

UNIVERSITE PARIS XI – ORSAY
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire - Orsay

THÈSE

Présentée pour obtenir

Le grade de DOCTEUR EN PHYSIQUE
de l'Université de Paris XI Orsay

par

Hassen Jenhani

COUPLEURS DE PUISSANCE HF POUR CAVITÉS
SUPRACONDUCTRICES EN MODE PULSÉ

Soutenue le 30 octobre 2006 devant la commission d'examen :

G. WORMSER (Président)
T. GARVEY
A. GAMP (Rapporteur)
J.-M. DE CONTO (Rapporteur)
T. JUNQUERA

*À mes chers parents,
à ma chère femme,*

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon directeur de thèse, Terence Garvey, pour sa bienveillante assistance : sa sollicitude et ses conseils éclairés m'ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Pareillement, je remercie le chef du groupe Coupleurs, Alessandro Variola, pour son soutien et ses conseils ainsi que pour son suivi quotidien de l'évolution de mes travaux.

J'exprime aussi mes vifs remerciements à tout les membres du groupe Coupleurs, notamment Pierre Lepercq, Laurent Grandsire, Bruno Mercier, Maher Omeich, Sophie Cavalier et Serge Prat, pour leur soutien et l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à mon travail.

J'adresse aussi un remerciement particulier à Bernard Mouton pour ses multiples interventions aussi efficaces que rapides pour résoudre tous les problèmes informatiques ; à Gérard Bienvenue pour ces conseils sur l'interprétation de certains phénomènes observés ; à Olivier Dalifard pour ces conseils sur la programmation LabView ; aux secrétaires du SERA Marie-Claude Leproust puis Isabelle Sokolsky qui m'ont toujours proposé leur aide pour résoudre tous les problèmes administratifs ; ainsi que tout mes autres collègues au SERA qui m'ont offert, d'une façon ou d'une autre, un grand soutien pendant le déroulement de ma thèse.

Je ne manquerai pas de remercier aussi notre cher personnel administratif au LAL, notamment Brigitte Renard, Sylvie Prant, Valentine Marcuola et Angelina Bastos. Leur aide m'a été plus que nécessaire pour répondre aux lourdes formalités administratives. Un grand merci est aussi adressé à mon tuteur Vincent Lepeltier. Son soutien m'a toujours donné la motivation pour aller de l'avant dans mes recherches.

Ce travail est aussi le fruit d'une collaboration avec le laboratoire Allemand DEZY. Je tiens à remercier très fortement mes interlocuteurs dans ce laboratoire, notamment Denis Kostin, Wolf-Dietrich Moeller et Arn Brinkmann.

Je remercie également monsieur le président du jury Gui Wormser et messieurs les membres du jury, Jean-Marie De Conto, Alexander Gamp et Tomas Junquera, d'avoir accepté de m'accorder l'honneur de leur présence à cette soutenance.

Je remercie, enfin, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Chapitre I : Introduction et généralités	7
I- Rôle des collisionneurs dans la physique de particules	7
II- Besoin de collisionneurs électron-positron	8
III- Choix du concept linéaire pour les collisionneurs e- e+ et caractérisation de la technologie	9
III-1- Option pour un collisionneur e- e+ linéaire	9
III-2- Choix technologiques : technologie chaude / technologie supraconductrice	10
IV- Le projet XFEL	11
IV-1- Les motivations du projet XFEL	11
IV-2- Présentation de l'accélérateur XFEL	11
V- Les coupleurs de puissances HF pour cavités supraconductrices	13
V-1- La nécessité des coupleurs	13
V-2- Position des coupleurs dans les projets d'accélérateurs linéaires supraconducteurs	14
VI- Intérêt et organisation du travail de thèse	15
Chapitre II : Coupleur et cavité supraconducteurs	19
I- La supraconductivité	19
I-1- La théorie BCS	19
I-2- Principe de l'effet Meissner	20
I-3- La résistance de surface	21
II- Cavité accélératrice supraconductrice	22
II-1- Les paramètres caractéristiques d'une cavité accélératrice	23
II-2- La motivation pour la supraconductivité	25
II-3- Limites de la supraconductivité	27
III- Coupleur pour cavité supraconductrice	27
III-1- Le couplage de la puissance RF à la cavité et circuits équivalents	27
II-1-1- Le couplage sans source de puissance	28

III-1-2- Le couplage en présence d'une source de puissance et les circuits équivalents	29
III-2- Le rôle des coupleurs HF pour cavités supraconductrices	33
III-2-1- Le rôle électromagnétique	33
III-2-2- La barrière du vide	34
III-2-3- L'interface thermique	34
III-3- Les phénomènes physiques régis par une puissance HF importante dans le coupleur	35
Chapitre III : Le phénomène du multipactor	37
I- Les conditions d'établissement du multipactor et ces différents types	37
II- Les équations dynamiques de l'électron	39
III- Lois d'échelle relatives au multipactor dans une ligne coaxiale	41
IV- Le coefficient d'émission secondaire	42
IV-1- La courbe standard du coefficient d'émission secondaire	42
IV-2- Les facteurs influençant le coefficient d'émission secondaire	44
Chapitre IV : Coupleur de puissance HF TTF-III	47
I- Présentation du coupleur TTF-III	48
II- Les différentes parties du coupleur TTF-III	49
II-1- La partie froide	49
II-2- La partie chaude	51
II-3- La transition guide d'onde	51
III- Les choix technologiques et difficultés de réalisations	52
<i>Le choix de la géométrie du coupleur</i>	52
<i>Les choix relatifs aux fenêtres</i>	52
<i>Le choix des matériaux</i>	53
<i>Le couplage variable</i>	53
<i>La brasure et la soudure</i>	54
<i>Les diagnostics</i>	54
<i>La polarisation du conducteur interne</i>	54

Chapitre V : Le test et conditionnement HF des coupleurs

TTF-III	55
I- Le rôle du conditionnement HF	55
I-1- La nécessité du conditionnement HF	55
I-2- l'action du conditionnement HF sur le coupleur et nécessité de la réduction de la durée de cette procédure	56
I-3- La nécessité du nettoyage des coupleurs avant leur conditionnement	58
II- La procédure de conditionnement des coupleurs TTF-III et l'intérêt de son automatisation	58
II-1- La disposition des coupleurs pendant le conditionnement	59
II-2- L'intérêt du conditionnement en onde progressive et à température ambiante	60
II-3- Le principe de la procédure de conditionnement HF des coupleurs TTF-III	61
II-4- Les mesures de sécurité pendant le conditionnement	64
II-5- L'intérêt de l'automatisation du conditionnement	64
III- L'infrastructure et les moyens consacrés pour le conditionnement des coupleurs au LAL	65
III-1- Le banc de contrôle des coupleurs	65
III-2- L'infrastructure de nettoyage des coupleurs au LAL	66
III-3- La chaîne de puissance	68
III-3-1- Présentation de la chaîne de puissance	68
III-3-2- Principe de fonctionnement	69
III-4- Le réseau HF pour l'alimentation de coupleurs	70
IV- Les procédures de préparation des coupleurs TTF-III au conditionnement	71
IV-1- La procédure de nettoyage des coupleurs TTF-III au LAL	71
IV-2- Les tests de fuites	72
IV-3- Le pompage des coupleurs	73
IV-4- Le réglage des antennes	73
V- Le programme de pilotage automatique du conditionnement	74
V-1- Les critères vérifiés par le programme de pilotage du conditionnement	75
V-2- Description du programme et des ressources utilisées	75
V-2-1- Les ressources informatiques	75

V-2-2- Description du programme de pilotage du conditionnement	76
VI- La mise en œuvre du premier conditionnement automatisé au LAL	81
VI-1- L'adaptation de la chaîne de puissance à la procédure de conditionnement	81
VI-2- Le premier conditionnement automatisé	83
VI-2-1- La vérification du bon fonctionnement du programme	83
VI-2-2- Le déroulement d'un conditionnement automatisé d'une paire de coupleurs	84
Conclusion	87

Chapitre VI : La série des conditionnements des coupleurs TTF-III effectués sur le stand de test à température ambiante au LAL

I- Les conditionnements des coupleurs TTF-III	89
I-1- L'évolution typique d'un conditionnement d'une paire de coupleurs TTF-III	90
I-1-1- La première étape du conditionnement	90
I-1-2- Le conditionnement après la fin de sa première étape	93
I-2- La différence des temps de conditionnement	94
I-3- Le comportement de courant électroniques	95
II- L'étude de l'utilité de l'étuvage in-situ pour le conditionnement des coupleurs	98
II-1- L'adsorption et l'énergie de liaison	99
II-2- L'adsorption de l'eau et son influence sur le pompage	99
II-3- L'effet de l'étuvage in-situ	101
II-3-1- Expérience	101
II-3-2- Résultats et interprétations	103
II-3-3- Conclusion	106
III- L'effet du stockage sur la préservation du conditionnement	107
III-1- La procédure de stockage	107
III-2- Etude de l'influence de la procédure de stockage sur le conditionnement	108
IV- La validation des conditionnements effectués	112
Conclusion	114

Chapitre VII : Optimisation de la procédure de conditionnement des coupleurs	117
I- Changement des seuils du vide	117
I-1- Comparaison des installations du vide LAL/DESY	119
I-1-1- Caractérisation de l'installation actuelle du vide pour le conditionnement des coupleurs au LAL	119
I-1-2- Installation de pompage des coupleurs à DESY	124
I-2- L'influence du changement des paramètres du vide sur le temps de conditionnement	125
II- Diminution du temps du programme de conditionnement automatique	126
<i>Observations et interprétations</i>	129
III- L'influence de l'augmentation du taux de répétition sur le conditionnement des coupleurs	132
<i>Expérience et observations</i>	133
Conclusion	135

Chapitre VIII : Prototype de coupleurs et simulations du multipactor	137
I- Coupleurs Prototypes : coupleur TTF-V	137
I-1- Coupleurs pour machines supraconductrices développés au LAL	137
I-2- Le coupleur TTF-V	138
I-3- Test préliminaire en champ maximum pour TTF-V	139
I-3-1- Principe de l'expérience	139
I-3-2- Risques	139
I-3-3- Expérience et résultats	141
II- Les études du multipactor sur les coupleurs TTF-III et TTF-V	143
II-1- Moyens de calcul et modélisation	143
II-1-1- Logiciel utilisé : principe	143
II-1-2- Modélisation	146
II-2- Simulations et interprétations	149
II-2-1- La partie froide du coupleur TTF-III	149
II-2-2- Le coupleur TTF-V	154

III- L'effet de la polarisation sur le coupleur TTF-III	158
III-1- L'influence de l'application de la polarisation sur le multipactor dans le coupleur TTF-III	159
III-1-1- La perturbation du multipactor par polarisation	159
III-1-2- Les conséquences de l'application de la polarisation	160
III-1-3- Loi d'échelle	160
III-1-4- Risque encouru par le coupleur suite à sa polarisation	161
III-2- Essai expérimental	161
III-2-1- Le choix des tensions de polarisation	161
III-2-2- Le choix du régime de la RF	162
III-2-3- Expérience et observations	162
Conclusion	166
Conclusion générale et perspectives	167
Bibliographie	173
Acronymes et abréviations	179
Annexe 1	181
Annexe 2	183
Annexe 3	185
Annexe 4	187
Résumé	189
Abstract	191

Chapitre I

Introduction et généralités

Sommaire :

- I- Rôle des collisionneurs dans la physique de particules
 - II- Besoin de collisionneurs électron-positron
 - III- Choix du concept linéaire pour les collisionneurs $e^- e^+$ et caractérisation de la technologie
 - IV- Le projet XFEL
 - V- Les coupleurs de puissances HF pour cavités supraconductrices
 - VI- Intérêt et organisation du travail de thèse
-

I- Rôle des collisionneurs dans la physique de particules

La physique des particules élémentaires a pour but d'expliquer la constitution de la matière et l'action des forces fondamentales entre ses constituants. Les masses des particules et l'intensité exacte des forces ont joué un rôle clef dans l'évolution de l'univers [1].

Le modèle standard donne une description précise et quantitative de l'interaction entre les quarks et les leptons. Ses prédictions ont été confirmées par de nombreuses mesures expérimentales. Cependant, les expériences auprès des accélérateurs et les observations du cosmos signalent des phénomènes qui ne peuvent pas être expliqués par le modèle standard. De nouvelles physiques sont indispensables pour aller au delà de la compréhension actuelle de la matière noire, de l'énergie noire et des masses du neutrino [2].

Trois moyens de mesure permettront d'explorer ces domaines [3] :

- les expériences sur les neutrinos ;
- l'augmentation des limites des énergies des interactions provoquées expérimentalement dans les collisionneurs proton-proton ;
- et l'obtention de meilleures précisions de mesures par l'augmentation des énergies des collisionneurs électron-positron.

En effet, les collisions dans l'accélérateur nous permettent de créer dans le laboratoire ce qui s'est passé immédiatement après le Big-Bang, avant environ 14 milliards d'années, quand la matière en forme de quarks et de leptons a été créée à partir de l'énergie. Ainsi, si nous arrivons à déterminer les lois de la nature qui ont permis le passage de la nature à l'état actuel nous aurons une bien meilleure idée sur le développement actuel de l'univers [1].

Jusqu'à présent, les collisionneurs électron-positron LEP au CERN et SLC à SLAC ont établi une image précise des interactions électrofaibles entre les particules de matière et ont confirmé la structure des forces [4]. Mais un troisième composant du modèle standard pour ce type d'interaction n'a pas encore été établi d'une manière définitive. Il s'agit du boson de Higgs, le supposé responsable du mécanisme de la brisure de la symétrie électrofaible et de la génération de la masse des particules.

II- Besoin de collisionneurs électron-positron

Les grands accélérateurs fonctionnant actuellement sont le collisionneur électron-proton HERA à DESY et le collisionneur proton-antiproton Tevatron à Fermilab près de Chicago. Ce dernier peut découvrir certains des états des plus petites masses intervenant dans la brisure de symétrie électrofaible [5]. Le prochain collisionneur sera le LHC, le collisionneur proton-proton du CERN qui sera probablement mis en fonctionnement en 2007. Il pourra mettre en jeu des énergies de 14 TeV. Ce collisionneur est susceptible de découvrir le boson de Higgs dans toutes ses gammes potentielles de masse. Le LHC doit aussi être sensible à de nouvelles physiques dans une gamme de plusieurs TeV. Cependant, l'expérience montre clairement qu'un collisionneur de protons seul n'est pas suffisant pour explorer d'une manière adéquate le monde subatomique. Il doit être complété par un collisionneur d'électron positron à haute énergie. Ainsi, le LHC ouvrira un large domaine de découvertes que le collisionneur e^-e^+ permettra d'étendre. Ce dernier assurera des mesures supplémentaires essentielles pour une meilleure compréhension des résultats obtenus et la détermination du sens de l'évolution future de la physique des particules.

La complémentarité entre les collisionneurs de protons et ceux des leptons est due à la différence de la nature et des propriétés de ces particules qui entrent en collision dans ces deux types d'accélérateurs. Les électrons et les positrons n'ont pas de structure interne. Etant des particules fondamentales, elles prennent toute l'énergie du faisceau et interagissent par l'intermédiaire des forces faibles et des forces électromagnétiques qui peuvent être calculées avec précision. Les conditions sous lesquelles la collision se déroule sont très bien définies.

Ainsi, des calculs précis peuvent être effectués pour identifier les produits des réactions obtenus après la collision. Il est possible alors de déterminer les propriétés de nouvelles particules tels que la masse, le temps de vie, le spin et les nombres quantiques sans ambiguïté et avec une grande précision. Cependant, les protons sont des particules composites formées de quarks, d'antiquarks et de gluons. Les détails du processus de collision peuvent ne pas être bien contrôlés ou sélectionnés. De plus, l'énergie effective des collisions des particules fondamentales est généralement largement au-dessous de l'énergie totale des deux protons et le taux des collisions non désirées est très élevé [1]. Par exemple, dans le cas du LHC, les bruits de fond accompagnant le processus de production du boson de Higgs sont importants. Ceci rend la mesure du couplage avec les quarks, les nombres quantiques ou avec son propre couplage difficile. Le collisionneur e- e+ peut produire le boson de Higgs avec un petit bruit de fond vu qu'il le génère en association uniquement avec une ou deux particules [5].

III- Choix du concept linéaire pour les collisionneurs e- e+ et caractérisation de la technologie

III-1- Option pour un collisionneur e- e+ linéaire

Un consensus mondial a donné les caractéristiques de base du projet du collisionneur e- e+ dont les collisions doivent se faire à une énergie pouvant atteindre 500 GeV et avec une luminosité de l'ordre de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Ce collisionneur doit aussi avoir la possibilité d'augmenter son énergie jusqu'à 1 TeV [5].

Jusqu'à présent, à l'exception du SLC, les collisionneurs électron-positron ont généralement été sous forme d'anneaux de stockage. Le plus grand étant le LEP avec une circonférence de 27 km et une énergie maximale par faisceau pouvant atteindre 100 GeV. Cependant, ce concept de collisionneur n'est plus tenable pour accéder à des niveaux d'énergie plus importants. En effet les particules chargées perdent une partie de leur énergie sous forme de rayonnement synchrotron quand elles sont forcées à suivre une trajectoire circulaire.

Ces pertes peuvent être exprimées par :

$$\Delta W_{Synch} \sim \left(\frac{E}{m}\right)^4 \frac{1}{R} \quad [I.1],$$

où E est l'énergie de la particule chargée, m sa masse au repos et R le rayon de courbure de la trajectoire.

Ces pertes sont d'autant plus importantes que la masse de la particule chargée est faible telle que celle de l'électron.

Les pertes par rayonnement synchrotron augmentent d'un facteur de 16 lorsque l'énergie de l'électron double [1]. D'où l'option pour le concept de collisionneurs linéaire (LC), proposée pour la première fois par Maury Tigner en 1965 [6], si l'énergie par faisceau doit dépasser sensiblement 100 GeV.

III-2- Choix technologiques : technologie chaude / technologie supraconductrice

Deux types de technologie pouvaient être choisis pour la construction du collisionneur linéaire (LC) [5]: le concept TESLA proposé par le laboratoire Allemand DESY et ses collaborateurs et le concept JLC/NLC dont la conception a émergé du programme de R&D entre SLAC à Stanford en Californie et KEK à Tsukuba au Japon. La différence primordiale entre ces deux technologies repose sur la fréquence du champ électrique utilisé pour l'accélération. La fréquence la plus basse (1,3 GHz) était du TESLA design qui utilise des cavités RF supraconductrices. Alors que la fréquence la plus haute (11,4 GHz) était celle de JLC/NLC design qui utilise des structures accélératrices à température ambiante. Une comparaison des paramètres techniques, de l'état d'avancement de la R&D et des risques a été établie par un comité spécialisé TRC (Technical Review Committee) formé pour cette mission par l'ICFA (International Committee on Future Accelerators) en 2001. Les deux technologies ont été jugées viables et à coûts comparables.

En août 2004, une décision finale a été prise par la ITRP (International Technology Recommendation Panel) formé par l'ICFA [2]. Conformément à cette décision, la technologie froide permettant d'utiliser une fréquence de fonctionnement relativement basse qui a été choisi. Ainsi, un seul collisionneur linéaire va être construit dans le cadre d'une collaboration mondiale impliquant l'Amérique, l'Europe et l'Asie. Le projet serait alors appelé ILC (International Linear Collider). Toutefois ce choix n'impose en rien l'adoption du projet TESLA.

En effet parmi les critères les plus importants pour le choix de la technologie froide, nous pouvons mentionner :

- la réduction significative de la consommation de puissance de fonctionnement vu le haut rendement des cavités supraconductrices ;

- la possibilité de fonctionnement des collisionneurs à des fréquences relativement basses et donc avec des cavités de tailles assez grandes pour éviter certains problèmes d'instabilité du faisceau ;
- la concrétisation du projet pilote de l'accélérateur XFEL (X-Ray Free Electron Laser) permettrait de valider une grande partie de la technologie du projet TESLA (En effet, XFEL sera un bon terrain d'exploitation de cette technologie et pourra fournir une station de tests et plusieurs prototypes au projet ILC).

IV- Le projet XFEL

L'accélérateur XFEL faisait partie intégrante du projet TESLA. Ainsi, sa ligne accélératrice n'était, en fait, qu'une portion de celle du collisionneur. Elle utilise par conséquent la même technologie que ce dernier tout en ayant des paramètres de fonctionnement spécifiques. Le principe de XFEL consiste à accélérer des électrons qui en passant par un aimant en forme d'onduleur permettent de produire des rayonnements X ayant les qualités d'un laser. Ceci est possible grâce au principe du SASE (Self Amplified Spontaneous Emission).

IV-1- Les motivations du projet XFEL

XFEL donnera le moyen aux scientifiques d'explorer de nouveaux domaines [7]. En effet, une augmentation importante de la brillance permettra des applications utilisant le rayonnement X jusqu'à présent impossibles. L'étude des modifications des structures sur des échelles de temps très petites sera possible et viendra compléter la femtochimie qui utilise les lasers optiques. De plus, une autre application encore impossible à explorer sera aussi examinée. Il s'agit de pouvoir étudier les structures moléculaires sans avoir recours à la cristallisation qui n'est toujours pas possible pour un grand nombre de bio-molécules. Un autre nouveau domaine des plus importants à examiner sera l'interaction non-linéaire entre les rayonnements X et la matière engendrant des processus multiphotoniques dans les atomes et les molécules. Et enfin, en concentrant les rayonnements X sur des surfaces de quelques μm^2 et même moins, XFEL permettra la génération de plasmas à des températures et des pressions qui sont jusqu'à présent totalement inexplorées.

IV-2- Présentation de l'accélérateur XFEL

L'installation du projet laser à électrons libres dans la gamme des rayons X (XFEL) est fondée sur l'utilisation d'un accélérateur linéaire. Elle permettra de produire une source à

rayons X avec des propriétés sans précédent [8] en terme de structure temporelle, de durée d'impulsion, de cohérence, de brillance moyenne et de brillance crête. Cette dernière surpassera n'importe quelle autre source conventionnelle de rayons X d'au moins 10 ordres de grandeurs de magnitude.

Cette machine comprend essentiellement :

- une section d'injection comprenant un canon HF à photocathode, un pré-accélérateur, et des compresseurs de paquets de particules ;
- une section accélératrice comprenant un linac (linear accelerator) supraconducteur de 2 km procurant aux électrons une énergie de 20 GeV ;
- une section de production de laser à électrons libres avec des longueurs d'ondes allant jusqu'à 0.1 nm ;
- et une section de distribution de la lumière produite vers 10 stations expérimentales.

Le linac de l'installation XFEL comprendra 116 modules accélérateurs cryogéniques de 12 m de long chacun avec 8 cavités supraconductrices à 9 cellules en niobium appelées les cavités TESLA (voir figure (I.1)). Ces dernières doivent être maintenues à une température de 2 K dans des bains d'hélium super-fluide contenu dans les modules cryogéniques. Ces modules doivent assurer en plus deux autres niveaux de thermalisations à 5-8 K et 40-80 K protégeant ainsi les résonateurs du transfert thermique introduit par le système d'alimentation en puissance HF.

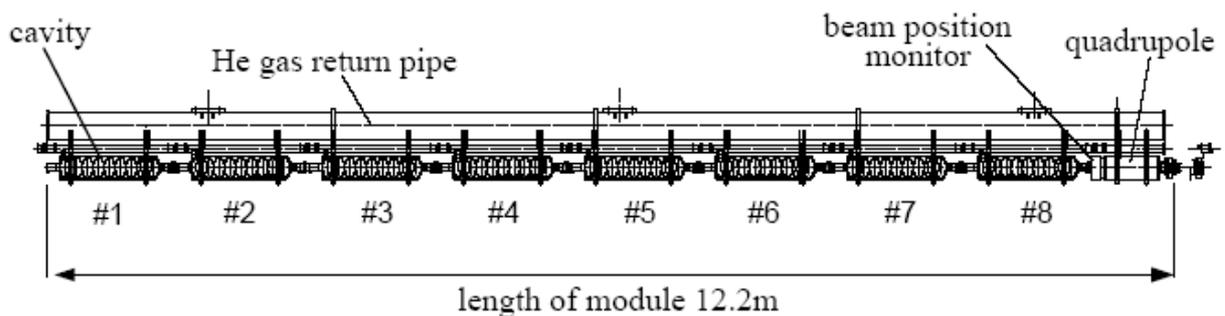


Figure (I.1) : Module cryogénique utilisé pour XFEL [9].

Le système de puissance HF de XFEL doit fournir à chaque cavité supraconductrice une puissance crête de 120 kW à une fréquence de 1,3 GHz, où elle doit assurer un gradient de champ accélérateur de 23,6 MV/m ainsi que la possibilité de passage d'un courant de faisceau pouvant atteindre 5 mA [10]. La puissance HF est envoyée sous forme d'impulsions de largeur maximale 1,38 ms : Le temps de remplissage de la cavité en puissance étant de 780 μ s

et celui du passage de faisceau est de 600 μ s. Le taux de répétition des impulsions est de 10 Hz.

La puissance HF est fournie aux cavités par des klystrons via un réseau de guides d'ondes. Mais, sa communication à ces résonateurs est très problématique. En effet, l'environnement cryogénique assuré par les cryomodules doit être préservé de tout apport calorifique externe afin de préserver l'environnement propice au bon fonctionnement des cavités. L'interfaçage entre la source HF et la cavité devient ainsi beaucoup plus délicat que celui des cavités fonctionnant à température ambiante. C'est le coupleur de puissance HF qui doit assurer l'alimentation de la cavité sans dégradation de ses performances.

V- Les coupleurs de puissances HF pour cavités supraconductrices

V-1- La nécessité des coupleurs

L'alimentation des cavités accélératrices nécessite l'utilisation de composants HF particuliers appelés coupleurs de puissance HF (voir figure (I.2)). Ces derniers doivent permettre un bon couplage entre la source HF (klystron) et les cavités ainsi qu'une séparation efficace entre deux milieux différents de propagation de l'onde électromagnétique : réseaux HF et cavité. Cette dernière est soumise à des conditions particulières de propreté et de vide afin de garantir les meilleures performances de fonctionnement et une bonne préservation des caractéristiques du faisceau qui la traverse.

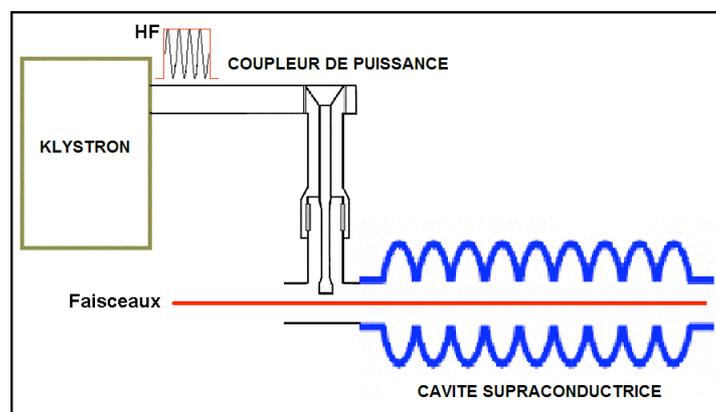


Figure (I.2) : Position du coupleur dans la chaîne de puissance HF. Le coupleur présenté est un coupleur coaxial assurant un couplage électrique avec l'ensemble cavité-faisceau moyennant une antenne.

Les cavités supraconductrices sont soumises à des contraintes beaucoup plus strictes que celles qui sont à température ambiante. En effet, l'état supraconducteur est très difficile à maintenir pendant le fonctionnement des cavités surtout sous des gradients accélérateurs élevés. Par conséquent, la moindre influence thermique externe ou locale peut faire sortir ces cavités de l'état supraconducteur. Les modules cryogéniques offriront une isolation thermique efficace aux cavités à condition que le coupleur -moyen de communication de la puissance- soit lui aussi étudié pour garantir cette fonction.

La forte croissance des valeurs des champs accélérateurs dans les cavités supraconductrices, ces dernières années, a imposé la nécessité d'investir énormément dans la conception de coupleurs de puissances HF de plus en plus robustes et fiables. Faces aux nouvelles contraintes de leur fonctionnement, de nouvelles solutions technologiques doivent être élaborées.

V-2- Position des coupleurs dans les projets d'accélérateurs linéaires supraconducteurs

Au même titre que les cavités supraconductrices, les coupleurs de puissance HF constituent des pièces maîtresses dans le Linac. Leur conception et leur réalisation peuvent s'avérer très difficiles, compte tenu des problèmes et des contraintes développés précédemment. Ces derniers se reflètent bien dans le coût du coupleur qui représente un enjeu très important dans un projet tel que le XFEL où le nombre total de coupleurs sera de l'ordre de 1000. Cet enjeu est davantage plus important vu le rôle d'interface joué par le coupleur. Ainsi, si ce dernier n'assure pas la barrière du vide, la cavité sera directement soumise au danger de contamination. Ceci peut causer des pertes de temps et de moyens considérables, surtout que les cavités sont rassemblées par groupes de huit pour ce projet.

L'enjeu économique est beaucoup plus grand dans le cas de l'ILC qui utilisera 10000 à 20000 coupleurs. Il est ainsi évident qu'un grand intérêt soit porté sur cette technologie. En effet, la réponse de ces coupleurs soumis à la HF reste jusqu'à présent très peu prévisible. Leur complexité ainsi que leur utilisation pour des puissances de plus en plus importantes suggèrent l'étude de leur comportement sous les conditions de fonctionnement les plus contraignantes. La difficulté de leur modélisation d'une manière exhaustive exige le recours à des méthodes expérimentales permettant le diagnostic et l'analyse des mesures effectuées sur les coupleurs.

Les tests menés sur le coupleur, suite à sa construction, peuvent être à la fois un moyen d'évaluation de ses performances et de son adaptation progressive au passage de la HF ainsi qu'une occasion de suivre et étudier ses réponses. Ces opérations sont considérées dans une procédure appelée « test et conditionnement HF » des coupleurs. C'est une étape essentielle dans le processus de préparation et traitement des coupleurs. La maîtrise et l'optimisation de cette procédure constituent en elles-mêmes une étape primordiale dans le processus de production des coupleurs et suscitent l'intérêt d'une grande partie de la communauté des ingénieurs et des physiciens des accélérateurs.

VI- Intérêt et organisation du travail de thèse

De nouvelles problématiques concernant les coupleurs sont apparues suite à la grande amélioration des performances des cavités supraconductrices. Les travaux effectués dans cette thèse ont pour but d'étudier certaines de ces questions. Ils ont essentiellement porté sur les coupleurs TTF-III choisis pour XFEL. L'intérêt de ce sujet se situe à deux niveaux. En premier lieu, une grande partie de la communauté des physiciens des accélérateurs soutient l'utilisation des cavités supraconductrices et cherche à prouver l'efficacité de cette technologie. Ensuite, le choix de la technologie froide pour la construction du futur collisionneur linéaire a élargi la communauté s'intéressant à ce thème. L'option du principe du coupleur TTF-III comme un choix de base pour le coupleur pour ILC constitue aussi une motivation supplémentaire pour ce travail.

Etant des composants complexes, les coupleurs TTF-III ont un comportement difficile à modéliser ou à prévoir. Ainsi, les travaux effectués au cours de cette thèse seront principalement expérimentaux. Nos principaux objectifs consistent, dans un premier temps, à maîtriser la procédure de conditionnement HF des coupleurs TTF-III et à l'automatiser. Dans un deuxième temps, une étude des comportements des coupleurs pendant leurs conditionnements HF sera menée en vue de mieux connaître leurs réactions au passage de la HF puis de réduire leurs temps de conditionnement. Ce dernier objectif représente l'un des enjeux les plus importants pour faire valoir le choix d'un coupleur. D'autres essais expérimentaux ont aussi été effectués sur ces coupleurs afin de valider certaines procédures utilisées pour le conditionnement. Un intérêt particulier a aussi été donné aux processus de génération des courants électroniques dans les coupleurs notamment par le multipactor. Des études de simulation de ce processus ont ainsi été effectuées. Son élimination a également été le sujet d'un essai expérimental. La totalité des travaux réalisés s'est déroulée au Laboratoire

de l'Accélérateur Linéaire (LAL). Ce dernier est doté d'une station de test et de conditionnement HF des coupleurs dans le cadre d'une coopération LAL/DESY. Ainsi, une série de prototypes de TTF-III a été fournie par deux industriels différents et a pu être testée.

Dans la suite de cette thèse, le travail présenté sera réparti sur les différents chapitres comme suit :

Dans le chapitre II nous allons donner un aperçu théorique sur la supraconductivité. Ensuite, nous introduirons certains des paramètres les plus importants pour les cavités afin de pouvoir mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation de la supraconductivité. Puis nous présenterons la notion de couplage et décrirons le rôle des coupleurs de puissance.

Nous allons consacrer le chapitre III à la description du phénomène de multipactor et sa dépendance de l'émission secondaire des électrons relative aux surfaces. Ces notions seront indispensables pour expliquer l'action du conditionnement sur les surfaces et introduire des connaissances nécessaires pour mieux comprendre les travaux de simulation qui seront présentés.

Le chapitre IV comprendra une présentation du coupleur TTF-III. Une description des performances, de la géométrie et de la technologie utilisée pour ce dernier sera alors donnée.

Le rôle du conditionnement ainsi qu'une description détaillée de la procédure de conditionnement utilisée pour le TTF-III seront relatées dans le chapitre V. Ce même chapitre, exposera les moyens alloués par le LAL et DESY pour le conditionnement de ces coupleurs. La mise en œuvre de l'automatisation de la procédure de conditionnement y sera aussi expliquée. Un premier conditionnement HF automatisé validera l'utilisation de la procédure et de son automatisation.

Dans le chapitre VI, une synthèse des constatations et des remarques résultant de l'analyse des mesures effectuées pendant les conditionnements HF des coupleurs TTF-III sera donnée. Des essais expérimentaux pour étudier l'influence de l'étuvage in-situ sur le conditionnement HF seront aussi exposés. D'autres essais portant sur la procédure de stockages seront également présentés.

Le chapitre VII détaillera, ensuite, les essais expérimentaux visant la réduction du temps de conditionnement. Des interprétations de ces résultats seront aussi explicitées.

Le chapitre VIII présentera certains coupleurs prototypes développés par le LAL notamment le coupleur TTF-V. Un essai expérimental préliminaire aura pour but de valider certaines performances pour ce dernier coupleur. Des simulations du multipactor effectuées sur les coupleurs TTF-III et TTF-V seront aussi détaillées et interprétées. Finalement, des résultats

d'essais expérimentaux visant l'élimination du multipactor dans TTF-III moyennant la polarisation de son conducteur interne seront exposés.

Chapitre II

Coupleur et cavité supraconducteurs

Sommaire :

- I- La supraconductivité
 - II- Cavité accélératrice supraconductrice
 - III- Coupleur pour cavité supraconductrice
-

I- La supraconductivité

La supraconductivité est un phénomène qui se manifeste par la perte de toute résistance électrique pour certains métaux. Il apparaît à des températures inférieures à une valeur limite très basse appelée température critique T_c dépendante du matériau concerné. Les courants électriques continus peuvent donc circuler à travers ces métaux sans aucune dissipation d'énergie. Une fois cette température limite est dépassée, la résistivité du métal revient à son état normal. La supraconductivité a été découverte en 1911 aux Pays-Bas par H. Kamerlingh Onnes [11]. La théorie qui explique ce phénomène physique est appelée la théorie BCS [12].

I-1- La théorie BCS

En 1957, J. Bardeen, L. Cooper et R. Schrieffer proposèrent une théorie microscopique, aujourd'hui connue sous le nom de théorie BCS, pour expliquer le phénomène de supraconductivité. Cette théorie est basée sur le couplage des électrons d'un métal en paires: appelées les paires de Cooper. Elles forment un état unique, cohérent et d'énergie plus basse que celui du métal normal où les électrons ne sont pas appariés.

La différence d'énergie entre l'état supraconducteur et l'état normal est appelée gap d'énergie et est notée Δ . C'est l'énergie nécessaire pour passer de l'état supraconducteur à l'état normal en brisant les paires de Cooper. Elle tend vers zéro lorsque la température T tend vers une température T_c appelée température critique.

Le problème est d'expliquer cet appariement compte tenu de la répulsion coulombienne [13]. En effet, dans un métal, les électrons interagissent avec le réseau cristallin formé d'ions

positifs. Ceux-ci attirent ces particules chargées libres et se déplacent légèrement. Le nom attribué à ces vibrations atomiques est phonons. Cette interaction entre les électrons et les phonons est à l'origine de la résistivité et de la supraconductivité. En effet, attirés par le passage très rapide d'un électron (10^6 m/s), les ions se déplacent et créent une zone locale électriquement positive. Compte tenu de l'inertie, cette zone persiste alors que l'électron est passé. Elle peut ainsi attirer un autre électron. Ce dernier se trouve, par l'intermédiaire d'un phonon, apparié à l'électron précédent, et ce, malgré la répulsion coulombienne.

La théorie quantique nous enseigne que les électrons dont le spin vaut $\pm 1/2$, obéissent au principe d'exclusion de Pauli. Ainsi, deux électrons de même spin ne peuvent occuper le même état d'énergie. Il s'ensuit qu'il ne peut cohabiter, par un état d'énergie, que deux électrons. Les états de basse énergie vont donc vite se saturer et l'énergie totale du système sera donc plus importante que si tous les électrons étaient dans le même état de plus basse énergie [14]. La paire de Cooper permet un état d'énergie global plus faible donc plus stable. En effet, celle-ci se comporte comme un boson, c'est à dire une particule de spin entier, par opposition aux fermions de spin demi-entier comme les électrons. Cela est important car seules les particules de spin demi-entier sont soumises au principe d'exclusion de Pauli. La paire de Cooper, en tant que boson, est soumise à la condensation de Bose-Einstein. Il s'agit d'un état particulier de la matière à basse température caractérisé par la possibilité pour les bosons d'occuper en nombre illimité le même état d'énergie le plus bas. Ces paires se déplacent sans rencontrer la moindre résistance ce qui implique la supraconductivité. Il faut bien sûr que ces paires se déplacent avec une énergie cinétique plus petite que le gap, sinon la paire sera cassée. L'agitation thermique finit par détruire ce fragile équilibre d'où l'effet néfaste de la température.

I-2- Principe de l'effet Meissner

Il y a une relation intime entre la supraconductivité et le champ magnétique. W. Meissner et R. Ochsenfeld ont découvert, en 1933, qu'un élément supraconducteur comme le plomb expulse un champ magnétique faible de son intérieur lorsqu'il est refroidi à une température inférieure à T_c ([15] et [16]). Cependant, pour un champ supérieur, il y aura une rupture de la supraconductivité et le matériau revient à son état normal.

Pour une géométrie simple, l'expression d'un champ magnétique parallèle à la surface qui sépare le demi espace supraconducteur et le vide est :

$$B_y(x) = B_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda_L}\right) \quad [\text{II.1}]$$

où λ_L est appelée la longueur de pénétration de London.

Ainsi le champ magnétique ne s'annule pas brutalement sur les surfaces supraconductrices mais pénètre dans le matériau avec une atténuation exponentielle. Pour des paramètres typiques des matériaux, la longueur de pénétration est petite, généralement de 20 à 50 nm. A l'intérieur du substrat d'un supraconducteur épais, le champ magnétique disparaît. Il s'agit de l'effet de Meissner et Ochsenfeld.

Il y a deux types de supraconducteurs avec quelques différences de réponse au champ magnétique. Ceux qui sont appelés de « type I » ne permettent pas la pénétration du champ magnétique à l'intérieur du substrat du matériau et restent en état supraconducteur tant que le champ reste inférieur au champ critique H_c vérifiant généralement $B_c = \mu_0 H_c < 1 \text{ Tesla}$.

Tous les alliages supraconducteurs ainsi que l'élément niobium, très utilisé pour la fabrication des cavités accélératrices en technologie froide, appartiennent à une deuxième grande classe de supraconducteurs appelée « type II ». Ils sont caractérisés par deux champs critiques, H_{c1} et H_{c2} . Au-dessous de H_{c1} , ces substances sont à la phase Meissner où le champ est totalement expulsé, alors qu'entre H_{c1} et H_{c2} , ces matériaux entrent dans une phase mixte dans laquelle le champ magnétique perce leurs substrats en forme de tubes. Beaucoup de ces matériaux restent à l'état supraconducteur à des champs importants (10 Tesla ou plus).

I-3- La résistance de surface

Contrairement au cas continu, les supraconducteurs ne sont pas libres des dissipations d'énergie dans le domaine des micro-ondes. Ceci est dû au fait que le champ magnétique de la RF entre dans la couche surfacique et induit une oscillation des électrons les empêchant de faire partie des paires de Cooper. Le nombre de ses électrons libres baisse exponentiellement avec la température. D'après la théorie de BCS pour la supraconductivité, la résistance de surface peut être donnée, si $T < T_c/2$, par une expression qui a été raffinée pour devenir [9]:

$$R_{BCS} = A \frac{1}{T} f^2 \exp\left(-1,76 \frac{T_c}{T}\right) \quad [\text{II.2}]$$

où f est la fréquence micro-onde utilisée et A est une constante dépendante des paramètres du supraconducteur [17].

Pour le Niobium la résistance de surface BCS à 1,3 GHz est d'environ 800 nΩ à 4,2 K et descend jusqu'à 15 nΩ à 2K (voir figure (II.1)). La dépendance exponentielle à la température

explique la raison pour laquelle l'intervalle de température 1,8 à 2 K est essentiel pour certaines cavités accélératrices afin d'obtenir des gradients importants avec des pertes extrêmement faibles. L'hélium superfluide est un excellent moyen de refroidissement grâce à sa conductivité thermique élevée.

En plus de la résistance BCS, il y a une résistance résiduelle R_{res} causée par les impuretés. Ce terme est indépendant de la température et a une valeur de quelques nΩ pour du niobium très pur mais peut facilement augmenter si la surface est contaminée.

Enfin la résistance de surface R_s peut être écrite sous la forme suivante :

$$R_s = R_{BCS} + R_{res} \quad [II.3]$$

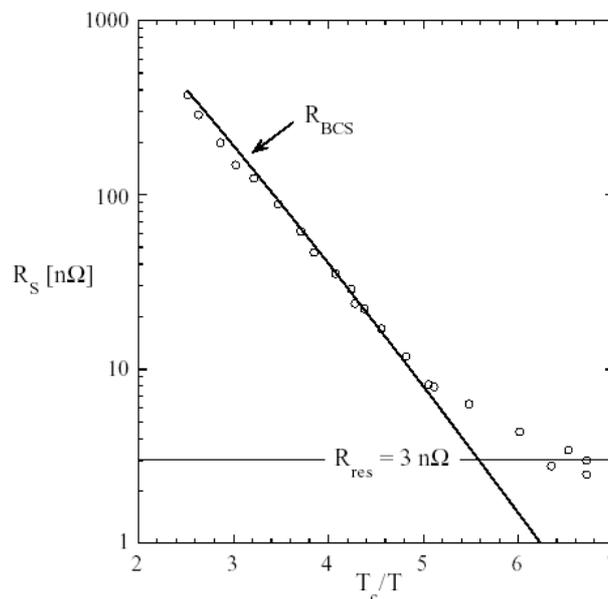


Figure (II.1) : Résistance de surface de la cavité 9 cellules de TESLA tracée en fonction du rapport T_c / T . La résistance résiduelle est de 3 nΩ ($f = 1,3 \text{ GHz}$) [9].

II- Cavité accélératrice supraconductrice

La cavité accélératrice est un résonateur hyperfréquence, qui excité par une onde électromagnétique pour une fréquence bien déterminée, appelée fréquence propre de résonance, permet l'établissement d'une onde stationnaire. Cette dernière est à l'origine d'un champ électrique axial créé essentiellement par le mode fondamental de résonance et capable d'accélérer une particule chargée. L'insertion de cette cavité dans une ligne de faisceau permet de communiquer aux particules des niveaux de puissances élevées.

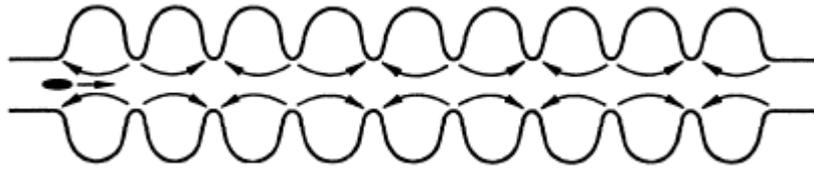


Figure (II.2) : Schéma représentatif de l'accélération de particules dans une cavité 9-cellules.

La tension accélératrice n'est, en effet, que l'expression d'une partie de l'énergie électromagnétique stockée sous forme d'onde stationnaire dans la cavité suite à son alimentation par une onde RF progressive. Il est primordial que ces résonateurs permettent de communiquer le maximum de cette énergie emmagasinée au faisceau afin de garantir un rendement d'accélération élevé.

II-1- Les paramètres caractéristiques d'une cavité accélératrice

Les caractéristiques les plus importantes pour la cavité sont le facteur de qualité Q_0 qui lui est intrinsèque et le champ accélérateur moyen E_{acc} vu par l'électron en la traversant. Ce champ E_{acc} est en relation directe avec la tension accélératrice V_c qui est donnée par :

$$V_c = E_{acc}d \quad [\text{II.4}],$$

d étant la longueur de la cavité.

Sachant que la puissance du faisceau P_b découle de la relation :

$$P_b = V_c I_b \quad [\text{II.5}]$$

il suffit d'augmenter le gradient accélérateur dans la cavité pour avoir une puissance faisceau importante, I_b étant le courant de faisceau.

Q_0 , exprime le rapport entre l'énergie U emmagasinée dans la cavité par rapport à l'énergie dissipée en une période RF.

$$Q_0 = \frac{\omega_0 U}{P_c} \quad [\text{II.6}],$$

ω_0 étant la pulsation de résonance,

P_c est la puissance dissipée dans les parois de la cavité par effet Joule à cause de la présence du courant RF induit sur les surfaces métalliques.

Q_0 exprime la vitesse de la décroissance de l'énergie stockée dans la cavité par dissipation dans les parois en un cycle RF. Il est aussi inversement proportionnel à la résistance surfacique R_s du métal composant le résonateur.

En effet, vu que l'énergie dans le champ électrique est égale à celle dans le champ magnétique, l'énergie dans la cavité est donnée par :

$$U = \frac{1}{2} \mu_0 \int_v |\vec{H}|^2 dv = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int_v |\vec{E}|^2 dv \quad [\text{II.7}],$$

v est le volume de la cavité.

De plus, la puissance dissipée est exprimée par l'équation suivante :

$$P_c = \frac{1}{2} R_s \int_s |\vec{H}|^2 ds \quad [\text{II.8}],$$

s est la surface de la cavité.

Ainsi nous pouvons écrire

$$Q_0 = \frac{\omega_0 \mu_0 \int_v |\vec{H}|^2 dv}{R_s \int_s |\vec{H}|^2 ds} = \frac{G}{R_s} \quad [\text{II.9}]$$

où

$$G = \omega_0 \mu_0 \frac{\int_v |\vec{H}|^2 dv}{\int_s |\vec{H}|^2 ds} \quad [\text{II.10}]$$

est la constante géométrique.

G dépend de la géométrie de la cavité mais pas de sa taille. Il permet par conséquence de comparer des cavités sans tenir compte de la taille et des matériaux des murs électriques les délimitant.

Il est donc évident qu'une résistance surfacique minimale sera préférable pour avoir un Q_0 maximal soit une puissance dissipée la plus réduite.

Un autre paramètre important permet de caractériser les pertes dans une cavité, c'est la résistance shunt R_a . Elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_a = \frac{V_c^2}{P_c} [\Omega] \quad (\text{ou } R_a^c = \frac{V_c^2}{2P_c} \text{ dans la théorie des circuits équivalents}) \quad [\text{II.11}].$$

La valeur de R_a doit être la plus grande possible afin de minimiser les pertes dans les murs de la cavité donnée ici par P_c . Pour les cavités en cuivre la valeur de la résistance shunt par unité de longueur est typiquement de 10 à 15 M Ω /m.

On note aussi que :

$$r_a = \frac{V_c^2}{P_c'} \quad [\text{II.12}],$$

P_c' étant la puissance dissipée par unité de longueur, et que le rapport :

$$\frac{R_a}{Q_0} = \frac{V_c^2}{\omega_0 U} \quad [\text{II.13}]$$

est indépendant de la résistance surfacique ainsi que de la taille de la cavité.

D'autres paramètres importants de la cavité seront introduits ultérieurement pour décrire son couplage avec la source de puissance.

Ayant pour fonction essentielle de communiquer une énergie bien déterminée au faisceau, la cavité doit avoir la meilleure conversion possible de la puissance fournie en puissance faisceau. Ceci est traduit par un rendement η qui est donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_b}{P_b + P_c} = \frac{1}{1 + \frac{P_c}{P_b}} = \frac{1}{1 + \frac{V_c}{2R_a I_b}} \quad [\text{II.14}]$$

En prenant pour exemple les cavités RF en cuivre du LEP [18] avec $R_a^c = 43 \text{ M}\Omega$, $I_b = 6 \text{ mA}$ et $V_c = 3 \text{ MV}$ nous avons $\eta \approx 15\%$.

II-2- La motivation pour la supraconductivité

La motivation la plus importante pour l'utilisation des cavités supraconductrices se manifeste dans le cas des accélérateurs en CW ou à un rapport cyclique important ($> 1\%$) du fait que l'énergie dissipée dans le cuivre est substantielle dans ces cas [19]. En effet, le facteur de qualité Q_0 , présentant l'aptitude d'une cavité à emmagasiner l'énergie, est très important dans le cas supraconducteur et à des valeurs de 10^9 à 10^{10} . Cependant, ce facteur n'est que de 10^5 dans le cas du cuivre.

Ceci est dû à la résistance de surface des matériaux supraconducteurs qui est cinq ordres de grandeur plus petite que celle du cuivre. Citons l'exemple du niobium qui est le matériau généralement utilisé pour les cavités supraconductrices. Sa résistivité est de quelques dizaines de $\text{n}\Omega$ alors que celle du cuivre est de quelques dizaines de $\text{m}\Omega$. L'influence de cette différence peut être constatée entre les pertes par effet Joule P_c pour les deux cas présentés dans l'exemple suivant (voir tableau II.1) [19] :

	Supraconducteur (Nb)	Cuivre
Q_0	2×10^9	2×10^4
r_a / Q_0 (Ω/m), fréquence RF = 500 MHz	330	900
P'_c (W/m) pour $E_{acc} = 1$ MV/m	1,5	56000
Puissance secteur (kW/m) pour $E_{acc} = 1$ MV/m	0,54	112
Puissance secteur (kW/m) pour $E_{acc} = 5$ MV/m	13,5	2800

Tableau II.1 : Puissance secteur nécessaire pour faire fonctionner des cavités en régime normal et en régime supraconducteur à 1 MV/m et 5 MV/m.

Dans le cas présenté dans le tableau II.1, la puissance dissipée par mètre est réduite d'un facteur de 4×10^4 dans le cas supraconducteur. Pourtant, ceci n'est pas suffisant pour comparer la consommation en puissance dans ces deux cas. En effet, dans le cas supraconducteur, la consommation de la puissance peut être partagée en deux parties :

- une puissance secteur nécessaire pour produire la RF nécessaire pour avoir le champ accélérateur demandé dans les cavités ;
- et une puissance secteur pour alimenter l'installation cryogénique nécessaire pour l'évacuation du surplus de calories gagné par la cavité par effet Joule [18].

Ces pertes P'_c qui sont de l'ordre de quelques watts par mètre (1,5 W/m dans l'exemple ci-présent pour une $E_{acc} = 1$ MV/m) nécessitent une consommation en puissance secteur très importante par le système cryogénique. Ceci est dû à deux facteurs :

- le premier étant le rendement de Carnot qui peut être exprimé par :

$$\eta_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad [\text{II.15}],$$

où T_1 est la température ambiante et T_2 est la température de fonctionnement de la cavité supraconductrice. Ainsi pour $T_1 = 300$ K et $T_2 = 4,2$ K, on a un rendement de Carnot de $\eta_c = 0,014$;

- le second est le rendement dû aux limites techniques du système de refroidissement et ne permettant qu'un rendement de l'ordre de 0,2 à 0,3. Ainsi le rendement total du système cryogénique est de 0,0028.

L'exemple précédent permet de voir que l'utilisation des cavités supraconductrices a réduit la puissance secteur consommée par un facteur de 200.

II-3- Limites de la supraconductivité

La limitation physique des résonateurs supraconducteurs est liée au besoin d'avoir un champ magnétique RF inférieur au champ de surchauffe du supraconducteur (de 200 à 240 mT pour le niobium). Pour les cavités TESLA ceci suppose un champ accélérateur maximum de 50 à 60 MV/m [19] et [9]. En principe, le facteur de qualité doit rester approximativement constant en approchant cette limite. Mais, en pratique, la courbe d'excitation $Q_0 = f(E_{acc})$ se termine par une valeur sensiblement inférieure, généralement accompagnée d'une forte décroissance de Q_0 pour les plus hauts gradients atteints dans la cavité comme le montre la figure (II.3).

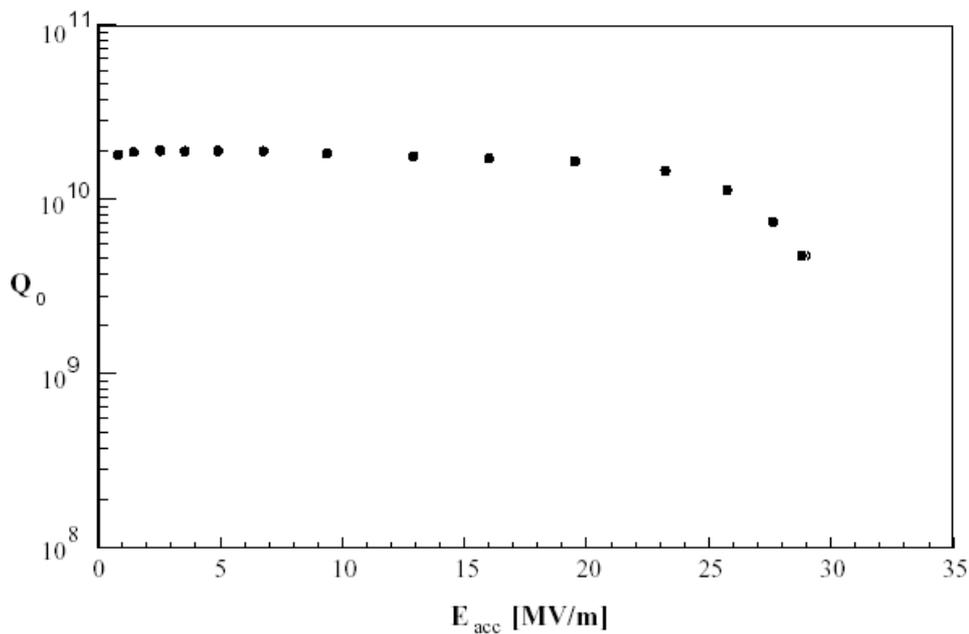


Figure (II.3) : Exemple de la dégradation du facteur de qualité Q_0 avec l'augmentation du champ accélérateur (cavité TESLA à 9 cellules [9]).

De plus, parmi les principales causes des dégradations des performances des cavités, nous trouvons le réchauffement excessif au niveau des impuretés se trouvant sur la surface interne, l'émission champ et le multipactor.

III- Coupleur pour cavité supraconductrice

III-1- Le couplage de la puissance RF à la cavité et circuits équivalents

Le couplage entre cavité et coupleur de puissance est normalement choisi de manière à ce qu'aucune puissance ne soit réfléchi pour les paramètres du faisceau choisis pour la machine.

Cette dépendance entre le couplage et le courant de faisceau se traduit généralement par une bande passante de l'ensemble coupleur-cavité d'un ordre de 0,1 à 10 kHz. Cette bande est beaucoup plus importante que celle de la cavité supraconductrice à Q_0 élevé et qui est typiquement entre 0,1 et 1 Hz. Par contre, en l'absence de faisceau, il y a une très grande désadaptation entre le générateur et la cavité [19]. Ainsi, la plupart de la puissance est réfléchiée. C'est pour cette raison que le coupleur et particulièrement sa fenêtre doivent être conçus de manière à pouvoir tolérer une large gamme de puissance réfléchiée.

III-1-1- Le couplage sans source de puissance

Considérons le comportement d'une cavité fonctionnant à la fréquence de son mode fondamental résonant une fois la puissance RF a été coupée. Le champ correspondant à cette fréquence ne peut pas se propager dans la ligne du faisceau, grâce à un choix judicieux de sa bande passante, par contre, il y décroît exponentiellement (voir figure (II.4)). Par conséquent, il est important de pouvoir ajuster la pénétration de l'antenne dans le voisinage de la cavité où le champ relatif à la fréquence fondamentale est non nul. Ceci afin de contrôler le couplage avec la cavité.

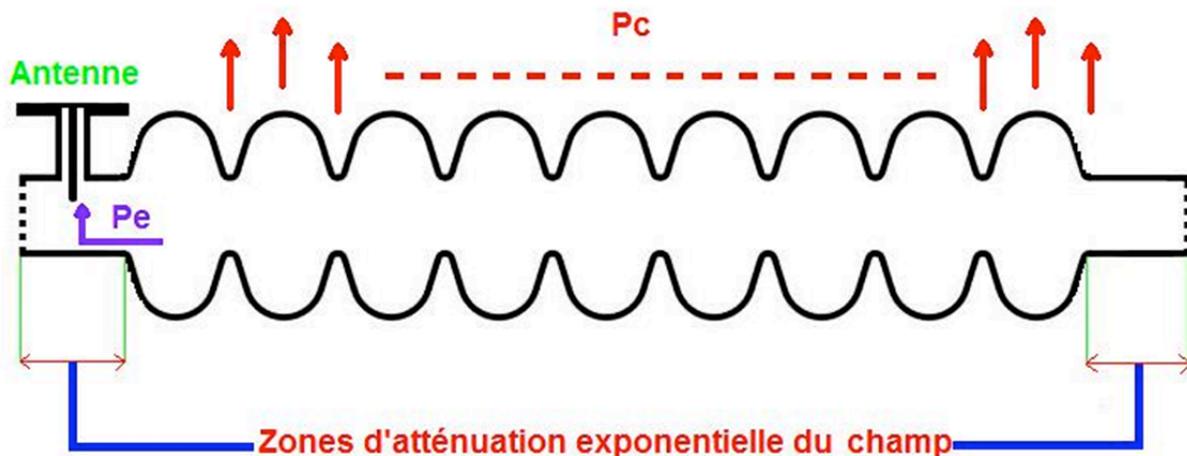


Figure (II.4) : Réalisation d'un couplage électrique avec une cavité moyennant une antenne.

Nous considérons que toute la puissance qui s'échappe de la cavité passe par le coupleur de puissance. Un bilan de puissance RF peut être alors donné par :

$$P_{tot} = P_c + P_e \quad [\text{II.16}],$$

P_{tot} étant la puissance totale et P_e la puissance s'échappant par le coupleur.

Analogiquement au facteur de qualité Q_0 , on peut définir le facteur de qualité en charge Q_L par :

$$Q_L = \frac{\omega_0 U}{P_{tot}} \quad [\text{II.17}].$$

En combinant les deux équations précédentes nous aurons :

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{P_c + P_e}{\omega_0 U} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e} \quad [\text{II.18}].$$

Ainsi nous avons attribué un facteur de qualité Q_e (ou Q externe) relatif au mécanisme de perte de la puissance RF via le coupleur. Ce facteur est défini par l'équation suivante :

$$Q_e = \frac{\omega_0 U}{P_e} \quad [\text{II.19}].$$

Le facteur de couplage β est défini par :

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_e} = \frac{P_e}{P_c} \quad [\text{II.20}].$$

On peut en déduire que si β est grand alors les pertes via le coupleur sont grandes par rapport P_c .

Notons que Q_e ne dépend que de la géométrie du coupleur et de la cavité et qu'il est indépendant des pertes dans cette dernière. Q_0 peut aussi être exprimé par :

$$Q_0 = Q_L(1 + \beta) \quad [\text{II.21}].$$

III-1-2- Le couplage en présence d'une source de puissance et les circuits équivalents

Même si les cavités ont plusieurs modes d'excitation, seul le mode fondamental sera pris en compte. En partant du fait que même les cavités à conduction normale ont un Q_0 grand, l'analyse peut être largement simplifiée par l'utilisation d'une approximation quasi-statique. Cette dernière utilise le fait que la constante du temps de la réponse de la cavité est relativement importante devant la période RF.

L'ensemble cavité-coupleur alimenté par un générateur peut être modélisé par la théorie des circuits équivalents ([19], [20]) comme suit:

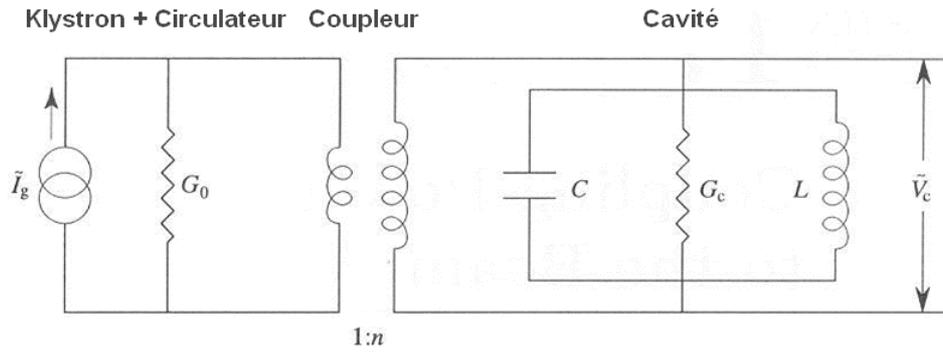


Figure (II.5) : Circuit équivalent de l'ensemble {source, ligne de transmission, coupler, cavité} (les grandeurs munies d'un tilde sont des grandeurs complexes).

L'ensemble générateur RF et circulateur (permettant de protéger le klystron de la puissance réfléchie) est modélisé par une source de courant idéale et une admittance shunt G_0 . Une ligne de transmission sans pertes avec une admittance G_0 connecte le générateur au coupleur de puissance. Ce dernier est représenté par un transformateur inséré entre la ligne de transmission et la cavité modélisée par un circuit RLC parallèle. Nous pouvons ainsi exprimer les paramètres du résonateur en fonction de ceux du circuit équivalent.

L'énergie stockée dans la cavité est :

$$U = \frac{CV_c^2}{2} \quad [\text{II.22}].$$

Isolée de l'environnement extérieur, sa puissance dissipée serait égale à :

$$P_c = \frac{G_c V_c^2}{2} \quad [\text{II.23}].$$

A partir des deux formules précédentes et en sachant que la pulsation propre du résonateur RLC est de $\frac{1}{\sqrt{LC}}$, nous pouvons déduire que :

$$Q_0 = \frac{\omega_0 U}{P_c} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{C}{G_c} = \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{1}{G_c} \quad [\text{II.24}].$$

En l'absence du courant de la source et en ayant le coupleur et la ligne de transmission connectés, la cavité voit une admittance G_0 / n^2 correspondant à la ligne de transmission via le transformateur. Celui-ci contribue aux pertes totales de puissance par le terme :

$$P_e = \frac{G_0}{n^2} \frac{V_c^2}{2} \quad [\text{II.25}].$$

Ce terme exprime les pertes passant à travers le coupleur.

En utilisant les expressions [II.19], [II.22] et [II.25], nous obtenons :

$$Q_e = n^2 \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{1}{G_0} \quad [\text{II.26}].$$

Nous relevons ici que le Q externe est indépendant des pertes dans la cavité.

A partir des nouvelles expressions de Q_0 et de Q_e nous pouvons déduire l'expression de β :

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_e} = \frac{G_0}{n^2 G_c} \quad [\text{II.27}].$$

Ainsi β est intimement lié à la dissipation dans la cavité.

L'impédance shunt peut être modélisée par :

$$R_a = \frac{2}{G_c} \quad [\text{II.28}], \text{ d'où } \frac{R_a}{Q_0} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\text{II.29}].$$

Un schéma équivalent encore plus simplifié peut permettre d'éliminer le transformateur. En effet, il suffit de remplacer G_0 par son admittance transformée $G_0 / n^2 = \beta G_c$ et \tilde{I}_g par le courant transformé $\tilde{i}_g = \tilde{I}_g / n$:

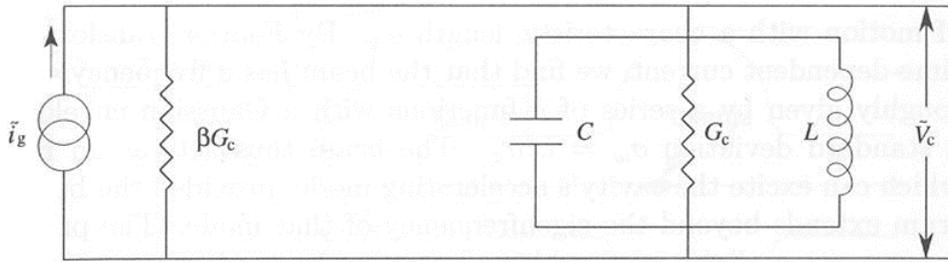


Figure (II.6) : Circuit équivalent simplifié de l'ensemble {source, ligne de transmission, coupleur, cavité}.

Ainsi la puissance dissipée dans la cavité est maximale quand cette dernière est adaptée au circuit d'entrée. Dans une telle situation, le courant attaquant le circuit résonant est $\tilde{i}_g / 2$ et la puissance dissipée est :

$$P_c^{\max} = \frac{i_g^2}{8\beta G_c} = P_g \quad [\text{II.30}]$$

où P_g est la puissance fournie par le générateur de courant.

L'analyse de ce circuit équivalent a permis de recenser trois formes de réponses possibles d'une cavité à une impulsion de puissance RF, et ce, selon la valeur de β (Voir figure (II.7)).

Dans tous ces cas, l'impulsion est supposée suffisamment longue pour que la cavité atteigne

son état d'équilibre. On distingue alors les cas suivants : sous-couplage ($\beta < 1$), couplage critique ($\beta = 1$) et sur-couplage ($\beta > 1$). Dans tous ces cas, on constate que toute la puissance RF envoyée vers la cavité au début de l'impulsion est réfléchiée totalement. La cavité se charge en énergie et la puissance réfléchiée décroît à sa valeur d'équilibre. Si le couplage incident est critique, la puissance injectée compense exactement les pertes de la cavité et la puissance réfléchiée devient nulle. Lorsque l'impulsion RF finit, la cavité devient elle-même une source de puissance et se décharge à travers le coupleur de puissance. Cette puissance rayonnée prend instantanément une valeur P_e pour décroître jusqu'à l'annulation. En couplage critique, la valeur de P_e est égale à la puissance incidente. Par contre en sous-couplage et sur-couplage P_e sera respectivement inférieure et supérieure à la puissance incidente [21].

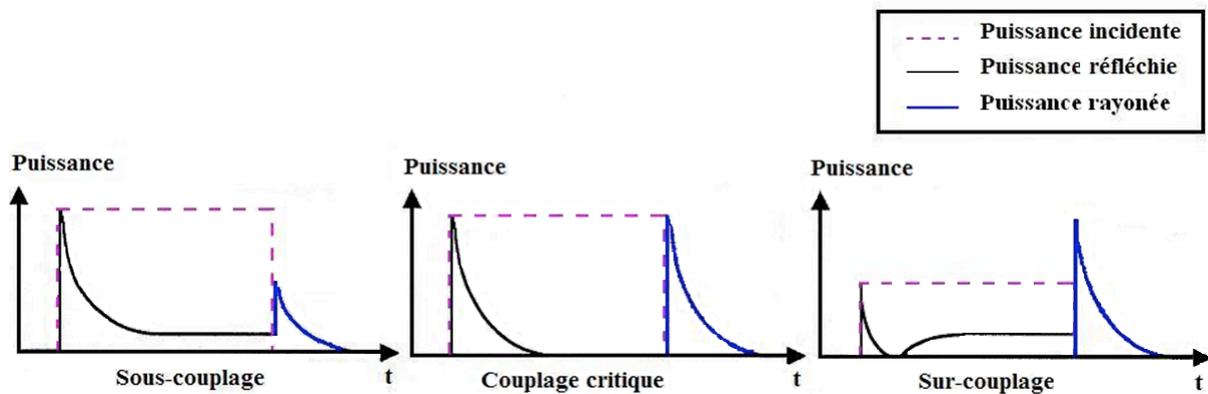


Figure (II.7) : Effet du couplage sur la puissance.

Pour tenir compte du faisceau dans le circuit équivalent, il suffit de superposer au schéma précédent une source de courant \tilde{i}_b parallèlement au générateur RF mais en opposition de phase avec le \tilde{i}_g [22], [19]. Le faisceau considéré doit bien sûr répondre à certains critères, qui sont données par la référence [19], afin qu'il réponde à cette modélisation.

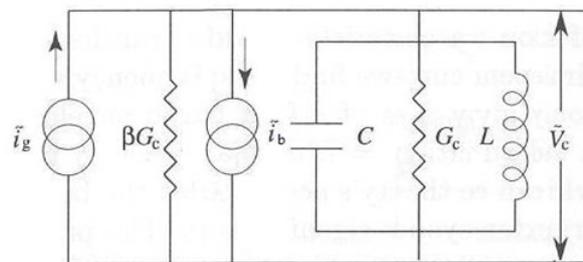


Figure (II.8) : Circuit équivalent de l'ensemble {Source, ligne de transmission, coupleur, cavité} en présence du faisceau.

Dans le cas présent, la condition d'adaptation de l'ensemble cavité-faisceau à la source est réalisée pour la valeur du coefficient de couplage :

$$\beta = \frac{P_g}{P_c} = 1 + \frac{P_b}{P_c} \quad [\text{II.31}].$$

Généralement, dans le cas supraconducteur, P_b est largement supérieur à P_c ce qui implique un besoin d'un coefficient de couplage important pour diminuer la réflexion de la puissance incidente.

Une nouvelle définition du Q_e s'impose :

$$Q_e = \frac{Q_0}{1 + \frac{P_b}{P_c}} \approx \frac{Q_0}{\frac{P_b}{P_c}} = \frac{V_c^2}{P_b} \frac{R_a}{Q_0} \quad [\text{II.32}].$$

Ainsi, une cavité adaptée au générateur RF en l'absence du faisceau ne l'est plus en sa présence. En plus, si le couplage est fixe, la dépendance de la puissance réfléchie au courant du faisceau ne permet un fonctionnement sans réflexion que pour un seul courant de faisceaux. Le besoin d'utilisation de plusieurs valeurs de courant impose deux alternatives pour le couplage : il doit, soit être fixé à une valeur où la puissance réfléchie ne dépasse jamais des niveaux tolérés, soit être variable. Cette dernière solution impose des difficultés supplémentaires de conception.

Une autre raison en faveur de l'option du couplage variable se manifeste dans l'impossibilité d'avoir des composants RF, tels que les coupleurs et les cavités, parfaitement identiques. Ceci est dû à la nécessité d'avoir certaines tolérances qui seront spécifiées pour la fabrication de ces éléments.

III-2- Le rôle des coupleurs HF pour cavités supraconductrices

En ce basant sur les conditions de travail des cavités supraconductrices, nous pouvons déduire le rôle que doit assurer un coupleur de puissance HF approprié [23], [24].

III-2-1- Le rôle électromagnétique

La fonction primordiale des coupleurs consiste à assurer le couplage approprié entre la source et l'ensemble cavité-faisceau. Le couplage peut être magnétique (inductif) ou électrique (capacitif). La conception de ce dernier s'avère plus simple à réaliser [24]. Il est aussi à remarquer que la pénétration de l'antenne assurant le couplage dans la ligne accélératrice crée une dissymétrie dans le champ électrique transverse. Ceci peut générer une déviation du paquet de particules accélérées. Toutefois, un couplage optimal ne peut être obtenu que par un

choix approprié de la pénétration de l'antenne. Il est, de ce fait, indispensable de trouver un compromis entre ces deux contraintes.

Le coupleur doit aussi garantir une bonne adaptation à l'impédance entre la source de puissance HF et la cavité supraconductrice. Les pertes Joule dans le coupleur doivent aussi être minimisées d'où l'utilisation du cuivre pour les surfaces conductrices internes des coupleurs.

III-2-2- La barrière du vide

Le coupleur de puissance doit préserver le vide à l'intérieur de la cavité. Des fenêtres en céramique sont alors utilisées pour assurer cette tâche. Elles doivent aussi permettre de garder une bonne adaptation du coupleur aux ondes électromagnétiques et résister aux pics de puissances transités par ces dernières. Ces fenêtres peuvent avoir des géométries très différentes d'un coupleur à un autre : coaxiales planaires, planaires ou cylindriques [25] (voir annexe 3). Ces composants en céramique constituent des éléments assez problématiques dans le coupleur vu leur fragilité et les procédés industriels supplémentaires qu'ils introduisent comme la brasure et le dépôt. Leurs positions dans le coupleur doivent être optimisées afin qu'ils ne soient pas exposés à des champs électromagnétiques trop importants.

De plus, étant soumis au pompage et à l'excitation de la HF, le coupleur ne doit pas produire des éléments susceptibles de contaminer la cavité. Ainsi, il doit subir un traitement approprié pour préserver un environnement propre à l'intérieur de ces résonateurs.

III-2-3- L'interface thermique

Le coupleur de puissance HF est, à la fois, lié au réseaux de distribution de la puissance HF qui est à température ambiante, et à la cavité supraconductrice fonctionnant généralement à des températures de 2 à 4,5 °K. Le transfert d'un flux thermique d'un côté à l'autre peut faire sortir les cavités de leurs états supraconducteurs. Ainsi, le coupleur de puissance HF doit avoir une résistance thermique importante afin de garantir un gradient de température important entre ces deux extrémités [24]. D'où le choix de l'acier inoxydable pour sa résistivité thermique comme matériau de base pour le corps du coupleur.

Un choix de la géométrie du coupleur ainsi que des matériaux le composant doit être fait et validé par des logiciels de simulation. Le stress mécanique imposé par cette différence de température est aussi un aspect important qui doit être assumé d'une manière harmonieuse entre les différents matériaux et pièces du coupleur. Ceci permettra d'éviter la dégradation de ces caractéristiques telles que l'adaptation à l'onde électromagnétique et l'étanchéité.

Il est à noter qu'en dehors des fonctions que le coupleur doit remplir, sa conception doit prendre en compte certains aspects pratiques : son montage, son traitement, son nettoyage ainsi que la géométrie de la cavité et du module cryogénique l'abritant. En conséquence, il est nécessaire de considérer, dès les premiers stades de la conception, l'ensemble coupleur-cavité comme étant une seule entité.

III-3- Les phénomènes physiques régis par une puissance HF importante dans le coupleur

Le passage de puissances HF importantes à travers le coupleur ainsi que son fonctionnement sous vide constituent deux causes fondamentales de l'apparition de certains phénomènes physiques dont la violence peut parfois causer au coupleur des dégâts importants. Parmi ces phénomènes nous citons principalement :

a) les champs électriques excessifs

Pendant le remplissage de la cavité en puissance HF, une partie de cette dernière sera réfléchi. La présence d'une onde stationnaire dans le coupleur peut augmenter le champ électrique maximum. De plus, certaines imperfections de soudure ou de brasure peuvent être à l'origine de quelques « pointes » susceptibles de créer de l'émission de champ. C'est un phénomène dû au renforcement du champ électrique au niveau de certaines pointes, provoquant l'émission d'électrons énergétiques [18]. Contrairement aux courants provoqués par le multipactor, ceux issus de l'émission de champ sont relativement faibles ($\sim nA$) mais l'énergie d'impact des électrons est importante.

Des arcs électriques peuvent survenir suite à une dégradation importante du vide ou si la partie en question est sous air. Cet arc électrique risque de causer des dégâts irréparables sur le coupleur. Il peut ainsi affecter l'état de surface, vaporiser certains matériaux pouvant contaminer la cavité ou même détruire la fenêtre éliminant ainsi la barrière du vide.

b) le phénomène du multipactor

Le multipactor est un phénomène qui concerne les structures HF sous vide. Il consiste en la multiplication rapide d'électrons résonants avec la fréquence utilisée suite à des impacts répétitifs sur les surfaces de la structure [18], [26]. La croissance du nombre des électrons est exponentielle et peut créer un phénomène d'avalanche d'électrons. Ces derniers seront

capables d'absorber une partie non négligeable de la puissance traversant le coupleur et provoquer la réflexion d'une autre, ce qui va à l'encontre du rôle électromagnétique de ce composant. Une condition essentielle pour que ce phénomène se maintienne consiste à avoir un rendement de production d'électrons supérieure à 1 suite à un impact. Ce rendement est exprimé par le coefficient d'émission secondaire de la surface et qui dépend du matériau, de son traitement et de sa propreté. Une description plus détaillée de ce phénomène sera présentée dans le chapitre III.

c) le dégazage

L'excitation des surfaces sous vide par la puissance HF provoque des désorptions libérant les éléments chimiques piégés par les parois du coupleur. Ces derniers peuvent contaminer les cavités ce qui peut réduire sensiblement leurs performances. Si ce dégazage est assez important il peut même créer un environnement propice au déclenchement d'arcs.

Il est donc clair que ces phénomènes sont étroitement liés à l'état des surfaces internes du coupleur qui sont excitées par la HF. Un soin particulier doit alors être réservé à cet aspect dans la conception, la fabrication ainsi que le traitement des coupleurs avant leur montage sur cavité. En plus de la difficulté de la conception des coupleurs viennent s'ajouter les problèmes dus aux phénomènes transitoires notamment en fonctionnement en mode pulsé. Ces derniers étant difficiles à simuler. Il est courant qu'il y ait plusieurs itérations entre concepteurs et fabricants avant qu'il y ait un modèle final valable pour l'application voulu. Il est donc fréquent que plusieurs prototypes soient fabriqués avant l'obtention du modèle final. De ce fait, il est très utile de s'inspirer des modèles de coupleurs existants ainsi que des méthodes de leurs traitements avant de ce lancer dans la R&D.

Chapitre III

Le phénomène du multipactor

Sommaire :

- I- Les conditions d'établissement du multipactor et ces différents types
 - II- Les équations dynamiques de l'électron
 - III- Lois d'échelle relatives au multipactor dans une ligne coaxiale
 - IV- Le coefficient d'émission secondaire
-

I- Les conditions d'établissement du multipactor et ces différents types

Le multipactor (MP) est un phénomène qui affecte le fonctionnement normal des structures RF sous vide, comme nous l'avons déjà précisé précédemment. Il dépend, à la fois, de la géométrie de l'élément RF, des surfaces sur lesquelles il s'établit et de la valeur du champ électromagnétique (ou la puissance RF) qui l'entretient. Son déclenchement peut se faire naturellement sous l'influence de certains phénomènes aléatoires tels qu'un rayonnement cosmique. Une fois déclenché, le MP est soit entretenu soit estompé, selon l'accomplissement des critères de résonance et de rendement de production d'électrons secondaires. Dans le cas d'un multipactor s'établissant sur un élément de surface, ces critères seront donnés par les conditions suivantes ([27]) :

1. un électron émis par une surface est accéléré par le champ EM, suite à quoi il entre en collision avec cette même surface après un nombre entier de cycles RF ;
2. l'impact de l'électron produit plus qu'un électron secondaire.

La première condition exprime le fait que les nouveaux électrons produits, suite à l'impact, sont accélérés par un champ EM ayant la même phase que celui vu par les électrons primaires au moment de leur production. Ceci permet l'établissement de la résonance du phénomène. Cela ne peut être vrai que si on suppose que la production des électrons par le processus de l'émission secondaire est relativement instantanée. En réalité, cette condition est vérifiée vu que le temps de génération des nouveaux électrons suite à l'impact est de 10^{-13} à 10^{-14} s [28],

[29]. La deuxième condition est responsable du maintien du phénomène et son intensification au cours du temps ou au contraire son atténuation et son arrêt.

En général, deux mécanismes de multipactor sont décrits dans la littérature [30], [31]. Le premier correspond à des points d'impact qui se superposent ou qui sont dans un proche voisinage du premier. Les trajectoires des électrons ont approximativement le même point de départ. Ce multipactor est appelé multipactor à un point. Le deuxième est caractérisé par une résonance des électrons s'effectuant entre des points d'impact appartenant à deux plans différents. Ils vont aller de l'un vers l'autre en suivant le changement de la phase de champ EM établie entre les deux surfaces émettrices. Dans ce cas le multipactor est dit à deux points. Plus généralement, on appelle, multipactor en n points un multipactor qui résonne entre n sites d'impact.

Le multipactor est aussi caractérisé par son ordre. Ce dernier peut être défini, pour un multipactor à un point, comme étant le nombre de périodes d'oscillations complètes du champ électromagnétique (EM) qui se déroulent entre l'émission d'un électron et son premier impact. Plus généralement, dans le cas d'un multipactor à n points, l'ordre du multipactor est défini par le nombre total d'oscillations complètes durant un cycle entier de n impacts. Il est à noter que plus l'ordre du multipactor est petit plus ce phénomène est stable et donc nocif.

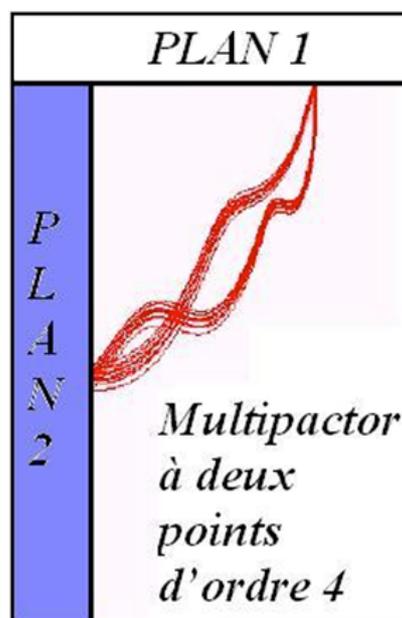


Figure (III.1) : Schéma représentatif d'un multipactor à deux points d'ordre 4. L'ordre de ce multipactor est donné par le nombre d'oscillations effectuées dans l'espace pour que l'électron parte d'un point puis y revienne tout en passant par un point d'impact intermédiaire.

II- Les équations dynamiques de l'électron

En négligeant le champ électrique créé par l'électron devant le champ environnant, l'équation du mouvement de l'électron sera régie dans une dynamique relativiste par l'équation suivante ([27], [30]) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e}{m} \left(1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} - \frac{1}{c^2} (\vec{v} \cdot \vec{E}) \vec{v} \right) \\ \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v} \\ \text{et } v = |\vec{v}| \end{array} \right. \quad \text{[III.1],}$$

avec

\vec{v} : la vitesse de l'électron.

c : la vitesse de la lumière dans le vide.

m : la masse de l'électron.

e : la charge de l'électron.

\vec{E} : le champ électrique.

\vec{B} : le champ magnétique.

Pour des raisons de simplification de la modélisation du multipactor, il est possible de supposer que la vitesse initiale de l'électron émis est normale à la surface émettrice [27] et de quelques électrons-volts. Cette hypothèse est assez représentative de la réalité physique pour des moyennes effectuées sur des populations d'électrons émis.

Dans cette partie la structure RF considérée sera une ligne coaxiale de diamètre interne et externe respectif a et b .

La configuration du champ EM dans la structure RF peut être soit sous forme progressive (TW), stationnaire (SW) ou mixte (MW). Cette dernière exprime un état où coexistent ensemble une onde TW et une autre SW.

L'expression du champ EM dans le cas SW est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{SW}(x, \varphi) = \frac{U}{2r \ln(\frac{b}{a})} (\cos(kz - \varphi) - \cos(kz + \varphi)) \vec{e}_r \\ \vec{B}_{SW}(x, \varphi) = \frac{U}{2cr \ln(\frac{b}{a})} (\cos(kz - \varphi) + \cos(kz + \varphi)) \vec{e}_\theta \end{array} \right. \quad [\text{III.2}],$$

où U est la chute de tension entre les conducteurs interne et externe
 $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$, $\varphi = \omega t$ et (r, θ, z) sont les coordonnées cylindriques.

Le mouvement de l'électron est régi par le champ électrique et le champ magnétique. Des résultats de simulation du multipactor dans une ligne coaxiale dans la référence bibliographique [32], ont montré la présence de deux types de multipactor dans ce cas. Un multipactor dit électrique (EMP) qui apparaît au niveau du maximum du champ électrique d'une onde stationnaire et un multipactor dit magnétique (MMP) qui se manifeste au niveau du maximum du champ magnétique. Les conditions d'observation de ces multipactors sont intimement liées à la configuration du champ dans la ligne coaxiale.

En SW, il n'y a que le EMP qui est observé. En effet, dans cette configuration le champ électrique et le champ magnétique sont en opposition de phase. Ce dernier, étant purement azimutal en mode TEM, est incapable d'accélérer les électrons radialement. Le champ électrique étant très faible au niveau du maximum du champ magnétique, le MMP ne peut pas s'établir [32]. Le EMP qui se crée au niveau du maximum du champ électrique n'est presque pas influencé par la force de répulsion $\vec{v} \wedge \vec{B}$ due au champ magnétique.

En TW, les deux champs électrique et magnétique sont en phase ce qui permet la création d'un multipactor dû à la fois au EMP et au MMP et qui se propage avec l'onde.

En MW, il est possible de reconnaître les deux types de multipactor qui se dissocient l'un de l'autre au fur et à mesure que la configuration du champ passe du TW vers le SW par variation du taux d'onde stationnaire (TOS). Le MMP dérive progressivement vers les puissances les plus élevées lorsque le TOS augmente.

Le multipactor se déclenche à des niveaux de puissances bien déterminés lorsque la condition de résonance est réalisée pour la géométrie considérée. Une augmentation de la puissance HF peut provoquer l'arrêt du multipactor pour qu'il réapparaisse à des puissances plus élevées. Pour une structure aussi simple qu'une ligne coaxiale, certaines lois d'échelle ont été déterminées et permettent de prévoir les conditions favorables à la création du multipactor. Bien sûr, encore faut-il que le rendement de production des électrons secondaires soit supérieur à un.

III- Lois d'échelle relatives au multipactor dans une ligne coaxiale

Certaines lois d'échelle auxquelles obéit le multipactor ont été déterminées dans le cas d'une SW dans une ligne coaxiale. Ainsi le multipactor considéré est le EMP. Ces lois d'échelles peuvent être d'une grande utilité pour prévoir la possibilité de l'apparition d'un multipactor ou son intensité. Elles peuvent par conséquent être un outil efficace pour la conception d'une structure avec le moins possible de multipactors.

Il a été démontré dans [30] que le champ électrique maximal relatif au déclenchement du multipactor dans le cas considéré (ligne coaxiale) est :

$$E_{\max} \sim \frac{f^2 d}{n+1} \quad [\text{III.3}],$$

où n est l'ordre du multipactor, f est la fréquence et d est le paramètre de la taille de la ligne coaxiale avec $a = \alpha d$ et $b = \beta d$ ($\alpha < \beta$) de manière à garder le rapport a/b toujours constant en variant d . Ceci permet de garder l'impédance caractéristique Z de la ligne constant pendant la variation de d :

$$Z = \frac{\eta_0}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{b}\right) \quad [\text{III.4}],$$

η_0 étant l'impédance du vide.

Il a été aussi trouvé que la loi d'échelle de la puissance incidente favorable au multipactor est régie par :

$$P_{\text{input}} \sim \frac{d^4 f^4}{(n+1)^2} \quad [\text{III.5}].$$

Ceci est en accord avec la relation liant la puissance au champ maximal dans la ligne coaxiale. Nous pouvons déduire de cette dernière relation qu'en augmentant la puissance incidente nous rencontrons, au début, les ordres de multipactor les plus élevés pour atteindre après les ordres les plus stables.

Le niveau de la puissance du multipactor, toujours dans le cas d'une ligne coaxiale en SW, dépend aussi de l'impédance de la ligne, et ce, selon le nombre des sites des impacts du multipactor. Ceci est donné par [33] :

$$P_{\text{un-point}} \sim (fD)^4 Z \quad [\text{III.6}], \quad P_{\text{deux-point}} \sim (fD)^4 Z^2 \quad [\text{III.7}],$$

où D est le diamètre externe de la ligne coaxiale.

Ce résultat est très utile puisqu'il permet de montrer qu'un choix judicieux des paramètres d'une ligne coaxiale permet de pousser le multipactor à des niveaux de puissances élevés.

Les niveaux de puissance de multipactor qui sont déterminés dans le cas SW peuvent être déduits pour le cas TW par la simple relation :

$$P_{TW} = 4P_{SW} \text{ [III.8].}$$

L'énergie moyenne d'impact des électrons obéit aussi à la loi d'échelle suivante, vérifiée dans [33] :

$$E_{kin} \sim (fD)^2 \text{ [III.9].}$$

Ce résultat permet de prévoir l'intensité du multipactor en fonction du matériau utilisé pour la surface. Ceci se déduit à partir de la courbe d'émission secondaire de cette dernière.

IV- Le coefficient d'émission secondaire

IV-1- La courbe standard du coefficient d'émission secondaire

L'étude du multipactor se fonde en grande partie sur le coefficient d'émission secondaire (SEC), noté δ , des surfaces exposées au champ EM dans une structure RF. Il exprime la faculté générale que ces surfaces ont à émettre des électrons suite à leur exposition à un flux d'électrons primaires. Ce coefficient est fonction des caractéristiques de la surface et de l'énergie de l'électron primaire lors de l'impact.

La courbe du coefficient d'émission secondaire d'une surface en fonction de l'énergie de l'électron incident a une forme standard présentée par la figure ci-dessous :

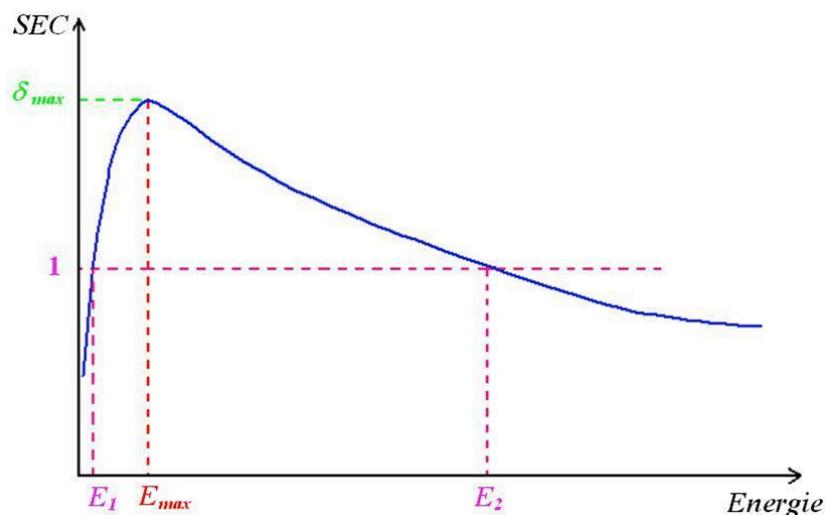


Figure (III.2) : Forme standard de la courbe du coefficient d'émission secondaire en fonction de l'énergie cinétique de l'électron incident.

Les valeurs du SEC varient d'un matériau à un autre. Cependant, l'invariance de la forme de la courbe est due au fait que le principe est toujours le même [19]. Un électron primaire incident interagit avec un nombre de charges proportionnel à son énergie cinétique d'incidence E_{kin} dans les couches supérieures au niveau de la surface. Lorsque cette énergie devient trop importante, la pénétration de l'électron devient plus profonde. Les électrons avec lesquels il interagit auront donc beaucoup plus de mal à quitter la surface à la différence de ceux issus de l'impact à faible E_{kin} . Ainsi, les valeurs de la courbe du SEC sont très sensibles aux adsorbats de la surface.

Le multiplicator ne peut avoir lieu que lorsque les électrons primaires possèdent des énergies cinétiques, au moment de l'impact, appartenant à l'intervalle $[E_1, E_2]$ (voir figure (III.2)). Généralement, E_1 est de l'ordre de quelques dizaines d'électrons volts alors que E_2 est de quelques milliers d'électrons volts. C'est à l'énergie primaire E_{max} que la production d'électrons secondaires atteint son maximum δ_{max} . A proximité de ce niveau d'énergie, le multiplicator peut être le plus intense, bien évidemment si la géométrie le permet. Ainsi, il est important de noter que ce ne sont pas les électrons les plus énergétiques qui sont les plus nocifs. Un grand intérêt est donné à l'étude des techniques de réduction de δ_{max} ainsi qu'à la largeur de l'intervalle $[E_1, E_2]$ pour les matériaux constituant les composants RF susceptibles d'être exposés au multiplicator.

Les électrons produits au niveau de la surface sont, en fait, un bilan de trois processus de production d'électrons [34], [28], [35]. En effet, l'impact d'un flux d'électrons I_0 sur une surface permet recueillir une partie I_e de ce courant qui va être réfléchi élastiquement. Le reste du flux pénètre dans la matière et peut se comporter de deux manières différentes. Certains électrons vont être rétro-diffusés pour créer un courant I_r . Les autres interagissent avec la matière à travers des processus plus compliqués pour produire ceux qui peuvent être appelés « les vrais électrons secondaires » donnant un flux I_{ts} . Le rendement total de production d'électrons à partir du flux primaire peut être exprimé par :

$$\delta_{tot} = \frac{(I_e + I_r + I_{ts})}{I_0} = \delta_e + \delta_r + \delta_{ts} \quad [\text{III.10}],$$

avec $\delta_e = I_e / I_0$, $\delta_r = I_r / I_0$ et $\delta_{ts} = I_{ts} / I_0$.

Nous supposons que les courbes de SEC qui seront utilisées dans la partie traitant la simulation du multiplicator dans le coupleur (chapitre VIII) représentent une bonne approximation des électrons intervenant effectivement dans la formation du multiplicator.

IV-2- Les facteurs influençant le coefficient d'émission secondaire

Suite à l'accomplissement des conditions de résonance, la réduction du coefficient d'émission secondaire constitue un moyen incontournable pour protéger le fonctionnement normal de la structure, vu son rôle essentiel dans la création du phénomène d'avalanche. Le choix des matériaux étant généralement limité par les besoins de l'application physique, c'est surtout par les techniques de traitement ainsi que les procédés de préparation des surfaces que le SEC peut être réduit. Ceci représente un domaine d'études de très grand intérêt pour plusieurs grandes structures accélératrices telles que celle du LHC où la présence de nuages d'électrons importants dans les chambres à vide peut perturber le faisceau [35], [36], [37], [38]. De même, la réduction du SEC est primordiale pour que les coupleurs de puissances HF des cavités supraconductrices puissent remplir leurs rôles, notamment la transmission optimale de la puissance au faisceau.

Les SEC des surfaces dépendent fortement de la rugosité de la surface, de la composition de la couche d'oxyde qui s'y forme ainsi que de la couche des gaz qui s'y condense [36], [37]. Il est, en effet, possible de diminuer l'émissivité d'une surface en augmentant sa rugosité. En plus, les SEC des matériaux utilisés ne sont pas similaires aux SEC de ces mêmes matériaux lorsqu'ils sont à leur état pur. En effet, les surfaces subissent l'influence de l'environnement auquel elles sont exposées. Ceci se manifeste par la condensation des gaz environnants en plusieurs couches qui seront les premiers à interagir avec les électrons incidents. Cette influence sera en fonction de l'épaisseur de ces couches et de leur composition. Il a été montré, par exemple, dans [36] que la condensation de l'eau sur les parois du cuivre augmente son SEC (figure (III.3)). Par contre, d'autres types de contamination des surfaces semblent avoir l'effet inverse. Un nombre croissant de couches d'hydrogène sur une surface de cuivre diminue son SEC [39].

Certains processus peuvent être volontairement appliqués pour la réduction du SEC. Nous nous intéressons à deux d'entre eux : l'effet de l'étuvage sous vide (que nous allons désigner tout le long de cette thèse par étuvage) et celui du bombardement des électrons sur une surface.

L'étuvage consiste en une élévation de la température de la surface permettant la libération des gaz qui s'y sont condensés, notamment la vapeur d'eau dont la suppression permet un meilleur SEC comme nous l'avons précisé ci-dessus. L'augmentation de la température permet de dégazer les surfaces plus efficacement et d'agir sur une plus large gamme

d'éléments condensés sur la surface [40]. Les effets de l'étuvage seront traités plus en détail ultérieurement dans cette thèse (chapitre VI).

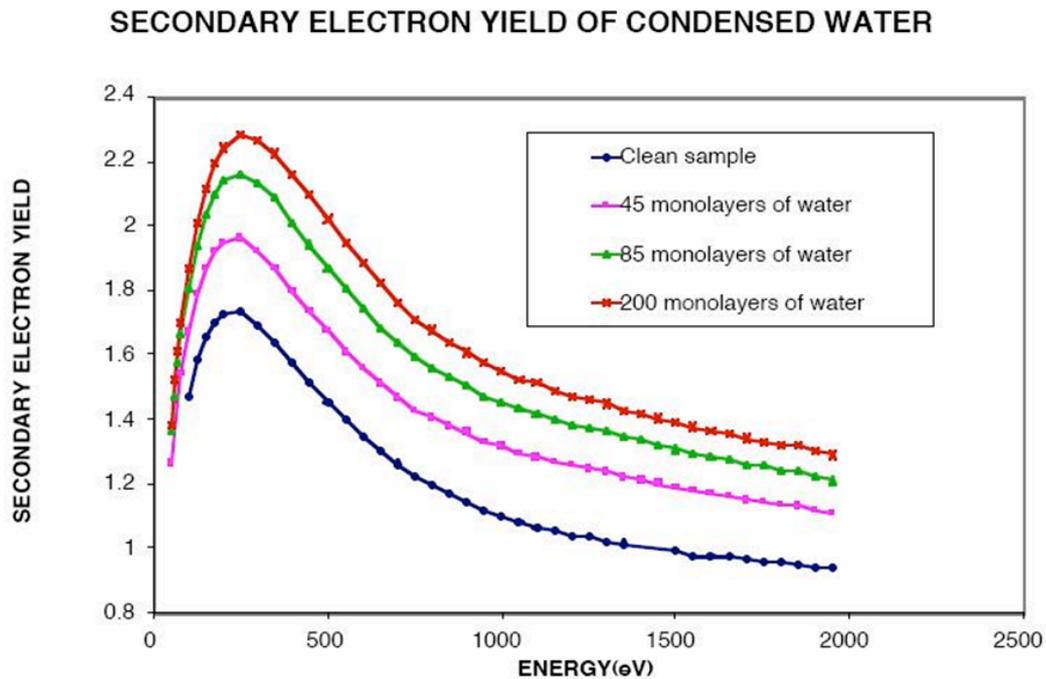


Figure (III.3) : Influence de la condensation de l'eau sur le coefficient d'émission secondaire du cuivre [36].

Concernant l'exposition d'une surface au bombardement électronique, cette action réduit efficacement le coefficient d'émission secondaire ([37] et [38]). Cette diminution s'effectue en fonction de l'augmentation de la dose totale d'électrons reçue par unité de surface. Ce mécanisme est lié en premier lieu au nettoyage de la surface. Mais ceci ne semble pas être le seul effet du bombardement électronique vu que certaines expériences ont montré que le SEC obtenu après cette opération peut être inférieur à celui du matériau pur. En effet, il a été constaté qu'une formation de carbone sur des surfaces de cuivre s'effectue sous l'influence du bombardement électronique ([36], [41]). L'origine de ce carbone ne semble pas être les gaz résiduels mais le matériau utilisé, comme il a été suggéré dans les références [37] et [42].

Finalement, certaines techniques de dépôt de couche minces d'éléments à faible SEC sur les surfaces des matériaux à coefficients d'émission secondaire élevés sont aussi utilisées afin d'éviter le multipactor. Les fenêtres en céramiques dans les coupleurs de puissance HF sont fragiles et facilement altérables par un multipactor puissant. De plus, le coefficient d'émission secondaire de ces céramiques est élevé. Ainsi, un dépôt adéquat de matériaux à faible SEC

constitue une solution efficace pour protéger la fenêtre sans dégrader ses caractéristiques électromagnétiques.

L'oxydation des surfaces et leur contamination peuvent avoir des conséquences très importantes sur l'intensité du multipactor dans les structures RF. Seulement, il est très difficile de les éviter en stade de fabrication, de manipulation ou de montage. Ainsi, il est nécessaire d'avoir des moyens efficaces pour réduire le SEC au dessous de certaines limites permettant le fonctionnement des composants de puissance RF aux conditions les plus extrêmes tolérées. De telles solutions sont indispensables pour les coupleurs de puissance HF des cavités supraconductrices. Leur complexité impose des procédés industriels de fabrication multiples qui peuvent influencer leur état de surface. Ils peuvent aussi être exposés à des environnements très variés pendant leur nettoyage et leur montage. Ceci implique une contamination des surfaces RF de ces composants pouvant être à l'origine de SEC importants. La vulnérabilité de tels composants au multipactor et leur fonctionnement à des puissances de plus en plus importantes exigent la maîtrise de solutions efficaces pour réduire le SEC. Le processus de nettoyage de la surface par bombardement électronique contrôlé et un moyen efficace souvent utilisé pour la préparation des coupleurs de puissance HF ainsi que les composants HF de la ligne accélératrice soumis à des champs EM importants. La procédure permettant d'utiliser ce principe d'une manière graduelle et sûre est appelée procédure de conditionnement HF.

Nous allons développer ultérieurement (chapitre V) la procédure de conditionnement HF relative aux coupleurs TTF-III et présenter son effet sur la réduction de l'émission secondaire.

Chapitre IV

Coupleur de puissance HF TTF-III

Sommaire :

- I- Présentation du coupleur TTF-III
 - II- Les différentes parties du coupleur TTF-III
 - III- Les choix technologiques et les difficultés de réalisations
-

Le développement des coupleurs de puissances HF pour des cavités supraconductrices a toujours été un défi important et un travail de longue haleine vu les contraintes ardues imposées par l'environnement cryogénique (chapitre I et II). L'expérience de la conception et de la fabrication du coupleur LEP-II au CERN en témoigne [43], [44]. Alors que le champ accélérateur demandé pour cette application était de 6 MV/m, plusieurs modèles et modifications ont été nécessaires pour la réalisation de la version finale. Le multipactor (chapitre III) était l'une des principales problématiques à éliminer. Le projet TESLA a lancé un nouveau défi en technologie des coupleurs de puissance en proposant une valeur « ambitieuse » de champ accélérateur supérieur à 20 MV/m pour les cavités supraconductrices à 9 cellules. C'est en s'alignant avec les besoins des projets XFEL et TESLA que la R&D des coupleurs a été fixée. Plusieurs versions de coupleurs ont été proposées et testées sur l'installation TTF (TESLA Test Facility) construite à DESY pour valider la technologie supraconductrice à utiliser pour X-FEL. Le coupleur TTF-III de DESY a été le modèle agréé pour le projet à la suite du workshop coupleur qui a eu lieu en novembre 2003 [45]. Ce coupleur était essentiellement le résultat de l'amélioration de deux modèles qui ont été développés dans le même cadre [46] : le coupleur FNAL [47] de Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory), le coupleur TTF-I et le coupleur TTF-II de DESY [48] (voir annexe 1). Toutefois, le comité de décision pour le choix du coupleur a insisté sur l'importance de l'amélioration du temps du conditionnement des coupleurs et a incité à avoir plus de statistiques sur ce sujet [45]. Des études d'industrialisation ont aussi été recommandées afin de permettre la réduction du coût des coupleurs TTF-III.

I- Présentation du coupleur TTF-III

Le coupleur TTF-III est un coupleur coaxial (figure (IV.1)) assurant un couplage électrique avec les cavités TESLA via son antenne introduite au niveau du tube de faisceau à l'entrée du résonateur (voir figure (IV.1)). Il est composé d'une partie fonctionnant à des températures imposées par l'environnement cryogénique appelée « partie froide », une partie à température ambiante appelée « partie chaude » et une transition de guide d'onde. Le couplage assuré par TTF-III est variable grâce à un mécanisme permettant de changer la pénétration de l'antenne. Le conducteur interne est aussi polarisable afin de permettre de surmonter les niveaux de multipactor difficiles à éliminer.

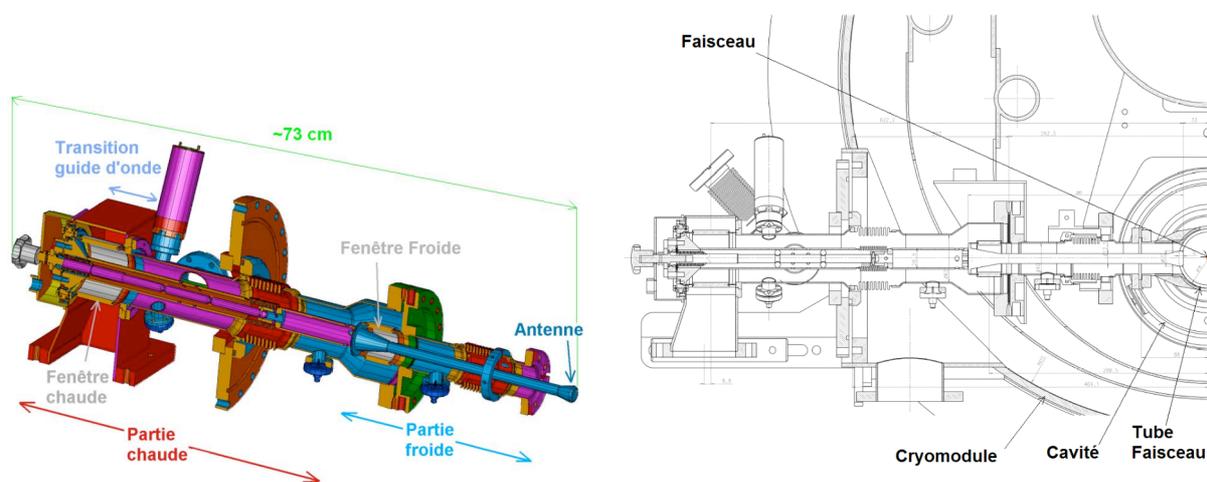


Figure (IV.1) : La présentation du coupleur TTF-III

Les spécifications EM du fonctionnement du coupleur TTF-III sont résumées dans le tableau IV.1.

Fréquence HF	1,3 GHz
Impulsion	1,38 ms : 780 μ s de temps de montée et 600 μ s d'impulsion plate
Puissance crête de fonctionnement	120 kW
Puissance moyenne	1,6 kW
Taux de répétition	10 Hz
Q_{ext}	$4,6 \cdot 10^6$ (Gamme de réglage $10^6 - 10^7$)

Tableau IV.1 : Spécifications EM du fonctionnement du coupleur TTF-III.

En dehors des spécifications de puissances de fonctionnement normal, ce coupleur doit être capable de supporter les conditions les plus extrêmes pendant son fonctionnement. En effet, comme nous l'avons précisé dans le chapitre II, l'adaptation entre le coupleur et la cavité est assurée en présence du faisceau. Or, la cavité subit une période de remplissage en énergie pendant un temps de montée de 780 μ s (voir tableau IV.1). Ceci est à l'origine de l'établissement d'une onde stationnaire dans le coupleur causant une augmentation du champ EM crête et de la puissance crête. De plus, la perte du faisceau pendant le fonctionnement est aussi à l'origine de désadaptations. Par conséquent, le coupleur TTF-III est conçu pour supporter des puissances crêtes P supérieures à celle de son fonctionnement nominal (P = 1 MW en onde progressive). Le champ électrique surfacique maximal dans une ligne coaxiale transmettant une telle puissance peut être conséquent. Variant proportionnellement à 1/r, il est plus important sur le conducteur interne notamment de la partie froide :

$$E_{\max \text{ Interne}} = \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{P}{\pi a^2 \ln(b/a)}} \quad [IV.1],$$

$$E_{\max \text{ Externe}} = \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{P}{\pi b^2 \ln(b/a)}}$$

a étant le diamètre interne et b le diamètre externe.

Dans le cas de TTF-III nous pouvons déduire les valeurs de champs suivantes dans la ligne coaxiale:

	Partie chaude	Partie froide
a (mm)	13,5	6,25
b (mm)	31	19,8
$E_{\max \text{ Interne}}$ (kV/m) à P = 1 MW	890	1632
$E_{\max \text{ Externe}}$ (kV/m) à P = 1 MW	387	515

Tableau IV.2 : Valeurs du champ électrique dans la ligne coaxiale du coupleur TTF-III.

II- Les différentes parties du coupleur TTF-III

II-1- La partie froide

La partie froide du coupleur TTF-III a un diamètre externe de 40 mm et une impédance caractéristique de 70 Ω . Elle est montée sur la ligne de faisceau à proximité de la cavité à alimenter. Elle partage ainsi le même vide que cette dernière. Elle est aussi munie d'une

fenêtre cylindrique en céramique permettant de délimiter l'environnement du vide partagé avec la cavité tout en permettant une propagation adaptée de l'onde EM. L'extrémité du conducteur interne de la partie froide constitue une antenne en cuivre permettant le couplage du mode fondamental au résonateur.

La température de cette partie du coupleur est soumise à trois points de thermalisation. Le premier, se trouvant au niveau de la fenêtre froide, est fixé à 70 K (figure (IV.2)) constituant un premier écran contre le flux thermique acheminé essentiellement par la partie chaude du coupleur. Les pertes thermiques ne doivent pas dépasser 6 W à ce niveau. Le deuxième est porté à 4,2 K et constitue une deuxième protection contre l'apport de calories aux cavités qui doit rester inférieur à 0,5 W. Et en fin, un dernier point qui est tenu à la température de fonctionnement du résonateur devant recevoir des flux de puissance thermiques inférieurs 0,06 W [49], [10].

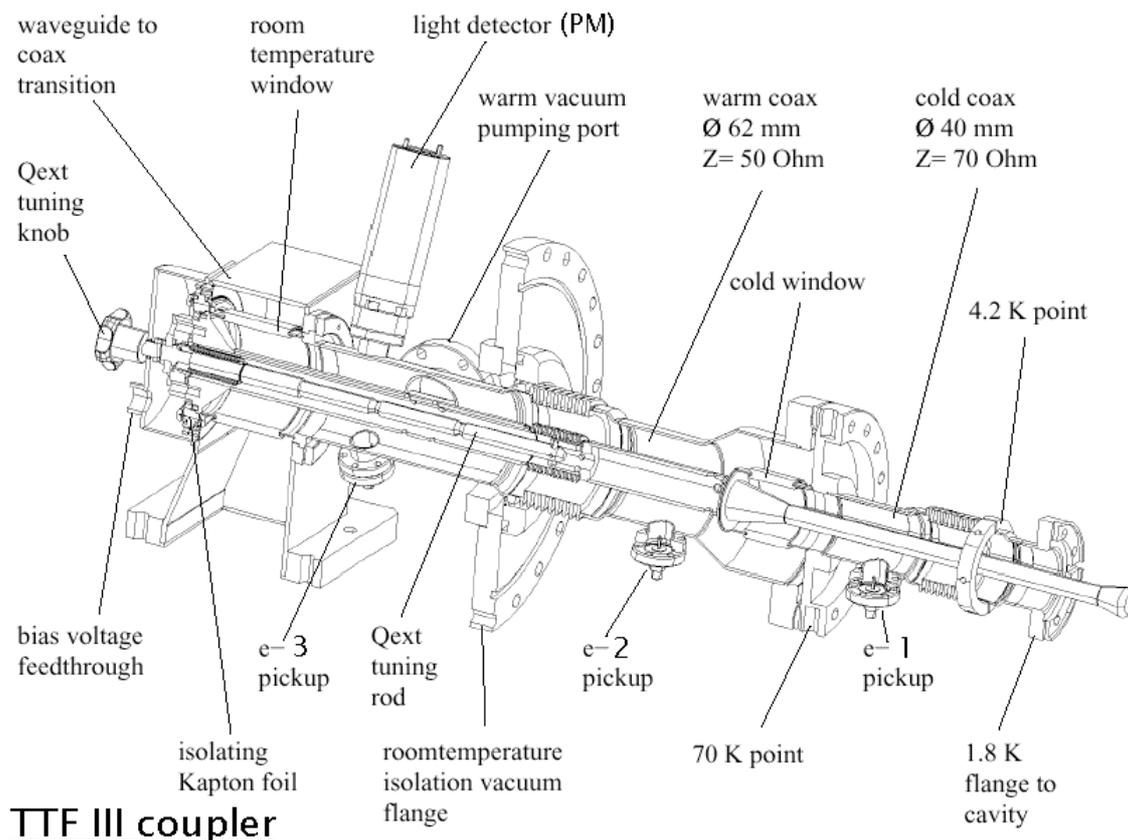


Figure (IV.2) : Schéma détaillé du coupleur de puissance.

Le conducteur externe de cette partie du coupleur est muni d'un port de mesure doté d'une antenne polarisée, appelé pick-up, afin de mesurer l'activité électronique dans cette partie.

II-2- La partie chaude

Cette partie a un diamètre de 62 mm et une impédance de 50Ω . Elle possède un vide totalement indépendant de celui de la partie froide. En effet, la partie chaude est délimitée par la fenêtre de la partie froide et d'une autre similaire mais de taille plus grande représentant une interface vide air et appelé fenêtre chaude. Le pompage de cette partie est assuré via un port muni d'une grille empêchant les fuites RF.

Contrairement à la partie froide, cette partie est exposée à la température ambiante et doit assurer le gradient de température nécessaire entre la température externe et le premier point de thermalisation.

Cette partie est aussi munie de deux pick-ups d'électrons et d'un hublot permettant l'utilisation d'un photomultiplicateur afin de mesurer l'activité photonique dans le coupleur.

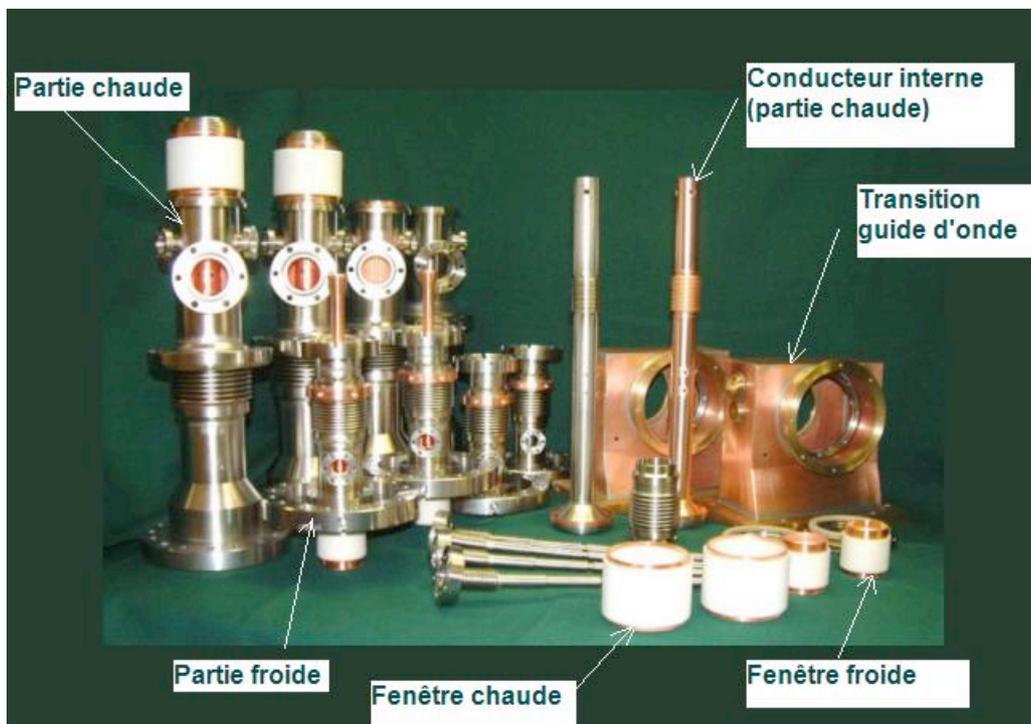


Figure (IV.3) : Parties de coupleurs désassemblés.

II-3- La transition guide d'onde

Cette partie totalement sous air joue un rôle essentiellement électromagnétique. Elle permet une adaptation progressive de l'onde électromagnétique entre le réseau de guide d'onde (mode TM_{010}) et la partie chaude du coupleur (mode TEM). Des ports de mesure sont prévus sur ce boîtier. L'un prévu pour la mesure de la température sur le métal et qui est assuré par un détecteur PT100. Les deux autres sont un détecteur d'arc et un détecteur infrarouge pour

mesurer la température sur la céramique. Le montage de cette transition guide d'onde sur la partie chaude ne doit permettre ni des fuites HF et ni des mauvais contacts susceptibles d'être à l'origine d'arc électrique. Cette partie est aussi munie d'orifices permettant l'introduction d'un gaz refroidissant en cas d'un réchauffement excessif de la fenêtre chaude.

III- Les choix technologiques et les difficultés de réalisation

Le choix de la géométrie du coupleur

L'option de couplage par champ magnétique au niveau de la cellule centrale de la cavité n'a pas été considérée pendant la conception de ces coupleurs. En effet, l'expérience acquise avec les coupleurs LEP-II [43] a montré que cette alternative est à l'origine d'augmentations de gradient de champ surfacique au sein de la cellule en question, provoquant l'émission champ néfaste à la conservation de l'état supraconducteur, ainsi qu'à la création de multipactor excessif.

En plus, bien qu'un coupleur guide d'onde ait une géométrie plus simple à concevoir qu'une forme coaxiale et présente des densités de puissance plus faibles [50], d'autres critères plus décisifs ont défendu le choix géométrique du TTF-III. En effet, la taille du guide d'onde est limitée par sa fréquence de coupure ce qui augmente sa charge thermique. Ce critère est déjà très déterminant en technologie supraconductrice comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II. De plus, le couplage électrique assuré par les coupleurs coaxiaux est facilement réglable par variation de la pénétration de l'antenne [51]. L'impédance de la ligne coaxiale peut aussi être différente de la valeur standard 50Ω par variation du rapport entre le diamètre du conducteur interne et le conducteur externe (voir l'équation [III.4]). Ceci peut permettre de déplacer les niveaux de multipactor vers des puissances plus importantes (chapitre III).

Les choix relatifs aux fenêtres

Le coupleur TTF-III possède deux fenêtres en céramique au lieu d'une. Ceci constitue une protection supplémentaire en cas de la rupture de l'une d'elles. En effet, pour que les cavités supraconductrices supportent des champs EM importants, elles doivent subir un traitement de surface et un nettoyage spécifiques. Cette préparation des cavités est très complexe et délicate à réaliser d'autant plus qu'elle est vulnérable aux risques de contamination. La moindre fuite au niveau d'une fenêtre aurait pour conséquence de mettre hors d'utilisation la cavité voisine suite à l'introduction de l'air ambiant. Le rassemblement des cavités supraconductrices dans

les cryomodules rend toute intervention pour changer les cavités contaminées très consommatrice en temps. Ainsi, l'option double fenêtres pour les coupleurs TTF-III minimise ce risque très pénalisant pour le fonctionnement de la machine.

Une autre mesure a été prise pour minimiser les risques pour les fenêtres. Leurs positions ont été choisies de manière à ce qu'elles évitent les champs électriques les plus importants.

Le choix des matériaux

Le coupleur TTF-III est essentiellement en acier inoxydable. Afin d'améliorer sa conductivité électrique, un dépôt de cuivre a donc été effectué. L'épaisseur de ce dépôt est étudiée de manière à ce que la bonne conductivité thermique du cuivre ne compromette pas la grande résistance thermique de l'acier inoxydable [25]. Un équilibre doit donc être maintenu pour que le coupleur assure son rôle de barrière thermique pour les cavités. Le dépôt de cuivre (10 et 30 μm d'épaisseur respectivement sur les conducteurs interne et externe) doit aussi répondre à des exigences très importantes telle qu'une très bonne adhésion à l'acier inoxydable. Ceci évitera qu'un décrochage de cuivre soit une source de pollution. Tous ces paramètres sont très strictement contrôlés au stade de fabrication.

De plus, les fenêtres en céramique possèdent un coefficient d'émission secondaire élevé. Ceci favorise l'établissement d'un multipactor pouvant leur infliger des dommages irréparables. Le dépôt d'une couche mince (~ 10 nm) de TiN sur les surfaces sous vide peut être une solution efficace contre ce problème [25], [52]. Le TiN est obtenu par évaporation du Titane dans une atmosphère d'ammoniac. Cette procédure et à la fois indispensable est très difficile à contrôler impose une grande expertise dans le domaine.

La couche fine de TiN peut aussi jouer un rôle d'évacuation des charges qui peuvent se déposer sur la céramique et être à l'origine de son claquage.

Le couplage variable

Le couplage variable dans le TTF-III est une option indispensable pour assurer un couplage approprié entre source RF et cavité. Néanmoins, cette option complique davantage le coupleur. Elle impose, en effet, l'utilisation d'un mécanisme de translation de l'antenne qui doit supporter lui aussi les conditions les plus contraignantes du fonctionnement du coupleur. De plus, cette option a nécessité l'introduction de soufflets sur le conducteur interne et externe. Ces derniers ne doivent pas perdre leur élasticité sous l'action des traitements thermiques subis par le coupleur. En plus, le dépôt d'une couche de cuivre d'épaisseur assez

uniforme sur leurs surfaces semble être une technique qui n'est maîtrisée que par une minorité l'industriels.

Les soufflets introduits sur cette version de coupleur leur offrent aussi une flexibilité mécanique permettant un assemblage plus souple.

La brasure et la soudure

L'utilisation de matériaux différents tels que le cuivre et les céramiques ainsi que la complication des formes géométriques dans le coupleur TTF-III implique une multitude de brasures et de soudures qui sont soumises à des conditions très strictes. Ceci permet de prévenir contre les possibilités d'avoir des bords ou des pointes pouvant être à l'origine d'une concentration du champ électrique. Ce dernier peut être capable de déclencher des décharges électriques nuisibles. De plus, il est primordial que ces soudures et brasures soient totalement étanches et que leurs procédés de réalisation n'affectent pas les caractéristiques des pièces à assembler. La présence de plusieurs diagnostics sur le coupleur est aussi à l'origine de plusieurs opérations de soudure qui doivent répondre à un cahier de charge très strict.

Les diagnostics

Malgré les difficultés de fabrication supplémentaires introduites par les diagnostics conçus sur TTF-III, ces moyens de mesures restent pour le moment un moyen indispensables pour assurer la sécurité du coupleur surtout lors de ces premières mises en fonctionnement. Ce sont à la fois des moyens de prévention contre l'emballement des phénomènes pouvant nuire au fonctionnement des coupleurs, des moyens d'étude du comportement de ces derniers et aussi de détection d'anomalies. L'utilité de certains de ces diagnostics, notamment les « pick-ups » d'électrons, sera mise en évidence dans ce mémoire dans la partie traitant le conditionnement HF.

La polarisation du conducteur interne

La polarisation en tension continue du conducteur interne du coupleur est rendue possible par l'insertion d'un condensateur entre la transition de guide d'onde et la partie chaude du coupleur. L'intérêt et l'utilisation de la polarisation seront évoqués plus en détail dans le chapitre VIII.

Chapitre V

Le test et le conditionnement HF des coupleurs TTF-III

Sommaire :

- I- Le rôle du conditionnement HF
 - II- La procédure de conditionnement des coupleurs TTF-III et l'intérêt de son automatisa-tion
 - III- L'infrastructure et les moyens consacrés pour le conditionnement des coupleurs au LAL
 - IV- Les procédures de préparation des coupleurs TTF-III au conditionnement
 - V- Le programme de pilotage automatique du conditionnement
 - VI- La mise en œuvre du premier conditionnement automatisé au LAL
-

I- Le rôle du conditionnement HF

I-1- La nécessité du conditionnement HF

Nous avons évoqué précédemment la grande influence que peut avoir la HF sur un coupleur de puissance (chapitre II). Les phénomènes qui y sont régis sont fortement liés à l'état de surface du composant HF. Un coupleur de puissance HF qui répond entièrement à son cahier des charges ne peut pas être directement utilisé dans les conditions nominales de son fonctionnement. Un premier passage brusque à une puissance HF assez importante dans un tel composant est généralement à l'origine de déclenchement d'une vive activité électronique ainsi que d'importants dégazages. Un tel comportement est non seulement nuisible aux conditions de fonctionnement de l'accélérateur mais constitue également un danger imminent pour le coupleur et la cavité.

De plus, la complexité des procédés de fabrication des coupleurs pour les cavités supraconductrices, comme nous l'avons déjà expliqué, peut être la source de quelques imperfections telles que des micro-pointes et certaines contaminations des surfaces. L'influence de ces dernières sur le fonctionnement de ces composants sous hauts champs EM

ne peut être connue que suite à des tests de validation. De plus, l'assemblage des différentes pièces du coupleur en une seule entité doit aussi être testé.

Face à ces problèmes les coupleurs de puissances HF pour les cavités supraconductrices ne peuvent devenir fonctionnels que suite à leur passage par une étape primordiale de préparation au fonctionnement appelée test et conditionnement HF des coupleurs. Il s'agit d'adapter progressivement les coupleurs à fonctionner à des puissances EM de plus en plus élevées tout en vérifiant leurs capacités à atteindre les performances de fonctionnement HF considérées en stade de conception. Les deux opérations sont réalisées simultanément dans une même procédure que nous allons appeler simplement « procédure de conditionnement HF ».

Les récentes performances atteintes en champs accélérateurs dans les cavités supraconductrices soumettent les coupleurs à des contraintes de fonctionnement supplémentaires limitant l'expérience acquise pour un conditionnement efficace à ces niveaux de puissances. Actuellement, il n'existe pas de procédure de conditionnement standard pour les coupleurs. En général, les laboratoires élaborent des procédures optimales pour leurs coupleurs [53]. Néanmoins, l'objectif final est toujours le même : avoir des coupleurs suffisamment préparés pour assurer leurs rôles dans toutes les conditions de fonctionnement.

I-2- L'action du conditionnement HF sur le coupleur et la nécessité de la réduction de la durée de cette procédure

Les surfaces des coupleurs, étant contaminées par l'air ambiant, ont généralement un comportement, vis-à-vis de la HF, qui est très différent de celui du matériau à l'état pur. La mise sous vide de ce composant n'est pas suffisante pour éliminer ces condensas. L'envoi de la puissance HF pendant le conditionnement engendre un processus actif beaucoup plus efficace. L'excitation des surfaces par l'onde EM déclenche une multiplication d'électrons plus ou moins énergétiques qui, en entrant en collision avec les différentes parois, stimulent les dégazages des surfaces et peuvent réduire le coefficient d'émission secondaire de ces derniers par le processus de bombardement d'électrons décrit précédemment (chapitre III). Ainsi le conditionnement permet à la fois un nettoyage plus efficace des surfaces et une meilleure immunité contre les multipactors stables.

En réalité, le conditionnement permet de stimuler les phénomènes nocifs au fonctionnement du coupleur d'une manière graduelle tout en gardant leurs magnitudes au dessous des seuils dangereux, de façon à les éliminer progressivement. En effet, le phénomène du multipactor et l'émission champ contribuent tous les deux à l'activité électronique dans le coupleur pendant

le conditionnement et peuvent constituer des générateurs d'électrons pour entretenir le bombardement de ces particules sur les surface.

En effet, d'une part, nous avons remarqué précédemment (chapitre III) que l'augmentation progressive de la puissance permet de rencontrer en premier lieu les multipactors ayant les ordres les plus élevés. Ces derniers sont les moins stables et s'étendent sur les intervalles de puissances les plus larges. Ainsi, l'accroissement contrôlé de la puissance dans le coupleur permet d'exciter ces ordres et de les maintenir un temps assez long, en contrôlant la puissance. Lorsque l'état des surfaces a suffisamment changé, il est possible d'augmenter davantage la valeur du champ EM. Ainsi, l'effet des électrons générés par le multipactor sera un facteur réducteur de ce même phénomène. En atteignant des puissances assez importantes pour l'établissement de multipactors d'ordres inférieurs, et donc plus stables, l'état de surface sera déjà beaucoup moins favorable à la création du phénomène d'avalanche que ce qu'il l'était avant le début du conditionnement. D'autre part, l'émission champ est directement liée à la valeur du champ EM dans le coupleur. Par conséquent, l'augmentation progressive de la puissance pourrait maintenir ce phénomène à un niveau assez faible alors que l'amélioration de la surface se poursuit.

L'activité électronique entretenue dans le coupleur pendant le conditionnement induit un dégazage continu des surfaces. Cependant, il est primordial de garder le vide au-dessous d'un certain seuil pour éviter l'établissement d'arcs électriques. Par conséquent, la procédure de conditionnement doit garantir un maintien efficace de l'équilibre fragile qui existe entre la présence d'une activité électronique suffisante pour améliorer l'état de surface et la protection de la structure contre l'établissement d'un multipactor stable. Ceci doit s'effectuer tout en empêchant la dégradation du vide ou une augmentation trop importante de la puissance ce qui pourrait générer un arc électrique.

Toutefois, une progression trop lente de la procédure de conditionnement peut être très pénalisante en temps. Ce critère est, en effet, d'autant plus important que le nombre de coupleurs à conditionner est grand. Prenons l'exemple d'une procédure non optimisée d'une paire de coupleurs nécessitant plus qu'une semaine de conditionnement continue. Pour des projets utilisant un nombre important de coupleurs, tel que ILC, ceci peut se traduire par un temps total de conditionnement de coupleurs de plusieurs années [54]. Les conséquences d'une telle durée peuvent être très pénalisante pour la date du début de la mise en marche de l'accélérateur. Il est donc évident qu'une réduction significative du temps de conditionnement représente un gain considérable pour les grands projets d'accélérateurs linéaires. Par

conséquent, la procédure de conditionnement HF des coupleurs doit être optimisée au maximum.

I-3- La nécessité du nettoyage des coupleurs avant leur conditionnement

Le conditionnement HF n'est malheureusement pas la solution miracle pour qu'un coupleur soit entièrement opérationnel. Il doit forcément être précédé par une procédure de nettoyage rigoureuse de toutes les parties des coupleurs, notamment celles qui partageront le même vide que la cavité. Faute de propreté adéquate, plusieurs cas peuvent se présenter. En effet, la procédure de conditionnement peut se trouver incapable d'évoluer au-dessus d'un certain niveau de puissance insuffisant pour valider le bon fonctionnement du coupleur. Un autre scénario plus dramatique, consistant en l'apparition d'une décharge électrique provoquant des résultats irréversibles, peut aussi avoir lieu. De toute manière, le conditionnement HF n'est pas censé réaliser tout seul les conditions de propreté suffisantes pour répondre aux exigences imposées par la cavité supraconductrice.

Toutes sortes d'impuretés peuvent contaminer les coupleurs. La nature de ces éléments et leurs quantités auront une grande influence sur le comportement du coupleur (voir le chapitre III). Les hydrocarbures constituent les éléments les plus problématiques pour le passage de la puissance dans le coupleur. Leur élimination est donc indispensable avant l'utilisation du coupleur. De plus, les impuretés qui peuvent se coller aux surfaces du coupleur peuvent être consommées par évaporation sous l'effet de la HF. En cas d'abondance, ils peuvent être à l'origine de claquages nocifs pour l'état de surface. Ainsi, le nettoyage des coupleurs doit garantir une élimination efficace de ces contaminants dans un environnement propre. La procédure de nettoyage des coupleurs de TTF-III sera décrite au cours de ce chapitre.

II- La procédure de conditionnement des coupleurs TTF-III et l'intérêt de son automatisation

Contrairement aux conditions de fonctionnement des coupleurs TTF-III sous un environnement cryogénique, leur conditionnement HF étudié ici présent se fera à température ambiante. Ils seront assemblés en paires puis conditionnés moyennant une puissance HF en onde progressive.

II-1- La disposition des coupleurs pendant le conditionnement

La procédure de conditionnement HF utilisée pour les coupleurs TTF-III est appliquée à deux coupleurs à la fois. Ces derniers seront disposés en série de manière à ce qu'ils perçoivent la même puissance HF les traversant l'un après l'autre. Chaque coupleur est monté par la bride de sa partie froide, se trouvant du côté de l'antenne (voir figure (IV.2)), sur une transition rectangulaire du guide d'onde que nous appellerons « transition froide » (voir figure (V.1)).

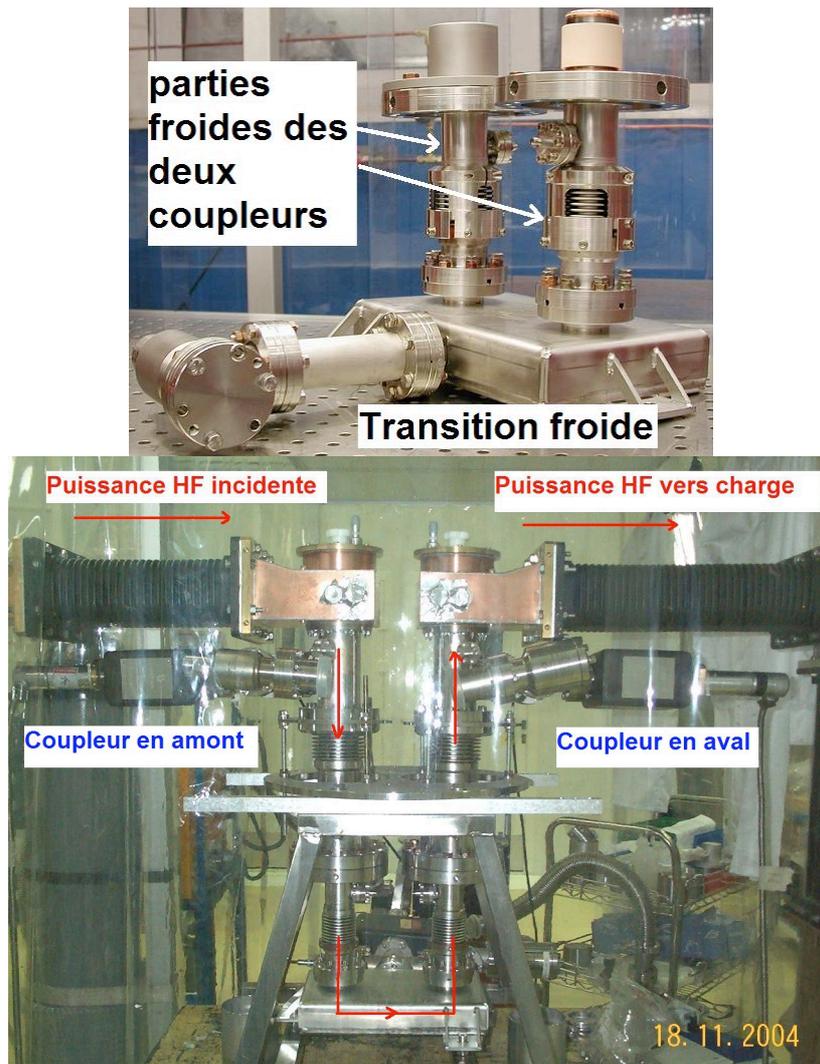


Figure (V.1) : Montage de deux coupleurs TTF-III sur « la transition froide ». En haut : le montage des parties froides d'une paire de coupleurs délimitant un seul vide commun entre elles. Le pompage de l'ensemble est assuré via le port de pompage de la transition froide. En bas : le montage complet des deux coupleurs avec l'indication du sens de propagation de la puissance.

Ainsi, la puissance HF envoyée pendant la procédure de conditionnement traversera un premier coupleur en amont en passant, dans l'ordre, par sa transition guide d'onde (sous air), puis par sa partie chaude et enfin par sa partie froide. La puissance sera transmise à la transition froide pour qu'elle remonte le deuxième coupleur, en aval, en traversant toutes ses parties dans l'ordre inverse.

Ce montage comprendra ainsi trois vides séparés (figure (V.2)): le vide de la partie chaude du coupleur en amont, le vide délimité par les deux parties froides et la transition froide, et le vide de la partie chaude du coupleur en aval. Ces vides seront notés respectivement V_{ch1} , V_{fr} et V_{ch2} (ou respectivement V_1 , V_2 et V_3)

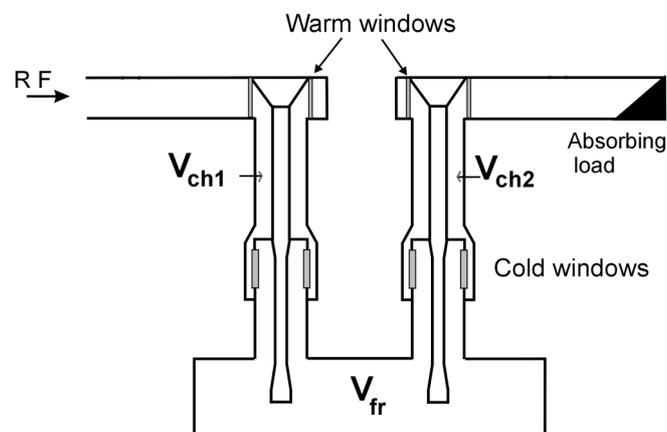


Figure (V.2) : Les différents compartiments sous vide dans l'assemblage d'une paire de coupleurs TTF-III.

II-2- L'intérêt du conditionnement en onde progressive et à température ambiante

Contrairement à l'onde stationnaire, l'emploi d'une onde progressive pendant le conditionnement permet au maximum du champ EM envoyé de balayer toute la structure. Ceci permettra de garantir l'action du conditionnement sur tout le coupleur. De plus, l'onde progressive permet aux électrons générés sur une région de surface de voyager avec l'onde (voir chapitre III). Ceci permettra d'étendre l'effet de l'impact des électrons sur plusieurs endroits des parois internes de la structure. En contrepartie, pour obtenir la même valeur du maximum de champ EM obtenu en onde stationnaire, il faut quadrupler la puissance envoyée en onde progressive.

Le choix du conditionnement des coupleurs à la température ambiante et non à leur température de fonctionnement sur cavité est dû à la difficulté de cette dernière opération. En

effet, l'expérience du conditionnement des coupleurs du LEP [43] et [44] a permis de constater que, sous froid cryogénique, une telle opération évolue très lentement et ne permet pas toujours d'atteindre la valeur de puissance maximale souhaitée. De plus, il est possible de voir l'activité du multipactor s'intensifier avec l'évolution du conditionnement à la différence de celui effectué à température ambiante. Aussi, il n'est pas exclu de pouvoir atteindre la puissance maximale mais de retrouver de nouveaux niveaux de multipactor en faisant baisser la puissance. L'arrêt d'un conditionnement en cours pendant quelques heures peut aussi provoquer la perte des effets de ce dernier. On parle alors de déconditionnement [43]. L'origine de ce problème est, en fait, la difficulté que trouve le système de pompage à éliminer les gaz désorbés par les surfaces à froid. En effet, les molécules arrachées sous l'action des impacts des électrons sont aussitôt piégées par les surfaces à la manière d'une cryopompe. Ils ne peuvent pas ainsi atteindre les ports de pompage. Ainsi, la désorption des gaz sur les surfaces par le conditionnement à basse température ne fait que déplacer le problème mais pas l'éliminer.

Il est à noter qu'après le conditionnement HF de ces paires de coupleurs à température ambiante, il seront suffisamment préparés pour qu'ils soient montés sur des cavités où ils subiront des tests à température ambiante puis à basses températures. Ces tests représentent la validation finale de l'aptitude des coupleurs à fonctionner dans la ligne accélératrice et témoigneront au même titre de l'efficacité du conditionnement HF à température ambiante déjà effectué. Ces tests seront décrits ultérieurement dans le chapitre VI.

II-3- Le principe de la procédure de conditionnement HF des coupleurs TTF-III

Pendant le conditionnement il est très important de contrôler l'importance de l'activité dans les coupleurs durant l'augmentation de la puissance HF. Les niveaux de vide dans les coupleurs doivent être mesurés pour témoigner de l'importance des dégazages des surfaces. Une observation continue des courants électroniques dans le coupleur est aussi primordiale pour avoir une image sur l'intensité des phénomènes responsables de la production des électrons tel que les multipactors et l'émission champ. Cela permettra de prévoir certaines décharges électriques présentant un éventuel danger pour les coupleurs.

La procédure de conditionnement HF des coupleurs TTF-III repose sur la démarche suivante : au début, la puissance HF est envoyée à la paire de coupleurs sous forme d'impulsions courtes ($\Delta T = 20 \mu s$) à la fréquence de 2 Hz tout en augmentant la puissance progressivement de 1

kW à 1MW. Cette augmentation sera effectuée en fonction des niveaux des vides V_{ch1} , V_{fr} et V_{ch2} . En effet, tant que le vide est au dessous d'un premier seuil V_{seuil1} , la puissance peut être augmentée périodiquement d'un pas ($\Delta P = 0,1$ dB) après un temps d'attente ($t = 30$ s). Si l'un des vides dépasse ce seuil, la puissance sera diminuée du même pas. A ce niveau, une autre précaution est utilisée. En effet, en cas d'un dégazage important il est possible qu'une petite diminution de la puissance ne soit pas suffisante pour que de bons vides soient récupérés. Ceci induit une plus longue exposition des coupleurs à un mauvais vide et donc la possibilité d'avoir des arcs. Ainsi un deuxième seuil du vide V_{seuil2} plus important que le premier est aussi utilisé. Si ce seuil est aussi dépassé, la puissance sera diminuée de plusieurs pas à la fois ($4 \times \Delta P$). Ceci, permettra de se placer à un niveau de puissance plus sûre pour le fonctionnement. Pendant le conditionnement, les vides et les courants électroniques mesurés ne doivent jamais dépasser des valeurs maximales au-delà desquels les coupleurs sont sensés être exposés à de possibles dangers éminents. Ainsi la puissance doit être immédiatement coupée pour chaque excès. Cette fonction est assurée par des moyens matériels rapides appelés interlocks permettant de couper la puissance pour chaque valeur mesurée dépassant un seuil maximal que nous appellerons « seuil interlock ». Chaque valeur de courant électronique mesurée par l'un des pick-ups doit être inférieure au seuil interlock du courant appelé $I_{e\text{Interlock}}$ et ceci quels que soient les niveaux de vide. En effet, vu la rapidité de l'emballement des phénomènes électroniques et leur nocivité, la seule résolution prise à leur rencontre est un seul seuil matériel qui arrête la puissance s'il est dépassé. Une fois coupée, la puissance ne sera remise qu'après vérification que tous les vides dans le coupleur sont relativement faibles. La puissance sera augmentée rapidement à un niveau légèrement inférieur au dernier atteint avant l'arrêt. La procédure peut alors continuer normalement.

Une fois la puissance maximale de 1 MW est atteinte avec les impulsions de largeurs égales à $20 \mu\text{s}$, elle sera maintenue constante pendant une heure entière. Nous appellerons cette opération « palier ». Elle vérifie que le coupleur peut maintenir cette puissance avec des niveaux de vides et de courants électroniques inférieurs aux seuils minimums tolérés. Tout dépassement de l'un des seuils implique une reprise du palier depuis le début. En fin de palier, la puissance HF sera coupée et tout sera repris dès le début pour toutes les largeurs d'impulsion suivantes $50 \mu\text{s}$, $100 \mu\text{s}$, $200 \mu\text{s}$, $400 \mu\text{s}$, $800 \mu\text{s}$ et $1300 \mu\text{s}$ (voir tableau V.1). Pour les deux dernières largeurs d'impulsion, la puissance maximale à atteindre est d'uniquement 500 kW.

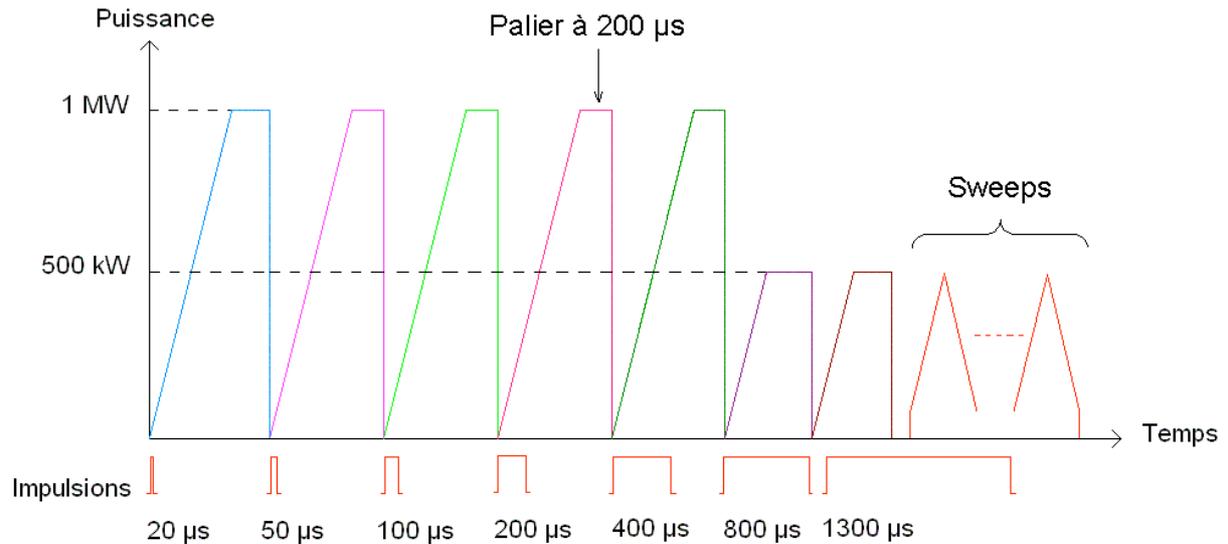


Figure (V.3): Schéma représentatif de la puissance de la variation de la puissance dans le coupleur pendant le conditionnement.

Une fois toutes ces étapes sont terminées, un test de l'efficacité du conditionnement est alors effectué pour le valider. Il consiste à faire augmenter la puissance HF dans le coupleur jusqu'à 500 kW puis la diminuer jusqu'à une valeur assez basse en faisant plusieurs cycles, appelé chacun « sweep ». L'opération se déroule sans intervenir les seuils primaires et secondaires du vide. La largeur d'impulsion utilisée pour cette manœuvre est 1300 µs. Le but de cette opération est de varier la puissance toujours dans un même sens pour s'assurer que ce genre de manœuvre ne provoque pas d'activité excessive dans le coupleur une fois conditionné. Une fois la puissance maximale est atteinte, la puissance est diminuée avec la même vitesse de montée pour repasser par les mêmes niveaux de puissance. Les seules protections utilisées seront donc les interlocks. Si l'un d'eux se déclenche, tout le conditionnement est alors à refaire.

		Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4	Etape 5	Etape 6	Etape 7	Sweeps
Largeur d'impulsion (µs)	(ΔT)	20	50	100	200	400	800	1300	1300
Puissance minimale (kW)	(P_{\min})	1	1	1	1	1	1	1	50
Puissance maximale (kW)	(P_{\max})	1000	1000	1000	1000	1000	500	500	500

Tableau V.1: Les différentes étapes du conditionnement HF de TTF-III.

II-4- Les mesures de sécurité pendant le conditionnement

Afin de pouvoir mener le conditionnement HF des coupleurs TTF-III en toute sécurité, ces derniers sont dotés de plusieurs diagnostics permettant d'observer leurs comportements (voir chapitre IV). Toutes les mesures effectuées sont reliées à des interlocks pour protéger les coupleurs des éventuels incidents. En dehors de ceux qui sont utilisés pour les vides et les courants électroniques, deux de ces interlocks sont destinés aux deux photomultiplicateurs montés sur les parties chaudes de la paire et qui surveillent les activités photoniques pendant le fonctionnement. Les fenêtres chaudes peuvent aussi être victimes d'arcs électriques susceptibles de se déclencher de leur côté sous air. Un détecteur d'arc relié à un interlock provoquera l'arrêt immédiat du conditionnement au moindre événement. Cette fenêtre est aussi protégée contre l'élévation excessive de température par un détecteur infrarouge et un détecteur PT100. Ces deux détecteurs sont reliés à des interlocks se déclenchant à des températures atteignant les limites tolérées ($T_{\text{Interlock}}$) par la céramique de la fenêtre. Les limites imposées sur les valeurs des signaux mesurées sur les coupleurs sont illustrées dans le tableau V.2. En dehors de tous ces interlocks pour protéger les coupleurs, d'autres sont utilisés pour protéger la chaîne de puissances de tout dysfonctionnement.

Vide	Premier seuil	V_{seuil1}	2×10^{-7} mbar
	Deuxième seuil	V_{seuil2}	4×10^{-7} mbar
	Seuil interlock vide	$V_{\text{Interlock}}$	1×10^{-6} mbar
Courant électronique	Seuil interlock courant	$I_{e\text{Interlock}}$	5 mA
Activité photonique	Seuil interlock photomultiplicateur	$PM_{\text{Interlock}}$	1 Lux
Température	Seuil interlock infrarouge	$T_{\text{Interlock}}$	85 °C
Arc électrique	Déclenchement d'interlock en tout ou rien		

Tableau V.2 : Seuils imposés sur les signaux mesurés par les diagnostics pour protéger les coupleurs pendant leur fonctionnement.

II-5- L'intérêt de l'automatisation du conditionnement

La grande importance attachée à la réduction de la durée du conditionnement des coupleurs TTF-III incite fortement à l'automatisation de cette procédure. Ceci rendra cette opération totalement autonome et continue ce qui permettra de s'affranchir des heures conventionnelles du travail du personnel qui aurait à la diriger. En plus, l'automatisation permet de réduire les erreurs de manipulations et garantir des interventions rapides en cas de problème pour réduire

la valeur de la puissance HF sans être obligé d'arrêter la procédure. L'automatisation d'une procédure de conditionnement est aussi le meilleur moyen de la respecter rigoureusement et d'assurer de sa reproductibilité d'une manière identique. Ceci facilite l'étude des comportements des coupleurs et l'optimisation de la procédure en question.

Afin de pouvoir profiter de tous les avantages de l'automatisation, il est essentiel de créer un programme permettant de gérer avec le moins de risques possibles toutes les situations qui peuvent avoir lieu pendant le conditionnement. Ce programme doit donc intégrer l'état de fonctionnement de la chaîne de puissance dans la procédure de conditionnement.

III- L'infrastructure et les moyens consacrés pour le conditionnement des coupleurs au LAL

Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire possède une infrastructure complète pour la réception des coupleurs sortis d'usine, leur conditionnement puis leur stockage avant l'envoi à DESY. Cette infrastructure comporte :

- un banc de contrôle de la qualité de fabrication des coupleurs ;
- une salle blanche pour le nettoyage et le montage des coupleurs ;
- une station de déminéralisation de l'eau à utiliser pendant le nettoyage ;
- un four pour le traitement thermique des différentes parties du coupleur ;
- une installation de pompage et de détection des fuites ;
- et une source de puissance HF munie d'un réseau de guides d'onde pour alimenter les coupleurs.

III-1- Le banc de contrôle des coupleurs

Avant d'entamer une procédure de préparation au conditionnement, les coupleurs reçus au LAL sont contrôlés afin de noter les imperfections de fabrication et dénoncer les non-conformités visibles. Pour chacune des parties chaude et froide, une liste des points à examiner est dressée. Elle porte essentiellement sur la qualité du cuivrage, particulièrement au niveau des soufflets et à proximité des soudures et des brasures ainsi que sur la qualité de l'application de ces deux derniers procédés. En effet, en matière de brasure et de soudure, il est important de :

- ne pas introduire des pointes ou des bords marqués pouvant être à l'origine de concentration de champs ;

- et de limiter, pendant l'action de soudure, les projections de matériaux pouvant être à l'origine des contaminations indésirables de la céramique.

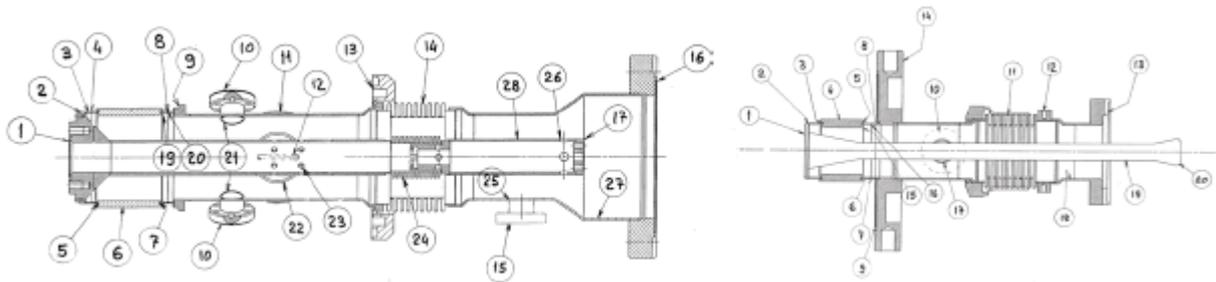
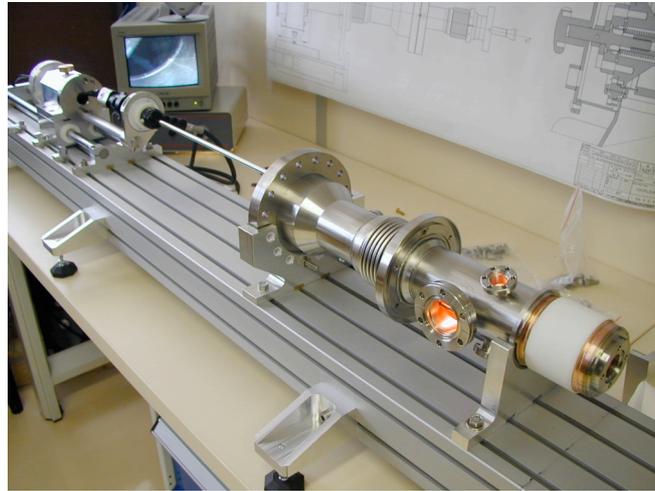


Figure (V.4) : Le banc de contrôle des coupleurs à la réception et les différents points sensibles à inspecter. Sur la photo ci-dessus, l'endoscope est introduit dans une partie chaude d'un coupleur permettant ainsi de visualiser son état interne sur un écran.

Le contrôle du coupleur de l'intérieur est assuré grâce à un banc muni d'un endoscope équipé d'une caméra CCD (figure (V.4)). Les anomalies sont notées et enregistrées en vue de comprendre l'influence de certaines d'entre elles sur le comportement des coupleurs lors du conditionnement. Ces informations peuvent être d'une grande utilité surtout en stade d'industrialisation.

III-2- L'infrastructure de nettoyage des coupleurs au LAL

Le nettoyage des coupleurs TTF-III répond à une procédure de nettoyage très stricte. Ils doivent être manipulés sous une atmosphère très contrôlée et suivre un traitement leur assurant une propreté semblable à celle des cavités avant qu'ils soient hermétiquement fermés. Pour ce faire, le LAL s'est équipé d'une salle blanche comprenant un compartiment

classe¹ 1000 et un deuxième de classe 10 (voir figure (V.5)). Une cuve de nettoyage à ultrason est utilisée dans cette salle pour laver les pièces du coupleur. L'eau utilisée pour le nettoyage des coupleurs à l'intérieur de cette salle est fournie par une station d'eau ultra-pure (figure (V.6)) permettant de fournir une eau ayant une résistivité de 18 MΩ.cm [55].



Figure (V.5) : Schéma représentatif de la salle blanche pour le nettoyage des coupleurs au LAL [56].

Un four (figure (V.6)) permettant de monter à une température allant jusqu'à 400°C sous une pression de 10⁻⁶ mbar s'ouvre sur la partie classe 10 de la salle blanche. Il permettra ainsi un étuvage des parties des coupleurs pendant plusieurs heures qui peuvent ensuite être montées dans l'environnement de la classe 10.

¹ Un environnement est dit de classe n s'il ne contient pas plus que n particules de diamètres supérieurs à 0,5 µm dans un volume d'un pied cube.



Figure (V.6) : A gauche : station de production d'eau ultra pure. A droite : four pour l'étuvage des coupleurs donnant sur la partie classe 10 de la salle blanche.

III-3- La chaîne de puissance

III-3-1- Présentation de la chaîne de puissance

La chaîne de puissance utilisée par le LAL pour le conditionnement des coupleurs comprend essentiellement un modulateur de puissance (la source HT) alimentant, via un transformateur, un klystron TH2104 (la source HF). Ce dernier injecte la puissance HF dans un circuit de guides d'ondes le reliant aux coupleurs et aux charges montées aux extrémités de ce réseau.



Figure (V.7) : Source de puissance. A gauche : système de contrôle/commande de la source de puissance. Au milieu : modulateur. A droite : klystron monté sur le transformateur de tension.

L'ensemble modulateur klystron permet d'atteindre une puissance maximale de sortie de 5 MW et une largeur d'impulsion de 1,8 ms pour une fréquence 1,3 GHz. Le taux de répétition maximal de l'ensemble est de 10 Hz [57].

III-3-2- Principe de fonctionnement

Un premier transformateur du modulateur convertit la tension du réseau en une tension de 600 V. Cette dernière est utilisée pour alimenter un convertisseur AC/DC à découpage qui fournit une tension continue variable entre 0 et 10 kV. Cette tension continue charge une série de 3 condensateurs parallèles qui se déchargent partiellement pour donner l'impulsion de commande du canon du klystron. Cette dernière sera amplifiée, juste avant, par un transformateur de tension éleveur de rapport 1:12 qui permet de fournir une impulsion allant jusqu'à 120 kV et 90 A.

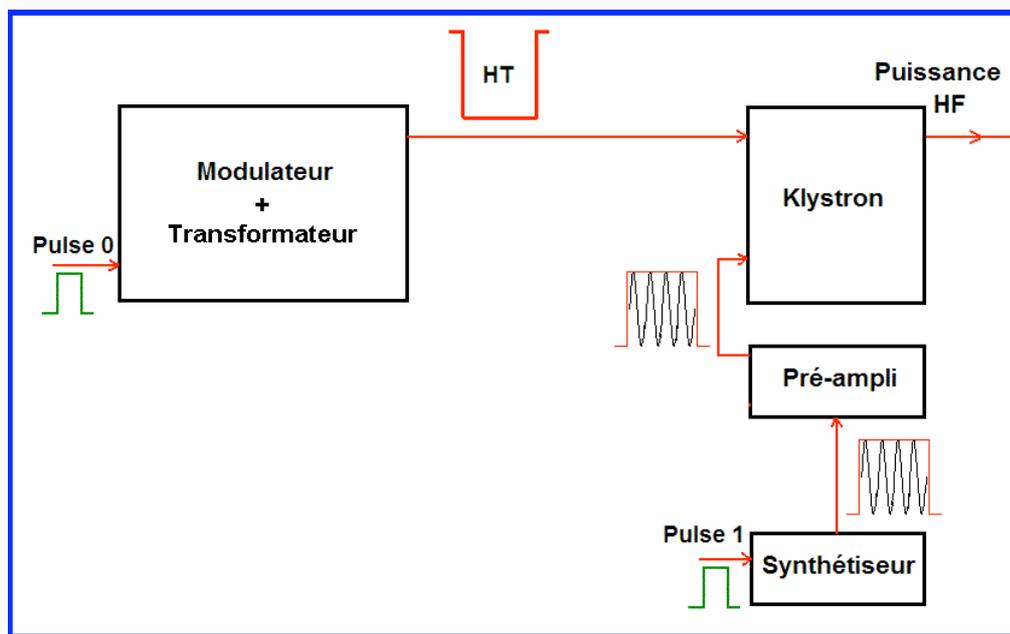


Figure (V.8) : Principe de fonctionnement de la chaîne de puissance

Le signal HF à 1,3 GHz est généré en premier lieu par un synthétiseur. Le klystron reçoit ce signal après son amplification par un préamplificateur (400 W). Cette HF est déjà modulée par un train d'impulsions synchrones avec d'autres envoyées au modulateur pour la génération des impulsions HT. La HF amplifiée par le klystron peut atteindre 5 MW.

L'ensemble de la chaîne de puissance est relié à un système de refroidissement assuré par une circulation permanente de l'eau déminéralisée. Pour des raisons de sécurité, un châssis

d'interlock est aussi utilisé. Il contient les cartes électroniques du traitement de l'ensemble des états et des mesures envoyés par les différents capteurs.

La partie commande de la chaîne de puissance est reliée aux interlocks ainsi qu'aux sous-systèmes contrôlables de l'ensemble. Elle permet la mise en marche et le pilotage de l'ensemble, une fois les conditions de sécurité sont vérifiées. Elle est reliée à la partie haute tension par une liaison en fibre optique pour des raisons de compatibilité électromagnétique. Les cartes électroniques sont aussi protégées par des condensateurs de filtrage. La partie commande peut être pilotée par ordinateur.

III-4- Le réseau HF pour l'alimentation des coupleurs

Le réseau HF est le circuit de guide d'onde que traverse l'onde électromagnétique générée au niveau du klystron pour atteindre le(s) coupleur(s) à conditionner. Il doit assurer le minimum de perte possible de la puissance et réduire au minimum les réflexions. La présence d'un isolateur (ou circulateur) dans, ce réseau, est indispensable pour protéger le klystron des éventuelles réflexions de la puissance.

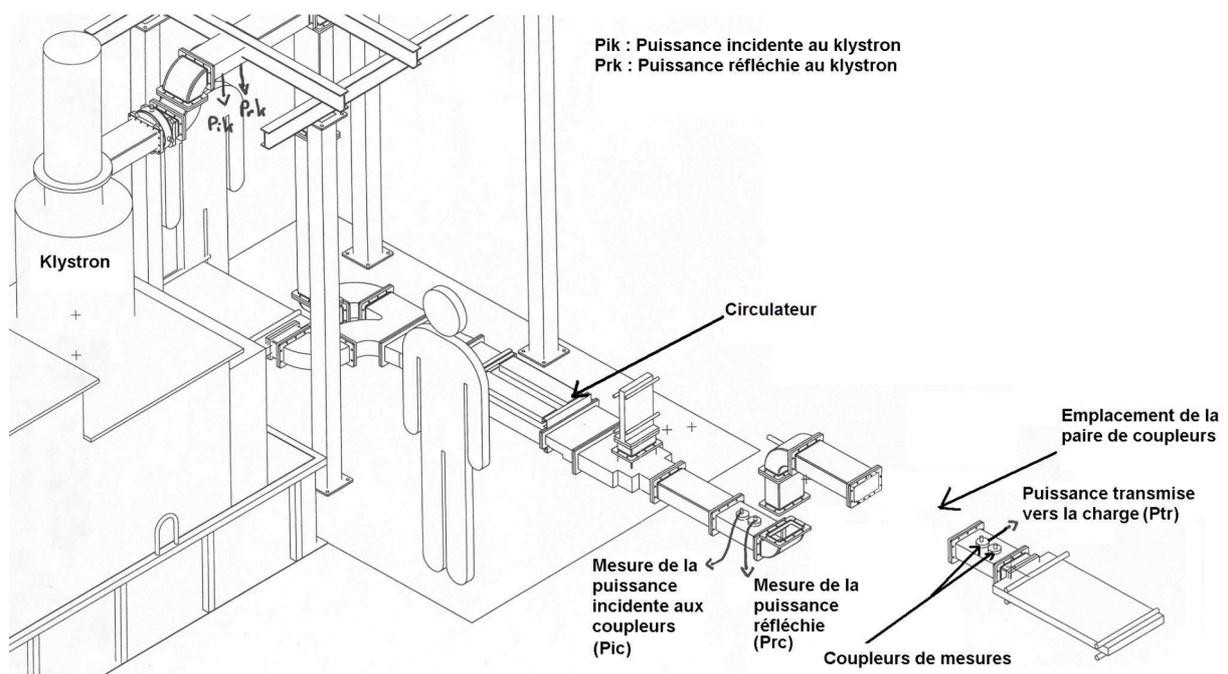


Figure (V.9) : Réseau HF pour le conditionnement des coupleurs.

Ce réseau est muni aussi de coupleurs de mesures. Ces coupleurs permettent de mesurer la puissance HF incidente et réfléchie à la sortie du klystron, à l'entrée des coupleurs et à leurs

sorties. Des charges adaptées munies d'un système de refroidissement sont utilisées aux extrémités du réseau et permettent d'éviter les réflexions.

IV- Les procédures de préparation des coupleurs TTF-III au conditionnement

Les différentes parties des coupleurs sont reçues au LAL en pièces détachées. Elles subissent, tout d'abord, un contrôle général de conformité. Ensuite, elles sont nettoyées, étuvées et assemblées en paires sans leurs transitions de guides d'onde (transitions chaudes) ; après quoi, un test d'étanchéité du montage est effectué. Les coupleurs sont alors sortis de la salle blanche et placés sous un flux laminaire continu. Le pompage des différents compartiments de vide peut ainsi commencer. Cette étape peut être accompagnée ou non d'un étuvage in-situ des coupleurs. Suite à cela, les transitions de guides d'onde sont montées sur les fenêtres chaudes. Le réglage de profondeur de pénétration des antennes dans la transition froide devient possible. Les coupleurs sont alors prêts à être conditionnés dès que les niveaux de vide seront assez bons. Ils sont par conséquent montés sur le réseau de guide d'onde pour recevoir la puissance HF.

IV-1- La procédure de nettoyage des coupleurs TTF-III au LAL

La procédure de nettoyage des coupleurs TTF-III effectué au LAL se fait en deux étapes. Une première dans le compartiment classe 1000 de la salle blanche et une deuxième dans le compartiment classe 10. Ceci n'est valable que pour les parties du coupleur qui seront sous vide pendant le conditionnement.

a) Dans le compartiment classe 1000

Toutes les parties des coupleurs ainsi que la transition froide sont placées dans la cuve à ultrasons. Elles sont ensuite immergées dans l'eau ultra pure à 50°C produite par la station de déminéralisation. Un détergent actif contre les hydrocarbures (Tikopure R33) est ensuite ajouté. L'opération de nettoyage dure 15 minutes. Une fois ce temps écoulé, ces parties sont rincées à l'eau ultra pure tout en contrôlant la résistivité de l'eau récupérée pendant cette opération (Elle doit être supérieur à 14 MΩ.cm en fin de rinçage).

b) Dans le compartiment classe 10

Toutes les parties nettoyées doivent être séchées dans ce compartiment sous un flux laminaire. Les parties froides ainsi que la transition froide sont soumises à un souffle d'azote ionisé et filtré tout en utilisant un compteur de particules. Ce dernier doit compter moins de 10 particules de 0,3 microns par pied cubique. Si ce but n'est pas atteint, les pièces doivent retourner dans la cuve ultrasons. Toutes les pièces, parties chaudes et parties froides, doivent passer par le four où elles seront étuvées sous vide (10^{-6} mbar) à 150°C pendant 35 à 40 heures. Une fois cette opération terminée, toutes les pièces seront montées, les pompes ioniques seront branchées aux ports de pompage via ces tubes et des vannes qui ont suivi un étuvage identique à toutes les autres pièces. Enfin, un test de fuites sera effectué.

IV-2- Les tests de fuites

Une fois les vannes et les pompes ioniques montées sur les ports de pompage de la paire de coupleurs dans le compartiment classe 10 de la salle blanche, les surfaces internes de l'assemblage doivent être totalement isolées de l'atmosphère externe. Faute d'une bonne étanchéité, les coupleurs risquent d'être contaminés lorsqu'ils seront exposés à l'air ambiant du laboratoire dès leur sortie de l'environnement propre. Un test de fuites doit alors être effectué à l'intérieur de la salle blanche. Pour ce faire, nous utilisons un groupe de pompage comportant une pompe primaire, une pompe turbomoléculaire et un spectromètre de masse pour la détection de l'hélium. Cette opération se déroule comme suit :

Un pompage primaire de l'une des chambres à vide de la paire de coupleurs est effectué jusqu'à atteindre 10^{-1} mbar. La pompe utilisée est une pompe primaire à membrane. Elle a l'avantage de permettre un pompage propre à la différence des pompes à palettes pouvant être à l'origine de fuite d'huile très néfaste aux surfaces internes du coupleur. Ensuite une pompe turbomoléculaire prend la relève abaissant le vide à 10^{-5} mbar. Un jet d'hélium est alors soigneusement appliqué à tous les endroits susceptible d'être à l'origine de fuite. Le grand pouvoir d'infiltration de l'hélium lui permet de s'infiltrer par la moindre fuite et de se trouver à l'intérieur de la chambre à vide. Il sera donc aussitôt détecté par le spectromètre de masse calé sur la masse atomique de l'hélium. La sensibilité de ce dispositif pour les fuites est de 10^{-10} mbar.l/s. Les coupleurs présentant des fuites dues à l'assemblage sont rassemblés et testés à nouveau.

Enfin, si l'ensemble de la paire de coupleurs est libre de toute fuite, il sera gardé sous dépression par fermeture des vannes pendant leur pompage. Ils n'auront donc pas besoin d'être pompés par des pompes primaires sur le banc de test.

IV-3- Le pompage des coupleurs

Après sa sortie de la salle blanche, un premier pompage du montage de la paire de coupleurs est effectué par deux pompes turbomoléculaires. Une première pompe est branchée simultanément aux deux parties chaudes des coupleurs et une deuxième est montée sur le port de pompage de la transition froide. Trois jauges montées le plus proche possible sur chacun des ports de pompage permettent de donner le niveau du vide dans chaque compartiment pompé avec une bonne approximation. Lorsque les niveaux de vide passent au dessous de 10^{-6} mbar, il est possible d'activer les trois pompes ioniques montées chacune à une distance optimale des ports de pompages. Ces pompes sont identiques et ont toutes une vitesse de pompage de 20 l/s. Le conditionnement des coupleurs n'est généralement lancé que si les limites du pompage sont atteintes, faute de quoi la durée de cette opération serait trop longue. Pour atteindre les niveaux de vides minimum dans les coupleurs, il est courant d'effectuer un étuvage in-situ² sur le montage pendant le pompage turbo-moléculaire. Cette opération consistant à chauffer les parois des coupleurs pendant leur pompage permet, une fois terminée, d'atteindre des vides de l'ordre de 10^{-9} mbar durant le pompage ionique.

IV-4- Le réglage des antennes

Afin de minimiser les réflexions de puissance et les pertes dans les coupleurs, les paramètres S du montage doivent présenter des paramètres S_{11} et S_{22} les plus bas possible et les paramètres S_{12} et S_{21} les plus proches possibles de 1. Pour cela, un réglage optimal des antennes des coupleurs doit être effectué afin d'obtenir un compromis entre les valeurs souhaités des S_{ij} .

Nous essayons au cours de cette manœuvre d'avoir S_{11} et S_{22} inférieurs à -30 dB. S_{12} et S_{21} doivent en même temps être de l'ordre de -0,1 dB.

Suite à cette opération la paire de coupleurs sera branchée aux réseaux HF et sera prête à recevoir la puissance.

² L'opération de l'étuvage in-situ sera plus détaillée dans le chapitre VI.

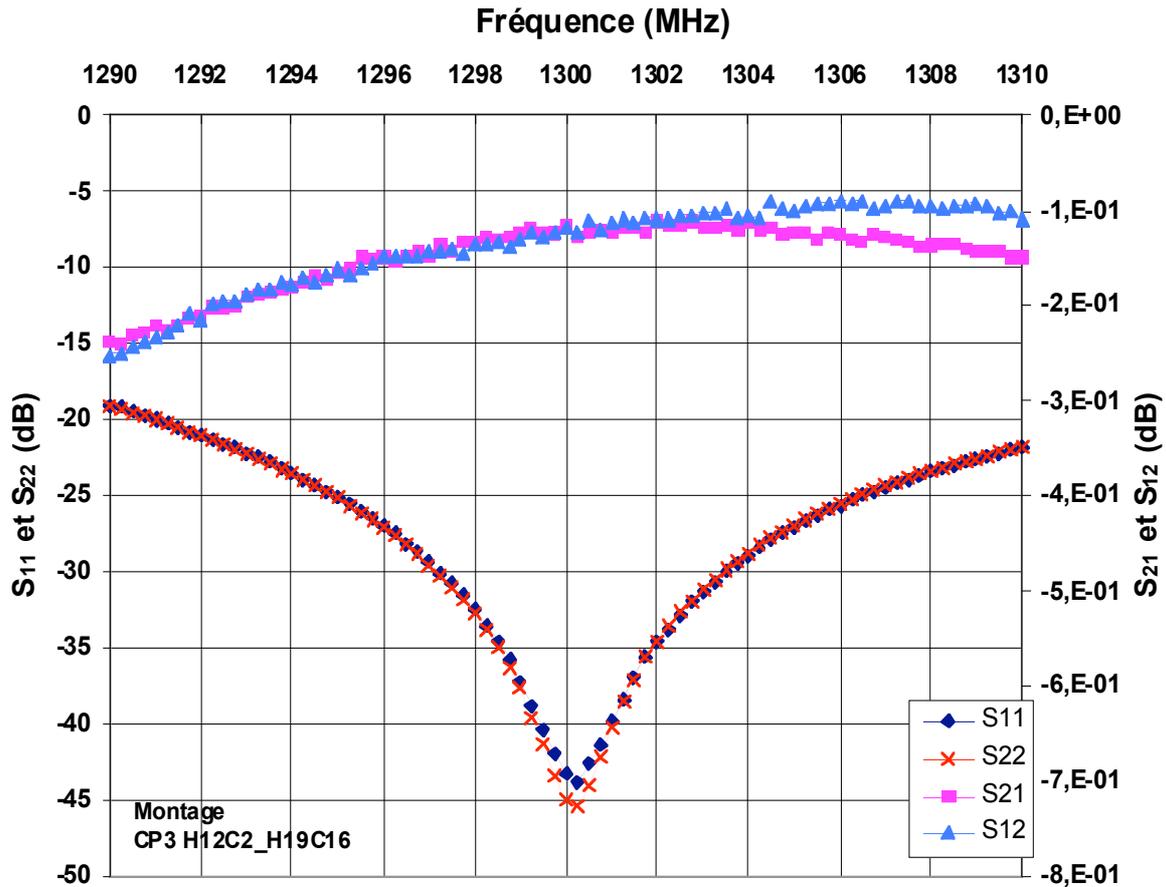


Figure (V.10) : Paramètres S d'un montage d'une paire de coupleurs TTF-III après le réglage des antennes. S_{11} , S_{22} , S_{12} et S_{21} représentent les modules des paramètres S mesurés.

V- Le programme de pilotage automatique du conditionnement

Une étape clef pour la réalisation de tout le travail exposé le long de cette thèse consiste en l'élaboration d'un programme informatique permettant le pilotage automatique de la procédure de conditionnement des coupleurs TTF-III.

Initialement, le choix de l'outil de programmation ainsi que les cartes de commande et d'acquisition ont été effectués par le service électronique du LAL. Un programme de mise en marche et d'arrêt de la chaîne de puissance a aussi été déjà effectué. Ainsi le travail à réaliser consistait en la création d'un programme fiable pour assurer le conditionnement des coupleurs en absence de toute assistance humaine.

V-1- Les critères vérifiés par le programme de pilotage du conditionnement

Afin de garantir le déroulement du conditionnement conformément à la procédure et en répondant à toutes les conditions de sécurité, le travail de programmation demandé consistait essentiellement à :

- gérer la variation de la puissance avec les délais imposés par la procédure et créer les pilotes nécessaires pour communiquer avec certains matériels ;
- assurer la synchronisation des impulsions HF et HT ainsi que la variation de la largeur de l'impulsion HF suivant l'évolution de la procédure ;
- permettre l'acquisition des grandeurs indispensables pour la gestion du conditionnement ;
- garantir l'évolution de cette opération sans aucun conflit possible entre les procédures fonctionnant en parallèle tout en vérifiant systématiquement tous les états des variables du programme qui peuvent influencer le résultat de chaque action à effectuer ;
- détecter les problèmes matériels et les déclenchements des interlocks liés aux mesures effectués par les diagnostics sur les coupleurs et arrêter le déroulement du programme de conditionnement en toute sécurité.

L'étude du comportement des coupleurs aura pour but d'optimiser la procédure de conditionnement et de mieux comprendre des facteurs qui influencent leurs fonctionnements. Ceci impose l'utilisation d'un programme d'enregistrement des acquisitions et de gestion des fichiers des données enregistrées. Ces fonctionnalités seront intégrées dans le programme principal pour gérer le conditionnement.

V-2- Description du programme et des ressources utilisées

V-2-1- Les ressources informatiques

Le programme de pilotage du conditionnement a été élaboré par le langage de programmation graphique LabView6.0. Le support du programme est un PC Pentium III utilisant un système d'exploitation Windows2000 Professionnel. Plusieurs cartes électroniques ont été utilisées pour le contrôle commande du conditionnement :

- une carte E/S tout ou rien PCI-DIO-96 pour la mise en marche et l'arrêt de la chaîne de puissance ainsi que la surveillance de tous les interlocks et leur mise à zéro ;

- une carte multifonctions E/S analogique avec 2 compteurs/timers PCI-6071E. Elle permet l'acquisition des mesures effectuées par les diagnostics et la génération des impulsions de synchronisation de la source HT et la source HF ;
- une carte GPIB pour commander le synthétiseur ;
- une interface Profibus permettant d'introduire la consigne HT au modulateur.

La commande pilotage de la station de conditionnement des coupleurs peut se résumer dans la figure (V.11).

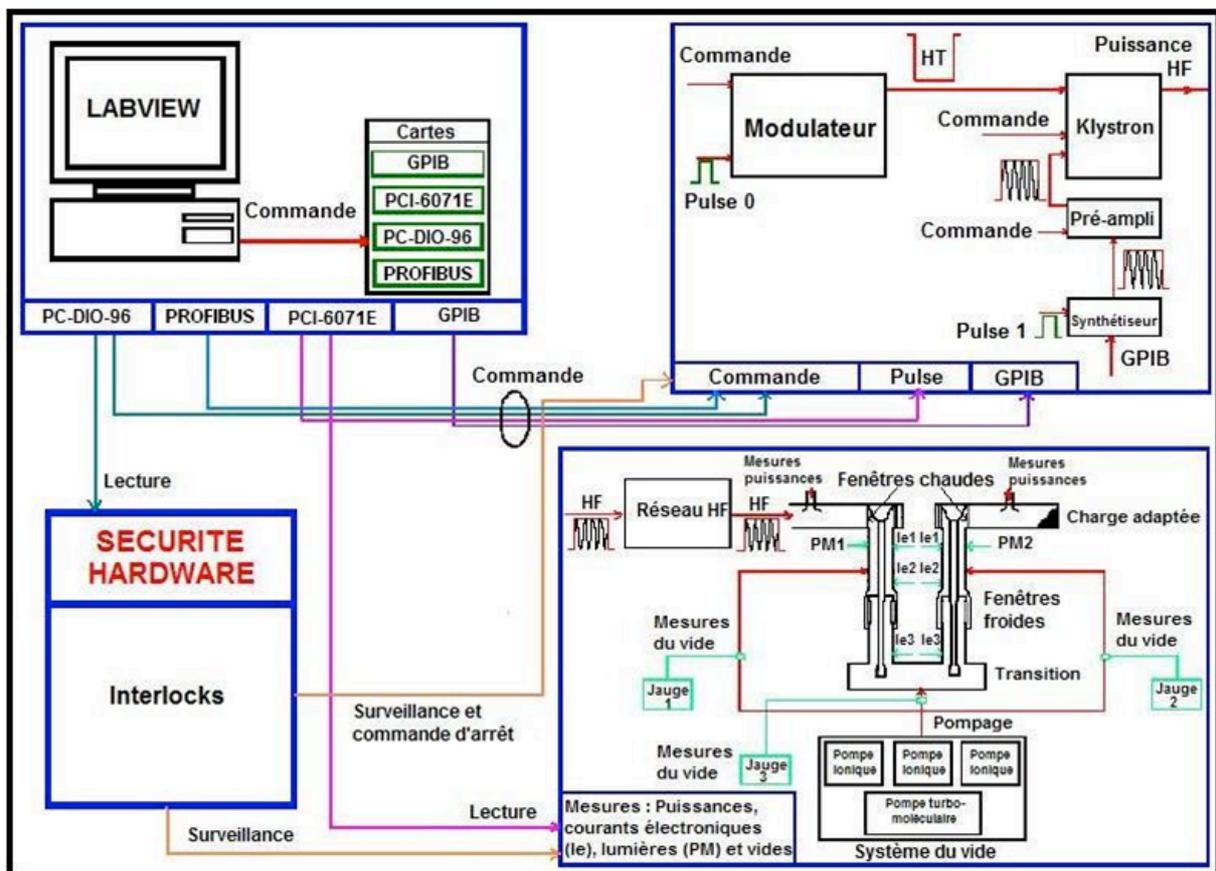


Figure (V.11) : Schéma synoptique du pilotage automatique de la station de conditionnement des coupleurs.

V-2-2- Description du programme de pilotage du conditionnement

L'automatisation du conditionnement a nécessité la mise en œuvre de plusieurs sous programmes qui communiquent entre eux pendant l'exécution de la procédure.

L'ensemble comprend essentiellement :

a) Un programme de lancement

Il permet essentiellement le lancement de la procédure de conditionnement et la configuration des paramètres initiaux. Son rôle peut se résumer en :

- la mise en marche et en arrêt de la chaîne de puissance ainsi que la lecture des états des interlocks ;
- la configuration de la procédure de conditionnement et le lancement du programme permettant son pilotage ;
- la configuration des ports d'entrées des mesures, le lancement du programme d'acquisition, l'affichage des mesures et l'introduction de commentaires sur les fichiers d'enregistrement des données
- et enfin le forçage de l'ordre correct du lancement et de l'arrêt des programmes appelés.

Des précautions ont été prises pour obliger l'utilisateur à respecter le bon ordre du lancement des différents programmes et à protéger ainsi la démarche à suivre des éventuelles erreurs de manipulation. A titre d'exemple, vu l'importance attaché à l'acquisition des données pour étudier le comportement des coupleurs, l'ensemble des programmes a été conçu de manière à ce que le conditionnement ne puisse être mis en route qu'après le lancement du programme d'acquisition. En plus, l'enregistrement des données ne peut se faire que lorsque la puissance est envoyée aux coupleurs et s'arrête au moment où le programme du pilotage de conditionnement s'interrompt. Ceci permettra d'optimiser la taille des fichiers de données.

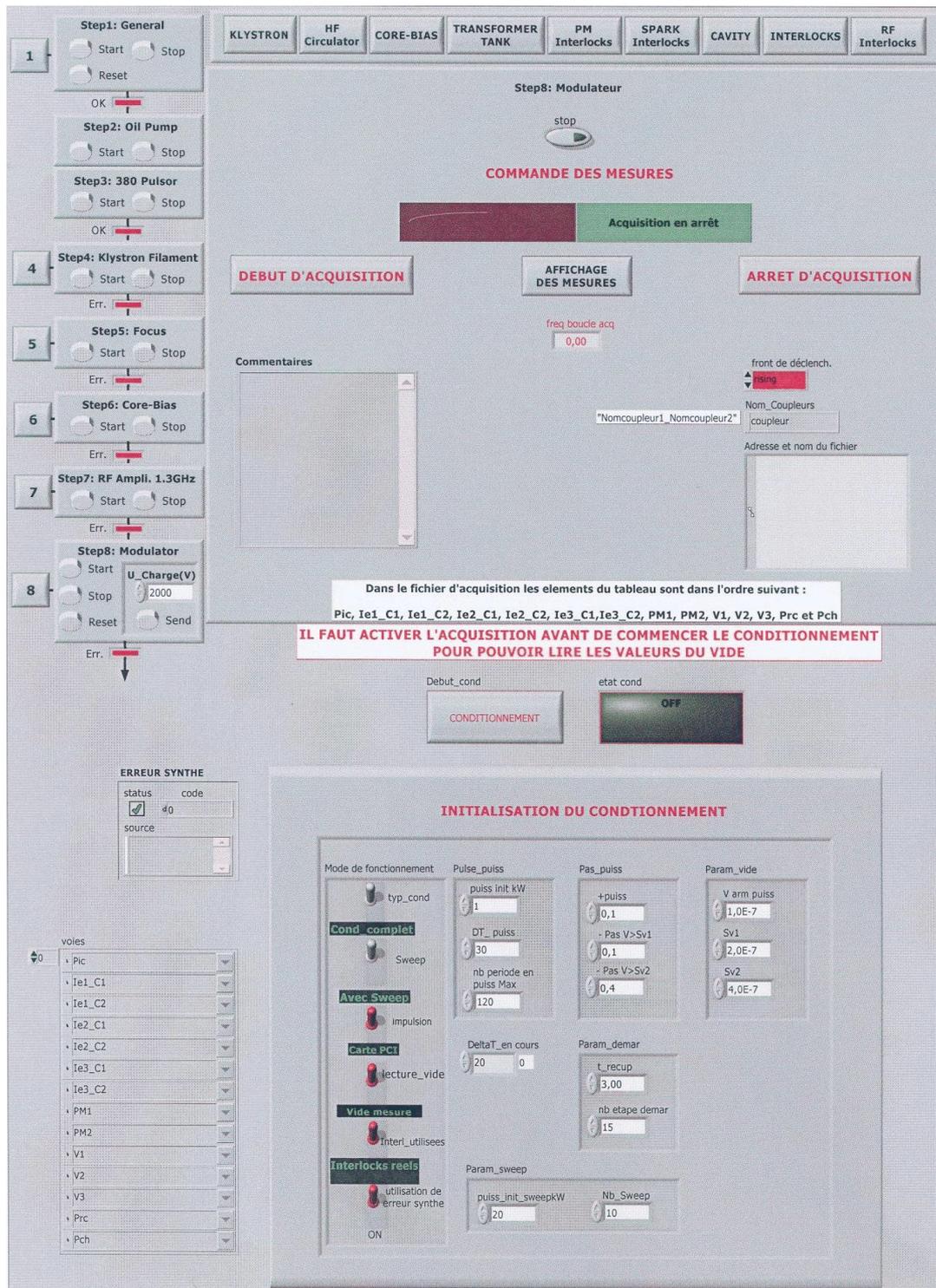


Figure (V.12) : Interface d'initialisation et de lancement du conditionnement

b) Un programme d'acquisition

Il assure essentiellement :

- le paramétrage de l'acquisition (son déclenchement, sa fréquence, la nature des fronts de déclenchement...);

- le lancement de l'acquisition et le signalement d'erreurs d'acquisition ou de problèmes de délais
- et la création automatique de fichiers d'enregistrement des données d'acquisition sous des formats très simplement exploitables avec l'introduction automatique de la fin de chaque étape de conditionnement.

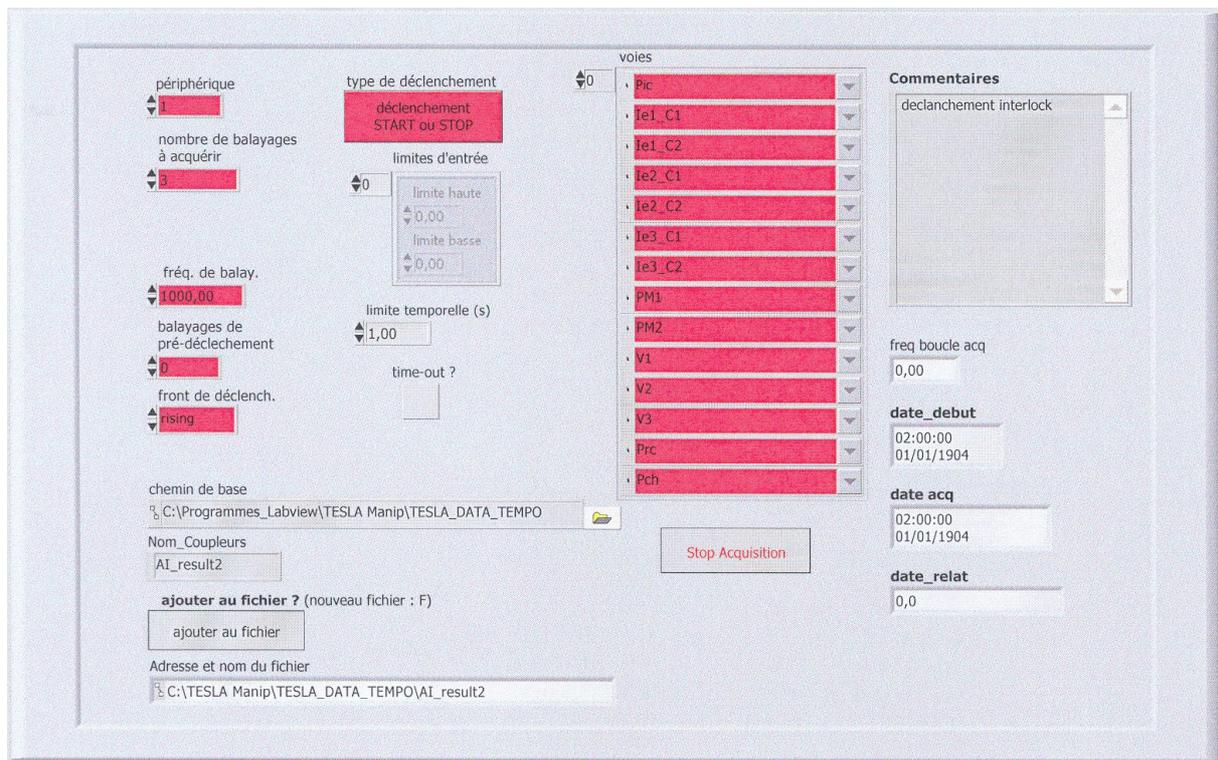


Figure (V.13) : Interface du programme d'acquisition.

c) Un programme de pilotage du conditionnement

Ce programme constitue la partie la plus importante de toute la partie logicielle élaborée et celle qui a nécessité le plus de temps de programmation. Elle intègre toutes les étapes de la procédure de conditionnement telle qu'elles étaient présentées précédemment. Un grand soin a été attaché à ce que l'exécution de chaque changement du niveau de puissance soit précédée par une vérification de l'état du fonctionnement de tous les programmes et que les consignes envoyées par le système de commande ont été reçues correctement. Les interlocks sont surveillés d'une manière continue de manière afin de permettre un arrêt de l'exécution du programme dans les meilleures conditions.

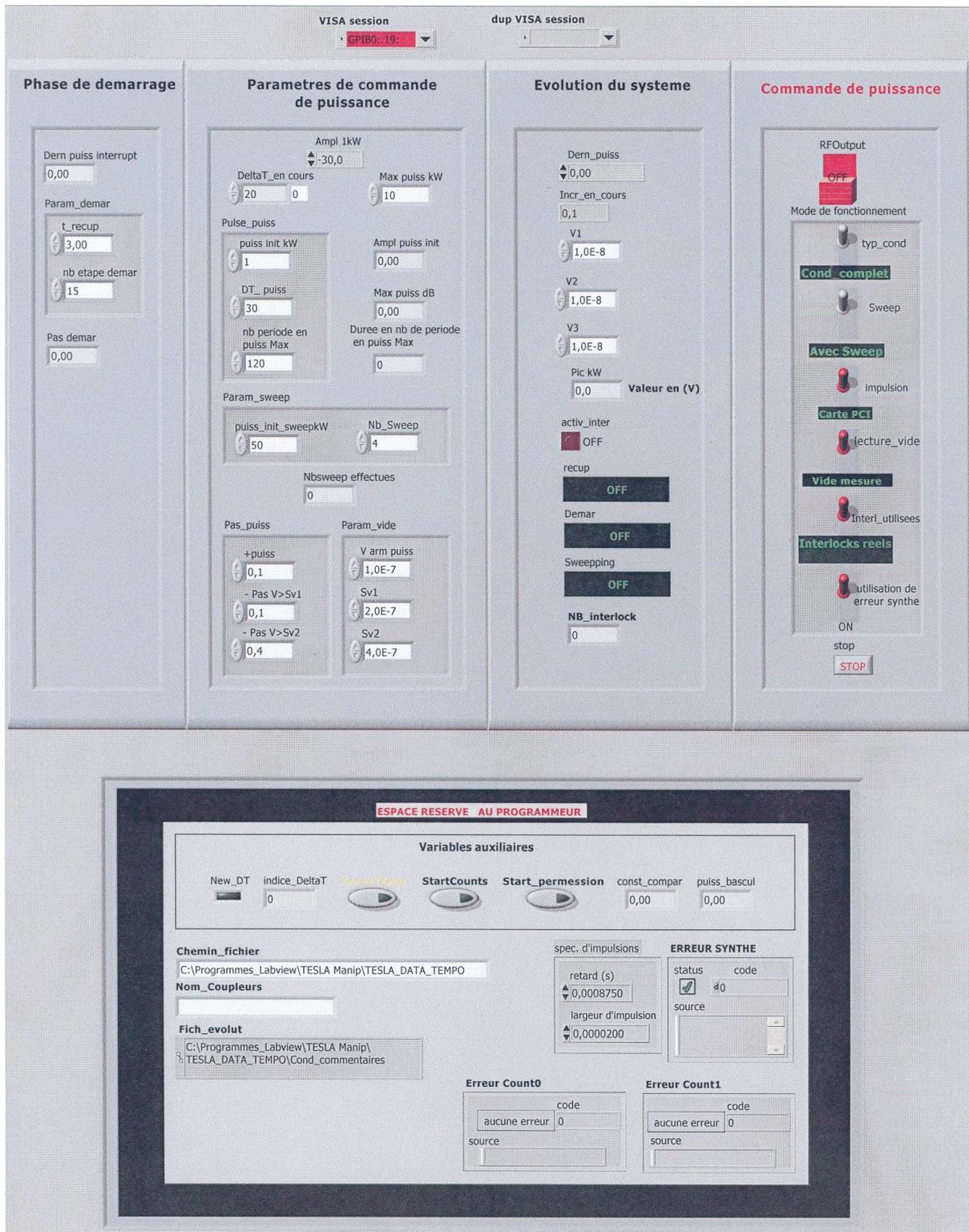


Figure (V.14) : L'interface du programme du pilotage.

Pendant le déroulement du conditionnement, un fichier décrivant la progression du programme du pilotage est généré permettant de voir les anomalies de fonctionnement en cas de problème. Ce programme gère aussi les counters/timers via d'autres sous

programmes auxquels il fait appel. Ces counters/timers permettent le contrôle de la synchronisation entre la HT et la HF, le décalage entre leurs impulsions et la largeur de l'impulsion HF. Il est capital de n'avoir aucune erreur sur la commande de ces éléments.

En cas d'arrêt de la puissance suite à un interlock, le programme change sa vitesse d'augmentation de la puissance pour balayer plus rapidement les niveaux de puissance déjà explorés tout en gardant la possibilité de basculer en un mode plus lent si les niveaux du vide deviennent mauvais.

Ce programme donne aussi la possibilité de décomposer l'opération du conditionnement en plusieurs étapes qui peuvent être testées une par une, ce qui permet de se mettre directement dans l'étape souhaitée suite à un arrêt de la procédure. Toutefois, il impose à l'utilisateur certaines restrictions afin d'éviter les erreurs de manipulation. En plus, une autre option importante a été prévue depuis le début de la conception de ce programme. Elle consiste en la possibilité de pouvoir le tester d'une manière simple et sans utilisation de signaux réels, notamment ceux relatifs aux vides et aux interlocks qui constituent les données sur lesquelles se base le système pour varier la puissance.

VI- La mise en œuvre du premier conditionnement automatisé au LAL

VI-1- L'adaptation de la chaîne de puissance à la procédure de conditionnement

Afin de pouvoir appliquer la procédure de conditionnement présentée ci-dessus de la manière la plus sûre et en se basant sur les moyens mis à notre disposition, nous avons eu à faire certains choix et à prendre certaines précautions.

Au début, il a fallu choisir entre deux moyens pour commander la puissance HF : un premier en variant la HT et un deuxième en agissant sur la sortie du synthétiseur. Concernant la première alternative, nous avons constaté que le changement de la tension de la polarisation du klystron peut être à l'origine d'une fluctuation importante de la puissance HF. Ainsi nous avons opté pour la deuxième alternative consistant à garder la HT toujours constante et à varier la puissance HF de la sortie du synthétiseur dans un intervalle de 30 dB permettant ainsi de couvrir la gamme de puissance souhaitée entre 1 kW et 1 MW.

Nous avons aussi constaté, pour le conditionnement des coupleurs, que la variation de puissance n'est pas exponentielle contrairement à ce que nous sommes censés avoir par une

variation de puissance par un pas de 0,1 dB. En effet, bien que la consigne envoyée au synthétiseur soit conforme à la procédure, la caractéristique de la sortie de la chaîne totale n'est que le produit des caractéristiques de tous ses composants (voir figure (V.8)) notamment le préamplificateur. La valeur du signal HF, correspondant à 1 MW à de puissance incidente au coupleur, donnée par le synthétiseur est choisie de manière à ce qu'elle sature le préamplificateur. Ceci permet d'imposer une limitation physique de la puissance empêchant tout excès dépassant cette valeur pour une HT fixe. En plus, lorsque la puissance HF atteint des valeurs importantes, les pas de variation de cette grandeur deviennent de moins en moins importantes en s'approchant de la 1 MW (figure (V.15)).

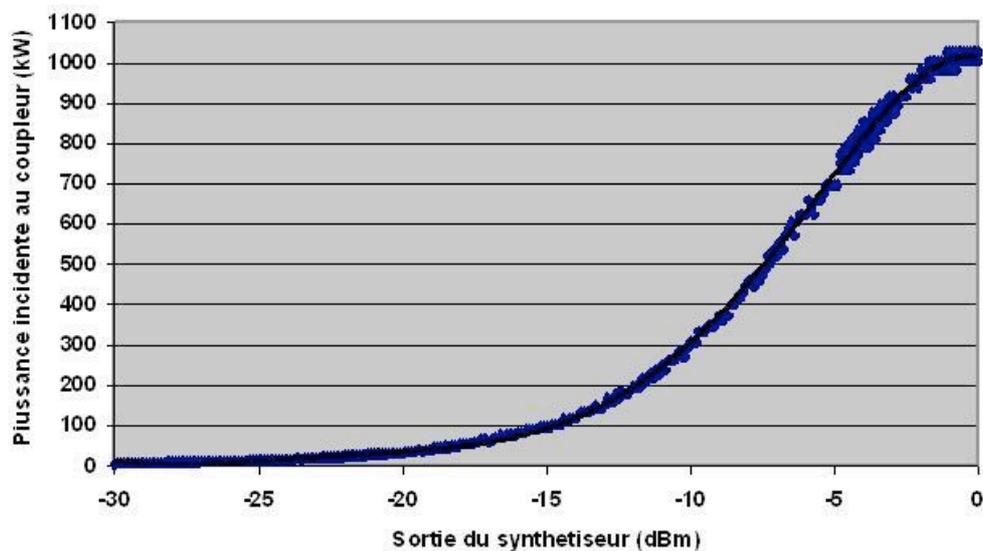


Figure (V.15) : Courbe de variation de la puissance incidente aux coupleurs en fonction de la consigne envoyée au synthétiseur à HT fixe. La gamme de variation de la puissance sur ce dernier est [-30 dBm ; 0 dBm].

Un autre détail est à prendre en compte concernant la puissance maximale à atteindre pour les différentes étapes de conditionnement. Il s'agit de la forme de l'impulsion HT qui n'est pas parfaitement plate. Ayant pour rôle de polariser la cathode du klystron, elle module son signal de sortie HF provoquant sa déformation. La forme de la HT présente certaines ondulations à son début. Elle devient après assez plate mais présente une certaine décroissance vers sa fin. Pour résoudre ce problème nous utilisons une HT ayant une largeur fixe de 1,6 ms. L'impulsion HF sera envoyée d'une manière synchrone avec un décalage choisi de façon à ce qu'elle se situe dans la zone la plus plate de l'impulsion HT.

Le choix de la valeur de la HT a été effectué suite à un étalonnage de toute la chaîne de puissance. Cette valeur est de 7750 V.

Les mesures des différentes puissances incidentes et réfléchies sur le réseau de guide d'ondes sont possibles grâce à des cristaux détecteurs à diode Schottky. Ils sont montés sur tous les coupleurs de mesures de la puissance incidente et réfléchie du réseau HF au niveau du klystron de la paire de coupleurs et de la charge terminale en leurs aval (voir figure (V.9)) . Un choix approprié de la chaîne d'atténuateurs utilisés pour chaque cristal détecteur a été aussi effectué.

VI-2- Le premier conditionnement automatisé

Ce premier conditionnement était avant tout une validation de l'automatisation de la procédure de conditionnement qui était mise en route pour la première fois pour les expériences « coupleurs » effectuées au LAL [58]. Ainsi, il était surtout question de voir si le programme gère le conditionnement d'une manière efficace et de vérifier d'une manière définitive tous les paramètres qui seront utilisés pour tous les prochains conditionnements. Pour des raisons de sécurité, cette première utilisation du programme de conditionnement n'a pas été effectuée d'une manière continue. La paire de coupleurs TTF-III qui a servi pour ce test a été utilisée pour la première fois. Elle a subi la procédure de nettoyage décrite ci-dessus et un étuvage in-situ.

VI-2-1- La vérification du bon fonctionnement du programme

Certains tests ont été effectués afin de garantir le bon déroulement du conditionnement :

- vérification de la communication GPIB entre le programme de pilotage du conditionnement et le synthétiseur : Il est primordial que la consigne envoyée à la source HF soit reçue correctement et que chaque erreur soit signalée au programme ;
- vérification de la conformité des impulsions envoyées par la carte PCI 6071E au modulateur et à la source HF aux besoins de la procédure utilisée (largeurs, décalage et synchronisation) et observation des réponses ;
- vérification du bon déroulement de l'acquisition effectuée par la carte PCI 6071E : correspondance entre les noms des capteurs et les noms des valeurs enregistrées, précision de la valeur enregistrée et respect des délais pour chaque acquisition ;

- vérification de la réaction du programme du conditionnement vis-à-vis des déclenchements des interlocks : Comme nous l'avons déjà mentionné, ce programme permet à l'utilisateur de simuler certaines entrées pour voir sa réaction ;
- test de la procédure de la remise en marche de la HT en cas d'interruption de la puissance, suite à un interlock ;
- vérification du bon fonctionnement du programme de conditionnement le long de toute cette opération ;

VI-2-2- Le déroulement d'un conditionnement automatisé d'une paire de coupleurs

Les résultats du premier conditionnement ont été aussi présentés dans les références [58] et [23]. Toutefois, nous avons choisi de présenter parfois des résultats types pour des raisons de clarté des figures.

Le premier conditionnement réalisé a permis de voir l'évolution de la puissance dans les coupleurs d'une manière générale. Le programme d'acquisition utilisé permet d'enregistrer une valeur de chaque grandeur mesurée toutes les secondes. Ceci permet de suivre les dynamiques de décroissance du vide dans le coupleur avec une bonne définition. La variation de la puissance en fonction des vides pendant un conditionnement est représentée par la figure (V.16).

Dans cet exemple nous pouvons constater qu'au début du conditionnement la puissance évolue rapidement vu que les vides initiaux sont au-dessous des seuils imposés. Un dégazage important peut survenir très rapidement amenant le niveau du vide à des valeurs importantes. Un dépassement de la valeur choisie pour l'interlock du vide provoque instantanément un arrêt matériel rapide de la puissance permettant au système de pompage de récupérer des niveaux de pression favorable au conditionnement. Les premières 24 heures représentées dans la figure (V.16) correspondent à l'étape à 20 μ s du conditionnement. Elle constitue la partie la plus problématique de ce dernier vu que le coupleur est exposé à la puissance pour la première fois. Elle est généralement caractérisée par une grande fluctuation du vide. De plus, nous constatons une différence entre le comportement des deux coupleurs d'une même paire malgré leurs préparations dans les mêmes conditions. Ceci est dû aux dissemblances qui existent entre eux. Les autres étapes du conditionnement correspondants aux différentes largeurs l'impulsion sont beaucoup moins consommatrices en temps.

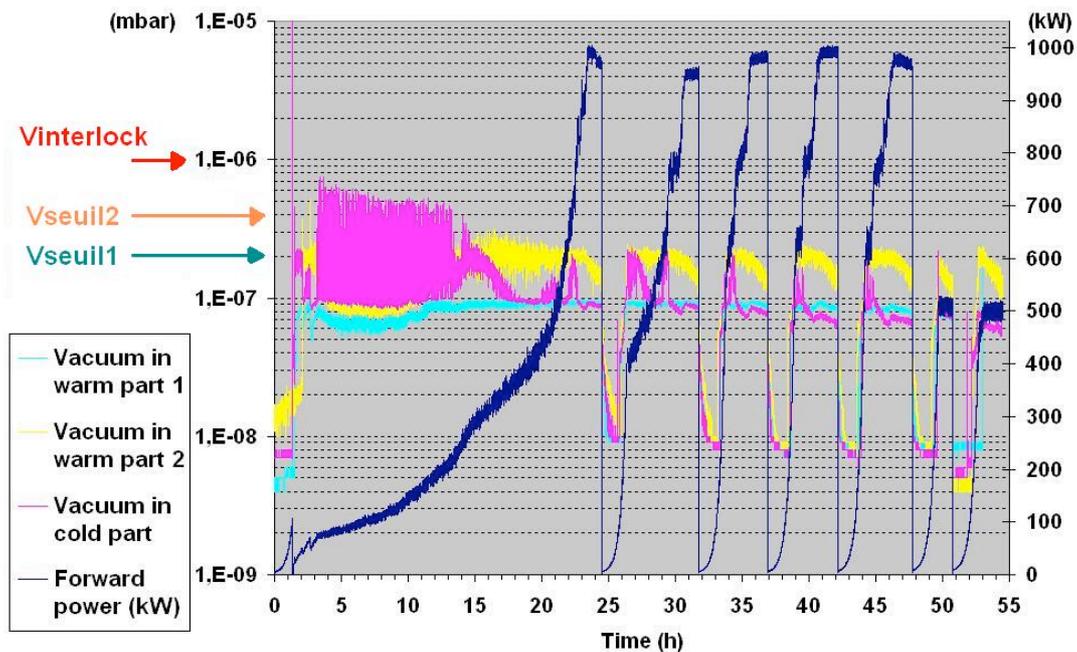


Figure (V.16) : Variation de la puissance HF incidente aux coupleurs en fonction des valeurs des vides dans la paire de coupleurs durant son conditionnement automatisé. Cet exemple n'est pas un résultat du premier conditionnement.

Concernant les courants électroniques, leurs valeurs augmentent progressivement en élevant la puissance à partir de sa valeur minimale, mais le maximum atteint ne correspond pas forcément à la puissance la plus importante (voir figure (V.17)). En dehors de rares singularités correspondant à une élévation brusque du courant qui peuvent, en général, déclencher un interlock de courant, les valeurs sont restées généralement dans l'intervalle de 0 à 5 mA. Sur un même coupleur les courants électroniques mesurés en trois points différents par les pick-ups, représentés dans la figure (IV.2), peuvent avoir des comportements très différents.

Les paliers de puissances maximales d'une heure ont été aussi effectués pour chaque étape avec succès prouvant la capacité du coupleur à supporter les conditions extrêmes spécifiées en stade de conception. Des sweeps ont aussi été réalisés sans aucun problème rencontré.

En ne comptant que les temps effectifs de conditionnement, nous avons pu estimer le temps total de cette opération. En effet, afin de pouvoir comparer l'évaluation du temps de conditionnement effectué avec celles réalisées à DESY, nous n'avons pris en compte que les périodes de conditionnement comptabilisées dans les résultats de ce laboratoire. Il s'agit d'éliminer les temps nécessaires à la validation de chaque étape du conditionnement puis à celle de l'opération entière ; soit respectivement les paliers et les sweeps.

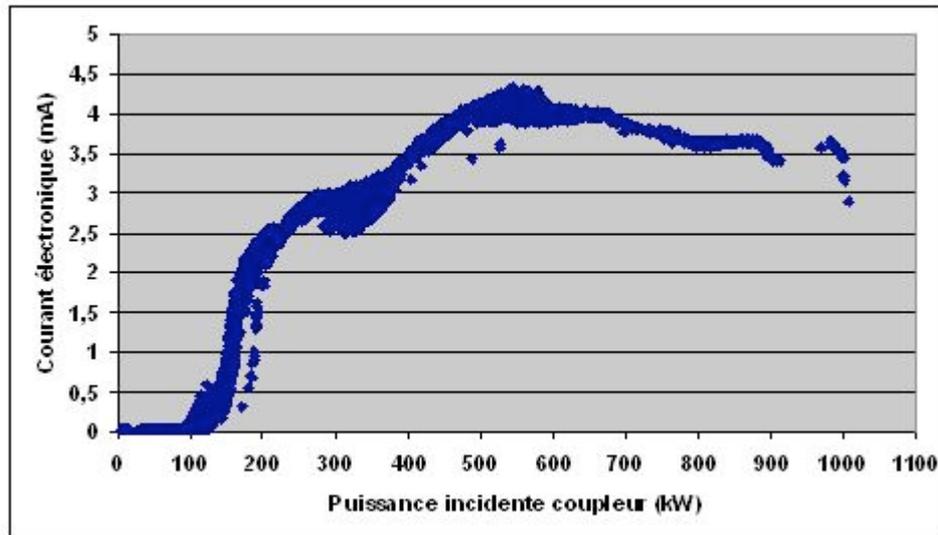


Figure (V.17) : Variation du courant électronique mesurée par l'un des pickups d'électron en fonction de la puissance (pour la première paire conditionnée). L'absence de valeurs pour une gamme de puissance entre 900 kW et 1000 kW est due à une intervention pendant le conditionnement pour vérifier l'exactitude des valeurs de puissance mesurées.

Le temps effectif du conditionnement estimé pour ce premier conditionnement est de 50 heures. Il est comparable à la meilleure performance de temps de conditionnement atteinte à DESY jusqu'à la date du déroulement de ce test. Ce résultat constitue une preuve de la bonne application de la procédure de conditionnement utilisée. Elle valide quelque part aussi le travail de nettoyage en salle blanche de cette paire de coupleurs et sa mise sous vide qui semblent respecter les besoins de propreté favorables au bon fonctionnement des coupleurs. Toutefois, certains facteurs peuvent avoir contribué à l'obtention d'un temps de conditionnement aussi bon. D'un côté, l'arrêt de la procédure de conditionnement alors qu'elle est en cours à plusieurs reprises et pendant de longues heures a permis la récupération d'un bon vide dans les coupleurs qui aurait changé les conditions du déroulement du conditionnement une fois repris. D'un autre côté, la dissemblance entre coupleurs, déjà soulignée à plusieurs reprises, serait une bonne raison pour croire qu'il est fort probable que les conditionnements futurs ne seront pas aussi rapides que celui-ci. Seule une étude sur plusieurs coupleurs peut fournir une réponse assez objective sur les performances en temps de conditionnement qu'on peut atteindre.

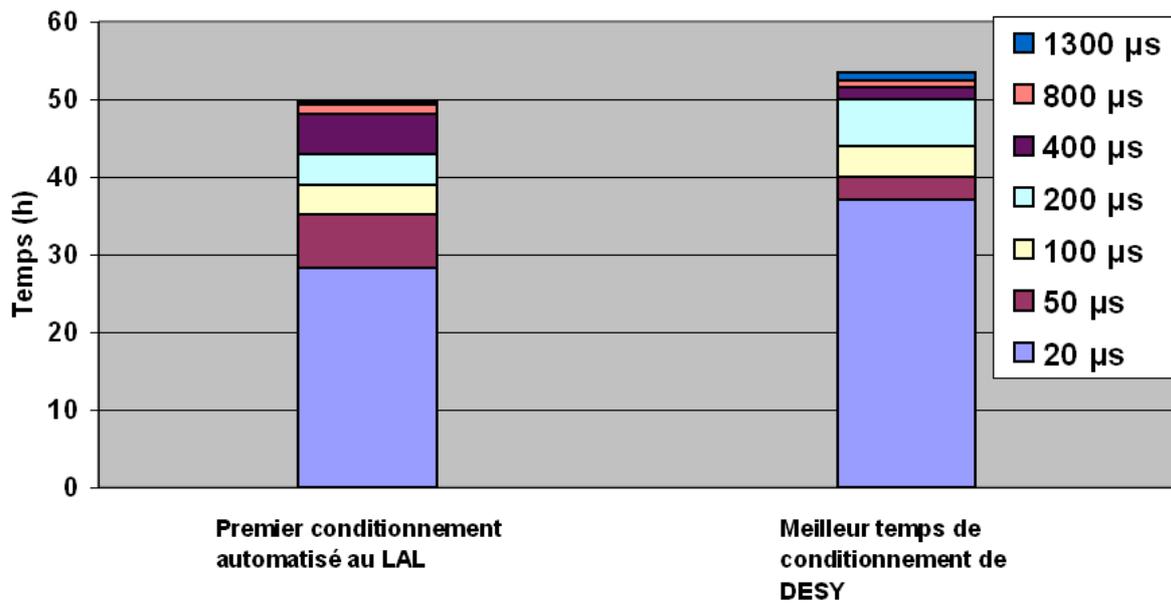


Figure (V.18) : Estimation du temps de conditionnement effectué pour ce premier conditionnement et sa comparaison avec le meilleur temps de conditionnement d'une paire de coupleurs effectué à DESY jusqu'à cette date.

Ce premier conditionnement automatique s'est déroulé dans les meilleures conditions de fonctionnement. L'interaction entre le programme qui gère le conditionnement et tout l'appareillage s'est déroulée de la manière souhaitée. Ainsi tous les paramètres nécessaires pour cette opération ont pu être fixés définitivement. Maintenant, il est possible de commencer à effectuer des conditionnements automatisés sans interruption et de manière entièrement autonome. Ceci permettra d'avoir des résultats que nous pourrons comparer d'une manière objective. L'étude de ces résultats sera le but du prochain chapitre.

De plus, une validation définitive de la procédure entière de la préparation des coupleurs, depuis leur réception jusqu'à leur stockage en passant par leur conditionnement, sera accomplie suite à la mise en fonctionnement des coupleurs TTF-III sur les cavités TESLA. Cette étape sera décrite ultérieurement.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'intérêt du conditionnement des coupleurs et la nécessité d'un nettoyage adapté de ces composants. Une description détaillée de la procédure utilisée et des moyens mis en œuvre a aussi été effectuée. Le besoin de conditionnement d'un grand nombre de coupleurs et d'étude de leurs comportements a imposé l'automatisation de

cette procédure. Ainsi une partie importante du travail effectué dans cette thèse a consisté en l'élaboration d'un programme de pilotage du conditionnement et d'acquisition des mesures effectuées par les différents diagnostics. La garantie de la sécurité des coupleurs pendant le conditionnement était l'une de nos premières priorités. Ce programme a été testé avec succès. Le premier conditionnement automatisé réalisé a permis d'obtenir des résultats très satisfaisants.

Chapitre VI

La série des conditionnements des coupleurs TTF-III effectuée sur le stand de test à température ambiante au LAL

Sommaire :

- I- Le conditionnement des coupleurs TTF-III
 - II- L'étude de l'utilité de l'étuvage in-situ pour le conditionnement des coupleurs
 - III- L'effet du stockage sur la préservation du conditionnement
 - IV- La validation des conditionnements effectués
-

L'automatisation de la procédure de conditionnement au LAL a permis de l'appliquer sur plusieurs paires de coupleurs TTF-III dans le cadre de la coopération LAL-DESY évoquée précédemment. Ainsi 15 paires, fournies par deux constructeurs différents, ont été conditionnées. Certains coupleurs ou (parties de coupleurs) ont été conditionnés plus d'une fois afin de répondre aux exigences de certaines expériences visant à étudier le comportement de ces composants HF. Les acquisitions effectuées pendant ces opérations ont été dépouillées afin qu'elles puissent servir de base de renseignement permettant d'étudier les coupleurs, de tirer certaines conclusions sur leurs comportements et de prévoir d'une manière approximative le comportement du coupleur une fois soumis à de nouvelles conditions de fonctionnement. La totalité de ces travaux a été effectuée durant la préparation de cette thèse sur les coupleurs.

I- Les conditionnements des coupleurs TTF-III

Les différents coupleurs conditionnés au LAL avec la procédure décrite dans le chapitre précédent présentent des similarités de comportement pendant cette opération comme ils présentent aussi certaines différences. Ces dernières sont parfois assez remarquables même

entre deux coupleurs appartenant au même assemblage et donc censés avoir eu exactement le même traitement et être exposés aux mêmes puissances. Certains coupleurs conditionnés étaient étuvés in-situ, d'autres ne l'étaient pas. Les différences de comportement enregistrées entre les deux cas seront détaillées plus tard dans ce chapitre. Nous allons plutôt commencer par présenter le comportement typique des coupleurs TTF-III vis-à-vis de la puissance pendant le conditionnement.

I-1- L'évolution typique d'un conditionnement d'une paire de coupleurs TTF-III

I-1-1- La première étape du conditionnement

Au début du conditionnement la paire de coupleurs utilisée est soumise à des puissances relativement faibles augmentant d'une manière très graduelle sous forme d'impulsions de 20 μ s de largeur. Avant le début de cette opération, les pressions initiales dans ces composants sont réduites aux minima qu'on peut atteindre en un temps de pompage raisonnable. Les coupleurs restent visiblement insensibles à ces premières élévations de puissance pendant un certain moment durant lequel les valeurs des vides observées restent invariables et les courants électroniques nuls. Dès que la puissance franchit une certaine valeur (qui peut varier d'un coupleur à un autre), un dégazage intense s'effectue accompagné généralement d'une apparition d'un courant électronique qui lui est corrélé. Souvent, ce premier évènement est accompagné d'un ou plusieurs interlocks simultanés. Nous avons enregistré des valeurs de pressions supérieures à 10^{-5} mbar en partant de pressions de quelque 10^{-9} mbar. Les courants électroniques enregistrés peuvent souvent saturer le port de la carte d'acquisition. L'activation d'un interlock ou la diminution de la puissance par le programme permet au système de pompage de récupérer un bon vide dans les coupleurs et d'annuler les courants électroniques observés. Toutefois, le comportement du coupleur vis-à-vis de la HF change généralement depuis ce temps là. Ce dernier devient plus réactif à des niveaux de puissances relativement plus bas. Ceci se manifeste par la création, à des puissances moins importantes, de faibles courants électroniques entretenus accompagnés par des dégazages emmenant les pressions à des niveaux supérieurs à un seuil du vide. En ce moment, l'évolution de la puissance ralentit et devient totalement dépendante de l'oscillation des valeurs des vides aux alentours des seuils considérés par le programme de pilotage. A partir de ce stade, l'effet de conditionnement commence à devenir concret. Une action permanente

sur les surfaces est créée. Des dégazages continus témoignent du nettoyage progressif de la surface et sont accompagnés par des courants électroniques. Les valeurs de ces derniers fluctuent mais sont, en général en ce premier stade de conditionnement et notamment dans les parties chaudes des coupleurs, d'amplitude croissante en fonction de la puissance jusqu'à atteindre quelques centaines de kilowatts.

Après un certain temps de conditionnement, il suffit de diminuer significativement la valeur de la puissance pour voir que les dégazages diminuent considérablement même si ce niveau inférieur provoquait avant des montées importantes de vides. Ceci montre la diminution de la réactivité des surfaces aux niveaux de puissances. Les fluctuations de certains vides peuvent être assez intenses, surtout en ce stade de conditionnement, mais elles finissent par s'approcher progressivement de la valeur du premier seuil imposé pour cette grandeur (voir l'exemple du vide V_3 dans la figure (VI.1)). D'un autre côté, les courants électroniques, même s'ils semblent corrélés avec ces vides, ont au début des valeurs faibles. Mais les surfaces des coupleurs, qui ne sont qu'à leur début de conditionnement et qui sont chargées en dépôt de différents gaz, sont vraisemblablement encore très sensibles aux bombardements électroniques, d'où les forts taux de dégazages constatés. La fin de la première étape du conditionnement se termine après que la paire de coupleurs considérée ait réussi à faire passer une puissance HF de 1 MW avec des largeurs d'impulsion de 20 μ s (voir les détails de la procédure de conditionnement dans le chapitre précédent), sans que l'un des vides n'ait dépassé le premier seuil ($2 \cdot 10^{-7}$ mbar). A ce niveau de puissance les courants électroniques sont déjà assez importants (généralement supérieur à 3 mA au moins dans l'une des parties de l'assemblage conditionné) mais leur influence sur les surfaces a beaucoup diminuée sous l'action du bombardement continu des surfaces par les électrons.

Les niveaux de pression dans les différentes parties de la paire de coupleurs sous conditionnement sont généralement très différents (voir Figure (VI.1)). En effet, l'une des parties est souvent plus influencée par le passage de la HF et commence à ralentir l'évolution de la puissance à des niveaux où les autres n'ont pas généré beaucoup de dégazage. Ceci peut durer jusqu'à ce que la sensibilité d'une autre partie l'emporte et qu'elle donne, par la suite, le rythme d'évolution du conditionnement. Ceci peut aussi avoir lieu entre les deux parties chaudes de la paire utilisée.

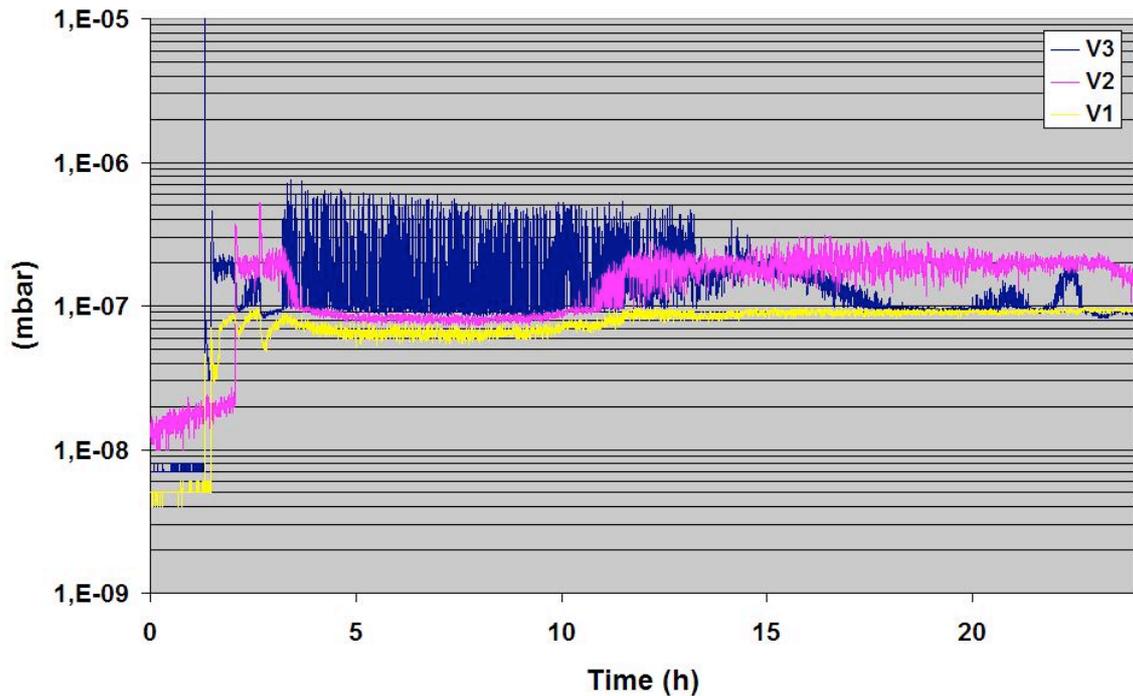


Figure (VI.1) : Exemple du comportement des vides dans les trois parties d'une paire de coupleurs en conditionnement pendant la première étape (20 μ s). V₁, V₂ et V₃ sont les vides mesurés (voir annexe 2).

Il a été constaté que même si cette première étape de conditionnement utilisait les largeurs d'impulsions les plus faibles, elle constitue l'étape la plus importante du conditionnement et aussi la plus consommatrice en temps (Voir figure (VI.2)). Ce temps est généralement supérieur à la moitié du temps total. En effet, pendant cette étape les coupleurs ne sont pas encore adaptés au passage de la puissance. L'abondance des dégazages en témoigne. Les coefficients d'émission secondaires (SEC) des surfaces doivent aussi être élevés au début de conditionnement. Ceci provoque une génération abondante des courants électroniques qui forment un processus actif pour dégazer les surfaces d'un côté et réduire leur SEC d'un autre comme nous l'avons déjà expliqué dans le chapitre III. En plus, pendant le conditionnement à 20 μ s tous les niveaux de champs HF sont explorés progressivement balayant la gamme de puissance entre quelques kilowatts et un Mégawatt. De ce fait, une bonne partie des problèmes dépendants des phénomènes sensibles aux niveaux des champs, tels que les effets de pointe pouvant être dus à des impuretés, peut être éliminée à ce premier stade.

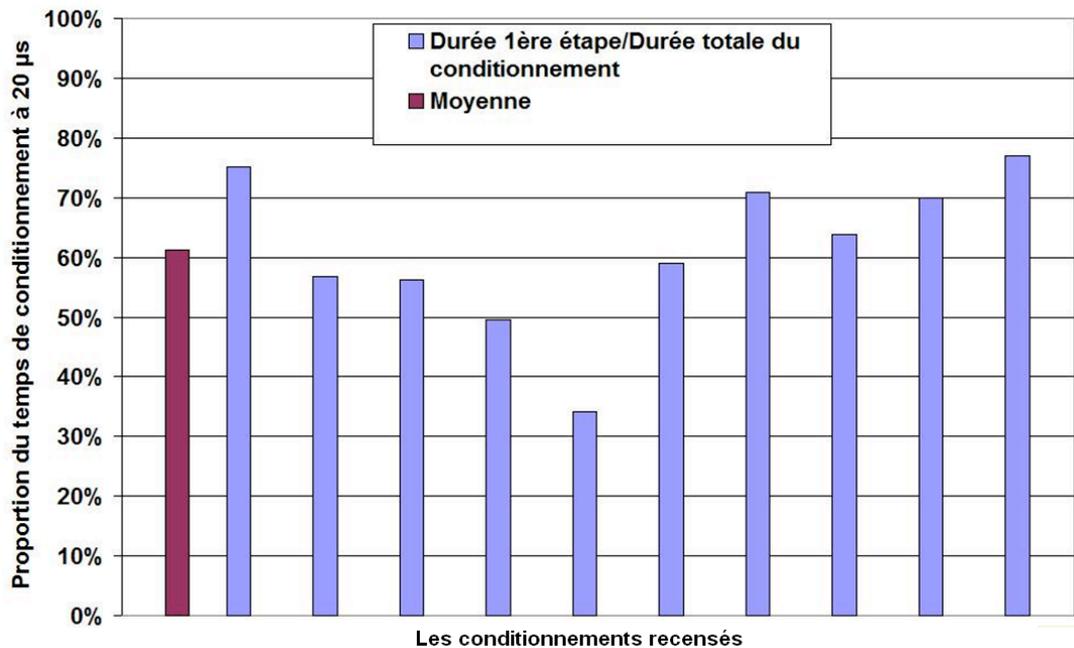


Figure (VI.2) : Représentation des pourcentages des proportions des temps de conditionnements à 20 μs par rapport aux temps totaux relatifs aux durées de ces opérations.

I-1-2- Le conditionnement après la fin de sa première étape

Les étapes de conditionnement succédant à la première sont beaucoup plus rapides malgré l'utilisation d'impulsion plus larges et donc de puissances moyennes plus élevées. Ces étapes sont caractérisées par des fluctuations des valeurs des pressions beaucoup moins importantes. Ces dernières ne commencent à atteindre le premier seuil de vide qu'à des puissances relativement élevées (voir figure (VI.3)).

Cette figure montre que, pour certains conditionnements, les dégazages deviennent très réduits après la première étape de conditionnement. Par conséquent, leurs contributions à ralentir le conditionnement seront sensiblement diminuées. Toutefois, il n'est pas exclu d'avoir des événements suffisamment puissants pour déclencher des interlocks, mais ils sont en général très ponctuels et leur influence sur le temps total de conditionnement est très réduite.

En fin de conditionnement, la validation de cette opération est assurée par des sweeps (voir la partie dédiée à la description de la procédure). Généralement, les couples totalement conditionnés n'ont pas de mal à passer ce test avec succès.

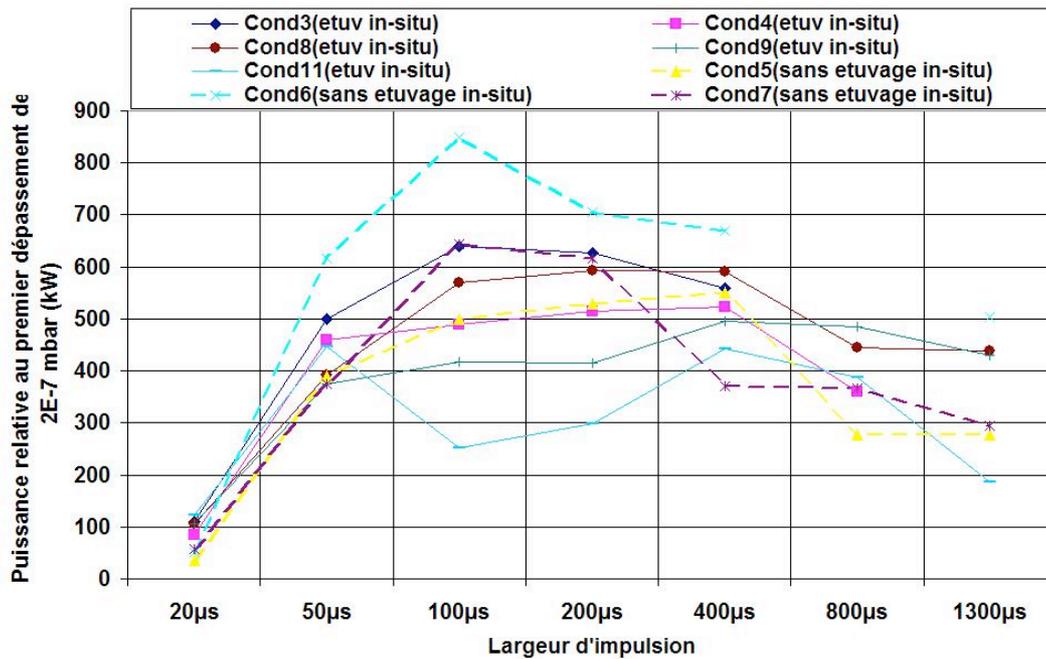


Figure (VI.3) : Puissances relatives au premier dépassement du niveau de pression de $2 \cdot 10^{-7}$ mbar en chaque étape du conditionnement. Chaque courbe représente un conditionnement. Les valeurs absentes pour certaines étapes de conditionnement signifient que la valeur $2 \cdot 10^{-7}$ mbar n'a jamais été dépassée.

I-2- La différence des temps de conditionnement

En dehors de la similarité globale entre les déroulements des divers conditionnements présentés ci-dessus, des différences assez remarquables peuvent être constatées en comparant les différents résultats d'acquisition enregistrés. La plus évidente est celle qui est entre les différents temps de conditionnement. En effet, en plus de l'imprévisibilité de la durée que pourrait avoir un conditionnement, les valeurs de cette dernière peuvent passer de quelques dizaines d'heures à presque 200 heures. Ces différences peuvent causer de grands problèmes quant à la programmation des tâches nécessaires en partant du nettoyage au stockage.

Aux premières opérations de conditionnement effectuées, nous n'avons pas assez de statistiques pour pouvoir confirmer la cause de cette grande dissemblance, mais nous avons suspecté en premier lieu deux facteurs. Le premier est l'ensemble des imperfections de construction des coupleurs qui varient d'un composant à un autre. Le deuxième est l'influence de la différence de la composition et de la quantité des éléments chimiques qui peuvent exister sur les surfaces des coupleurs suite à leur nettoyage ou à leur éventuel étuvage in-situ. La contribution de ce dernier sera étudiée plus tard dans ce chapitre.

Concernant les imperfections de construction, des observations ont été effectuées sur le banc de contrôle de coupleurs se basant sur un schéma précisant les endroits où certains procédés industriels risquent d'introduire certaines irrégularités (voir figure (V.4)). Ces observations ont permis de relever sur la majorité des coupleurs plusieurs petites imperfections susceptibles d'influencer les courants électroniques notamment les bords créés par certaines soudures. Toutefois, nous n'avons pas encore réussi à établir un lien concret entre une imperfection de construction donnée et un comportement particulier du coupleur.

I-3- Le comportement des courants électroniques

Les amplitudes des courants électroniques mesurées au niveau des coupleurs permettent de refléter l'activité électronique en cours dans le coupleur. Etant le produit de phénomènes assez complexes, il est très difficile d'anticiper leurs intensités ou leur persistances avant le début du conditionnement. Toutefois, certaines constatations d'ordre général peuvent être notées. En effet, il a été remarqué qu'en dehors des événements singuliers provoquant des interlocks, les valeurs maximales des courants électroniques atteintes ont été généralement enregistrées dans les parties chaudes des coupleurs. En dressant les courbes des courants électroniques en fonction de la puissance pour toutes les étapes de chaque conditionnement, nous avons remarqué d'autres différences entre les parties chaudes et les parties froides. Les courants de ces dernières présentent des pics assez marqués pour certains niveaux de puissance (voir figure (VI.4)) qui sont toujours les mêmes pour tous les conditionnements. Ces pics de courant sont enregistrés autour des puissances d'environ 330 kW, 500 kW et 700 kW. D'autres pics peuvent aussi apparaître mais leurs apparitions ne sont pas aussi systématiques. Dans les parties chaudes, cet aspect est très peu observé pour la première étape du conditionnement, mais il arrive que certains pics commencent à se discerner peu à peu dans les étapes suivantes suite à la diminution de la production globale des électrons. Toutefois, ils sont souvent noyés dans un fond de courant électronique qui rend difficile l'identification des puissances de leur établissement.

Nous avons aussi déjà évoqué maintes fois l'amélioration du coefficient d'émission secondaire pendant le conditionnement. L'évolution des courants électroniques d'une étape de conditionnement à une autre peut en donner la preuve. Il a été observé que pour une même puissance et un même point de mesure, l'amplitude des courants enregistrés d'une étape de conditionnement à une autre qui la suit peut diminuer significativement et même disparaître définitivement (voir figure (VI.5)).

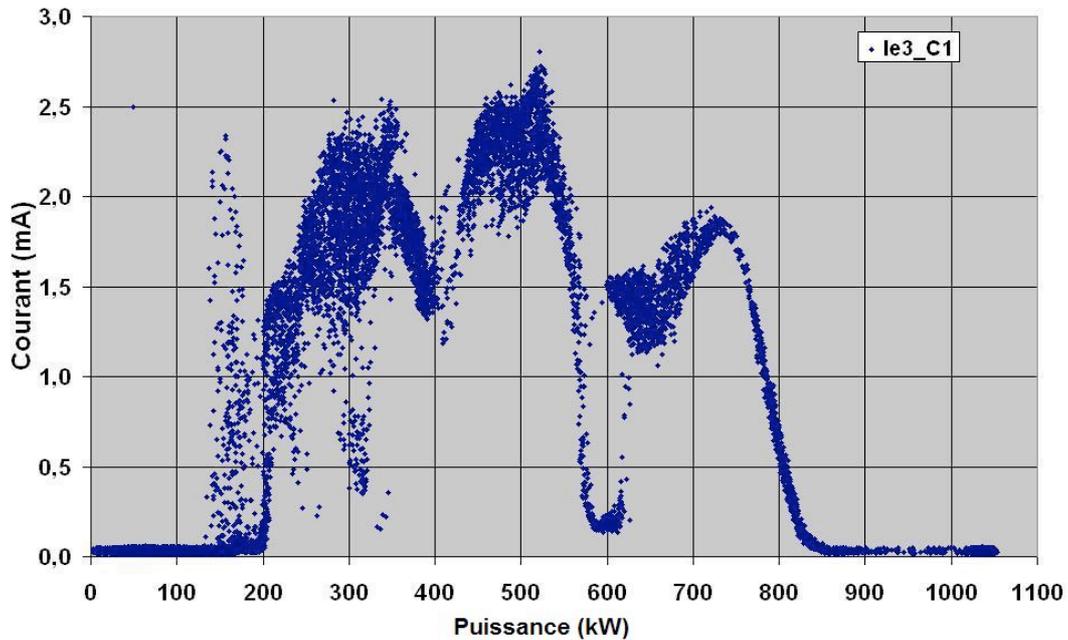


Figure (VI.4) : Représentation d'un exemple de la variation d'un courant électronique enregistré sur une partie froide d'un coupleur en fonction de la puissance pendant son conditionnement à 20 μ s.

L'exemple présenté dans la figure (VI.5) montre un exemple typique de la diminution des courants électroniques dans une partie froide d'un coupleur TTF-III. Nous pouvons constater la diminution drastique de la production des courants électroniques. Cette dernière s'exprime en plus des diminutions de leurs amplitudes maximales par la réduction des intervalles des puissances de leur production. Le début de plus en plus tardif de la production de ces électrons est aussi toujours observé. Les courants dans les parties chaudes des coupleurs subissent aussi les mêmes changements. Cette évolution due à des modifications significatives de l'état de surface peut être expliquée par la coexistence de plusieurs actions créées par le conditionnement sur les surfaces. En effet, durant une étape de conditionnement à une largeur d'impulsion déterminée, une élimination progressive de certains émetteurs sur la surface s'effectue contribuant ainsi à la réduction du bilan total des électrons produits. De plus, les électrons énergétiques frappant les surfaces et provoquant les dégazages facilitent le pompage des contaminants qui peuvent influencer le SEC. Enfin, la réduction du SEC par le bombardement électronique défavorise l'entretien des multipactors d'ordre supérieur qui se créent aux puissances relativement basses et qui sont en général peu stables.

Courant électronique dans une partie froide pendant le conditionnement

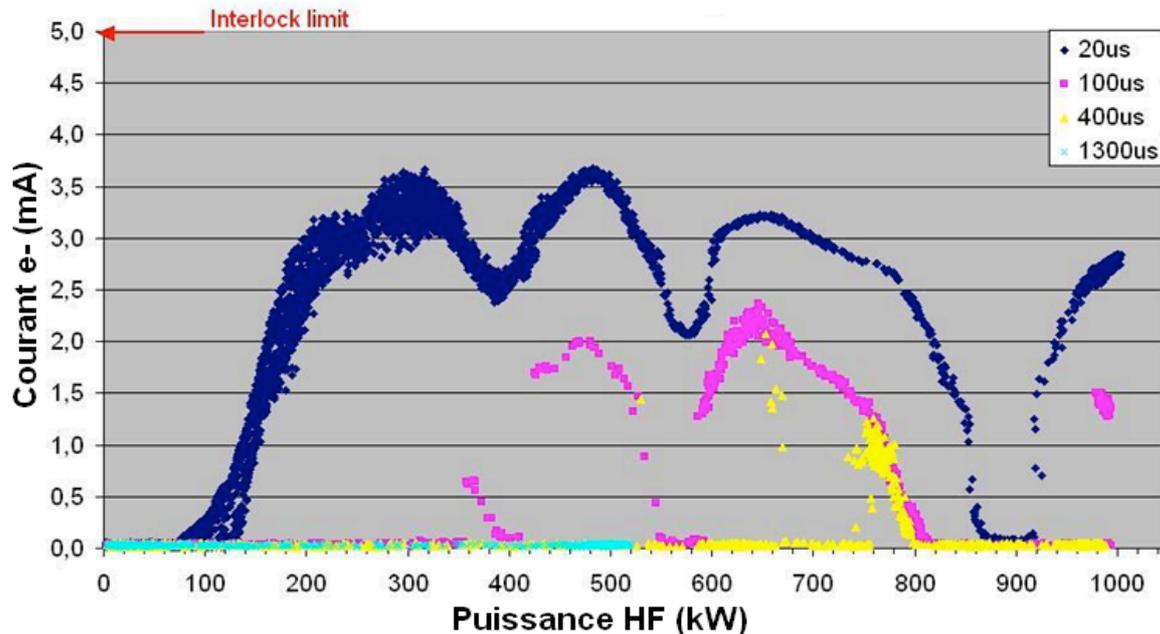


Figure (VI.5) : Exemple de l'atténuation des courants électroniques dans une partie froide d'un coupleur TTF-III pendant le conditionnement.

Afin de constater la sensibilité décroissante des coupleurs au passage de la puissance, nous avons dressé un graphe résumant les puissances à partir desquelles la production des électrons dans les coupleurs commence à devenir significative. Nous avons choisi arbitrairement 0,8 mA comme valeur à partir de laquelle le courant est considéré significatif. La figure (VI.6) présente un résumé de cette étude sur un échantillon de neuf conditionnements.

En se basant sur la figure (VI.6), nous pouvons constater que le niveau de puissance de début de génération d'un courant électronique significatif est généralement croissant d'une étape à une autre malgré l'élargissement des impulsions considérées. Ces niveaux de puissances peuvent être de l'ordre de 100 kW au début du conditionnement pour dépasser les 400 kW en fin de conditionnement pour des impulsions de 1300 µs. Nous rappelons que la puissance de fonctionnement crête de ces coupleurs en présence de faisceaux est de 120 kW.

Une autre remarque peut aussi être tirée de la figure (VI.6). La production du courant au début du conditionnement commence dans les coupleurs non étuvés in-situ à des puissances relativement basses (de 40 kW à 60 kW) par rapport à ceux qui sont étuvés in-situ (de 85 kW à 130 kW). Mais une fois la première étape est terminée, cette différence n'existe plus entre les deux types de conditionnement.

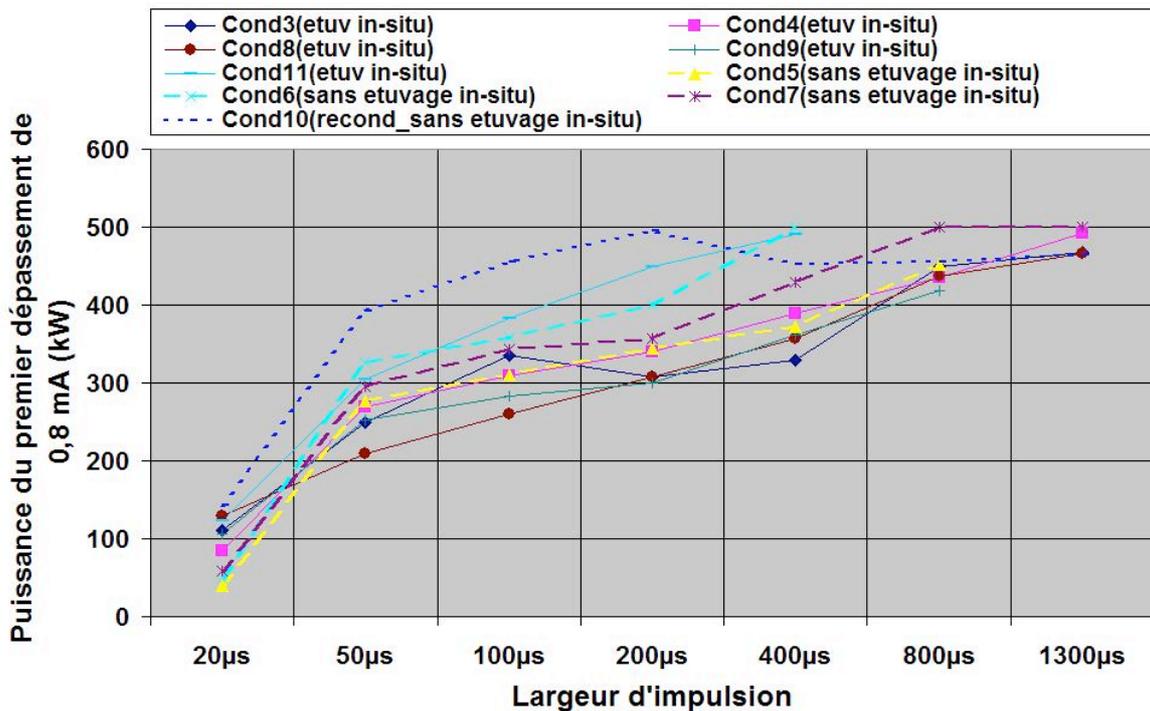


Figure (VI.6) : Puissance d'apparition du premier courant électronique significatif dans les paires de coupleurs par étape de conditionnement.

II- L'étude de l'utilité de l'étuvage in-situ pour le conditionnement des coupleurs

A la sortie du montage de la paire de coupleurs de la salle blanche, l'installation de pompage ionique est déjà montée sur tous les ports correspondants. Ceci garantit une séparation hermétique des surfaces internes avec l'air ambiant et préserve le nettoyage effectué. Une première étape de pompage est assurée par les pompes turbomoléculaires, puis ce sont les pompes ioniques qui prennent la relève pour atteindre le meilleur vide possible dans les coupleurs. Afin de pouvoir atteindre de meilleurs vides limites et obtenir des surfaces d'avantage « plus propres », une procédure d'étuvage in-situ a été proposée. Elle consistait à chauffer toutes les parties qui seront sous vide pendant le conditionnement et pomper simultanément les molécules issues du dégazage stimulé par l'élévation de la température. Une telle opération contribuera certes au nettoyage des surfaces et à l'obtention de meilleurs niveaux de vides limites mais elle peut aussi s'avérer consommatrice en temps. Ainsi, faute de ne pas avoir une influence sensible sur le temps de conditionnement ou les conditions de son déroulement, cette opération ne pourra pas être adoptée. Nous nous sommes donc proposés d'étudier l'utilité d'intégrer l'étuvage in-situ dans la chaîne des procédures de préparation des coupleurs au conditionnement.

II-1- L'adsorption et l'énergie de liaison

Toutes les surfaces des solides et des liquides présentent des forces d'attraction qui leurs sont normales permettant une probabilité d'adsorption des molécules des gaz qui s'y posent. Ces gaz adsorbés peuvent être désorbés et constituent la source essentielle de gaz dans les systèmes de vide. Les molécules adsorbées dans ces derniers sont beaucoup plus nombreuses que celles qui sont dans le volume [59]. Ainsi, à l'exposition des surfaces internes des coupleurs à l'air ambiant, les molécules de l'atmosphère sont adsorbées avec certaines valeurs d'énergies de liaisons qui se créent entre elles et les matériaux de ces surfaces. Nous pouvons ainsi distinguer des adsorptions physiques et des adsorptions chimiques. Dans le premier cas, les molécules de gaz sont faiblement attirées par des forces de Van der Waals avec des énergies de liaison inférieures à 40 kJ/mol (10 kcal/mol ou 0,4 eV). Dans le deuxième cas, les liaisons se créant entre les molécules du gaz et les atomes (ou les molécules) de la surface de l'enceinte de vide varient entre 80 kJ/mol et 800 kJ/mol (de 20 à 200 kcal/mol ou de 0,8 à 8 eV) [60].

Pour de petites valeurs d'énergie de liaison E le taux de désorption est assez élevé pour que les molécules leurs correspondant disparaissent rapidement du volume et ne causent plus de problème durant le pompage [60]. Les molécules ayant des énergies de liaison très grandes ont des taux de désorption trop faibles pour avoir des conséquences sur le vide. Ce sont les éléments ayant des énergies de liaison moyennes qui font que les gaz ne peuvent pas être éliminés de l'enceinte du vide dans un temps raisonnable. L'eau fait partie de ces éléments.

II-2- L'adsorption de l'eau et son influence sur le pompage

Au début du pompage, la surface peut être déjà couverte par plusieurs centaines de monocouches de H_2O . En effet, la vapeur d'eau forme des liaisons avec les surfaces et les couches de H_2O déposées. L'énergie de liaison qu'elle crée avec une surface métallique est d'environ 23 kcal/mol. Celle qui est créée entre molécules d'eau est d'environ 10 kcal/mole. Les couches qui sont plus proches des premiers adsorbés auront des énergies de liaison entre les deux valeurs données [61]. A ce stade, il est intéressant d'introduire la notion de temps de séjour pour les molécules adsorbées. Il s'agit du temps que reste, à une température donnée, une molécule adsorbée en place avant qu'elle ne soit désorbée. Ce temps dépend de la valeur de l'énergie de liaison. Il est donné par la relation suivante [62]:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{E}{R.T}} \quad [VI.1],$$

où

τ est le temps de séjour [s],

τ_0 est la période de la vibration de la particule sur la surface $\tau_0 \approx 10^{-13}$ [s],

E est l'énergie de liaison [J/mol],

R est la constante des gaz parfait avec $R= 8,314$ [J/(K.mol)],

et T est la température [K].

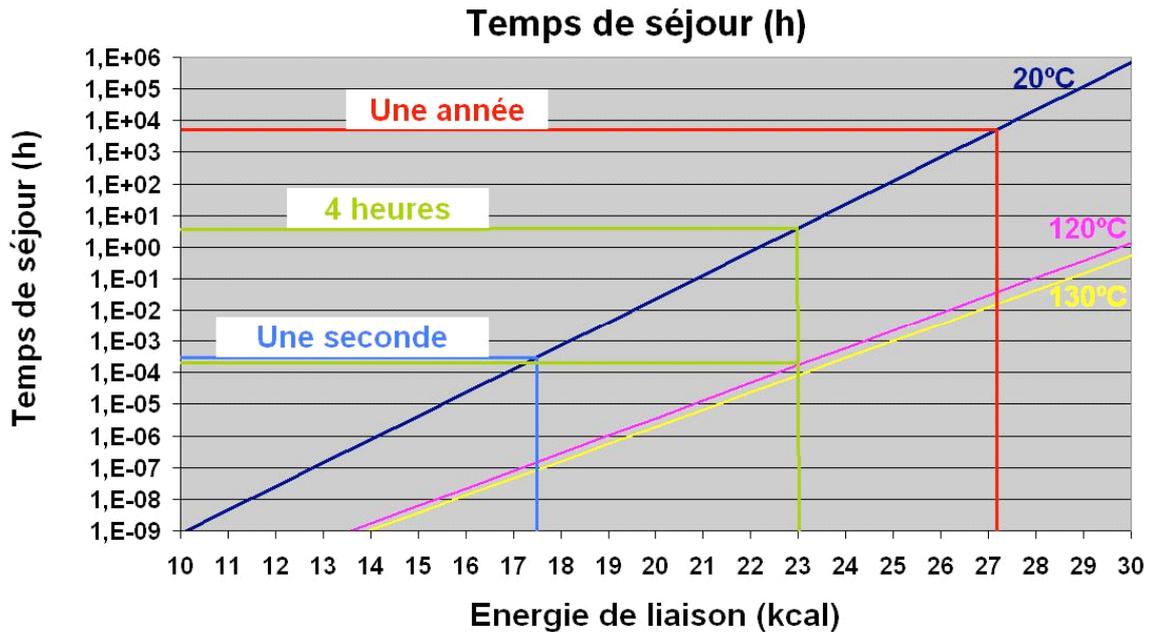


Figure (VI.7) : Variation du temps de séjour des molécules en fonction de leurs énergies de liaison pour une température donnée.

Le temps de séjour d'une molécule d'eau sur une surface métallique à température ambiante est de plusieurs heures alors que celui de sa liaison avec une autre molécule d'eau est de quelques microsecondes. Ainsi, il est clair que le pompage permettra de désorber la plupart de l'épaisseur de l'ensemble des monocouches d'eau dès le début, mais une quantité suffisante d'eau sera désorbée assez lentement ralentissant ainsi le processus de pompage.

Un autre facteur jouant un rôle important pour le pompage est le trajet que réalise une molécule après sa désorption. En effet, lorsque la molécule d'eau acquiert une énergie suffisante pour qu'elle soit désorbée, elle peut migrer sur la surface à un autre endroit où elle peut créer une liaison plus forte. Dans le cas où elle traverse le volume délimité par l'enceinte, elle ne peut être pompée que si sa trajectoire lui permet d'entrer dans le port de pompage ce qui ne représente qu'une probabilité très petite par rapport à toutes les trajectoires qui peuvent

avoir lieu. Ceci augmentera la probabilité qu'une molécule désorbée se collera à nouveau aux surfaces même si le coefficient de collage est relativement petit.

Une solution pouvant être efficace pour résoudre ce problème existe. Elle consiste à chauffer la chambre à vide, donnant ainsi aux molécules d'eau assez d'énergie pour être désorbées. De plus, même si le trajet de la molécule avant d'atteindre le port de pompage sera long, la probabilité de collage à la surface de nouveau diminuera ainsi que le temps que la molécule passera dans cette enceinte.

II-3- L'effet de l'étuvage in-situ

L'utilisation de la technique de chauffage des coupleurs pendant le pompage a, sans doute, une influence non négligeable sur l'amélioration des niveaux du vide. Il est évident aussi que la géométrie complexe de l'assemblage conditionné et la limitation des tailles des ports de pompage posera d'avantage de problèmes pour l'évacuation des molécules d'eau que pour les autres gaz. Mais, le critère qui nous intéresse le plus est l'effet de l'étuvage in-situ sur le temps du conditionnement et la réaction du coupleur vis-à-vis de la HF.

Afin de pouvoir opter pour l'application ou non de cette opération, nous avons décidé de conditionner des paires de coupleurs sans aucun préchauffage puis avec préchauffage (ou étuvage in-situ).

II-3-1- Expérience

a) Principe

L'étuvage in-situ effectué consiste à chauffer toutes les parties sous vides de l'ensemble « paire de coupleur et transition de liaison (ou « transition froide ») » tout en les soumettant à un pompage continu. Après obtention, d'un vide jugé raisonnable, le chauffage est arrêté alors que le pompage continue jusqu'à atteindre les valeurs minimales possibles du vide. Ainsi le conditionnement HF peut commencer.

b) Mise en œuvre

Les moyens utilisés:

- 3 rubans en silicone traversés par des conducteurs pour le chauffage des surfaces métalliques des coupleurs et qui supportent une température maximale de 200°C.

Ces rubans ne génèrent pas de poussière ce qui permet de maintenir un environnement assez propre autour des coupleurs.

- Un papier aluminium permettant en couvrant la paire de coupleurs enlacés par les rubans d'homogénéiser la température et de faciliter son augmentation en limitant l'échange thermique entre le montage et l'air ambiant.
- 3 thermocouples permettant de mesurer la température simultanément sur chacun des deux coupleurs ainsi que la transition froide.
- 3 régulateurs de température fonctionnant en tout ou rien permettant d'atteindre la consigne thermique fixée.

La méthode :

Un premier pompage des coupleurs est effectué par des pompes turbomoléculaires afin d'obtenir les pressions de l'ordre de quelques 10^{-7} mbar dans toutes les parties pompées. Les rubans de chauffage sont alors enroulés sur les différentes parties de l'ensemble à étuver : un ruban est utilisé pour chaque coupleur avec son groupe de pompage ionique. Un dernier ruban permet de chauffer la transition froide et la pompe ionique qui lui correspond. Les thermocouples nécessaires aux commandes des températures sont placés à des points de mesures jugés significatifs notamment à proximité des brides de l'assemblage des parties chaudes aux parties froides des coupleurs. En effet, le choix de ces points de mesure est dû à la présence de joints en aluminium à ces endroits et qui ne peuvent assurer l'étanchéité qu'à des températures inférieures à 150°C. Une fois les thermocouples placées, toutes les parties à étuver in-situ sont couvertes de papier aluminium. L'augmentation de la température peut alors commencer.

La température est élevée à partir de la température ambiante pour atteindre progressivement la consigne choisie tout en passant par des paliers durant lesquels la température est maintenue constante pendant un certain temps arbitraire dépendant du flux dégazé par les parties étuvées. Dans notre cas, cette augmentation de température dure environ une demi journée. Puis, la température est maintenue à la valeur de la consigne pendant 3 à 4 jours, toujours selon l'amélioration de la pression mesurées. La température est ensuite diminuée progressivement (en quelques heures) afin d'éviter toute déformation des matériaux. Le pompage ionique peut alors commencer.

Une augmentation d'une dizaine de degrés de la température maximale de l'étuvage peut permettre un gain de temps considérable pour la diminution du temps de

l'étuvage in-situ vu la dépendance exponentielle du temps de séjour à la température, comme le montre l'expression présentée précédemment. Dans notre cas, nous sommes limités par la température maximale supportée par le joint en aluminium (150°C). Nous avons opté pour une température d'étuvage maximale de 120°C à 130°C pour être suffisamment loin de la valeur limite tout en tenant compte des erreurs de mesure.

II-3-2- Résultats et interprétations

a) Effet de l'étuvage in-situ sur le temps de conditionnement

La différence entre les temps de conditionnement des paires des coupleurs étuvés in-situ et ceux qui ne l'étaient pas est assez importante. Pour les premiers, trois paires de coupleurs sur six ont été conditionnées en un temps inférieur ou égal à 50 h ce qui constitue jusqu'à ce stade à peu près la limite inférieure du temps de conditionnement atteinte par DESY. Pour les coupleurs non étuvés in-situ, le temps minimal de conditionnement était de 96 h ce qui est supérieur au temps maximal de conditionnement des coupleurs étuvés in-situ. La durée maximale du conditionnement des coupleurs non étuvés in-situ est d'environ 225 h. La figure ci-dessous présente les moyennes des temps des conditionnements dans les deux cas.

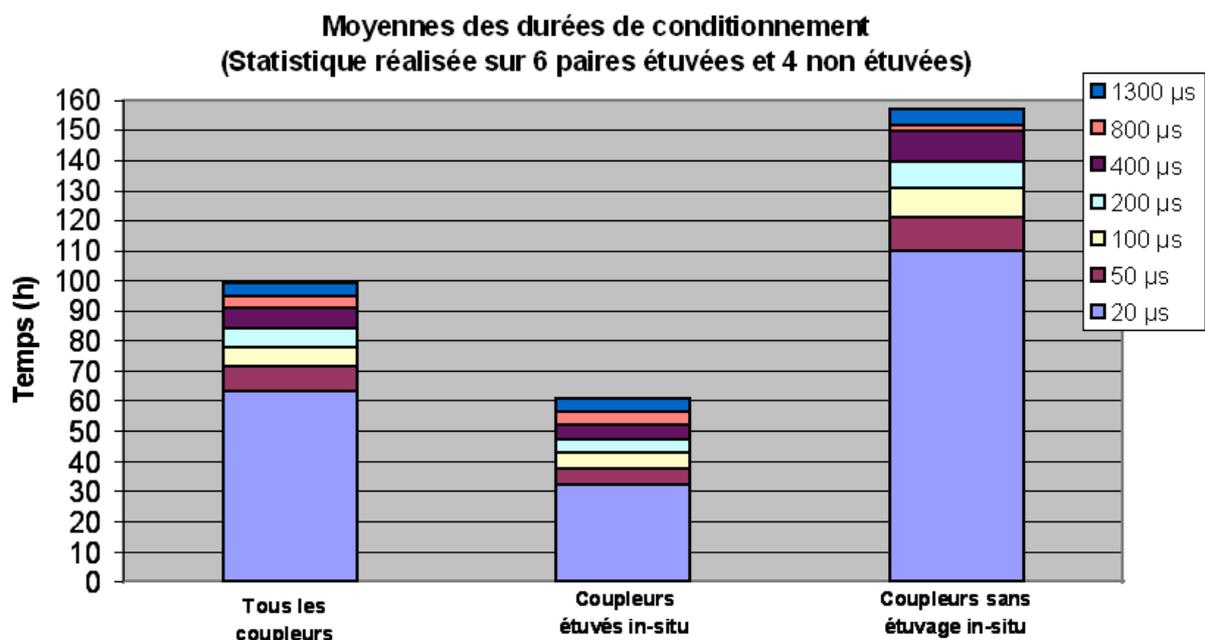


Figure (VI.8) : Mise en évidence de l'effet de l'étuvage in-situ en moyenne sur le temps de conditionnement.

Ainsi, nous pouvons constater, qu'en moyenne, le temps de conditionnement des coupleurs étuvés in-situ ne représente que 40% de ceux qui ne le sont pas.

Cette figure permet aussi de constater que le comportement des coupleurs vis-à-vis de l'élargissement de l'impulsion reste le même, ainsi la phase la plus critique du conditionnement reste celle où le coupleur reçoit la puissance HF pour la première fois (c'est-à-dire à 20 μ s).

La différence des temps de conditionnement pour les coupleurs conditionnés de la même manière est aussi importante, comme le montre les minima et les maxima présentés ci-dessus pour les deux cas étuvé et non étuvé in-situ. Ceci témoigne d'une assez grande dissemblance entre les différents coupleurs. Il est donc primordial de vérifier que cette dissemblance n'est pas à l'origine de la différence des durées de conditionnement constatées dans les deux cas étudiés (étuvé et non étuvé in-situ).

Pour ce faire, des comparaisons ont été effectuées en utilisant à chaque fois la même paire de coupleurs dans les deux cas étuvé et non étuvé in-situ. L'expérience consistait à conditionner à chaque fois une paire de coupleurs avec étuvage in-situ, à la démonter et à la re-nettoyer pour éliminer tout l'effet de l'étuvage précédent puis à l'assembler et à la reconditionner à nouveau, cette fois-ci sans étuvage in-situ. La figure ci-dessous montre les résultats de cette expérience.

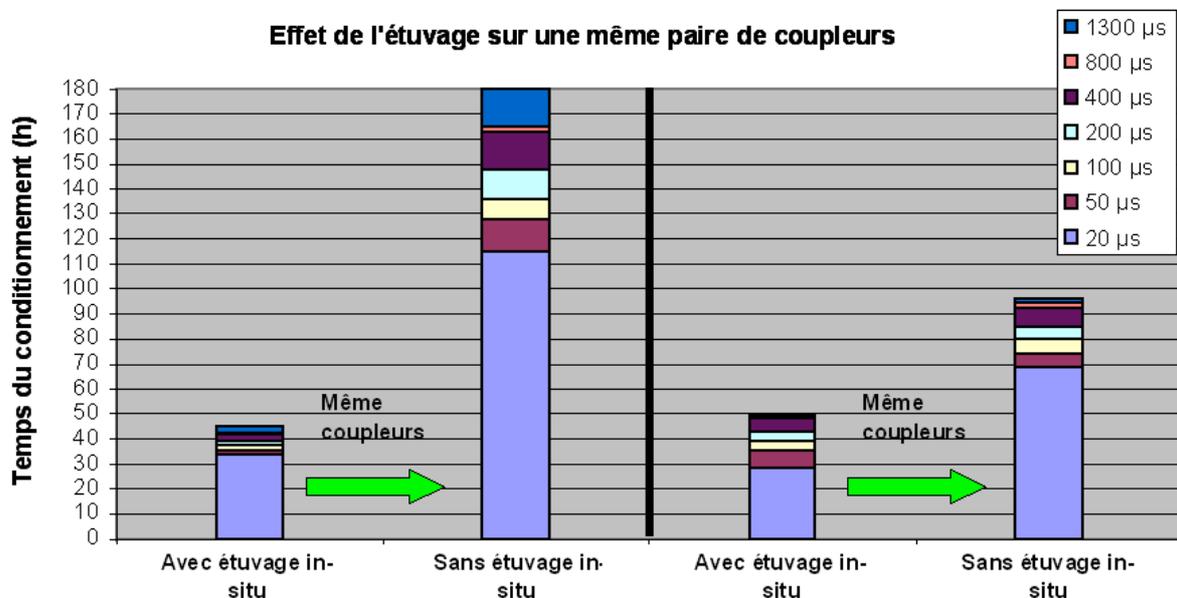


Figure (VI.9) : Etude de l'effet de l'étuvage in-situ sur le temps de conditionnement après élimination de l'influence de la dissemblance entre coupleurs.

Cette expérience montre que l'effet de l'étuvage in-situ sur le conditionnement reste très important même si l'effet de la dissemblance entre coupleurs conditionnés est éliminé. Il est à remarquer que dans le cas de l'étuvage in-situ les paires ont été conditionnées dans des temps très courts. Ceci montre qu'ils ne présentent pas de problèmes majeurs d'imperfections de construction lors du conditionnement. Toutefois, ces mêmes paires de coupleurs présentent des temps de conditionnement relativement long par rapport à leur premier conditionnement (un rapport de 400% et un rapport de 190% respectivement pour la paire présentée à gauche et celle présentée à droite). Ces résultats sont en accord avec l'étude menée sur les 10 paires de coupleurs déjà présentées.

b) L'effet du conditionnement sur la présence de la vapeur d'eau dans les coupleurs

Après avoir démontré la grande influence de l'étuvage in-situ sur le temps de conditionnement, il était intéressant de voir si des conditionnements aussi longs que ceux observés dans le cas sans étuvage in-situ permettaient d'avoir des surfaces aussi propres que celles obtenues par étuvage in-situ.

En effet, la durée du conditionnement est très dépendante des taux de dégazage des surfaces. Il est à rappeler que la variation de la puissance se base strictement sur les valeurs des vides pendant le conditionnement. Ces dernières sont l'image des dégazages des surfaces stimulées par les phénomènes créés par le passage de la HF [37] qui pourraient aider les molécules d'eau à briser leurs liaisons avec la surface et augmenter ainsi leur probabilité d'évacuation par les ports de pompage.

L'utilisation d'un spectromètre de masse branché sur le système de pompage des parties froides de chaque paire des coupleurs nous a permis d'avoir une idée sur les rapports entre les différents gaz existant dans les deux cas étuvé et non étuvé in-situ. Ce dernier cas présente des pics plus importants pour tous les éléments présents vu que le vide limite est beaucoup moins bon que celui que nous pouvons atteindre en cas d'étuvage in-situ (voir figure (VI.10)). En prenant le pic d'hydrogène comme référence (masse atomique égale à 2), on remarque qu'il y a un rapport d'environ un ordre de grandeur entre ce dernier et les pics 17 et 18 représentant l'eau dans le cas non étuvé in-situ. Ce rapport est de deux ordres de grandeurs dans le cas étuvé in-situ, et ce, avant le conditionnement.

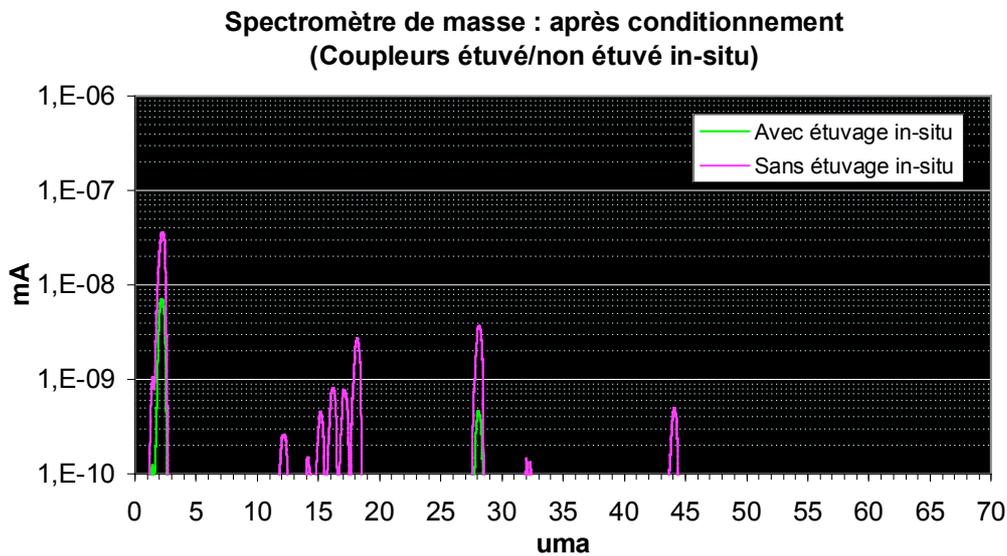
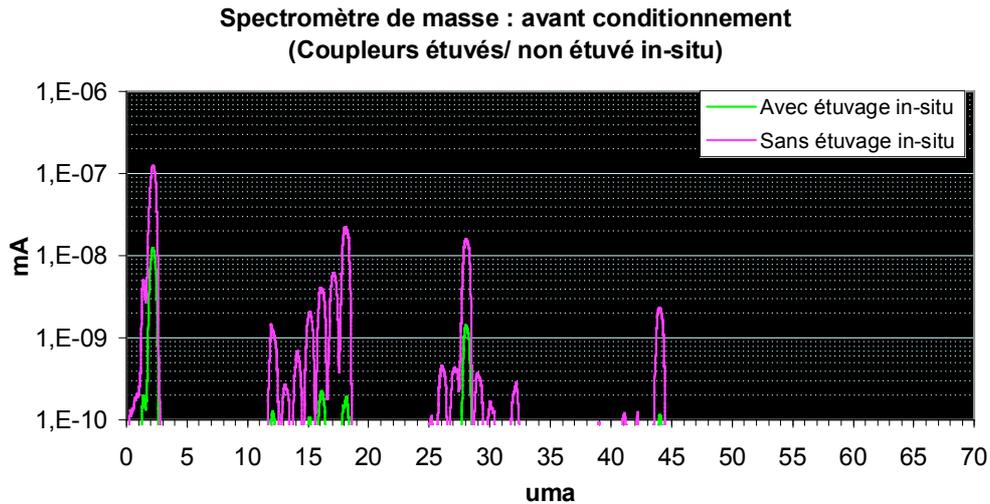


Figure (VI.10) : Gaz présent dans les coupleurs avant et après le conditionnement dans le cas d'étuvage in-situ et sans étuvage in-situ.

Après conditionnement, on remarque dans les deux cas une amélioration des pressions minimales atteintes suite à une diminution générale de la présence de tous les éléments mais le rapport entre la quantité d'hydrogène et celle de l'eau reste le même. On peut constater aussi que l'action de l'étuvage in-situ sur le dégazage est plus efficace qu'un long conditionnement.

II-3-3- Conclusion

L'adsorption de la vapeur d'eau par les surfaces est à l'origine d'une limitation de pompage significative. Toutefois, l'étuvage in-situ permet d'améliorer les niveaux des vides initiaux

dans les coupleurs en favorisant une désorption rapide de l'eau. Les tests présentés ci-dessus montrent aussi qu'il désigne un moyen efficace pour réduire d'une manière drastique le temps de conditionnement HF des coupleurs, d'où une importante économie sur le coût de cette opération. De plus, un long conditionnement des coupleurs réduit significativement la quantité d'eau qui y est présente initialement mais son influence sur le vide reste sensiblement inférieure à celle de l'étuvage in-situ. Une application plus optimale de la procédure de l'étuvage in-situ serait possible si le joint d'aluminium utilisé pour le montage de la paire de coupleurs ne posait pas une contrainte de limite thermique de 150°C.

III- L'effet du stockage sur la préservation du conditionnement

Les paires de coupleurs conditionnées sont stockées en attendant qu'elles soient testées sur cavité. Le stockage consiste à laisser les parties froides sous vide, une fois le conditionnement est terminé, et remplir les parties chaudes d'azote pur afin d'éviter l'introduction de l'air dans ces parties provoquant la dégradation de l'effet du conditionnement. Le choix de l'azote est dû à son temps de séjour relativement court sur les surfaces permettant ainsi une facilité de pompage de ce gaz une fois que ces coupleurs doivent fonctionner sous puissance HF. Une exposition des coupleurs à l'air ambiant entraînera la formation de plusieurs mono-couches de H₂O qui, à la différence de l'azote, a un temps de séjour long et poserait des difficultés de re-pompage des coupleurs ainsi qu'un problème de déconditionnement.

Il est donc intéressant de connaître l'efficacité de la procédure de stockage utilisée pour maintenir l'état de conditionnement des coupleurs. Ces derniers ne doivent pas rencontrer des difficultés de conditionnement sur cavité.

III-1- La procédure de stockage

Une fois que le conditionnement est terminé et que le vide limite est atteint, la bouteille d'azote est reliée au système de pompage de l'une des parties chaudes via une ligne introductrice séparée à son tour du port de pompage par une vanne. Cette ligne introductrice est tout d'abord pompée par une pompe turbo-moléculaire jusqu'à une pression de 10⁻⁵ mbar. A ce stade, la pompe sera arrêtée. L'azote sera alors libéré doucement dans la ligne introductrice et la vanne de séparation sera ouverte progressivement permettant le passage graduel de l'azote dans la partie chaude du coupleur. Lorsque la pression à l'intérieur de cette dernière atteint la pression atmosphérique, elle sera hermétiquement fermée par la vanne. La même opération sera effectuée pour la partie chaude du deuxième coupleur.

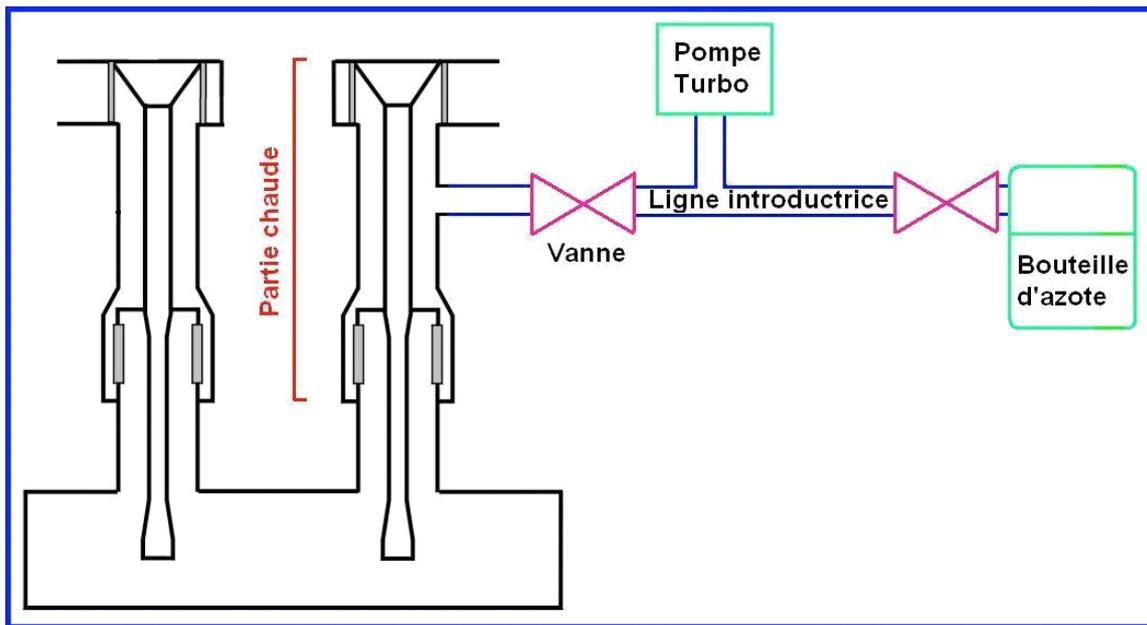


Figure (VI.11) : Principe de la mise sous azote des parties chaudes des coupleurs conditionnés.

L'azote utilisé est procuré dans des bouteilles sous une pression de 200 bar à 15°C avec une pureté supérieure à 99,996% avec les résidus suivants :

- O₂ inférieur à 5 v.p.m (volume par million) ;
- H₂O inférieur à 3 v.p.m ;
- et hydrocarbures inférieurs à 1,5 v.p.m.

III-2- L'étude de l'influence de la procédure de stockage sur le conditionnement

Afin de pouvoir étudier l'effet de la procédure de stockage sur le conditionnement des coupleurs certaines expériences ont été menées :

a) Expérience 1 : l'effet d'un stockage de courte durée sous azote d'une paire de coupleurs conditionnée

L'expérience a consisté à conditionner une paire de coupleurs étuvée in-situ. Une fois le conditionnement était effectué, une introduction d'azote a été réalisée selon la procédure décrite si dessus. Les coupleurs sont restés sous cet état pendant quelques heures puis ils ont été à nouveau re-pompés. Ensuite, le conditionnement de ces coupleurs a été relancé.

Le temps du deuxième conditionnement a été très court avoisinant le temps minimal du déroulement de la procédure utilisée et qui est entièrement dépendant des paramètres choisis du programme de conditionnement (voir figure(VI.12)).

b) Expérience2 : l'effet d'un stockage long sous azote sur le conditionnement d'une paire de coupleurs

Le principe de cette expérience est le même que celui de la précédente à la différence que, dans ce cas, la durée de stockage a été beaucoup plus longue (un mois et demi) et que la paire de coupleurs utilisée n'a pas été étuvée in-situ avant son conditionnement.

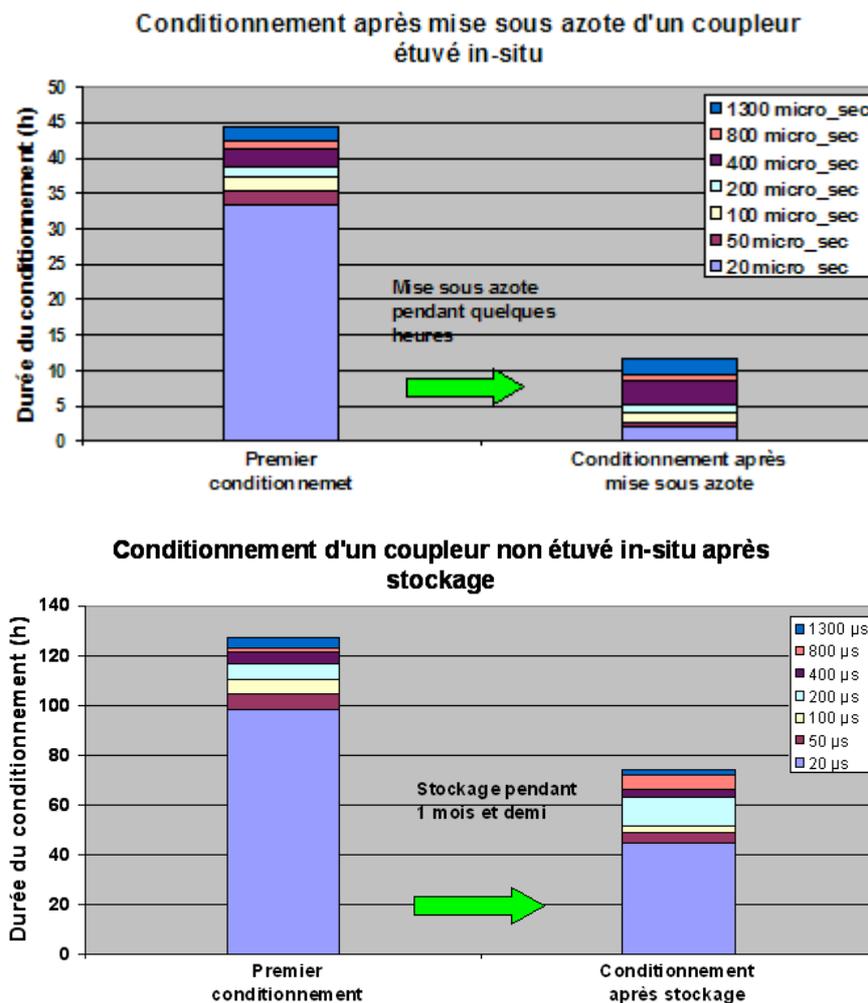


Figure (VI.12) : En haut : Durée du re-conditionnement d'une paire de coupleurs étuvée in-situ stockée sous azote pendant quelques heures. En bas : Durée du re-conditionnement d'une paire de coupleurs non étuvée in-situ stockée sous azote pendant un mois et demi.

Le temps du deuxième conditionnement a été, cette fois-ci, trop long même s'il ne présente que 60% de la durée du premier.

c) Observations et interprétations

Le stockage sous azote sur les coupleurs étuvés in-situ semble ne pas affecter leur conditionnement. Ceci est en accord avec les propriétés de l'azote, présentés précédemment, permettant de récupérer, suite à un pompage, un état de surface semblable à celui obtenu par le conditionnement. Contrairement au résultat attendu, le stockage long d'un coupleur non étuvé in-situ s'est révélé avoir des conséquences importantes sur la mémoire de conditionnement. En effet, dans l'expérience 2, on remarque que le conditionnement après stockage était ralenti dès son début, c'est-à-dire pour des impulsions de 20 μs , alors que ce coupleur avait supporté des impulsions beaucoup plus larges à son premier conditionnement. Le re-conditionnement total du coupleur a été même plus long que le premier conditionnement de l'expérience 1.

Afin de pouvoir expliquer le comportement observé dans l'expérience 2, nous proposons d'effectuer une troisième expérience permettant de déduire si le re-conditionnement long des coupleurs était dû au fait que les coupleurs n'étaient pas étuvés in-situ ou à leur long stockage.

d) Expérience 3

Suite aux deux expériences de stockages effectuées précédemment nous allons essayer à travers cette dernière expérience de conclure concernant l'effet du stockage sur un coupleur selon qu'il soit étuvé in-situ avant son conditionnement ou non.

Nous avons utilisé pour ce faire une paire de coupleurs déjà conditionnée avec un étuvage in-situ puis stockée, selon la procédure présentée, pendant deux mois. Le principe de cette expérience consiste à reconditionner cette paire une deuxième fois sans refaire un étuvage in-situ et de voir, à la fois, le comportement des coupleurs et la durée du conditionnement. Ce conditionnement s'est déroulé sans l'avènement d'aucun interlock. Le temps de conditionnement était uniquement de 12h13 soit 3h13 de plus que le temps du déroulement du programme pour la procédure utilisée. L'intégralité de ce retard est due au conditionnement effectué pendant la première étape (20 μs). Le vide de la partie froide était toujours inférieur à $2 \cdot 10^{-7}$ mbar. Les vides des parties chaudes étaient plus importants et se sont eux qui étaient à l'origine du ralentissement de ce conditionnement.

Concernant les courants électroniques mesurés après le stockage, ils sont nettement supérieurs à ceux obtenus en fin du premier conditionnement (figure (VI.13)) mais ne semblent pas affecter les niveaux de vide aussi sensiblement que pendant ce dernier. Nous pouvons ainsi constater que même si le stockage dans ces circonstances ne conserve pas parfaitement l'état du conditionnement, il permet néanmoins la restitution d'un bon comportement des coupleurs vis à vis de la HF après un court temps de conditionnement.

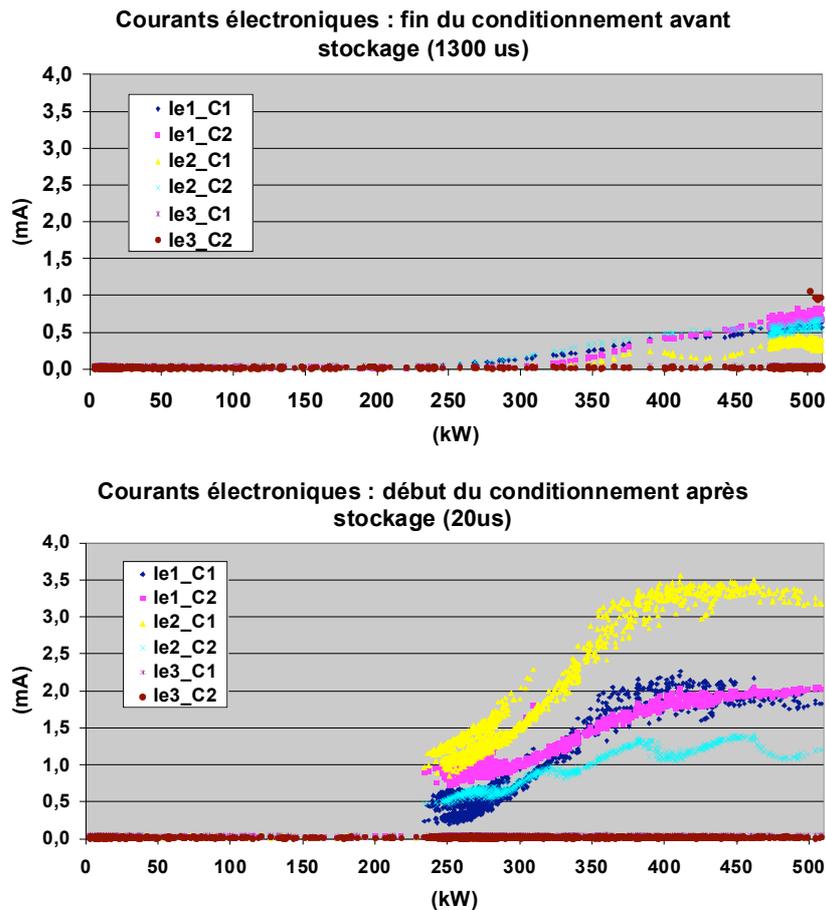


Figure (VI.13) : Comparaison des courants électroniques mesurés en fin du conditionnement et ceux au début du conditionnement après un stockage pendant deux mois pour une même paire de coupleurs.

En résumant ces trois expériences, nous pouvons constater que le stockage des coupleurs après leurs conditionnements, semblerait avoir des conséquences différentes sur la conservation de l'effet du conditionnement et ce selon qu'ils soient étuvés in-situ ou non avant ce conditionnement. En effet, les résultats des première et troisième expériences ont montré qu'un coupleur étuvé in-situ puis conditionné peut facilement retrouver son état conditionné après un stockage sous azote même pour une longue durée. Par contre, un

coupleur non étuvé in-situ avant son premier conditionnement serait beaucoup plus influencé par un long stockage. Ceci se reflète dans le temps de reconditionnement assez long. Ainsi l'ensemble de ces expériences nous permet de valider notre procédure de stockage en premier temps et de recommander l'étuvage in-situ pour les coupleurs pour une meilleure sauvegarde de leurs états après conditionnement durant toute la période de stockage.

IV- La validation des conditionnements effectués

La préparation des coupleurs TTF-III au LAL a été effectuée en vue de garantir un fonctionnement fiable de ces composants une fois montés sur les cavités TESLA. Ainsi, après avoir adapté les coupleurs au passage de la puissance et validé leurs robustesses sur un banc de test à température ambiante et en utilisant des ondes progressives, il est impératif de les tester à des conditions similaires à celles de leur fonctionnement sur la ligne accélératrice. De tels essais permettront de rendre compte de l'efficacité et de la rigueur de l'application de toutes les opérations qui leurs ont précédé. Par conséquent, les coupleurs envoyés à DESY sont testés un par un après leurs montages sur cavités dans le cryostat CHECHIA. Ces essais se font en deux étapes successives.

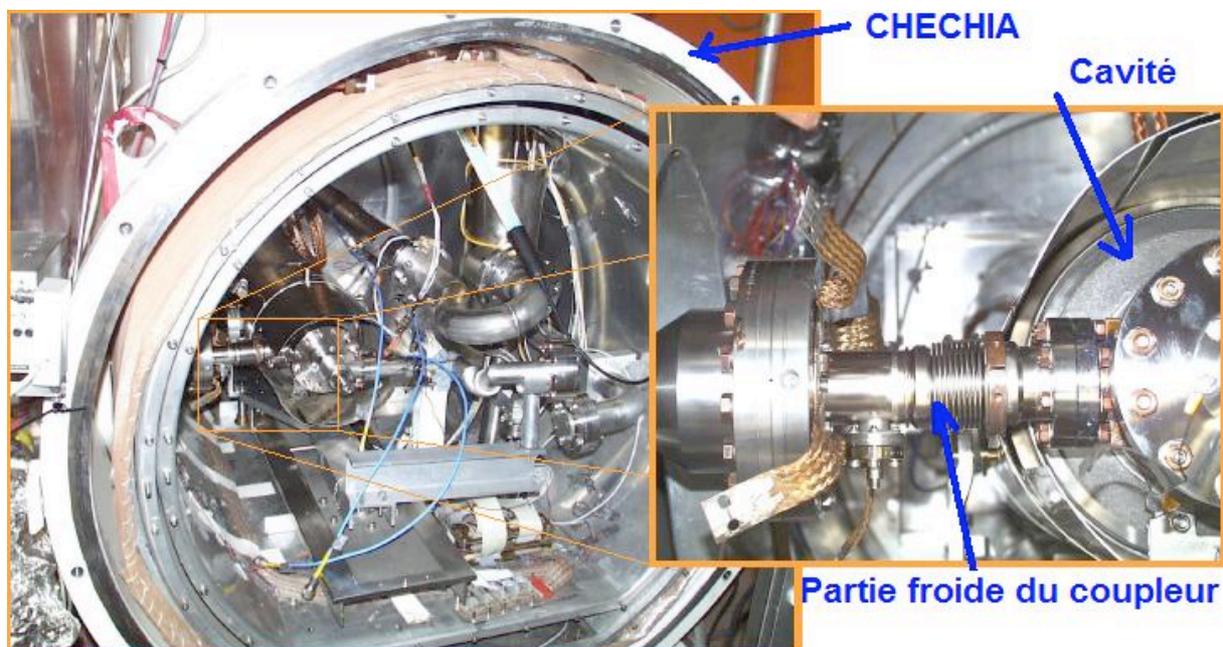


Figure (VI.14): Disposition du coupleur pendant son test sur cavité dans le cryostat CHECHIA.

La première étape consiste à reconditionner le coupleur à température ambiante et sans faire intervenir la cavité sur laquelle il est monté. Pour ce faire, il suffit d'envoyer une puissance avec une fréquence suffisamment décalée de la fréquence de résonance de la cavité pour se placer en dehors de la bande passante de ce résonateur. Ainsi toute la puissance HF via le coupleur (généralement à la fréquence de 1298 MHz) est réfléchi au niveau du résonateur. Une fois cette première étape est effectuée avec succès, une deuxième étape faisant intervenir la cavité peut alors être effectuée aux températures de fonctionnement de cette dernière. Le cryostat est alors hermétiquement fermé et pompé. Ensuite, la cavité est soumise à la température 2 K. La puissance est alors envoyée à la cavité à sa fréquence de résonance via le coupleur après avoir réglé la pénétration de l'antenne pour obtenir un coefficient de qualité en charge Q_L de 3×10^6 . Les impulsions modulant la HF ont une forme permettant de créer un champ accélérateur constant à partir d'une certaine date durant le remplissage de la cavité simulant ainsi l'effet du passage du faisceau dans la cavité (voir figure (VI.15)).

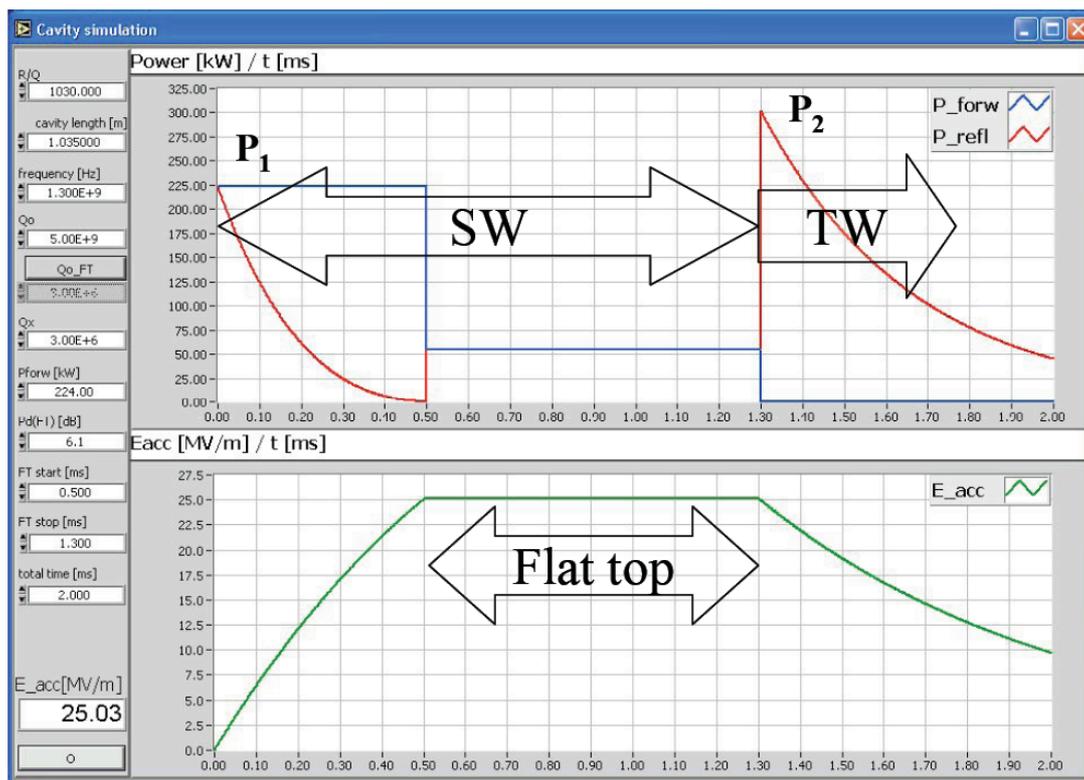


Figure (VI.15) : Le cadran du haut montre la forme de l'impulsion (en bleu) modulant la HF permettant de simuler l'introduction du faisceau dans les cavités à partir d'une certaine date (0,5 ms dans ce cas). La courbe en vert, dans le cadran du bas, montre l'obtention d'un champ accélérateur constant à partir de cette date jusqu'à la fin de l'impulsion. (Résultats de simulations présentés dans la référence [63]).

Les coupleurs conditionnés au LAL qui ont passé ces tests les ont tous passés avec beaucoup de succès. Leurs conditionnements hors résonances ont été effectués en des temps remarquablement meilleurs que ce qui se faisait avant. De plus, ils ont permis le fonctionnement de certaines cavités TESLA sous des champs accélérateurs d'environ 35 MV/m (voir figure (VI.16)). Ces tests sur les cavités n'ont en aucun cas été limité par les coupleurs.

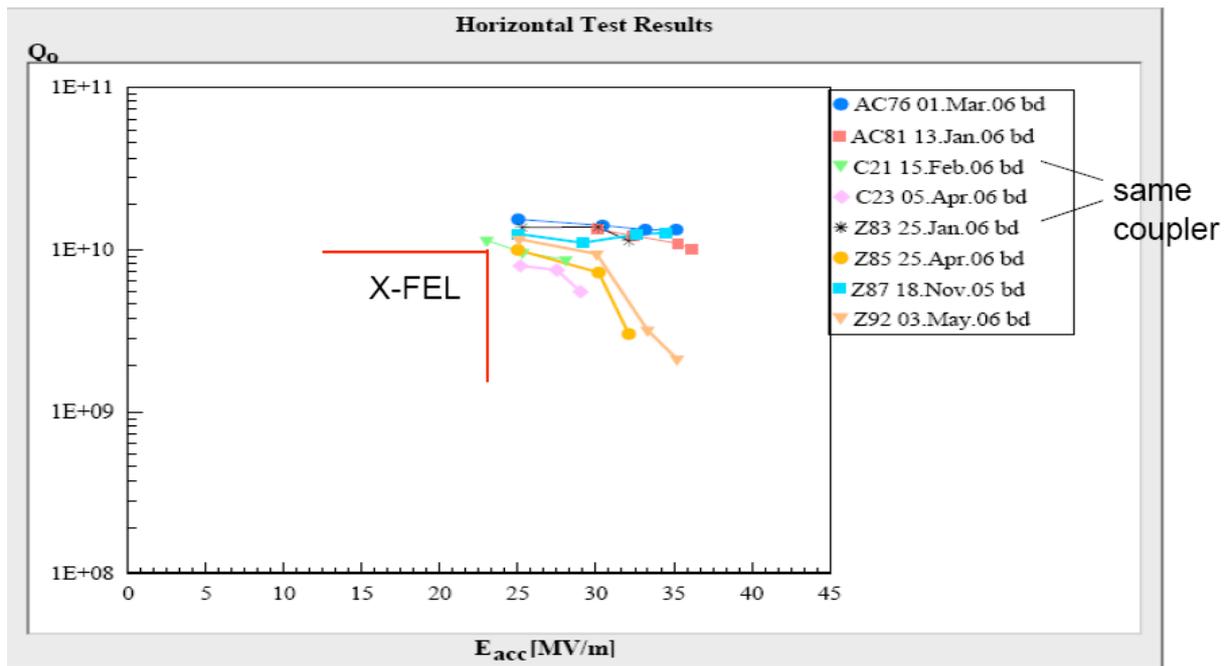


Figure (VI.16) : Performances obtenus par des cavités TESLA montées avec des coupleurs TTF-III conditionnés au LAL.

Finalement, ces résultats peuvent ainsi valider toute la série des opérations effectuées sur les coupleurs TTF-III au LAL. Les conditionnements HF réalisés au sein de ce dernier, a donc permis à ces coupleurs de pouvoir fonctionner d'une manière fiables jusqu'aux limites supportées des cavités utilisées pour les tests.

Conclusion

Plusieurs conditionnements automatisés de coupleurs TTF-III ont été réalisés avec succès au LAL. Les mesures enregistrées pendant ces opérations ont permis de noter le comportement de ces coupleurs pour la procédure appliquée. Nous avons exposé dans ce chapitre les différences et les similarités relevées entre les différents conditionnements. Un intérêt particulier a été donné au temps du conditionnement. L'influence de l'étuvage in-situ sur ce

dernier a fait l'objet d'une étude qui a permis de donner une estimation de son apport dans la réduction du temps de conditionnement. Elle nous a également enseigné que sa contribution à l'amélioration du vide était plus importante qu'une longue exposition du coupleur à la HF.

Nous nous sommes aussi intéressés, dans ce chapitre, à la validation de la procédure de stockage des coupleurs après leurs conditionnements. Cette étude a montré que les coupleurs étuvés in-situ avant leur conditionnement gardent assez bien leur état conditionné après un long stockage. Toutefois, les coupleurs non étuvés in-situ perdent une grande partie de leur conditionnement.

Une validation de l'efficacité des conditionnements des coupleurs réalisés au LAL a été prouvée par le test d'un certain nombre d'entre eux sur des cavités TESLA dans des conditions cryogéniques, à DESY. Ces coupleurs permettent aux cavités de fonctionner sous des champs de l'ordre de 35 MV/m.

Chapitre VII

Optimisation de la procédure de conditionnement des coupleurs

Sommaire :

- I- Changement des seuils du vide
 - II- Diminution du temps du programme de conditionnement automatique
 - III- L'influence de l'augmentation du taux de répétition sur le conditionnement des coupleurs
-

Cette partie présente l'enchaînement logique et chronologique des changements apportés sur les paramètres de la procédure de conditionnement. Ces modifications ont été basées sur l'étude de plusieurs conditionnements déjà effectués au LAL. Certaines observations ont permis d'orienter à chaque fois nos décisions de manière à chercher les meilleures solutions pouvant à la fois réduire le temps de conditionnement et garantir la sécurité des coupleurs.

I- Changement des seuils du vide

Le conditionnement de plusieurs paires de coupleurs TTF-III selon la procédure de DESY a révélé une grande différence entre les temps de conditionnement de chaque paire. Cette différence est due à l'influence des dissemblances entre les coupleurs sur leur comportement pendant cette opération. En se limitant aux coupleurs étuvés in-situ et conditionnés au LAL, la différence des temps de conditionnement a été sensiblement réduite à un intervalle de temps de 45h à 90h avec une moyenne de 60h. Cette dernière reste une valeur relativement élevée compte tenu de la nécessité de conditionner 500 paires de coupleurs pour le projet XFEL.

L'analyse des enregistrements des valeurs des vides pendant les conditionnements ont permis de remarquer le fait suivant : une partie importante du temps de conditionnement a été dépensée à des niveaux de puissance où la fluctuation du vide était trop importante (dépassant sensiblement les seuils choisis (seuil1 = 2×10^{-7} ; seuil2 = 4×10^{-7})) sans que les courants électroniques soient significatifs.

Or, en respectant la procédure de conditionnement utilisée jusqu'à présent, de telles valeurs de vides obligent le système à diminuer, d'un coup, la puissance d'une manière significative ($4 \times \Delta P^1$ si l'un des vides est supérieur à 4×10^{-7}) afin de permettre une récupération efficace des niveaux de pression tolérés. En conséquence, l'augmentation de la puissance pour réatteindre l'ancien niveau de puissance sera lente. La succession de telles opérations est très pénalisante en temps de conditionnement. L'exemple ci-dessous (figure (VII.1)), montre un cas où l'augmentation de la puissance de 80 kW à 117 kW pour une largeur d'impulsion de 20 μ s a pris 5 h à cause de la variation excessive du vide dans les parties froides. Or l'efficacité du conditionnement est essentiellement en fonction de l'action des courants électroniques sur l'état de surface et le coefficient d'émission secondaire. Ceci permettra de pouvoir accéder à des niveaux de puissance plus importants avec un maximum de sécurité pour les coupleurs. Ainsi le cas présent ne semble pas permettre un conditionnement efficace pendant cette phase du conditionnement à faibles courants.

De ce fait, une augmentation des pressions seuils utilisées pour la procédure de conditionnement actuelle pourrait réduire sensiblement le temps de conditionnement. Toutefois, ceci pourrait être à l'origine du déclenchement de décharges électriques pouvant avoir des effets irréversibles sur les fenêtres des coupleurs. De plus, vu la dissemblance observée sur les coupleurs, ce problème ne peut pas être résolu en sacrifiant une paire de coupleurs en la soumettant à une telle expérience. Par contre, une statistique menée sur plusieurs coupleurs peut donner une conclusion assez fiable.

Etant donné que cette même procédure de conditionnement est aussi utilisée pour les coupleurs TTF-III à DESY moyennant un système de vide différent, il est utile de déduire les niveaux des seuils à utiliser à partir des différences entre le système du vide LAL et celui de DESY.

¹ Nous rappelons que ΔP est le pas de variation de la puissance utilisé par le programme de conditionnement.

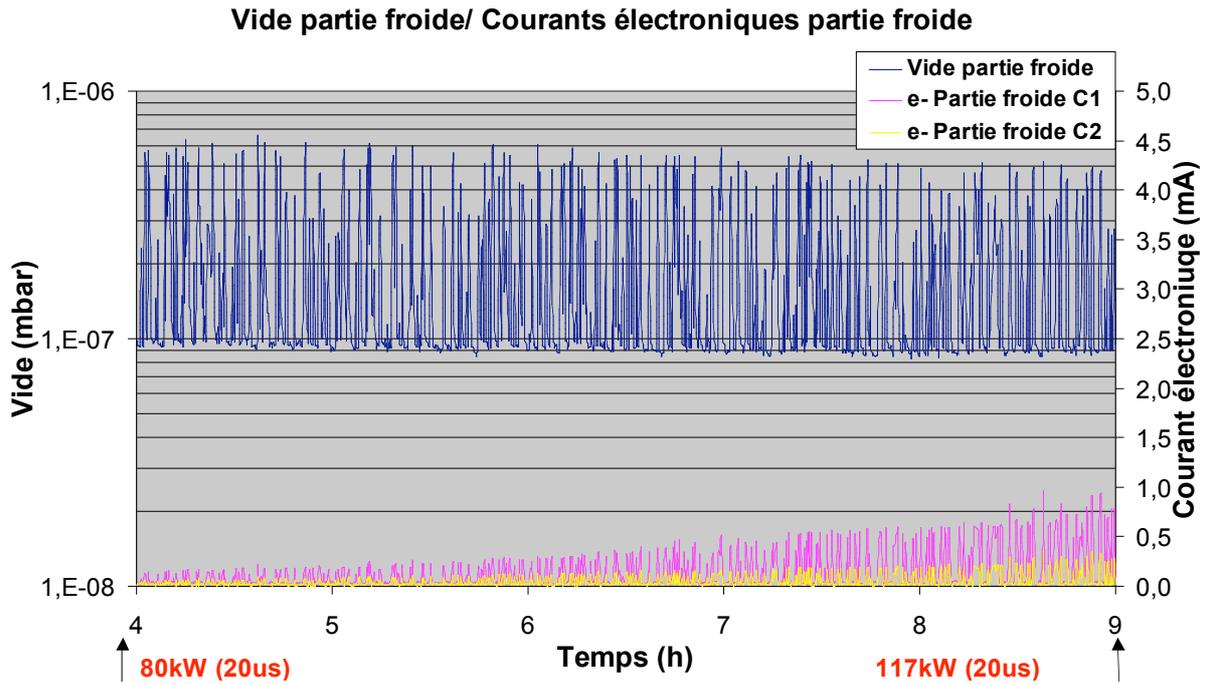


Figure (VII.1) : Présentation d'un exemple d'une période de conditionnement consommatrice en temps mais pas forcément efficace pour l'amélioration des états de surfaces des coupleurs. (e- : courant électronique ; C1 et C2 : respectivement coupleur en amont et coupleur en aval de la paire conditionnée)

I-1- Comparaison des installations du vide LAL/DESY

Les détails des calculs approchés permettant la comparaison des deux installations du vide LAL et DESY sont présentés dans la mémo technique [64].

I-1-1- Caractérisation de l'installation actuelle du vide pour le conditionnement des coupleurs au LAL

Le pompage est assuré pour chacune des parties par une pompe ionique Starcell. Chaque pompe a une vitesse de pompage de $S = 20$ l/s. Comme il peut être constaté, le système du vide des deux parties chaudes 1 et 2 est identique (voir figure (VII.2)). L'installation de pompage a été optimisée de manière à ce que les pompes soient les plus proches possibles des ports de pompage.

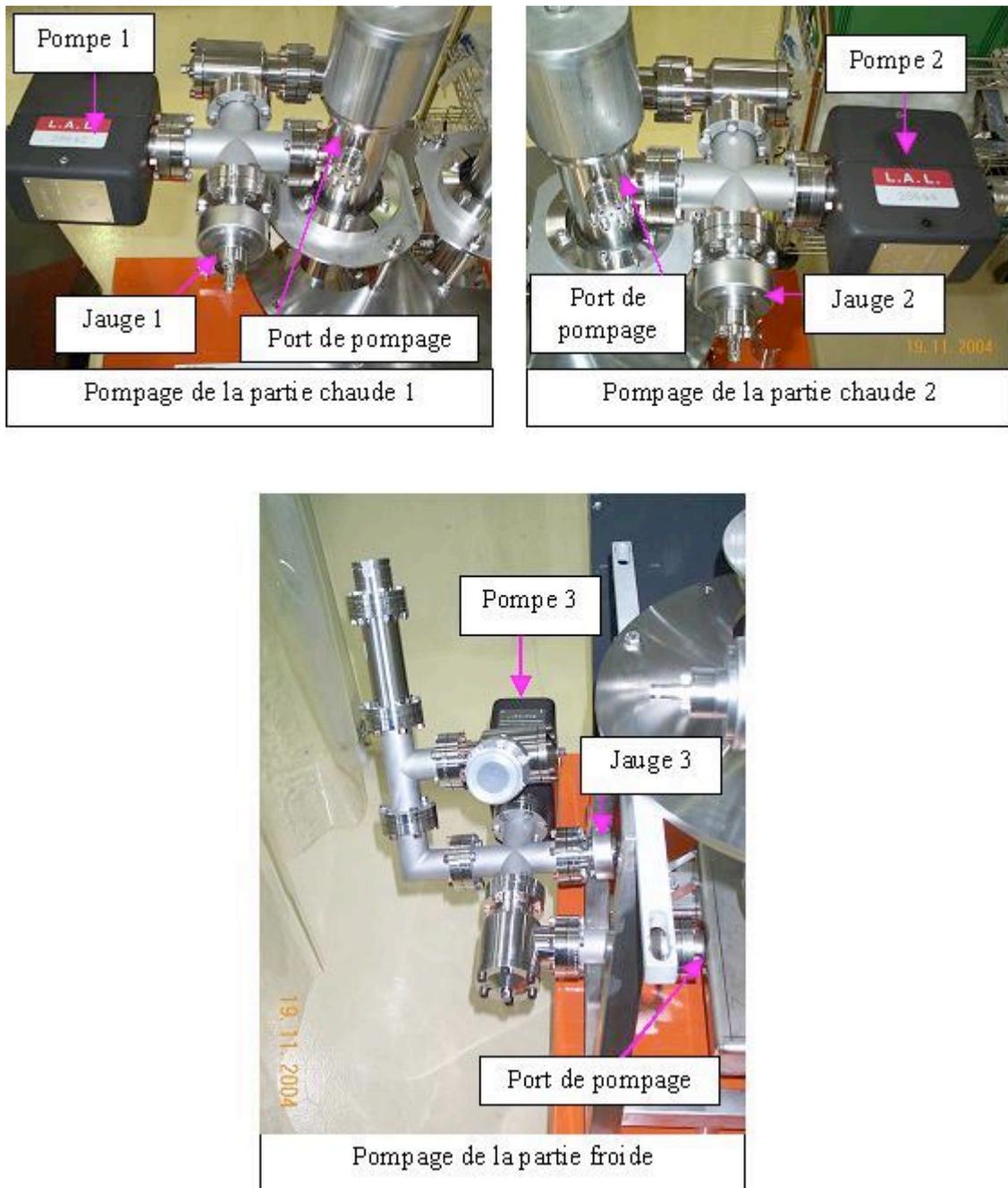


Figure (VII.2) : Système du vide du LAL pour le conditionnement des paires de coupleurs TTF-III.

a) Les hypothèses de calcul utilisées

Dans le calcul suivant, nous allons utiliser des formules pratiques pour le calcul des caractéristiques de l'installation en se basant sur les hypothèses suivantes :

- $D \ll D_0$ où D est le diamètre de la canalisation et D_0 le diamètre de l'enceinte en amont ;
- régime d'écoulement moléculaire ;

- ces calculs sont valables pour l'air à 20 °C ;
- dégazage des canalisations de pompage et de mesure négligeable .

Par conséquent, les formules de calculs utilisées [65] sont présentées ci-dessous. Toutes les longueurs seront exprimées en centimètre :

- conductance C [l/s] d'une canalisation cylindrique de longueur L et de diamètre D :

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L} \text{ [VII.1] ;}$$

- correction de bout : conductance cylindrique dont la longueur n'est pas grande devant son diamètre :

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L + 1,33D} \text{ [VII.2] ;}$$

- longueur équivalente d'une canalisation cylindrique coudée $L_{\text{equiv}} = L_{\text{axiale}} + D$ [VII.3].

Dans toutes les formules précédentes les longueurs sont exprimées en cm.

b) Modélisation de l'installation de pompage des coupleurs au LAL

La modélisation de l'installation de pompage de la paire de pompage se base sur les photos de la canalisation présentées ci-dessus (Figure (VII.3)).

i. Partie chaude 1

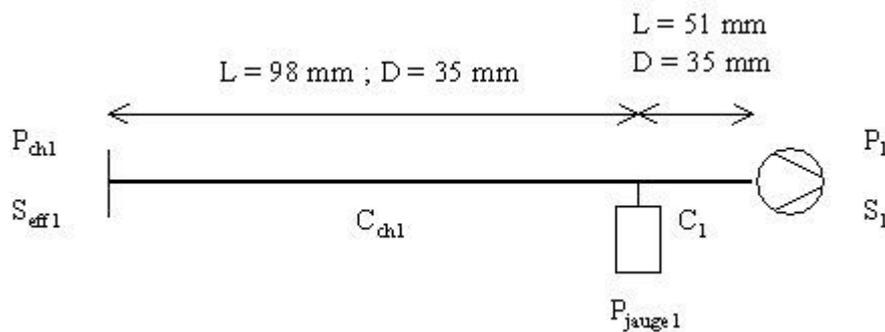


Figure (VII.3) : Modèle pour le calcul des caractéristiques du pompage de la partie chaude d'un coupleur TTF-III.

- P_{ch1} : Pression au niveau du port du pompage de la partie chaude 1.
- P_1 : Pression au niveau de la pompe 1.
- P_{jauge1} : Pression mesurée par la jauge 1.
- S_1 : Vitesse de pompage de la pompe 1.

S_{eff1} : Vitesse efficace de pompage au niveau du port de pompage de la partie chaude 1.

En appliquant les formules de calcul des conductances données précédemment nous obtenons :

$$[VII.2] \Rightarrow C_{ch1} = 35,89 \text{ l/s.}$$

$$[VII.1] \Rightarrow C_l = 101,72 \text{ l/s.}$$

La vitesse efficace de pompage S_{eff1} peut être exprimée par :

$$\frac{1}{S_{eff1}} = \frac{1}{C_{ch1}} + \frac{1}{C_l} + \frac{1}{S_1} \Rightarrow S_{eff1} = \frac{S_1 C_l C_{ch1}}{S_1 C_l + S_1 C_{ch1} + C_l C_{ch1}} \quad [VII.4].$$

Ainsi nous obtenons

$$S_{eff1} = 11,40 \text{ l/s}$$

En exprimant le flux gazeux Q comme suit :

$$\begin{cases} Q = C_l (P_{jauge1} - P_1) \\ Q = C_{ch1} (P_{ch1} - P_{jauge1}) \\ Q = S_1 P_1 \end{cases} \quad [VII.5]$$

nous pouvons obtenir :

$$P_{ch1} = P_{jauge1} \left(1 + \frac{S_1 C_l}{C_{ch1} (C_l + S_1)} \right) \quad [VII.6]$$

D'où le rapport entre la mesure de la pression P_{jauge1} et la valeur effective P_{ch1} :

$$P_{ch1} = 1,47 P_{jauge1}$$

ii. Partie chaude 2

Comme le circuit équivalent obtenu pour la partie froide est similaire à la partie chaude 1, nous pouvons reprendre le même calcul pour obtenir :

La vitesse efficace de pompage S_{eff2} au niveau du port de pompage de la partie chaude 2 est:

$$S_{eff2} = 11,40 \text{ l/s.}$$

Le rapport entre la mesure de la pression P_{jauge2} au niveau de la jauge 2 et la valeur effective de la pression P_{ch2} au niveau du port de pompage de la partie chaude 2 est:

$$P_{ch2} = 1,47 P_{jauge2}.$$

iii. Partie froide

Un schéma équivalent du modèle représentant le système du pompage de la partie froide est donné par la figure (VII.4).

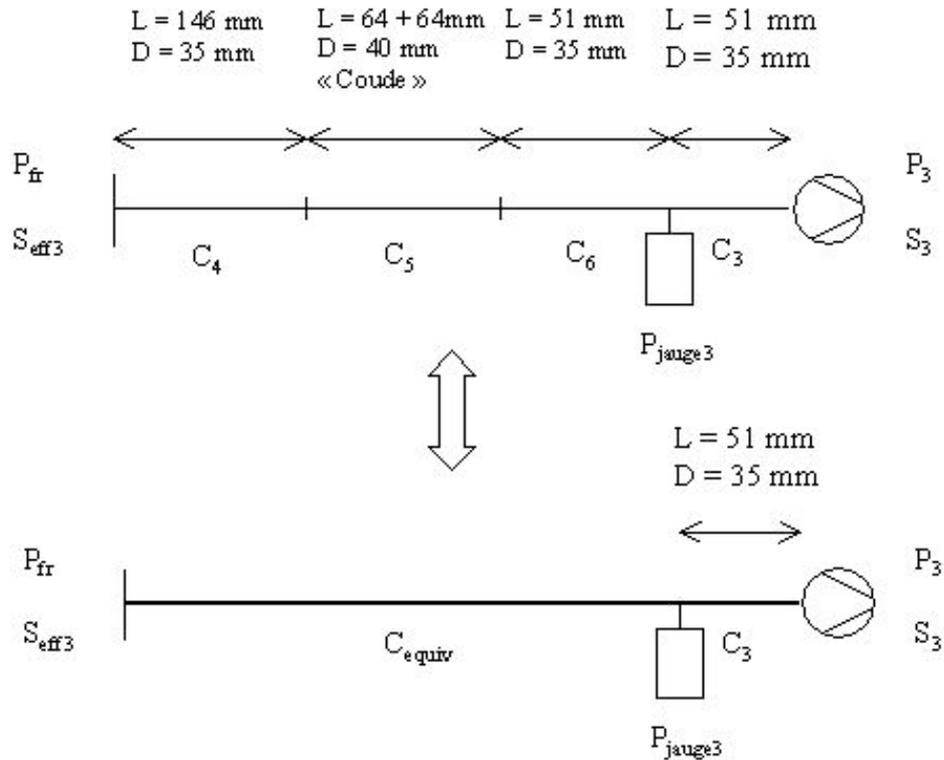


Figure (VII.4) : Modèle pour le calcul des caractéristiques du pompage de la partie froide d'un coupleur TTF-III.

P_{fr} : Pression au niveau du port du pompage de la partie froide.

P_3 : Pression au niveau de la pompe 3.

P_{jauge3} : Pression mesurée par la jauge 3.

S_3 : Vitesse de pompage de la pompe 3.

S_{eff3} : Vitesse efficace de pompage au niveau du port de pompage de la partie froide.

Les valeurs des conductances peuvent être calculées comme suit :

En utilisant [VII.2], on obtient $C_4 = 26,94$ l/s.

En utilisant [VII.1], on obtient $C_6 = C_3 = C_1 = 101,72$ l/s.

En utilisant [VII.3] et [VII.1], on obtient $C_5 = 46,10$ l/s.

$$\frac{1}{C_{equiv}} = \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} + \frac{1}{C_6} \Rightarrow C_{equiv} = \frac{C_4 C_5 C_6}{C_4 C_5 + C_4 C_6 + C_5 C_6} \quad [\text{VII.7}]$$

$$C_{equiv} = 14,57 \text{ l/s.}$$

Comme nous avons ramené un circuit similaire à celui de la partie chaude 1, le reste du calcul s'effectue de la même manière que pour ce dernier.

La vitesse efficace de pompage S_{eff3} sera donc

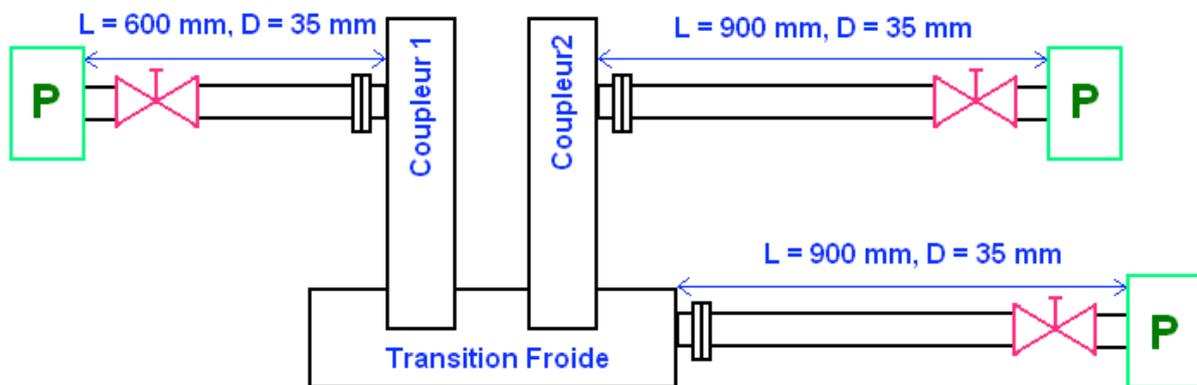
$$S_{eff3} = 7,78 \text{ l/s}$$

et le rapport entre la mesure de la pression P_{jauge3} et la valeur effective P_{fr} sera donné par :

$$P_{fr} = 2,15 P_{jauge3}.$$

I-1-2- Installation de pompage des coupleurs à DESY

Nous avons refait les mêmes calculs que ceux présentés en haut en se basant sur un schéma du système de vide de DESY présenté dans la figure (VII.5). Les pompes ioniques sont identiques et ont chacune une vitesse de pompage de 60 l/s. Dans ce cas, les mesures du vide ont été effectuées directement avec les courants des pompes ioniques.



P: Pompe ionique 60 l/s

Figure (VII.5) : Système du vide utilisé par DESY pour le conditionnement des coupleurs de puissance HF TTF-III.

Nous avons appliqué les mêmes hypothèses pour caractériser l'installation du vide de DESY. Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau comparatif suivant :

Caractéristiques du système du vide		LAL	DESY
Vitesse de chacune des pompes ioniques		20 l/s	60 l/s
Partie chaude 1	Vitesse efficace de pompage au niveau du coupleur	11,40 l/s	7,1 l/s
	(Pression effective) / (Mesure de pression)	1,47	8,5
Partie chaude 2	Vitesse efficace de pompage au niveau du coupleur	11,40 l/s	5,0 l/s
	(Pression effective) / (Mesure de pression)	1,47	12
Partie froide	Vitesse efficace de pompage au niveau de la transition	7,78 l/s	5,0 l/s
	(Pression effective) / (Mesure de pression)	2,15	12

Tableau VII.1 : Comparaison des caractéristiques des systèmes de pompage des coupleurs TTF-III pendant les conditionnements effectués au LAL et à DESY.

De ce tableau nous pouvons déduire qu'en plus du fait que l'installation de pompage du LAL bénéficie d'une meilleure vitesse effective de pompage, le programme de conditionnement de DESY se base sur une estimation du vide qui est au meilleur des cas cinq fois plus petite que l'estimation du LAL pour la même valeur du vide mesuré. Ceci nous permet d'avoir une marge de variation des seuils du vide et des niveaux d'interlock d'au moins cinq fois.

En se basant sur les données enregistrées pendant les conditionnements effectués au LAL, nous avons opté pour les nouveaux paramètres du vide suivant :

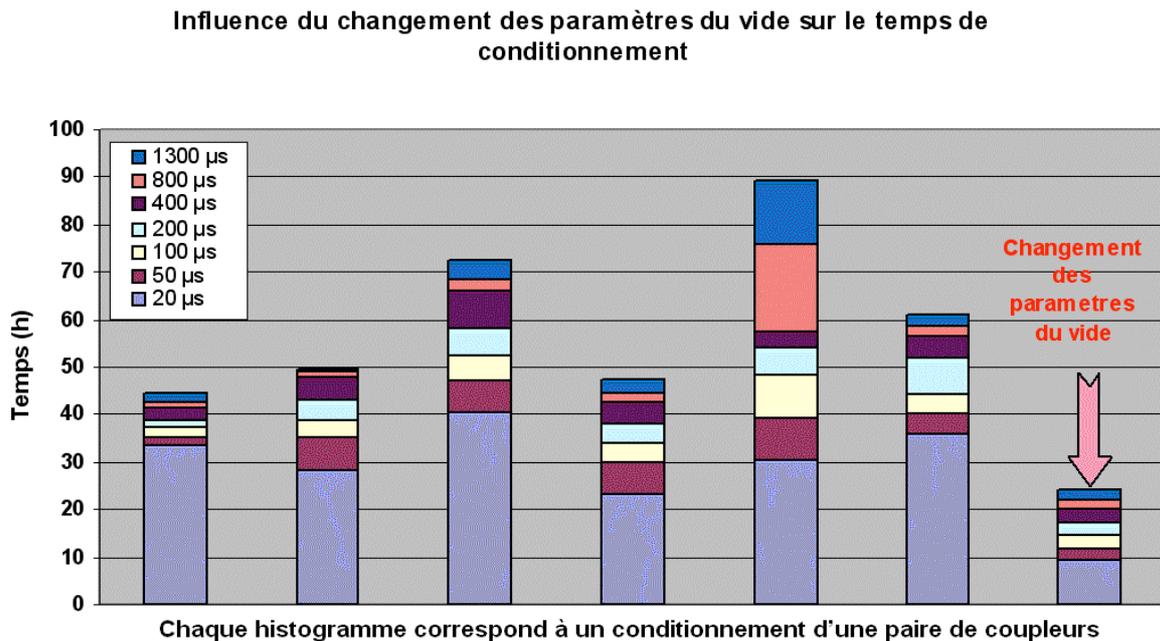
	Anciens paramètre du vide (mbar)	Nouveaux paramètre du vide (mbar)
Seuil1	2×10^{-7}	6×10^{-7}
Seuil2	4×10^{-7}	1×10^{-6}
Interlock	10^{-6}	5×10^{-6}

Tableau VII.2 : Les nouveaux paramètres du vide pour le conditionnement des coupleurs TTF-III.

I-2- L'influence du changement des paramètres du vide sur le temps de conditionnement

Un premier conditionnement avec étuvage in-situ, utilisant ces nouveaux paramètres, a permis de constater une amélioration conséquente en temps de conditionnement (Figure (VII.6)). Pour la première fois nous sommes arrivés à diminuer d'environ 50% les meilleurs temps de conditionnement enregistrés à DESY et au LAL. Ce temps de conditionnement est de l'ordre de 24h [66].

Pendant ce conditionnement toutes les étapes de la procédure utilisant des largeurs d'impulsions supérieures à 20 μs avaient une durée très voisine du temps du programme imposé par la durée du cycle du contrôle/commande pour la variation de la puissance qui est imposée par la procédure (voir figure (VII.6)). Ceci est dû au fait que les vides sont restés généralement inférieurs au premier seuil du vide. Ainsi, il est possible de gagner d'avantage en temps de conditionnement sur ces étapes en réduisant la durée de ce cycle.



Tous ces coupleurs sont étuvés in-situ

Figure (VII.6) : Le gain du temps de conditionnement réalisé en adoptant les nouveaux paramètres du vide. Ces histogrammes sont relatifs à sept paires de coupleurs étuvés in-situ.

II- Diminution du temps du programme de conditionnement automatique

Jusqu'à présent tout changement de la valeur de la puissance est suivi d'un temps d'attente de 30 s durant lequel la puissance sera maintenue constante (chapitre V). Durant ce temps là (que nous pouvons aussi appeler durée de la boucle de contrôle de la puissance), l'excitation des surfaces par les impulsions RF pourrait être à l'origine de nouveaux dégazages notamment suite à une augmentation de la puissance. Ces derniers peuvent être peu intenses et donc rapidement pompés permettant ainsi au système de contrôle de garder les niveaux du vide au dessous du premier seuil. Mais aussi, ces dégazages peuvent être assez importants et entretenus pour obliger le système à diminuer la puissance en fin de cette période d'attente.

Dans ce cas, il est intéressant de pouvoir pomper tout l'excédent de gaz suite à une seule diminution de la puissance. Autrement, le système continuera à diminuer la puissance après un second temps d'attente puis essaiera de regagner des puissances plus élevées toujours en perdant les mêmes temps d'attente. La répétition d'une telle action peut être très consommatrice en temps de conditionnement. D'autant plus que l'observation des conditionnement déjà effectuée au LAL montre une meilleure efficacité du conditionnement si la puissance est gardée toujours assez voisine des valeurs provoquant des dégazages importants. En d'autres termes : « Soit un coupleur en cours de conditionnement et supportant le passage de la puissance jusqu'à une valeur P1 sans qu'il n'y ait une création de dégazages ni de courants excessifs. Si une puissance P2 supérieure à P1 provoque des dégazages excessifs dans le coupleur, le fait de l'exposer à une puissance trop inférieure à P1 n'aura pas une influence significative sur son comportement à P2. ». D'où la nécessité d'optimiser le temps d'attente.

Ainsi une diminution du temps d'attente risque d'avoir des conséquences sur les capacités du système à récupérer un bon vide dans les coupleurs d'une manière aussi efficace qu'avant. Ce problème concerne surtout la première étape du conditionnement (à 20 μ s) où les surfaces sont encore très réactives au passage de la puissance. Notre but est de réduire d'une manière significative le temps d'attente et de permettre avec ce changement la diminution du temps de conditionnement. Nous nous sommes donc fixé un critère qualitatif qui permettrait d'apprécier la réaction du système du pompage aux dégazages.

Le critère choisi est le suivant :

« Le système de pompage doit, suite à un événement ponctuel de dégazage, pouvoir ramener des pressions importantes avoisinant le seuil d'interlock ($5 \cdot 10^6$ mbar) à des pressions suffisamment basses ($< 6 \cdot 10^7$ mbar) pour pouvoir augmenter la puissance et ce pendant moins d'un seul temps d'attente. »

Pour se baser sur des cas réels représentant ce problème nous avons examiné des enregistrements de l'évolution du pompage de la puissance suite à des interlocks survenus pendant des conditionnements précédents (voir figure (VII.7)).

Les résultats affichés dans la figure (VII.7) montrent que le système de pompage est capable de répondre au critère posé pour un temps d'attente de 5 secondes. Ce résultat est bien sûr valable pour les trois parties pompées de l'assemblage de la paire de coupleurs. Nous avons

opté pour un nouveau temps d'attente trois fois plus grand (15 s) que la valeur trouvée ce qui permet d'avoir une certaine marge de sécurité.

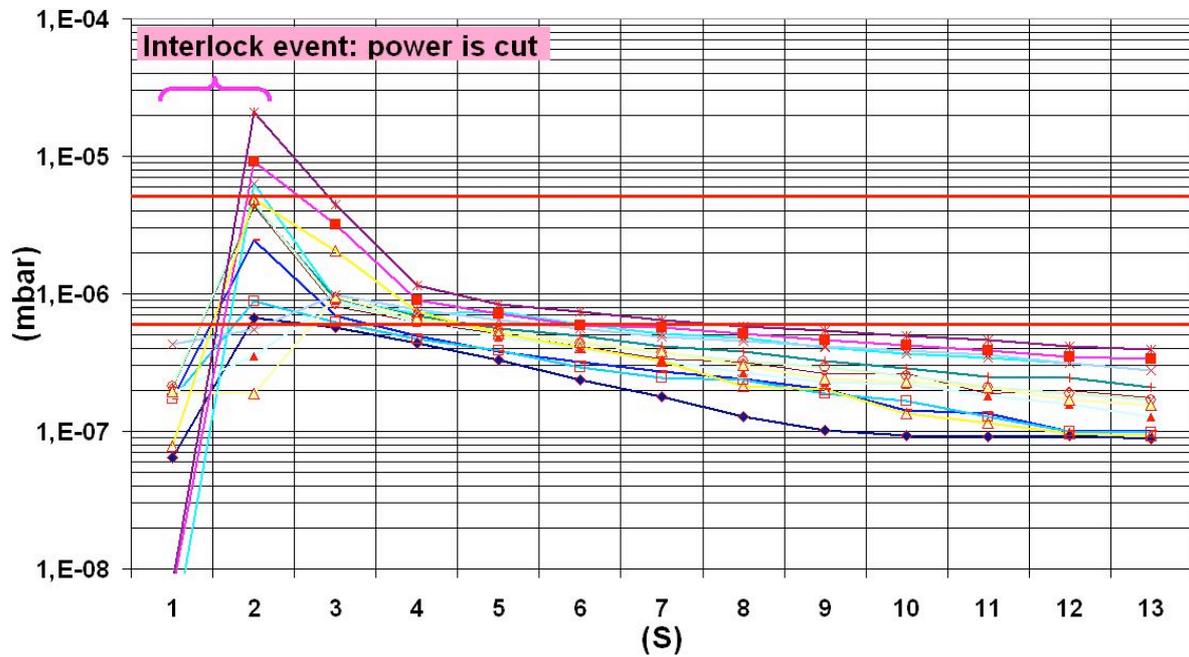


Figure (VII.7) : Temps nécessaire pour la récupération d'une valeur tolérée du vide (inférieure au premier seuil) suite un événement de dégazage accompagné par un déclenchement d'interlock.

L'utilisation de ce nouveau temps a été testée pendant un conditionnement d'une nouvelle paire de coupleurs. Une nouvelle performance en temps de conditionnement a ainsi pu être réalisée en atteignant la valeur de 20 h (voir figure (VII.8)).

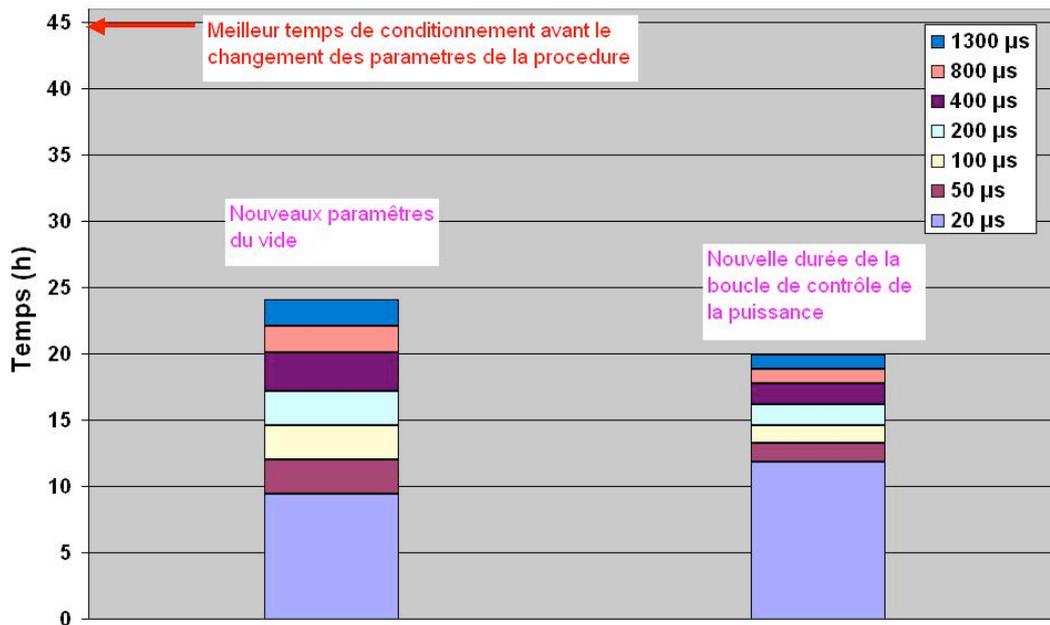


Figure (VII.8) : Les nouveaux temps de conditionnement obtenus après les changements apportés sur la procédure de conditionnement.

Observations et interprétations

Ces deux derniers changements de paramètres de la procédure de conditionnement ont permis d'avoir des résultats encourageants en matière d'amélioration du temps du conditionnement. Le changement des paramètres du vide semble permettre d'économiser efficacement les périodes de conditionnement jugées non suffisamment efficaces comme celle représentées dans la figure (VII.1). La diminution de la durée de la boucle de contrôle de la puissance du conditionnement semble elle aussi apporter une amélioration supplémentaire non négligeable au temps de conditionnement. Néanmoins, plus de statistiques doivent être effectuées pour confirmer le résultat relatif à ce dernier conditionnement.

Le gain en temps réalisé par cette dernière modification a été apporté sur les étapes utilisant des largeurs d'impulsion supérieures à 20 µs, comme nous l'avons prévu. Il a été aussi intéressant de voir que le temps de conditionnement relatif à la première étape est devenu plus long dans le cas utilisant un temps d'attente plus court (voir figure (VII.8)). Ceci pourrait être expliqué par la différence de comportement des coupleurs vis à vis de la puissance à cause de leur dissemblance. Mais, une analyse plus approfondie des comportements des coupleurs pendant ces deux derniers essais expérimentaux a révélé une autre explication.

En effet, pendant ces deux derniers conditionnements un nouveau comportement des coupleurs a été observé. Pendant la première étape du conditionnement et à partir de la puissance 550 kW, nous avons observé, pour les deux paires, un déclenchement d'une série d'interlocks qui ont ralenti le conditionnement. En comparant le temps consommé par ces arrêts dus aux interlocks pour chacun des deux conditionnements, il s'est avéré que leur différence est égale à celle observée entre leurs durées de conditionnement à 20 μ s. Ainsi, il est vraisemblablement possible que ce sont ces nouveaux interlocks observés qui étaient à l'origine du retard qu'a pris le conditionnement à 20 μ s suite à la réduction de la durée de la boucle de contrôle de la puissance.

Ces nouveaux interlocks observés sont en fait relatifs à la mesure des courants électroniques sur les parties supérieures des coaxiales chauds de certains coupleurs (voir la position des pick-ups de mesure dans l'annexe 2). En effet, ces événements n'ont pas été accompagnés par des dégazages importants ou une réflexion significative de la puissance incidente comme nous l'observons habituellement dans les cas de décharges. En plus, les mesures des courants juste avant le déclenchement des interlocks montrent des courants qui avoisinent les seuils tolérés pour ces grandeurs (5 mA) pendant le conditionnement, et ce, sans que le système manifeste une incapacité à récupérer le vide. Ainsi ces interlocks sont uniquement dus à des valeurs excessives des courants électroniques qui frôlent le seuil d'interlock causant l'arrêt de la puissance.

Il est à noter que pendant les conditionnements précédents les courants électroniques excèdent rarement les 4 mA. Ce nouveau excès observé peut être expliqué par la réduction très importante du temps de conditionnement suite à ces derniers changements de paramètres de la procédure. En effet, il semblerait qu'une aussi rapide évolution du conditionnement ne permette pas une action suffisante de la RF sur les surfaces. Les taux de production des électrons ne sont plus suffisamment réduits avant d'atteindre les puissances où les courants électroniques deviennent assez importants. Ceci est dû à la réduction de temps d'exposition des coupleurs à la RF, et donc à l'influence des bombardements électroniques, avant d'atteindre ces puissances.

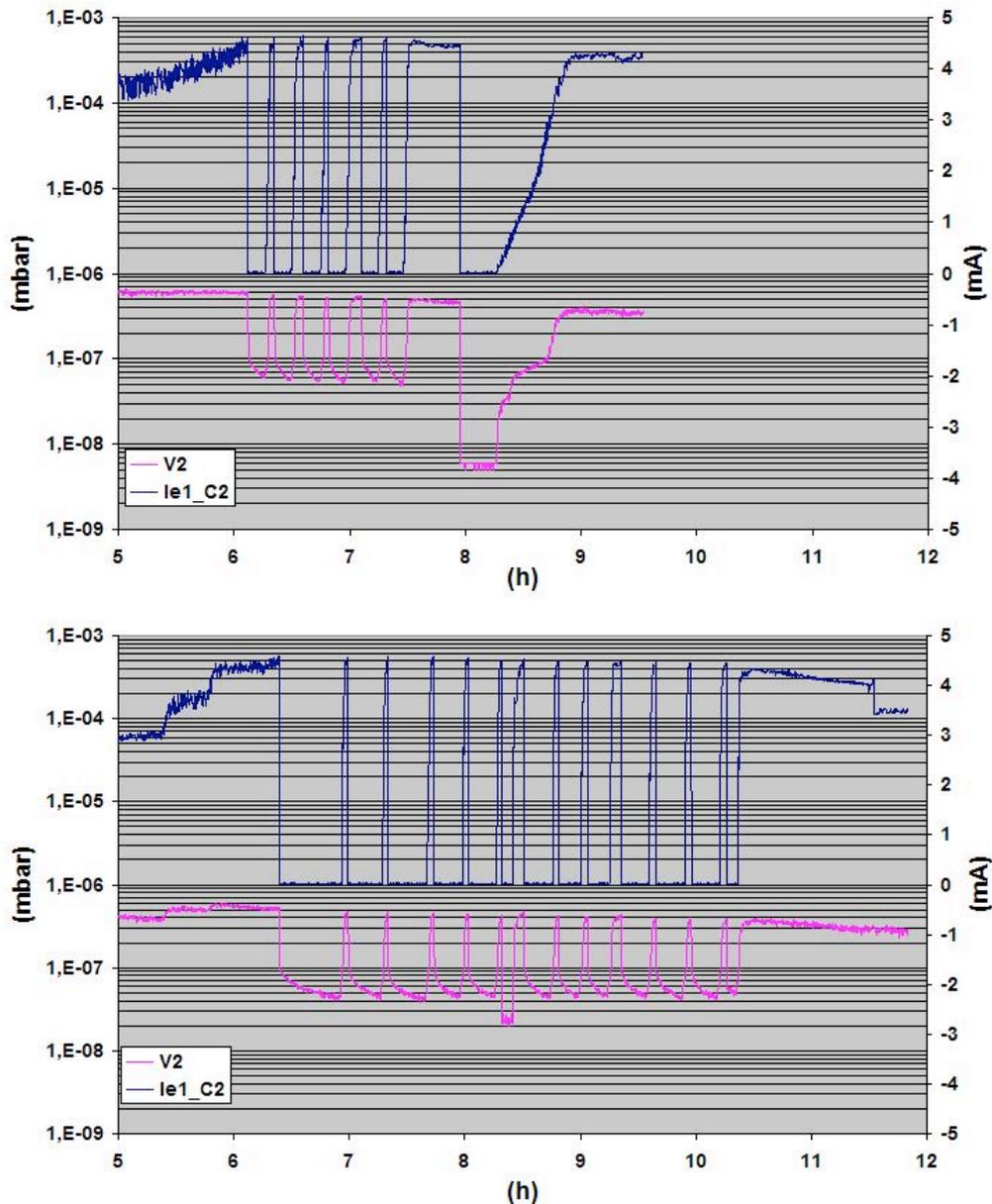


Figure (VII.9) : Courants électroniques excessifs causant des interlocks dans les cas des derniers conditionnements rapides effectués. Le graphe du haut est relatif au conditionnement après le changement des paramètres du vide. Celui du bas est relatif au conditionnement après le changement du temps d'attente. Ie1_C2 est le courant électronique provoquant l'interlock enregistré à la partie haute du coaxiale chaud et V₂ est le vide influencé par ce courant.

Nous pouvons remarquer que sans ces nouveaux interlocks, les durées des premières étapes des deux conditionnements seraient presque identiques, ce qui n'a jamais été remarqué jusqu'à présent sur tous les conditionnements effectués. De plus, le temps de conditionnement des coupleurs après la fin de la première étape était pour les deux coupleurs dépendant uniquement du temps de l'évolution du programme, donc de la durée de la boucle de contrôle

de la puissance. Ainsi, ces deux derniers coupleurs auraient pu avoir le même temps de conditionnement s'ils étaient conditionnés de la même manière. Si ce résultat est confirmé par d'autres conditionnements, il serait un argument important pour le rôle de la relaxation des paramètres du vide dans la diminution des différences des temps des conditionnements pour les différents coupleurs en plus de sa grande contribution à la réduction du temps de conditionnement moyen. En effet, le fait d'avoir des temps de conditionnement similaires pour les coupleurs TTF-III malgré les dissemblances aurait une incidence très positive sur la programmation des conditionnements des grandes séries de coupleurs.

En revenant plutôt au problème d'existence de ces activations d'interlocks, il serait donc intéressant de pouvoir les éliminer afin de gagner d'avantage en temps de conditionnement.

Pour ce faire, deux solutions éventuelles peuvent être envisagées :

- Une première consiste à augmenter légèrement le seuil interlock des courants électroniques. Si ces derniers n'ont pas des valeurs plus importantes que cette nouvelle limite, il serait possible de pouvoir éviter la série des arrêts de puissance constatée dans les derniers conditionnements.
- Une deuxième consiste à augmenter la fréquence de répétition des impulsions HF pendant le conditionnement. Ceci augmentera le temps effectif de l'exposition du coupleur à la HF. Ainsi, une plus grande action des bombardements électroniques sur les surfaces favorisera une meilleure réduction de productions des courants électroniques, notamment avant d'atteindre les puissances où les interlocks successifs ont été observés.

Ces deux solutions ont des objectifs différents. La première vise à esquiver le problème alors que la deuxième a pour but de l'éliminer. Nous avons opté pour l'expérimentation de la deuxième option en premier lieu. En effet, il est toujours intéressant de réduire la réactivité des surfaces du coupleur au passage de la puissance.

Seule l'expérimentation de la deuxième solution sera présentée dans ce travail.

III- L'influence de l'augmentation du taux de répétition sur le conditionnement des coupleurs

Comme nous l'avons déjà précisé, le but de cette manœuvre est d'augmenter le temps effectif du conditionnement en accroissant la fréquence des impulsions RF envoyées aux coupleurs. Nous espérons ainsi empêcher l'augmentation excessive des valeurs des courants électroniques provoquant une série d'interlocks et par conséquent un accroissement des temps

d'arrêt de la puissance pendant le conditionnement. Il nous importe également de savoir si le changement d'un tel paramètre pourrait avoir une influence significative sur le temps de conditionnement. Toutefois, cette opération pourrait avoir d'autres conséquences non souhaitables. En effet, l'augmentation de la fréquence des impulsions aurait une action directe sur le taux de dégazage des surfaces qui va naturellement augmenter. Il est donc intéressant de faire un choix judicieux de la nouvelle fréquence afin que le système de pompage puisse pomper l'excès de dégazage aussi efficacement qu'avant. Nous avons choisi, pour un premier essai une fréquence de 5 Hz à la place de la fréquence de 2 Hz utilisée jusqu'à présent. Avec cette nouvelle fréquence la puissance moyenne maximale à laquelle le coupleur TTF-III sera exposé est de 3,25 kW. Cette puissance est bien supportable par ce coupleur d'après les références [67] et [68].

Ce prochain conditionnement prendra bien évidemment compte des dernières modifications apportées sur la procédure.

Expérience et observations

Au début la puissance a été envoyée progressivement aux coupleurs, selon la procédure habituelle, à la fréquence convenue de 5 Hz. Un premier interlock est survenu, dans la première étape à 20 μ s, à 120 kW suite à un courant électronique important accompagné par un dégazage considérable. Cette première décharge est couramment observée dans les coupleurs à des niveaux de puissances similaires. Les dégazages des surfaces commencent toujours à être significatives à partir de la remise de la puissance suite à cet évènement. Mais un comportement singulier a caractérisé ce conditionnement. En effet, le système n'a pas réussi à dépasser la puissance 140 kW. Les courants électroniques assez faibles constatés à ces niveaux de puissance étaient responsables d'un emballement des vides provoquant plusieurs interlocks bloquant la progression du conditionnement (voir figure (VII.10)). La nouvelle fréquence de répétition semble ainsi être trop importante. Par conséquence, le système de pompage paraît ne pas pouvoir récupérer le flux de gaz au début du conditionnement devenu trop abondant. Pour s'assurer de la corrélation directe entre ce problème et les nouvelles conditions de fonctionnement imposées, nous avons remis la fréquence de répétition habituelle de 2 Hz. Le système semble alors ne pas avoir de difficultés à garder les pressions dans les coupleurs à des valeurs raisonnables, montrant ainsi que la cause des problèmes rencontrés précédemment est effectivement la fréquence de 5 Hz. Une fois ceci est vérifié, nous avons rapidement basculé sur une nouvelle fréquence de répétition de 4 Hz. Cette nouvelle fréquence a permis de générer une augmentation globale des valeurs

des pressions dans les coupleurs sans pour autant causer des problèmes de récupération du vide. Cette fréquence semble adéquate pour tester l'effet de l'augmentation de la fréquence de répétition sur la procédure de conditionnement (voir figure (VII.10)).

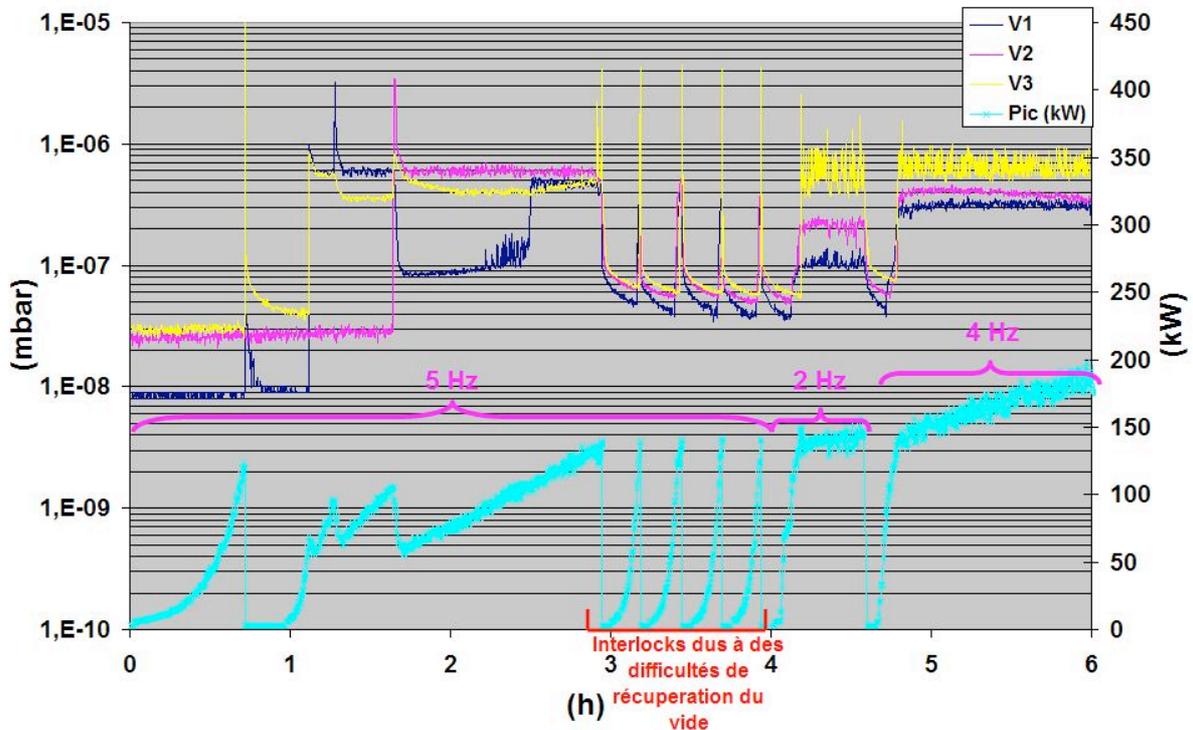


Figure (VII.10) : L'influence des fréquences de répétition sur la capacité de pompage des coupleurs au début de leur conditionnement.

La première étape de conditionnement s'est achevée sans l'avènement d'aucun interlock depuis l'utilisation de la fréquence de répétition de 4 Hz. Durant toute cette période, tous les courants électroniques étaient tout le temps inférieurs à 4 mA et généralement inférieurs à 3 mA. Ceci a permis de constater l'effet désiré de l'augmentation de la fréquence de répétition sur les valeurs des courants électroniques qui étaient trop élevées. Les interlocks constatés à 550 kW pendant les deux autres essais ont pu être alors évités. Toutefois, le temps de conditionnement de cette étape était équivalent à celui obtenu dans la première expérience utilisant les nouveaux paramètres du vide. Le temps total de conditionnement était de 19,3 h.

Ainsi, aucun effet significatif de l'amélioration du temps de conditionnement n'a pu être démontré par cette tentative. Cependant, une diminution sensible des courants électroniques a pu être remarquée dans le cas de cette expérience et qui reste à confirmer par des conditionnements futurs.

Conclusion

Ce chapitre présente les travaux d'optimisation de la procédure de conditionnement des coupleurs TTF-III. Une première étude a permis de relaxer les seuils imposés pour contrôler les niveaux des vides dans les coupleurs pendant le conditionnement. Cette action était à l'origine d'une réduction drastique du temps de conditionnement qui a atteint 24 heures. Tout en gardant ces nouveaux paramètres, nous avons aussi optimisé le temps de la boucle de commande de la puissance pendant le conditionnement. Nous avons ainsi réussi à atteindre une nouvelle performance en temps de conditionnement atteignant cette fois-ci 20 heures.

Les modifications apportées à la procédure de conditionnement ont été à l'origine de l'accroissement des valeurs des courants électroniques durant certains stades du conditionnement. Un essai expérimental a montré qu'une augmentation appropriée de la fréquence de répétition utilisée pour les impulsions HF semble permettre d'éviter ce nouveau comportement. L'utilisation de la nouvelle fréquence de répétition ne semble pas influencer les nouvelles performances atteintes en temps de conditionnement.

Chapitre VIII

Prototypes de coupleurs et simulations du multipactor

Sommaire :

- I- Coupleurs prototypes : coupleur TTF-V
 - II- Les études du multipactor sur les coupleurs TTF-III et TTF-V
 - III- L'effet de la polarisation sur le coupleur TTF-III
-

I- Coupleurs prototypes : coupleur TTF-V

I-1- Coupleurs pour machines supraconductrices développés au LAL

En plus des études sur le conditionnement des coupleurs TTF-III et leur industrialisation, le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire est très impliqué dans l'élaboration des prototypes de coupleurs pour des projets en cours d'étude. Parmi les modèles de coupleurs qui ont été développés nous trouvons le TTF-IV [69], le TTF-V et TW60 [70]. Le premier (voir annexe 3) était destiné à une structure supraconductrice proposée pour le projet TESLA appelée « Superstructure » [71] et qui consistait en une disposition en série de quatre cavités de 7 cellules qui sont alimentées par un seul coupleur.

Le coupleur TTF-V (Figure (VIII.1)) est un coupleur qui est très ressemblant à TTF-III mais dont la conception permettrait son utilisation pour des puissances plus élevées. Il peut être un candidat pour une structure supraconductrice utilisant un seul coupleur pour alimenter deux cavités à neuf cellules.

Le coupleur TW60 (voir annexe 3) a été développé pour répondre aux mêmes motivations que ceux pour la construction de TTF-V mais tout en proposant certaines différences fondamentales au niveau de la conception. En effet, contrairement à tous les coupleurs cités ci-dessus (TTF-III, TTF-IV, TTF-V) qui comprennent chacun deux fenêtres cylindriques, ceux du TW60 sont coaxiales planaires (voir annexe 3). Cette géométrie a été inspirée des coupleurs KEK B et SNS qui ont été testés avec succès. Le choix de cette fenêtre a pour but de simplifier les procédés de fabrication du TW60 afin de réduire son coût. Une autre

spécificité de ce coupleur consiste en l'utilisation d'un joint d'isolation à la place du condensateur permettant la polarisation de l'âme centrale dans le coupleur TTF-V.

Seul le coupleur TTF-V fera l'objet d'étude dans le cadre de ce travail.

I-2- Le coupleur TTF-V

Ce modèle de coupleur devrait être capable de supporter des puissances HF en ondes progressives pouvant aller jusqu'à 2 MW. Le principe de sa conception repose sur l'utilisation de la même géométrie du coupleur TTF-III en gardant sa partie chaude tout en changeant les dimensions de sa partie froide. Ainsi, le diamètre de cette dernière sera de 62 mm au lieu de 40 mm. Le coupleur TTF-V aura par conséquent le même diamètre pour ses deux parties chaude et froide. Un tel changement est censé pousser les niveaux de multipactor les plus stables de la partie froide vers des puissances plus élevées que ceux qui sont dans le coupleur TTF-III. Ce résultat peut être directement déduit de l'équation d'échelle [III.5] présentée dans le chapitre III.

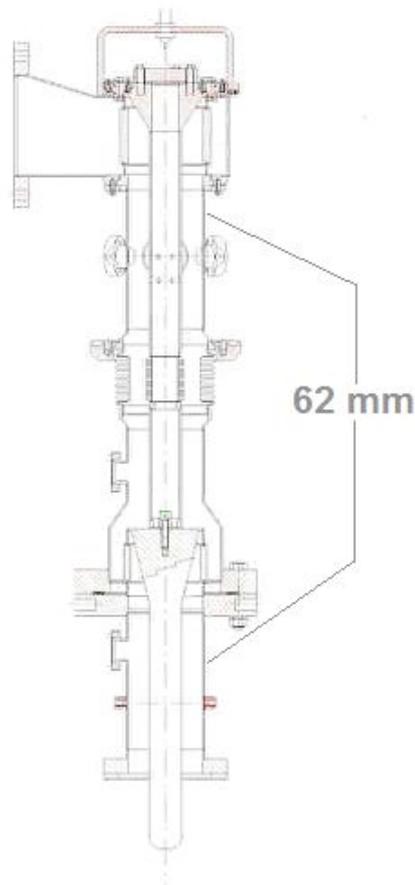


Figure (VIII.1) : Schéma du coupleur TTF-V

Ce changement de diamètre imposera aussi certaines modifications sur la fenêtre froide et la transition de passage entre les deux parties du coupleur TTF-V par rapport au TTF-III. Pour une première version de ce modèle, il n'y aura pas de système de réglage de la profondeur de pénétration de l'antenne.

I-3- Test préliminaire en champ maximum pour TTF-V

Etant encore au stade de fabrication, les tests sur les coupleurs TTF-V ne peuvent bien évidemment pas être réalisés. En revanche, le fait qu'il ait une partie chaude similaire à celle du coupleur TTF-III nous a incité à effectuer un test visant à augmenter la puissance HF jusqu'à 2 MW dans ce dernier coupleur. Ceci consistera à valider d'une manière préliminaire l'une des contraintes que TTF-V doit supporter.

I-3-1- Principe de l'expérience

Il s'agit d'utiliser une paire de coupleurs totalement conditionnée et ne présentant pas d'anomalie limitant particulièrement l'augmentation du champ électrique. La puissance sera progressivement augmentée à partir de quelques kilowatts jusqu'à la valeur maximale que nous pouvons atteindre sans un risque majeur et ce avec une largeur d'impulsion de 20 μ s. L'accroissement de la puissance sera géré par le programme du pilotage du conditionnement. Les seuils du vide et la vitesse de l'évolution du programme utilisés seront spécifiés pour cette expérience de manière à garantir le maximum de sécurité. L'opération ne sera pas entièrement automatisée et les paramètres en cours de la procédure peuvent être modifiés selon le besoin.

I-3-2- Risques

Les risques encourus par le coupleur pendant cette expérience sont à la fois la création d'un champ maximal trop élevé et la possibilité de création d'un multipactor d'ordre inférieur. L'utilisation d'une impulsion courte (20 μ s) avec un taux de répétition de 2 Hz permet une meilleure efficacité de pompage en cas de problème.

La simulation du champ EM dans un coupleur TTF-III a montré que le champ maximal est atteint au niveau des gorges des fenêtres. Le danger redouté dans ce cas est d'avoir des claquages à ce niveau pouvant être nuisibles pour la céramique. Un tel accident est peu probable dans la partie sous vide vu la rigidité diélectrique élevée de ce dernier. Par contre, dans la partie sous air (le côté sous air de la gorge de fenêtre chaude (voir figure (VIII.2)), un claquage est susceptible d'avoir lieu.

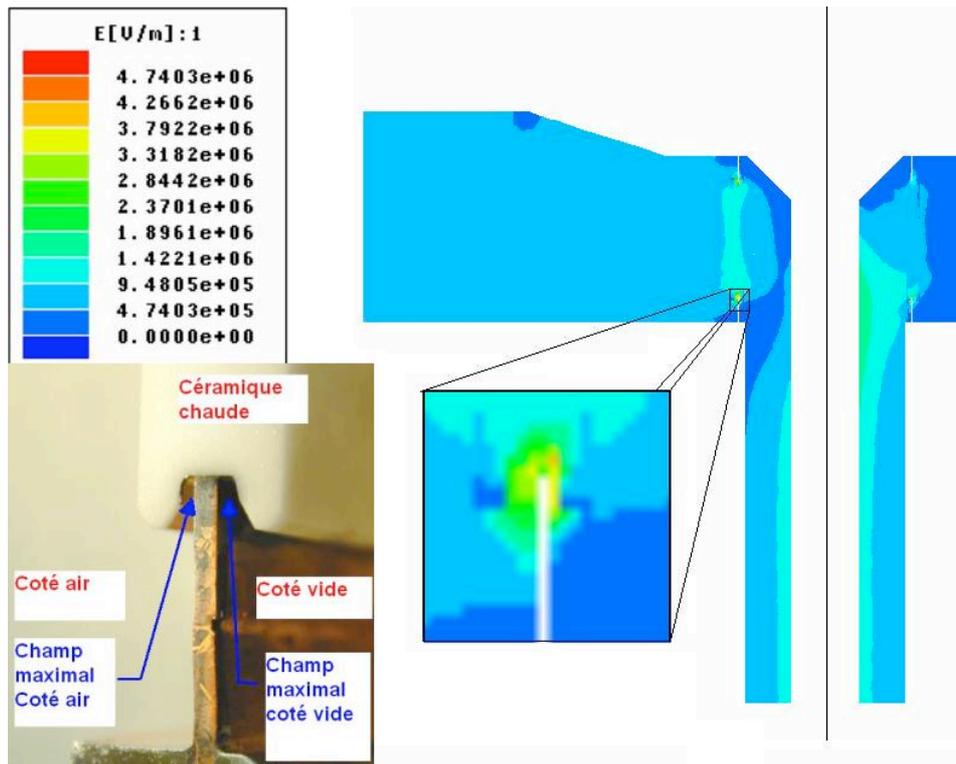


Figure (VIII.2) : Champ EM maximal dans un coupleur. A gauche : une photo montrant les endroits où le champ électrique peut être trop important. A droite : une simulation HFSS montrant l'intensité du champ EM à 2 MW dans la partie chaude d'un coupleur TTF-III.

Les simulations numériques du champ EM dans la partie chaude du coupleur TTF-III ont permis de donner les valeurs suivantes :

Puissance	Champ EM dans la gorge de la fenêtre chaude sous air.	Champ EM dans la gorge de la fenêtre chaude sous vide.
1 MW	2,3 MV/m	3,35 MV/m
2 MW	3,25 MV/m	4,74 MV/m

Tableau VIII.1 : Champs électriques maximum au niveau de la fenêtre chaude du coupleur TTF-III obtenus par simulation HFSS.

Nous pouvons constater qu'à 2 MW le champ EM dans la gorge du côté air peut dépasser la rigidité diélectrique de l'air qui est de 3 MV/m approximativement. Ceci suggère d'augmenter en premier lieu la puissance jusqu'à une valeur inférieure à 1700 kW pour éviter les claquages. Puis, si cette puissance est atteinte sans problème, il faut introduire un gaz ayant une meilleure rigidité électrique que l'air pour pouvoir continuer à augmenter la puissance

HF. Du côté vide, ce dernier étant un bon isolant, nous ne risquons pas d'avoir un problème de la même nature.

I-3-3- Expérience et résultats

a) Conditions expérimentales

L'utilisation d'un gaz à rigidité diélectrique élevée pour remplacer l'air nécessite un réseau HF étanche. De plus, le gaz SF₆ qui est généralement utilisé dans des situations similaires requiert un système pour sa récupération après utilisation. Ces deux conditions n'étant pas encore remplies par la station actuelle d'essai des coupleurs au LAL, nous nous sommes proposés de faire l'expérience tout en laissant la zone à risque sous air. En effet, le modèle de simulations EM utilisé propose une géométrie simplifiée de la gorge de la céramique mais présentant un angle plus vif pouvant être à l'origine d'un champ électrique supérieur au champ réel. Nous avons choisi d'augmenter la puissance prudemment au-delà de 1 MW tout en protégeant les coupleurs par l'utilisation du détecteur d'arc.

La paire de coupleurs utilisée a déjà été conditionnée en utilisant une procédure qui tient compte des nouveaux paramètres de vide et de vitesse de programme présentés dans le chapitre précédent.

b) Déroulement de l'expérience et observations

En premier lieu, une augmentation de la puissance dans la paire de coupleurs jusqu'à 1 MW a été effectuée. Les niveaux du vide étaient relativement bas avec une apparition de deux courants électroniques de petites amplitudes mesurés en haut des parties chaudes de chaque coupleur. Aucun autre courant n'a été capté par les autres « pick-ups ». En restant toujours à puissance constante (1 MW), un champ magnétique externe a été appliqué sur les différentes parties de la paire de coupleurs. Il a été remarqué que ces courants électroniques sont très fortement atténués pendant cette opération. De plus, ce champ appliqué a même été à l'origine de la création d'un courant électronique dans la partie froide lorsqu'il l'a balayé provoquant en même temps une fluctuation importante du vide (voir Figure (VIII.3)). À l'élimination du champ appliqué, les courants électroniques observés reprennent leurs amplitudes initiales.

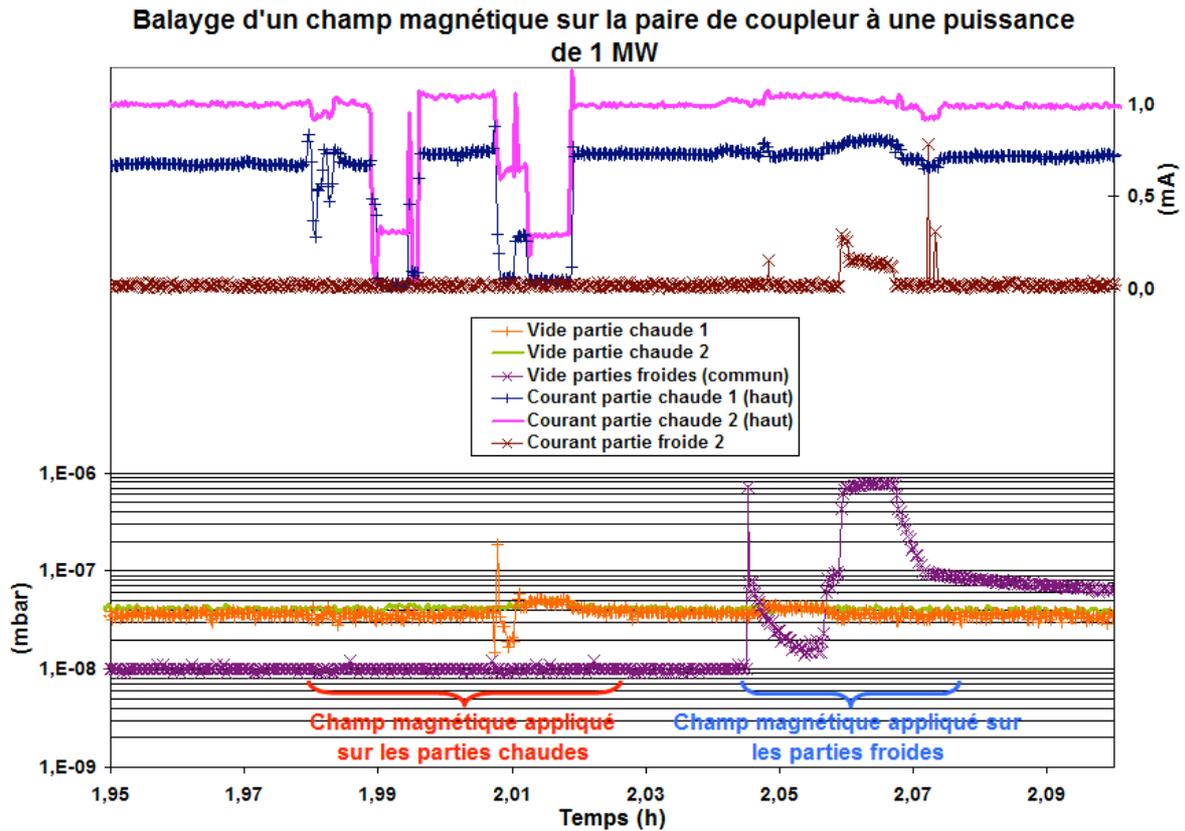


Figure (VIII.3) : Influence du champ magnétique externe sur les courants observés sur la paire de coupleur à 1 MW.

La puissance a été ensuite augmentée graduellement jusqu'à 2 MW. Cette opération s'est effectuée sans qu'il y ait de dégazage excessif ni d'interlock. Aucun courant électronique supplémentaire aux deux premiers n'a été enregistré. La puissance a été ensuite réduite à sa valeur minimale puis un balayage rapide de la puissance a été effectué jusqu'à 2 MW. En fin de cette opération une inspection visuelle de la gorge de la céramique chaude n'a pas révélé des traces d'arcs.

c) *Interprétation*

Le coupleur TTF-III semble pouvoir supporter les pics des champs créés par le passage d'une puissance HF de 2 MW pour une largeur d'impulsion de 20 μ s et à la fréquence de répétition utilisée. De plus, nous avons remarqué que la procédure de conditionnement utilisée au préalable permet une exploration de nouveaux niveaux de champs électriques non atteints dans les coupleurs auparavant sans créer d'événement particulier.

La grande influence du champ magnétique sur les courants électroniques observés suggère qu'ils sont induits par le multipactor. Sa présence exclusivement en haut de la partie

chaude du coupleur peut être expliquée par le fait qu'il soit induit par la discontinuité introduite par la fenêtre. Finalement, les courants électroniques créés dans les coupleurs jusqu'à 2 MW ne semblent pas être particulièrement nocifs à la structure.

II- Les études du multipactor sur les coupleurs TTF-III et TTF-V

Le long de ce mémoire, le multipactor a été présenté à la fois comme un danger pour les coupleurs et comme un générateur d'électrons utiles au conditionnement. Les deux effets qu'il peut avoir sont dépendants de sa stabilité et de la multiplicité des surfaces sur lesquelles il évolue pour des énergies d'impacts d'électrons données. En conséquence, il est très intéressant d'enrichir les travaux d'étude du comportement des coupleurs TTF-III par une étude de l'évolution du multipactor dans cette structure HF. Toutefois, ce phénomène reste peu compris et sa modélisation n'est qu'approximative vu sa forte dépendance des phénomènes de surfaces. De plus, une structure HF aussi complexe que celle de TTF-III reste difficile à modéliser.

Les résultats de simulations qui peuvent être obtenus pourraient donner des éléments de réponse sur les comportements observés sur le stand de test. Dans le cas de TTF-V (coupleur non pas encore testé à la date de la réalisation de cette étude), la simulation pourrait aider à mieux prévoir les problèmes et expliquer certains comportements dans les futurs tests, ce qui permettrait de pouvoir améliorer la version actuelle.

II-1- Moyens de calcul et modélisation

II-1-1- Logiciel utilisé : principe

a) Présentation du programme de simulation

Le logiciel utilisé pour l'étude du phénomène du multipactor est MultiPac2.1 [72], [73]. Il permet de déterminer les valeurs des champs électriques de production du multipactor ainsi que de le localiser et de l'identifier. Ce programme a été élaboré dans le cadre d'une collaboration entre DESY et l'Université de Helsinki. Il a été écrit en langage C et conçu pour fonctionner sous le programme Matlab et un système d'exploitation Linux. Il a été délivré au LAL dans le cadre de sa coopération avec DESY pour le projet coupleurs.

MultiPac2.1 permet de traiter des problèmes à deux dimensions (2D). Il utilise une interface graphique Matlab et un solveur 2D moyennant la méthode des éléments finis

pour calculer le champ. En conséquence, les structures étudiées doivent avoir une symétrie de révolution.

b) Paramètres utilisées par le programme pour le calcul du multipactor :

Le programme utilisé offre une interface graphique permettant d'introduire les différents paramètres nécessaires au calcul du multipactor. Il utilise aussi un nombre de fichiers, appelés fichiers d'entrées, dans lesquels il est possible de configurer essentiellement la géométrie de la structure étudiée et le coefficient d'émission secondaire relatif aux surfaces exposées à la HF.

La démarche à suivre consiste à modéliser la structure à étudier dans les fichiers d'entrées. Suite à cela, l'interface graphique permettra de spécifier les paramètres nécessaires pour le calcul de champ tels que la fréquence utilisée, la permittivité électrique relative, le coefficient de réflexion à la sortie de la structure et la taille du maillage. Elle permettra aussi d'introduire les paramètres pour le calcul de multipactor tel que les sites choisis pour la production d'une première population d'électrons primaires ainsi que leurs phases d'émission, le nombre d'impact à considérer avant l'arrêt des calculs et la plage des puissances HF dans laquelle se feront ces calculs de multipactor.

c) Principe du calcul du multipactor par MultiPac2.1

La première étape faite par ce programme est celle de l'établissement de la carte de champ dans la structure définie. Pour commencer la simulation du multipactor, le logiciel crée une population de points initiaux composés d'électrons primaires. Chacun de ces derniers a une position x appartenant aux sites initiaux que l'utilisateur a choisis sur la structure et une phase φ correspondant à celle du champ environnant lors de son extraction. Ainsi, pour chaque position x , il y aura un nombre d'électrons primaires défini chacun avec une phase différente couvrant ainsi avec une certaine densité une période HF entière. Une première itération sera effectuée et consistera à calculer la trajectoire de chaque électron primaire de son point de départ jusqu'à ce qu'il entre en contact avec l'un des murs de la structure. Ce calcul sera effectué en intégrant l'équation de mouvement des électrons [III.1]. Les positions des zones d'impact seront donc déterminées. La production d'un électron secondaire suite à cet impact n'est possible que si la phase du champ environnant à cet instant sera favorable à son extraction. Ce sont les électrons secondaires qui vont être utilisés comme électrons primaires pour la deuxième itération. D'autres paramètres de cet impact sont aussi calculés, tels que l'énergie cinétique de l'électron incident et le

coefficient d'émission secondaire relatif à cette énergie et qui est calculé à partir de la courbe de SEC prédéfinie. N itérations seront effectuées à chaque lancement d'un calcul, où N est le nombre d'impact à considérer et qui est introduit par l'utilisateur. A la fin de ces itérations, un compteur C_N est créé permettant de comptabiliser uniquement les électrons primaires qui ont pu générer des électrons pendant N impacts. Ce compteur ne prend pas en considération le SEC. Un autre compteur e_N , qui se base sur les mêmes populations produites, fait intervenir la multiplication des électrons relative à chaque impact en fonction du SEC correspondant.

L'ensemble de ces opérations sera fait pour chaque niveau de puissance couvrant la gamme de puissances à étudier. Ainsi une courbe exprimant C_N en fonction de la puissance permettra de distinguer les puissances pour lesquelles une production d'électron est encore possible après N impacts sans tenir en compte le taux de production (donné par la courbe de SEC) qui permettra de distinguer les puissances favorables à l'entretien d'un multipactor. Par contre, la courbe de e_N en fonction de la puissance permettra de donner le taux production d'électrons pour chaque niveau de puissance après N impacts, donnant ainsi une idée plus complète sur l'intensité du multipactor mais tout en intégrant les erreurs induites par une mauvaise estimation de la courbe de SEC.

Afin de situer le site le plus probable pour l'établissement d'un multipactor, une minimisation d'une fonction appelée « fonction de distance » est effectuée. Cette fonction est définie par :

$$d_N = \sqrt{|x - x'|^2 + \gamma^2 |e^{i\varphi'} - e^{i\varphi}|^2},$$

où γ est un facteur d'échelle.

En effet, il s'agit de calculer la distance entre chaque électron primaire, défini par (x, φ) , et l'électron qu'il engendre après N impacts, défini par (x', φ') , en utilisant la fonction de distance. Les minima obtenus en utilisant cette fonction permettent de localiser les sites des électrons dont les trajectoires ont survécu à N impacts et qui sont capables de produire du multipactor. En ce moment les trajectoires des électrons sont recalculées en utilisant le résultat de la minimisation comme électrons primaires. Ainsi, si les énergies d'impact des électrons produits permettent d'avoir un SEC supérieur à un, la trajectoire trouvée peut être considérée comme relative à un multipactor.

II-1-2- Modélisation

a) Modélisation de la géométrie du coupleur

Vu la complexité de la géométrie du coupleur TTF-III, plusieurs simplifications ont été apportées au modèle à étudier. Tout d'abord, il a fallu éliminer les parties ne permettant pas d'avoir une symétrie de révolution. La transition du guide d'onde de la partie chaude du coupleur introduit une dissymétrie du champ EM au niveau de la fenêtre chaude et à l'entrée de la ligne coaxiale de la partie chaude (voir figure (VIII.3)). La présence des ports pour les diagnostics ainsi que le port de pompage posaient aussi un problème de non symétrie de révolution. Après, nous avons choisi d'éliminer les détails qui seront difficiles à décrire par le modèle et dont la présence pourrait poser des problèmes de calcul de champ EM ou de multipactor, tels que les soufflets sur les conducteurs internes et externes.

Ainsi la modélisation du coupleur TTF-III se réduira en trois parties simples :

- un tube coaxial ayant le diamètre et l'impédance de celui de la partie chaude du coupleur ;
- une géométrie décrivant la fenêtre froide du coupleur ;
- et un tube coaxial ayant le diamètre et l'impédance de celui de la partie froide du coupleur.

La modélisation d'un tube coaxial se réduit en premier lieu à une coupe longitudinale de ce dernier. La moitié de cette coupe sera, par la suite, prise en considération vu la symétrie de révolution. Le multipactor évolue dans l'espace entre le conducteur interne et le conducteur externe de la ligne coaxiale (voir figure (VIII.4)).

Pour modéliser la fenêtre froide, nous employons la même démarche que celle de la ligne coaxiale sauf que la partie en question comprend deux compartiments séparés par un diélectrique. Une première partie appartenant à la partie chaude du coupleur et une deuxième à sa partie froide (voir figure (VIII.5)). Des simplifications géométriques ont aussi été apportées.

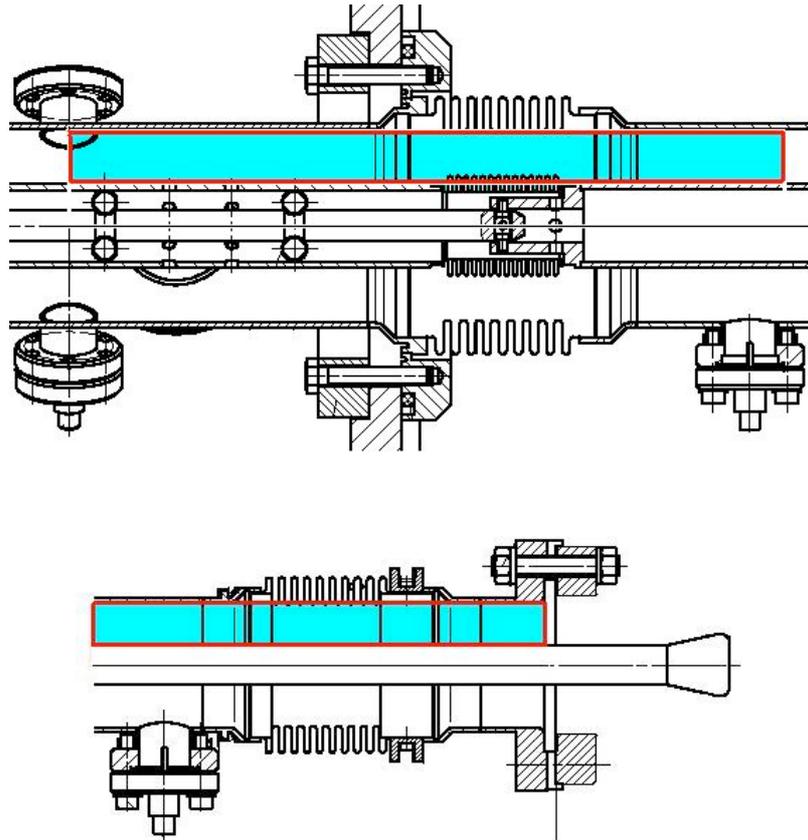


Figure (VIII.4) : Géométries des modèles des parties froide et chaude du coupleur TTF-III utilisés par MultiPac2.1. Seules les parties en bleu sont à considérer.

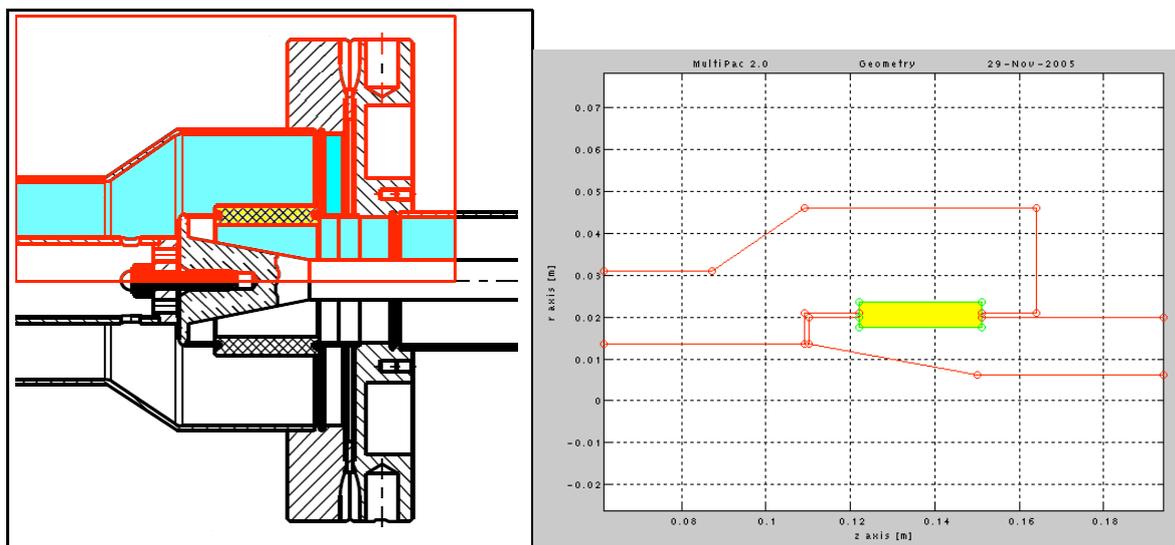


Figure (VIII.5) : Géométrie du modèle de la fenêtre froide du coupleur TTF-III utilisés par MultiPac2.1. A droite : la partie à considérer pour le modèle. A gauche la représentation de ce modèle sur Multipac2.1.

b) *Choix des coefficients d'émission secondaires*

Afin de pouvoir simuler le multipactor dans le coupleur, il faut introduire au programme les courbes du coefficient d'émission secondaire (SEC) en fonction de l'énergie cinétique de l'électron incident (voir chapitre III) pour le cuivre des surfaces métallique et le TiN déposé sur la céramique. Vu la grande sensibilité des valeurs de ces courbes à l'historique des surfaces qu'ils représentent, les valeurs qui seront utilisées ne seront qu'approximatives.

Puisque nous ne disposons pas de mesures des SEC effectuées sur les surfaces internes des coupleurs TTF-III, nous avons utilisé des courbes de SEC du cuivre donnant une moyenne de mesure effectuée au CERN sur 25 échantillons [38]. Le SEC de TiN est utilisé est issu des mesures présentées dans [39]. Ces courbes sont représentées dans la figure (VIII.6).

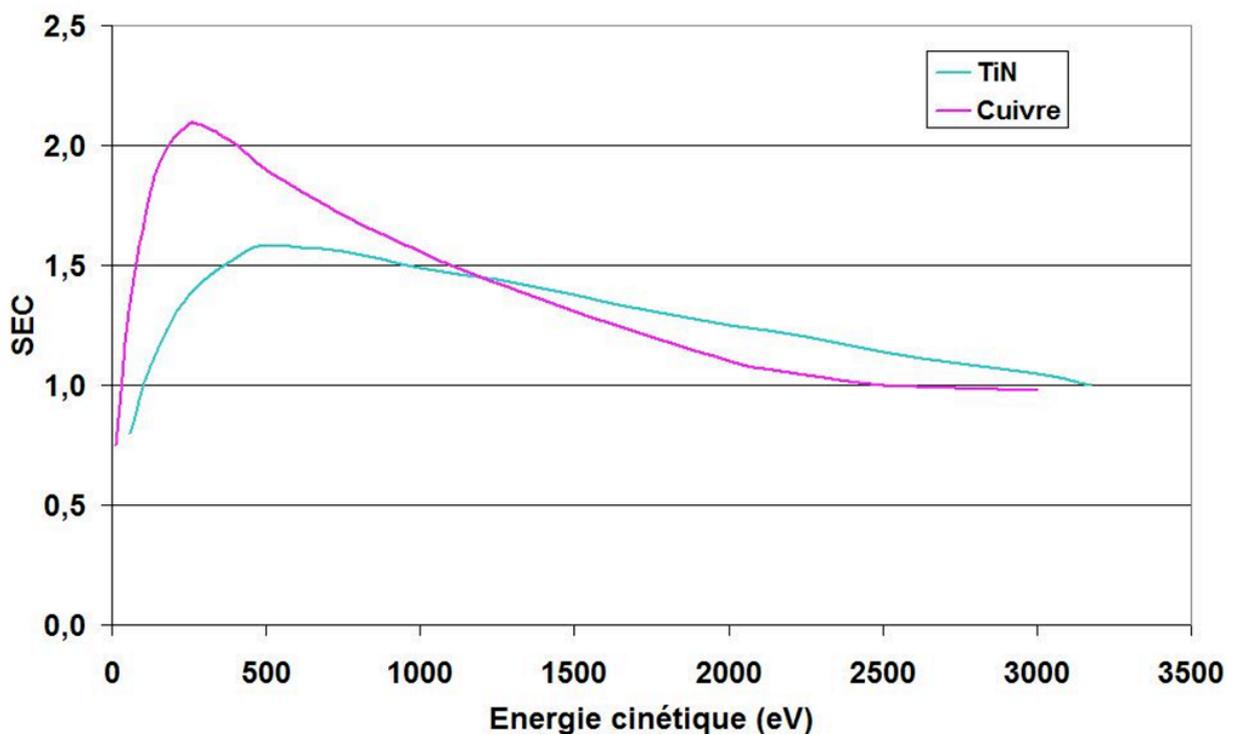


Figure (VIII.6) : Courbes des coefficients d'émission secondaire utilisés pour les simulations du multipactor dans les coupleurs étudiés.

Enfin, les hypothèses concernant les conditions initiales de l'électron à sa sortie de la surface et qui ont été évoquées au chapitre III seront adoptées pour effectuer ces simulations.

II-2- Simulations et interprétations

Etant donné que les opérations de conditionnement que nous faisons sont réalisées en ondes progressives, nous avons choisi de faire des simulations du multipactor dans les mêmes conditions. Pour ce faire, le coefficient de réflexion R est choisi égal à zéro. Le nombre d'impacts N a été pris égal à 20 afin de répondre aux consignes données avec le programme conseillant l'utilisation d'un N entre 20 et 30. Finalement, les structures étudiées doivent avoir une longueur minimale d'un quart de la longueur d'onde utilisée.

II-2-1- Partie froide du coupleur TTF-III

a) Ligne coaxiale de la partie froide

Le résultat de cette simulation est donné essentiellement par les courbes présentées dans la figure (VIII.7). Il s'agit de trois courbes de variation en fonction de la puissance incidente représentant dans l'ordre, du haut vers le bas :

- le rapport du compteur C_N , que nous avons déjà déterminé, sur le nombre des électrons initiaux défini avant de réaliser les N impacts ;
- l'énergie E_{fN} de l'électron au dernier impact ;
- et le rapport du compteur e_N sur le nombre des électrons initiaux.

Les puissances pour lesquelles la courbe de haut de la figure (VIII.7) donne une valeur nulle montrent qu'en ces niveaux il n'est pas possible d'entretenir une production d'électrons pendant 20 impacts successifs. Ceci explique l'annulation de E_{fN} et de e_N pour les mêmes puissances. De plus, les plus grandes valeurs du compteur C_N ne sont pas forcément celles qui sont à l'origine des plus forts taux de production d'électrons après N impacts. Ceci peut être constaté pour les valeurs de ce compteur aux pics 390 kW et 900 kW. Pour expliquer ceci, il suffit de voir la courbe de E_{fN} qui est accompagnée par des lignes horizontales en rouge. Les deux lignes continues représentent les niveaux haut et bas des énergies entre lesquelles le SEC est supérieur à 1. La ligne discontinue donne plutôt l'énergie correspondante au SEC maximum. Ainsi, nous pouvons déduire que les électrons produits au niveau de puissance 390 kW ont des énergies leur permettant de produire un maximum d'électrons secondaires compensant ainsi leur faible taux d'entretien par la HF.

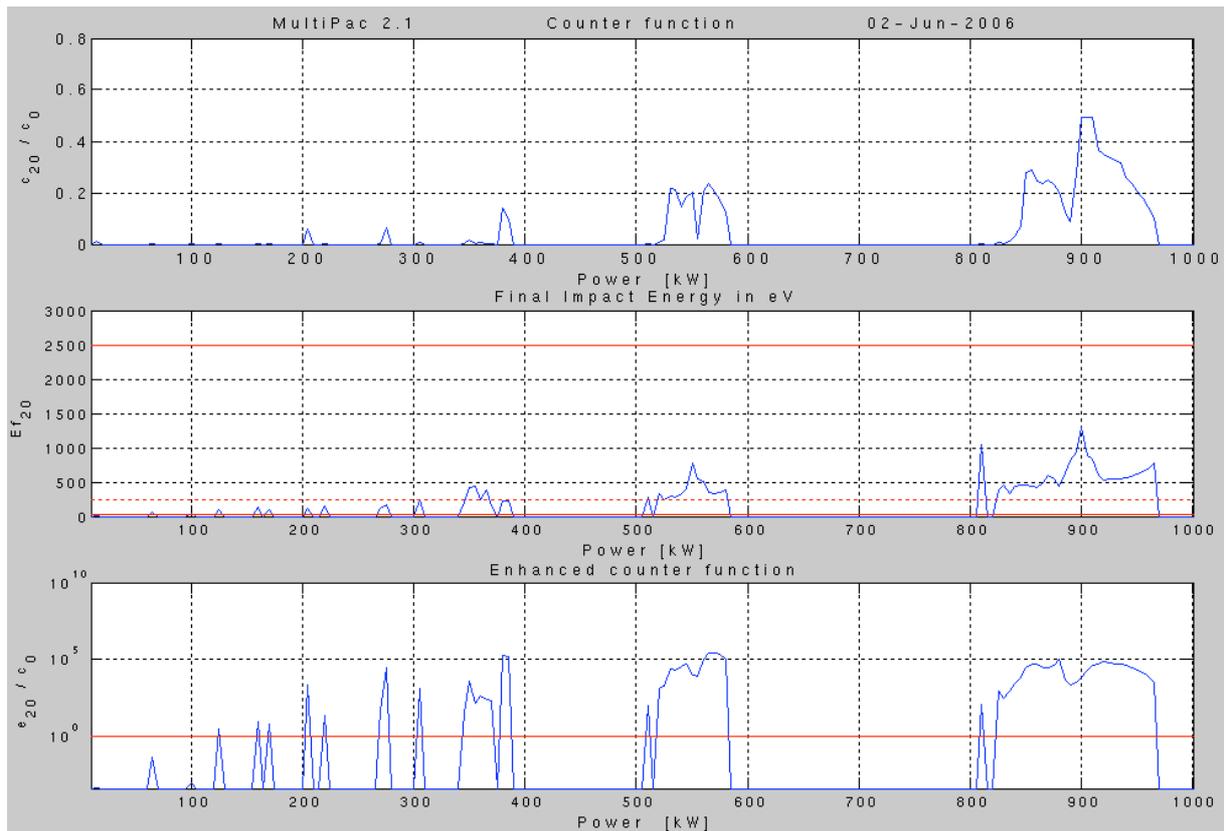


Figure (VIII.7) : Figure représentant des niveaux de puissances favorables à l'établissement du multipactor obtenus par simulation MultiPac2.1.

Seules les puissances pour lesquelles la courbe de e_N/C_0 (figure (VIII.7)) dépasse la ligne rouge correspondant à la valeur 1 peuvent être des niveaux de multipactors. Nous distinguons ainsi plusieurs niveaux possibles. Afin de déterminer les différents ordres de ces multipactors, nous avons calculé les trajectoires relatives à certains de ces pics.

Les résultats retrouvés dans la figure (VIII.8) correspondent à ce que nous pouvons déterminer par le diagramme permettant de calculer les niveaux de multipactor et leurs ordres sur une ligne coaxiale pour des ondes stationnaires (voir annexe 4). La déduction du résultat pour les ondes progressives se fait en utilisant la loi d'échelle par l'équation [III.8]. L'information qu'on peut apprendre de ce diagramme est évidemment beaucoup moins exhaustive.

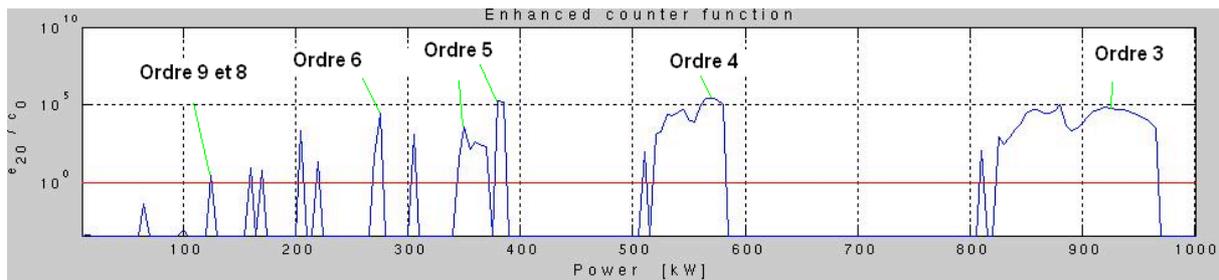


Figure (VIII.8) : Détermination des ordres de certains des niveaux de multipactor par le calcul des trajectoires des électrons.

Un exemple de la trajectoire d'un électron pour un multipactor d'ordre 4, c'est-à-dire apparaissant aux puissances entre 500 kW et 600 kW, est donné par la figure (VIII.9). Les calculs des trajectoires effectués pour tous les ordres de multipactor trouvés ont montré que ce phénomène s'établit toujours sur le conducteur externe.

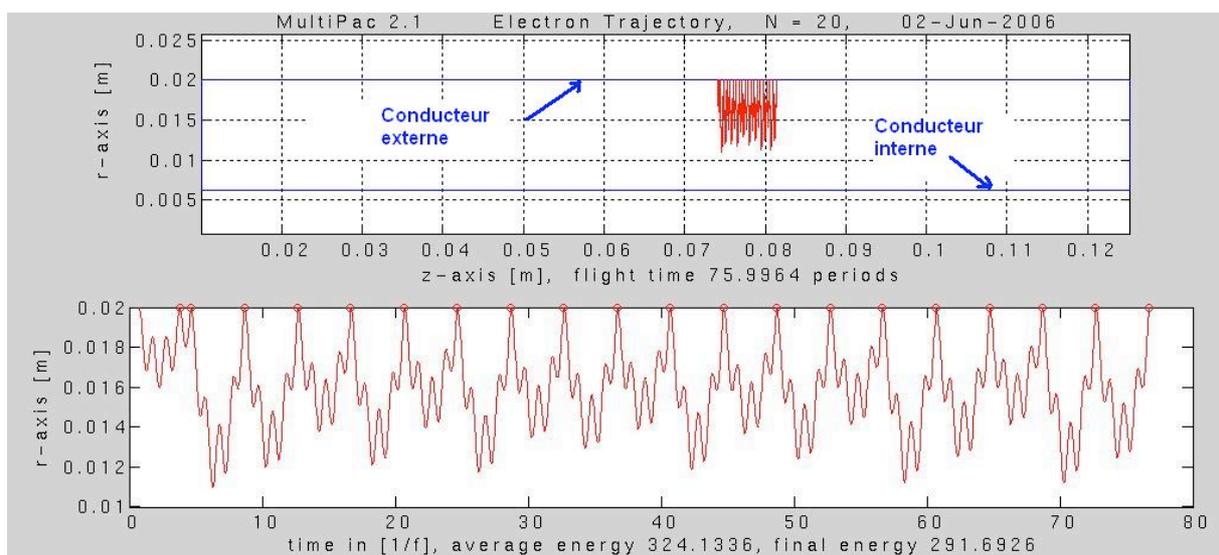


Figure (VIII.9) : Simulation de la trajectoire d'un électron pour un multipactor d'ordre 4 dans le modèle représentant la ligne coaxiale de la partie froide de TTF-III. Les énergies des électrons sont exprimées en [eV].

Nous pouvons remarquer pour le modèle et le SEC considérés que le premier multipactor possible s'établit vers 130 kW. De plus, les ordres de multipactor pouvant avoir lieu dans la gamme des puissances utilisées est varié de 9 à 3. Ce dernier ordre est suffisamment stable pour pouvoir créer des problèmes pendant le conditionnement des coupleurs. L'absence de ces problèmes, pendant le conditionnement, pourrait être expliquée par le

changement du SEC suffisamment pendant cette opération pour que le multipactor d'ordre inférieur ne puisse plus s'établir.

Malgré la possibilité de coïncider la présence de multipactor d'ordre 4 et 5 avec certains pics de certains courants électroniques mesurés sur les parties froides de TTF-III pendant le conditionnement, une différence importante a été remarquée. En effet, d'après les simulations effectuées, le multipactor ne peut pas s'établir dans la ligne coaxiale pour des puissances appartenant à [600 kW ; 800 kW] (voir figure (VIII.7)), et ce, indépendamment du SEC. Ceci est en contradiction avec la présence systématique d'un pic de courant électronique à 700 kW sur toutes les parties froides conditionnées. Jusqu'à ce stade d'étude, certaines hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette différence. La première serait que le modèle utilisé ne permet pas de donner une représentation assez proche de la réalité vu la négligence de certains détails géométriques. La deuxième serait que les courants électroniques mesurés sont plutôt captés sur la fenêtre froide voisine du pick-up d'électrons.

b) Fenêtre froide

La simulation du multipactor sur la fenêtre froide, toujours en ondes progressives, se fait en deux étapes. Une première permettant de constater le multipactor dans le côté donnant sur la partie chaude que nous appelons côté chaud. La deuxième étape calcule le multipactor dans l'autre côté que nous appelons côté froid. La simulation a révélé l'absence de multipactor pour des puissances inférieures à 1 MW dans le côté chaud. Cependant, des niveaux de multipactor très similaires (en ordre et en niveau de puissances) à ceux obtenus sur la ligne coaxiale froide ont été retrouvés sur le côté froid de la fenêtre (figure (VIII.10)). Pourtant, la différence entre ces deux structures est très grande.

Afin de comprendre cette grande ressemblance nous avons essayé de voir les trajectoires des électrons de ces multipactors (figure (VIII.11)). Ce qui a été observé c'est que ces derniers évoluent uniquement sur le coaxial froid, et ce, pour tous les ordres. Ceci pourrait être une explication suffisante pour la ressemblance observée.

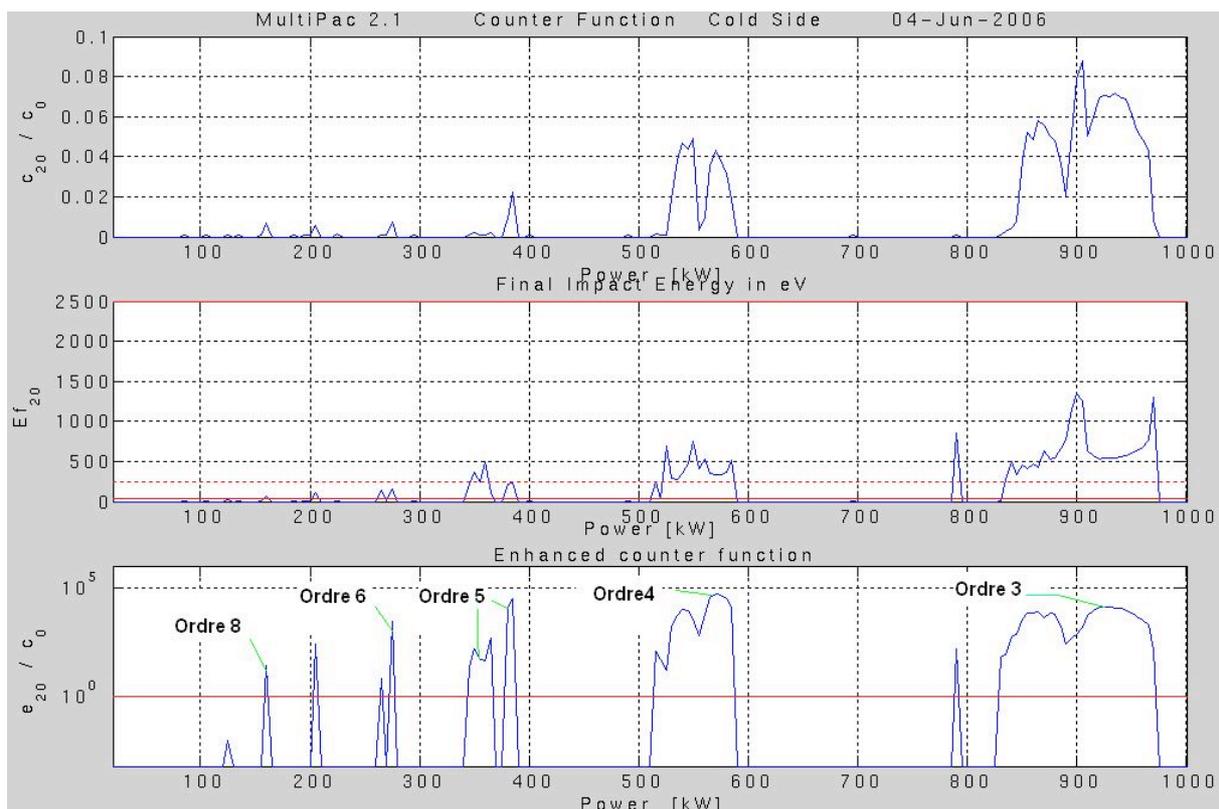


Figure (VIII.10) : Figure exposant des niveaux de puissances favorables à l'établissement du multipactor pour le modèle représentant la fenêtre froide, obtenu par simulation MultiPac2.1.

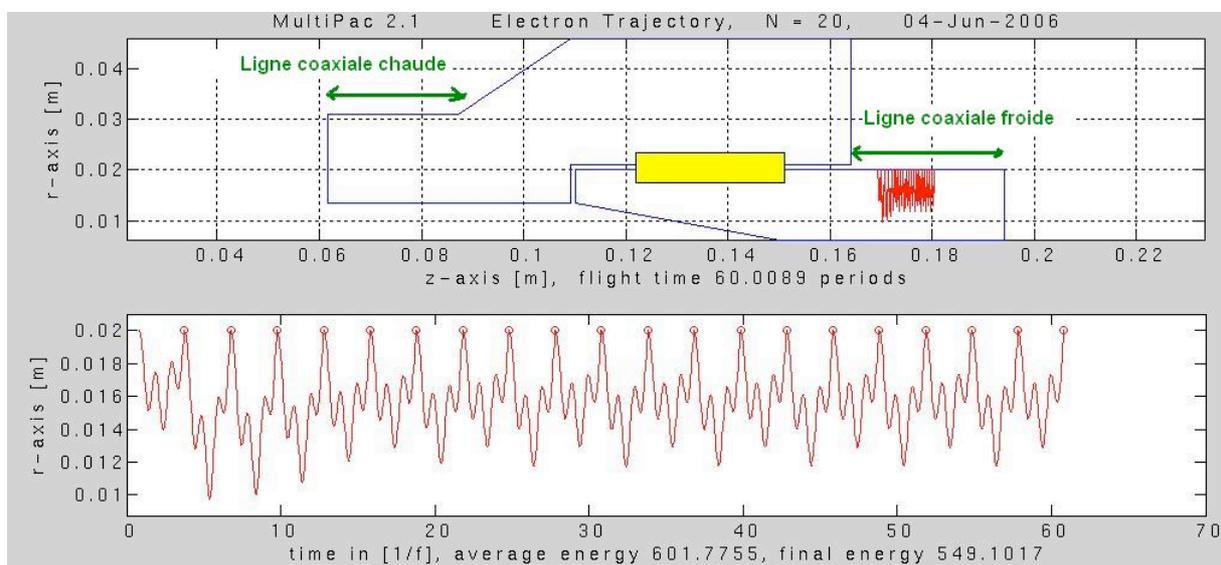


Figure (VIII.11) : Trajectoire d'un multipactor d'ordre 3 calculée sur le côté froid de la fenêtre froide.

Afin de vérifier que l'établissement du multipactor sur le coaxial froid uniquement n'est pas dû à un choix fait par le programme pour ce site suite à l'optimisation de la fonction

de distance, nous avons imposé un calcul de la trajectoire d'un électron issu de la céramique. Le résultat obtenu (figure (VIII.12)) montre que, même dans ce cas, l'électron finit par migrer sur la ligne coaxiale froide pour achever sa trajectoire.

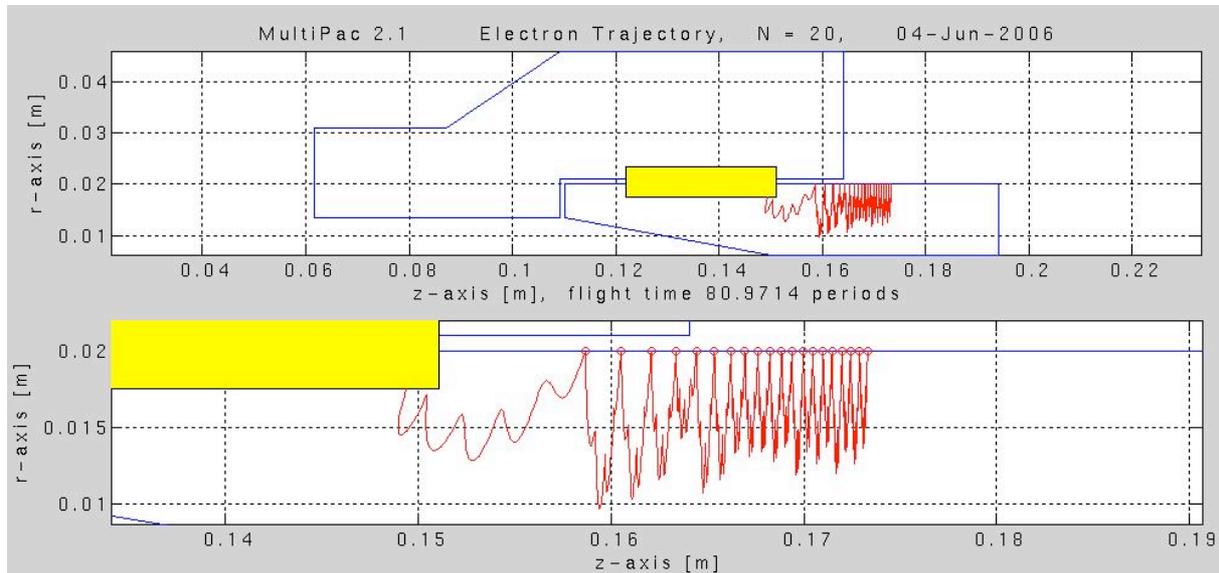


Figure (VIII.12) : Trajectoire d'un électron du multipactor lorsque son point de départ appartient au côté froid de la céramique.

D'un autre côté ceci montre que la partie en céramique (en jaune dans la figure (VIII.11)) est libre de tout multipactor pour des puissances inférieures à 1 MW de ces deux côtés. Ce résultat n'est plus forcément vrai pour d'autres modes de propagation. Nous pouvons, donc, conclure que notre hypothèse expliquant que le pic de courant électronique observé à 700 kW pendant le conditionnement de la partie froide peut provenir d'un multipactor établi au niveau de la fenêtre froide, ne semble pas être vraie.

Afin de terminer l'étude du multipactor sur TTF-III, des calculs concernant la partie coaxiale chaude doivent être effectués. Vu que cette partie est la même dans les deux coupleurs TTF-III et TTF-V nous avons choisi d'intégrer son étude avec celle de ce dernier coupleur.

II-2-2- Le coupleur TTF-V

a) *Ligne coaxiale*

La simulation du multipactor sur cette partie du coupleur a été effectuée pour des puissances allant jusqu'à 2 MW (figure (VIII.13)). Une détermination des ordres a aussi

été réalisée et vérifiée en utilisant le diagramme présenté en annexe 4. Ces résultats montrent une apparition du multipactor à des puissances plus importantes que ceux observés sur la ligne coaxiale froide de TTF-III. En plus, les ordres les plus stables tel que l'ordre 3 n'apparaissent sur aucune gamme des puissances étudiées. Ceci approuve l'élargissement de la partie froide du coupleur TTF-III pour un fonctionnement en des puissances plus élevées. Les trajectoires de multipactor calculées s'établissent aussi sur le conducteur externe.

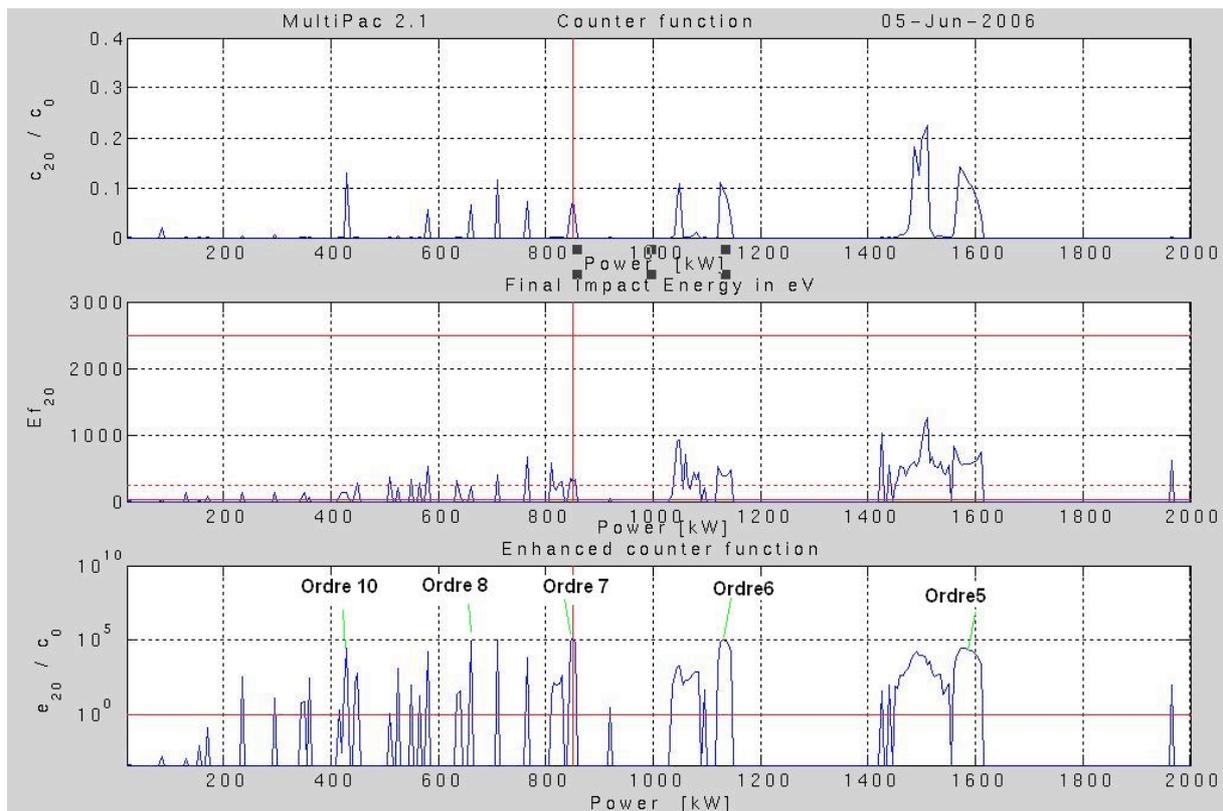


Figure (VIII.13) : Figure présentant des niveaux de puissances favorables à l'établissement du multipactor obtenus par simulation MultiPac2.1.

Il est encore à remarquer que la correspondance entre les courants électroniques observés et les niveaux de multipactors calculés n'est pas évidente.

b) Fenêtre froide

La modélisation de la fenêtre froide de TTF-V a été effectuée exactement de la même manière que pour celle de TTF-III. Une simulation du multipactor, toujours pour des puissances allant jusqu'à 2 MW, a permis de constater des ordres supérieurs ayant des trajectoires très instables dans le côté chaud de la fenêtre. Aucun de ces derniers ne

s'établit sur la céramique. De plus, le C_N présente des valeurs très faibles pour toutes les puissances balayées.

Concernant le côté froid de la fenêtre, le comportement est totalement différent. En effet, pour les puissances allant jusqu'à 1 MW, nous remarquons déjà un multipactor à deux points d'ordre 2. Le C_N est assez faible mais les énergies des électrons pour ces puissances sont adéquates pour établir le multipactor (figure (VIII.14)). Ce dernier apparaît à partir des puissances avoisinant les 700 kW.

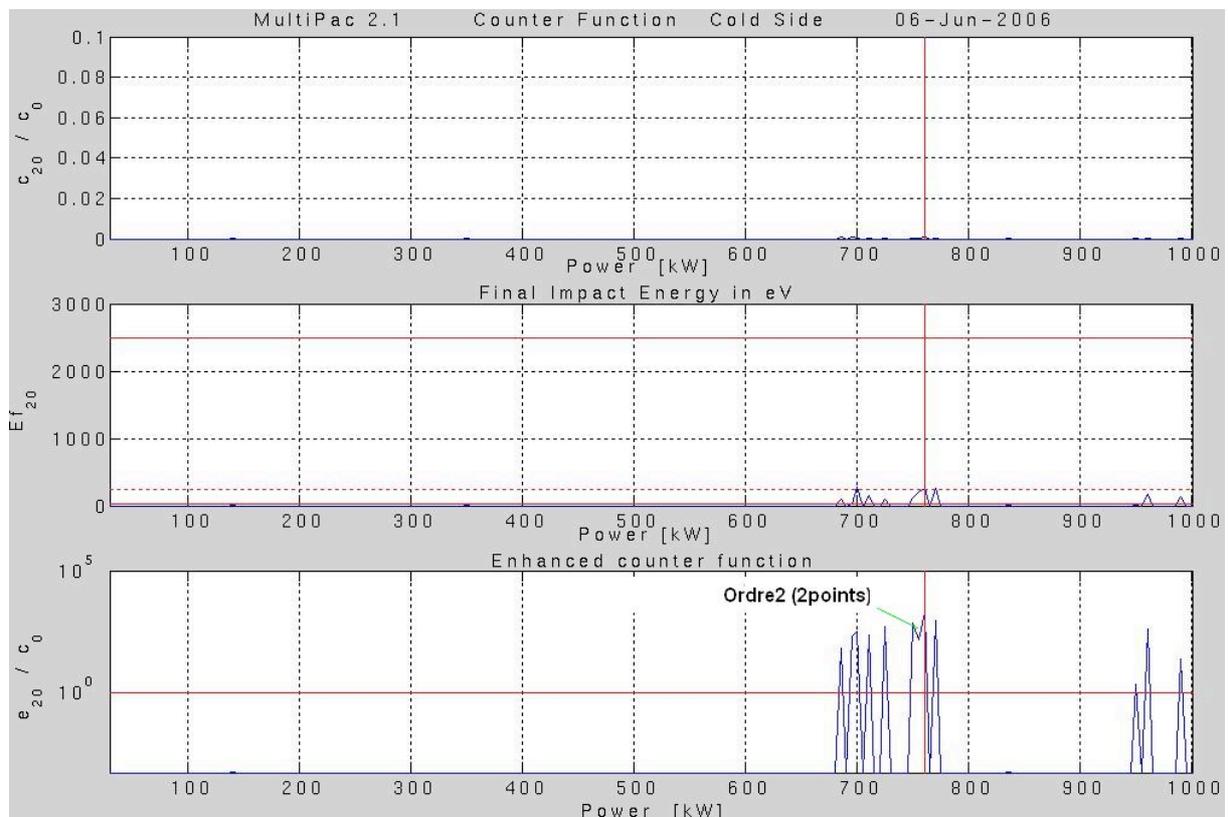


Figure (VIII.14) : Les niveaux de puissances inférieurs à 1 MW favorables à l'établissement du multipactor pour le modèle représentant la fenêtre du TTF-V, obtenu par simulation MultiPac2.1.

En étendant la même étude entre 1 MW et 2 MW, nous constatons une forte présence du multipactor à deux points d'ordre 1 et 2 et qui s'étale sur la plupart de cette gamme de puissance (Figure (VIII.15)). Cependant, le processus de production devient différent. C'est le C_N qui devient à présent plus important alors que les énergies des électrons deviennent moins favorables à la production des électrons secondaires. Ces multipactors

peuvent être très stables et nocifs. En plus, l'étude de leurs trajectoires (figure (VIII.16)) montre que le multipactor s'établit sur la céramique.

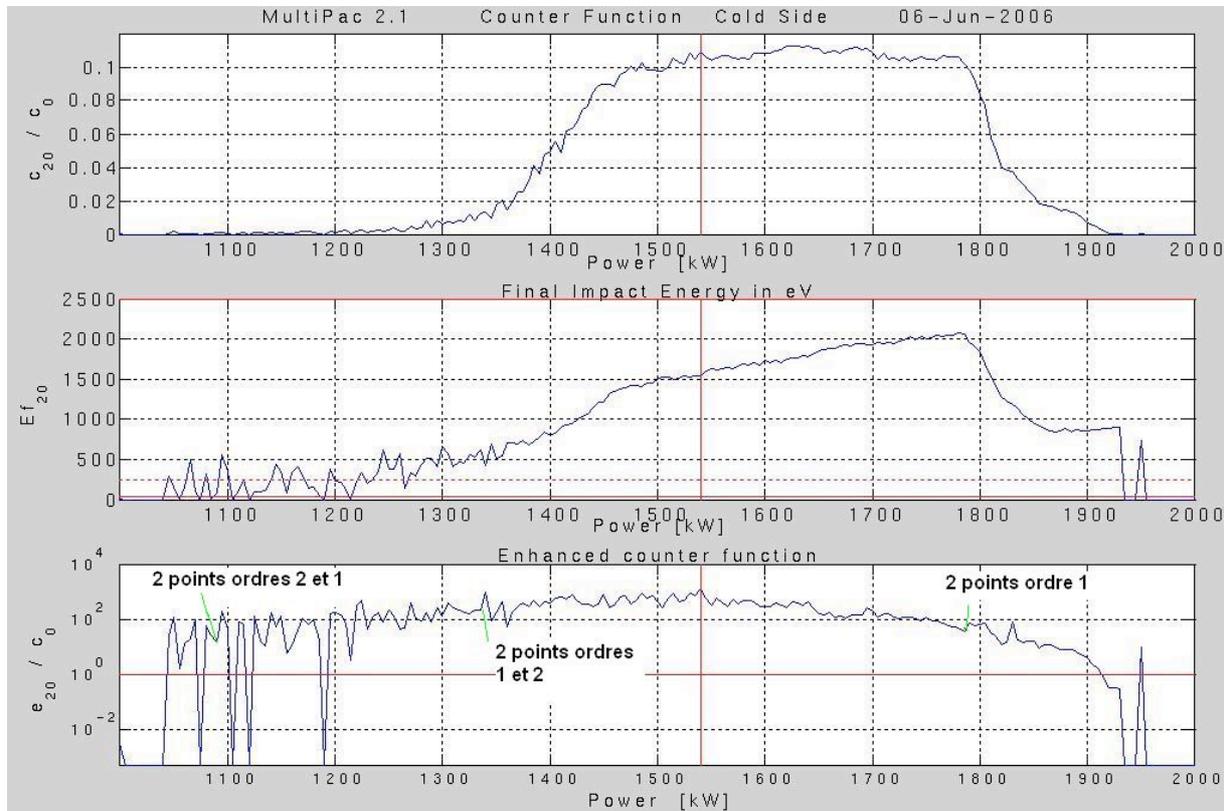


Figure (VIII.15) : Figure présentatrice des niveaux de puissances entre 1 MW et 2 MW favorables à l'établissement du multipactor pour le modèle représentant la fenêtre du TTF-V, obtenu par simulation MultiPac2.1.

Les modifications apportées sur la fenêtre froide de TTF-III semblent avoir changé radicalement son comportement vis-à-vis du multipactor. Elle semble courir un grand risque à cause de la présence d'ordres très stables.

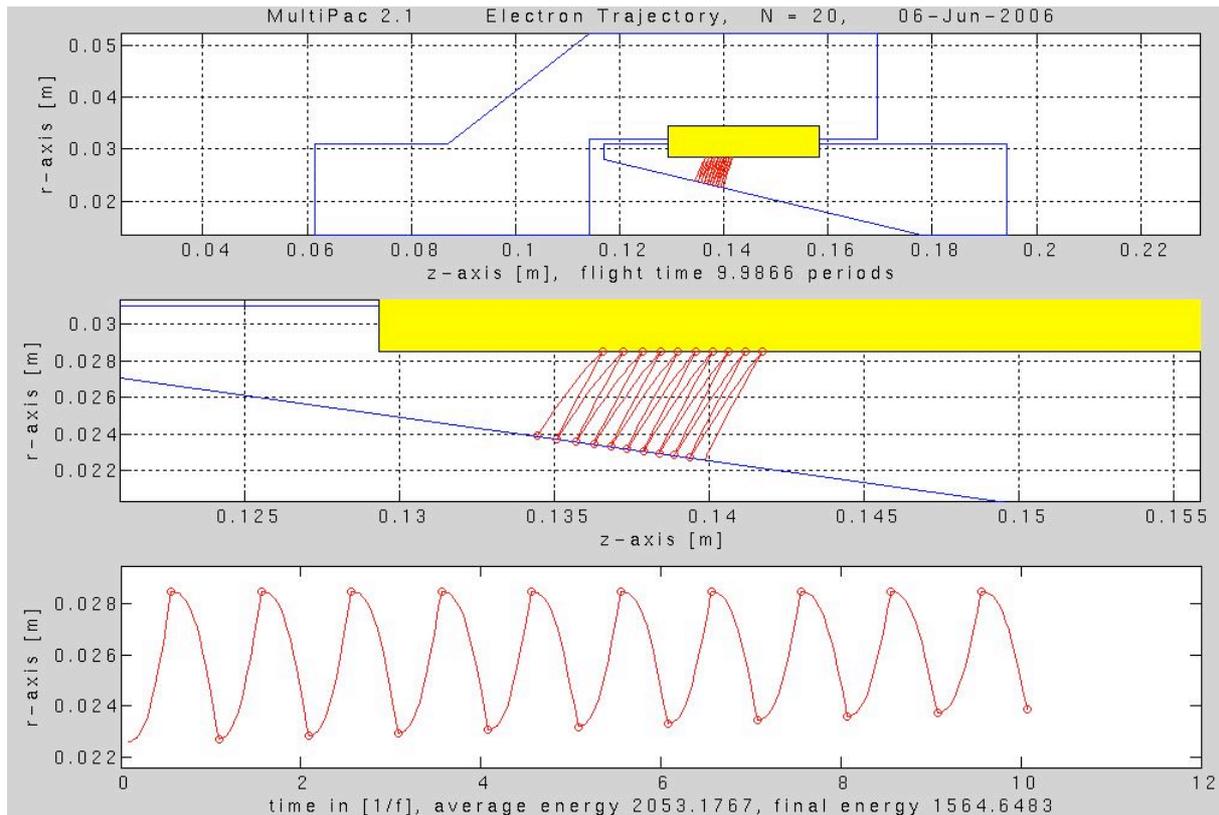


Figure (VIII.16) : Multipactor de 1^{er} ordre à deux points sur la fenêtre de TTF-V.

III- L'effet de la polarisation sur le coupleur TTF-III

Le choix d'une géométrie appropriée et généralement le moyen primordial pour éviter les conditions de résonance pour le multipacting. Cependant, il n'est pas toujours possible de changer la géométrie suffisamment pour échapper à ce problème. En conséquence, d'autres méthodes doivent être utilisées pour éliminer le multipacting comme la gravure sur la surface du conducteur ou la perturbation électrostatique ou magnétostatique [74].

Le coupleur coaxial TTF-III est muni d'un conducteur interne polarisable permettant d'effectuer une perturbation électrostatique afin d'éviter le multipactor pendant le fonctionnement sur cavité. En effet, en pratique, cette dernière n'est pas parfaitement accordée [75]. Par conséquent, le coupleur peut être le siège d'ondes progressives TW, stationnaires SW ou mixte MW. Ces conditions peuvent être propices au déclenchement du multipactor.

Cette étude a pour but de déterminer les tensions de polarisations nécessaires pour éliminer le multipactor dans l'un des cas de propagation de la RF (TW, SW, MW) et déduire la polarisation à utiliser pour les autres cas.

III-1- L'influence de l'application de la polarisation sur le multipactor dans le coupleur TTF-III

III-1-1- La perturbation du multipactor par polarisation

Pour simplifier le problème, nous considérons que le coupleur TTF-III peut être modélisé en trois parties comme nous l'avons fait pour la simulation du multipactor. Mais sachant que le champ EM correspondant à la fenêtre ne peut pas être calculé analytiquement, son expression sera présentée uniquement dans la ligne coaxiale.

En considérant le cas le plus général tenant compte de toutes les configurations du champ dans un coaxial pour un coefficient de réflexion R donné au bout de la ligne ($0 \leq R \leq 1$), nous avons :

le champ électrique global après l'application de la polarisation en tension continue est donné par [76] :

$$\vec{E}(x, \varphi) = \vec{E}_R(x, \varphi) + \frac{V}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \vec{e}_r \quad [\text{VIII.1}],$$

où V est la tension de polarisation entre l'axe et le conducteur externe de la ligne coaxiale, $\varphi = \omega t$ est la phase du champ électromagnétique, a et b sont les diamètres respectifs des conducteurs interne et externe de la ligne et \vec{E}_R est le champ RF traversant le coaxial est dépendant du coefficient de réflexion R comme suit :

$$\vec{E}_R = R \vec{E}_{SW} + (1 - R) \vec{E}_{TW} \quad [\text{VIII.2}],$$

avec

$$\vec{E}_{SW}(x, \varphi) = \frac{U}{2r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} (\cos(kz - \varphi) - \cos(kz + \varphi)) \vec{e}_r \quad [\text{VIII.3}] \text{ et}$$

$$\vec{E}_{TW}(x, \varphi) = \frac{U}{2r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} (\cos(kz - \varphi)) \vec{e}_r \quad [\text{VIII.4}].$$

où U est la chute de tension entre les conducteurs interne et externe, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ et (r, θ, z) sont les coordonnées cylindriques.

En ce basant sur les résultats de la référence bibliographique [76], nous considérons que la trajectoire de l'électron du MP est essentiellement radiale. Ainsi, son mouvement suivant l'axe est beaucoup plus petit que celui suivant la direction radiale même si l'onde est purement TW où les électrons sont censés se déplacer avec l'onde RF. Or, sachant que la perturbation statique créée par la polarisation en tension continue est purement radiale, elle aura pour effet de générer une force radiale de répulsion permettant lorsqu'elle est choisie judicieusement de rompre les conditions de résonance de l'électron.

III-1-2- Les conséquences de l'application de la polarisation

Des résultats de simulations ont montré que l'application de la polarisation influence sensiblement la création du multipactor ainsi que son comportement. Il est, d'ailleurs, possible de remarquer, que pour toutes les simulations effectuées en [32] et [77], en absence de polarisation dans une ligne coaxiale traversée par une RF en SW, le multipactor à un point apparaît sur le conducteur externe. Ceci a été repris dans la référence [76] tout en signalant que l'application de la tension continue a été à l'origine d'un nouveau type de multipactor qui s'est créé sur le conducteur interne. En effet, une polarisation négative génère un multipactor sur le conducteur externe de la ligne coaxiale et une tension positive produit un multipactor sur le conducteur interne [27]. Ce résultat aussi semble vrai pour la fenêtre froide de TTF-III d'après [74].

De plus, un comportement très important a été remarqué quant à l'influence de la polarisation sur les ordres de multipactor. En effet, en l'absence de polarisation, l'augmentation de la puissance permet de rencontrer successivement des multipactors d'ordres décroissants. Le premier ordre et donc rencontré en dernier lieu. En effectuant la même opération tout en polarisant le conducteur interne, les ordres du multipactors sont rencontrés dans l'ordre croissant [76]. Les ordres les plus petits s'étalent sur les gammes de puissance les plus larges.

III-1-3- Loi d'échelle

Seul le multipactor d'origine électrique EMP sera pris en compte.

Partons d'une carte, que nous appellerons carte du multipactor, décrivant l'intensité et l'ordre du multipactor en fonction de la tension de polarisation (en abscisse) et de la puissance RF dans une ligne coaxiale (en ordonnée) pour un coefficient de réflexion R donné. Il est possible de déduire la même carte correspondant à un autre coefficient de réflexion par :

$$P_R^{EMP} \sim \frac{1}{(1+R)^2} P_{TW} = \frac{4}{(1+R)^2} P_{SW} \text{ [VIII.5] [76]},$$

où les puissances d'apparition de multipactor représentées par cette loi sont toutes relatives au même ordre et à la même polarisation.

Ainsi il suffit d'avoir la carte de multipactor pour une RF en SW pour déduire toute les configuration de propagation. Nous remarquons ici que pour la propagation en SW, nous pouvons obtenir tous les ordres de multipactor que nous cherchons mais avec les puissances incidentes les plus basses par rapport à n'importe quel autre régime de propagation. Toutefois, les tensions de polarisation au delà desquelles le multipactor est éliminé restent valables pour tout R [76].

III-1-4- Risque encouru par le coupleur suite à sa polarisation

La recherche expérimentale de la tension de polarisation reste une opération délicate à réaliser. En effet, le premier ordre de multipactor étant le premier rencontré pendant l'augmentation de la puissance lorsqu'une tension de polarisation est appliquée, le multipactor peut être particulièrement nocif à la structure RF. Ce même ordre de multipactor peut être moins nuisible à des puissances plus élevées car les électrons seront trop énergétiques pour l'entretenir. Ainsi, la polarisation peut être à l'origine de dégâts sur un coupleur en cas d'un choix non judicieux de la tension.

III-2- Essai expérimental

III-2-1- Le choix des tensions de polarisation

Les résultats des simulations effectuées sur les parties du coupleur TTF-III présentés dans la référence [74] donnent les tensions d'élimination du multipactor pour chacune des lignes coaxiales de la partie froide et de la partie chaude :

	Polarisation négative (kV)	Polarisation positive (kV)
Coaxial chaud	-3,5	+2,5
Coaxial froid	-2,9	+2,7

Tableau VIII.2 : Tension de polarisation minimale, en valeur absolue, suffisante pour éliminer le multipactor dans les parties coaxiales de TTF-III.

Des résultats de simulations effectuées sur la fenêtre froide, toujours dans la même référence [74], ont permis de conclure qu'une polarisation positive de +4 kV permet d'éliminer le multipactor jusqu'à des puissances de 900 kW et que l'idée d'une polarisation négative ne semble pas être une bonne option.

En conséquence, pour minimiser les risques d'endommager le coupleur, il est prudent de choisir une tension supérieure à +4 kV. Nous optons pour l'utilisation d'une tension de 4,5 kV. Ainsi en utilisant l'équation [VIII.1], les tensions continues provoquées sur les conducteurs internes et externes relatifs aux parties coaxiales chaudes et froides seront :

	Partie chaude	Partie froide
Champ continu sur le conducteur interne (kV/m) à $V = 4,5$ kV	401	624
Champ continu sur le conducteur externe (kV/m) à $V = 4,5$ kV	175	197

Tableau VIII.3 : Champs électriques provoqués par la polarisation continue du coupleur.

III-2-2- Le choix du régime de la RF

Le comportement du multipactor est différent dans la ligne coaxiale selon le régime de propagation RF utilisé. En effet, en SW le multipactor apparaît essentiellement au niveau des maxima du champ électrique et reste à ce niveau là. En TW, le siège du multipactor n'est plus fixe mais se propage dans la ligne avec le champ RF [32].

Afin de pouvoir mesurer le plus de signaux possibles avec les capteurs des courants électroniques situés dans le coupleur, nous optons pour l'étude de l'influence de la polarisation du conducteur interne sur le multipactor en régime TW. Ceci peut permettre de collecter plus efficacement des électrons qui sont déjà en mouvement dans le sens de la propagation.

III-2-3- Expérience et observations

Nous rappelons que la nomenclature des courants électroniques et des vides est présentée en annexe 2.

Le test de l'effet de la polarisation des conducteurs internes des coupleurs TTF-III sur le multipactor a été effectué sur une paire de ces coupleurs déjà étuvée in-situ et conditionnée. L'expérience a consisté à augmenter, en premier lieu, la puissance dans les deux coupleurs à partir de quelques kilowatts jusqu'à 1 MW, en utilisant des impulsions de largeur 20 μ s et de noter, en second lieu, le comportement du vide et des courants électroniques dans toutes les parties (voir figure (VIII.17))

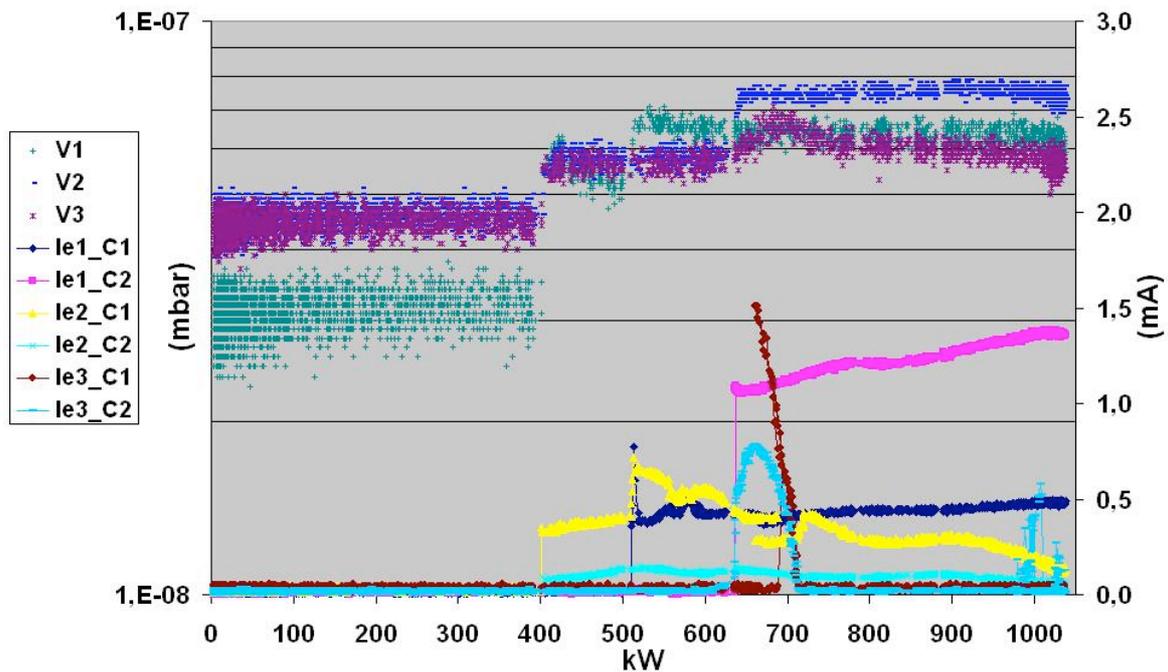


Figure (VIII.17) : Variation des courants électroniques et des vides dans la paire de coupleurs utilisée avant l'application de la polarisation pour des impulsions de largeur $20\mu\text{s}$.

Nous pouvons noter l'apparition des courants électroniques au fur et à mesure que la puissance augmente, et ce, sur toutes les parties de la paire de coupleurs. Ces courants ont une bonne corrélation avec les fluctuations des vides mais ne sont pas à l'origine de dégazages importants du fait que les surfaces sont déjà conditionnées.

Afin de voir l'influence de la polarisation sur le coupleur TTF-III, une tension continue de 4,5 kV a été appliquée au coupleur en amont suite à l'arrêt de la puissance. L'augmentation de la puissance a alors été effectuée comme précédemment tout en gardant la même largeur d'impulsion.

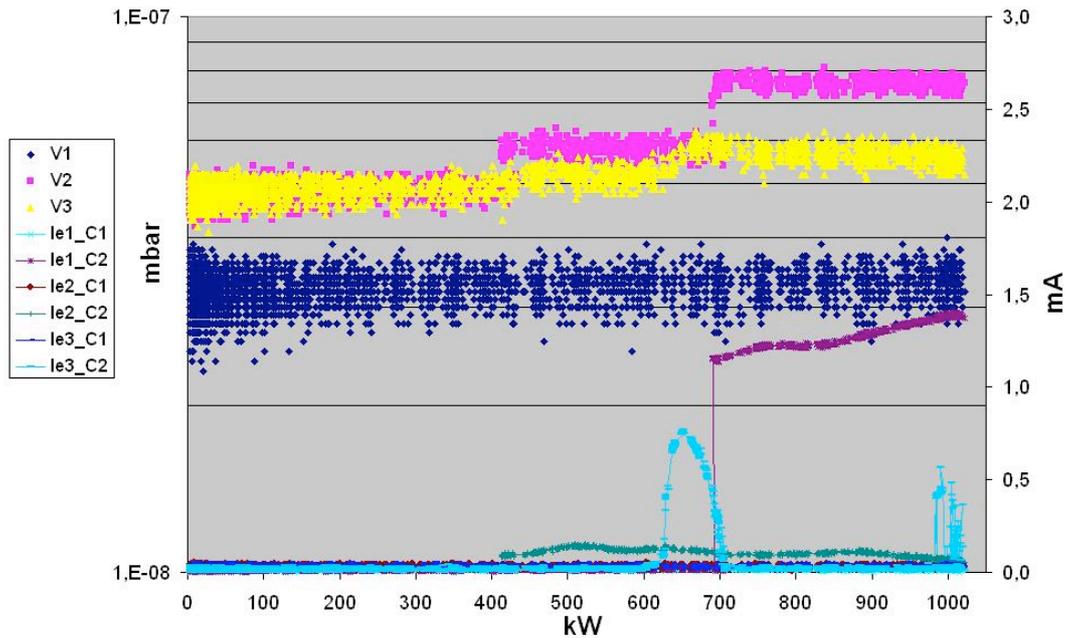


Figure (VIII.18) : Variation des courants électroniques et des vides dans la paire de coupleurs utilisée pendant l'application d'une polarisation de 4,5 kV sur le coupleur en amont (C1) pour des impulsions de largeur 20 μ s.

La comparaison de cette dernière figure avec celle d'avant montre une disparition totale des courants électroniques dans le coupleur en amont (C1) alors qu'ils ont gardé les mêmes amplitudes aux niveaux de puissances auxquels ils sont sensibles pour le coupleur en aval (C2). De plus, le vide V1, respectif à la partie chaude du coupleur en amont, semble être constant. Ceci est un argument supplémentaire en faveur de l'absence de toute activité électronique significative dans ce coupleur.

Afin de tester l'efficacité de cette polarisation à des conditions plus contraignantes de fonctionnement du coupleur, nous avons choisi de refaire la même expérience pour une largeur d'impulsion de 400 μ s et des puissances allant jusqu'à 1 MW puis pour une largeur de 1300 μ s et des puissances atteignant 500 kW.

Le comportement des coupleurs est resté le même sous ces nouvelles conditions de fonctionnement. La polarisation semble éliminer intégralement toute activité électronique dans le coupleur en amont.

Afin d'avoir la preuve que l'absence de ces activités électroniques est uniquement due à la polarisation, nous avons décidé d'éliminer la polarisation sur le coupleur en amont pour l'appliquer au coupleur en aval de la même paire utilisée. Pour ce faire, nous avons repris l'essai à 400 μ s durant lequel nous avons observé le plus de dégazage sur le coupleur en aval

(non polarisé en ce moment là). Nous pouvons alors comparer le comportement des coupleurs suite à la permutation de la polarisation.

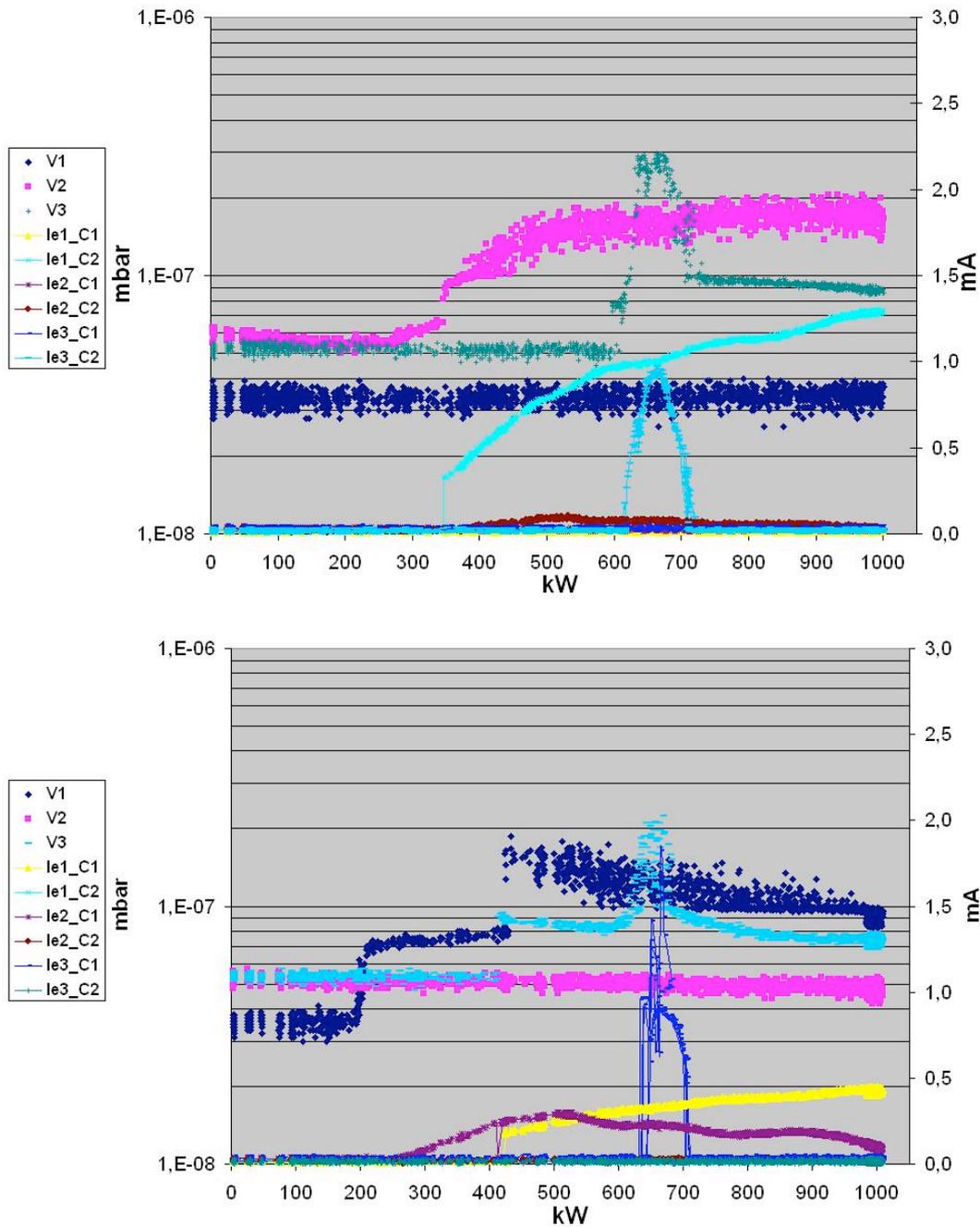


Figure (VIII.19) : Comparaison du comportement des coupleurs d'une paire avant et après la permutation de leur polarisation pour des largeurs d'impulsion de 400 μ s. Le graphe du haut correspond à des polarisations respectives de C1 et C2 de 4,5 kV et 0 kV. Le graphe du bas correspond à des polarisations respectives de C1 et C2 de 0 kV et 4,5 kV. (La couleur adoptée pour une mesure n'est pas forcément la même dans les deux graphes)

La figure ci-dessus prouve que c'est bel est bien la polarisation du conducteur interne du coupleur qui est à l'origine de la disparition des courants électroniques dans le coupleurs vu que ces derniers réapparaissent dans le coupleur en amont suite à l'arrêt de la polarisation et disparaissent totalement dans le coupleur en aval suite à sa polarisation.

Enfin, ces résultats montrent le grand effet qu'à une polarisation suffisante sur les activités électroniques dans le coupleur TTF-III. Il est pratique d'utiliser cette option en cas d'un dysfonctionnement d'un coupleur pendant son fonctionnement sur une ligne accélératrice. Toutefois, il est intéressant de tester l'effet de cette polarisation sur un coupleur non conditionné pour voir son efficacité pour des surfaces plus sensibles au multipactor. De plus, d'autres essais expérimentaux pourront permettre une meilleure optimisation du choix de la valeur de la tension de polarisation.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un test expérimentalement montrant la possibilité d'envoyer une puissance de 2 MW dans le coupleur TTF-III pour des largeurs d'impulsions de 20 μ s. Cet essai a permis de déduire la possibilité de tester de coupleur TTF-V à ces niveaux de puissance sans soumettre sa fenêtre chaude au danger d'établissement d'arc dans la partie sous air. Nous avons aussi remarqué qu'un coupleur conditionné peut tolérer un passage de puissances allant jusqu'à 2 MW sans qu'il soit soumis à une préparation particulière.

Nous avons aussi présenté des études de simulations du multipactor dans les coupleurs TTF-III et TTF-V. Ces travaux montrent essentiellement l'absence du multipactor sur la fenêtre froide de TTF-III dans le cas d'une onde progressive. Par contre un multipactor stable pourrait s'établir sur la fenêtre froide de TTF-V pour le même mode de propagation.

Des différences importantes ont aussi été constatées entre certains résultats de simulation et les courants électroniques mesurés pendant le conditionnement. Un modèle plus représentatif de la réalité physique pourrait donner des résultats plus satisfaisants.

Nous avons finalement étudié l'influence de la polarisation du conducteur interne du coupleur sur l'élimination du multipactor. Le choix d'une tension de polarisation adéquate et son application sur un coupleur conditionnés nous a permis de prouver son efficacité à éliminer tous les courants électroniques pour toutes les gammes de puissance allant jusqu'à 1 MW.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux effectués durant cette thèse ont été menés dans le cadre de la coopération LAL/DESY visant à instaurer une activité de R&D et de conditionnement des coupleurs au LAL. L'importance d'une telle activité découle de l'intérêt scientifique donné à la construction des installations accélératrices (accélérateurs et collisionneurs) en technologie supraconductrice choisie essentiellement pour son fort rendement en puissance HF. L'état d'avancement du projet pilote XFEL a aussi été une motivation importante pour cette tendance.

Les coupleurs de puissances HF, pour les cavités supraconductrices à haut gradient telles que celles de XFEL et de ILC, sont des composants très problématiques. La maîtrise de la technologie et des procédés de préparation de ces coupleurs est un axe de recherche intéressant pour la technologie supraconductrice appliquée aux accélérateurs. Un nombre croissant d'importantes unités de recherches à travers le monde s'intéresse à ces activités.

Cette thèse a été réalisée en vue de répondre à certains des objectifs les plus substantiels fixés par le LAL dans le cadre de ses activités concernant les coupleurs en question. Ces objectifs sont résumés dans les points suivants :

- instaurer une activité de conditionnement HF automatique des coupleurs au LAL ;
- étudier le comportement des coupleurs TTF-III ;
- réduire les temps de conditionnement HF des coupleurs TTF-III.

L'instauration d'une activité de conditionnement HF automatique des coupleurs au LAL

Cette première étape est cruciale pour la réalisation de tous les objectifs présentés ci-dessus. Ainsi, un grand soin a été donné à l'élaboration d'un programme de pilotage automatique de toute l'opération du conditionnement HF. Le programme réalisé en langage graphique « LabView » permet un contrôle de toute la chaîne de puissance utilisée pour le conditionnement des coupleurs. Ce programme assure aussi l'acquisition et l'enregistrement de toutes les mesures effectuées par les différents moyens de diagnostic. Les arrêts accidentels ou provoqués par les interlocks sont aussi gérés automatiquement assurant la sécurité du déroulement du conditionnement. Des tests ont permis la validation du bon fonctionnement de ce programme.

Une série de conditionnements HF à température ambiante des coupleurs TTF-III a été accomplie avec succès. Une application rigoureuse de la procédure a permis aux coupleurs

testés d'atteindre les performances demandées et de passer les testes de validation accompagnant le conditionnement.

Huit des coupleurs conditionnés au LAL ont été testés sur des cavités supraconductrices dans des conditions cryogéniques. Ces tests étaient un succès total. Les cavités ont fonctionné sous des champs accélérateurs avoisinant 35 MV/m et n'ont en aucun cas été limitées par les coupleurs. Ce résultat prouve incontestablement la fiabilité de toute la chaîne de préparation des coupleurs au LAL. Le conditionnement HF que nous avons effectué a permis aux coupleurs de remplir leurs fonctions dans les meilleures conditions.

L'étude du comportement des coupleurs

La série de coupleurs TTF-III conditionnée au LAL nous a permis de collecter assez de mesures pour pouvoir décrire le comportement typique de ces coupleurs durant leurs conditionnements. Ces informations permettront de détecter plus facilement les éventuels comportements atypiques de certains coupleurs et aiderons à mieux en connaître les raisons.

La première observation concernant les conditionnements HF est la grande différence qui peut être constatée entre les temps de conditionnement d'une paire de coupleur à l'autre. Cette différence est très incommode pour l'ordonnancement du conditionnement de grandes séries de coupleurs.

Toutefois, tous les conditionnements effectués au LAL montrent que la première étape du conditionnement est la plus consommatrice en temps (environ 60 % de la durée totale en moyenne) alors qu'elle utilise la largeur d'impulsion la plus faible (20 μ s). Cette étape est aussi celle qui agit le plus sur la réactivité des surfaces des coupleurs au passage de la puissance. Nous avons aussi noté une réduction progressive des courants électroniques tout le long du conditionnement. De plus, en passant d'une étape d'un conditionnement HF vers une autre, la première apparition des courants électroniques se fait pour des puissances de plus en plus élevées.

Nous avons aussi constaté qu'un coupleur TTF-III conditionné peut supporter une augmentation de la puissance pour des impulsions de 20 μ s jusqu'à 2 MW tout en gardant les valeurs des vides et des courants électroniques assez bas. Ce résultat a aussi permis de valider la capacité de la partie chaude de TTF-V à tolérer le champ électrique relatif à la puissance de 2 MW notamment dans la partie sous air.

Nous avons aussi réussi à donner expérimentalement une estimation de l'apport de l'étuvage in-situ sur l'opération de conditionnement des coupleurs TTF-III. Les expériences effectuées ont révélé la possibilité de réduire, en moyenne, de deux fois et demi le temps de

conditionnement. Elles ont aussi montré que l'étuvage in-situ améliore le vide limite dans les coupleurs mieux qu'une longue exposition à la HF pendant un conditionnement. Suite à ces résultats, nous avons opté pour l'utilisation systématique de l'étuvage in-situ avant chaque opération de conditionnement. Les gains en coût d'opérations de conditionnement d'une grande série de coupleurs peuvent être assez intéressants avec l'économie de puissance réalisée grâce à l'étuvage in-situ. Ce dernier sera encore plus attractif avec une meilleure optimisation de sa durée.

Nous avons aussi essayé d'estimer l'influence de la procédure de stockage sur l'état de conditionnement des coupleurs. Les essais expérimentaux accomplis montrent, d'un côté, que les coupleurs étuvés in-situ avant d'être conditionnés restent peu sensibles au passage de la HF après leur stockage. D'un autre côté, les coupleurs non étuvés in-situ ont retrouvé une bonne partie de leur sensibilité à la HF.

Des simulations du multipactor ont été effectuées sur des modèles correspondant aux coupleurs TTF-III et TTF-V pour des puissances en TW. Les calculs ont été menés en utilisant le logiciel (2D) MultiPac2.1. Des différences significatives ont été remarquées entre les puissances d'établissement des courants électroniques dans les parties coaxiales du TTF-III et celles relatives aux multipactors calculés. Ces différences pourraient être, en partie, dues à une grande simplicité du modèle par rapport à la structure réelle. Quant à la fenêtre froide du TTF-III, la simulation prévoit une absence du multipactor sur la céramique de cet élément jusqu'à une puissance de 1 MW. En revanche, un multipactor stable à deux points peut s'établir sur la face intérieure de la céramique de la fenêtre froide de TTF-V à partir d'une puissance de 700 kW. Néanmoins, les électrons très énergétiques de ce multipactor peuvent réduire sa capacité à s'entretenir.

Nous avons aussi essayé de choisir une tension de polarisation du conducteur interne permettant d'éliminer efficacement le multipactor dans TTF-III pour des puissances allant jusqu'à 1 MW. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés de certains résultats de simulation existants dans la bibliographie. L'expérimentation de l'effet de la tension que nous avons choisi a été réalisée sur une paire de coupleurs préalablement conditionnée. Le résultat montre incontestablement la possibilité d'éliminer les résidus des courants électroniques dans les coupleurs pour toute la gamme de puissances étudiée.

La réduction des temps de conditionnement HF des coupleurs TTF-III

Les conditionnements des coupleurs au LAL et à DESY montrent que le temps de conditionnement atteint rarement la limite inférieure de 45h. En conséquence, nous avons

décidé d'apporter certains changements sur la procédure utilisée afin d'apporter une amélioration significative des temps de conditionnement. Toutefois, ces modifications ne doivent pas mettre en danger les coupleurs. L'analyse des mesures enregistrées pendant tous les conditionnements effectués a permis de choisir les paramètres à changer. Nous avons en premier lieu opté pour le changement des seuils des vides. Une estimation des capacités de pompage de l'installation utilisée au LAL nous a permis de choisir les nouveaux seuils. Grâce à ces nouveaux paramètres nous avons réduit le temps de conditionnement jusqu'à uniquement 24h.

Une autre étude a permis d'optimiser le temps de la boucle de variation de la puissance pendant le conditionnement. Le choix de ce nouveau temps répondait à un critère que nous avons établi. Avec ce nouveau paramètre nous avons réussi à réduire le temps de conditionnement à 20h. Ces derniers résultats constituent une performance importante qui pourra réduire d'une manière considérable le coût du conditionnement des coupleurs.

Néanmoins, nous avons constaté pendant ces deux derniers conditionnements une croissance des valeurs des courants électroniques qui ont provoqué plusieurs interruptions de la procédure par déclenchement d'interlocks. Ces événements apparaissent à une puissance HF bien déterminée pendant la première étape du conditionnement. Nous avons jugé la réduction du temps d'exposition des coupleurs à la HF, suite à la diminution considérable du temps de conditionnement, responsable de ces nouveaux événements. Afin de le prouver, nous nous sommes proposés de conditionner une paire de coupleurs en utilisant les nouveaux paramètres de la procédure mais tout en augmentant la fréquence de répétition. L'essai expérimental a montré qu'il est possible de conditionner cette paire à une fréquence de 4 Hz sans qu'une surcroissance du vide ne compromette cette opération. L'utilisation de cette fréquence a empêché l'avènement des interlocks observés dans les deux conditionnements précédents. D'autres essais expérimentaux seront nécessaires pour confirmer ce résultat. Le temps de ce dernier conditionnement est légèrement inférieur à 20 h.

Perspectives

Un nouveau contrat entre le LAL et DESY a été signé dans le but de conditionner 30 nouveaux coupleurs TTF-III au LAL. Un plan d'expériences sera dressé afin de pouvoir profiter de ces conditionnements pour approfondir nos recherches. Nous serons intéressés de voir si une meilleure optimisation de la procédure de conditionnement pourrait diminuer d'avantage le temps de conditionnement d'une manière significative. Certaines des

expériences sur ces coupleurs serviront aussi à compléter des essais que nous avons entamés durant cette thèse. Nous nous intéresserons, donc à l'effet de l'augmentation de la fréquence de répétition sur le comportement du coupleur pendant le conditionnement. Nous allons aussi essayer de tester l'influence de la polarisation du conducteur interne du coupleur sur les courants électroniques pendant le conditionnement.

Un intérêt particulier sera donné aux tests des coupleurs prototypes TTF-V et TW60. Ils seront en premier lieu conditionnés puis nous chercherons à connaître leurs limites de puissances tolérées. Nous sommes actuellement en train d'étudier la possibilité de faire fonctionner notre réseau HF sous SF6 ou en utilisant une autre solution alternative permettant l'usage de puissances importantes.

Une paire de coupleurs TTF-III qui a subi un dépôt de TiN sur toutes ces surfaces cuivrées sera aussi conditionnée. Nous chercherons à comparer les courants électroniques produits dans ces coupleurs avec ceux des coupleurs TTF-III classiques. Les temps de conditionnement constatés dans les deux cas seront aussi comparés.

Par ailleurs, nous tenterons de nous équiper d'un logiciel de simulation (3D) du multipactor. Des modèles plus détaillés des coupleurs de puissance seront alors mis en œuvre pour la simulation de ce phénomène dans les coupleurs TTF-III et sa comparaison avec les mesures des courants électroniques.

Bibliographie

- [1] : « TESLA Technical Design Report, Part I : Executive Summary », Ed. : F.Richard, J.R.Schneider, D.Trines, A.Wagner, 2001
- [2] : Executive Summary of the International Technology Recommendation Panel, 19 August, 2004
- [3] : B. Barrish, « The Global Design Effort for an International Linear Collider », EPAC'06, Edinburgh, Scotland, 2006
- [4] : « TESLA Technical Design Report, Part III : Physics at an e+ e- Linear Collider », Ed. : R. D. Heuer, D. Miller, F. Richard, P. Zerwas, 2001
- [5] : Worldwide Linear-Collider Study Group, « Understanding Matter, Energy, Space, and Time: The Case for the e+ e- Linear Collider », AAPPS Bulletin Vol. 13, No.4, August, 2003
- [6] : M. Tigner, « A Possible Apparatus for Electron Clashing-Beam Experiments », Nuovo Cimento Vol 37, 1228-1231, 1965
- [7] : « TESLA Technical Design Report, Part V : The X-Ray Free Electron Laser », Ed. : G. Materlik Th. Tschentscher, 2001
- [8] : Interim Report of the Scientific and Technical Issues (XFEL-STI) Working Group on a European XFEL Facility in Hamburg, 11 January 2005
- [9] : B. Aune et al., « The Superconducting TESLA Cavities », DESY, February 2000
- [10] : « The European X-Ray Free-Electron Laser Technical Design Report », DESY 2006-097, Germany, July 2006
- [11] : Onnes, H. Kamerlingh, « The Superconductivity of Mercury » Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, Nos. 122 and 124, 1911
- [12] : D. R. Tilley and J. Tilley, Superfluidity and Superconductivity, Institute of Physics Publishing Ltd, Bristol 1990
- [13] :
<http://www.lem.a.univ-tours.fr/Materiaux/Supra/Historique/HISTSUP.HTM>
- [14] :
<http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier103-3.php>
- [15] : P.Schmüser, « Basic Principles of RF Superconductivity and Superconducting Cavities », Pushing the Limits of RF Superconductivity Workshop, Argonne National Laboratory, September 2004

- [16] : P.Schmüser, «Superconductivity in High Energy Particle Accelerators», Prog. Part. Nucl. 49 (2002) issue1, available from the internet : <http://www.desy.de/~pschmues> , file supercon-acc.pdf
- [17] : B. Bonin, CERN Accelerator School, «Superconductivity in Particle Accelerators », CERN 96-03, ed. S. Turner, Hamburg, 1995
- [18] : W. Weingarten, « Superconducting Cavities – Basics », CERN Accelerator School, Hamburg, May 1995
- [19] : H. Padamsee et al, « RF Superconductivity for Accelerators », Wiley Series in Beam Physics and Accelerator Technology, Ed. Mel Month, USA, 1998
- [20] : E. Haeberl, « Couplers, Tutorial and Update », Particle Accelerators, 1992, Vol. 40, pp.141-159
- [21] : S. Bousson, « Etude des Phénomènes Thermiques dans les Cavités Accélévatrices en Niobium Rigidifiées par Projection Thermique », IPNO-T-00-04, Orsay, France, 2000
- [22] : P. Wilson, High Energy Electron Linac : Applications to Storage Rings RF Systems and Linear Colliders, Preprint SLAC-PUB-2884, November 1991
- [23] : H. Jenhani, « Conditionnement des Coupleurs de Puissance HF pour Cavités Supraconductrices en Mode Pulsé », Journées Jeunes Chercheurs 2004, île Berder, Bretagne, France, 2004
- [24] : I. E. Campisi, « State of the Art Power Coupler for Superconducting RF Cavities », EPAC2002, Paris, France, 2002
- [25] : B. Rusnak, « RF Power and HOM Coupler Tutorial », 11th Workshop on RF superconductivity, Lubeck-Travemunde, Germany, 2003
- [26] : W. J. Schrader, «A New Mode of Cyclotron Resonance Multipacting», Physica, Vol 40, Issue 2, Pages 223-228, December 1968
- [27] : E. Somersalo, P. Ylä-Oijala, D. Proch, J. Sarvas, Computational Methods for Analyzing Electron Multipacting in RF Structures, Particle Accel. 59 (1998) 107
- [28] : M. A. Furman and M. T. F. Pivi, « Probabilistic Model for the Simulation of Secondary Electron Emission », Physical Review Special Topics, Accelerators and Beams, Vol. 5, 124404 (2002)
- [29] : A. J. Dekker, « Secondary Electron Emission », Ed. F.Seitz et D. Turnbull, Solid State Physics Vol. 6 (Academic Press, New York, 1958), pp. 251-315
- [30] : Erkki Somersalo and al, “Electron Multipacting in RF Structures”, TESLA Rapport 14-94, 1994
- [31] : F. L. Krawczyk, « Status of Multipacting Simulation Capabilities for SRF Applications », SRF2001, Japan, September 2001

- [32] : P. Yla-Oijala, « Analysis of Electron Multipacting in Coaxial Lines with Travelling and Mixed Waves », TESLA Report 97-20, 1997
- [33] : E. Somertsalo et al., “Analysis of Multipacting in Coaxial Lines”, IEEE Proceedings, PAC 95, pp.1500-1502
- [34] : M. T. F. Pivi and M. A. Furman, « Electron Cloud Development in the Proton Storage Ring and in the Spallation Neutron Source », Physical Review Special Topics, Accelerators and Beams, Vol. 6, 034201 (2003)
- [35] : M. A. Furman, « The Electron-Cloud Effect in the Arcs of the LHC », LHC Project Report 180, CERN, 1998
- [36] : N. Hilleret, « The Secondary Electron Yield of Technical Materials and its Variation with Surface Treatments », EPAC, Austria, 2000
- [37] : B. Henrist et al., « The Variation of The Secondary Electron Yield and of the Desorption Yield of Copper under Electron Bombardment : Origin and Impact on the Conditioning of LHC », EPAC, France, 2002
- [38] : N. Hilleret, « A Summary of Main Experimental Results Concerning the Secondary Electron Emission of Copper », », LHC Project Report 472, CERN, 2002
- [39] : N. Hilleret, Talk : « Surface Properties of Technological Materials and Their Influence on the Operation and Conditioning of R. F. Couplers », Workshop on High Power Couplers SC ACC JLab 2002
- [40] : M. Seidel, Talk « Coupler Processing – Vacuum Aspects », Coupler Workshop, DESY, November 2003
- [41] : M. Andritsky, « Damage of Oxide Layers on an Al-alloy by Electron Bombardment », Vacuum, 39, 7/8, 649-652, 1989
- [42] : C. Scheuerlein et M. Taborelli, « Electron Stimulated Carbon Adsorption in Ultrahigh Vacuum Monitored by Auger Electron Spectroscopy », J. Vac. Sci. Technol. A 20 (1), (2002), 93-101
- [43] : R. Losito, « LEP Coupler... a Troubled Story of Success », CERN-SL-2002-057-ECT
- [44] : M. Stirbet et al., «Gas Condensation on Cold Surfaces, a Source of Multipacting discharges in the LEP2 Power Coupler », 7th Workshop on RF Superconductivity, Gif-sur-Yvette, France, 1995, Part. Accel : 53 919960 n. 1-4
- [45] : R. Brinkmann et al., « Recommendations from the X-FEL Power Coupler Meeting », DESY, Hamburg, November, 2003
http://xfel.desy.de/projectgroup/workpackages/linac/wp5powercoupler/index_eng.html
- [46] : D. Kostin, « TESLA RF Couplers Development at DESY », The 10th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, 2001

- [47] : M.Champion, « Design, Performance and Production of the Fermilab TESLA RF Input Couplers », Proc. Of the LINAC 96
- [48] : W.-D. Möller, « High Power Coupler for the TESLA Test Facility », Proc. of the 9th Workshop on SRF, Los Alamos National Lab, USA, 1999
- [49] : T. Garvey, « The Design and Performance of CW and Pulsed Power Couplers – A Review », SRF2005, USA, 2005, Physica C 441 (2006) 209-215
- [50] : I. E. Campisi, Talk : « State of the Art Power Couplers for the Superconducting RF Cavities », EPAC02, Paris, 2002
- [51] : I. E. Campisi, « Fundamental Power Couplers for Superconducting Cavities », 10th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, 2001
- [52] : J. Lorkiewicz et al, « Anti-multipactor TiN Coating of RF Power Coupler Components for TESLA at DESY », TESLA Report 2004-02
- [53] : M. Stirbet, « RF Conditioning : System and Procedures », High Power Couplers Workshop, Jlab, USA, 2002
- [54] : M. Champion, Talk : «The Future », Workshop on High-Powers for Superconducting Accelerators, JLAB, USA, November 2002
- [55] : T. Garvey, W.-D. Moller, « The RF Power Coupler Development Program at LAL-Orsay and DESY-Hamburg for TESLA and The European X-FEL », International Congress On Optics and Opto-electronics, Warsaw, September 2005
- [56] : L. Grandsire, « R&D COUPLEURS TESLA : PROCEDURES DE TRAVAIL EN SALLE BLANCHE », LAL, TESLA-SB-PROC-01, Orsay, France, 12-12-2001
- [57] : M. Omeich, « Notice Technique Descriptive de la station d'essais des coupleurs », LAL, Memo Technique, N° Note SERA 2004-24, Orsay, mars 2004
- [58] : H. Jenhani, « Premier conditionnement automatique d'une paire de coupleurs TTF-III », Note Technique. Note SERA 2004-141, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay, France, 2004
- [59] : J.L. de Segovia, « Physics of Outgassing », CERN Accelerator School, Ed : S. Turner, Denmark, June 1999
- [60] : K. Jousten, « Thermal Outgassing », CERN Accelerator School, Ed : S. Turner, Denmark, June 1999
- [61] : P. Danielson, « Pumping speed in the dry zone », Journal of Practical and Useful Vacuum Technology, Reprinted by permission by R&D Magazine, all rights reserved. Cahners Business Information. A shorter version appeared in S&D Magazine, December 2003
- [62] : J. Frenkel, Zeit. fur Phys. 26 (1924) 117

- [63] : W.-D. Möller, Talk : « Pulsed High Peak Power Couplers for Superconducting Cavities », Orsay, February, 2005
- [64] : H. Jenhani, « Caractérisation de l'installation du vide pour le conditionnement des coupleurs TTF-III », MEMO Technique LAL, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay, France, 2005
- [65] : J. Delafosse, G. Mongodin, « LES CALCULS DE LA TECHNIQUE DU VIDE », Société Française des Ingénieurs et Techniciens du Vide, France, 1961
- [66] : H. Jenhani et al “Developments in Conditioning Procedures for the TTF-III Power Couplers”, EPAC’06, Edinburgh, Scotland, 2006
- [67] : J. Knobloch et al., « CW Operation of the TTF-III Input Coupler », PAC2005, Knoxville, Tennessee, USA, 2005.
- [68] : S. Bauer et al., « CW test of the TTF-III input coupler at Rossendorf », Energy Recovery Linac Report 2004, ERL 04-10, 2004
« <http://www.lns.cornell.edu/public/ERL/2004/> »
- [69] : T. Garvey, H. Borie, « The TESLA High Power Coupler Program at Orsay », LAL, Orsay, France, 2004
- [70] : P. Lepercq, « Prototypes TW 60 et TTF-V », Note SERA 2004-153, LAL-Orsay, novembre, 2004
- [71] : J. Sekutowicz, M. Ferrario and Ch.Tang, « Superconducting Superstructure for TESLA Collider : A Concept », PRST-AB, Vol. 2, 062001, 1999
- [72] : P. Ylä-Oijala, « MultiPac 2.1 : Multipacting Simulation Toolbox with With 2D FEM Field Solver and MATLAB Graphical User Interface », Rolf Nevanlinna Institute, Helsinki, 2001.
- [73] : P. Ylä-Oijala, « MultiPac – Multipacting Simulation Package With 2D FEM Field Solver », SRF conference, KEK, Japan, 2001
- [74] : P. Yla-Oijala, Suppressing electron multipacting in ceramic windows by DC bias, NIM A, February 2001
- [75] : P. Yla-Oijala, “ Electron Multipacting in TESLA Cavities and Input Couplers”, Particle Accelerators, Vol. 63, pp. 105-137, 1999
- [76] : P. Yla-Oijala, “Suppressing electron multipacting in coaxial lines by DC voltage”, TESLA Reports 97-21, 1997
- [77] : « TESLA XFEL Technical Design Report, Supplement : First Stage of the X-Ray Laser Laboratory », Ed. : R. Brinkmann, B. Faatz, K. Flöttmann, J. Rossbach, J. R. Schneider, H. Schulte-Schrepping, D. Trines, Th. Tschentscher, H. Weise, DESY 2002 – 167, 2002

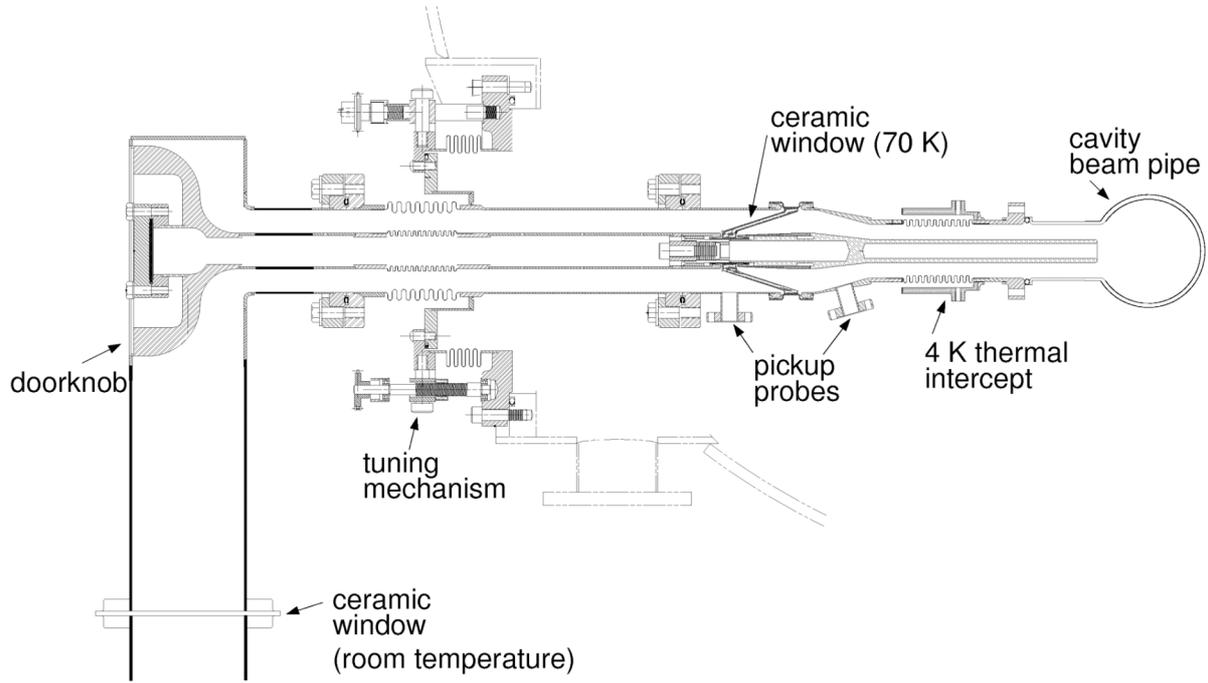
Acronymes et abréviations

2D	: Deux dimensions
BCS	: Théorie de J. BARDEEN, L. COOPER et R. SCHRIEFFER expliquant la supraconductivité
DESY	: Deutsches Elektronen-Synchrotron
HERA	: Hadron-Elektron-Ring-Anlage
HF	: Hyperfréquence
HT	: Haute tension
EM	: Electromagnétique
EMP	: Electric Multipacting
Fermilab	: Fermi National Accelerator Laboratory
ICFA	: International Committee on Future Accelerators
ILC	: International Linear Collider
ITRP	: International Technology Recommendation Panel
JLC	: Japan Linear Collider
KEK	: Koh-Enerugii Kasokuki Kenkyu Kikou - High Energy Accelerator Research Organization
KEKB	: Collisionneur électron positron pour les mesons B à KEK.
LAL	: Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
LC	: Linear Collider
LEP	: Large Electron Positron collider
LHC	: Large Hadron Collider
Linac	: Linear Accelerator
MP	: Multipactor
MMP	: Magnetic Multipacting
MW	: Mixed Wave

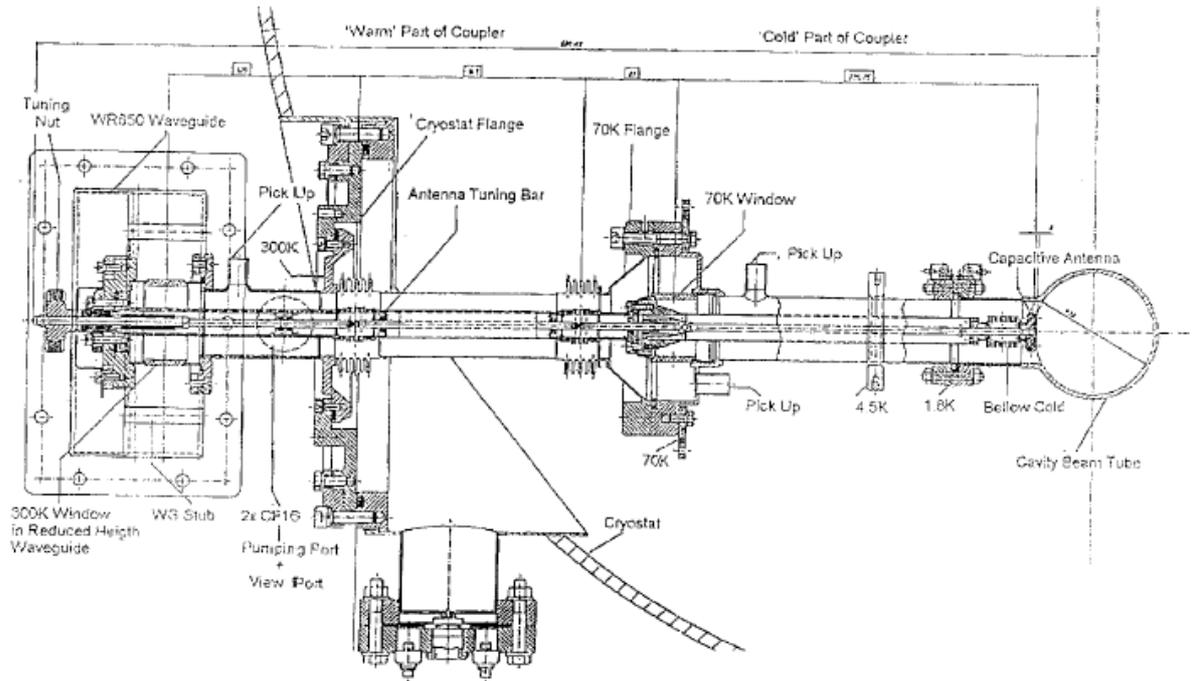
NLC	: Next Linear Collider
R&D	: Recherche et développement
RF	: Radiofréquences
SASE	: Self Amplified Spontaneous Emission
SEC	: Secondary Emission Coefficient
SLAC	: Stanford Linear Accelerator Center
SLC	: Stanford Linear Collider
SNS	: Spallation Neutron Source
SW	: Standing Wave
TEM	: Transverse Electric Magnetic
TESLA	: Tera Electron-volt Superconducting Linear Accelerator
Tevatron	: Accélérateur circulaire à Fermilab
TOS	: Taux d'Onde Stationnaire
TRC	: Technical Review Committee
TW	: Toward Wave
v. p. m	: volume par million
XFEL	: X-Ray Free Electron Laser

Annexe 1

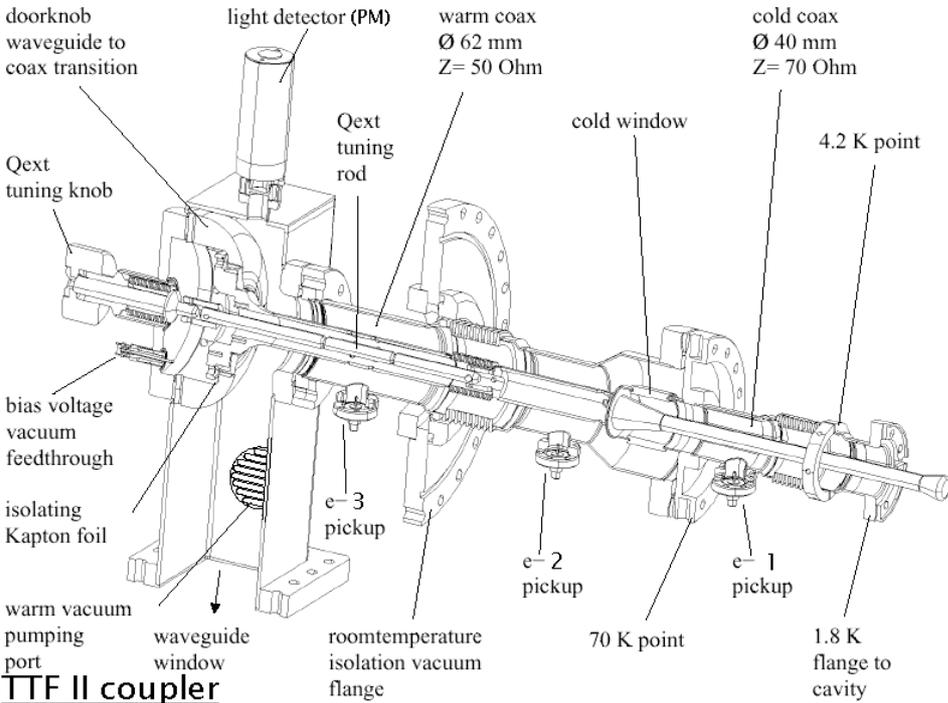
Coupleur FNAL



Coupleur TTF-I

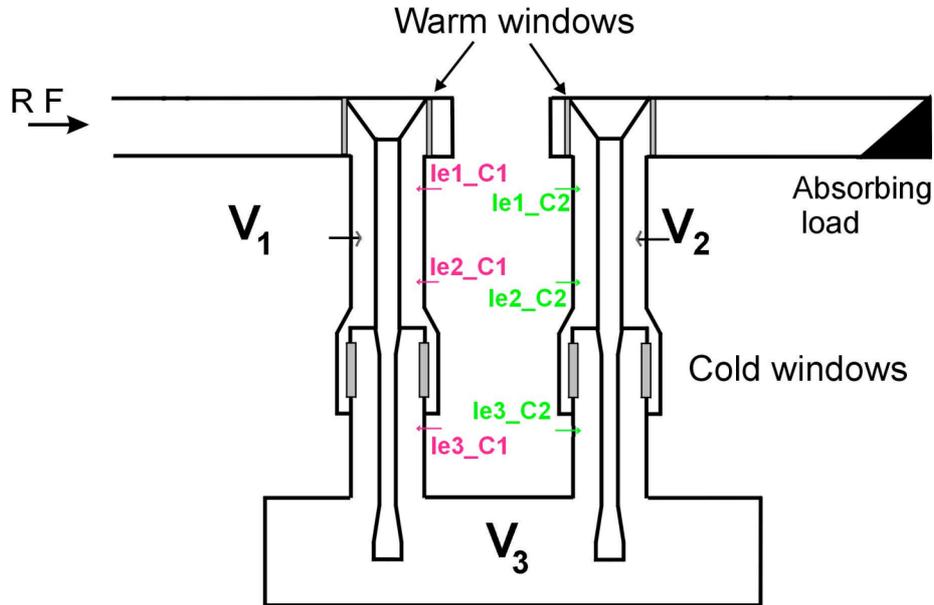


Coupleur TTF-II



Annexe 2

Nomenclature des différents diagnostics utilisés pour la mesure des vides et des courants électroniques dans une paire de coupleurs TTF-III :



V_1 [mbar] : est le vide de la partie chaude du coupleur en amont ou C1. Parfois nous utilisons aussi V_{ch1} pour représenter la même grandeur.

V_2 [mbar] : est le vide de la partie chaude du coupleur en aval ou C2. Parfois nous utilisons aussi V_{ch2} pour représenter la même grandeur.

V_3 [mbar] : est le vide de la partie partageant un vide commun entre les parties froides de C1 et C2. Parfois nous utilisons aussi V_{fr} pour représenter la même grandeur.

I_{e1_C1} [mA] : est le courant électronique mesuré en haut de la partie chaude du coupleur en amont ou C1.

I_{e2_C1} [mA] : est le courant électronique mesuré en bas de la partie chaude du coupleur en amont ou C1.

I_{e3_C1} [mA] : est le courant électronique mesuré en haut de la partie froide du coupleur en amont ou C1.

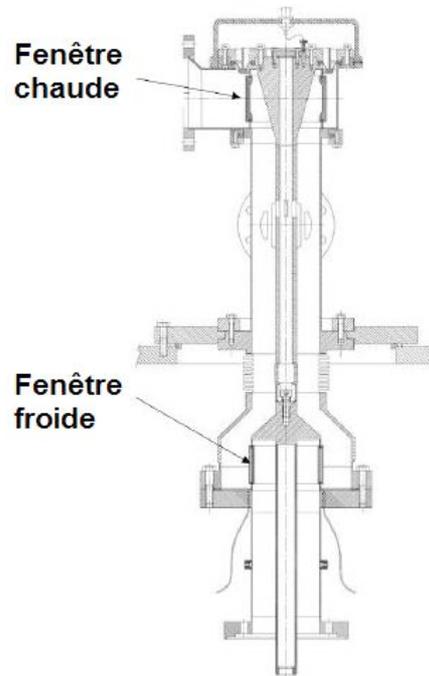
I_{e1_C2} [mA] : est le courant électronique mesuré en haut de la partie chaude du coupleur en aval ou C2.

I_{e2_C2} [mA] : est le courant électronique mesuré en bas de la partie chaude du coupleur en aval ou C2.

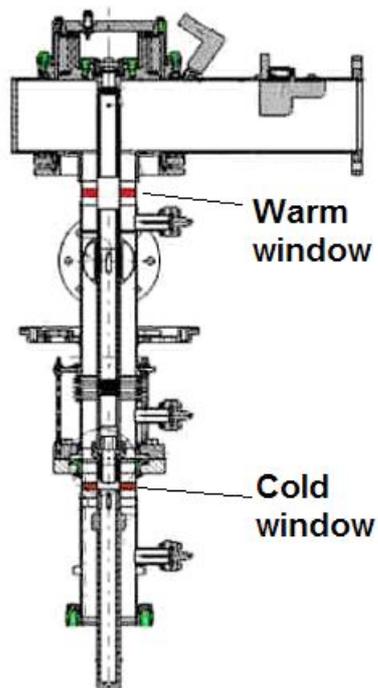
I_{e3_C2} [mA] : est le courant électronique mesuré en haut de la partie froide du coupleur en aval ou C2.

Annexe 3

Coupleur TTF-IV :



Coupleur TW60 :



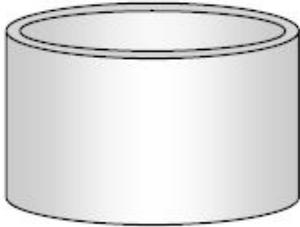
Exemples de géométries de fenêtres pour coupleurs de puissance HF :



**Fenêtre coaxiale
planaire**



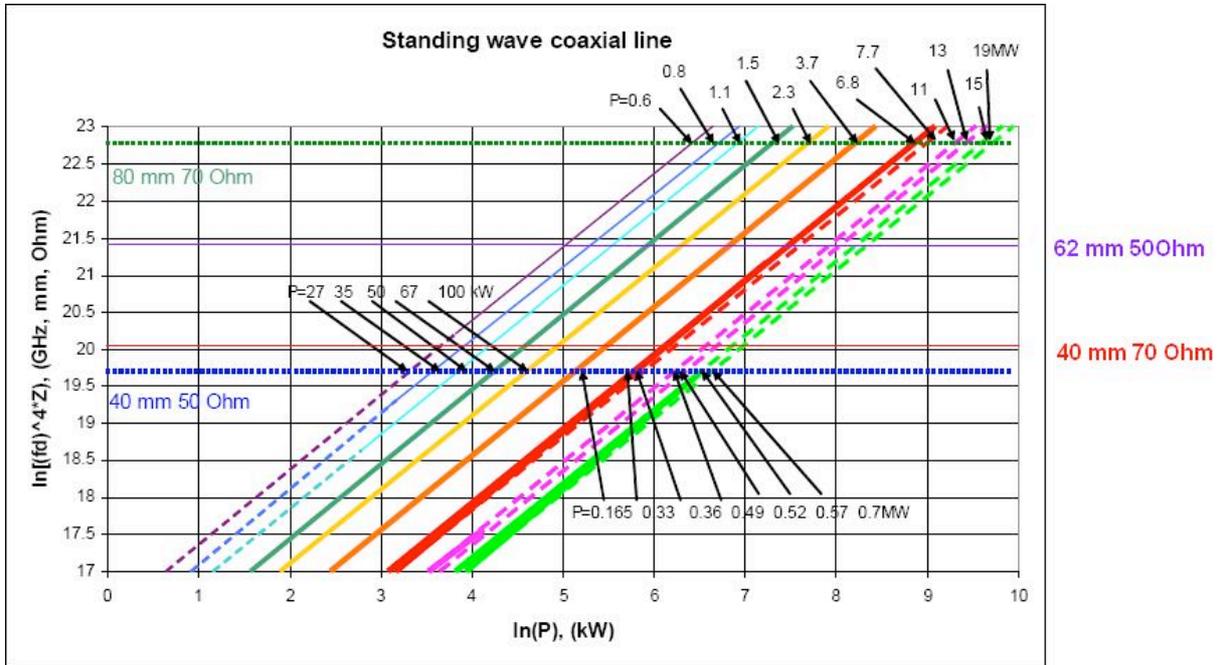
Fenêtre planaire



Fenêtre cylindrique

Annexe 4

Ce graphe permet de déterminer les niveaux de MP dans une ligne coaxiale



Résumé

Des avancées technologiques très importantes ont permis d'augmenter d'une manière drastique les valeurs des champs accélérateurs dans les cavités supraconductrices. Ces dernières sont devenues très attractives et ont été choisies pour des projets d'accélérateurs de grande ampleur tels que le XFEL et le collisionneur du futur ILC. Le temps de conditionnement HF des coupleurs alimentant les cavités supraconductrices et la quête de fiabilité face aux nouvelles contraintes de fonctionnement sont devenus des priorités pour ces projets internationaux.

Etant des composants complexes, les coupleurs TTF-III pour les cavités supraconductrices du projet XFEL ont un comportement difficile à modéliser ou à prévoir. Ainsi, nos travaux étaient principalement expérimentaux. Dans un premier temps, une automatisation complète du stand de test des coupleurs a été effectuée avec succès. Nous avons réussi, suite à cela, à conditionner une série de coupleurs TTF-III. Ces conditionnements ont permis de réaliser une étude sur les comportements des coupleurs pendant leurs conditionnements HF. Des expériences ont donné une estimation de l'effet de l'étuvage in-situ sur le temps de conditionnement. Les tests de certains de ces coupleurs sur cavités ont permis des fonctionnements à des champs de l'ordre de 35 MV/m.

Les études menées sur les coupleurs avaient pour principal objectif de réduire le temps de conditionnement. Ceci représente l'un des enjeux les plus importants pour faire valoir le choix d'un coupleur. Ce but a été réalisé suite à des optimisations apportées sur la procédure de conditionnement. Le temps de conditionnement a été fortement réduit.

Un intérêt particulier a également été donné aux processus de génération des courants électroniques dans les coupleurs, notamment par le multipactor. Des études de simulation de ce processus ont ainsi été effectuées. Son élimination par polarisation du conducteur interne a aussi fait l'objet d'un essai expérimental qui a validé l'efficacité de cette action sur TTF-III.

Les mots clés :

Coupleur de puissance HF, conditionnement, multipactor, supraconductivité, étuvage in-situ.

Abstract

Recent years have seen an impressive improvement in the accelerating gradients obtained in superconducting cavities. Consequently, such cavities have become attractive candidates for large superconducting linear accelerator projects such as the European XFEL and the International Linear Collider (ILC). As a result, there is a strong interest in reducing RF conditioning time and improving the performance of the input power couplers for these cavities.

The so called TTF-III input power coupler, adopted for the XFEL superconducting RF cavities are complex components. In order to better understand the behavior of this component we have performed a series of experiments on a number of such couplers.

Initially, we developed a fully automated RF high power test stand for coupler conditioning procedure. Following this, we performed a series of coupler conditioning tests. This has allowed the study of the coupler behavior during processing. A number of experiments were carried out to evaluate the in-situ baking effect on the conditioning time. Some of the conditioned couplers were sent to DESY in order to be tested on 9-cells TESLA cavities under cryogenic conditions. These tests have shown that the couplers in no way limit the cavity performance, even up to gradients of 35 MV/m.

The main objective of our coupler studies was the reduction of their conditioning time, which represents one of the most important criteria in the choice of coupler for high energy linacs. Excellent progress in reducing the conditioning time has been demonstrated by making appropriate modifications to the conditioning procedure.

Furthermore, special attention was paid to electron generation processes in the couplers, via multipacting. Simulations of this process were made on both the TTF-III coupler and on a new coupler prototype, TTF-V. Experiments aimed at suppressing multipacting were also successfully achieved by using a DC bias on the inner conductor of the co-axial coupler.

Keywords:

RF input power coupler, conditioning, multipacting, superconductivity, in-situ baking.

ACKNOWLEDGMENTS

We acknowledge the support of the European Community-Research Infrastructure Activity under the FP6 “Structuring the European Research Area” programme (CARE, contract number RII3-CT-2003-506395)