

PRINCIPE DU SYSTEME D'ACCORD DES CAVITES SOLEIL

P. Bosland, M. Juillard, M. Maurier, A. Mosnier*, G. Perilhous**

DAPNIA, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

* Projet SOLEIL, DRIF CNRS, 91198 Gif-sur-Yvette

** Laboratoire LURE, Centre Universitaire Paris Sud, 91898 ORSAY

Résumé

Le principe du système d'accord à froid (SAF) des cavités SOLEIL a été choisi pour obtenir la résolution en fréquence avec la plage de réglage nécessaire. De part sa conception, ce système devrait permettre d'obtenir la rigidité visée sans nécessiter un surdimensionnement des pièces mécaniques.

Les étapes de la préparation des cavités, de leur fabrication jusqu'à leur installation dans le cryostat et leur refroidissement, sont présentées avec leur influence sur la fréquence. La fréquence de réglage à chaud avant toute opération sur la cavité brute a été déterminée.

PRINCIPE DU SYSTEME D'ACCORD DES CAVITES SOLEIL

1) LES CRITERES: RESOLUTION, PLAGES DE REGLAGE, ET RIGIDITE

Le rôle du système d'accord à froid (SAF) est d'ajuster la fréquence des cavités avec une précision de l'ordre de $1/20^{\text{ème}}$ de la largeur du pic de résonance. La fréquence étant de $F_0=352.2$ MHz, le facteur de qualité Q en charge étant de $2.2 \cdot 10^5$, la largeur du pic à mi hauteur FWHM sera d'environ 1.6 KHz. La résolution en fréquence du système doit donc être meilleure que 80 Hz. La sensibilité à la déformation des cavités SOLEIL étant de 187 kHz/mm, il en résulte donc:

Résolution mécanique minimale: $\Delta L=0.43 \mu\text{m}$

Résolution en fréquence minimale: $\Delta F=80$ Hz

Le SAF fonctionne alors que la cavité est à 4.2 K. Il doit compenser les écarts en fréquence générés par l'imprécision de l'accord préalable à chaud (entre 10 et 20 KHz) qui peuvent être eux-mêmes amplifiés par les différents rétreins thermiques des éléments.

Le SAF doit aussi être actif pendant que les cavités fonctionnent à 4.2 K afin de corriger en permanence la variation de fréquence due aux variations de courant (beam loading): pendant l'injection du faisceau qui dure 1 à 2 mn, et pendant chaque run de 10 à 20 heures où l'intensité diminue régulièrement. L'amplitude de cette variation est d'environ 4.3 kHz soit $\Delta L=23 \mu\text{m}$.

La fréquence de résonance est ajustée en modifiant la longueur de la cavité. Un système mécanique, prenant appui sur la partie rigide de l'enceinte hélium considérée comme référence mécanique, agira sur l'autre extrémité de la cavité pour l'allonger. L'effort mécanique, toujours en traction de la cavité, sera transmis à la bride de la cavité par un système de double levier. La déformation est générée par un moteur pas à pas, associé à un réducteur. Le couplage entre le double levier et le réducteur s'effectue par l'intermédiaire d'un système vis écrou.

Un élément de souplesse sera placé sur l'enceinte hélium pour permettre le mouvement.

Il serait prudent de ne pas dépasser la limite élastique du cuivre au cours des déformations qui seront imposées aux cavités. Pour cela il sera préférable de rester dans la limite ± 1.2 mm par rapport à la position neutre de la cavité. L'effet de fond sur la bride extérieure exercera une force d'environ 12 kN. La force totale que verra le SAF s'annulera donc lorsque la cavité sera comprimée de **-0.7 mm**. Il y a alors un risque de "flottement" du SAF qu'il serait préférable d'éviter. La plage de réglage du SAF se réduit donc à -0.7 mm (compression) et + 1.2 mm (traction) par rapport à l'état non contraint de la cavité.

Plage de réglage mécanique : $\Delta l=1.9$ mm.

Plage de réglage en fréquence: $\Delta F=350$ kHz

Toutefois l'expérience du CERN sur les cavités LEP nous montre qu'il est possible si cela s'avérait nécessaire de déformer plastiquement le cuivre, dans une certaine mesure, sans décoller la couche de niobium et détruire la cavité.

La rigidité mécanique du SAF est un facteur déterminant pour obtenir une bonne stabilité du champ accélérateur dans la cavité. Elle doit être suffisante pour éviter tout couplage entre le système de régulation HF et les déformations des cavités dues aux forces de pression électrostatique (qui varient avec E_{acc}^2). La rigidité visée pour l'ensemble enceinte He+SAF est de:

Rigidité visée: 200 kN/mm

Pour cette valeur de rigidité et à un champ de 5 MV/m, la variation de fréquence due aux forces de pression électrostatique est de $\Delta F = 40$ Hz, dont 10 Hz sont dus à la souplesse du SAF.

La régulation de la fréquence de résonance (de la longueur) se fait à partir de la mesure du déphasage entre la fréquence de la cavité et celle d'un oscillateur de référence. Tout déphasage entre ces deux signaux se traduit par une variation de longueur en temps réel.

2) CHOIX DU SYSTEME ENTIEREMENT SOUS VIDE

Les trois principales options pour la conception des SAF sont les suivantes :

1. le système électromécanique est entièrement situé à l'extérieur du cryostat
2. le système est entièrement à l'intérieur du cryostat
3. certaines parties sont à l'intérieur, et d'autres à l'extérieur

L'option 1 présente l'avantage de l'accessibilité qui rend la maintenance plus légère. Elle implique cependant deux principaux développements.

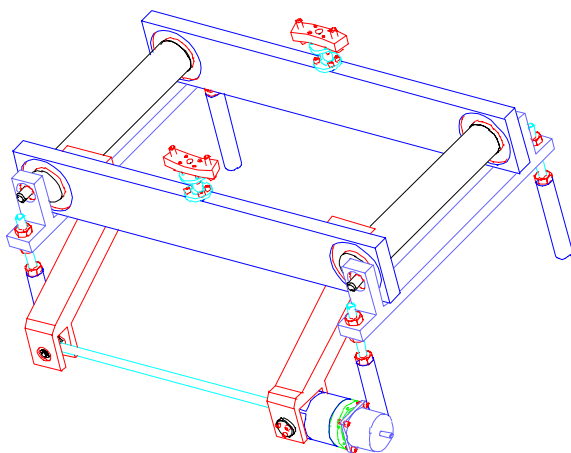
Le premier est lié aux rétreints thermiques différentiels. Le système mécanique étant situé à l'extérieur du cryostat, il prend appui sur l'enceinte à vide de ce cryostat dont la température reste à environ 300 K, alors que celle des cavités varie entre 300 et 4.2 K. Il faut donc imaginer un système débrayable qui n'agit que lorsque la cavité a atteint sa dimension minimale après refroidissement, et qui laisse la cavité libre dans son expansion lors de la remontée en température (qui peut être accidentelle). Contraindre la cavité pendant les montées et descentes en température pourrait générer des déformations plastiques de la cavité dangereuses pour son fonctionnement. Par ailleurs le système de débrayage ne doit pas nuire à la résolution du déplacement mécanique requis.

Le deuxième développement concerne le système de fixation des brides centrales des cavités sur le cryostat. L'effort généré par le SAF sur l'enceinte à vide du cryostat est transmis aux cavités par ces fixations. Il est de l'ordre de 30 kN au maximum. La rigidité de ces fixations doit donc être très grande pour éviter de coupler les systèmes d'accord des deux cavités via les parois du cryostat. De plus elles doivent comporter des ruptures thermiques pour limiter la consommation de hélium.

L'option 2, que nous avons choisie pour SOLEIL, est celle qui a été développée au SEA pour les cavités de MACSE et de TTF. Tout le système mécanique et le moteur fonctionnent sous vide dans le cryostat, et sont refroidis à 4.2 K. Cela nécessite donc une préparation particulière et un traitement de surface des pièces subissant un frottement (revêtements durcissant TiN, ou

à faible coefficient de frottement WS_2 ou MoS_2). Dans le cas de TTF le moteur qui fonctionne sous vide est refroidi par une tresse en cuivre reliée à l'enceinte He. Le problème des rétreints thermiques différentiels est minimisé puisque la référence mécanique servant d'appui au SA (l'enceinte hélium pour SOLEIL) est thermalisée avec la cavité.

L'option 3 peut être considérée comme une alternative à l'option 2 au cas où se poseraient des problèmes de fonctionnement du moteur sous vide: la seule différence est que le moteur est à l'extérieur du cryostat. Il est ainsi positionné loin de la cavité et peut donc posséder des parties magnétiques. Il ne nécessite plus de refroidissement particulier, et est très facilement accessible. Il sera alors nécessaire d'intercaler entre le moteur et le réducteur un arbre à double cardan qui permet d'accommoder les rétreins thermiques de la cavité, et déplacement de l'axe du réducteur qui ont lieu pendant le fonctionnement du SAF. Un passage tournant assurera l'étanchéité au vide du mouvement de rotation.



Vue en perspective du SAF

Le dimensionnement des pièces n'a pas encore été calculé pour obtenir la rigidité visée de 200 kN/mm.

3) PRINCIPE MECANIQUE DU SYSTEME

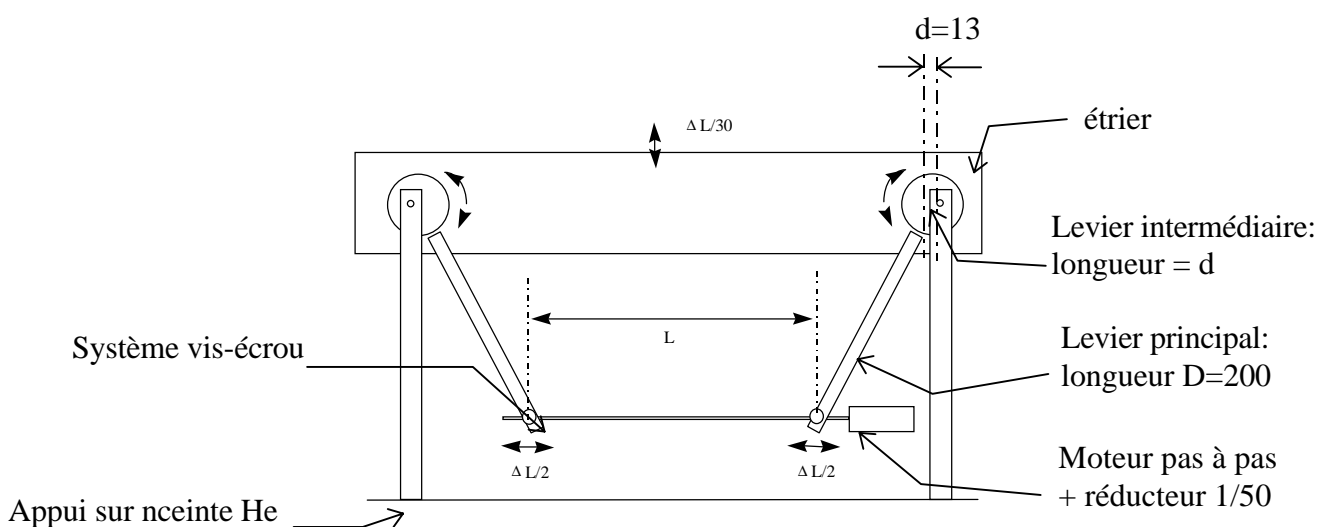


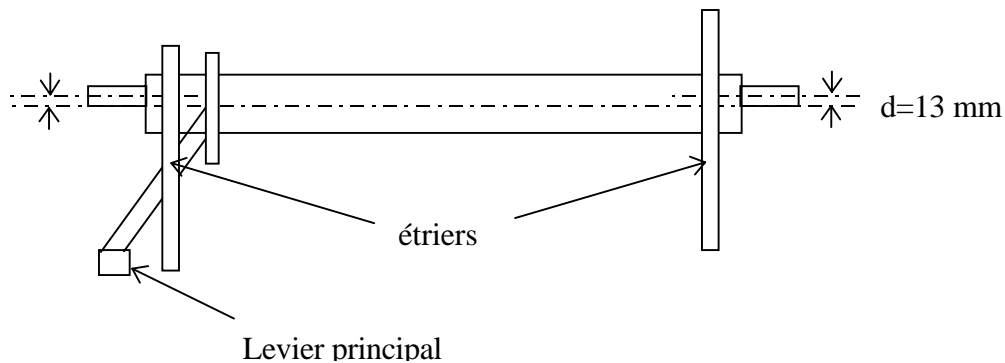
Schéma de principe du système d'accord

3.1) l'étrier

L'étrier est composé de deux barres parallèles prenant appui sous la bride $\Phi 260$ de la cavité. Elles transmettront intégralement l'effort exercé (30 kN maximum) par la cavité. Cet effort sera parallèle à la plus grande largeur, dans le sens de la plus grande rigidité. Elles prendront appui à leurs extrémités sur des tubes (leviers intermédiaires) par des roulements à billes. Ces roulements auront été préalablement dégraissés pour fonctionner sous vide et à $T=4.2$ K. La faible amplitude des mouvements n'est pas rédhibitoire à ce traitement.

3.2) leviers intermédiaires

Ils sont constitués par un tube tournant autour de deux axes, l'un centré l'autre décalé d'une distance $d=13$ mm.



Le mouvement de rotation est donné au tube par le levier principal. L'effort est transmis à l'étrier le plus loin de l'attache du levier principal par la torsion du tube. Ce dernier étant très rigide en torsion, la rigidité du système sera conservée avec un tube d'épaisseur raisonnable.

3.3) levier principal

La longueur efficace de ce levier qui est déporté pour éviter le tube faisceau $\Phi 260$ de la cavité est $D = 200$ mm. La démultiplication totale du système est donnée par le rapport $2 \cdot D/d=30$ (il y a 2 bras de leviers principaux)

3.4) système vis-écrou

C'est un des éléments sensibles du SAF. Son bon fonctionnement est conditionné par la qualité de l'usinage des autres pièces qui doit faire coïncider les 2 axes par lesquels passe la vis à l'extrémité des 2 leviers principaux.

La correction permanente de la variation en fréquence due au beam loading (4.3 kHz) est faite par une rotation de 0.46 tour de la vis (un angle de 166 deg), pour une démultiplication de 1/30 du bras de levier et un pas de vis de 1.5 mm. On peut donc craindre une usure provoquée par les frictions répétées sur les mêmes zones. Un traitement de surface sera effectué pour limiter l'usure (revêtements durcissant TiN sur la noix). Une solution alternative pourrait être le système à rouleaux TRANSROLL de SKF dans lequel il n'y a pas de frottement mais un roulement qui pourrait diminuer l'usure. Une caractéristique de ce système est sa réversibilité: un couple moteur sera nécessaire pour maintenir le système immobile.

3.5) fins de courses

Les fins de course seront des butées mécaniques identiques à celles mise en place sur le SAF de TTF.

3.5) moteur + réducteur

Le choix du moteur pas à pas n'est pas encore fait, mais il peut être du même type que celui utilisé sur TTF qui fonctionne dans les mêmes conditions et génère des efforts similaires. Les roulements ainsi que les arbres seront dégraissés et leur surface recevront un dépôt "lubrifiant" pour limiter l'usure. Les couples en fonctionnement sont très largement supérieurs à ce qui est nécessaire. Il sera donc possible de limiter la puissance d'alimentation afin de réduire le couple qui serait généré si le système vis-écrou arrivait sur la butée mécanique de fin de course.

Le réducteur est le modèle HFUC 2A-GR, n° 17 ou 20, de HARMONIQUE DRIVE, avec rapport de réduction 1/50. Les couples nominaux de fonctionnement sont très largement supérieurs à ceux nécessaires (respectivement 13 et 25 Nm), et les couples de pic instantanés admissibles sont respectivement de 70 et 98 Nm. Des réducteurs du même type fonctionnent sur les SAF de MACSE et TTF, dans des conditions similaires dans le cas de TTF: sous vide et à T=4.2 K. Ces conditions de fonctionnement impliquent, comme pour le moteur, un traitement adapté des pièces en frottement: dégraissage, et traitement de surface par dépôt (revêtements durcissant TiN, ou à faible coefficient de frottement WS₂ ou MoS₂).

3.6) Forces, couples, et résolution théoriques:

Pour un pas de vis de 1.5 mm, un bras de levier de 1/30, un réducteur 1/50, et un moteur pas à pas (400 demi pas par tour):

- force maximale générée par la cavité: 30 kN
- force maximale sur le système vis-écrou: 1 kN
- couple sur le système vis-écrou: 0.239 Nm
- rendement du système vis-écrou: ≈ 0.8
- couple d'entrée du réducteur: $4.77 \cdot 10^{-3}$ Nm
- couple de maintien "standard" d'un moteur pas à pas: 1 Nm
- couple max en butée, en sortie de réducteur: 50 Nm
- résolution mécanique: 15.7 nm

Remarque:

La résolution mécanique du système (15.7 nm) est 30 fois meilleure que nécessaire (470 nm). Cela n'est qu'une conséquence de la limitation des efforts sur les pièces en frottement qui nécessite une grande démultiplication, qui elle-même conduit à une très grande résolution mécanique théorique.

3.7) Appuis sur l'enceinte hélium

Le SAF prend appuis sur le tube de plus grand diamètre de l'enceinte hélium en quatre points. Le design des pièces de liaison n'est pas encore établi. La structure de ces pièces est très importante pour conserver la rigidité du système.

4) LES ETAPES DE LA FABRICATION DES CAVITES, LEUR INSTALLATION DANS LE CRYOSTAT ET L'ACCORD EN FREQUENCE

Nous présentons ci dessous les étapes principales de la préparation des cavités qui peuvent avoir une influence sur leur géométrie, et dont il faudra tenir compte pour le réglage du SAF. Il est primordial d'estimer au mieux les variations de fréquence induites à chaque étape, et les incertitudes afin d'effectuer un accord initial des cavités brutes de fabrication, à température ambiante, suffisamment précis pour que la fréquence finale, à 4.5 K, soit comprise dans la plage de réglage offerte par le SAF.

Pour la suite nous définirons:

F0: la fréquence visée du centre de la plage de réglage à 4.2 K: $F0=352.2$ MHz

F1: la fréquence à 300 K de la cavité Nb/Cu installée dans le cryostat

F2: la fréquence des cavités brutes de fabrication à 300 K

Les différents effets sur la fréquence sont les suivants:

- la chimie du cuivre: -0.92 kHz/ μ m
- pompage de l'air (variation de ϵ): +104 kHz
- pression de l'hélium à 1.2 bars (4.5 K), cavité bridée: -5.5 kHz
- rétreint thermique du cuivre: +1160 kHz
- déformation de la cavité: +186 kHz/mm

1) La cavité en cuivre

Les tolérances sur les dimensions de la cavité en cuivre lors de sa fabrication conduisent à une incertitude sur la fréquence de \pm **100 kHz**.

2) Accord de la cavité à chaud

La cavité brute de fabrication est accordée à la fréquence

$$F2 \pm 20 \text{ kHz}$$

3) Chimie de la surface interne (SUBU)

En traitant la surface interne de la cavité pour la préparer au dépôt, on enlève une épaisseur d'environ 40 μ m. Les calculs montrent une diminution de la fréquence après chimie de:

$$\Delta F(\text{chimie}) = -37 \text{ kHz}$$

4) Rinçage et séchage sous vide

Les résidus de produits chimiques sont rincés à l'eau ultra pure, et les cavités sont ensuite séchées. Cette opération est réalisée en étuvant les cavités à 50 °C sous flux d'azote filtré à pression réduite (quelques millibars).

On peut craindre, qu'au cours des pompages que subiront les cavités, les contraintes résultant de la pression atmosphérique dépassent la limite élastique du cuivre dans certaines zones où elles se concentrent (région proche des iris de petits diamètre). Les calculs de déformations de la cavité par l'effet de fond montrent que si la cavité n'est pas maintenue la contrainte maximale s'élève à : $\sigma = 57$ MPa

La limite élastique du cuivre est de 60 MPa. Il faudra donc rigidifier la cavité pendant les différentes phases de pompage. La contrainte maximale pour des cavités rigidifiées est de : $\sigma=26.1 \text{ Mpa}$

5) Dépôt de la couche de niobium

L'épaisseur du dépôt est de l'ordre du micron. L'augmentation de la fréquence résultant est donc négligeable.

6) Installation dans le cryostat, et refroidissement :

Après acceptation, les enceintes hélium sont soudées sur les cavités, et le tout est installé dans le cryostat avec les systèmes d'accord. Ces derniers sont alors réglés pour viser la fréquence de 352.2 MHz après refroidissement à 4.2 K. Ce réglage doit tenir compte de:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1) ϵ de l'air. Après pompage: | +104 kHz |
| 2) 1.2 bar d'hélium, cavité bridée: | -5.5 kHz |
| 3) refroidissement du cuivre: | +1160 kHz |
| 4) la différence de rétreint inox-cuivre 0.35 mm: | +60 kHz (=65-5 kHz souplesse SAF) |
| 5) effet de fond sur le système d'accord: | -11 kHz |
| 6) le centre de la plage de réglage (-0.7 à +1.2 mm) se situe à +0.25 mm (traction) par rapport au point de la cavité non contrainte, soit 0.1 mm de moins que l'élongation de 0.35 mm, ce qui correspond à: | -18.6 kHz |

La fréquence de réglage du SAF, cavité installée dans le cryostat avant refroidissement est donc:

$$F1=F0-1.289 \text{ MHz}$$

soit:

$$F1=350.91 \text{ MHz}$$

La fréquence F2 de réglage de la cavité brute ne diffère de F1 que par l'effet de la chimie du cuivre (-37 kHz), soit:

$$F2=350.95 \text{ MHz}$$

7) La fréquence d'accord à chaud avant la chimie sera:

$$\mathbf{F2 = 350.95 \text{ MHz}}$$

Si la fréquence des cavités avant la chimie du cuivre est comprise entre 350.85 et 351.05 MHz on accordera ces cavités après le dépôt, installées dans le cryostat, avec le système d'accord à froid. Si l'écart par rapport à F2 est supérieur à 0.1 MHz, on accordera les cavités avant la chimie du cuivre à la fréquence F2=350.95 MHz.