fréquence de résonance (moins de 10 kHz/mm).

3.5 Minimisation des champs de surface

3.5.1 Minimisation du champ électrique de surface

Le maximum de champ électrique se trouve sur le tube de glissement central. Deux paramètres principaux influent sur la valeur de ce maximum et sur sa répartition spatiale : le rayon de courbure de la paroi du tube de glissement (rayon r_3 sur la Figure 2), et la distance du tube de glissement à la paroi de la cavité. Il existe donc une limite inférieure aux champs que l'on peut atteindre du fait du β optimal de la cavité d'une part, et des dimensions du conducteur externe qui sont acceptables d'autre part.

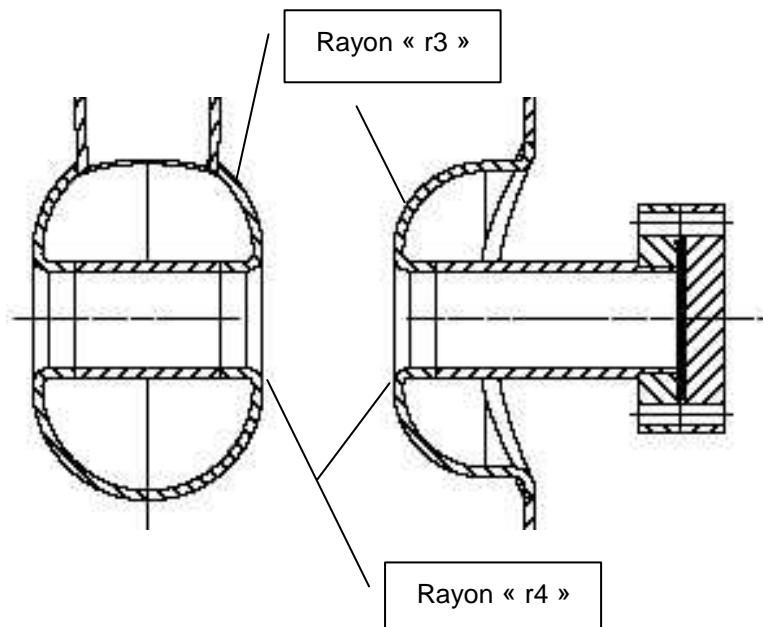


Figure 2 – Définition des rayons des tubes de glissement.



La diminution du champ électrique de surface sature pour les grandes valeurs de r_3 . Le diamètre du tube de glissement ainsi fixé, on règle le diamètre externe de la cavité. Un compromis est inévitable afin de ne pas aboutir à une cavité de trop fort diamètre.

Les dimensions des demi tubes de glissement externes et du tube de glissement interne n'ont nullement besoin d'être identiques ; les premiers cités peuvent être plus petits, dans la mesure où le champ électrique sur leur surface est significativement plus faible.

3.5.2 Minimisation du champ magnétique de surface

Le maximum du champ magnétique se trouve sur le stem, autour de sa jonction avec le sommet de la cavité. Comme dans toute ligne coaxiale, plus le diamètre du conducteur interne (ici le stem) est important, plus faible est le champ magnétique. Comme le maximum est localisé dans la partie haute, cette constatation conduit naturellement à un stem conique, afin que le stem n'ait pas un diamètre trop important au niveau du tube de glissement.

L'utilisation d'un sommet torique participe aussi à la minimisation du champ magnétique de surface, mais il a surtout pour avantage de faciliter les phases de rinçages et de chimie en éliminant les angles et faces planes.

3.6 Autres géométries considérées

Une géométrie alternative a été considérée, où la section de la cavité et / ou du stem n'est plus cylindrique mais en forme d'hippodrome. Ceci permet de régler indépendamment les dimensions dans les deux plans verticaux. Cette solution a finalement été rejetée car elle n'offre pas d'avantage décisif tout en compliquant la réalisation.

La hauteur de l'axe faisceau, ou plus exactement le positionnement du fond de la cavité par rapport aux tubes de glissement, est un paramètre indépendant. Il est intéressant d'abaisser la position des tubes de glissement afin de minimiser la composante de champ magnétique transverse B_x au niveau de l'axe faisceau ; *a contrario*, il faut garder une certaine distance entre le fond et le tube de glissement afin que le champ magnétique reste le plus faible possible à hauteur du joint RF

3.7 Augmentation du diamètre du tube faisceau

Des calculs RF pour une cavité avec un tube faisceau de plus grand diamètre (44 mm) ont été effectués. Ces calculs sont postérieurs à toutes les études présentées dans ce document. De fait, tous les calculs mécaniques et le design du cryomodule ne sont compatibles qu'avec de diamètre de tube faisceau de 30 mm.

	Cavité optimisée ($\varnothing=30$ mm, $r_3=35$ mm)	$\varnothing=44$ mm, $r_3=28$ mm	$\varnothing=44$ mm, $r_3=35$ mm
Fréquence de résonance	87,931 MHz	86,791 MHz	84,518 MHz
r/Q	632 Ω	571 Ω	560 Ω
E_{pic}/E_{acc}	5,0	5,5	5,4
B_{pic}/E_{acc}	8,75 mT/(MV/m)	9,4 mT/(MV/m)	9,6 mT/(MV/m)

Tableau 1 – Influence du diamètre de tube faisceau sur les performances RF de la cavité.

Deux types de calcul ont été effectués. Le premier conserve constant le diamètre des tubes de glissement, donc l'arrondi r_3 (voir Figure 2) diminue de 7 mm ; dans le deuxième cas, les arrondis sont



conservés constants et c'est donc le diamètre des tubes de glissement qui augmente de 14 mm. Ces cavités n'ont pas été ré optimisées, aussi les résultats présentés dans le Tableau 1 doivent-ils pouvoir être améliorés.

3.8 Compensation de la composante dipolaire

Il convient de mentionner que cette étude a été réalisée pour des cavités à 176 MHz, β 0,14 dans la mesure où c'est cette solution qui avait été retenue à ce moment (voir en annexe). Le design étant globalement le même pour les cavités à 88 MHz, la situation est encore plus favorable qu'à 176 MHz, la distance de l'axe faisceau par rapport au fond ramenée à la longueur d'onde étant plus courte, et donc les composantes du champ magnétique plus faibles.

En effet, du fait de leur asymétrie verticale, les cavités de type quart d'onde présentent sur l'axe faisceau une composante dipolaire (champ E_y) et une composante défocalisante (champ B_x).

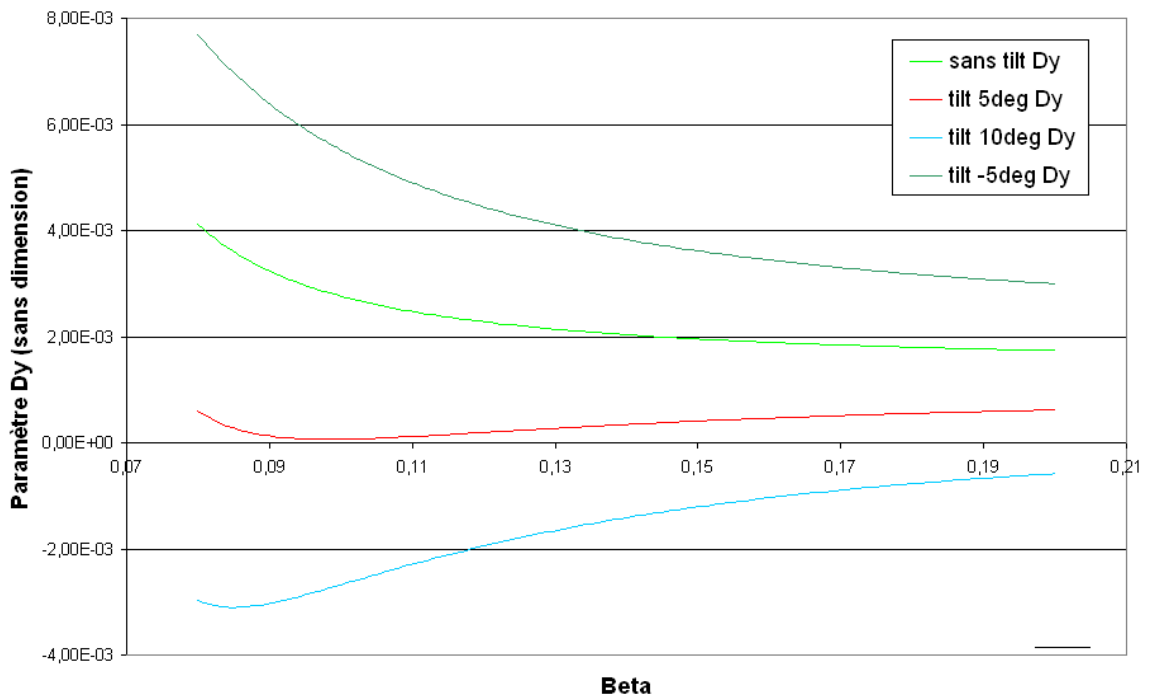


Figure 3 – Evolution du paramètre Dy avec l'angle d'inclinaison des tubes de glissement

Deux paramètres sont utilisés afin de mesurer les caractéristiques des cavités vis-à-vis de ce problème de composante défocalisante [5] :

- ∇ le paramètre g mesure la défocalisation différentielle ;
- ∇ le paramètre Dy mesure l'angle de déflexion.

La technique utilisée pour diminuer ces composantes consiste à incliner les parois des tubes de glissement (Figure 3 et Figure 4) [6].

Toutefois, compte tenu des faibles déflexions et grossissements d'émittance induits par ces composantes, cette solution n'a pas été implémentée sur le prototype.

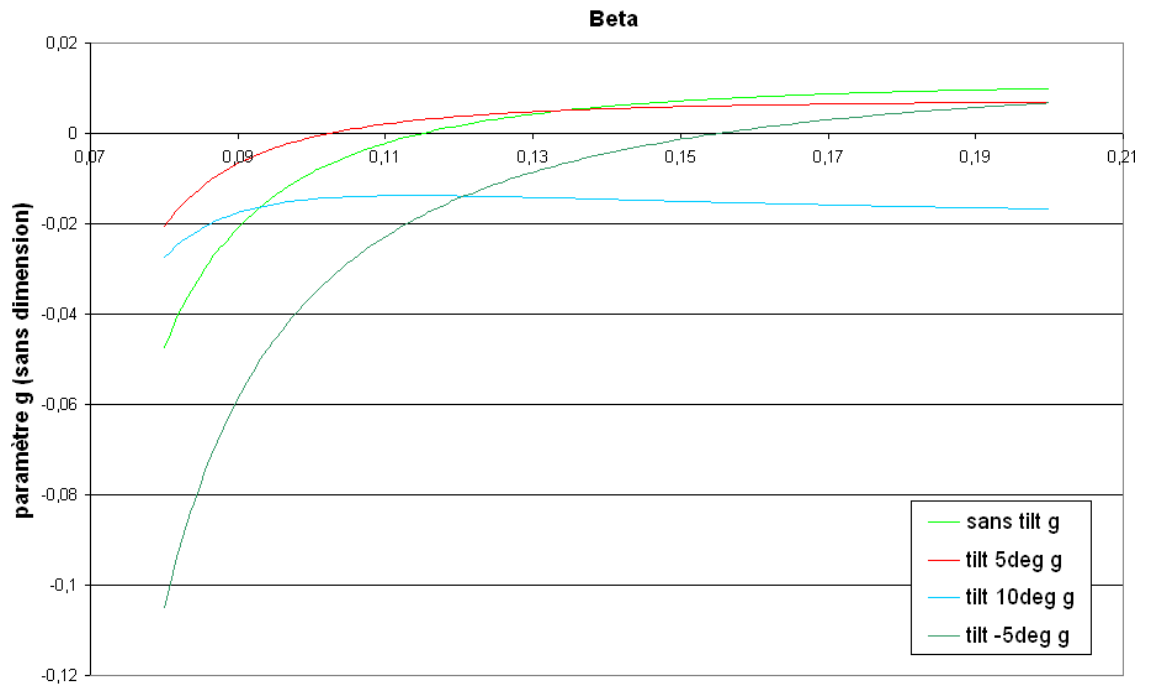


Figure 4 – Evolution du paramètre g avec l'angle d'inclinaison des tubes de glissement

3.9 Sensibilité aux erreurs

Afin de d'imposer des tolérances réalistes lors de la fabrication, il est nécessaire de connaître l'influence de différentes cotes et erreurs sur la fréquence de résonance. Ceci permet également de déterminer la procédure d'accord la plus adéquate. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Dimension	Type de variation	Sensibilité
Longueur totale de la cavité	Allongement de la cavité par insertion de cylindres en haut du conducteur extérieur et du cône (conducteur intérieur)	-80 kHz/mm
Hauteur du conducteur extérieur	Déplacement de l'ensemble stem / tore vers le bas	-6,5 kHz/mm
Longueur de l'espace accélérateur	Allongement des deux espaces accélérateur par retrait du tube de glissement extérieur	+115 kHz/mm
Position du fond	Déplacement vers le haut	-3,5 kHz/mm

Tableau 2 – Influence des cotes mécaniques sur la fréquence de résonance.



3.10 Minimisation des pertes

Pour le calcul des pertes RF dans la cavité, une résistance de surface R_s de $10 \text{ n}\Omega$ à 4 K est considérée¹.

En plus des pertes dans les parois en niobium de la cavité proprement dite, deux contributions importantes sont analysées : celles du joint de la bride de fond de la cavité d'une part, celles sur la portion en acier inoxydable des tubes faisceau (au delà des brides de la cavité) d'autre part. Pour ces calculs, la résistance de surface de l'inox à 4 K est prise à $36 \text{ m}\Omega$, et celle du cuivre à la même température à $0,15 \text{ m}\Omega$.

Les pertes sur les tubes en acier inoxydable dépendent de la position de la bride. Plus celle-ci est proche de la cavité et plus les pertes sont importantes. Dans la configuration retenue, les pertes sont d'environ 200 mW au total pour les deux tubes faisceau au champ nominal. Il est donc recommandé de cuivrer les portions de tube inox placées derrière la bride jusqu'au soufflet de rupture de conduction. Ce faisant, les pertes correspondantes sont réduites d'un facteur 10.

Les pertes sur le joint de la bride de fond sont d'autant plus faibles que l'axe faisceau et le joint sont éloignés du fond. La position du fond doit néanmoins faire l'objet d'un compromis (voir 4.5). Dans la configuration choisie, les pertes sur le joint de la bride du fond, considéré en cuivre, sont de 26 mW au champ nominal.

3.11 Couplage

Le coupleur de puissance de type coaxial est connecté au fond de la cavité en position verticale. L'antenne pénètre dans la cavité dans une zone de faible champ magnétique, ce qui permet de réduire les risques d'échauffement de son extrémité. Ce positionnement simplifie la conception de l'enceinte hélium car il n'est pas nécessaire d'y ajouter une sortie étanche pour le coupleur.

Les calculs du couplage à la cavité ont été effectués pour différents diamètres du conducteur externe, 30 mm , 40 mm et 36 mm en conservant une impédance de 50Ω pour le coupleur. L'extrémité de l'antenne est hémisphérique. On a étudié l'influence sur le facteur de qualité externe Q_{ext} de l'enfoncement de l'antenne et du décentrement du coupleur par rapport à l'axe vertical de la cavité dans la direction orthogonale à l'axe faisceau. La valeur nominale de Q_{ext} pour un fonctionnement en deutons est $6,6 \cdot 10^5$. Les résultats des calculs de Q_{ext} , effectués à l'aide de HFSS sur une demi cavité sont résumés sur la Figure 5. Les valeurs de Q_{ext} ont été déterminées par deux méthodes différentes, à partir des paramètres S (bande passante à -3 dB) et à partir de l'énergie stockée et la puissance émise par le port de couplage. Les résultats sont comparables à moins de 5% près sauf pour des valeurs de Q_{ext} supérieures à 10^6 pour lesquelles il devient coûteux en temps de calcul de déterminer avec précision la bande passante à -3 dB . On favorise les cas où la pénétration de l'antenne est minimisée. On remarque que le décentrement de 20 mm du coupleur n'est pas pénalisant.

¹ A 88 MHz et en considérant un RRR de 250, la résistance BCS vaut $3,2 \text{ n}\Omega$, à laquelle il convient d'ajouter une résistance résiduelle liée, en particulier, au piégeage du champ magnétique terrestre (voir 18, 3^{ème} partie).

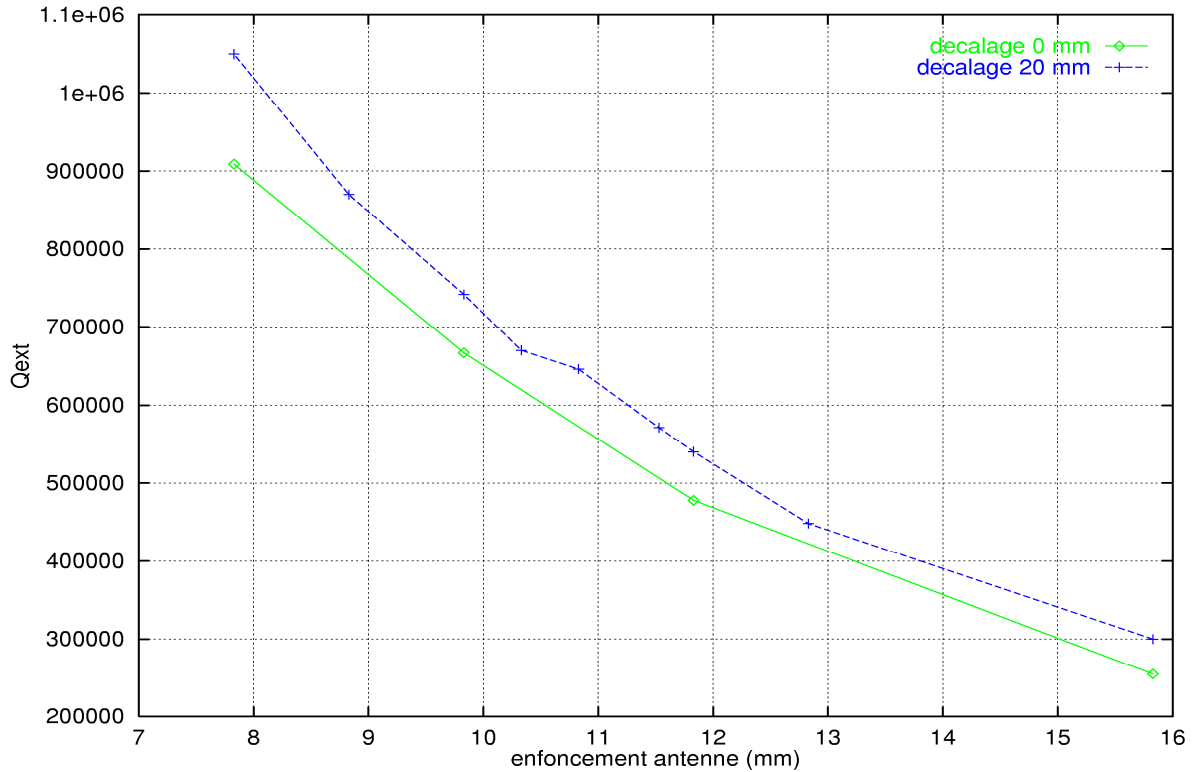


Figure 5 – Variation du Q_{ext} en fonction de la pénétration de l'antenne et de sa position radiale.

Etant donné l'encombrement des brides de connexion du coupleur et du pick-up et la nécessité de faciliter le montage de ces éléments en salle blanche, il a été décidé de décentrer de 20 mm l'axe du coupleur et d'utiliser une amenée de puissance de diamètre 36 mm (bride standard CF 40) comme représenté sur la Figure 6. L'adjonction d'un congé de 4 mm à la connexion entre le coupleur et le fond de la cavité diminue le Q_{ext} de 10%. La pénétration totale de l'antenne est donc fixée à 10 mm.

Des calculs de multipactor dans la zone coaxiale et cylindrique du coupleur ont été effectués à l'aide du code MUPAC [7], pour un diamètre externe de 30, 36 et 40 mm. La puissance a été balayée de 0 à 20 kW dans un régime d'ondes progressives. Aucune barrière de multipactor n'a été détectée sur cette plage que le diamètre soit 30, 36 ou 40 mm.

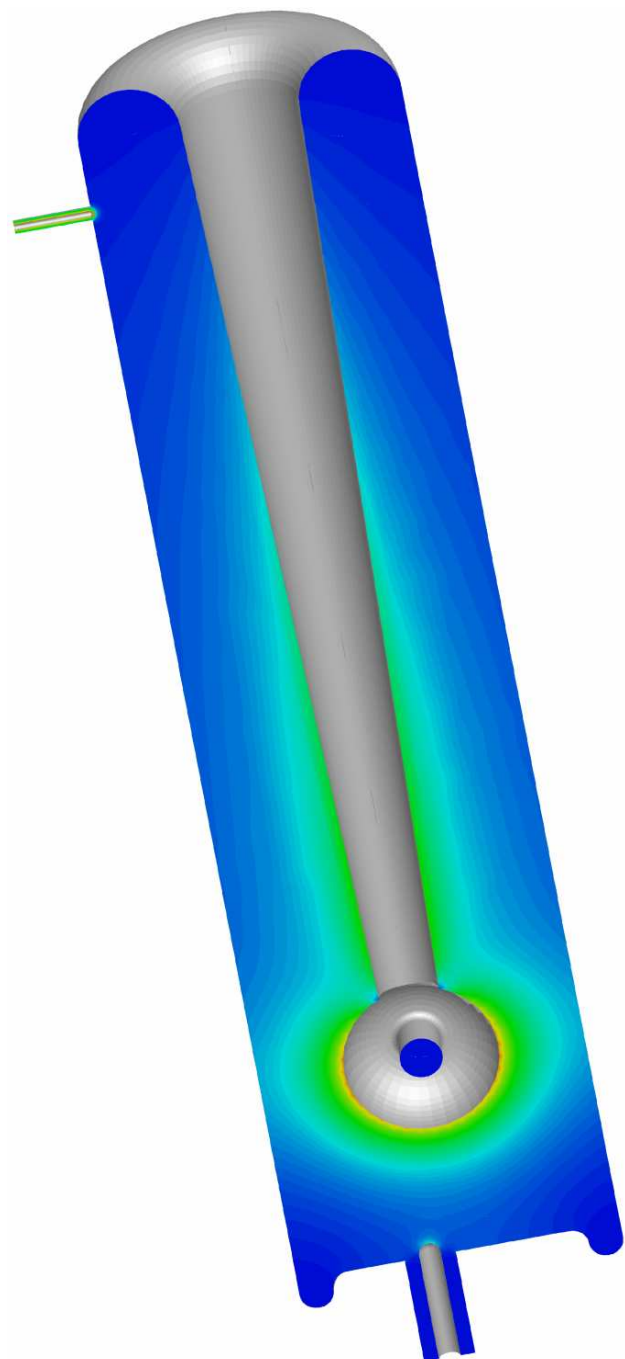


Figure 6 – Module du champ électrique pour le couplage nominal



3.12 Récapitulatifs

Hauteur totale	964,25	mm
Diamètre	230	mm
Hauteur de l'axe faisceau ²	153	mm
Altitude de la partie plate du fond	29	mm
Diamètre du tube faisceau	30	mm
Diamètre haut du cône	85	mm
Diamètre bas du cône	43,9	mm
<i>Arrondis du fond</i>		
180°, rayon	12	mm
90°, rayon	17	mm
<i>Tube de glissement interne</i>		
Diamètre total	110	mm
Rayon extérieur (r3)	35	mm
Rayon intérieur (r4)	5	mm
<i>Demi tube de glissement externe</i>		
Diamètre total	96	mm
Rayon extérieur (r3)	28	mm
Rayon intérieur (r4)	5	mm
Enfoncement	40	mm

Tableau 3 – dimensions de la cavité

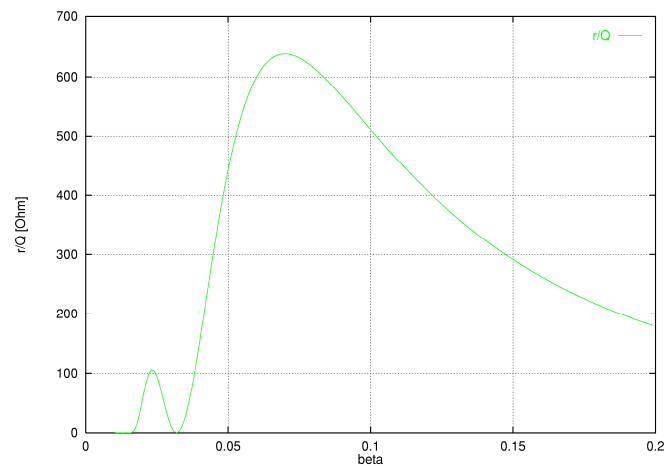


Figure 7 – Acceptance en β de la cavité

² Par rapport à la partie plate du fond.



Fréquence de résonance	87,931 MHz
β optimal	0,070
E_{pic}/E_{acc}	5,00
B_{pic}/E_{acc}	8,75 mT/(MV/m)
r/Q	632 Ω
Facteur de qualité Q	$2,2 \cdot 10^9$ (R_s 10 n Ω)
Pertes cavité (à 1 MV/m)	41,5 mW
(à 6,5 MV/m)	1,75 W
Pertes joint (à 1 MV/m)	0,61 mW
(à 6,5 MV/m)	26 mW

Tableau 4 – caractéristiques de la cavité

4 Calculs mécaniques

4.1 Codes de calcul

Deux codes ont été utilisés pour les calculs mécaniques : *I-DEAS*, et *CASTEM* [8]. Pour les calculs impliquant un couplage entre calculs RF et mécaniques (système d'accord en fréquence, déformation de la cavité sous pression), les maillages ont été générés sous *I-DEAS*, les déformations calculées sous *CASTEM*, et un maillage déformé généré par ce même logiciel pour un calcul RF sous *SOPRANO*.³

Par ailleurs, afin d'accélérer les calculs, un code de calcul RF utilisant la méthode des perturbations (Slater) a été écrit sous *CASTEM*. Ce code permet de déterminer les décalages en fréquence d'une cavité engendrés par une déformation mécanique calculée par *CASTEM*. Ce code nécessite toutefois un calcul préliminaire des champs électromagnétique (à déformation nulle), effectué sous *SOPRANO* avec un maillage identique à celui qui doit être déformé.

La géométrie de la cavité (grandes dimensions, tôles de faible épaisseur) se prête *a priori* bien à des calculs mécaniques reposant sur l'hypothèse des coques minces. Néanmoins, la présence d'arrondis dont le rayon de courbure est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de coque amène à utiliser plutôt le modèle de coque épaisse. Des calculs préliminaires effectués sur un modèle témoin simplifié de la cavité, parfaitement représentatif du point de vue mécanique, ont permis de valider l'hypothèse coque épaisse. En pratique, on constate que les modèles solides 3D doivent posséder au moins deux éléments quadratiques ou quatre, voire même cinq, éléments linéaires dans l'épaisseur de la coque pour atteindre une précision équivalente au calcul suivant l'hypothèse des coques

³ En fait, une étape supplémentaire s'insère entre la sortie du maillage déformée et le calcul RF. En effet, le maillage extrait de *CASTEM* n'est qu'une peau déformée, interface entre le vide et le métal, et il convient de générer un maillage en volume du vide pour le calcul hyperfréquence. Cette étape s'effectue sous *I-DEAS*. Tous les échanges sont faits au moyen du format universel de *I-DEAS* (.unv), à l'exception du passage de *I-DEAS* vers *CASTEM* qui nécessite la traduction du format universel en fichier sauvegarde *CASTEM*. Cette traduction est effectuée, pour ce qui nous concerne, à l'aide du logiciel libre *CODE ASTER*, développé par EDF, mais une interface simple dédiée est en cours de réalisation au DAPNIA/SIS.



épaisses. De manière générale, les contraintes tendent à être légèrement sous-évaluées. Les valeurs de déformation convergent plus rapidement que celles des contraintes lorsque le nombre d'éléments dans l'épaisseur de paroi augmente.

Les calculs qui suivent se basent donc essentiellement sur l'hypothèse des coques épaisses. L'utilisation de coques linéaires ou quadratiques a peu d'influence sur les valeurs de déplacement et sur les fréquences des modes de vibration (mais les contraintes sont différentes). Dans tous les cas, les calculs RF utilisent des éléments linéaires car *SOPRANO* ne traite pas les éléments quadratiques. Aussi, les déformations mécaniques calculées sur les maillages quadratiques ont dû être projetées sur un maillage linéaire avant leur transfert sous *SOPRANO*.

4.2 Système d'accord en fréquence

Plusieurs approches de l'accord en fréquence ont été considérées. Toutes s'appuient sur une déformation mécanique de la cavité.

Plusieurs zones d'application peuvent être envisagées. Le fond est à exclure dans la mesure où il n'offre qu'une faible action sur la fréquence d'une part, et qu'il supporte le coupleur de puissance d'autre part. La déformation des tubes faisceaux (plus précisément des demi tubes de glissement externes) semble la voie naturelle car elle offre *a priori* une forte sensibilité (zone de fort champ électrique). Malheureusement, les contraintes d'encombrement sont telles que cette solution ne peut être utilisée.

La zone de fort champ magnétique se situe en haut de la cavité, à la jonction entre le conducteur extérieur et le stem. Les calculs montrent qu'une déformation du conducteur extérieur dans cette partie haute est peu efficace (environ 7 kHz à 400 MPa de contraintes). La déformation du stem dans la zone magnétique n'est pas viable en raison de sa forte rigidité (cône).

Reste une solution intermédiaire (celle retenue), où un applicateur appuie suivant un axe perpendiculaire à l'axe faisceau, à une hauteur optimale. Cet applicateur ne se contente pas d'ovaliser le conducteur extérieur, il a également pour effet de déplacer les demi tubes de glissement ; c'est cet effet qui est prédominant.

L'optimisation consiste donc à déterminer :

- ∇ la forme de l'applicateur permettant de minimiser les contraintes tout en maximisant la gamme d'accord en fréquence ;
- ∇ la hauteur optimale où positionner cet applicateur ;
- ∇ les autres paramètres (comme l'influence de l'épaisseur de paroi).

Les calculs mécaniques ont été effectués par *CASTEM* (obtention des déformations) et *I-DEAS* (obtention des contraintes⁴), en mixant des maillages coques épaisses et 3D tétraédriques quadratiques. Les géométries et maillages sont générés sous *I-DEAS*, les maillages déformés étant obtenus avec *CASTEM* (voir 4.1).

⁴ La lecture des résultats sur un maillage mixte coque/3D est problématique sous *CASTEM*, d'où l'utilisation d'*I-DEAS* pour fiabiliser les résultats de contraintes.

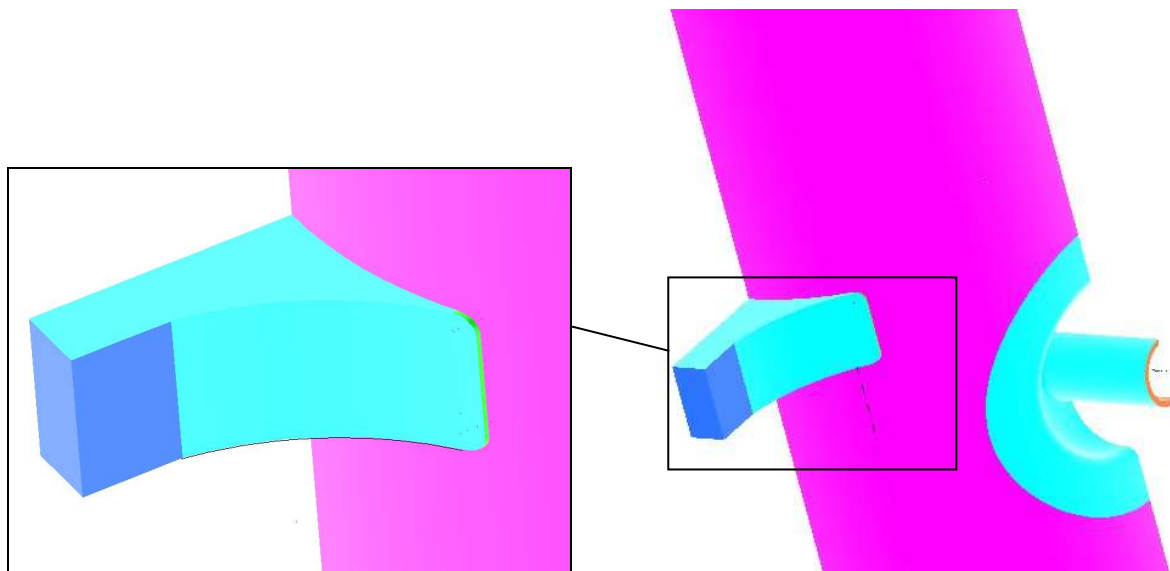


Figure 8 – Applicateur du système d'accord en fréquence

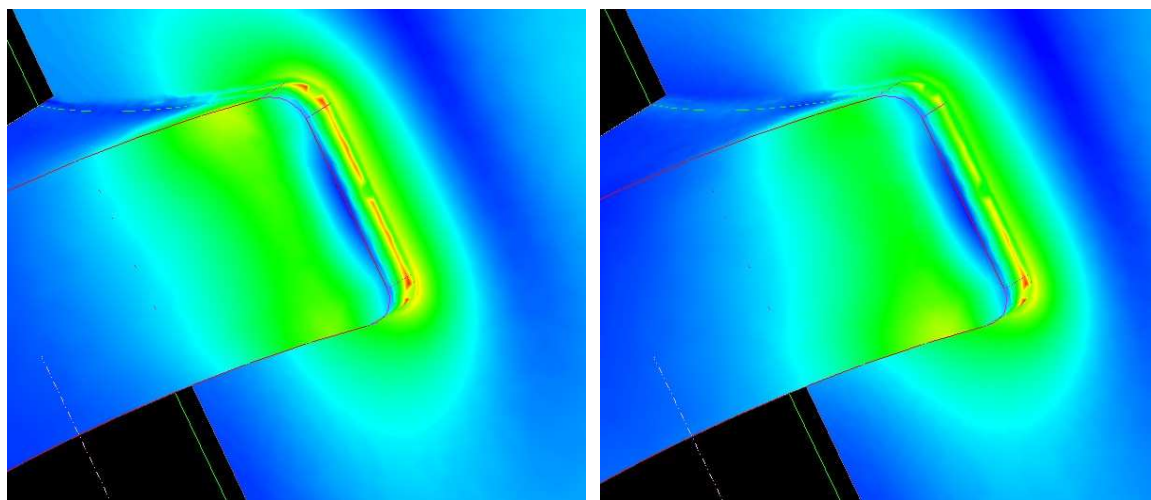


Figure 9 – Répartition des contraintes générées par le système d'accord en fréquence.

A gauche : force appliquée, à droite : déplacement imposé.

L'applicateur le plus performant possède la forme indiquée sur la Figure 8. L'altitude optimale se situe à 90 mm au-dessus de l'axe faisceau. Un décalage de 20 mm dans un sens ou dans un autre entraîne une chute de 15% environ de l'efficacité.

Le maximum de contrainte se situe à la jonction entre la cavité et l'applicateur. Les contraintes sont plus fortes lorsqu'un déplacement, et non une force, est appliqué. Ceci signifie que lorsqu'une force est appliquée, l'applicateur prend un angle très léger (0,1°).

Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous, pour trois épaisseurs de tôle de niobium ; on constate en effet que la plage d'accord en fréquence est meilleure lorsque la tôle est plus épaisse.



Epaisseur de niobium	Contrainte Von Mises pour une force appliquée de 9850 N	Décalage en fréquence pour une force appliquée de 9850 N	Gamme de réglage à 400 MPa
3 mm	380 MPa	-15,8 kHz	±16,6 kHz
3,5 mm	300 MPa	-13,4 kHz	±17,9 kHz
4 mm	250 MPa	-12,0 kHz	±19,2 kHz
4 mm sp.	245 MPa	-14,8 kHz	±24,2 kHz
Epaisseur de niobium	Contrainte Von Mises pour une variation de diamètre de 2 mm	Décalage en fréquence pour une variation de diamètre de 2 mm	Gamme de réglage à 400 MPa
3 mm	480 MPa	-16,6 kHz	±13,8 kHz
3,5 mm	435 MPa	-17,3 kHz	±15,9 kHz
4 mm	410 MPa	-17,7 kHz	±17,3 kHz
4 mm sp.	405 MPa	-19,1 kHz	±18,9 kHz

Tableau 5 – Efficacité du système d'accord en fréquence

Une épaisseur de niobium moindre (3 mm) conduit à une gamme de décalage en fréquence plus importante mais au détriment de contraintes plus fortes. Inversement, si la tôle est plus épaisse (4 mm), les contraintes au niveau de l'applicateur sont réduites mais le décalage en fréquence est plus faible. Au bilan, l'effet de réduction des contraintes étant plus important, il est plus intéressant de travailler avec une épaisseur de 4 mm.

La ligne « 4 mm sp » correspond à une cavité dont toutes les tôles sont en 4 mm d'épais, à l'exception d'une zone de 55 mm (40 mm+15 mm de hauteur brasée) à compter du plan de joint de la bride d'en bas. Cet amincissement local à pour double avantage de conserver les contraintes faibles de l'épaisseur 4 mm puisque la zone de fortes contraintes est située complètement dans la zone épaisse, tout en bénéficiant de l'effet de souplesse de la tôle mince en terme de décalage en fréquence.⁵

4.3 Sensibilité à la pression

L'objectif est de rendre la cavité la plus insensible possible aux variations de pression du bain d'hélium, soit moins de $1/10^6$ de bande passante de variation maximale. La bande passante étant de 132 Hz à -3 dB ($Q_{ext}=6,67 \cdot 10^5$) et les tolérances sur la stabilité du bain d'hélium de 2 bars, ceci correspond à une sensibilité maximale de 6,5 Hz/mbar.

Si l'on considère la cavité nue, sans renfort, avec une paroi de niobium homogène de 3 mm d'épaisseur, deux phénomènes se cumulent pour abaisser la fréquence de résonance :

- ∇ la pression tend à faire rentrer les demi tubes de glissement externes vers l'intérieur (déformation suivant l'axe z de 0,025 mm/bar) ;

⁵ A titre de comparaison, une variation de 2 mm de la longueur de la cavité au niveau des tubes accélérateurs imposée par déplacement des tubes faisceau engendre un décalage en fréquence de 40 kHz (hors optimisation de la géométrie mécanique des tubes de glissement, et hors considérations de contraintes).



- ∇ la pression tend à déplacer l'ensemble stem et tube de glissement vers le bas par déformation du tore (déformation suivant l'axe y de 0,128 mm/bar).

Le décalage en fréquence engendré par ces deux phénomènes est de -4,3 Hz/mbar. On peut déterminer l'importance relative des deux contributions en appliquant alternativement la pression sur les deux zones considérées. On constate alors que la contribution majeure (81%) est liée à la déformation verticale. En conséquence, l'optimisation consiste à minimiser le déplacement vertical du stem.

Pour ce faire, deux possibilités sont envisagées : rigidification du tore par son épaissement, ou bien à l'aide d'un renfort mécanique soudé (cf. Figure 10).

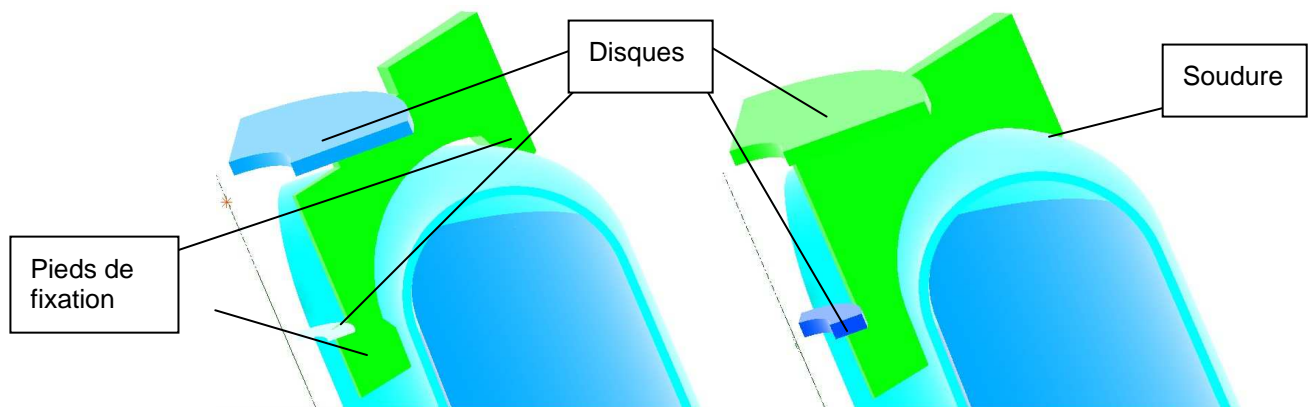


Figure 10 – Renforts considérés pour contrer les effets de pression.

A gauche : renfort à deux pieds, à droite renfort soudé.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 6. De manière générale, les renforts sont plus efficaces que l'épaissement de la tôle de niobium pour contrer l'effet vertical, mais l'épaissement permet de réduire également l'effet horizontal. La solution la plus efficace consiste donc à utiliser une tôle de niobium un peu plus épaisse (4 mm) avec un renfort aussi rigide que possible (tout soudé).

Epaisseurs		Sans renfort	Renfort 2 pieds	Renfort soudé
Cavité	Tore			
3 mm	3 mm	-4,3 Hz/mbar	-2,1 Hz/mbar	-1,4 Hz/mbar
3 mm	4 mm	-2,9 Hz/mbar	-1,9 Hz/mbar	-1,3 Hz/mbar
4 mm	4 mm	-2,5 Hz/mbar	-1,5 Hz/mbar	-1,0 Hz/mbar
5 mm	5 mm	-1,7 Hz/mbar	(non calculé)	(non calculé)

Tableau 6 – Sensibilité de la cavité aux variations de pression

Par défaut, la solution sans renfort avec une épaisseur de niobium homogène de 4 mm est retenue. Ainsi, les performances requises sont atteintes avec une marge de sécurité, sans surcoût notable ni complexité technique accrue.

4.4 Vibrations

Les modes de vibrations ont été calculés sur une demi cavité sans enceinte hélium. Aussi, seuls les modes possédant cette symétrie sont étudiés.

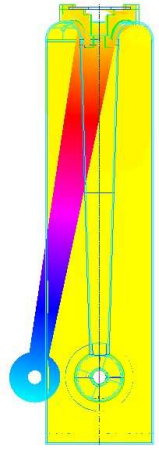
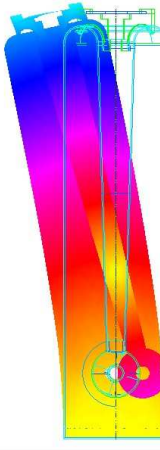
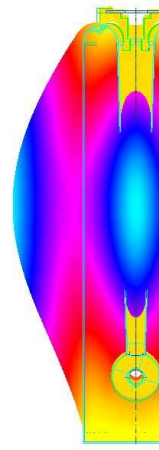
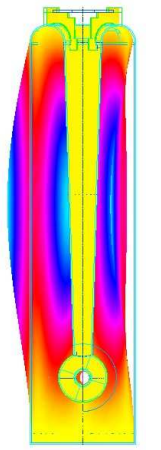
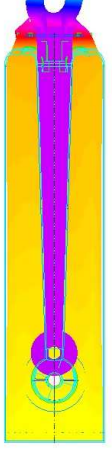
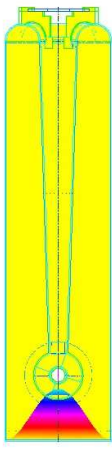
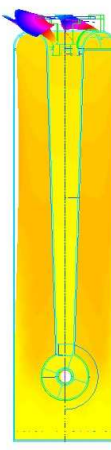
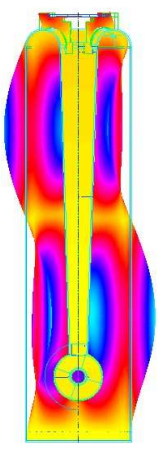
Mode	1	2	3	4
Déformée modale				
Fréquence (sans renfort)	31 Hz	141 Hz	259 Hz	267 Hz
Fréquence (avec renfort)	42 Hz	126 Hz	260 Hz	275 Hz
Mode	5	6	7	8
Déformée modale				
Fréquence (sans renfort)	274 Hz	398 Hz	Inexistant	495 Hz
Fréquence (avec renfort)	327 Hz	398 Hz	452 Hz	497 Hz

Tableau 7 – Premiers modes de vibration mécanique de la cavité.

Le renfort indiqué est du type « à deux pieds » (cf. Figure 10).



Les dix premiers modes de résonance mécaniques ont été déterminés. Sur la cavité de base (sans renfort), le premier mode est à 31 Hz et seul le second est en dessous de 200 Hz (que l'on peut considérer comme une limite au delà de la quelle les modes ont peu de chance d'être excités). Tous ces modes sont rassemblés sur le Tableau 7.

Les études se sont concentrées sur le premier mode de résonance, avec pour objectif de faire augmenter sa fréquence de résonance autant que possible.

Si l'on tente de rigidifier le stem, la masse de celui-ci augmente. Même si le matériau utilisé est léger (titane, aluminium), l'effet de la masse est au mieux aussi important que l'effet lié à la rigidification, et la fréquence n'augmente pas. Le même raisonnement s'applique au tore.

Dans le cas théorique où le cône est infiniment rigide (mais pas le tore), la fréquence de vibration de ce mode est de 74 Hz. Si c'est le tore qui est infiniment rigide (mais pas le cône), cette fréquence est de 71 Hz. Ces valeurs, presque identiques, indiquent deux choses. D'une part, elles constituent une sorte de limite haute impossible à dépasser. D'autre part, le fait qu'elles sont pratiquement égales indiquent que le tore et le stem contribuent de manière équilibrée à ce mode ; autrement dit, atténuer la torsion du tore, ou bien celle du stem, ne permettrait pas de remonter la fréquence de résonance de ce mode significativement.

De fait, aucune des solutions envisagées n'a permis de remonter cette fréquence significativement. Par exemple :

- a) L'utilisation du renfort à deux pieds (Figure 10) permet de monter la fréquence à 42 Hz.
- b) L'épaississement du tore à 5 mm donne une fréquence de 45 Hz.
- c) L'utilisation du renfort tout soudé (Figure 10) permet de passer à 54 Hz si le tore est épais de 4 mm.
- d) Si à ce renfort on ajoute un croisillon en titane dans le stem destiné à l'empêcher de se tordre, la fréquence reste à 54 Hz (compensation de la raideur accrue par la masse supplémentaire).
- e) Dans le cas où ce même renfort (mais sans le croisillon) est soudé jusqu'en bas du stem (solution pratiquement impossible à mettre en œuvre), la fréquence passe à 69 Hz.

Dans le cas de la solution b (qui serait retenue s'il s'avérait nécessaire de compenser des variations de pression plus importantes que prévues), en ajoutant la masse d'hélium présente dans le stem, on aboutit à une fréquence ramenée à 48 Hz.

L'effet potentiel de ce mode de vibration sur la fréquence de résonance a été calculé. Comme on ne peut pas prédire l'amplitude des vibrations du stem qui sont trop dépendantes de l'environnement de la cavité, il a été décidé de faire le calcul de décalage en fréquence pour une amplitude maximale de déplacement du stem fixée arbitrairement à 1 mm. Ce mouvement engendre un décalage en fréquence de 642 kHz pour le mode où le stem oscille dans le plan de l'axe faisceau, et de 498 kHz pour celui où l'oscillation est dans le plan perpendiculaire.

Ce mode, quelle que soit sa polarisation, est donc hautement nocif. Néanmoins, il s'avère impossible de modifier significativement sa fréquence de résonance. Si, dans les conditions réelles (cavité insérée dans un cryomodule), ce mode est excité, il faudra donc concevoir un dispositif de dissipation. Ce type de dispositif reposant sur des frottements, il est impossible de le concevoir de manière fiable par calcul, seuls des essais permettant de valider son efficacité. Cette étude sort du cadre de l'APD, et ne pourra être entreprise qu'après réalisation d'essais sur un cryomodule complet. Toutefois, le système dissipatif peut être simple [9] et son implantation sur la cavité est prise en compte (en termes d'encombrement et de possibilités de fixation) lors des études du cryomodule.



4.5 Fond de la cavité

Le choix d'un fond démontable permet de procéder au rinçage haute pression dans les meilleures conditions : le jet peut balayer intégralement la surface de la cavité, aussi bien les parties à fort champ magnétique pour limiter le risque de quench que les portions à fort champ électrique pour limiter l'émission d'électrons, et l'évacuation de l'eau est aisée. Cependant ce choix entraîne la présence d'un joint qui doit assurer l'étanchéité au vide et à la RF, et d'une bride de relativement grand diamètre qui doit être brasée au corps en niobium de la cavité.

Le joint doit être placé dans un champ magnétique le plus faible possible pour réduire les pertes RF. Le joint ne peut pas être refroidi efficacement puisqu'il n'est en contact qu'avec les brides.

Dans le cryomodule, le fond n'est pas en contact direct avec le bain d'hélium, et le coupleur générera une charge thermique importante. Il doit donc être refroidi activement et le matériau utilisé doit posséder une conductivité thermique élevée. On préfère donc utiliser du cuivre (recouvert d'une couche de niobium).

Le fond doit résister aux essais de qualification de mise sous pression à 2,5 bars, bien qu'il ne soit pas inclus dans le tank hélium. En effet, lors du test en cryostat vertical, la cavité entière doit pouvoir supporter une surpression d'hélium. La réduction des contraintes mécaniques sous pression ne peut être obtenue qu'en arrondissant la liaison entre la bride inférieure et la partie plane du couvercle (rayon supérieur à 15 mm pour un couvercle simple), ce qui implique un abaissement du fond.

Le coupleur de puissance est placé sur le fond. Le Q_{ext} doit être égal à $6,66 \cdot 10^5$. Obtenir un tel Q_{ext} impose une limitation sur cet abaissement du fond si l'on veut éviter que l'antenne en cuivre du coupleur ne pénètre trop dans la cavité et n'engendre des pertes RF supplémentaires, difficiles à évacuer de surcroît. Le meilleur cas pour la RF est celui où la distance entre le joint et le fond est minimisée, ce qui est extrêmement défavorable pour la mécanique. Il est donc nécessaire de trouver l'intermédiaire optimal.

Le coût de matière pour réaliser des brides en niobium-titane forgé est très élevé. L'utilisation de brides en inox implique une contrainte supplémentaire en ce qui concerne les chocs thermiques, puisque les coefficients de dilatation de 300 K à 4 K sont très différents entre le niobium et l'inox. Même dans le cas où le fond est réalisé en cuivre, la résistance au choc thermique favorise une augmentation de la distance entre la partie plate du fond et la brasure avec la bride pour augmenter son élasticité.

La solution représentée sur la Figure 11 a donc été choisie, car elle permet au mieux de satisfaire à toutes ces exigences. Les brides sont du type CF en inox, avec joint RF en cuivre, le fond est en cuivre déposé niobium. La résistance à la pression est assurée grâce à une épaisseur de 5 mm qui permet une réalisation de la pièce à partir d'une tôle. La forme en S permet de garder ces rayons de courbure assez élevés en réduisant la distance entre le joint et la partie du fond supportant le coupleur. Les déformations dues à la pression et au choc thermique se répartissent sur les trois quarts de cercle de la géométrie (voir Figure 11), et non sur un seul quart de cercle comme dans le cas d'un fond simple.

Les calculs de mise sous pression à 2,5 bars de la cavité indiquent que la contrainte maximale atteinte vaut 41 MPa, inférieure à la limite élastique, pour un déplacement vertical maximum de 0,21 mm au centre du fond.

Des calculs mécaniques de choc thermique ont été effectués avec *CASTEM* en utilisant un modèle plastique et en prenant en compte la dépendance des propriétés des matériaux avec la température. Les propriétés mécaniques du niobium en fonction de la température ont été interpolées à partir de courbes de traction à 300, 77 et 4 K. Comme il est impossible de prévoir les véritables conditions de

température dans le cas du remplissage du tank par l'hélium liquide (ébullition de l'hélium, variations très rapide de pression, etc.), on a opté pour une descente en froid adiabatique partant de 300 K ; on fait donc l'hypothèse que le système est thermalisé à tout instant. Le système a également été simplifié puisque ni le joint cuivre ni la brasure ne sont modélisés. On peut observer que les contraintes culminent à 40 MPa dans le fond en cuivre à une température intermédiaire de 150 K, puis diminuent: les coefficients de dilatation de l'inox et du cuivre diffèrent peu, mais cette différence varie avec la température. Les contraintes dans la partie cylindrique basse en niobium de la cavité sont les plus élevées de par la différence importante entre les coefficients de dilatation du niobium et de l'inox. Certaines zones en niobium dépassent la limite élastique durant la mise en froid. Un test supplémentaire a donc été effectué, à savoir un calcul dans les mêmes conditions de modélisation pour la bride des coupleurs HOM de *SOLEIL* qui a supporté de nombreux chocs thermiques sans problème lors des tests du cryomodule [10]. Le calcul indique le même comportement, à savoir un dépassement de la limite élastique lors de la descente en froid.

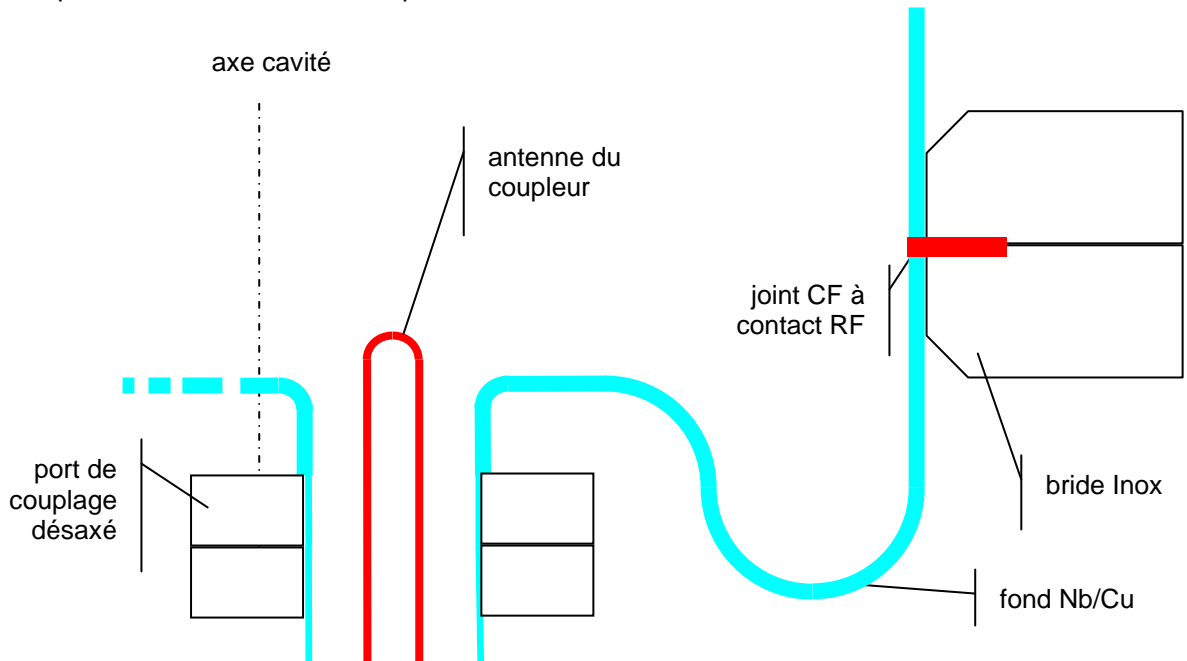


Figure 11 - Vue schématique en coupe du fond de la cavité

5 Conclusions

Les calculs RF indiquent que les caractéristiques demandées semblent réalistes, sous réserve que les opérations de fabrication et de préparation n'apportent pas de détérioration sensible. Le prototype doit permettre de répondre à cette question.

Sur le plan mécanique, la cavité s'avère apte à supporter les instabilités de pression telles qu'imposées au système cryogénique (± 2 mbar). Moyennant l'adjonction de renforts (donc un surcoût ainsi qu'une difficulté technique supplémentaire), 5 mbar devient admissible.

Un système d'accord en fréquence à froid sur une gamme de ± 24 kHz a été conçu. Il plaide encore plus fortement que les aspects liés à la tenue en pression pour une cavité réalisée en tôle de 4 mm.



Sur le plan des vibrations, les résultats sont moins probants : seul un cryomodule test permettrait de savoir si ces vibrations sont vraiment un problème, et de tester les dissipateurs seuls à même de vaincre ce problème.

Le fond démontable de la cavité a été conçu de manière à supporter les chocs thermiques inhérents au refroidissement (et par là même aux opérations de brasure) tout en minimisant les pertes sur le joint.



Références

- [1] *SOPRANO* est un code de calcul commercial de la société Vector Fields.
- [2] W. Bruns, "GdfidL : A Finite Difference Program with Reduced Memory and CPU Usage", *Proceedings of the PAC-97, Vancouver*, vol. 2, pp. 2651-2653, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac97/papers/pdf/9P118.PDF>
- [3] *HFSS* est un code de calcul commercial de la société Ansoft.
- [4] *I-DEAS* est un code de calcul commercial de la société EDS.
- [5] N. Pichoff, "Un modèle pour quantifier les performances transverse des cavités", *note interne CEA/DIF/DPTA/SP2a/LFPA*, 2003.
- [6] P. Ostroumov & K.W. Shepard, "Minimizing transverse-field effects in superconducting quarter-wave cavities", *Proceedings of the LINAC-02, Kyongju*, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/I02/PAPERS/TU468.PDF>
- [7] G. Devanz, "Multipactor simulations in superconducting cavities and power couplers", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 4, 012001 (2001).
- [8] *CASTEM* est un code de calcul du CEA - DEN/DM2S/SEMT.
- [9] A. Facco & V. Zviagintsev, "Mechanical stabilisation of superconducting quarter wave resonators", *Proceedings of the PAC-97, Vancouver*, vol. 3, pp. 3084-3086, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac97/papers/pdf/3P026.PDF>
- [10] C. Thomas-Madec, "Synchrotron SOLEIL Superconducting RF Status", *Proceedings of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Travemünde*, 2003.



Annexe

Récapitulatif des cavités quart d'onde optimisées sur le plan électromagnétique pour le projet SPIRAL 2

Au cours du déroulement du projet, plusieurs cavités ont été optimisées sur le plan RF. Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le Tableau 8.

	Unités	88 MHz β 0,07	88 MHz β 0,12	176 MHz β 0,12	176 MHz β 0,14
Fréquence	MHz	87,931	87,715	175,95	175,94
β optimal		0,070	0,117	0,120	0,141
Diamètre tube faisceau	mm	30	50	30	30
Diamètre cavité	mm	230	370	200	220
V_{acc} @ 1 MV/m acc.	kV	239	400	204	240
E_{pic} / E_{acc}		5,00	4,92	4,95	5,47
B_{pic} / E_{acc}	mT/(MV/m)	8,75	9,04	9,15	10,17
r/Q	Ω	632	463	499	503
Pertes @ 6,5 MV/m acc.	W	1,75	4,6	1,0	1,2
Q_0		$2,2 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^9$

Tableau 8 – Caractéristiques RF des cavités optimisées pour le linac supraconducteur du projet SPIRAL 2

||
ced
||



2^{ème} partie

Réalisation et essais d'une cavité prototype



6 Introduction

Afin de vérifier la faisabilité du design retenu, une cavité prototype représentative a été fabriquée afin d'être testée en cryostat vertical. Cette cavité diffère du design final précédemment exposé sur deux points uniquement : elle est fabriquée dans du niobium d'épaisseur 3 mm, et le fond est constitué de niobium titane.

L'enceinte hélium, les dispositifs d'accord en fréquence, de stabilisation mécanique, de renforts ainsi que les ports de couplage ne sont pas réalisés.

7 Réalisation d'une cavité prototype

Suite à appel d'offre, la réalisation de la cavité prototype a été confiée à la société *ACCEL GmbH*. La spécification technique pour réalisation du prototype est présentée en annexe de ce rapport d'APD.

Seules des modifications mineures ont été apportées aux plans pour réalisation après concertation. Celles-ci comprennent l'ajout d'un cylindre intermédiaire entre le cône et le tube de glissement central afin d'éviter une soudure très complexe d'un cône sur une sphère et l'amincissement des tôles à 2 mm au niveau des lèvres de soudure.

Les tubes de glissement sont réalisés par usinage de rondins de niobium massif. Cette solution, onéreuse en matière, est plus simple à effectuer qu'un repoussage, compte tenu des rayons de courbure assez prononcés. En revanche, le tore supérieur est réalisé par repoussage.

La réalisation de cette cavité nécessite la fabrication d'un outillage conséquent pour la tenue des pièces lors des phases de soudure ou de repoussage en particulier. Cet outillage est contractuellement la propriété d'*ACCEL GmbH*.

Un seul problème majeur est apparu en cours de fabrication. A l'issue de la soudure du stem conique, une déformation d'une profondeur d'environ 1 mm autour de la soudure a été constatée, sur environ un tiers de la hauteur totale (voir Figure 12). Les relevés 3D faits pour tenter d'analyser le défaut n'ont malheureusement pas pu être exploités par suite d'un problème technique.

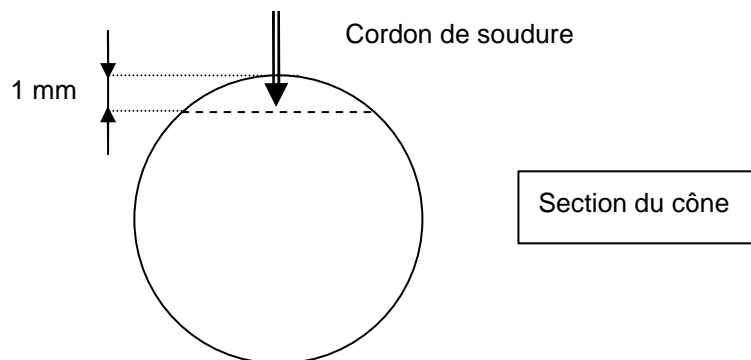


Figure 12 – Déformation du cône constaté (schéma pas à l'échelle).



Figure 13 – Eléments du prototype de cavité.

Ci-dessus à gauche : demi-tube de glissement d'extrémité avant reprise d'usinage et soudure sur le conducteur extérieur. A droite : le tore supérieur avant soudure, sous emballage de protection. Ci-dessous : le cône avant sa soudure sur le tube de glissement central.



La cause présumée de cette déformation est la technique de soudure. Le cône est maintenu en position au moyen de points de soudure, puis il est soudé par faisceau d'électrons. Dans ce cas



précis, par suite de l'utilisation d'une machine trop petite, il a été nécessaire d'effectuer cette soudure en deux passes. Il est probable que l'effondrement observé soit lié au recouvrement des deux passes de soudure. Il faut souligner qu'il n'y a aucune nécessité technique à procéder de la sorte : l'utilisation d'une enceinte de soudure par bombardement électronique de plus grandes dimensions, existant chez notre fournisseur, permet d'effectuer la soudure incriminée en une seule passe.

Les conséquences de cette déformation sont d'autant plus difficiles à estimer que l'on ne dispose pas de dimensions précises. Un calcul hyperfréquence basé sur les relevés approximatifs à notre disposition permet d'estimer l'erreur en fréquence liée à ce défaut à moins de 50 kHz.

Le seul autre défaut apparu lors de la conception concerne le couvercle du fond ; suite à la soudure, la partie plate s'est bombée vers l'intérieur de la cavité de 0,8 mm. Les conséquences sur la fréquence sont négligeables et l'influence sur le design final nulle dans la mesure où la géométrie du fond est différente.

8 Réception de la cavité prototype

A réception (Figure 14 et Figure 15), la cavité fait l'objet d'un examen et de contrôles préliminaires.



Figure 14 – Cavité SPIRAL 2 β 0,07 à réception, 10 novembre 2004.

La cavité est munie de l'outillage de transport (propriété de ACCEL GmbH) permettant de maintenir les tubes de glissement immobiles pendant le transport.

Les soudures et brasures et les états de surface sont examinés visuellement. Les seules réserves portent sur la qualité de la soudure de la portion cylindrique du stem sur le tube de glissement central,



qui manque de régularité, et sur la dimension des espaces accélérateurs, manifestement inégale (la différence étant de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres). Une mesure plus précise est prévue à l'issue des premiers tests RF, ainsi qu'une inspection plus générale à l'aide d'un endoscope. Cette inspection a été effectuée par le fabricant qui n'a relevé aucun défaut.

La documentation fabricant comprend des relevés de mesures des cotes demandées. Toutes ces cotes mesurées sont dans les tolérances demandées. Il existe une incertitude quant à deux cotes : la hauteur totale de la cavité et la distance entre l'axe faisceau et le sommet du tore sont en effet mesurées depuis l'extérieur du tore. Or il existe une incertitude sur l'épaisseur de cet élément puisqu'il est réalisé par repoussage. Une incertitude d'un dixième de millimètre sur cette dimension, donnée (et non mesurée) comme valant 2,5 mm, suffit à mettre les deux cotes concernées hors tolérance. Les dimensions externes des tubes de glissement, le rayon interne du tore, le rayon interne de la cavité (ces deux dernières cotes par opposition aux dimensions externes), et surtout la dimension des espaces accélérateurs n'ont pas été mesurées. Compte tenu du retard de livraison, la mesure des cotes manquantes a été repoussée car elle demande une mise en œuvre assez lourde. Il conviendra de modifier le cahier des charges afin que ces cotes soient mesurées sur les cavités de série.

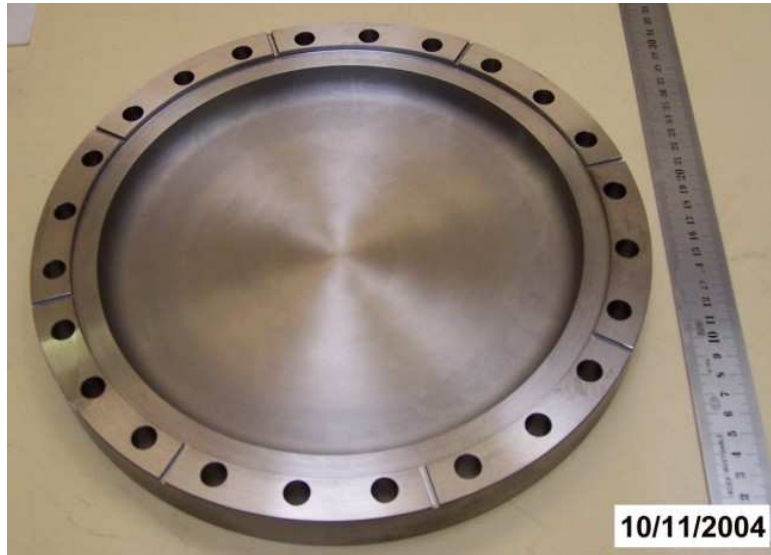


Figure 15 – Couvercle en niobium - titane.

9 Préparation de la cavité SPIRAL 2

9.1 Chimie

Du fait de sa géométrie, la cavité quart d'onde à 88 MHz n'est pas adaptée à une chimie par trempé, qui nécessiterait des protections trop compliquées contre les attaques des brasures inox-niobium, et un volume d'acide très important.

Un système de chimie par circulation d'acide a donc été conçu au DAPNIA. Les modifications nécessaires dans l'optique du traitement d'une série de 12 à 14 cavités, identifiées au cours de la préparation de la cavité, sont présentées en annexe 1.

La cavité est traitée tête en bas (la bride du fond orientée vers le haut). Le protocole de traitement est le suivant.

9.1.1 Rinçage ultra sons

La cavité est suspendue au pont roulant, immergée dans le bac ultra sons à 60°C (dimensions de l'ouverture = 0,50 x 0,50 m), puis remontée au pont. Elle est basculée pour vidanger le liquide alcalin, puis rincée à l'eau déminéralisée.

9.1.2 Chimie FNP

Le bain chimique est identique à celui utilisé habituellement pour le traitement des cavités niobium au SACM. Il est composé d'un mélange d'acides concentrés : acide fluorhydrique, nitrique, et phosphorique, aux concentrations volumiques respectives 1:1:2. La vitesse d'attaque du niobium est d'environ 1 µm/min dans les conditions usuelles (en particulier avec un rapport volume d'acide sur surface à traiter de 10 à 11 cm). La durée de la chimie a été estimée à 2 heures 30 pour obtenir les 150 microns demandés.

La cavité est amenée au pont dans l'alvéole de traitement chimique sur un support spécifiquement conçu. Le schéma de circulation est présenté sur la Figure 16. La pompe d'injection est munie d'un dispositif anti-pulsation. Les pompes à air comprimé ont un débit de 20 l/min, ce qui permet le remplissage complet de la cavité en 1 minute 48 secondes en théorie, et 1 minute 53 secondes en pratique.

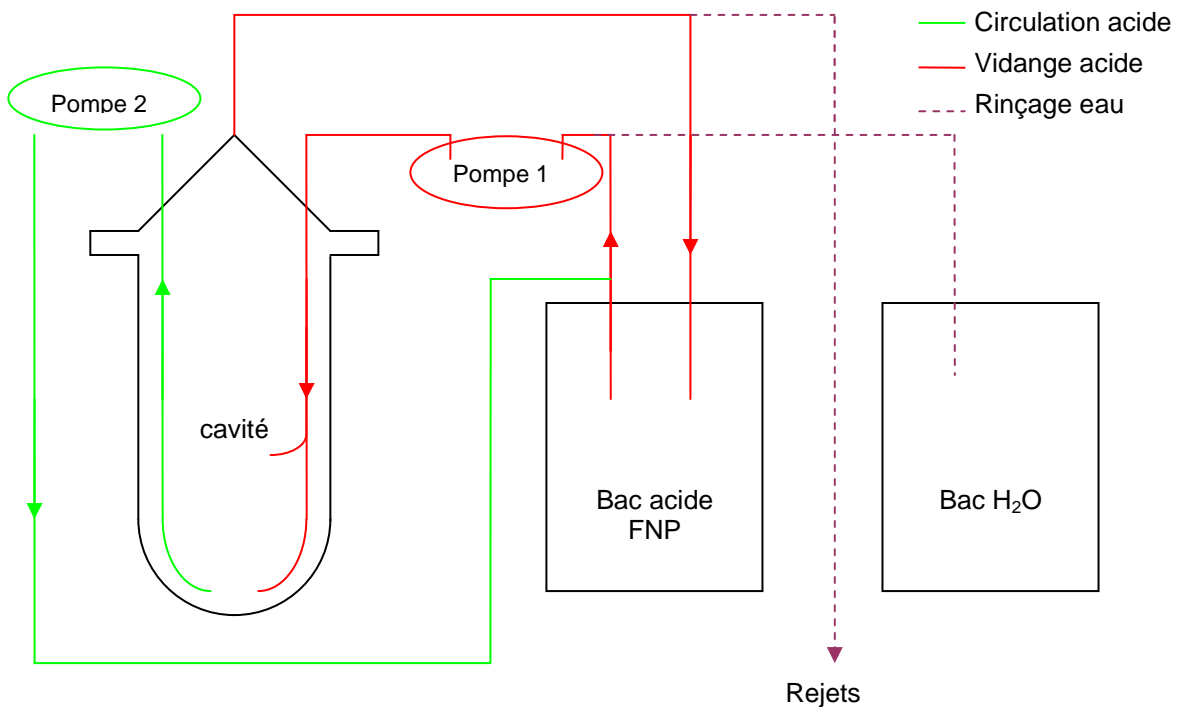


Figure 16 – schéma de principe du traitement chimique FNP.

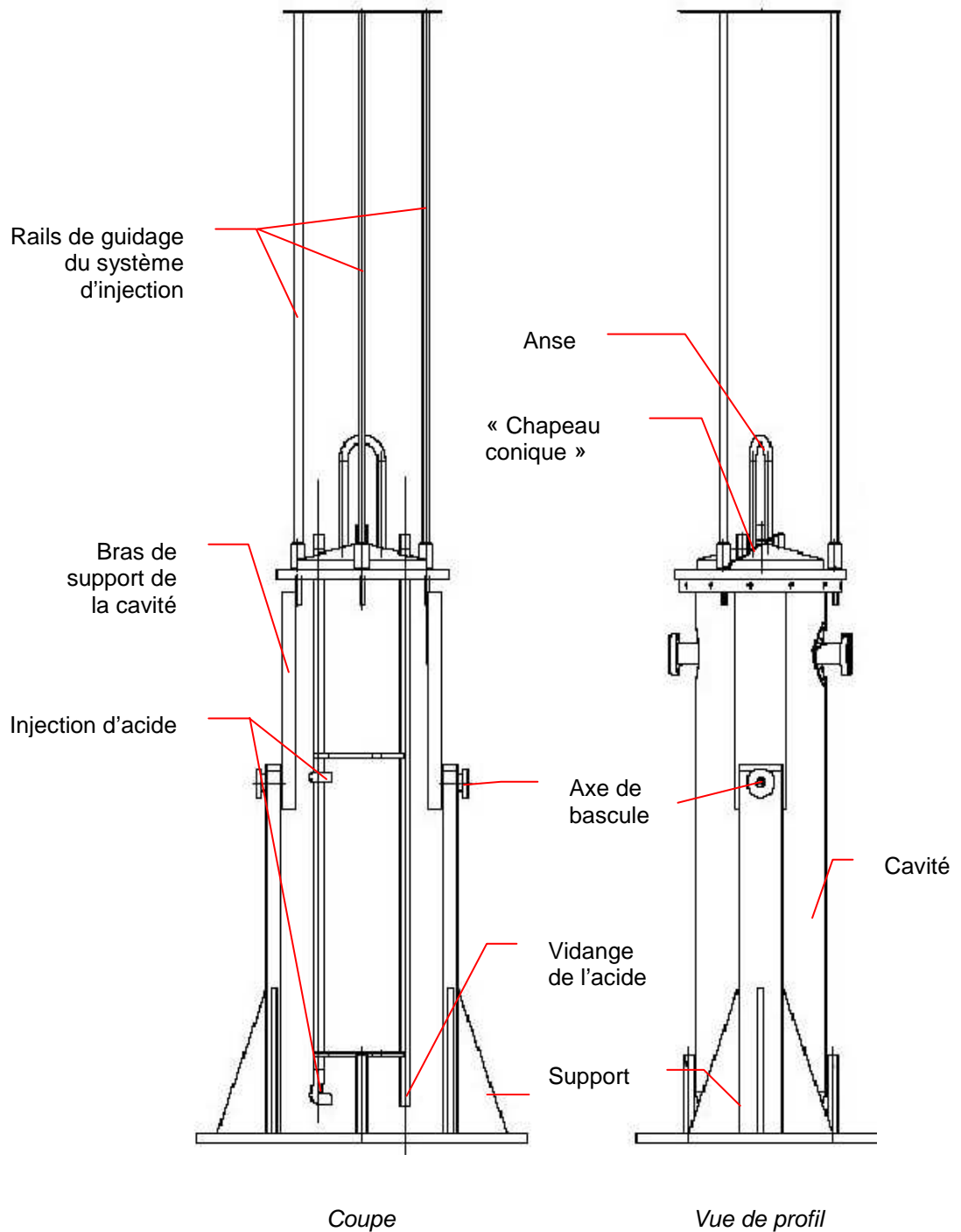


Figure 17 – système conçu pour le traitement chimique.

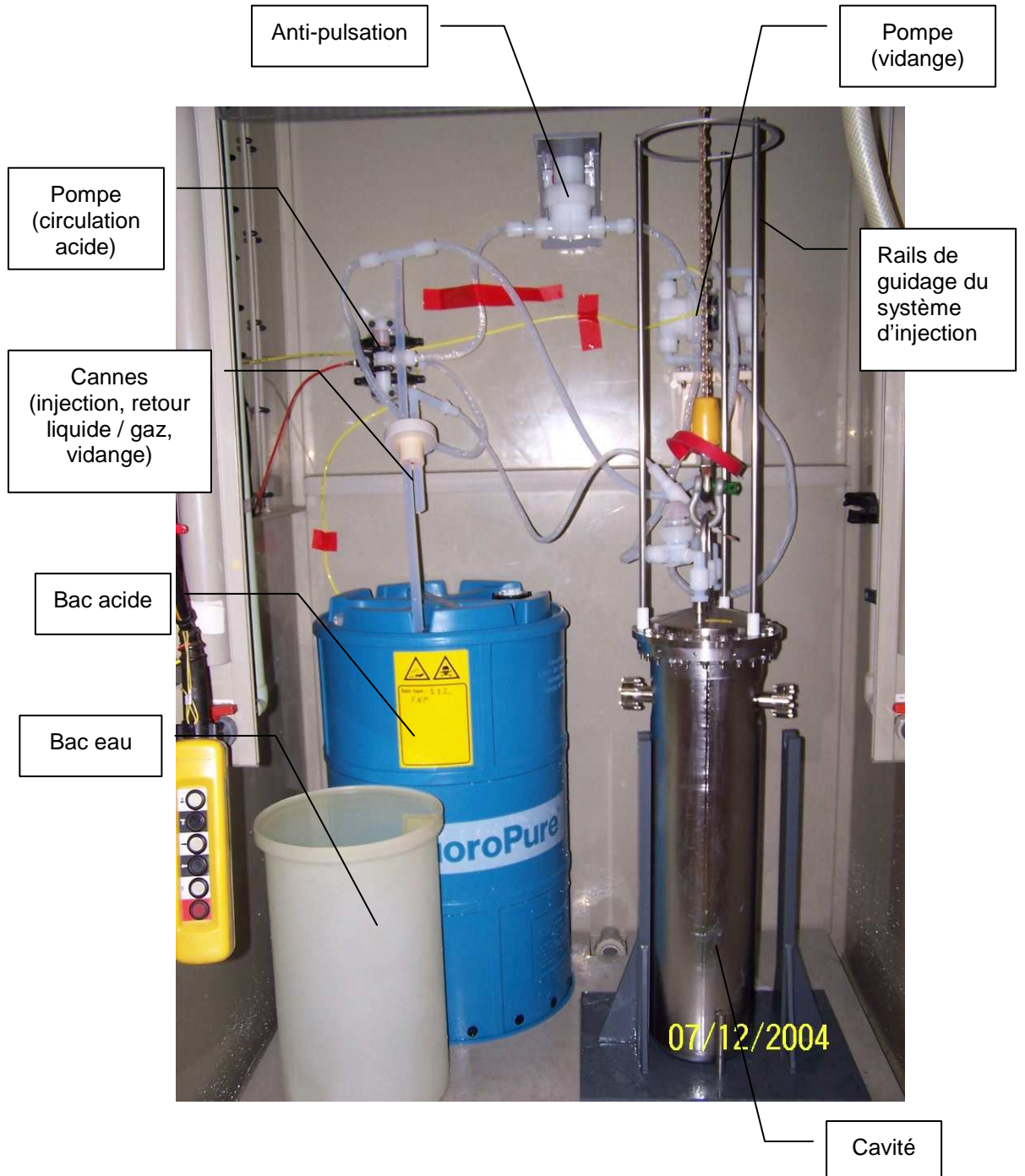


Figure 18 – Traitement chimique FNP de la cavité.

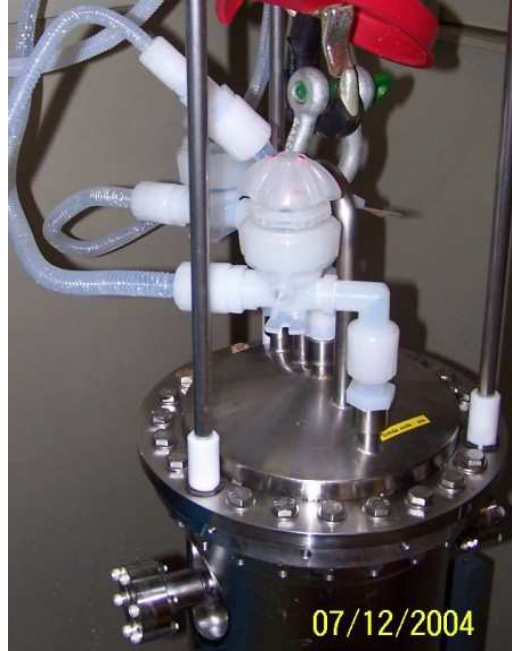


Figure 19 – Détail des connexions avec vannes.

L'injection d'acide se fait à deux hauteurs dans la cavité, afin d'assurer un meilleur brassage et de limiter le risque de formations de bulles stagnantes bloquant l'attaque. Le jet d'acide est tangentiel aux parois de la cavité. Lors de son positionnement initial, la canne permettant cette injection est guidée en coulissant sur trois tiges fixées sur la bride de fond de la cavité. Ce dispositif évite tout contact entre cette canne et les parois en niobium.

Les pièces spécifiquement conçues pour ce test (voir Figure 17) sont: le support basculant, le chapeau conique fermant la cavité, la canne d'injection (qui est solidaire du chapeau). Dans la mesure où ce dispositif ne doit pas être utilisé fréquemment, les pièces sont réalisées en acier inoxydable qui n'est pas attaqué par le mélange d'acides (sauf à long terme). Le chapeau conique est muni d'une anse permettant de manœuvrer la cavité ainsi équipée avec le pont roulant.

Pendant la durée de l'attaque chimique, les portées de joint et les brasures inox-niobium sont protégées par une bande de caoutchouc (viton).

Le traitement chimique, sur ces bases, était prévu en deux étapes de 50 minutes suivies d'une dernière à ajuster en fonction de l'effet des deux premières.

A l'issue de la première chimie de 50 minutes, la pesée indique que 2,2 kg de niobium ont été enlevés. Cette variation de masse, rapportée à la surface interne de la cavité indiquée par le logiciel CATIA, soit 1,39 m², conduit à une valeur d'attaque e de :

$$e = \frac{\Delta V}{S} = \frac{\Delta m / \rho}{S} = \frac{2,2 \text{ kg} / 8,57 \text{ kg} / \text{dm}^3}{139 \text{ dm}^2} = 185 \mu\text{m}$$

soit une vitesse d'attaque de 3,5 μm par minute !



Cette vitesse bien supérieure aux prévisions est expliquée par la vitesse de circulation de l'acide. Celle-ci est supérieure aux valeurs habituelles (chimie intégrée des cavités monocellules) et conduit à un renouvellement permanent du film interfacial, accélérant ainsi considérablement la vitesse d'attaque. De plus l'utilisation d'un bain d'acide neuf ne peut aller que dans le même sens. Cet écart de la vitesse d'attaque par rapport aux prévisions est révélateur de la sensibilité de cette chimie aux paramètres opératoires tels que l'agitation du bain. Par ailleurs, une forte inhomogénéité de l'épaisseur enlevée est prévisible à cause de la géométrie complexe de la cavité. Néanmoins, au vu des résultats (voir 10.2), une vitesse d'attaque élevée et inhomogène ne limite pas les performances de la cavité.

Pour la série de cavité finale, dans l'hypothèse probable où ce même procédé de traitement serait utilisé, il conviendra d'optimiser le procédé en trouvant un juste compromis entre l'agitation, nécessaire à l'élimination des bulles, et la vitesse d'attaque. Pour ce faire, les débits seront ajustés en utilisant la cavité prototype « en fin de vie ».

Une ultime chimie consistant simplement en un « mouillage » de la surface de la cavité par le mélange FNP 1-1-2 est effectué avant l'entrée en salle blanche.

Le traitement du couvercle en niobium titane est effectué en le remplissant d'acide. Ce traitement statique est bien plus lent que le traitement par circulation forcée, même si la vitesse d'attaque du niobium titane par ce mélange est le double de celle du niobium pur. Compte tenu de la faiblesse des champs dans cette région de la cavité, seuls 10 μm sont effectivement enlevés.

9.2 Rinçage haute pression

9.2.1 Conception

Le rinçage à haute pression (HPR) est une étape cruciale pour l'obtention de bonnes performances par une cavité supraconductrice. Le problème est particulièrement aigu pour des cavités de géométrie complexe et fermée comme les résonateurs quart d'onde.

Dès la conception, les possibilités de rinçage de la cavité ont été prises en compte. C'est en effet principalement dans ce but que le fond de la cavité est démontable.

Se pose néanmoins le problème des grandes dimensions de cette cavité. A 88 MHz, la cavité mesure près d'un mètre de haut. Le nettoyage de la cavité d'une extrémité à l'autre requiert donc deux fois cette dimension, soit 2 mètres. De ce fait, le rinçage vertical comme utilisé pour les cavités elliptiques n'est pas viable compte tenu des dimensions de la salle blanche existante.

Le système conçu (voir Figure 20) est donc horizontal. La buse est fixe ; la cavité tourne autour de l'axe moteur qui entraîne également une table coulissante dans un mouvement de translation (voir Figure 21). Le pas de vis est de 1 mm, choisi pour que toutes les surfaces de la cavité soient balayées. Les roulements, particulièrement, ont été conçus et positionnés de manière à ne pas générer de poussière à proximité de l'entrée de la cavité.

Le dimensionnement de la buse est crucial afin d'assurer un rinçage de toutes les surfaces. La buse est de forme hémisphérique, et 9 trous sont percés sur sa périphérie, balayant 240 degrés (voir Figure 22).

Le diamètre des trous est dimensionné pour s'adapter à la gamme de fonctionnement de la pompe, soit 4 à 15 l/min. L'expérience montre que la relation de Bernouilli peut être utilisée moyennant un coefficient de correction expérimental basé sur différents débits et dimensions de



buses utilisés lors de rinçages précédents. Les trous de la buse font 0,6 mm de diamètre, ce qui doit assurer un débit entre 9 et 11 l/min.

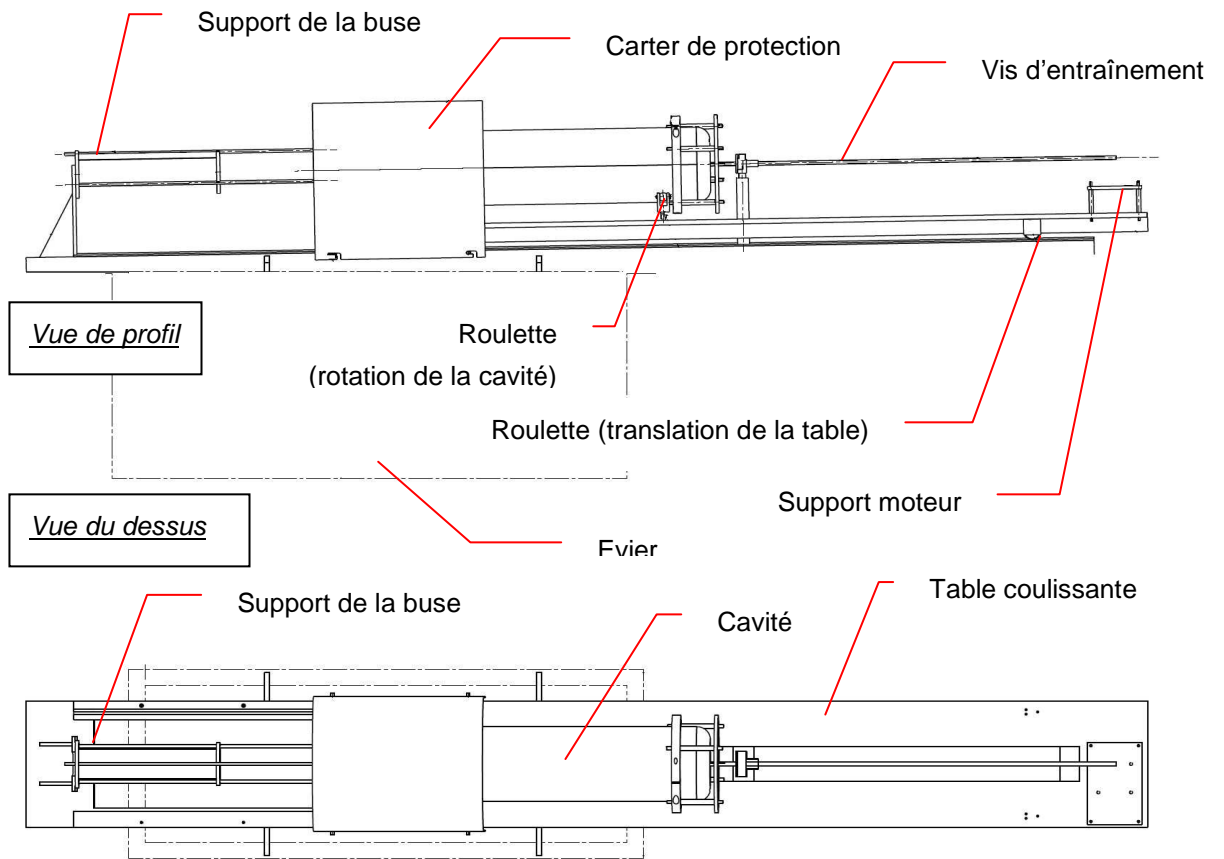


Figure 20 – Système de rinçage HPR ; vue d'ensemble.



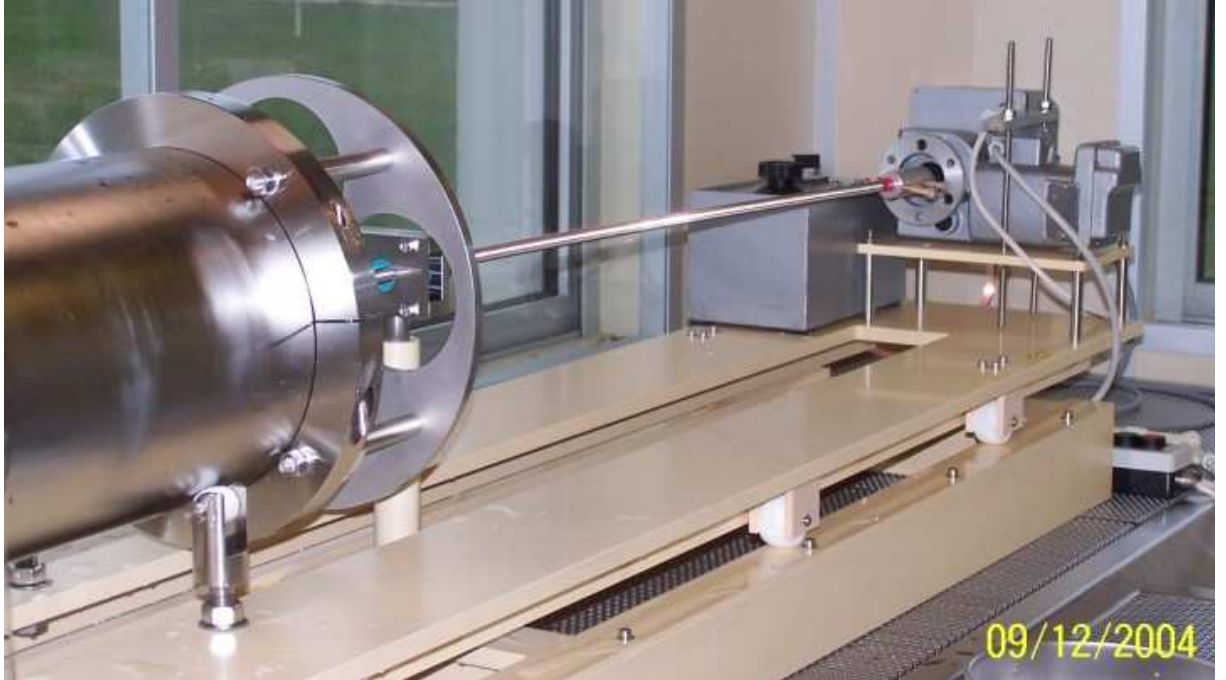


Figure 21 – Vue du système d'entraînement.

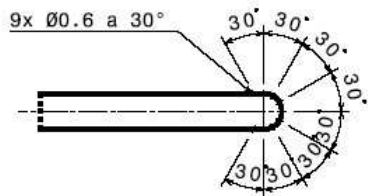


Figure 22 –Orientation des perçages de la buse HPR.

Après rinçage, la cavité est séchée sur un support spécifique (Figure 23), inclinée à 45°, afin de permettre l'écoulement de l'eau sur toutes les surfaces.

Comme pour le système de traitement chimique, des modifications nécessaires dans l'optique du traitement de la série de cavités ont été identifiées. Elles sont résumées en annexe 2.



Figure 23 – Support pour le séchage.

9.2.2 Rinçage

Le protocole implique trois heures de rinçage soit 1 800 tours, avec un débit de 10 l/min. En pratique, le moteur à vitesse maximale permet le cycle complet en deux heures et trente minutes. Le débit mesuré est de 12,7 l/min, ce qui se situe bien dans la plage de fonctionnement de la pompe ; la pression en sortie de celle-ci n'est que de 58 bars au lieu des 80 bars visés. Cette chute de pression n'est pas encore expliquée mais reste acceptable (la limite étant à 30 bars).

9.3 Préparation de la cavité

Après séchage, le couvercle est monté sur la cavité. L'étanchéité est assurée par une bague en cuivre munie de deux joints en indium, en remplacement du joint *Helicoflex* et dans l'attente de la réception de celui-ci. Les brides des tubes faisceau sont fermées par un joint *Conflat* standard.

La cavité est mise sous vide, suivie de la détection de fuite, puis la cavité est montée sur l'insert. Pour finir, elle est insérée dans le cryostat vertical (Figure 24) et mise en froid.



Figure 24 – La cavité sur son insert lors de son positionnement dans le cryostat vertical.

10 Essais RF de la cavité SPIRAL 2

10.1 Mesures de fréquence

La fréquence de la cavité a été mesurée à chaque stade :

- 1) après réception,
- 2) après chimie,
- 3) après mise sous vide,
- 4) après mise en froid,
- 5) en puissance.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 9.



	Fréquence	Effet mesuré	Effet calculé
A réception	87,621 MHz	-	-
Après chimie (200 μm)	87,637 MHz	+16 kHz	+8 kHz
Après mise sous vide	87,651 MHz	+14 kHz	+20 kHz
Après mise en froid	87,788 MHz	+137 kHz	+128 kHz

Tableau 9 – Effets des diverses opérations sur la fréquence de la cavité

10.2 Mesures de champ et de Q_0

Les essais ont été conduits sur le cryostat vertical CV1 en utilisant les mêmes procédures d'acquisition et de mesure que pour les cavités elliptiques de fréquence 700 MHz et plus. Les composants ont été adaptés à 88 MHz quand nécessaire (amplificateur, boucle de régulation, coupleur directionnel, etc.).

Rappelons que les caractéristiques nominales calculées sont un Q_0 de $2,2 \cdot 10^9$ à faible champ (voir Tableau 4, 1^{ère} partie) et un champ accélérateur de 8 MV/m pour une utilisation sur machine à 6,5 MV/m. La spécification de Q_0 au champ nominal est $5,3 \cdot 10^8$ (pour des pertes totales de 7 W ; voir 2.2, 1^{ère} partie).

Un champ accélérateur maximum de 9,5 MV/m a été atteint (voir Figure 25). La barre d'erreurs est de 5 à 10% sur le champ et de 20% sur le Q_0 compte tenu des conditions expérimentales.

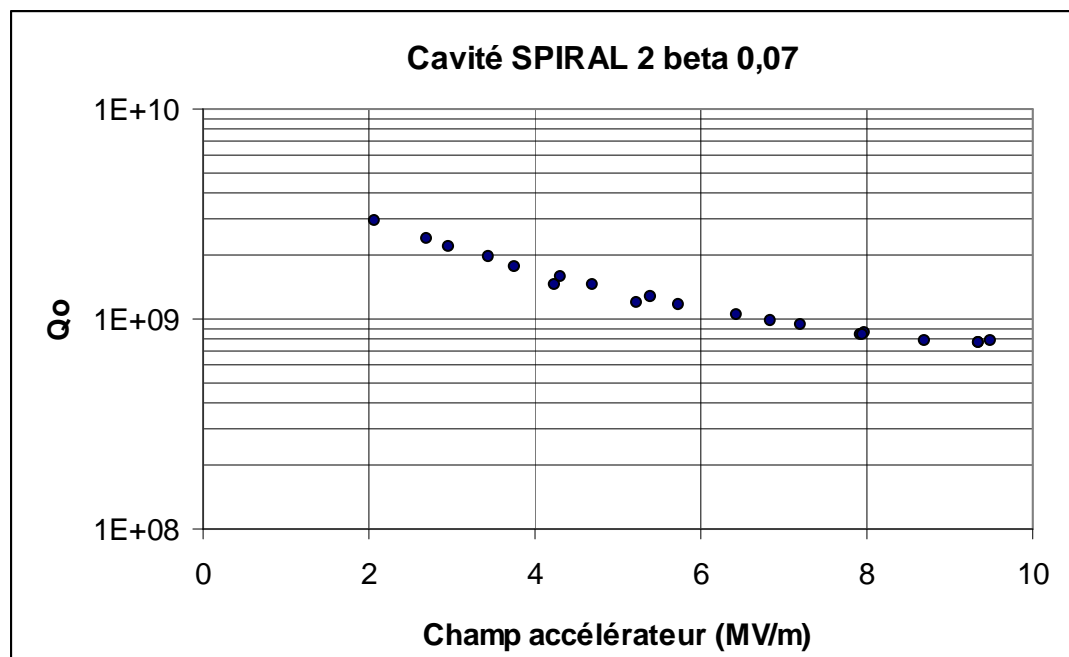


Figure 25 – Mesure du Q_0 en fonction du champ accélérateur.

Le Q_0 à bas champ est en accord avec les caractéristiques calculées ($2,9 \cdot 10^9$ à 2 MV/m de champ accélérateur). Au champ nominal, il est supérieur à $9 \cdot 10^8$. Les pertes RF correspondantes sont de 4 W environ. Le cahier des charges est donc également satisfait sur ce point. Il faut toutefois rappeler que



ces mesures sont effectuées dans les conditions idéales d'un cryostat vertical ; en particulier, le champ magnétique piégé est très faible. Les pertes dans le cryomodule seront donc plus importantes, la contribution supplémentaire provenant du champ magnétique terrestre piégé, en présence du blindage décrit en 18 (3^{ème} partie), étant de 700 mW environ.

La valeur de champ dans la cavité n'est pas limitée par un phénomène de quench total. Aux alentours de 9,5 MV/m, la puissance transmise chute brutalement (et donc le champ dans la cavité) mais non complètement. La lenteur des phénomènes de récupération (partielle) semble incriminer des échauffements anormaux, probablement situés au niveau du joint en cuivre du couvercle, voire sur le couvercle en niobium-titane lui-même. Les pertes RF sur le fond en niobium-titane de la cavité, ou bien dans le joint en cuivre, peuvent être la cause de l'échauffement. Des essais complémentaires, en particulier en plaçant des sondes de températures aux points concernés, doivent permettre de savoir si le joint, le fond seul, ou bien une autre zone de la cavité est en cause.

Toutefois le fond de la cavité de série est radicalement différent de celui du prototype, aussi bien par sa forme que par le matériau utilisé : le cuivre, associé à des tresses, permettra un refroidissement adéquat (voir 16.4.3 dans la 3^{ème} partie).

11 Conclusion

11.1 Protocole de préparation

Le protocole usuel de préparation des cavités supraconductrices en niobium massif a été utilisé avec succès. Le système de rinçage HPR s'est avéré satisfaisant aux besoins ; moyennant quelques améliorations rendant nécessaire une reprise d'étude partielle, il permettrait de satisfaire aux besoins d'une série de cavités de ce type. Pour ce qui concerne la phase de traitement chimique il sera nécessaire de réduire la vitesse ou la durée d'attaque. Des essais sont préconisés pour déterminer la durée de chaque phase.

11.2 Fréquence

Dans le cas d'un prototype, l'obtention précise de la fréquence de résonance est relativement secondaire. Pour les cavités destinées à être montées sur l'accélérateur, il en va tout autrement.

Deux problèmes se posent. Le premier est relatif aux simulations RF, le second a trait aux problèmes de réalisation mécanique.

Du fait des techniques de maillage essentiellement, les codes de calcul RF 3D ne permettent pas à l'heure actuelle de déterminer avec une précision suffisante (inférieure à 50 kHz) la fréquence de résonance *absolue* d'une cavité. Les deux codes utilisés ont toujours, pour des dimensions de cavité strictement identiques, indiqué des résultats différents d'environ 200 kHz.

Par ailleurs, les incertitudes liées à la réalisation des cavités, en particulier les rétreints de soudure et les déformations lors des recouvrement de soudures circulaires, ne permettent pas d'obtenir des tolérances générales bien meilleures que le 1/10^e de millimètre. Ceci est également insuffisant pour assurer une précision de la fréquence de résonance de l'ordre de 50 kHz.

Plusieurs hypothèses sont à l'étude afin de définir le protocole permettant d'obtenir une précision suffisante sur la fréquence en fin de fabrication, en utilisant une ou plusieurs mesures de fréquence intermédiaires.



Par ailleurs, un procédé de réglage de la fréquence à chaud par déformation plastique doit être validé. La cavité actuellement réalisée peut constituer un bon outil pour ce faire.

11.3 Champ et pertes

Les premiers essais ont démontré que la cavité était capable d'atteindre les performances demandées. Conçue pour 8 MV/m de champ accélérateur (normalisation par $\beta \cdot \lambda$) afin de fonctionner à 6,5 MV/m, elle a atteint environ 9,5 MV/m, ce qui correspond à des champs de surface électrique et magnétique de 47 MV/m et 81 mT.

Le facteur de qualité est à la valeur nominale : entre $9 \cdot 10^8$ et $1 \cdot 10^9$ à 6,5 Mv/m. Les pertes dans la cavité sont donc comprises entre 3,6 et 4,1 W, dans les conditions idéales du cryostat vertical (en particulier avec un blindage magnétique optimal).



Annexe 1

Modifications à apporter au système de traitement chimique

- Le système de guidage des cannes d'injection acide est insuffisant et ne permet pas un contrôle suffisant. Par ailleurs, la position relative des embouts d'injection acide et de l'anneau rigidificateur les supportant doit être corrigée afin de permettre de passer autour des tubes de glissement.
- Les joints de protection et d'étanchéité pour les trois brides doivent être revus.
- Le système tel que conçu nécessite de démonter les vannes (injection / vidange d'acide) à chaque ouverture de cavité.
- Le matériau utilisé pour supporter la cavité (armodur) et en particulier les bras portant la cavité lors des opérations de rinçage et de chimie est trop fragile pour supporter la cavité remplie d'eau, et la température (60°C) du bain ultrason. Il est souhaitable de le remplacer par de l'acier inoxydable.
- Il est nécessaire de concevoir un outillage de protection de la portée de joint du couvercle afin de le traiter par trempe.



Annexe 2

Modifications à apporter au système de rinçage haute pression

- L'utilisation de certains matériaux est inadaptée. Le support de la buse en armodur n'est pas assez rigide et entraîne des vibrations de forte amplitude en fonctionnement. Les appuis sur l'évier en armodur soudé sont trop faibles. Dans ces deux cas, l'utilisation d'aluminium est recommandée. Les roulettes en téflon supportant la cavité pèlent sous son poids et l'impact des soudures.
- Le nombre d'appuis du plateau coulissant insuffisant entraîne une flèche importante. La position des supports réglables est inadaptée par rapport au positionnement des roulettes.
- Le support et l'interface avec le moteur est à revoir; en particulier, un système d'ajustement pour son alignement est nécessaire.
- Une échancrure dans la table de rinçage doit être prévue pour permettre l'amplitude de rinçage nécessaire (dégagement du support de buse), ou bien la buse doit être rallongée.
- Le carter de protection est inadapté et l'évacuation de l'eau n'est pas prévue correctement (l'eau coule à côté de l'évier).
- Le système de fixation de la cavité sur l'axe d'entraînement ne permet pas un démontage sans un nombre de manipulation excessif (augmentant les risques de pollution) et doit être revu.
- L'extrémité des deux tubes de rigidification du support de buse doit être bouchée côté cavité.

||
ced
||



3^{ème} partie

Etude et conception du cryomodule

12 Principes généraux

Le cryomodule de la cavité SPIRAL 2 à $\beta = 0,07$ présente quelques particularités qui ont grandement influencé sa conception. Premièrement, les contraintes d'encombrement imposées par la forte intensité du faisceau sont très rigoureuses suivant la direction de l'axe faisceau. Ceci détermine la forme parallélépipédique du cryomodule, la position peu conventionnelle du système d'accord, etc. Une autre particularité est la présence d'une seule cavité par cryomodule, ce qui présente un avantage majeur principalement du point de vue de l'alignement. Enfin, originalité par rapport aux cavités généralement conçues au DAPNIA, l'axe principale de la cavité quart d'onde n'est pas celui de l'axe faisceau.

La conception de ce cryomodule s'appuie largement sur l'expérience accumulée au SACM dans la réalisation des cryomodules précédents, principalement SOLEIL et SUPER3HC.

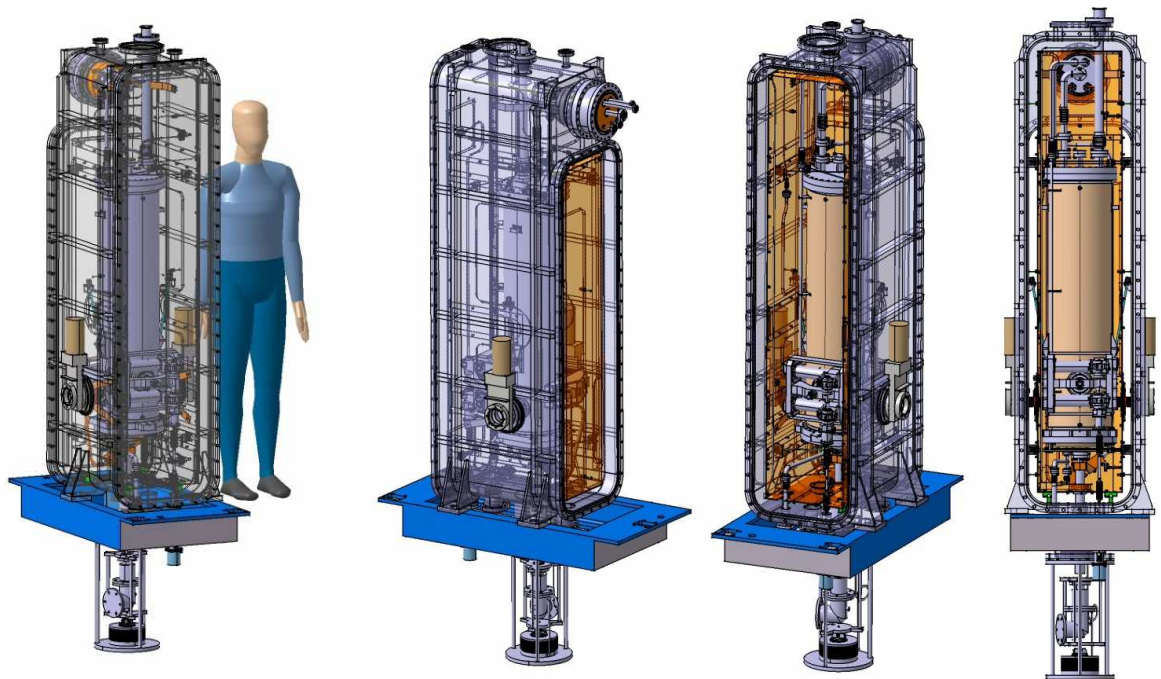


Figure 26 – Vues générales du cryomodule.

La cavité est en beige, visible. L'enceinte hélium est en gris. L'écran thermique figure en orange. Le châssis apparaît en bleu. Noter le coupleur en bas.

Une attention particulière a été portée à la simplification des procédures d'assemblage en salle blanche (voir 21) pour limiter les risques de pollution par des poussières susceptibles de dégrader les performances des cavités.

13 Géométrie et encombrement

En dépit de la forme cylindrique de la cavité, il est impossible de concevoir le cryomodule avec la même géométrie. En effet, la longueur du cryomodule selon l'axe faisceau doit être très faible, et cette limitation empêchera l'implantation des différents systèmes (système d'accord en particulier) si la



dimension était la même dans le plan perpendiculaire. De fait, une géométrie parallélépipédique permet de découpler les deux dimensions (voir les vues d'ensemble du cryomodule sur la Figure 26).

Afin de faciliter le montage et la maintenance et d'améliorer l'accessibilité aux composants, une trappe est aménagée de chaque côté.

La hauteur globale du cryomodule est déterminée principalement par la distance entre l'axe faisceau et les raccords cryogéniques. Elle est de 2 218 mm de la bride supérieure à la bride coupleur.

La largeur (dimension perpendiculaire à l'axe faisceau) est fixée principalement par l'encombrement du système d'accord. Elle est de 657 mm. Dans la direction de l'axe faisceau, le cryomodule mesure 623 mm en incluant les vannes.

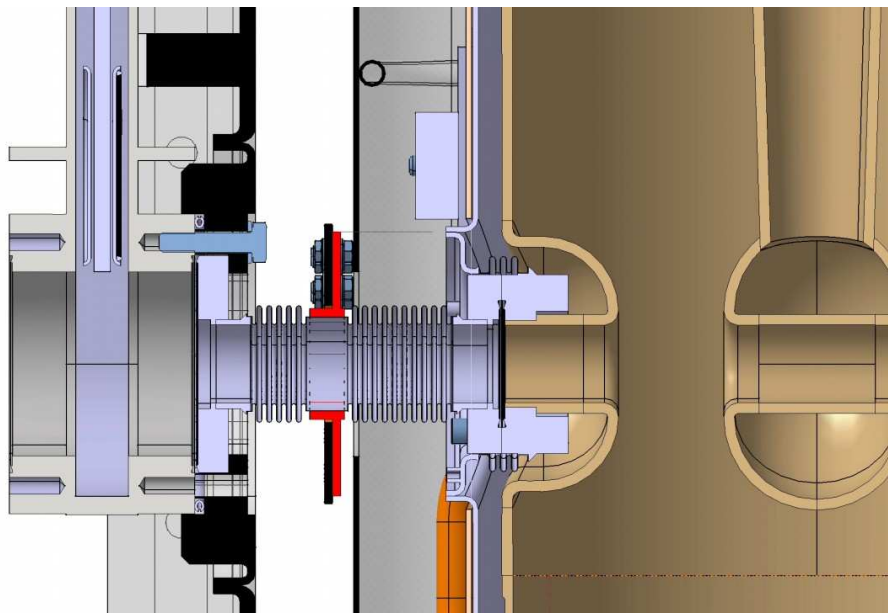


Figure 27 – Implantation de la zone de l'axe faisceau entre la vanne d'isolement (à gauche) et l'axe de symétrie de la cavité (à droite).

Dans la direction de l'axe faisceau, le plus grand soin a été apporté pour que les distances de bride à bride soient les plus faibles possibles (Figure 27). Le positionnement et le nombre des soudures, la longueur des soufflets, le positionnement et la forme des brides ont été optimisés en prenant en compte le facteur cryogénique (voir 16.2.2 et 16.3.2). Ainsi, les brides du tube faisceau sont rentrées dans les tubes de glissement de la cavité autant que le permettent les techniques de soudure et les dissipations RF sur la portion en acier inoxydable du tube faisceau (3.10, 1^{ère} partie). Le nombre des ondes des soufflets de rupture de conduction et la place réservée pour la thermalisation à 65 K sont gardés aussi faibles que possible. Enfin, la géométrie de la bride externe du cryomodule est spécialement optimisée pour minimiser son encombrement.

Toutes les dimensions du cryomodule sont conservées aussi compactes que possible car l'inconvénient majeur de la géométrie parallélépipédique par rapport aux formes cylindriques conventionnelles est sa sensibilité à la pression. Afin de supporter la pression externe de 1 bar (enceinte sous vide) avec des contraintes et des déformations minimales, il est nécessaire d'utiliser de l'acier inoxydable d'épaisseur 6 mm avec des barreaux de renfort [1]. Les contraintes générées sont alors inférieures à 100 MPa et les déplacements de 1 mm au maximum (Figure 28).

Du fait des renforts, l'enceinte du cryomodule est lourde : 325 kg nue. Les couvercles, qui sont en aluminium d'épaisseur 20 mm, pèsent 38 et 46 kg.

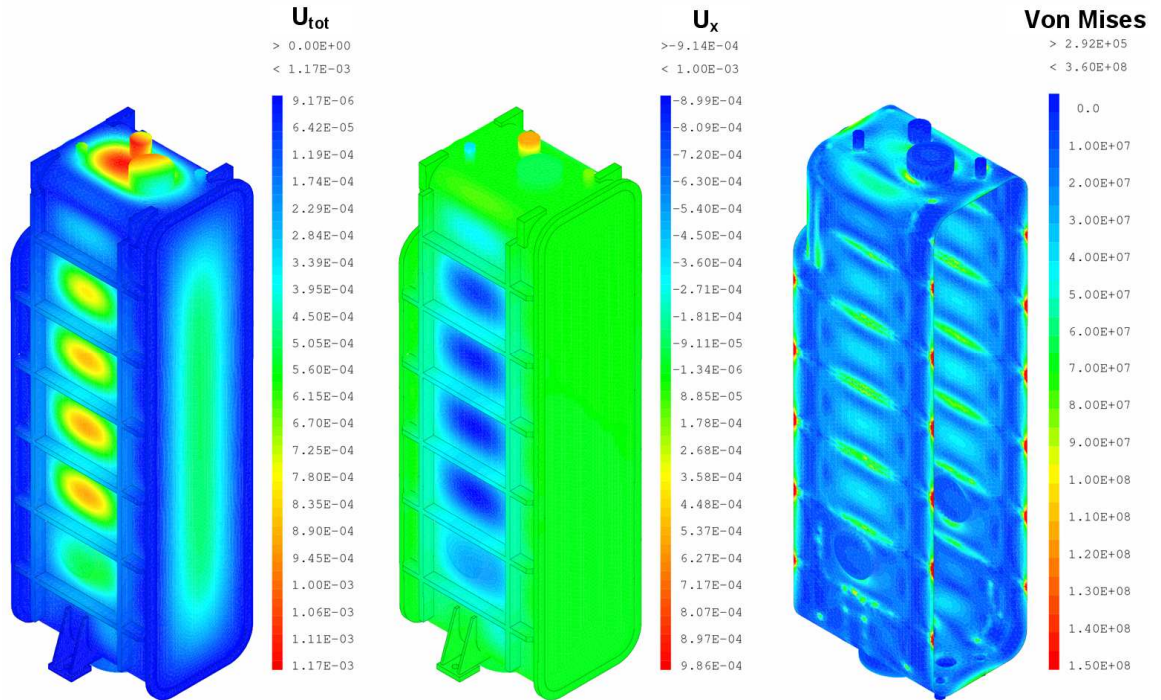


Figure 28 – Déformées et contraintes sur l'enceinte du cryomodule sous l'effet de 1 bar de pression statique.

14 Pompage

14.1 Vide d'isolation

Une bride CF63 placée en bas de l'enceinte à vide permet le pompage du vide d'isolation au travers d'une chicane aménagée dans l'écran cuivre. Une pompe turbomoléculaire associée à une pompe primaire permet l'évacuation du gaz avant la mise en froid. Ce groupe de pompage peut être arrêté à l'issue de la mise en froid, la grande surface de la masse froide assurant à elle seule un pompage très efficace. Il est néanmoins nécessaire de conserver la possibilité de pomper le vide d'isolation à tout moment au cas où une petite fuite se déclarerait.

Des éléments de souplesse devront être installés entre la pompe primaire et l'enceinte pour limiter la transmission de vibrations à la cavité.

14.2 Vide cavité

Les procédures de pompage et de remise à la pression atmosphérique devront être effectuées suivant un cahier des charges strict, afin d'éviter toute pollution par des poussières du vide cavité.



Ces spécifications devront être rédigées afin de définir le groupe de pompage à utiliser dès l'assemblage du premier module. Le pompage entre la pression atmosphérique et le vide s'effectuera très lentement avec une pompe turbomoléculaire associée à une pompe primaire sèche via un système de diaphragme ou une vanne microfuite. Le vide limite atteint, le pompage pourra être assuré par une pompe ionique à chaud comme à froid.

15 Support et alignement

15.1 Maintien de la cavité

La cavité est maintenue dans le cryomodule par le biais de tirants en Ta6V (alliage de titane). Cet alliage a été choisi plutôt que le G10 (un polymère très isolant thermiquement) pour sa résistance en flexion. Dix de ces tirants sont nécessaires. Quatre sont placés horizontalement au sommet de l'enceinte hélium, quatre horizontalement à sa base, et les deux autres verticalement (en fait, avec une légère inclinaison afin de minimiser les ouvertures dans l'écran et pour des considérations d'encombrement au niveau des attaches) (voir Figure 30).

Les tirants horizontaux, croisés par paires et placés symétriquement, fixent l'axe vertical de la cavité et bloquent la rotation autour de cet axe. La position de l'axe vertical de la cavité devrait donc être conservée après refroidissement. De plus, du fait des dilatations différentielles, les contraintes sur les tirants sont pratiquement nulles à froid.

Néanmoins, la cavité va être amenée à se déplacer verticalement au sein de l'enceinte à vide du fait des dilatations thermiques (rétreints). De plus, les matériaux utilisés ont des coefficients de dilatation relativement différents. Ainsi il est nécessaire d'anticiper ces rétreints thermiques afin qu'à froid l'axe de la cavité supraconductrice, l'axe du réservoir inox et l'axe de l'enceinte à vide à 300 K soient alignés.

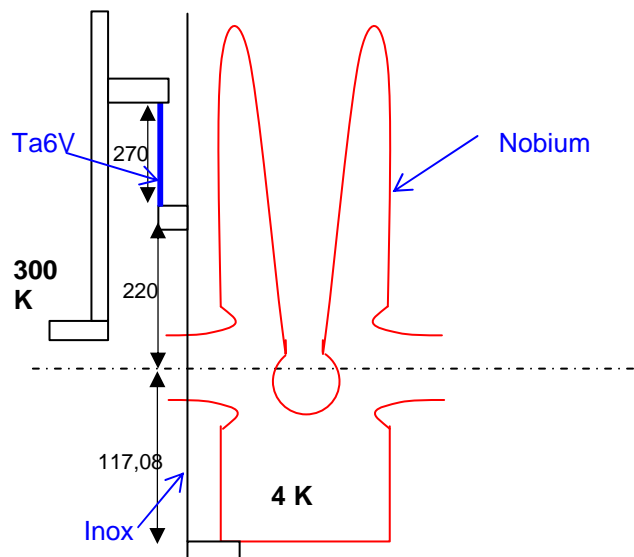


Figure 29 – Rétreints thermiques.

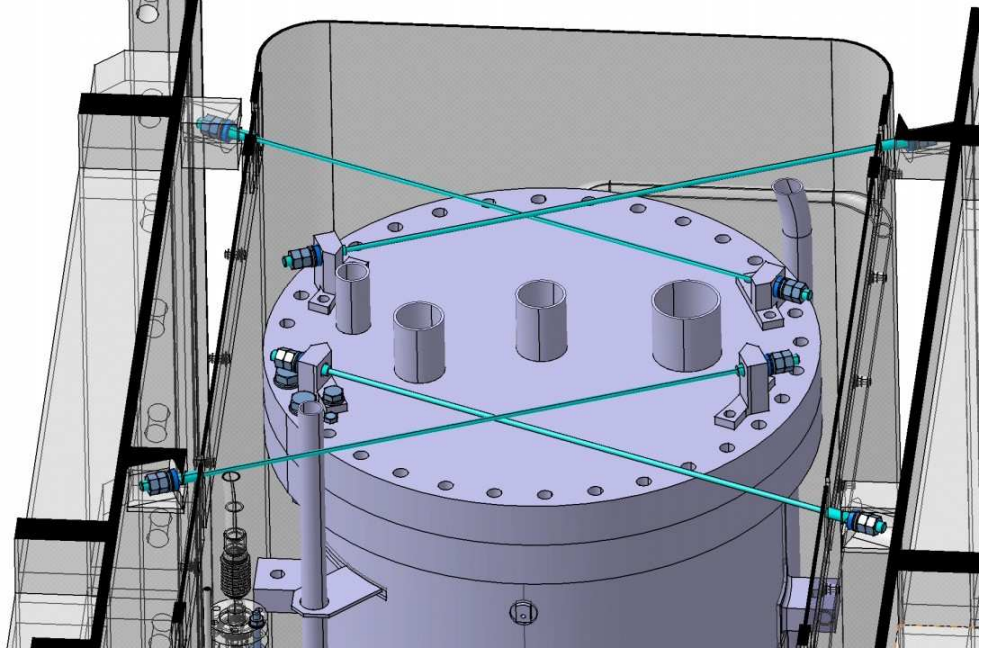
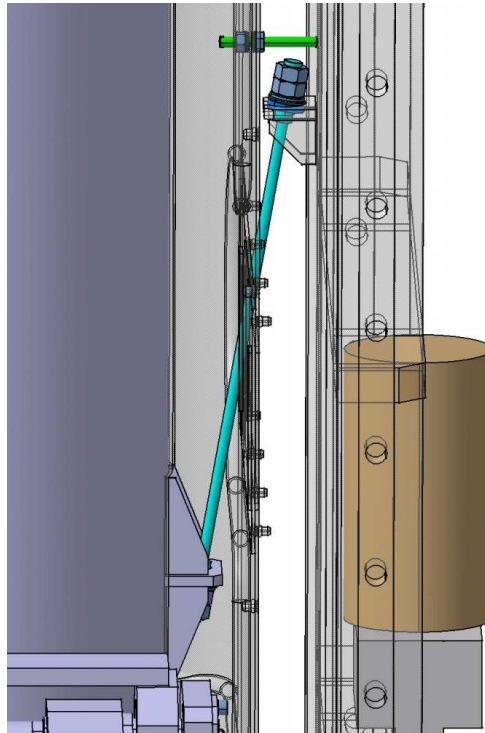


Figure 30 – Tirants supportant la cavité.

Ci-dessus : implantation des tirants horizontaux au-dessus de la cavité ; ci-dessous : implantation de l'un des tirants verticaux.





L'axe de la cavité en niobium lié en bas au réservoir inox devrait descendre de 0,17 mm ($(\Delta L/L)_{(4K)Niobium} = 0,146\%$). Les tirants en alliage de titane (TA6V) raccordant le 300 K au réservoir à 4 K subiront un rétreint de 0,25 mm pour une longueur initiale de 270 mm. Le réservoir en acier inoxydable se contractera entre le bas de la cavité et le point d'accroche des tirants d'une longueur de 1,05 mm. La longueur initiale à 300 K de cette partie est de 337,08 mm (220+117,08). Ainsi d'après nos estimations, l'axe faisceau devrait se déplacer vers le haut d'environ **1,125 mm** lors de la mise en froid du cryomodule. La Figure 29 présente une schématisation de la géométrie.

De même, la mise sous vide de l'enceinte du cryomodule entraîne un déplacement des points de fixation des tirants verticaux sur l'enceinte du cryomodule de 1 mm environ en direction de la cavité. Ce mouvement entraîne un déplacement de l'axe faisceau vers le bas de **0,17 mm**. Ce déplacement tend à compenser l'effet de la mise en froid.

En conséquence, il est nécessaire d'aligner à chaud l'axe de la cavité **0,955 mm** plus bas que l'axe faisceau théorique, afin que les effets liés à la mise en froid et à la mise sous vide viennent déplacer l'axe faisceau de la cavité jusqu'à l'axe théorique.

15.2 Alignement

Le fait que le cryomodule ne contient qu'une seule cavité est un avantage certain. La précision visée est, conformément aux spécifications de la dynamique faisceau, de 1 mm. La procédure d'alignement est la suivante (voir Figure 31).

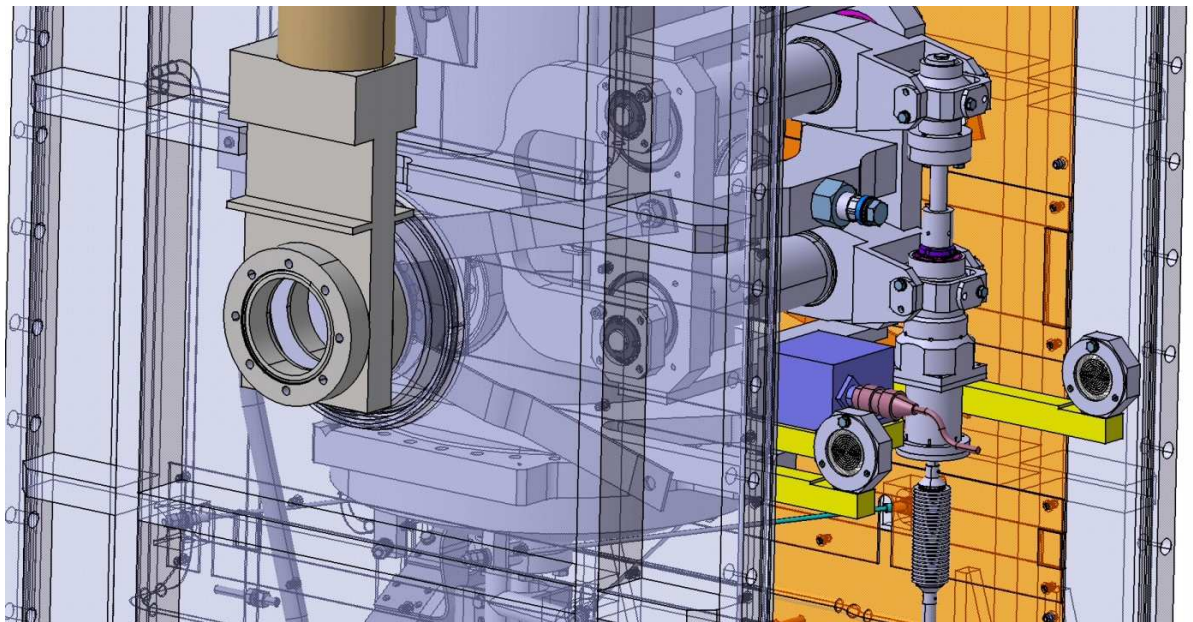


Figure 31 – Report de l'axe faisceau pour alignement.

En usine, la position de l'axe faisceau est reportée avec précision (quelques centièmes de millimètres) sur trois usinages en V sur la bride du bas de la cavité (voir Figure 32). Cette référence permet d'accéder à la position de la cavité une fois celle-ci fermée. La cavité est pré-alignée dans le cryomodule en utilisant le système de tirants décrits en 15.1. Ensuite, un outillage précis en appui sur les usinages de référence permet de déporter l'axe faisceau ainsi repéré sur l'axe d'alignement du linac, hors du cryomodule (à chaud, celui-ci étant ouvert). Un inclinomètre électronique placé sur ce



même outillage permet d'obtenir la position verticale de l'axe faisceau. En utilisant les mires figurant l'axe faisceau ainsi déporté, il est ainsi possible d'aligner le *cryomodule* (et donc la cavité) de manière à aligner correctement l'axe faisceau.

Lors de la mise en froid, le placement des tirants horizontaux permet d'éviter tout mouvement de l'axe faisceau en rotation. En revanche, il faut prendre en compte le déplacement vertical de celui-ci (voir 15.1).

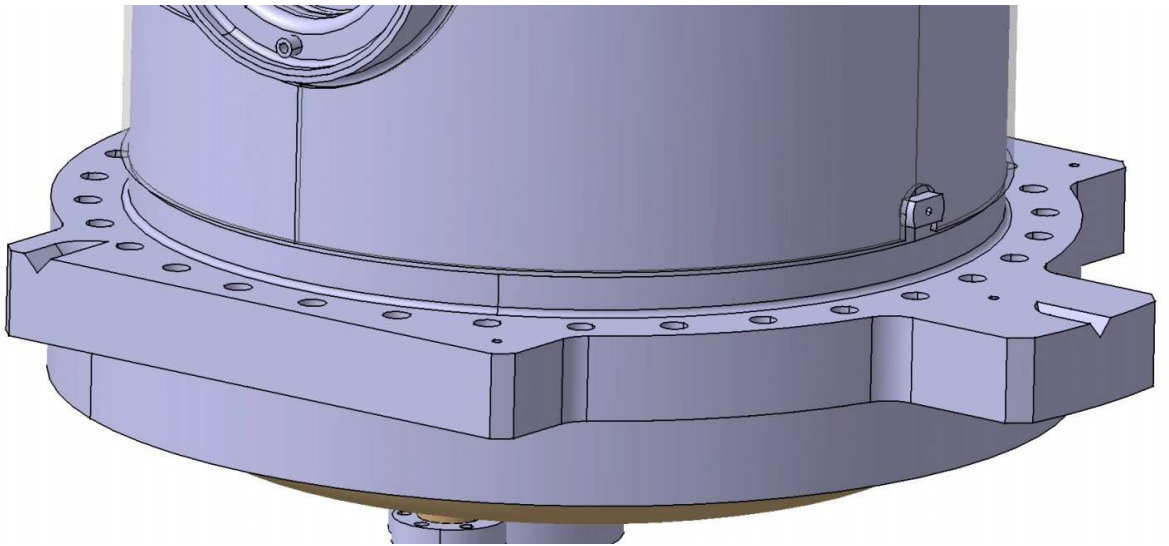
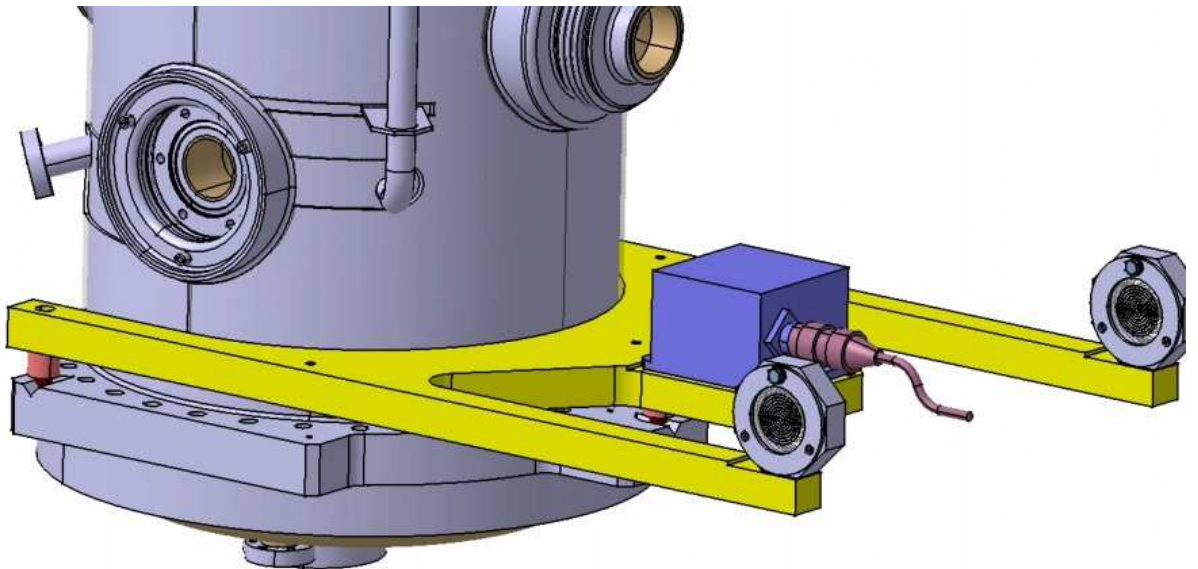


Figure 32 – Usinages de référence en V et positionnement de l'outil de report d'axe.





16 Cryogénie

16.1 Introduction

La cavité supraconductrice essentiellement composée de Niobium (sauf le fond qui est un dépôt de Niobium sur cuivre) est insérée dans un réservoir d'hélium liquide (4 K) afin d'assurer une température uniforme (inférieure à 9,2 K) avec un bon coefficient d'échange thermique. L'espace annulaire entre la partie cylindrique de la cavité et le réservoir d'hélium liquide est de 9 mm. Ainsi la cavité sera entourée d'hélium liquide « bouillant ».

Le bas de la cavité, réalisé à partir d'un dépôt de niobium sur du cuivre, sera refroidi essentiellement par conduction thermique. Le coupleur de puissance apportant une puissance relativement importante au niveau du fond de la cavité, un système à thermosiphon (16.4.3) sera utilisé.

Au dessus de la cavité une hauteur d'hélium liquide d'environ 10 cm sera présente. Le niveau dans le réservoir d'hélium liquide sera régulé durant le fonctionnement du cryomodule à partir d'une mesure permanente de niveau.

Afin de limiter les apports par rayonnement, un écran thermique en cuivre (Figure 34) est positionné entre le réservoir et l'enceinte à vide. Cet écran de 3 mm d'épaisseur est refroidi à partir d'hélium gazeux à 60 K et 15 bar. La circulation d'hélium gazeux se fera à travers des tubes en cuivre de diamètres 8-10 mm brasés sur l'écran.

De la super-isolation est utilisée afin de réduire les apports radiatifs. Une vingtaine de couches est préconisée autour de l'écran cuivre et le positionnement d'une demi douzaine autour du réservoir d'hélium.

Le réservoir d'hélium contient 16 litres d'hélium liquide et 5 litres de gaz au dessus de ce bain. La consommation du cryostat est estimé à **20 l/h** (~0,7 g/s), d'après les apports thermiques sur le bain à 4 K détaillés en 16.3 (~14 W).

L'alimentation en hélium liquide, hélium gazeux et les retours provient d'une ligne cryogénique de transfert raccordée aux différents cryomodules, étudiée par l'IPN d'Orsay, au travers d'une boîtes à vannes. La partie haute de notre cryomodule vient se raccorder sur cette boîte à vanne (Figure 33). Cinq tuyauteries sont à connecter :

- alimentation en hélium liquide de la cavité : raccord CF16,
- alimentation hélium gaz de l'écran 65 K : raccord CF16,
- retour gaz de l'écran : raccord CF16,
- retour gaz hélium froid : raccord CF25,
- mise en froid de la cavité : raccord CF16.

16.2 Les apports thermiques sur l'écran à 65 K

Les apports thermiques sur cet écran refroidi par une circulation d'hélium gazeux sont dus d'une part aux échanges radiatifs avec l'enceinte à vide à 300 K et d'autre part aux apports par conduction.

L'écran en cuivre de 3 mm est alimenté par de l'hélium gazeux à 15 bar dont la température d'entrée est **60 K** avec un débit de **0,6 g/s**. La température de sortie sera proche de **70 K** ($T_e - T_s \sim 10^\circ\text{C}$: obtenu par bilan enthalpique pour une puissance de **30 W**). Les pertes de charge pour cette circulation d'hélium gazeux au sein du cryomodule sont légèrement inférieures à 10 mbar. Les tubulures (8x10) seront brasées à l'intérieur de l'écrantage en cuivre pour faciliter la mise en place des couches de super-isolation. La longueur totale de la tubulure est d'environ 13 mètres avec une



distance maximale entre tubes de 600 mm, afin d'homogénéiser au mieux les températures. L'écrantage sera composé de trois parties principales :

- la structure, constituée d'un bloc regroupant l'écrantage du fond et des cotés,
- le dessus : c'est un chapeau venant se fixer sur la structure,
- la partie avant qui permet de refermer l'écrantage thermique.

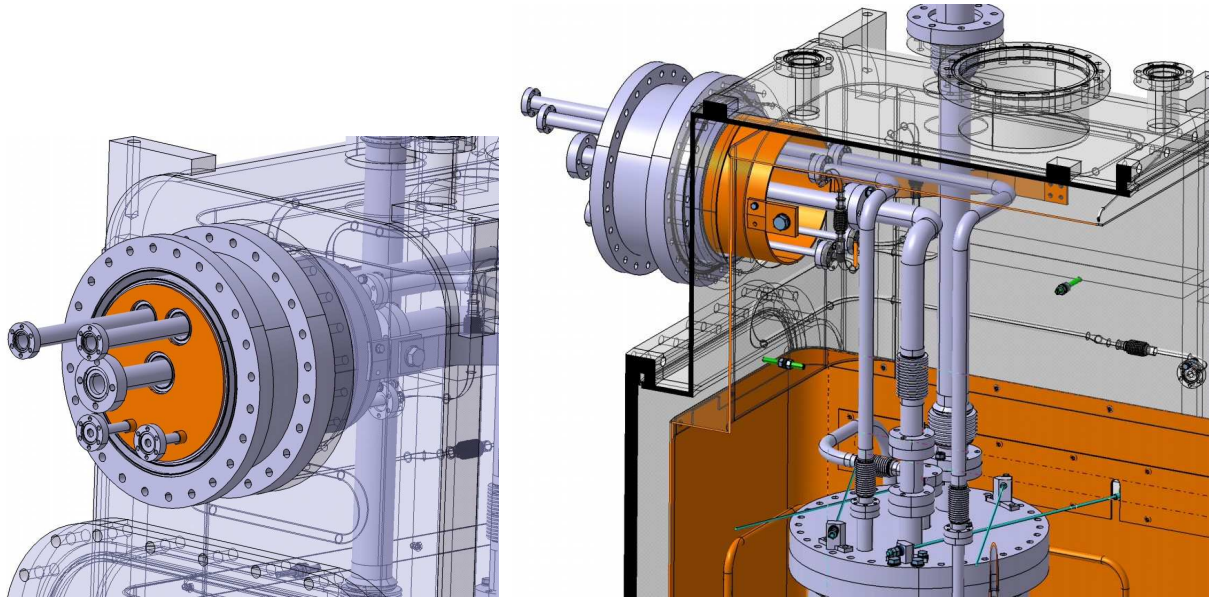


Figure 33 – Interface cryogénique.

Par ailleurs, sur ces écrans de nombreux trous ont été réalisés afin de faciliter le montage. Ces trous seront ensuite refermés par des pièces de cuivre vissées aux écrans. Un système avec perçages a été prévu sur la partie basse de l'écran pour faciliter le pompage de l'enceinte à vide, tout en limitant les échanges radiatifs entre le 300 K et le réservoir à 4 K.

16.2.1 Les apports de chaleur par rayonnement

L'écran à une température moyenne d'environ 65 K et protégé par 25 couches de super-isolation échangera de l'énergie par rayonnement avec l'enceinte à vide à 300 K. Le flux échangé est alors estimé à 1 W.m^{-2} , ce qui engendre une puissance totale transmise sur la surface de l'écran (légèrement supérieure à 4 m^2) de **5 W**.

16.2.2 Les apports de chaleur par conduction

Différents contacts et liaisons entre le 300 K et l'écran à 65 K sont réalisés. Nous allons passer en revue dans cette partie les éléments apportant de l'énergie sous forme de chaleur à l'écran cuivre.

- Apports thermiques au niveau du tube faisceau.

Un soufflet inox permet d'assurer le raccordement entre la bride extérieure à 300 K et la cavité à 4 K. Au passage de l'écran 65 K, le soufflet est thermalisé au niveau d'un méplat. Le soufflet composé de 5 ondes entre 300 K et 65 K et d'un diamètre intérieur de 30 mm possède une épaisseur de 0,15 mm. Les apports ont été estimés à 0,5 W de chaque coté de la cavité. Ainsi **1 W** est apporté à

l'écran au niveau du tube faisceau. L'écran sera en fait lié thermiquement au méplat positionné par des tresses en cuivre dont le dimensionnement est présenté en 16.4.4.

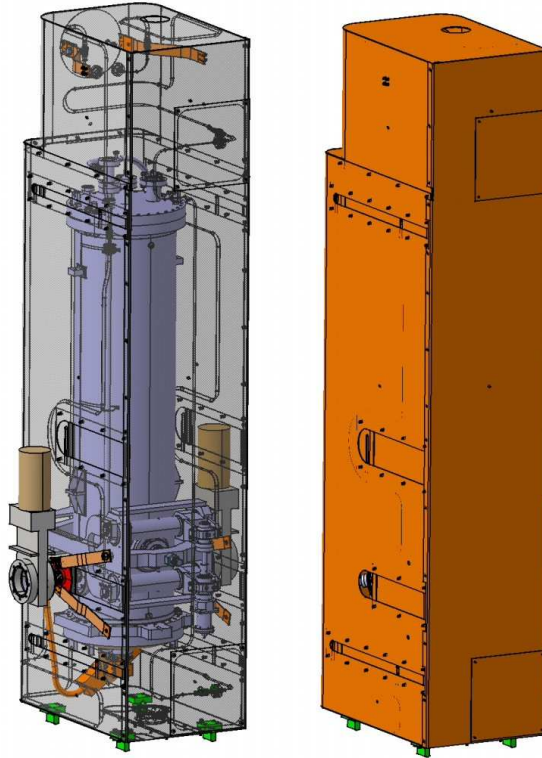


Figure 34 – Ecran thermique en cuivre.

A gauche : écran (grisé transparent) en place sur la cavité. A droite : écran seul. Les pieds d'appui de l'écran figurent en vert.

- Apports thermiques au niveau des pieds et supports de l'écran.

L'écran thermique en cuivre est maintenu par 4 pieds et 10 tiges de calage en fibre de verre époxy. Les apports conductifs au niveau des pieds sont de 0,5 W par pied, soit **2 W** pour les 4 pieds. Les tiges contribuant au maintien de l'écran apporte chacune environ **0,15 W**.

Ainsi les apports totaux pour les différents supports sont de **3,5 W**.

- Apport au niveau des tuyauteries de liaison (pompage, sécurité, ...).

La tuyauterie permettant l'évacuation d'urgence du gaz contenu dans le réservoir possède un diamètre intérieur de 35 mm et un diamètre extérieur de 38 mm. Afin de limiter les apports thermiques et d'encaisser les rétreints dus aux dilatations différentielles, un soufflet inox de 7 ondes (épaisseur 0,20 mm) est soudé à la tuyauterie. Le flux apporté par cette tuyauterie est légèrement inférieur à **0,5 W**.

Le tube de pompage de 20 mm de diamètre (épaisseur : 1,5 mm) et d'une longueur de 44 mm engendre un échange conductif de **5,5 W**.

- Apport par les fils de mesure et d'alimentation

La plupart des raccordements de mesures (sondes de températures, fil pick-up,...) seront thermalisés sur l'écrans à 65 K. Il est toutefois difficile actuellement de calculer précisément les



apports que ces derniers engendreront, car nous ne connaissons pas les longueurs qui seront utilisées. Toutefois, une approximation avec une longueur de 1 mètre montre que les apports pour le câble pick-up (mesure RF dans la cavité supraconductrice) sont proches de **1,2 W**. En ce qui concerne les fils de mesures des sondes de température (par exemple), soit 20 fils en cuivre avec un diamètre de 0,2 mm et 1 m de longueur), les apports restent inférieurs à **0,1 W**.

- Apport par le coupleur de puissance

Les apports totaux pour le coupleur de puissance sont de **8,3 W** [1].

16.2.3 Récapitulatif des apports à 65 K

Le Tableau 10 est un récapitulatif des différents apports thermiques à évacuer au niveau de l'écran à 65 K.

	<i>Matériau</i>	<i>Nombre d'éléments identiques</i>	<i>Apports thermiques par élément (W)</i>	<i>Apports totaux (W)</i>
Rayonnement 300K – 65 K				5
Tube faisceau	Inox	2	0,5	1
Pieds écran	Fibre verre epoxy	4	0,5	2
Tige de maintien écran	Fibre verre epoxy	10	0,15	1,5
Tube de pompage	Inox	1		5,5
Tube sécurité	Inox	1		0,5
Fils (Pick-up, mesures, ...)		1		1,3
Coupleur de puissance	Inox	1		8,3
			Total	25,1

Tableau 10 – Apports thermiques à 65 K.

16.3 Les apports thermiques à 4 K

Dans cette partie nous allons quantifier les apports thermiques arrivant sur le réservoir d'hélium liquide à 4 K.

L'épaisseur de liquide entre la cuve inox et la cavité est au minimum de 9 mm. Les dissipations de la cavité et les apports thermiques engendrent une légère ébullition au niveau des parois de la cavité. Toutefois, les flux restent relativement limités et répartis sur l'ensemble des surfaces d'échange.

Dans un premier temps, nous quantifierons les apports par rayonnement sur le réservoir d'hélium liquide, ensuite les différents apports par conduction seront détaillés, puis nous donnerons la valeur des dissipations RF calculés et enfin un tableau permettra de récapituler toutes ces sources de chaleur.



16.3.1 Les apports de chaleur par rayonnement

Le réservoir inox contenant l'hélium liquide sera protégé par 5 ou 6 couches de super-isolation. L'écran thermique 65 K lui apportera ainsi par rayonnement un flux estimé à $0,05 \text{ W.m}^2$. Aussi les apports radiatifs sur le réservoir devraient être inférieurs à **0,1 W**.

16.3.2 Les apports de chaleur par conduction

- Apport par le tube faisceau

La présence d'un soufflet en acier inoxydable de 10 ondes et d'une épaisseur de 0,15 mm limite fortement les apports thermiques dans cette zone de raccordement. Les apports par conduction pour les 2 soufflets sont d'environ **0,05 W** au total.

- Apports par les tubulures (pompage cavité, sécurité hélium)

Le tube de pompage de la cavité (diamètre 20 mm, épaisseur 1,5 mm) comporte entre la thermalisation à 65 K et la cavité, une longueur de 40 cm et un soufflet de 9 ondes (diamètre 20 mm, épaisseur 0,15 mm). Les apports sont ainsi relativement faible : **0,03 W**.

En ce qui concerne la tubulure de sécurité pour l'évacuation des gaz, celle-ci d'un diamètre 36x40 mm comporte un soufflet de 7 ondes dont l'épaisseur de paroi est de 0,2 mm. Les apports entre l'écran thermique et la zone à 4 K par cette tuyauterie sont de **0,08 W**.

- Apports par les tirants de support

Le réservoir de la cavité est fixé à partir de 2 tirants verticaux et 8 tirants horizontaux en alliage de Titane (Ti6Al4V).

Les tirants verticaux ont une longueur de 250 mm et un diamètre de 6 mm. Un tirant engendre alors 0,16 W d'apport. Ainsi pour les 2 tirants verticaux, nous aurons **0,32 W**.

En ce qui concerne les tirants horizontaux, la longueur est alors de 250 mm avec un diamètre de 4 mm. Le flux de chaleur entre la partie hélium et l'enceinte à vide est de **0,07 W**, ce qui engendre des apports pour les 8 tirants de **0,56 W**.

- Apports par le système d'accord de la cavité

La solution retenue pour le système d'accord consiste à un positionnement extérieur du moteur avec un tube de transmission comportant des soufflets.

Dans ce cas, l'axe de liaison apporte de la puissance par conduction thermique. La liaison entre l'extérieur à 300 K et la zone à 4 K est réalisée par un tube comportant 2 soufflets d'épaisseur 0,1 mm avec 25 ondes chacun. Les apports par conduction sont alors très faibles (**~0,01 W**) et donc négligés. La puissance dissipée par frottements est elle aussi négligée.

Remarque : Dans le cas du positionnement interne du moteur, il faudrait alors prendre en compte les apports par conduction dans les câbles d'alimentation électrique (4 câbles de diamètre 0.5 mm, soit **0,2 W** avec thermalisation à 65 K et une longueur de 20 cm). Les dissipations thermiques du moteur en fonctionnement resteraient difficiles à évaluer car on ne peut connaître par avance la fréquence d'utilisation. Toutefois, celle-ci devrait rester ponctuelle et les apports du moteur seraient alors négligeables.

- Apports par les fils de mesure et d'alimentation

D'après nos estimations, les apports du câble pick-up (avec une longueur de 1 m) sont de **1 W** au niveau du réservoir d'hélium liquide. En ce qui concerne les fils des sondes de température, une vingtaine de fils en cuivre de 0,2 mm et 1 m de longueur apportent une puissance inférieure à **0,1 W** au total. Les apports thermiques par les jauges de niveau habituellement utilisées sont souvent négligeables.



- Apport par le coupleur de puissance

En ce qui concerne le coupleur de puissance, les résultats donnés prennent en compte les différentes sources d'apport thermiques (conduction, rayonnement, ...). Le laboratoire LPSC Grenoble a déterminé que la puissance statique déposée par ce système à 4 K serait de **0,76 W** [1].

16.3.3 Les apports par dissipation RF

La dissipation dans la cavité est de **7 W**, avec une densité de flux plus importante sur le haut de la cavité et au niveau de la jointure du fond de la cavité (voir 3.12, 1^{ère} partie). Les pertes dynamiques dans le coupleur à 20 kW sont de **0,54 W**.

16.3.4 Récapitulatif des apports à 4 K

Le Tableau 11 est un récapitulatif des différents apports thermiques à évacuer au niveau de l'écran à 4 K.

	<i>Matériau</i>	<i>Nombre d'éléments identiques</i>	<i>Apports thermiques par élément (W)</i>	<i>Apports totaux (W)</i>
Rayonnement 65 K – 4 K				0,1
Tube faisceau	Inox	2	0,025	0,05
Tirants verticaux	TA6V	2	0,16	0,32
Tirants horizontaux	TA6V	8	0,07	0,56
Tube de pompage	Inox	1		0,03
Tube sécurité	Inox	1		0,08
Système d'accord (moteur externe)		1		0,01
Fils (Pick-up, mesures, ...)	Cuivre	1		1,1
Coupleur de puissance (statique)	Inox	1		0,76
Pertes RF cavité				7
Pertes RF coupleur				0,54
			Total	10,6

Tableau 11 – Apports thermiques à 4 K.

16.4 Les études particulières

16.4.1 Mise en froid

La mise en froid du cryomodule se fait par l'intermédiaire d'un tube raccordé à la partie basse de l'enceinte hélium, à proximité de la bride massive en inox. Ceci est destiné à minimiser les gradients



thermiques dans la mesure où cette bride, de par sa masse, est longue à refroidir, et aussi à bénéficier au maximum de la capacité calorifique de l'hélium gazeux qui va s'évacuer en remontant le long de la cavité, contribuant ainsi à son refroidissement.

16.4.2 Enceinte hélium

L'enceinte hélium, en acier inoxydable, vient se souder sur la bride du bas de la cavité. Elle se prolonge bien au-dessus de la cavité, sur une hauteur d'une quinzaine de centimètres au-dessus de la cavité. Cet espace agit comme séparateur de phase et laisse une place suffisante pour insérer des dispositifs mécaniques comme les renforts de cavité pour diminuer la sensibilité aux variations de pression du bain d'hélium (4.3, 1^{ère} partie), ou d'atténuation des vibrations (4.4, 1^{ère} partie).

L'enceinte hélium est traversée par les tubes faisceau. L'étanchéité est assurée par le biais de soufflets en acier inoxydable soudés sur la bride du tube faisceau. Elle est également traversée par le système d'accord. Là aussi, des soufflets en acier inoxydable assurent l'étanchéité. Une collerette intermédiaire en acier inoxydable est brasée sur l'applicateur en niobium (voir 4.2, 1^{ère} partie) pour permettre la soudure de ce soufflet.

L'enceinte est épaisse de 2 mm. La pression d'hélium est de 1 bar. Des calculs mécaniques [2] montrent qu'elle supporte la pression d'épreuve interne de 3 bars.

16.4.3 Thermosiphon

La géométrie du réservoir hélium et de la cavité ne permet pas de refroidir la bas de la cavité (niobium sur cuivre) autrement que par conduction thermique. De plus, les dissipations RF sont assez importantes à proximité du joint (3.10, 1^{ère} partie) et d'autre part des apports supplémentaires, par le coupleur de puissance et le tube de pompage, sont prévisibles. Ainsi, il a été décidé d'étudier un système particulier afin de pouvoir convenablement refroidir et thermaliser la partie basse de la cavité. Une solution utilisant l'hélium liquide sous forme d'un thermosiphon est apparue comme une solution efficace et assez facile à mettre en œuvre. De l'hélium liquide est soutiré dans le réservoir et une tuyauterie permet de l'amener jusqu'à un point bas. Ensuite dans la zone remontante, un bloc cuivre sur lequel des tresses peuvent être fixées est positionné avec un angle de 35°. La chaleur sera alors apportée dans cette zone par le biais de tresses. Enfin, la conduite remonte se raccorder au tube d'évacuation de gaz froid. Une tuyauterie de 16x1 mm est utilisée pour ce thermosiphon. Pour cette géométrie, la densité de flux critique a été estimée à 500 W.m^{-2} ; en prenant une marge convenable de 50%, il sera possible d'évacuer sans aucun problème une puissance de **2 W** (à 4 K) par cette voie. Il faudra toutefois veiller à ne pas trop soumettre ce thermosiphon à une puissance supérieure car cela pourrait engendrer une forte augmentation de température au niveau du bloc de cuivre.

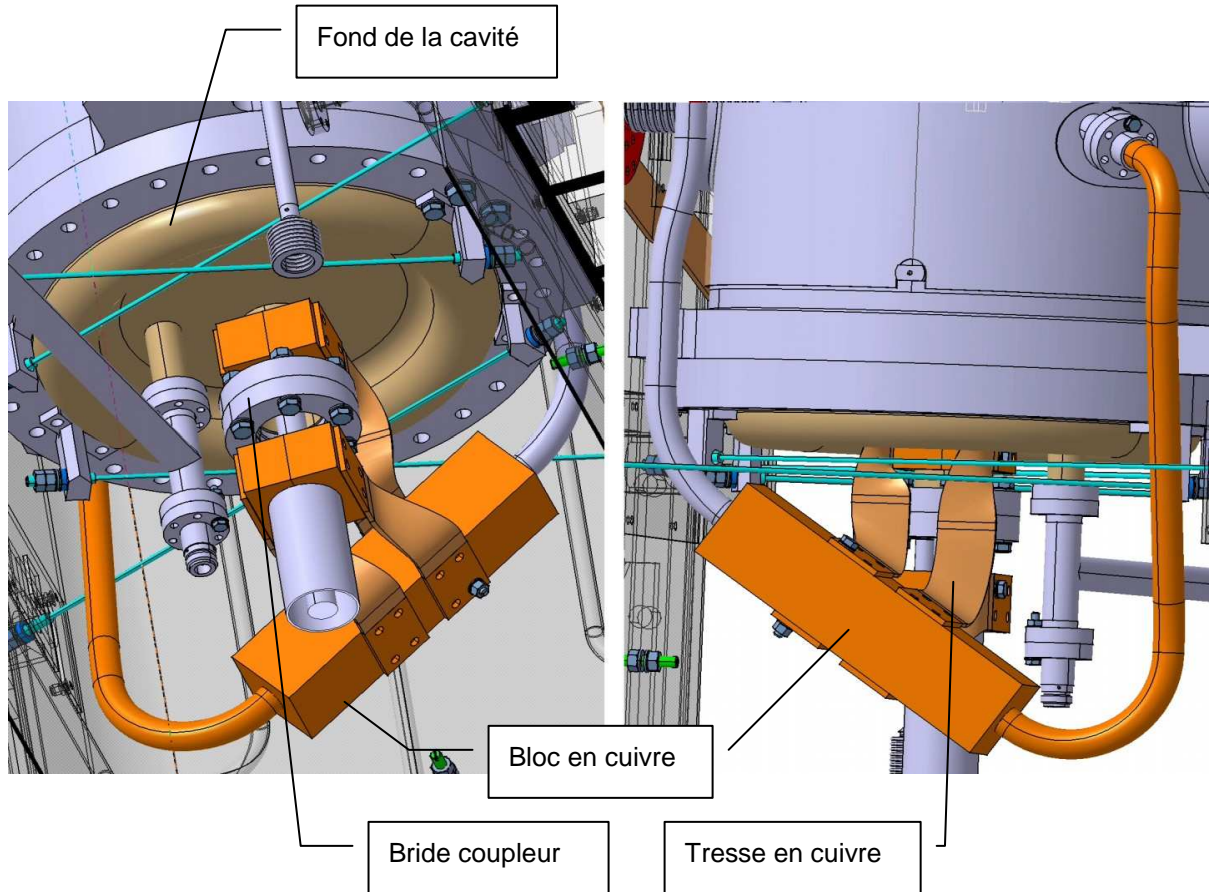


Figure 35 – Système de refroidissement du fond de la cavité.

16.4.4 Tresses

Différentes tresses de cuivre avec une bonne conduction thermique aux basses températures (RRR>100 : Cu-ETP ou **Cu-OF**) seront utilisées dans ce cryomodule. Les dimensions des tresses à mettre en œuvre, et en particulier leur section, ont été uniformisées ; pour la tresse a été dimensionnée pour la plus grande puissance à évacuer. Le refroidissement du coupleur de puissance est considéré comme un des points les plus délicats à thermaliser en minimisant la différence de température entre les extrémités du lien thermique. Une puissance de 1,3 W est à évacuer par l'intermédiaire du thermosiphon tout en gardant une différence de température inférieure à 0,5 K. Quatre tresses d'environ 15 cm de long et d'une section de 30x3 mm² sont nécessaires.

Par ailleurs, un des points très importants concerne le contact entre les tresses et les pièces à thermaliser. L'utilisation d'indium ou autre doit être envisagé avec un serrage suffisant (1 kN) et avec une surface de contact correspondant à plusieurs fois la section de passage.



16.5 Conclusion

Pour ce cryomodule, les apports alors estimés sont de 25,1 W à 65 K et 10,6 W à 4 K. Ceci est en accord avec le dimensionnement initial qui prévoyait une puissance de 30 W à 65 K et 15 W à 4 K par cryomodule. L'ensemble du système de réfrigération (groupe froid, ...) devrait donc être adapté aux besoins des cryomodules dimensionnés par le DAPNIA.

Toutefois, certains apports plus difficilement quantifiables restent à surveiller, comme ceux du coupleur de puissance.

17 Système d'accord

Le système d'accord en fréquence est un des points cruciaux de ce cryomodule. Les contraintes d'encombrement suivant la direction de l'axe faisceau sont telles qu'il est impossible d'utiliser la méthode habituelle consistant à modifier la longueur de l'espace accélérateur en agissant sur les tubes faisceau. Une méthode de substitution (voir 4.2, 1^{ère} partie) a été optimisée. Ainsi, l'effort se fait perpendiculairement à l'axe faisceau, à une hauteur permettant la gamme de réglage en fréquence la plus grande possible compte tenu des contraintes admissibles à froid (400 MPa). Les contraintes d'encombrement sont donc moindres, mais non nulles, car le système d'accord est positionnée à une altitude proche de l'axe faisceau et les tubes faisceau gênent son implantation mécanique.

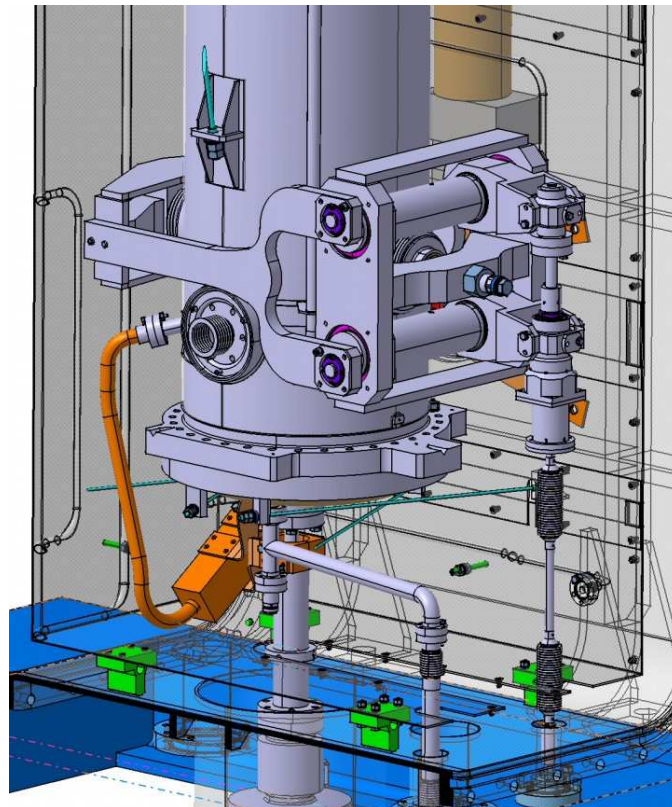


Figure 36 – Vue générale du système d'accord.



L'optimisation de l'applicateur a déjà été abordée en détail (voir 4.2, 1^{ère} partie). Le système d'accord en fréquence doit permettre de déformer la cavité de ± 1 mm sur chaque face, soit une amplitude maximale de ± 2 mm. Afin de pouvoir balayer toute la gamme, le système peut fonctionner en traction et en compression.

La géométrie du mécanisme a été ajustée pour minimiser, d'une part, la rotation des excentriques (le débattement angulaire maximum admissible compte tenu de l'encombrement est de 13°), et d'autre part les contraintes dans le bras. Ceci revient à maximiser la rigidité du système tout en optimisant la forme du bras qui matérialise l'articulation du mécanisme. Plusieurs géométries ont été étudiées [2] ; le bras choisi est représenté sur la Figure 37. Les caractéristiques du système sont présentées dans le Tableau 12.

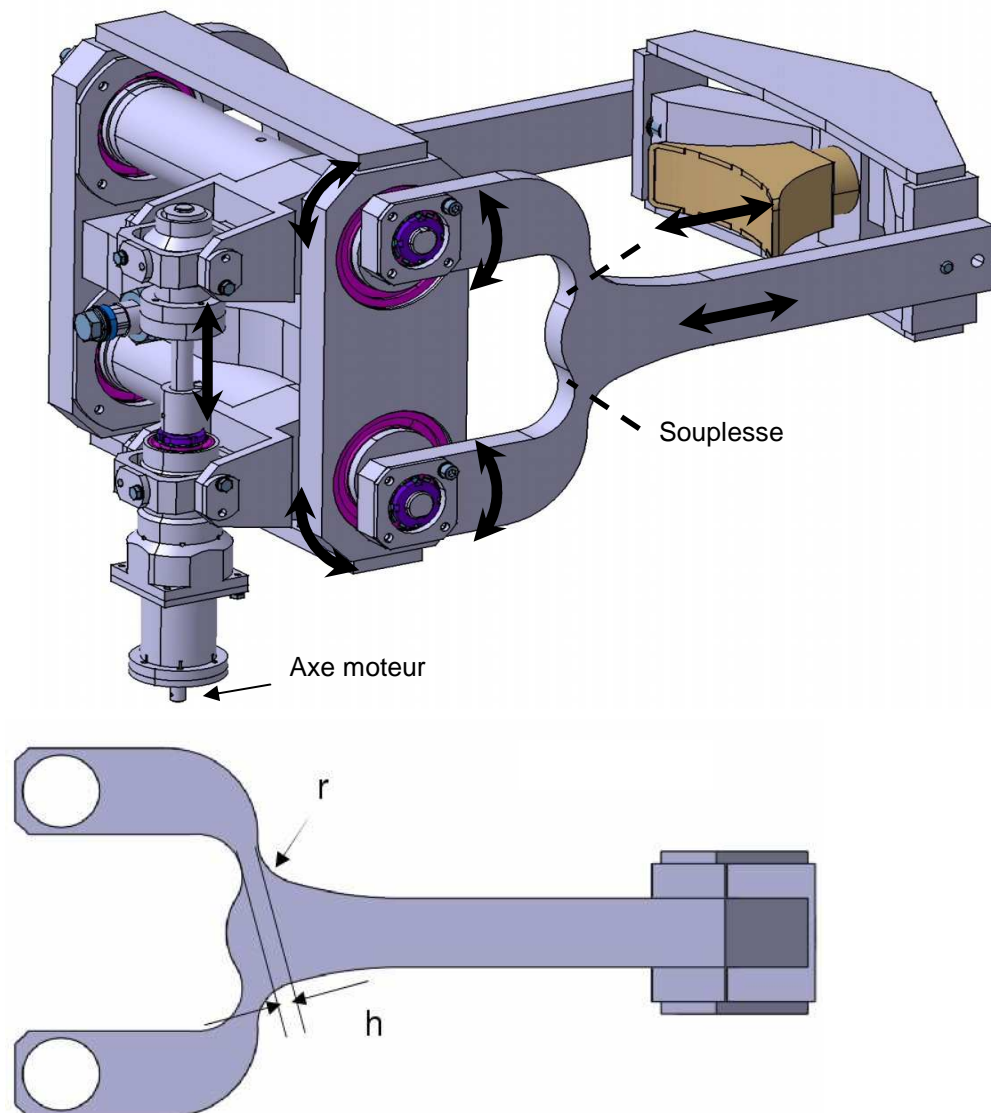


Figure 37 – Profil du bras.

	Contrainte Von Mises [MPa]	Débattement angulaire [deg]	Couple [N.m]
Compression, 1 mm	256	12,75	95,3
Traction, 1 mm	205	12,75	-100,6

Tableau 12 – Caractéristiques mécaniques du bras du système d'accord

Tel que conçu, le système peut fonctionner aussi bien avec le moteur à l'intérieur du cryomodule (moteur sous vide) qu'à l'extérieur, comme présenté sur les schémas de ce rapport. Dans ce cas, un passage tournant étanche au vide standard, compatible avec les efforts transmis par l'axe (effort de 1,5 kg pour 2 kg admissibles), est utilisé. La rupture de conduction est assurée par des soufflets en acier inoxydable qui assurent en même temps la flexibilité nécessaire du fait de la course du système d'accord (35 mm)(voir Figure 38).

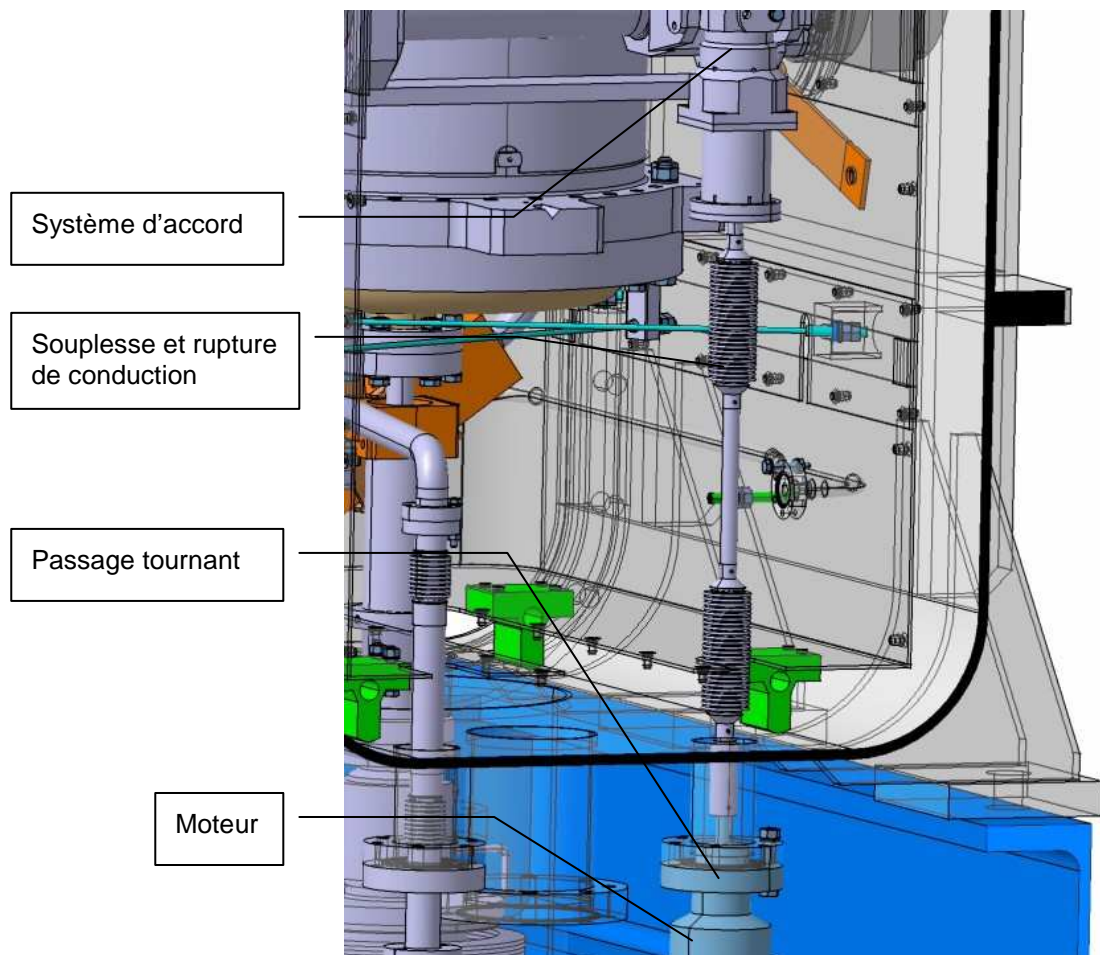


Figure 38 – Transmission moteur (cas où le moteur est hors du cryomodule).



18 Blindage magnétique

La fréquence de résonance relativement basse de la cavité permet de limiter les effets du champ magnétique piégé au cours du refroidissement sur la résistance de surface. A 80 MHz, la sensibilité de la résistance de surface au champ magnétique piégé est de $0,2 \text{ n}\Omega/\text{mG}$ [3]⁶. Ceci implique que, du seul fait du champ magnétique terrestre (à Paris, 470 mG avec une inclinaison de 64°), la résistance résiduelle en l'absence de tout blindage est de $97 \text{ n}\Omega$ (Tableau 13).

Champ magnétique (mG)	R_s (n Ω)	Q_0	Pertes @ 6,5MV/m (W)
0,0	3,2	$6,9 \cdot 10^9$	0,56
3,0	3,8	$5,8 \cdot 10^9$	0,67
10,0	5,2	$4,2 \cdot 10^9$	0,91
34,0	10,0	$2,2 \cdot 10^9$	1,75
470,0	97,2	$2,3 \cdot 10^8$	17,0

Tableau 13 – Pertes en fonction du champ magnétique résiduel.

Un blindage magnétique est donc nécessaire. Pour ce faire, un cylindre de Cryoperm (alliage magnétique de haute perméabilité aux températures cryogéniques, soit $\mu = 12\,000$) est enroulé autour de l'enceinte hélium. Les effets d'un blindage magnétique cylindrique dépendent du matériau utilisé, des dimensions du blindage, et de la position du champ par rapport à l'axe principal de ce cylindre [4]. En utilisant ces données, il est possible de déterminer l'épaisseur du blindage nécessaire (Tableau 14).

Epaisseur du blindage (mm)	0,1	0,5	1	2	5	10
Champ horizontal résiduel (mG)	72	17	8,5	4	1,7	0,9
Champ vertical résiduel (mG)	147	34	17	9	3,5	1,8
Champ total résiduel (mG)	164	38	19	10	4	2
R_s induite (nW)	36	11	7	5	4	3,6
Pertes @ 6,5 MV/m (W)	6,3	1,9	1,2	0,9	0,7	0,6
Q_0	$6,1 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^9$	$6,1 \cdot 10^9$

Tableau 14 – Effets du blindage magnétique.

Un blindage d'épaisseur 1 à 2 mm est un compromis raisonnable compte tenu des contraintes de faisabilité (encombrement, mise en forme et disponibilité du matériau) et des performances recherchées.

Le blindage se présente sous la forme de deux demi-cylindres qui viennent s'assembler autour de l'enceinte hélium (Figure 39). Du fait des objets qui le traversent (fixation des tirants, applicateurs du système d'accord en fréquence, etc.), il est percé d'ouvertures plus ou moins grandes qu'il conviendra de venir combler au mieux avec des raccords de petites dimensions. Toutes ces ouvertures constituent des faiblesses de blindage qui engendreront nécessairement un piégeage de flux supplémentaire. Le blindage se poursuit sur toute la hauteur de l'enceinte hélium, au-delà même de la

⁶ Cette valeur est plutôt conservatrice dans la mesure où elle considère des valeurs de RRR de 80. Elle est néanmoins utilisée en l'état afin de conserver une marge de sécurité.

partie haute de la cavité, afin d'améliorer le facteur d'écrantage (qui augmente avec le rapport longueur sur diamètre d'un blindage cylindrique).

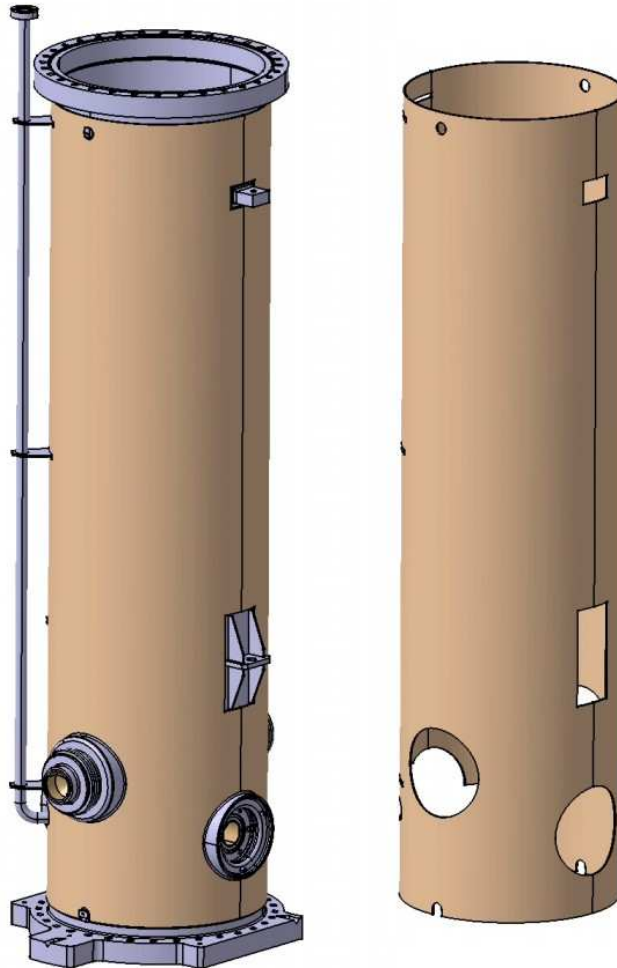


Figure 39 – Blindage magnétique.

A gauche : blindage magnétique en place sur l'enceinte hélium. A droite : blindage magnétique seul.

19 Instrumentation

Un bilan de l'instrumentation générale nécessaire pour ce cryomodule a été fait. Les piquages nécessaires ont été pris en compte. En revanche, les interfaces seront à finaliser en fonction des différents modèles finalement retenus, de même que, par exemple, les supports de fixation dans le cas des sondes de température.

Il est prévu plus d'instrumentation pour le cryomodule tête de série, ce qui permettrait d'obtenir des données complémentaires utiles (par exemple en termes de températures) et de définir plus finement l'instrumentation strictement nécessaire.



19.1 Cryogénie

Il faut prévoir une sonde de niveau pour l'asservissement du système cryogénique. Il est préconisé de dupliquer cette sonde à titre de précaution. Elle sera positionnée dans la cheminée des sécurités.

Il est prévu d'insérer les mesures de pression d'hélium liquide par le même piquage : une mesure classique (capteur Cerabar) et une mesure rapide de sécurité.

Cette même cheminée des sécurités est utilisée pour les soupapes de sécurité cryogéniques. Il est préconisé d'utiliser une soupape avec récupération d'hélium tarée à 1,5 bar environ plus une de sécurité ultime à 1,75 bar, sans récupération.

L'instrumentation cryogénique comprend également les sondes de température. Celles-ci sont a priori de deux modèles : des PT100 pour les mesures au dessus de 50 K et des Cernox pour les mesures à 4 K. L'implantation prévue est la suivante :

- 1 PT100 sur entrée écran,
- 1 PT100 sur sortie écran,
- 1 PT100 pour placement libre sur écran (à définir),
- 1 Cernox au point bas du thermosiphon,
- 1 Cernox à la sortie de l'hélium gaz,
- 1 Cernox au niveau maximum admissible de liquide dans l'enceinte hélium,
- 1 Cernox au niveau minimum admissible de liquide dans l'enceinte hélium,
- 2 Cernox sur le coupleur de puissance entre le 65 K et le fond de la cavité,
- 1 Cernox sur le fond de la cavité,
- 1 Cernox sur le système d'accord,
- 1 Cernox sur le moteur si celui-ci est dans le cryomodule.

Par ailleurs, les connexions pour trois autres jauges de température sont prévues. Ceci implique donc le montage de 5 prises Jaeger à 12 broches sur la bride CF supérieure.

Enfin, une chaufferette pour la remise à température ambiante du cryomodule est fixée en base de l'enceinte hélium. Les deux câbles nécessaires sont connectés sur la même bride que l'alimentation du moteur (voir 19.3).

19.2 Vide

Des brides CF16 et CF40 sont prévues en bas du cryomodule pour monter des jauges à vide classiques Pirani et Penning, aussi bien sur le vide cavité que sur le vide d'isolation. Les références exactes de ces jauges seront choisies ultérieurement par le groupe vide de l'accélérateur.

19.3 Autres

Dans le cas où le moteur est monté dans le cryomodule, les câbles d'alimentation sont connectés sur une prise Jaeger montée sur une bride en haut du cryomodule.

Le câble N de l'antenne de mesure RF vient se raccorder sur ce même piquage.

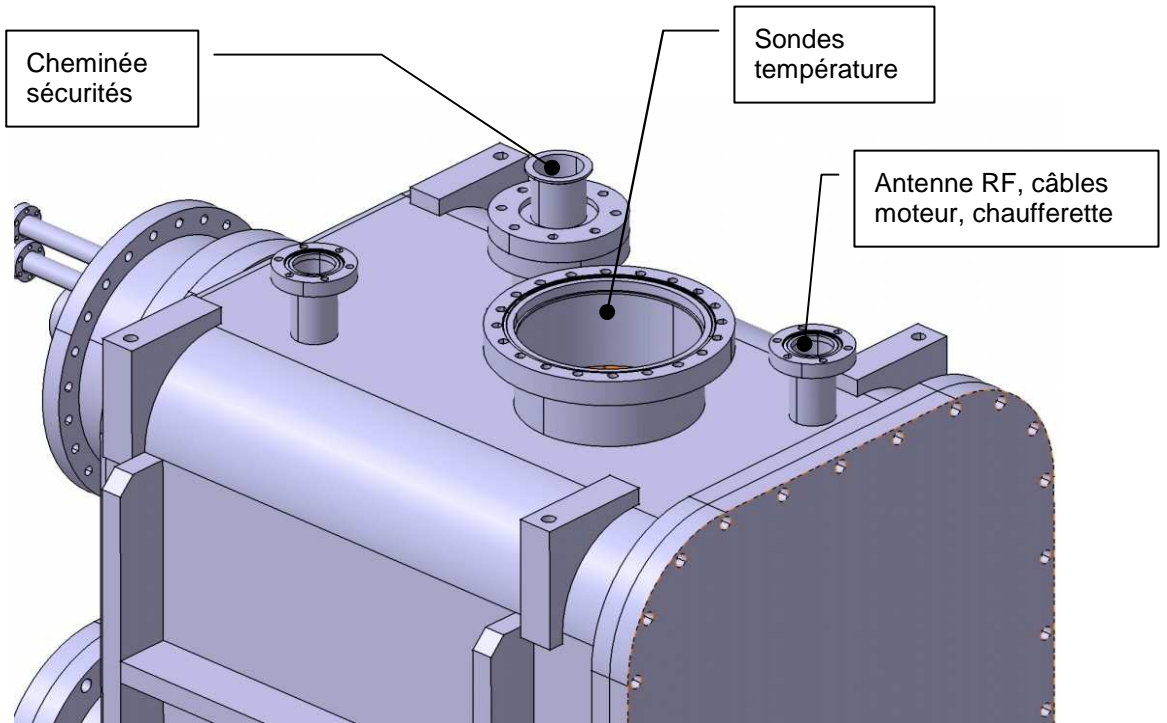
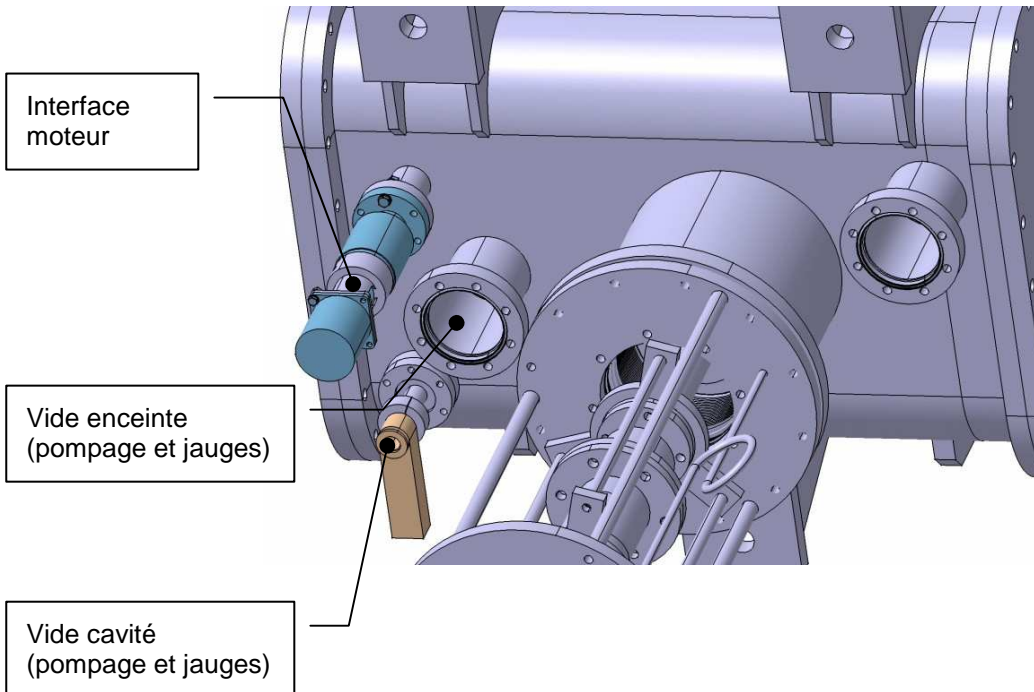


Figure 40 – Raccordements de l'instrumentation du cryomodule.





20 Interfaces

La conception du cryomodule implique de prendre en compte les interfaces avec les équipements et dispositifs reliés, conçus dans d'autres services et instituts.

L'interface cryogénique a été décrite précédemment (voir 16.1).

Le coupleur de puissance a été développé au LPSC Grenoble. L'interface avec le cryomodule consiste en une grande bride basse et une petite bride haute. Le choix de ces brides et du type de joint est revenu au LPSC. Les positions relatives de ces brides ont été fixées de manière à ce que l'enfoncement de l'antenne du coupleur soit adéquate (voir 3.11, 1^{ère} partie). La solution au problème de l'effet de fond lié à la mise sous vide de l'enceinte hélium a été étudiée par le LPSC ; elle doit prendre en compte une compensation sans déplacement résiduel afin qu'aucun effort ne soit subi ni par le coupleur, ni par la cavité, lors des remises à la pression atmosphérique, en particulier du cryomodule seul (la cavité restant sous vide). Les interfaces de thermalisation cryogéniques à 4 et 65 K ont été définies par le SACM.

Le support du cryomodule a été conçu par GANIL. Sa compatibilité avec le cryomodule a été vérifiée, aussi bien sur le plan des encombrements, des fixations, que de la position résultante de l'axe faisceau.

La dernière interface concerne la connexion des tubes faisceau. L'intégration des lignes est de la responsabilité de GANIL. L'interfaçage a consisté principalement à optimiser l'encombrement, à déterminer le type de vanne le plus adapté et à choisir la position du soufflet sur la ligne. Il a été décidé que le soufflet ne serait pas monté sur le cryomodule.

21 Assemblage du cryomodule

L'assemblage du cryomodule commencera après le test de la cavité en cryostat vertical. La cavité aura été fabriquée et testée avec son enceinte hélium soudée. Entre ce test et l'assemblage du cryomodule, la cavité ne devra subir qu'un rinçage haute pression, et on limitera autant que faire se peut toute nouvelle attaque chimique qui remettrait la surface à nu.

Avant toute rédaction des spécifications sur la procédure d'assemblage, voici présentées les deux phases principales.

1. Une première phase de préparation et d'assemblage dans la salle blanche. A la fin de cette phase la cavité sera placée dans son enceinte à vide à l'aide d'un outillage de fixation provisoire, avec le coupleur de puissance, le pick-up de mesure RF, les soufflets de transition 4 K – 300 K, les deux vannes faisceau, le tube de pompage du vide cavité avec les deux jauges à vide et la vanne de fermeture.

Le vide cavité sera testé en salle blanche, et il sera préférable de garder ce volume sous vide jusqu'à la mise en œuvre sur l'anneau.

2. Une deuxième phase d'assemblage en atelier ne nécessitant aucune ouverture du vide cavité. Les interventions seront alors effectuées par les grandes trappes d'accès.

L'ensemble sorti de salle blanche, les tirants de suspension de la cavité seront installés, ainsi que l'écran magnétique, la super-isolation de la cavité, le système d'accord, l'écran cuivre avec sa propre super-isolation, le circuit cryogénique et toutes les tresses de thermalisation. Les sondes de température, les chaufferettes, le câble du pick-up seront placés avant la dernière opération d'alignement et de report d'axe de la cavité.

Une fois le test de fuite effectué sur le circuit d'hélium, l'écran cuivre et l'enceinte à vide pourront être fermés, et le vide d'isolation pompé et testé.
Le cryomodule est alors prêt pour les tests définitifs avec puissance RF.

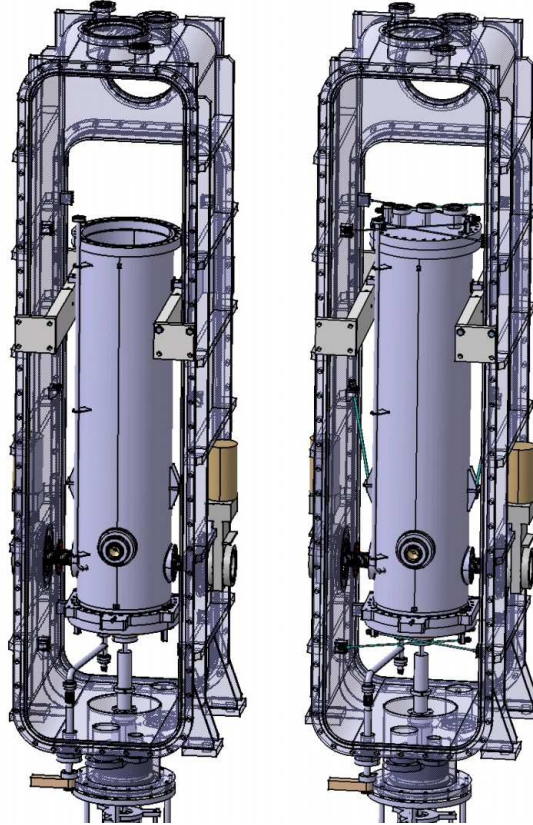
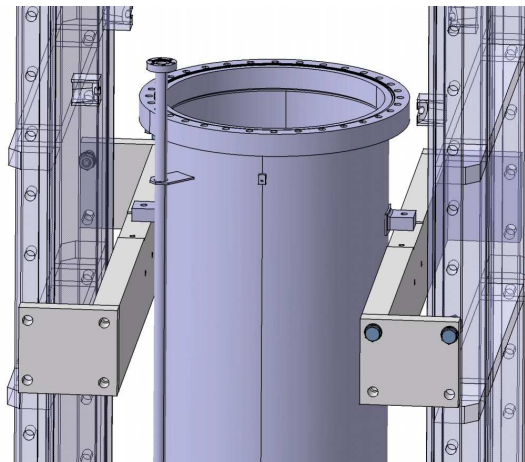


Figure 41 – Assemblage des tirants sur le cryomodule.

Ci-dessus : avant et après montage, outillage en place. Ci-dessous : détail de l'outillage de support.





Références

- [1] Y. Gomez & al., "Argumentaire pour choix de solutions technologiques", *note interne LPSC, LPSC/SERM/SPI/DA/04-02*, 2004.
- [2] F. Nunio, "Dimensionnement mécanique de l'ensemble cryomodule QWR SPIRAL 2", *note de calcul interne CEA, DAPNIA/SIS/10/05/FN*, 2005.
- [3] C. Vallet, "Etude de la dissipation dans les supraconducteurs en régime haute fréquence", *thèse de l'Université Claude Bernard (Lyon 1)*, 1994.
- [4] M. Boloré & al., "Magnetic shielding of the TESLA TTF superconducting cavity", *TESLA report n° 1994-23*.

||
ced
||



Conclusion

Dans le cadre de l'avant-projet détaillé (APD), et en une période de deux ans (2003-2004), une cavité de type quart d'onde a été développée au SACM. Un prototype représentatif a été réalisé et testé, permettant un retour sur expérience important dans l'optique d'une série. Les performances atteintes par cette cavité sont pleinement satisfaisantes dans la mesure où elles satisfont largement le cahier des charges initial.

Dans le même temps, un schéma détaillé de cryomodule complet, prenant en compte les problèmes normalement associés à ce type d'objets (cryogénie, alignement, assemblage et propreté, coûts...) a été réalisé, ouvrant la voie à la réalisation d'une tête de série comprenant la première cavité réelle dans un cryomodule complet.

La réalisation de cette tête de série permettrait d'obtenir des informations cruciales : influence de la pollution sur les performances de la cavité, contrôle des vibrations, optimisation de la procédure de montage, etc. Elle est indispensable pour réaliser dans un délai raisonnable la série de 12 cryomodules équipés, nécessaire au démarrage de l'accélérateur du projet SPIRAL 2, avec toutes les garanties de fiabilité requises.

||
ced
||



Annexe 1

Participants à l'activité « Cryomodule A » de l'APD SPIRAL 2

CEA/DSM/DAPNIA/SACM

Stéphane Chel, *responsable d'activité*

Alain Aspart

Pierre-Emmanuel Bernaudin

Pierre Bosland

Jean-Pierre Charrier

Bernard Coadou

Jean-François Denis

Guillaume Devanz

Yves Gasser

Michel Luong

Frédéric Michel

Jean-Pierre Poupeau

Dominique Roudier

CEA/DSM/DAPNIA/SIS

Jean-Marc Baze

Pascal Contrepois

Pierre de Girolamo

Patrick Graffin

Philippe Hardy

François Nunio

Gildas Thomas



Annexe 2

Liste des publications

P.-E. Bernaudin & al., "Design of the Low-beta, Quarter-wave Resonator and its Cryomodule for the SPIRAL 2 Project", *Proceedings of the ES. PAC-04, Lucerne*,
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e04/PAPERS/TUPLT054.PDF>

G. Devanz & al., "Quarter-wave Cavities for the SPIRAL 2 Project", *Proceedings of the SRF-03 conference, Lübeck*.

S. Chel & al., "Low-Beta SC Quarter-Wave Resonator and Cryomodule for SPIRAL 2", *à paraître dans le cadre de la PAC 2005, Knoxville*.