



Développement et réalisation d'un klystron à haut-rendement de type kladistron

Antoine Mollard

► To cite this version:

Antoine Mollard. Développement et réalisation d'un klystron à haut-rendement de type kladistron. Physique des accélérateurs [physics.acc-ph]. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLS507 . tel-01763142

HAL Id: tel-01763142

<https://theses.hal.science/tel-01763142>

Submitted on 10 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement et réalisation d'un klystron à haut-rendement de type kladistron

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université Paris-Sud

École doctorale n°576 : particules hadrons énergie et noyau :
instrumentation, image, cosmos et simulation (Pheniics)
Spécialité de doctorat: physique des accélérateurs

Thèse présentée et soutenue à Saclay, le 7 décembre 2017, par

Antoine Mollard

Composition du Jury :

Jean-Marcel Rax Professeur des Universités, École Polytechnique	Président
Jean-Marie De Conto Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes	Rapporteur
Walter Wuensch Principle Scientist, CERN	Rapporteur
Juliette Plouin Ingénieur de Recherche, CEA Saclay	Encadrante CEA
Claude Marchand Ingénieur de Recherche, CEA Saclay	Directeur de thèse
Armel Beunas Ingénieur, Thales Electron Devices	Co-Directeur de thèse
Walid Kaabi Ingénieur de Recherche, CNRS IN2P3	Invité



Titre : Développement et réalisation d'un klystron à haut-rendement de type kladistron

Mots clés : klystron, kladistron, rendement, accélérateur

Résumé : Les klystrons sont des tubes électroniques dans lesquels un ou plusieurs faisceaux d'électrons sont modulés afin de d'amplifier un signal radiofréquence. Pour ce faire, des cavités passives constituant la ligne d'interaction du klystron échangent de l'énergie électromagnétique avec le faisceau. Il en résulte une modification périodique de la vitesse des électrons, qui sont regroupés en paquets. A la fin de la ligne d'interaction, cette énergie est partiellement transmise à un circuit radiofréquence externe. Afin d'améliorer les performances des klystrons et d'augmenter leur rendement énergétique, une nouvelle architecture, inspirée des RFQ (Radio-Frequency Quadrupole), a été proposée. Il s'agit d'utiliser un nombre plus important de cavités, faiblement couplées au faisceau, et permettant la mise en paquets des électrons de façon très progressive et économe en énergie. Dans l'optique de tester cette nouvelle architecture, le point de départ de ce projet a été la modification de la ligne d'interaction d'un klystron existant.

Les éléments d'origines ont été modélisés avec différents programmes de simulation (AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D). Plusieurs architectures ont été ensuite simulées avec ces programmes, afin d'améliorer le rendement énergétique de ce klystron. Une fois que les paramètres électromagnétiques des cavités ont été déterminés, il a été nécessaire de concevoir les pièces constituant cette nouvelle ligne. Le développement de ce nouveau klystron a imposé la création d'un système d'accord des cavités en fréquence, et d'une méthode de titanage, afin d'empêcher la création de phénomène de multipactor. Pour ce faire, deux séries de prototypes ont été conçues, fabriquées et testées. Cette étape a également permis la vérification des méthodes de brasage prévues avec les pièces finales. Les différents éléments de la ligne d'interaction ont été réalisés par un partenaire industriel extérieur au projet. Ces pièces ont été ensuite assemblées à Thales Electron Devices Vélizy, avant que le nouveau klystron soit testé sur un banc dédié.



Title : Development and fabrication of a high-efficiency klystron based on the kladistron principle

Keywords : klystron, kladistron, efficiency, accelerator

Abstract : Klystrons are vacuum tubes that amplifies microwave signals with the modulation of its beam electrons velocities. The electron beam and the klystron cavities exchange electromagnetic energy. This energy exchanges accelerate or decelerate electrons, and create bunches. The electromagnetic energy carried by these bunches is transferred to an external radio-frequency circuit in the last cavity. In the frame of the improvement of klystrons efficiency, a new design inspired by RFQ (Radio-Frequency Quadrupole) had been proposed. With more cavities, poorly-coupled with the beam, the electron bunching is expected to be smoother and more efficient. The purpose of this project was the test of this new design by replacing the interaction line of an existing klystron. This klystron was simulated with several codes such as AJ-Disk, Klys2D and MAGIC2D.

We then used these simulation software to try new designs to improve this klystron efficiency. Once we chose the new cavities electromagnetic properties, we designed the interaction line parts. This klystron development involved the design of a new tuning system for the cavities frequencies, and a new titanium deposition method, in order to prevent multipactor effect. This step needed the design and the fabrication of two series of cavities prototypes to test our new parts and methods. The brazing method was also checked with these cavities. The final interaction line parts were fabricated by a subcontractor, and then assembled and brazed at Thales Electron Devices Vélizy. This new klystron will finally be tested on a dedicated conditioning and testing bench.



À Julien,
À Benoît,
Aux Disparus,

Remerciements

Le travail effectué durant ces trois années a été supervisé par Juliette Plouin, Franck Peauger et Claude Marchand au CEA, Rodolphe Marchesin et Armel Beunas à Thales Electron Devices. Je souhaite remercier mes encadrants pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur ce projet ; je les remercie également pour leur suivi, leurs conseils, et l'expérience qu'ils m'ont transmis. J'aimerais adresser des remerciements très particuliers à Juliette Plouin, pour sa confiance, sa pédagogie, et le travail considérable qu'elle a réalisé au cours de ce projet. Je remercie également Franck Peauger, inventeur du kladistron, pour son aide, son soutien et son travail, notamment lors de la définition de la structure, ainsi que pour ses précieux conseils à chaque étape. Je remercie Claude Marchand d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse ; je le remercie également pour sa disponibilité, sa confiance, ses conseils et son investissement.

Je remercie Jean-Marcel Rax pour avoir accepté d'être président de mon jury de thèse. Je remercie également Jean-Marie De Conto et Walter Wuensch d'avoir accepté d'examiner mon travail et d'en être rapporteurs. Je remercie Walid Kaabi d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je souhaite remercier l'ensemble de mes collègues, au CEA comme à Thales, pour leur aide à chaque étape, leur professionnalisme et leur amitié. Je remercie Enrico Cenni, Lyes Boudjaoui et Guillaume Ferrand pour leur aide quant à l'utilisation des logiciels COMSOL et HFSS. Je remercie Nicolas Misiara, Julien de Almeida Clara, Pierre Manil, Henry Przybilski et l'ensemble du LCAP pour leur accueil, leur travail et leurs conseils ; je les remercie également pour la disponibilité de leur matériel. Je remercie Thibault Hamelin pour son aide et ses conseils quant à l'étude du multipactor et notamment l'utilisation du code MUSICC3D. Je remercie Pol Carbonnier, Didier Braud, Jean-Pierre Charrier et Matthieu Baudrier pour leur aide et pour m'avoir prêté leurs outils lors des tests de nos prototypes. Je remercie également Antoine Dael, Michel Desmons et Guillaume Devanz pour leurs conseils. Je remercie Claire Simon et Nicolas Chauvin pour leur aide quant aux formations que j'ai pu suivre dans le cadre de ma thèse.

Je remercie Karim Haj-Khlifa, Quentin Vuillemin, Jean-François David, Pierre Bernardi, Yoann Ventribout, Flore Molenda, Dorian Bugnot, Yoann Rozier et Alberto Leggieri pour leur aide lors de l'utilisation des codes de simulation de Thales. Je remercie Hervé Lebled, Pascal Wuattier, Edmond Boghossian et Gerald Lietaer pour leur disponibilité et pour les informations relatives au klystron TH2166 qu'ils m'ont transmis. Je remercie également François Legrand pour son aide lors de ce projet.

J'aimerais remercier l'ensemble de l'équipe d'Alice Gallissian pour leur accueil, et notamment Philippe Denis et Jordan Lannes pour leur travail et leurs conseils sur le brasage et le titanage de nos pièces. Je remercie également Alban Renault, Didier Lecomte et Charles Monteiro pour le brasage et le titanage des pièces prototypes et de la ligne finale. Je remercie Jean-Luc Piquet, Pascal Wuattier et David Bariou pour leur aide lors des mesures radiofréquences et des réglages des cavités.

J'adresse des remerciements particuliers à l'équipe de Gaultier Le Brun, et notamment Ali Kadhefi, Omar Hachoum et Pascal Wuattier, pour leur rigueur, leur professionnalisme et leur réactivité lors de l'assemblage, du brasage et de la reprise du kladistron.

Je remercie tous ceux que j'ai rencontré lors de conférences ou de formations au cours de ces trois années et qui m'ont apporté des conseils et des informations qui m'ont permis de mener à bien ce projet.

Je remercie Frédéric Gérardin, Didier Chirpaz-Cerbat, Rémi de Guiran, Louise Napoly, Aline Riquelme, Nicolas Misiara, Robin Cubizolles, Christian Arcambal, Florence Ragon, Norou N'Doye, Romain Carlier, Matthieu Baudrier, Thomas Pugnât, Gabrielle Perreu, Guillaume Dilasser, Wanda Chelli-Cherfa, Jonathan Dumas, Stéphane Berry, Anaïs Bruniquel, Adrien Bouygues, Rémi Braud, Benoît Bolzon, Janic Chambrillon, Julien Avronsart, Thibault Lecrevisse, Karim Haj-Khlifa, Yoann Rozier, Quentin Vuillemin, Jordan Lannes, Alban Renault, Thibault Hamelin, Alice Sutra Fourcade, Matthieu Valette, Aurore Dumanic, Emeline Giner Demange, Lyes Boudjaoui, Thomas Plaisant, Thomas Proslie, collègues et amis qui m'ont permis de passer trois années de thèse inoubliables.

Je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien durant ces années ; je remercie également mon père pour les corrections orthographiques. Je remercie mes parents, mes sœurs et mes professeurs, qui m'ont aidé et encouragé durant l'ensemble de mes études et qui m'ont permis de parvenir jusqu'au doctorat.

Enfin, je remercie Véronique pour m'avoir donné la force de réaliser cette thèse, et pour son soutien dans tout ce que j'entreprends depuis presque dix ans.

Table des matières

Introduction	1
1 Vers les klystrons haut rendement	7
1.1 Le klystron	8
1.1.1 Interaction faisceau-cavité et paramètres des cavités du klystron	8
1.1.2 Pertes dans un klystron et rendement	15
1.1.3 Le phénomène de multipactor	19
1.2 État de l’art des klystrons haut-rendement	22
1.2.1 Les klystrons à collecteur déprimé et les klystrons à faisceaux multiples	22
1.2.2 L’optimisation des bunchs	23
1.3 Le projet kladistron	26
1.3.1 Le RFQ (Radio-Frequency Quadrupole)	26
1.3.2 Une interaction faisceau-cavité quasi-adiabatique	26
1.3.3 Le kladistron	26
1.3.4 Le choix du klystron TH2166	27
1.4 Conclusion du chapitre	28
2 Design du kladistron	29
2.1 Les codes de simulation de klystron	30
2.1.1 AJ-Disk	30
2.1.2 Klys2D	33
2.1.3 MAGIC2D	37
2.1.4 Le champ magnétique et le faisceau d’électrons dans les codes de si- mulation	39
2.2 Tests et comparaison des codes d’interaction dans le cas du klystron TH2166	40
2.2.1 Régime permanent du klystron TH2166	40
2.2.2 Régime transitoire du klystron TH2166	43
2.3 Conception de la ligne d’interaction du kladistron TH2166	44
2.3.1 Choix des paramètres électromagnétiques des cavités	45
2.3.2 Ajustement des fréquences des cavités et des longueurs des glissements de la ligne	51
2.3.3 Choix de la géométrie des cavités	52
2.4 Solutions technologiques nécessaires au développement du kladistron	56
2.4.1 Tolérances géométriques et nécessité de systèmes d’accord précis	56
2.4.2 Multipactor, titanage et changement de géométrie des cavités	61
2.5 Conclusion du chapitre	64

3	Réalisation technique de la ligne d'interaction	65
3.1	Prototypes de cavités	66
3.1.1	Mesures radiofréquences	66
3.1.2	Validation des systèmes d'accord	69
3.1.3	Validation de la méthode de brasage	75
3.1.4	Validation de la méthode de titanage	76
3.1.5	Validation de la méthode de réglage par tapotage des becs	84
3.2	La ligne d'interaction finale	86
3.2.1	Intégration de la ligne d'interaction	86
3.2.2	Réalisation des pièces	89
3.2.3	Gamme de fabrication du kladistron	90
3.3	Conclusion du chapitre	94
4	Test du kladistron TH2166	95
4.1	Protocole de conditionnement et de test des klystrons	96
4.1.1	Le banc de test du klystron TH2166 : la station TV	96
4.1.2	Conditionnement du klystron	98
4.2	Résultats des tests du klystron TH2166	100
4.3	Conditionnement et tests du kladistron TH2166	102
	Conclusion	103
	Bibliographie	107
A	Données de calculs utilisées lors des simulations de kladistron	111
B	Étude de l'influence des tolérances de fabrication sur la fréquence des cavités	115

Table des figures

1	Domaines d'application des klystrons[1]	2
2	Schéma de principe du klystron[2]	3
3	Schéma de principe du banc de test XBOX3[3]	4
4	Validation de notre nouvelle architecture de klystron - changement de la ligne d'interaction	5
1.1	Modulation des vitesses des électrons à leur passage au voisinage de la cavité d'entrée d'un klystron en fonction de la phase de l'onde (en haut) et mise en paquets dans le tube de glissement suivant (en bas)	9
1.2	Représentation en trois dimensions de la mise en paquets des électrons dans un klystron ; l'intensité du faisceau, proportionnelle à la densité de charges, est représentée en fonction de la position le long de l'axe du faisceau et du temps[4]	10
1.3	Coupe longitudinale d'une cavité de klystron	11
1.4	Schéma électrique équivalent d'une cavité de klystron[5]	13
1.5	Schéma électrique parallèle équivalent[5]	13
1.6	Loi empirique liant le rendement d'interaction et la pervéance des klystrons[6] ; les longueur d'ondes des klystrons sont exprimées en centimètres	16
1.7	Phases des électrons en fonction de leur position dans le long de la ligne d'interaction, courant faisceau associé (première et deuxième harmoniques) et dispersion des vitesses des électrons ; cas d'un faisceau bunched à l'entrée de la cavité de sortie et d'un faisceau débunché lors de son passage devant le gap de la 14 ^{ème} cavité ; simulations AJ-Disk	19
1.8	Coefficient d'émission secondaire en fonction de l'énergie de collision de l'électron primaire pour du cuivre[7]	20
1.9	Coefficient d'émission secondaire en fonction de l'énergie de collision de l'électron primaire pour différents matériaux (cuivre, niobium et titane)[7]	21
1.10	Phase des électrons en fonction de leur position le long de l'espace d'interaction (résultat de simulation AJ-Disk pour un klystron appliquant la méthode COM) ; en bleu sont tracés les phases des électrons ; les lignes verticales rouges et mauves correspondent aux positions des cavités[8]	24
1.11	Phase des électrons en fonction de leur position le long de l'espace d'interaction (résultat de simulation AJ-Disk pour un klystron appliquant la méthode BAC) ; en bleu sont tracés les phases des électrons ; les lignes verticales rouges et mauves correspondent aux positions des cavités[8]	25

1.12	Phase des électrons en fonction de leur position le long de l'espace d'interaction (résultat de simulation AJ-Disk pour un klystron appliquant la méthode CSM); en bleu sont tracés les phases des électrons; les signes "+" et "-" correspondent aux phases pour lesquelles le champ électrique dans les gaps des cavités atteint ses valeurs extrémales; les gaps sont indiqués par les lignes verticales mauves[9]	25
1.13	Résultats de calcul AJ-Disk - cas d'un kladistron à 20 cavités; de haut en bas : le diagramme d'Applegate, le courant du faisceau (première et deuxième harmoniques) et la dispersion des vitesses des électrons[10]	27
2.1	Modélisation du faisceau d'électrons dans AJ-Disk	30
2.2	Algorithme du programme AJ-Disk	31
2.3	Résultats de calculs du programme AJ-Disk	33
2.4	Modélisation de l'espace d'interaction dans Klys2D[11]	34
2.5	Algorithme de Klys2D[11]	36
2.6	Ordre des calculs de MAGIC2D[12]	38
2.7	Champ magnétique réel selon l'axe faisceau du klystron TH2166	39
2.8	Rendement du klystron TH2166 en fonction de la puissance d'entrée (échelle logarithmique) - Mesures expérimentales et simulations	41
2.9	Faisceau d'électrons le long de la ligne d'interaction du klystron TH2166 - Simulations Klys2D (en haut) et MAGIC2D (en bas), configuration 3	42
2.10	Courants faisceau de première harmonique - résultats de simulations AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D, en configuration 1 et 3	43
2.11	Puissance de sortie du klystron TH2166 en fonction du temps, dans les configurations 1 et 3 - simulations MAGIC2D	44
2.12	Faisceau d'électrons dans la ligne d'interaction du kladistron - Simulations Klys2D et MAGIC2D, configuration 3	46
2.13	Puissance de sortie en fonction du temps - faisceau d'électrons dans un glissement de kladistron; design préliminaire à 19 cavités, non retenu - Simulation MAGIC2D	47
2.14	Puissance de sortie en fonction du temps; design définitif du kladistron - simulation MAGIC2D	48
2.15	Modulation du courant de première harmonique du faisceau le long de la ligne d'interaction, à saturation; résultats de simulation AJ-Disk et Klys2D	49
2.16	Dispersion des vitesses des macrocharges le long de la ligne d'interaction; les vitesses négatives (cercle orange) concernent les électrons réfléchis; design provisoire de la ligne d'interaction - Simulation Klys2D	50
2.17	Rendements de différentes architectures de kladistron en fonction de la puissance d'entrée - résultats de calculs AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D, dans les configurations 1 et 3	50
2.18	Principaux paramètres géométriques des cavités de klystron	52
2.19	Zones capacitive et inductive des cavités de klystron - exemple avec une cavité du klystron TH2166	53
2.20	Forme des cavités "type 2" - Calcul COMSOL	54
2.21	Forme des cavités "type 3" et paramètres géométriques - Calcul COMSOL	55
2.22	Vue en coupe de la ligne d'interaction; les cavités de type 1 correspondent aux cavités du klystron TH2166 - représentation obtenue avec MAGIC2D	55

TABLE DES FIGURES

2.23	Décalage du rendement du kladistron en fonction du décalage en fréquence des cavités. Résultats de simulations Klys2D avec un faisceau généré par Optic2D et les valeurs mesurées du champ magnétique	56
2.24	Champ électrique dans les cavités type 2 et 3 du kladistron - Résultats COMSOL	57
2.25	Champ magnétique dans les cavités type 2 et 3 du kladistron - Résultats COMSOL	58
2.26	Fréquences, en gigahertz, des cavités de type 2 et 3 en fonction de leur rayon R_{cavh} , en millimètres - résultats de calculs COMSOL	59
2.27	Système d'accord des cavités CLIC	60
2.28	Système d'accord des cavités du kladistron	60
2.29	Charges extraites dans le gap d'une cavité du klystron TH2166 en fonction de la valeur du champ électrique - Résultats MUSICC3D	61
2.30	Forme des cavités monobecs "type 2" - Calcul COMSOL	62
2.31	Charges générées dans le gap des cavités bibecs et monobecs du kladistron, avec et sans dépôt de titane en fonction de la valeur du champ électrique - Résultats MUSICC3D	63
2.32	Vue en coupe de la lignes d'interaction du kladistron ; les pièces originelles sont représentées en bleu, les pièce modifiées en rouge et les nouvelles pièces créées au cours de ce projet sont en noir	64
3.1	Mesure des paramètres des cavités prototypes	66
3.2	Mesure en réflexion S_{11} de la fréquence de résonance de la cavité prototype "type 2"	68
3.3	Mesure en transmission S_{21} de la fréquence de résonance et de la bande passante de la cavité prototype "type 2"	69
3.4	Cavité prototype "type 2"	70
3.5	Cavité prototype "type 3"	70
3.6	Décalage de la fréquence de la cavité en fonction du nombre de tours du "piston" du système d'accord n° 3 - pion en Cupronickel brasé	72
3.7	Décalage de la fréquence de la cavité en fonction du nombre de tours du "piston" du système d'accord n° 4 - pion en Cupronickel brasé	73
3.8	Décalage de la fréquence de la cavité en fonction du nombre de tours du "piston" du système d'accord n° 1 avec un seul palier en bronze - pion en Cupronickel brasé	74
3.9	Pièce prototype "concave" (MB) de la deuxième série	77
3.10	Pièce prototype "à titaner" (Ti) de la deuxième série	77
3.11	Directions des mesures de l'épaisseur des pièces Ti titanées (hydrure de titane)	78
3.12	Résultats de mesures des fréquences des cavités Ti_2MB_2 et Ti_3MB_3	79
3.13	Disque de titane usiné	80
3.14	Diagramme de phase cuivre-titane[13] ; le point eutectique cuivre-titane est indiqué en orange	81
3.15	Pièce prototype Ti_6 de la deuxième série titanée (feuille de titane diffusée) .	81
3.16	Résultats des mesures de fréquence des cavités Ti_1MB_1 et Ti_6MB_6 avant et après titanage	82
3.17	Surface tracée en interpolant les résultats de mesure d'épaisseur de la pièce Ti_1 titanée (Matlab)	83
3.18	Schéma de principe d'installation du cylindre de support pour titanage . . .	83
3.19	Pièce Ti_1 titanée et reprise	84
3.20	Schéma de principe du tapotage des bcs des cavités	85

3.21	Schéma de principe du tapotage des becs des cavités	86
3.22	Vue en coupe des lignes d'interaction du klystron TH2166 et du kladistron - simulation COMSOL	87
3.23	Modifications effectuées sur la cavité d'entrée	87
3.24	Modifications effectuées sur la cavité de sortie	88
3.25	Pièce "glissement 15-16" permettant d'adapter la cavité de sortie à notre architecture	89
3.26	Pièce de la ligne d'interaction usinée par VDL - face "concave" à gauche et "à titaner" à droite	89
3.27	Extrait des contrôles dimensionnels effectués sur les pièces usinées - profil d'une face "concave" de cavité	90
3.28	Titanage des pièces et brasage des pions des systèmes d'accord	91
3.29	Assemblage du sous-ensemble constitué de l'anode et de la masse polaire, de la cavité d'entrée, de la couronne d'adaptation du circuit de refroidissement et de la cavité 2, ou sous-ensemble "anode" - extrait de la gamme d'assemblage.	92
4.1	Klystron TH2166 en cours de conditionnement sur le banc "station TV"[14]	96
4.2	Schéma de principe des commandes et capteurs de puissance électrique du banc "station TV"	97
4.3	Courbes du courant cathode et le courant dans le corps du tube en fonction de la tension de la cathode; conditionnement d'un klystron TH2166 (2003)[14]	99
4.4	Mesure de la puissance de sortie radiofréquence d'un klystron TH2166 en fonction de la puissance d'entrée, pour différentes valeurs de tension cathode (2003)[14]	100
4.5	Rendements de klystrons TH2166, obtenus avec les mesures expérimentales des puissances de sortie, en fonction de la puissance d'entrée, entre 2003 et 2007	101
A.1	Rendements des principales architectures de kladistron simulées en fonction de la puissance d'entrée - résultats de calculs AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D, dans les configurations 1, 2 et 3	112
B.1	Décalage en fréquence des cavités type 2 et type 3 en fonction de l'écart des cotes par rapport à leurs valeurs nominales - Résultats de simulations COMSOL	115

Liste des tableaux

2.1	Faisceaux et champs magnétiques utilisés lors de nos simulations	39
2.2	Fréquence d'une des cavités du kladistron en fonction de la distance entre deux cavités consécutives - résultats de calculs COMSOL	45
2.3	Paramètres électromagnétiques de la ligne d'interaction finale du kladistron .	52
3.1	Mesures de fréquences et de facteurs de qualité avant brasage	71
3.2	Pentes (décalage en fréquence en mégahertz par tour de piston effectué) des différents segments des Figures 3.6, 3.7 et 3.8	74
3.3	Mesures de fréquences et de facteurs de qualité après brasage	76
3.4	Paramètres des cavités prototypes de la deuxième série : résultats de calculs COMSOL	78
A.1	Faisceaux et champs magnétiques utilisés lors de nos simulations	111
A.2	Longueurs de glissement, en millimètres, entre le milieu du gap de la cavité considérée et le milieu du gap de la cavité précédente ; valeurs utilisées dans les calculs d'interaction	111
A.3	Fréquences, en mégahertz, des cavités utilisées dans nos calculs d'interaction	112
A.4	Paramètres des configurations utilisées dans nos calculs d'interaction	113

Introduction

Le cadre du projet de thèse

Cette thèse est un projet de développement scientifique et technique entre le Département des Accélérateurs, Cryogénie et Magnétisme du CEA et l'entreprise Thales Electron Devices, dans le cadre de la collaboration européenne Eucard-2. L'objectif général est de mettre en œuvre une nouvelle architecture de klystron à haut-rendement en bande X (12GHz), utilisable par le projet CLIC au Cern, et de valider expérimentalement son principe de fonctionnement par un prototype à 5GHz dérivé du klystron TH2166 de Thales.

Le principe du klystron

Le klystron est un amplificateur radiofréquence de forte puissance. Un faisceau d'électrons, dont les vitesses sont modulées dans un tube à vide afin de former des paquets, transporte et amplifie le signal radiofréquence. Ces tubes électroniques ont été développés à partir de 1937 par W. Hansen et Russell et Sigurd Varian bien que la modulation des vitesses des électrons et leur mise en paquets aient été théorisées en 1932 et mises en application pour la production de signal radiofréquence en 1935 par D. A. Rozhansky, Agnessa Arsenjeva et Oskar Heil[15]. La cavité résonatrice de W. Hansen, qui a été utilisée dans le premier klystron, a été développée dans le cadre d'un projet de spectroscopie à rayons X ; mais le premier tube des frères Varian servit d'abord comme transmetteur haute fréquence afin de permettre aux avions de se poser uniquement grâce aux instruments embarqués (et donc sans aucune visibilité). C'est à cette époque que le nom du klystron fut choisi en référence au mot grec « $\kappa\lambda\upsilon\zeta\omega$ », associé aux vagues s'échouant sur le rivage. La division tubes électroniques de l'entreprise « Varian Associates » devint en 1996 CPI (Communications and Power Industries). Durant la deuxième guerre mondiale, le développement des klystrons et des magnétrons permit la mise au point du radar en bande S embarqué, qui fut une technologie clé de ce conflit. Le manque de bobines de focalisation adéquates empêcha toutefois à cette époque son utilisation pour la communication[15].

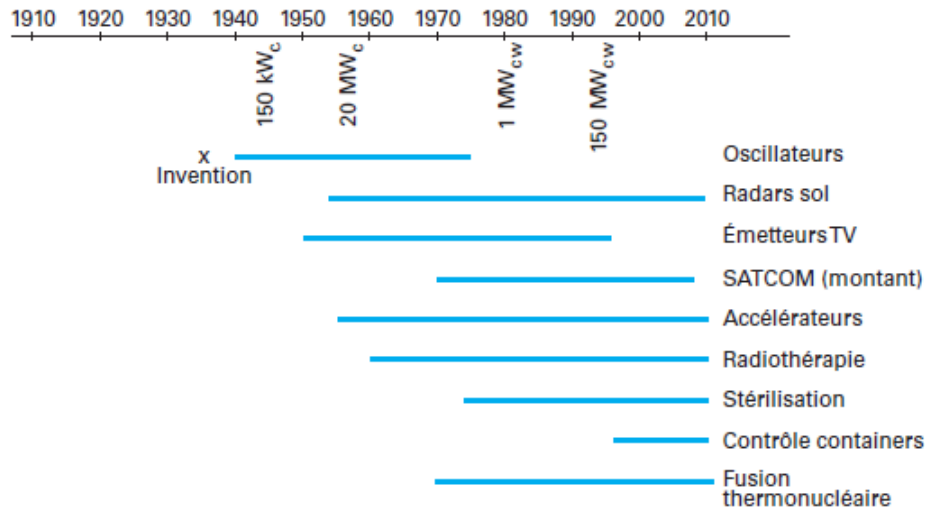


FIGURE 1 – Domaines d'application des klystrons[1]

Les klystrons devinrent après la seconde guerre mondiale les amplificateurs privilégiés pour les radars et la communication TV, VHF et UHF (voir Figure 1). Le champ d'applications des klystrons s'est élargi aux domaines de la communication spatiale, de la fusion nucléaire et des accélérateurs de particules.

Les klystrons travaillent dans une gamme de fréquences allant de la partie inférieure des UHF (Ultra Hautes Fréquences), c'est-à-dire environ 200MHz, jusqu'à la bande W, soit environ 100GHz. La puissance crête, limitée par le risque de claquage RF, et donc par la durée des impulsions, peut atteindre 150MW dans les tubes en bande S. La puissance moyenne, limitée par l'efficacité des systèmes de refroidissement, peut atteindre 1MW en bande X (c'est à dire entre 8GHz et 12GHz). Le gain d'un klystron peut atteindre 60dB et le rendement 70%.

Un klystron est composé d'un canon à électrons, d'une bobine de focalisation, d'un espace d'interaction relié à ses extrémités aux antennes d'entrée et de sortie, et d'un collecteur (voir Figure 2). L'ensemble est maintenu à une pression très basse (environ 10^{-6} Pa) par la pompe ionique. Le canon, composé d'une cathode et d'une anode, crée un faisceau d'électrons confiné par le champ magnétique généré par la bobine. Les électrons transitent par la ligne d'interaction avant d'être récupérés par le collecteur[16, 17]. L'onde radiofréquence à amplifier excite le mode de résonance transverse magnétique TM₀₁₀ de la première cavité au moyen d'une antenne. Selon sa phase, le champ électrique longitudinal va accélérer ou ralentir les électrons du faisceau lors de leur passage en regard de la première cavité. L'interaction entre les électrons et les cavités de la ligne d'interaction permettent la modulation de leurs vitesses et leur mise en paquets (ou «bunching»). L'énergie cinétique des électrons mis en paquets est partiellement rayonnée sous forme d'une onde électromagnétique dans la cavité de sortie. Cette onde amplifiée est ensuite transmise grâce à un guide d'ondes et les électrons ralentis sont stoppés dans le collecteur.

Par convention, l'axe du klystron sera par la suite noté $\vec{z}$ dans un repère cylindrique $(0, \vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$.

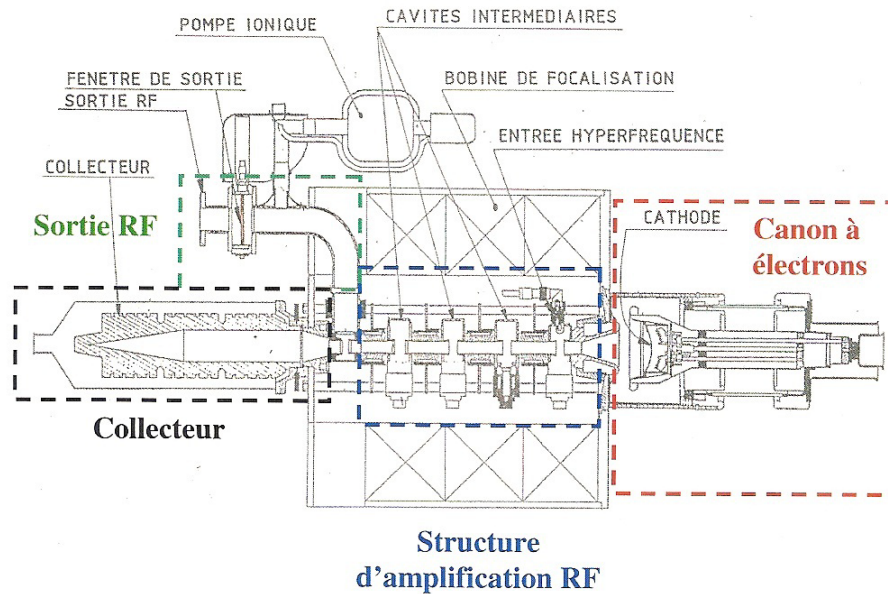


FIGURE 2 – Schéma de principe du klystron[2]

Le projet CLIC et les klystrons haut-rendement

Le projet CLIC (Compact Linear Collider) et CTF-3 (CLIC Test Facility)

Le projet d'accélérateur CLIC du Cern[18] a pour objectif la réalisation d'un accélérateur linéaire d'une énergie de 3TeV pour l'étude de l'interaction électron-positron ; cet accélérateur comprend une ligne principale d'une longueur totale de 50km, pourvue de plusieurs centaines de milliers de cavités radiofréquence. Ces cavités, d'une fréquence de 12GHz, sont alimentées en puissance radiofréquence par une ligne accélératrice secondaire pourvue de cavités résonnantes à une fréquence d'un gigahertz.

Afin de garantir le fonctionnement optimal de l'accélérateur CLIC, les cavités de sa ligne principale sont conditionnées ("rodées") au CLIC Test Facility 3 (CTF-3), au Cern[10]. Ce laboratoire comprend des bancs de test dédiés, composés de modulateurs, de klystrons de haute puissance et de guides d'onde ; le banc de test des cavités CLIC, XBOX3, est composé de 4 modulateurs de puissance radiofréquence alimentant chacun un klystron (voir Figure 3) ; ces sources de puissance envoient des pulsations d'une amplitude de 6MW et d'une durée de $4\mu s$, à une fréquence de répétition de 400Hz. La puissance RF est ensuite acheminée au moyen de guides d'onde à un compresseur de pulsations radiofréquences. En utilisant la modulation de phase et la commutation des circuits RF, les 4 bancs de tests des cavités reçoivent des pulsations d'une amplitude de 80MW et d'une durée de 300ns, à une fréquence de 100Hz. Les cavités sont exposées à ces ondes radiofréquences de haute puissance, à la fréquence propre des cavités, durant plusieurs cycles.

Le besoin de klystrons haut-rendement

Les klystrons délivrent une puissance radiofréquence pulsée de 6MW en crête et 100kW en moyenne, avec un rendement d'environ 47,5%. La puissance électrique nécessaire est donc d'environ 200kW en continu avec des pics à 12MW. En admettant que chaque cycle de conditionnement exige plusieurs heures et que 2 cavités peuvent être testées simultanément, la puissance électrique nécessaire reste de l'ordre du térawatt-heure. Ainsi, un rendement supérieur de seulement 10 points permettrait l'économie de plusieurs centaines de mégawatt-heure.

Dans le cadre de la collaboration internationale Eucard-2[10], il a été proposé de remplacer les klystrons du banc XBOX3 par des klystrons plus performants, compatibles avec les modulateurs existants. Ces tubes doivent produire des pulsations RF d'une amplitude de 10 à 12MW et d'une durée de $4,5\mu\text{s}$, à une fréquence de répétition minimale de 400Hz ; une étape de développement ultérieure devrait permettre d'augmenter cette fréquence jusqu'à 1kHz. Le principal défi technologique de ce projet est cependant l'augmentation du rendement, de 47,5% actuellement à un objectif de 70%.

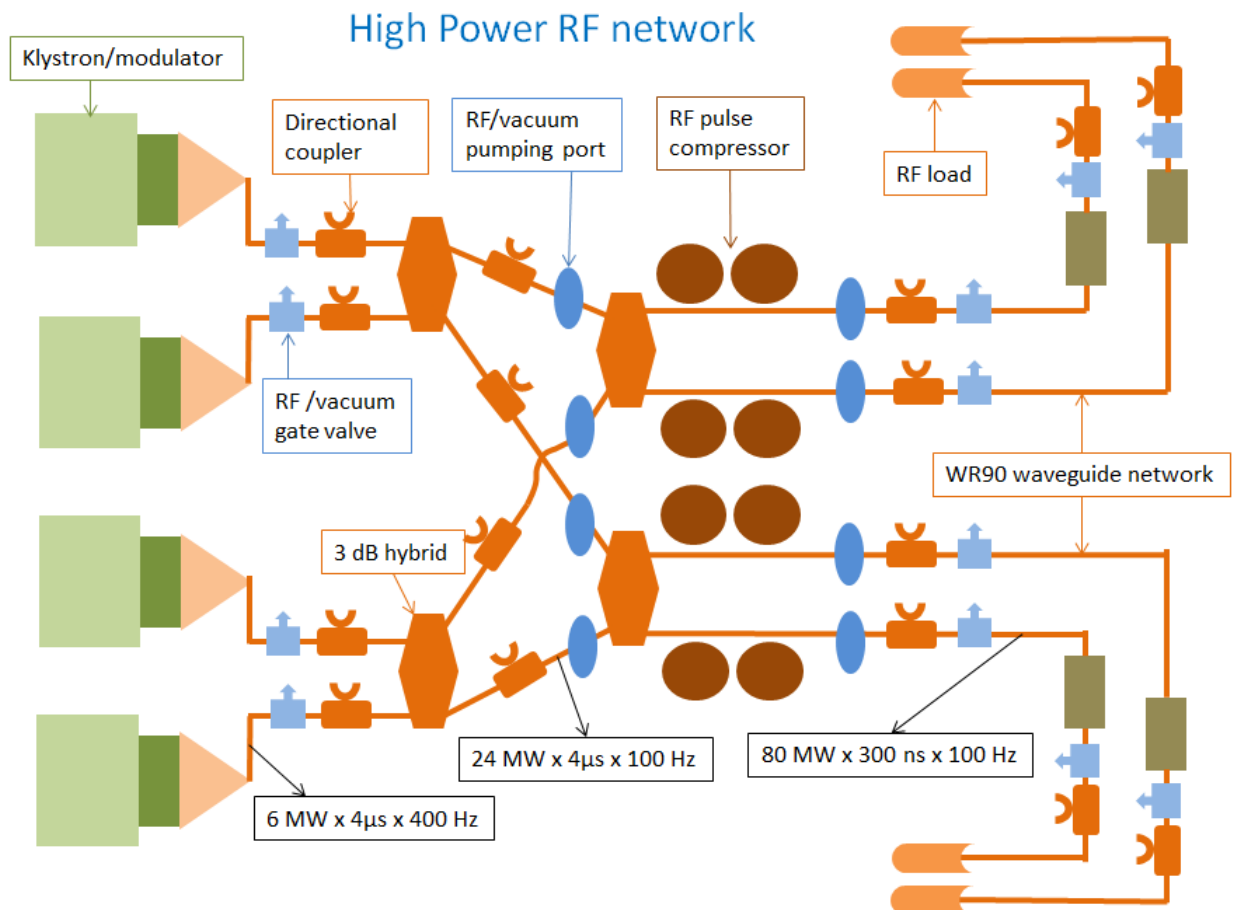


FIGURE 3 – Schéma de principe du banc de test XBOX3[3]

Le projet de thèse

Les objectifs de la thèse

Ce projet a pour but premier de développer un nouveau type de klystron à haut-rendement. Dans le cadre du partenariat entre Thales et le CEA, j'ai d'abord travaillé à l'amélioration d'un klystron existant en changeant sa ligne d'interaction. Ce klystron conserve donc sa bobine de focalisation, son canon à électrons et son collecteur, ainsi que les cavités d'entrée et de sortie (en mauve sur la Figure 4). La conception de ce prototype a dû ainsi respecter des contraintes supplémentaires liées à l'architecture d'origine : la longueur totale de la ligne d'interaction, le champ magnétique et le faisceau sont donc identiques au tube d'origine.

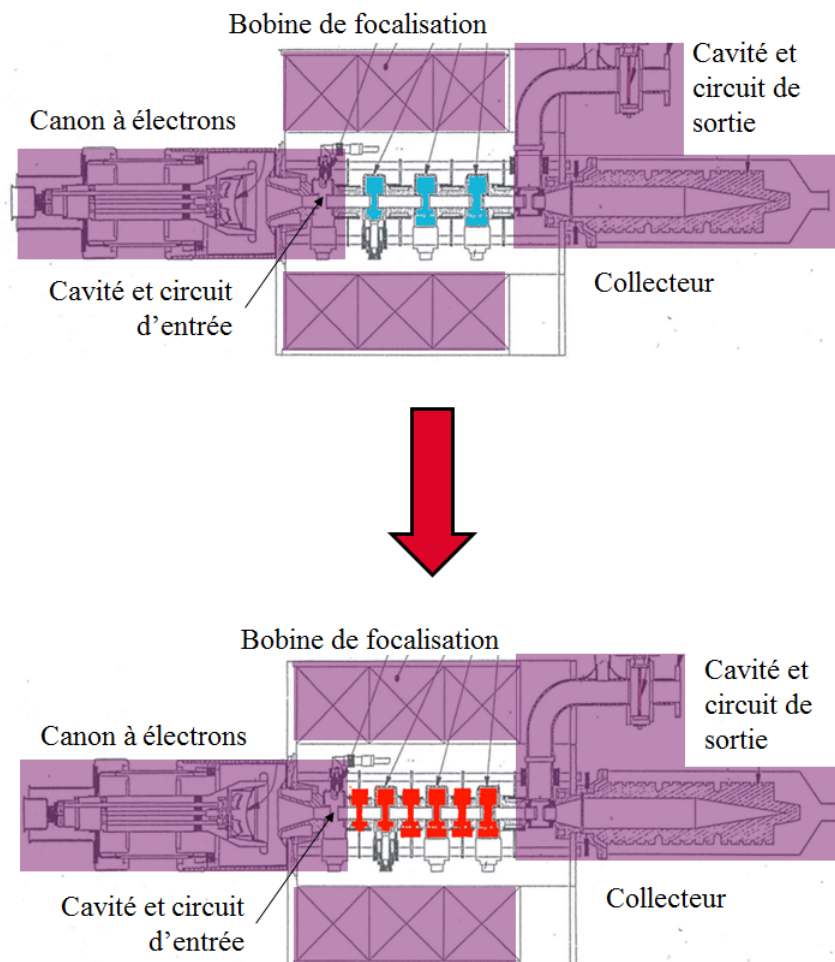


FIGURE 4 – Validation de notre nouvelle architecture de klystron - changement de la ligne d'interaction

Ce travail a donc nécessité de concevoir, d'assembler, d'intégrer et de tester une nouvelle ligne d'interaction pour un klystron de Thales.

Les simulations avec des codes de calculs m'ont permis d'obtenir d'abord des paramètres électromagnétiques adéquats puis la géométrie correspondante des cavités. Les simulations de phénomènes de multipactor ont complété cette première étape.

Les méthodes de fabrication et de réglage de la ligne d'interaction ont nécessité la conception, la réalisation et le test de pièces d'essais. Ces expériences m'ont permis d'achever le travail de conception de la ligne et de commencer la fabrication des pièces. Ces pièces ont été assemblées et intégrées au tube d'origine. Le conditionnement et les tests de cette nouvelle architecture ont enfin pu être effectués.

Le plan de la thèse

Nous verrons dans le premier chapitre les paramètres du klystron, le rendement d'interaction et les méthodes d'amélioration de la dynamique du faisceau d'électrons. Nous présenterons notamment les modélisations courantes de l'interaction faisceau/cavités, le bunching des électrons, les pertes d'énergie dans un tube électronique et le phénomène de multipactor ; puis nous aborderont les pistes de développement des klystrons à haut-rendement, comme les méthodes COM, BAC et CSM ; enfin nous montrerons l'architecture du klystron haut-rendement que nous avons mis en œuvre dans le cadre de ce projet.

Nous présenterons dans le deuxième chapitre les différentes étapes de conception des pièces de ce klystron ; nous commencerons par comparer les trois codes d'interaction qui m'ont permis de définir les paramètres de ce tube, avec l'exemple d'un klystron de Thales, puis nous verrons les règles de conception et leur application à ce projet ; ces méthodes concernent notamment le bunching des électrons, la variation du courant de modulation du faisceau le long de la ligne d'interaction et le régime transitoire du klystron. Nous détaillerons également la démarche de développement technologique qui accompagne ce projet, notamment le développement de méthodes de titanage pour prévenir le phénomène de multipactor ; et la conception d'un système d'accord pour assurer que les cavités finales soient réglables en fréquence.

Dans le chapitre 3, nous décrirons les étapes de validation de notre design de klystron, avec le test de pièces prototypes, puis la fabrication du nouveau klystron en tant que tel. Nous présenterons les véhicules test permettant les essais des systèmes d'accord en fréquence, les essais de titanage et de brasage ainsi que les résultats obtenus ; ensuite nous décrirons les étapes de fabrication, de titanage, d'assemblage et de brasage des cavités.

Enfin nous présenterons les tests de notre nouveau tube électronique sur le banc dédié ; nous verrons les différentes étapes de conditionnement et les essais en régime nominal.

Chapitre 1

Vers les klystrons haut rendement

Dans ce chapitre nous présenterons le principe du klystron et les méthodes d'amélioration du rendement. Dans une première partie seront abordés le klystron et ses paramètres, les phénomènes électromagnétiques impliqués et les échanges d'énergie associées. Nous nous intéresserons ensuite à quelques uns des klystrons à haut-rendement en développement, tels que les klystrons employant la méthode BAC (Bunch-Align-Compress) ou COM (Core Oscillation Method), et les klystrons multi-faisceaux. La dernière partie sera consacrée au principe du kladistron, ou klystron adiabatique.

1.1 Le klystron

1.1.1 Interaction faisceau-cavité et paramètres des cavités du klystron

Le faisceau d'électrons

Le canon d'un klystron est constitué d'une cathode entourée d'un wehnelt, placés en vis-à-vis d'une anode reliée en son centre à l'espace d'interaction. L'anode est maintenue à un potentiel nul et la cathode au potentiel désiré pour le faisceau, noté $V_{cathode}$. Le chauffage de la cathode permet aux électrons de son matériau constitutif d'être libérés (émission thermoïonique). Le champ électrique généré entre la cathode et l'anode accélère les électrons. La forme de la cathode et du wehnelt permettent de définir la forme et le diamètre du faisceau. La densité de courant est reliée à la température de la cathode par la loi de Richardson :

$$J = A_G T^2 e^{\frac{-W}{kT}} \quad (1.1)$$

avec :

- J la densité de courant émis ($A.m^{-2}$)
- A_G une constante dépendant du matériau de la cathode ($A.m^{-2}.K^{-2}$)
- T la température de la cathode (K)
- W le travail de sortie du métal (eV)
- k la constante de Boltzmann $\sim 1,381.10^{-23}.m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}$

Le faisceau d'électrons ainsi formé est caractérisé par sa pervéance (ou micropervéance), qui relie le potentiel de la cathode et le courant faisceau par la loi de Child-Langmuir[1] :

$$P = \frac{I_{faisceau}}{V_{cathode}^{\frac{3}{2}}} \quad (1.2)$$

La focalisation du faisceau

Les bobines de focalisation, réparties entre le canon à électrons et le collecteur, génèrent un champ magnétique assurant le confinement des charges en un faisceau de diamètre contrôlé. Afin de maintenir la forme cylindrique du faisceau, le champ magnétique doit avoir une valeur minimale égale au champ de Brillouin[19, 20] :

$$B_0 = \sqrt{\frac{\sqrt{2} I_{faisceau}}{\epsilon_0 \pi b^2 \eta^{\frac{3}{2}} \sqrt{V_{cathode}}}} \quad (1.3)$$

avec :

- ϵ_0 la permittivité du vide $\sim 8,854.10^{-12} m^{-3}.kg^{-1}.s^4.A^2$
- b le rayon du faisceau (m)
- η le rapport de la charge sur la masse d'un électron $\eta = \frac{q_e}{m} \sim 1,758.10^{11} C.kg^{-1}$

Dans la pratique, le champ magnétique le long de l'espace d'interaction est deux à trois fois supérieur au champ de Brillouin, afin de compenser les défauts du système qui nuisent à la focalisation du faisceau d'électrons[1].

Le bunching des électrons

La première cavité de l'espace d'interaction, ou cavité d'entrée, est pourvue d'une antenne émettant un signal de faible amplitude à la fréquence du klystron. Au passage des électrons au niveau du gap de la première cavité, le champ électrique axial variable $\vec{E}_z$, exerçant une force $\vec{F} = -e\vec{E}_z$ va accélérer ou décélérer les charges, selon la phase de l'onde à cet instant (voir Figure 1.1).

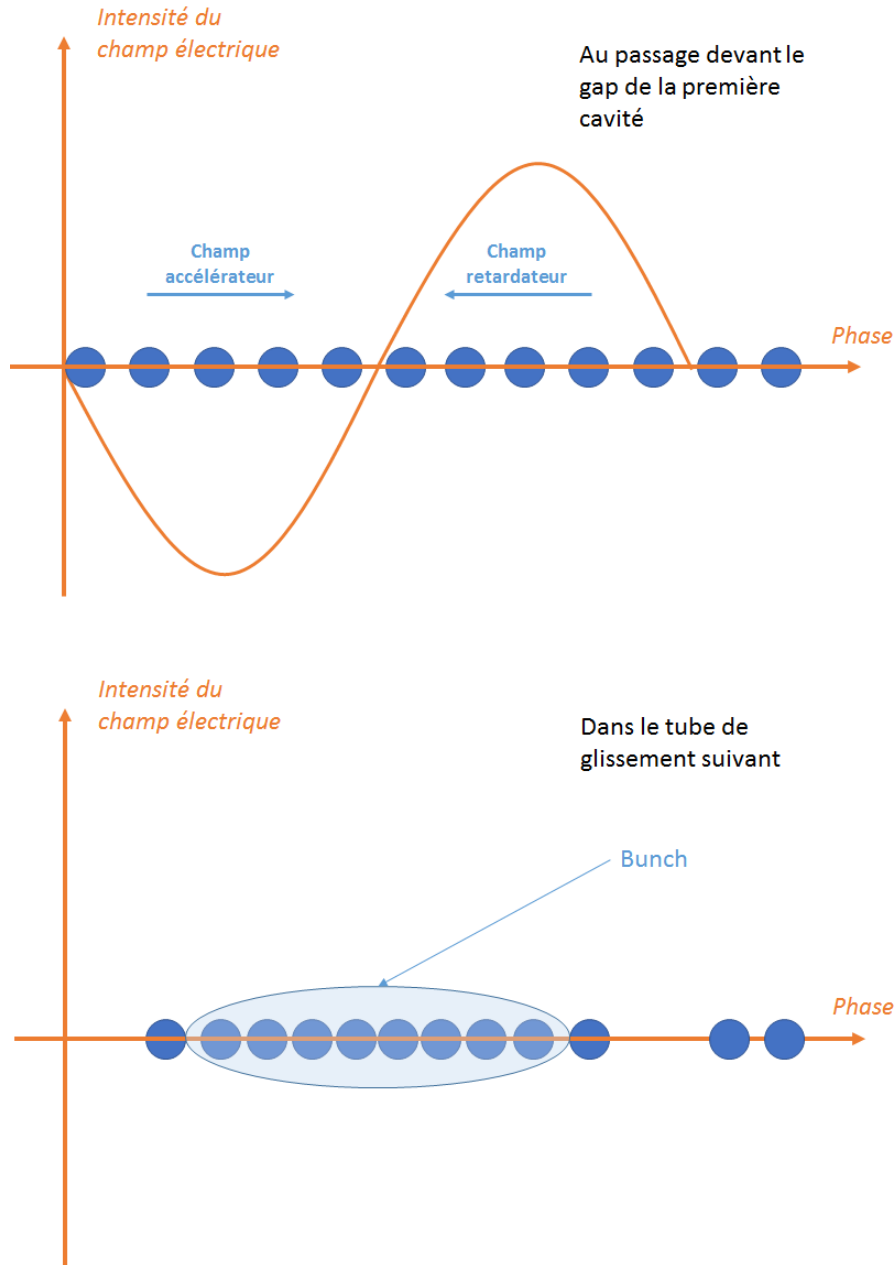


FIGURE 1.1 – Modulation des vitesses des électrons à leur passage au voisinage de la cavité d'entrée d'un klystron en fonction de la phase de l'onde (en haut) et mise en paquets dans le tube de glissement suivant (en bas)

La distribution des vitesses axiales des électrons sera donc une fonction périodique dépendant de la fréquence du signal à amplifier. Cette distribution de vitesses permet aux électrons accélérés de rattraper les électrons qui n'ont pas ou peu été affectés par l'onde dans le tube de glissement séparant les cavités ; ces derniers rattrapent de la même façon les électrons ralentis par l'onde. Les paquets d'électrons ainsi formés génèrent leur propre champ électrique. Ces charges étant en mouvement, un courant et donc un champ magnétique sont créés. Ce champ électromagnétique résonne dans les cavités passives de la ligne ; une onde stationnaire est ainsi créée dans chaque cavité, stockant une partie de l'énergie rayonnée par les électrons. Cette énergie est alors renvoyée de façon périodique au faisceau. Cet échange d'énergie électromagnétique permanent entraîne la création de paquets d'électrons, ou phénomène de « bunching » (voir Figure 1.2). Ce phénomène étant périodique, nous pourrions étudier par la suite le comportement des électrons dans l'espace des phases[21]. Pour un klystron donné, il existe une puissance du signal d'entrée optimale, appelée puissance de saturation, pour laquelle la puissance de sortie est maximale.

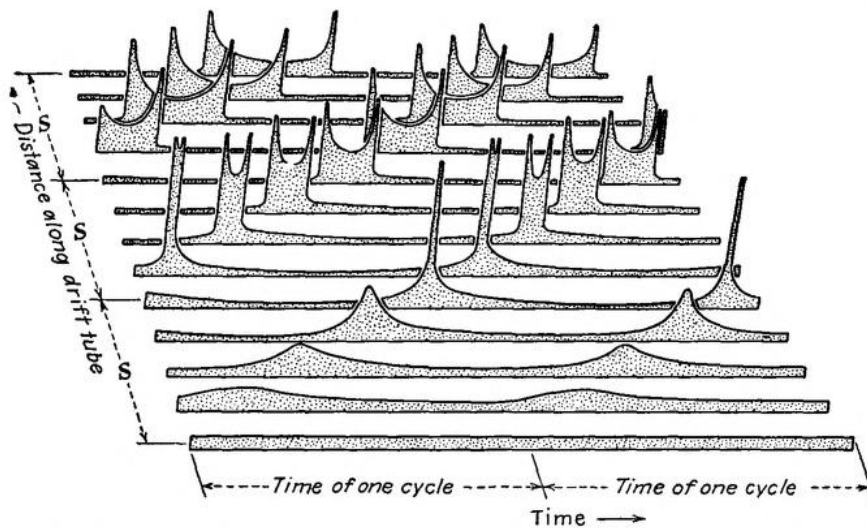


FIGURE 1.2 – Représentation en trois dimensions de la mise en paquets des électrons dans un klystron ; l'intensité du faisceau, proportionnelle à la densité de charges, est représentée en fonction de la position le long de l'axe du faisceau et du temps[4]

La dernière cavité, ou cavité de sortie, est reliée à un guide d'onde permettant de transmettre le signal amplifié. Lors du passage des électrons au niveau du gap de cette cavité, leur énergie cinétique sera partiellement rayonnée, et ils seront donc ralentis avant d'être stoppés dans le collecteur. La formation de paquets d'électrons en début de ligne permet ainsi de transmettre de façon périodique l'énergie cinétique des charges.

Les paramètres des cavités du klystron

Lors du passage des électrons au niveau d'une cavité résonnante, comme au niveau de la cavité de sortie, leur énergie cinétique est en partie rayonnée, et ils sont donc ralentis. L'énergie transférée à la cavité reste partiellement sous forme d'une onde stationnaire[1]. Les électrons suivants reçoivent l'énergie de l'onde stationnaire et sont donc accélérés. La vitesse des charges est alors de nouveau modulée par leur interaction avec les cavités résonnantes. Il apparaît alors que cet échange d'énergie, et la création de paquets d'électrons associée, dépendent de la fréquence de résonance des cavités, de la quantité d'énergie que l'on peut y stocker, et de la capacité de ces cavités à échanger de l'énergie avec le faisceau. Ces paramètres sont liés aux matériaux et à la géométrie des cavités.

Considérons un électron du faisceau à son passage au niveau du gap de la première cavité. Sa vitesse selon l'axe du faisceau est notée u_0 ; dans un cas non-relativiste, son énergie cinétique à l'entrée de la première cavité est donc :

$$E_{k,0} = \frac{1}{2} m u_0^2 = q_e V_{cathode} \quad (1.4)$$

Avec :

- m la masse de l'électron $\sim 9,109.10^{-31}$ kg
- q_e la charge de l'électron $\sim -1,602.10^{-19}$ C

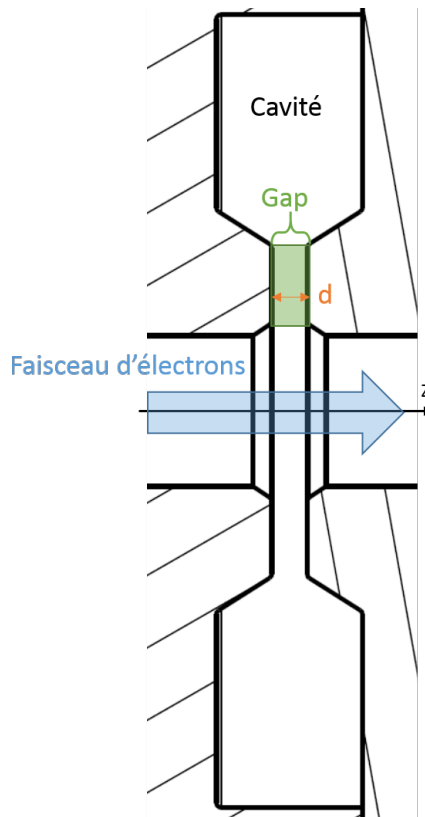


FIGURE 1.3 – Coupe longitudinale d'une cavité de klystron

Notons d la longueur du gap de la cavité (voir Figure 1.3) et u la vitesse de l'électron après son passage devant la cavité. L'équation du mouvement selon l'axe $(0, \vec{z})$ d'un électron à son passage devant la cavité est[15] :

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \eta \underline{E}_z(z, t) = \eta E_m f(z) e^{j\omega t} \quad (1.5)$$

Avec :

- $\underline{E}_z(z, t) = E_m f(z) e^{j\omega t}$ la composante axiale du champ électrique qui agit sur l'électron à son passage devant la cavité comme une fonction du temps et de la position selon l'axe $(0, \vec{z})$
- $f(z)$ un facteur de forme relatif aux lignes de champ électrique
- E_m la valeur du champ électrique telle que la différence de potentiel entre les extrémités du gap est :

$$\underline{V}_1 = \int_0^d E_m f(z) e^{j\omega t} dz \quad (1.6)$$

En considérant que la variation de vitesse de l'électron est faible lors de son passage devant le gap ($u \sim u_0$), nous pouvons écrire[15] :

$$z = u_0 t \quad (1.7)$$

$$\Rightarrow \beta_e z = \omega t \quad (1.8)$$

Avec $\beta_e = \frac{\omega}{u_0}$, ω étant la pulsation de résonance de la cavité considérée.

En multipliant de chaque coté l'équation (1.5) par $2dz$, et en utilisant la relation (1.8), nous obtenons :

$$2 \frac{dz}{dt} \frac{d^2 z}{dt^2} dt = \frac{d}{dt} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 dt = 2\eta E_m f(z) e^{j\beta_e z} dz \quad (1.9)$$

Après intégration entre $z = 0$ et $z = d$, cette relation devient :

$$\frac{1}{2} m u^2 - \frac{1}{2} m u_0^2 = e E_m \int_0^d f(z) e^{j\beta_e z} dz \quad (1.10)$$

Nous pouvons ainsi définir la différence de potentiel "effective" responsable de la variation d'énergie cinétique de l'électron à son passage devant le gap de la cavité :

$$V_{eff} = E_m \int_0^d f(z) e^{j\beta_e z} dz = \int_0^d E_z(z) e^{j\beta_e z} dz \quad (1.11)$$

Nous définissons le coefficient de couplage M comme un facteur de forme du champ électrique. Ce coefficient est adimensionné.

$$M(\beta_e) = \frac{\int_0^d E_z(z) e^{j\beta_e z} dz}{\int_0^d E_z(z) dz} \quad (1.12)$$

Le champ électrique E_z en question n'étant présent qu'à proximité de la cavité étudiée et dont l'action est négligeable ailleurs, nous pouvons généraliser la relation (1.12) en définissant l'intégrale sur la totalité de l'axe $(0, \vec{z})$.

$$M(\beta_e) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E_z(z) e^{j\beta_e z} dz}{\int_{-\infty}^{\infty} E_z(z) dz} \quad (1.13)$$

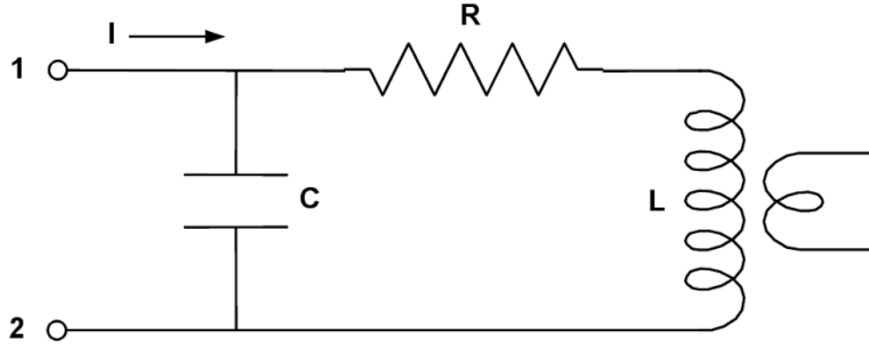


FIGURE 1.4 – Schéma électrique équivalent d'une cavité de klystron[5]

Du fait de ces propriétés électromagnétiques, nous pouvons modéliser les cavités de résonance comme des circuits électriques[5]; cette analogie présente en effet l'avantage de pouvoir être intégrée à des programme de simulation tels que AJ-Disk ou Klys2D. Le faisceau d'électrons est alors considéré comme une source de courant. La Figure 1.4 est un schéma électrique équivalent d'une cavité de klystron. La résistance R correspond aux pertes d'énergie dans les parois de la cavité et dans le cas de la cavité de sortie à l'énergie transmise au guide d'onde. Le condensateur et la bobine placés en série correspondent aux propriétés respectivement capacitives et inductives de la géométrie de la cavité.

Nous pouvons établir le circuit parallèle équivalent présenté en Figure 1.5. La résistance de shunt R_{SH} est équivalente à :

$$R_{SH} = R + \frac{L^2 \omega^2}{R} \quad (1.14)$$

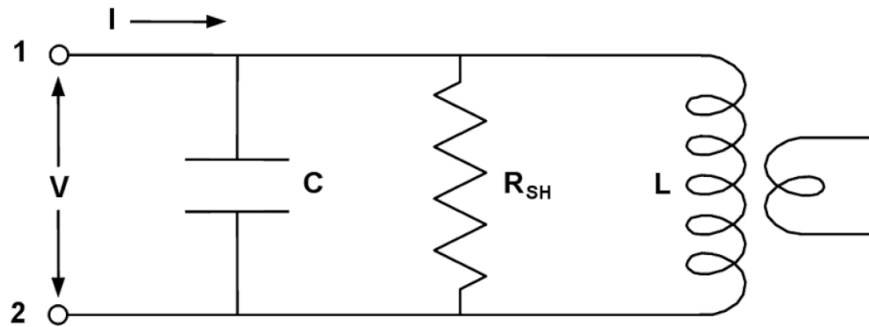


FIGURE 1.5 – Schéma électrique parallèle équivalent[5]

Nous formulons l'hypothèse qu'à la résonance, la tension aux bornes des éléments résistifs est bien plus faible qu'aux bornes des éléments inductifs dans ce circuit[5] ; nous pouvons négliger la valeur du premier terme de l'équation devant le second. Nous obtenons donc :

$$R_{SH} = \frac{L^2 \omega^2}{R} = \omega L Q \quad (1.15)$$

Avec :

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1.16)$$

En multipliant l'équation (1.16) en haut et en bas par $\frac{i^2}{2}$, i étant l'intensité crête du courant dans le circuit série (voir Figure 1.4), nous obtenons :

$$Q = \frac{\omega L \left(\frac{i^2}{2} \right)}{R \left(\frac{i^2}{2} \right)} = \frac{\omega U}{W} \quad (1.17)$$

Avec :

- $U = \frac{Li^2}{2}$ l'énergie maximale stockée
- $W = \frac{Ri^2}{2}$ la puissance moyenne dissipée par effet Joule

Notons aussi que la fréquence de résonance d'un tel circuit est liée à la capacité C du condensateur et de l'inductance L de la bobine par l'expression suivante :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.18)$$

Q est ainsi un moyen de caractériser les pertes par effet Joule dans la cavité ; le facteur de qualité dépend donc de la géométrie de la cavité et du matériau constituant ses parois, et plus exactement de sa conductivité. Nous pouvons également écrire la relation (1.15) de la façon suivante :

$$R_{SH} = \frac{L^2 \omega^2}{R} = \frac{\omega^2 L^2 \left(\frac{i^2}{2} \right)}{R \left(\frac{i^2}{2} \right)} = \frac{V^2}{2W} \quad (1.19)$$

Avec $V = \omega Li$ la tension crête aux bornes de la bobine.

Vient alors la relation :

$$\frac{R_{SH}}{Q} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{V^2}{2\omega U} \quad (1.20)$$

La tension V et l'énergie stockée dans la cavité U dépendent de la géométrie de la cavité et des matériaux la constituant. Le terme $\frac{R_{SH}}{Q}$ et la pulsation ω sont en revanche indépendants du matériau constitutif de la cavité et d'échange d'énergie avec l'extérieur.

Remplaçons :

- Q par Q_0 ,
- $V_{cathode}$ par V_k ,
- $I_{faisceau}$ par I_b .

De façon analogue à Q_0 , nous définissons le paramètre Q_e comme le facteur de qualité du couplage avec le circuit électromagnétique extérieur :

$$Q_e = \frac{\omega U}{P_{sortie}} \quad (1.21)$$

Q_e dépend de la géométrie de la cavité et de la qualité du couplage avec le circuit extérieur.

$M(\beta_e)$, $\frac{R_{SH}}{Q}$, Q_0 , Q_e et ω constituent les paramètres électromagnétiques permettant le dimensionnement des cavités de klystron ; cette modélisation est couramment utilisée dans les codes de calcul que nous présenterons par la suite.

Nous remplacerons par ailleurs :

- $M(\beta_e)$ par M ,
- $\frac{R_{SH}}{Q}$ par $\frac{R}{Q}$.

Enfin, précisons que la plupart des modèles utilisent des macrocharges plutôt que des électrons ; nous parlerons de façon indifférente de macrocharges ou d'électrons par la suite, à moins d'un risque de confusion.

1.1.2 Pertes dans un klystron et rendement

Rendement global et rendement d'interaction

Le canon à électrons et la bobine de focalisation d'un klystron sont alimentés en puissance électrique et la cavité d'entrée reçoit le signal radiofréquence sous forme d'une onde électromagnétique. La puissance de sortie d'un klystron correspond à la puissance radiofréquence transmise au guide d'onde. L'énergie cinétique des électrons qui n'a pas été transmise sous forme d'onde électromagnétique dans la cavité de sortie est absorbée par le collecteur et dissipée sous forme d'énergie thermique.

La pervéance d'un faisceau d'électrons est liée à sa densité de charge. Ainsi, un faisceau de pervéance élevée, c'est à dire proche de $2.10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$, sera par conséquent le siège de forces de répulsion coulombienne très intenses. D'autre part, ces forces de répulsion auront pour effet de créer un gradient de potentiel à l'intérieur du faisceau et de nuire à la mise en paquets des électrons[1, 5]. Il a donc été observé expérimentalement que le rendement des klystrons est une fonction décroissante de la pervéance du faisceau (voir Figure 1.6). La pervéance des faisceaux d'électrons ne dépasse pas en pratique $2,5.10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$ [1].

Nous pouvons définir le rendement d'interaction du klystron[22] :

$$\eta_{interaction} = \frac{P_{sortie}}{(V_k \cdot I_b)} \quad (1.22)$$

avec P_{sortie} la puissance électromagnétique transmise au guide d'onde (W).

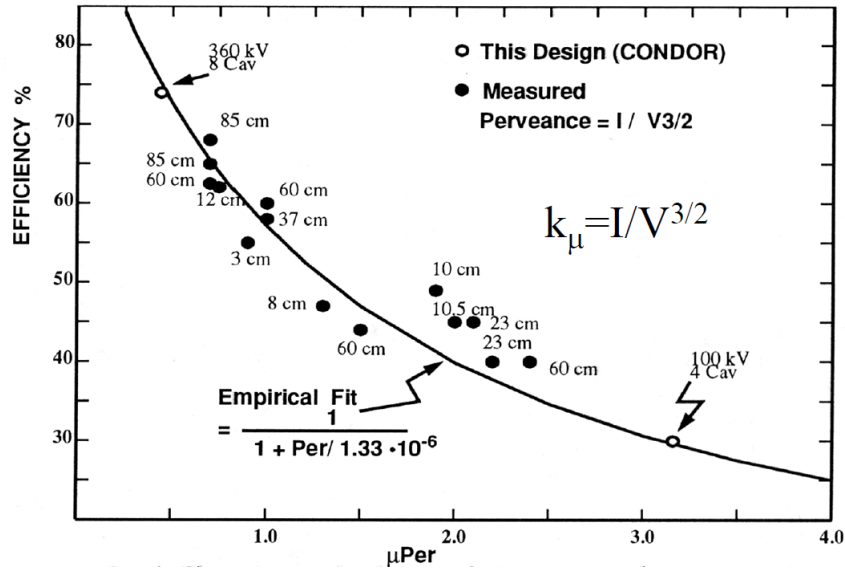


FIGURE 1.6 – Loi empirique liant le rendement d’interaction et la pervéance des klystrons[6] ; les longueur d’ondes des klystrons sont exprimées en centimètres

Nous distinguons le rendement d’interaction du rendement global du klystron :

$$\eta_{global} = \frac{P_{sortie}}{(V_k \cdot I_b + P_{Foc} + P_F + P_{entrée})} \quad (1.23)$$

avec :

- P_{Foc} la puissance absorbée par la bobine de focalisation (W)
- P_F la puissance nécessaire au chauffage de la cathode (W)
- $P_{entrée}$ la puissance électromagnétique injectée dans la cavité d’entrée (W)

Dans le cadre de l’étude du klystron TH2166, objet de la thèse, nous avons :

- $P_{Foc} \leq 4000$ W
- $P_F \sim 140$ W
- $P_{entrée} \leq 10$ W
- $V_k \cdot I_b = 111800$ W

La puissance électrique absorbée pour la génération du faisceau représente environ 96% de la consommation totale d’énergie et est ainsi prépondérante dans le bilan de puissances ; il est à noter que cela n’est pas vrai dans le cas général. Dans la suite de notre étude, nous assimilerons donc le rendement d’interaction au rendement global du klystron, noté η . Nous définissons également le gain G en décibels (dB) d’un klystron de la façon suivante :

$$G(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} \right) \quad (1.24)$$

Bilan de puissance du faisceau

Appliquons à présent le théorème de Poynting au champ électromagnétique dans la cavité de sortie[23] :

$$\int \int \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} + \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \right) dv + \int \int \int_V (\vec{E} \cdot \vec{J}) dv + \int \int_S \vec{E} \wedge \vec{H} \vec{ds} = 0 \quad (1.25)$$

Avec :

- L'induction électrique $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$
- L'induction magnétique $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$
- La densité de courant totale $\vec{J} = \vec{J}_{conv} + \vec{J}_{cond}$

Avec :

- La densité de courant de convection, générée par le faisceau $\vec{J}_{conv}$
- La densité de courant de conduction à la surface des parois $\vec{J}_{cond}$

L'équation 1.25 devient :

$$- \int \int \int_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_{conv}) dv = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int \int \int_V \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} + \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} dv \right) + \int \int \int_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_{cond}) dv + \int \int_S \vec{E} \wedge \vec{H} \vec{ds} \quad (1.26)$$

Avec :

- La puissance fournie par le faisceau $-\int \int \int_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_{conv}) dv$
- La variation de l'énergie stockée $\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int \int \int_V \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} + \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} dv \right)$
- La puissance perdue par effet Joule $W = \int \int \int_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_{cond}) dv$
- La puissance transmise au circuit extérieur $P_{sortie} = \int \int_S \vec{E} \wedge \vec{H} \vec{ds}$

En régime permanent, la variation d'énergie stockée $\frac{\partial U}{\partial t}$ est nulle en moyenne.

Nous pouvons exprimer et majorer la puissance fournie par le faisceau de la façon suivante :

$$\int \int \int_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_{conv}) dv = \int \int \int_V (\vec{E} \cdot \left(\frac{\vec{J}_{conv}}{J_0} \right) J_0) dv \leq |E|_{max} \cdot \left| \frac{J_{conv}}{J_0} \right|_{max} \int \int \int_V J_0 dv \quad (1.27)$$

Avec :

- J_0 la densité de courant dans le faisceau non modulé.
- $\int \int \int_V J_0 dv = I_b \cdot l$, l étant la longueur suivant l'axe du faisceau du volume V considéré.
- $\left| \frac{J_{conv}}{J_0} \right|_{max}$ la modulation de courant maximale, qui correspond à l'efficacité maximale de la mise en paquets.

Nous avons alors :

$$W + P_{sortie} \leq \left| \frac{J_{conv}}{J_0} \right|_{max} \cdot I_b \cdot (|E|_{max} \cdot l) \quad (1.28)$$

Avec $(|E|_{max} \cdot l)$ la tension maximale sur l'axe du circuit de sortie.

D'après ce qui précède, le rendement d'interaction devient :

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{V_k \cdot I_b} = \frac{- \int \int \int_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_{conv}) dv}{\left(1 + \frac{W}{P_{sortie}}\right) V_k \cdot I_b} = \frac{- \int \int \int_V (\vec{E} \cdot \left(\frac{J_{conv}}{J_0}\right) \vec{J}_0) dv}{\left(1 + \frac{W}{P_{sortie}}\right) V_k \cdot I_b} \leq \frac{1}{\left(1 + \frac{W}{P_{sortie}}\right)} \left| \frac{J_{conv}}{J_0} \right|_{max} \frac{(|E|_{max} \cdot l)}{V_k} \quad (1.29)$$

Nous identifions ainsi plusieurs sources de pertes et facteurs limitant le rendement d'interaction :

- Les pertes par effet de peau dans les parois de la cavité (W), dûs à la création de courants en surface, que nous avons étudié précédemment.
- Le champ électrique maximal dans les cavités $|E|_{max}$; un champ trop élevé peut entraîner l'apparition d'arcs électriques, selon la loi de Kilpatrick[24] :

$$f(MHz) = 1,64 \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^2 \cdot \exp\left(-8,5 \cdot \frac{E_0}{E}\right) \quad (1.30)$$

Avec $E_0 = 1 \text{ MV/m}$.

Dans le cadre de notre étude, c'est à dire avec un signal d'une fréquence de 4,9GHz, le champ électrique maximal admissible avant claquage est donc de 55MV/m.

- Le terme $\int \int \int_V (\vec{E} \cdot \left(\frac{J_{conv}}{J_0}\right) J_0) dv$ intègre deux phénomènes influant fortement sur le rendement :
 - Le déphasage entre le courant du faisceau $\vec{J}_{conv}$ et le champ électrique dans la cavité $\vec{E}$; afin que les électrons cèdent de façon optimale leur énergie cinétique, ce déphasage doit être de 180° .
 - La modulation de courant $\frac{J_{conv}}{J_0}$ dépendant de la qualité de la mise en paquets des électrons ; les électrons hors bunchs ne contribuent pas à cette modulation de courant. Sur la Figure 1.7 sont représentés, pour deux simulations AJ-Disk de klystron, le diagramme d'Applegate (phase des électrons le long de la ligne d'interaction), le courant du faisceau le long de la ligne et la dispersion des vitesses des électrons. Les gap des cavités sont représentées en violet.

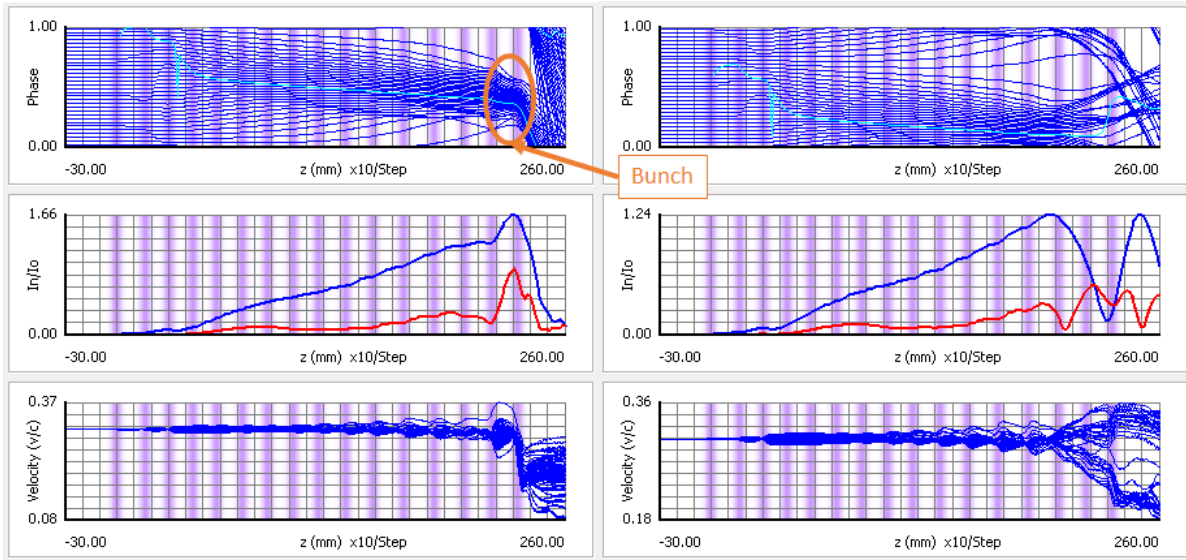


FIGURE 1.7 – Phases des électrons en fonction de leur position dans le long de la ligne d’interaction, courant faisceau associé (première et deuxième harmoniques) et dispersion des vitesses des électrons ; cas d’un faisceau bunched à l’entrée de la cavité de sortie et d’un faisceau débunché lors de son passage devant le gap de la 14^{ème} cavité ; simulations AJ-Disk

Nous constatons dans le premier cas l’harmonisation progressive des phases des électrons jusqu’à l’avant-dernière cavité, accompagnée de la montée du courant de première harmonique et de la dispersion graduelle des vitesses ; ces vitesses s’effondrent à partir de la dernière cavité, preuve que les électrons ont cédé leur énergie cinétique. En revanche, les résultats de la seconde simulation présentent une dispersion extrême des vitesses et des phases des électrons ainsi qu’un effondrement du courant faisceau à partir de la 14^{ème} cavité ; l’énergie cinétique des électrons n’est donc que peu exploitée, comme en témoignent les vitesses élevées à l’issue de la dernière cavité.

L’optimisation de la modulation de courant est une des principales pistes d’amélioration du rendement des klystrons, comme nous le verrons par la suite.

1.1.3 Le phénomène de multipactor

Un champ électrique suffisamment intense peut arracher des électrons dits primaires des matériaux constituant les cavités du klystron. Ces électrons, accélérés par ces champs électriques peuvent gagner une énergie suffisante pour venir extraire à leur tour des électrons à leur impact sur une paroi de la cavité considérée. Nous parlons alors d’émission secondaire[1]. Ces électrons sont à leur tour accélérés par le champ électrique et peuvent à leur tour être à l’origine d’émissions d’électrons secondaires, entraînant le phénomène de multipactor, c’est à dire la production massive d’électrons parasites. Ce phénomène perturbe l’interaction entre le faisceau et la cavité, chauffe les matériaux et dégrade significativement les performances et la structure du klystron ; les cavités peuvent en effet être désaccordées ou même grandement détériorées par des arcs électriques[7].

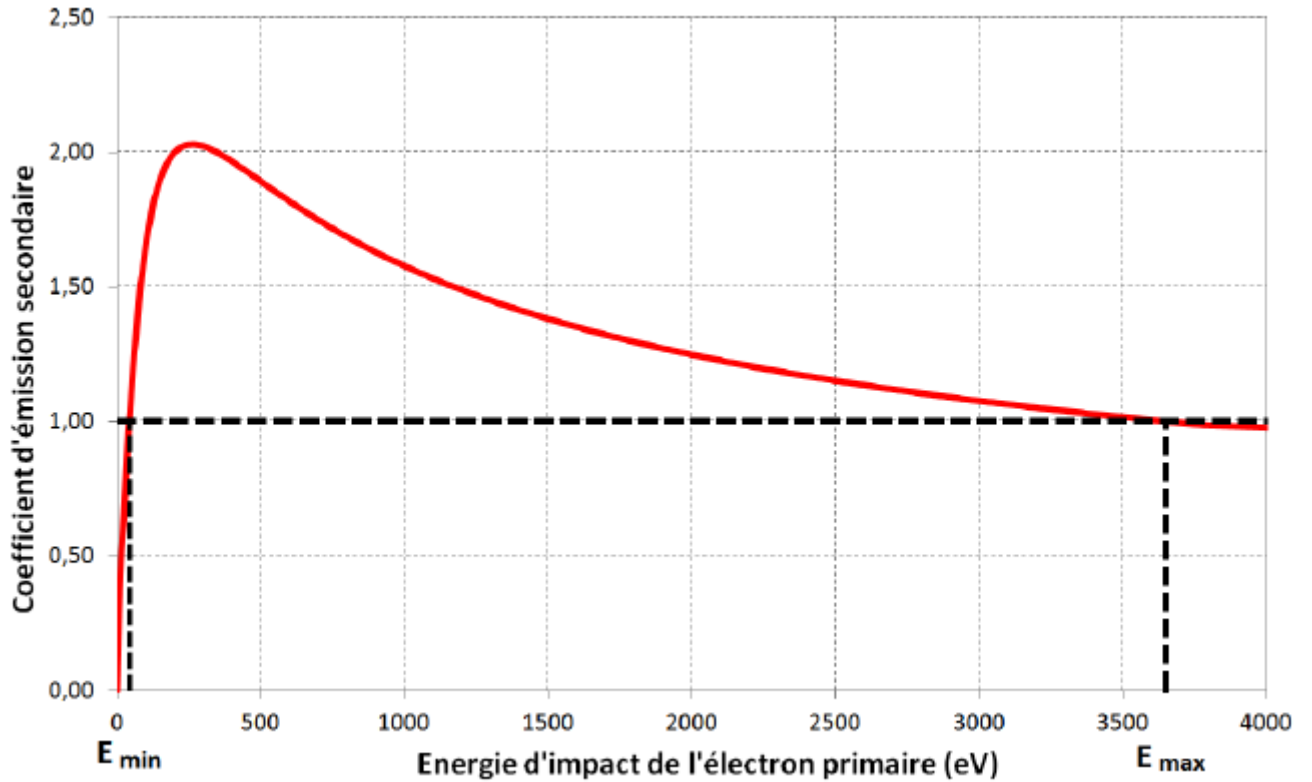


FIGURE 1.8 – Coefficient d’émission secondaire en fonction de l’énergie de collision de l’électron primaire pour du cuivre[7]

Le multipactor dépend des champs électriques en présence, de la géométrie de la structure et des matériaux exposés aux champs, notamment leur coefficient d’émission secondaire. Les géométries concaves des structures accélératrices et des tubes électroniques offrent des surfaces en vis-à-vis propices à l’échange d’électrons ; les alliages métalliques constituant ces surfaces permettent l’extraction d’électrons secondaires en abondance. Les champs électriques présents dans ces cavités sont des fonctions périodiques du temps et extraient et accélèrent les électrons, créant ainsi une avalanche électronique[7].

Le phénomène de multipactor nécessite que les électrons extraits initialement puissent atteindre une énergie cinétique suffisante pour extraire d’autres charges. Il faut pour cela que d’une part le champ électrique ait une intensité suffisamment élevée, mais également que la distance entre deux parois en vis à vis soit suffisamment faible. Si ces parois sont trop espacées, la phase de l’onde et donc du champ électrique a le temps de s’inverser et les électrons sont alors décélérés, voire réaccélérés dans la direction opposée, avant d’atteindre la surface en question. Lorsque les électrons atteignent la paroi considérée, leur énergie cinétique doit être comprise entre deux valeurs E_{min} et E_{max} dépendant du matériau, pour lesquelles le coefficient d’émission secondaire est supérieur à 1, afin que l’émission d’électrons secondaires soit possible (voir Figure 1.8).

Afin d'éviter le phénomène de multipactor, plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre lors de la conception et de la réalisation de structures accélératrices et de tubes électroniques. Lors de la fabrication de ces éléments, les parois exposées aux champs électriques les plus intenses peuvent être recouvertes d'une couche d'un matériau dont le coefficient d'émission secondaire est inférieur à 1 sur toute la plage d'énergie considérée, comme le titane (voir Figure 1.9). Les électrons incidents sont alors absorbés par le matériau et ne sont pas ou très peu à l'origine d'émission d'électrons secondaires. Il est également possible de modifier l'état de surface des structures en projetant des micro-billes de cuivres ou en perçant les parois de trous. Les aspérités créées par les micro-billes modifient les angles d'incidence des électrons primaires et rendent plus difficile l'émission de charges ; les trous permettent de piéger les électrons incidents.

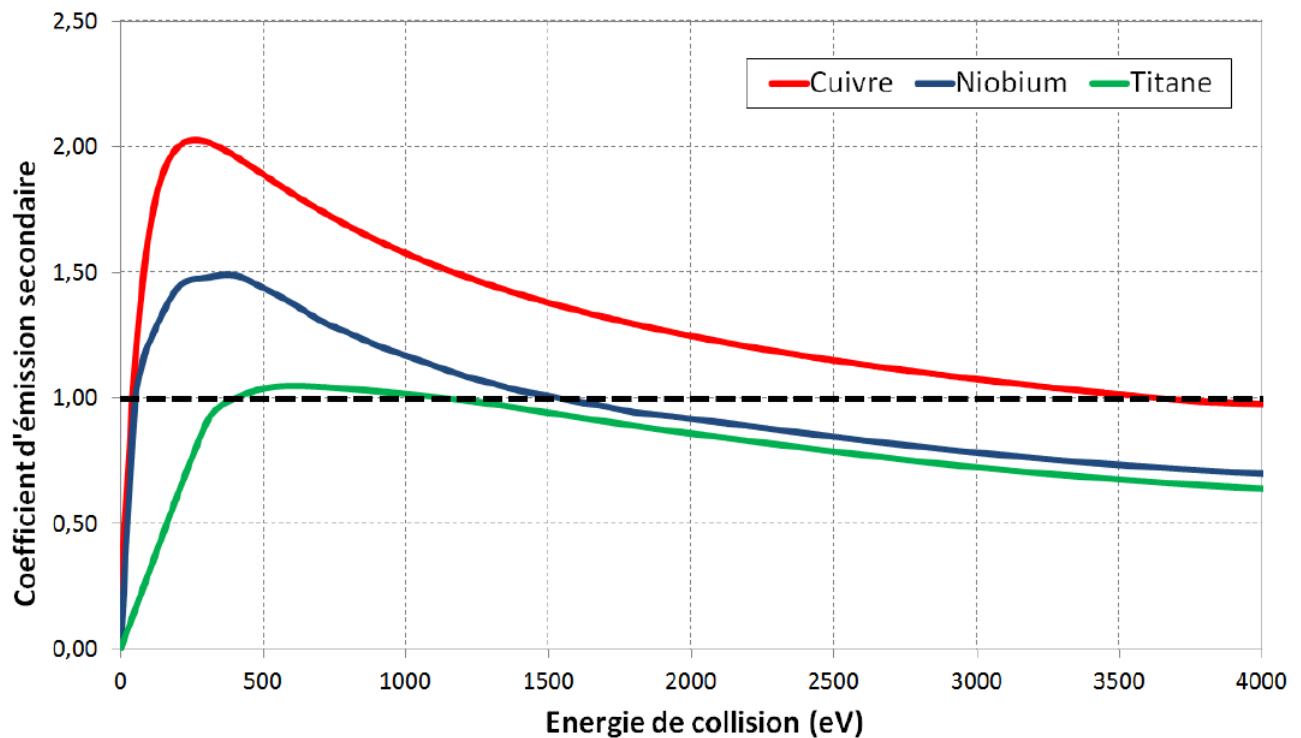


FIGURE 1.9 – Coefficient d'émission secondaire en fonction de l'énergie de collision de l'électron primaire pour différents matériaux (cuivre, niobium et titane)[7]

1.2 État de l'art des klystrons haut-rendement

Plusieurs méthodes sont envisagées afin d'augmenter le rendement des klystrons ; nous pouvons distinguer parmi elles trois pistes d'amélioration :

- La récupération de l'énergie dissipée dans le collecteur.
- L'utilisation de faisceaux de faible pervéance
- L'optimisation de la mise en paquets des électrons

1.2.1 Les klystrons à collecteur déprimé et les klystrons à faisceaux multiples

Les klystrons à collecteur déprimé

Comme nous l'avons vu précédemment, les électrons cèdent une partie de leur énergie cinétique dans la cavité de sortie avant d'être absorbés par le collecteur. Afin d'améliorer le bilan énergétique des klystrons, des collecteurs déprimés ont été développés ; ces collecteurs sont pourvus d'électrodes permettant l'absorption de l'énergie des électrons. La dispersion de vitesses des électrons étant maximale à leur entrée dans le collecteur, il convient de veiller à ce que les électrons les plus rapides soient freinés sans pour autant que les plus lents ne soient accélérés dans le sens opposé[1]. Pour ce faire, les collecteurs sont conçus en plusieurs "étages" d'électrodes portées à des tensions croissantes : le premier étage absorbe l'énergie cinétique des électrons les plus lents, le deuxième les électrons ayant une énergie légèrement plus élevée, jusqu'à couvrir une partie conséquente de la plage des vitesses concernée. De tels collecteurs pour klystrons mais aussi IOTs (Inductive Output Tube) et tubes à ondes progressives ont été conçus avec 1 à 5 étages. L'énergie ainsi récupérée peut alors être utilisée pour alimenter le canon à électrons. Il est à noter que ces collecteurs permettent d'améliorer grandement le rendement global du tube électronique lorsque le rendement d'interaction est faible ($\sim 30\%$).

Les klystrons à faisceaux multiples

Les faisceaux d'électrons de pervéance élevée (environ égale à $2 \cdot 10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$) ne sont pas adaptés dans le cas des klystrons à rendement d'interaction élevé ; ces tubes électroniques sont en outre limités en puissance. Dans les années 1940, V. F. Kovalenko puis J. Bernier proposèrent de transporter l'onde radiofréquence non pas avec un seul faisceau de haute pervéance mais avec plusieurs, de faible pervéance, c'est à dire inférieure à $10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$ [5]. Chaque faisceau est assimilable à un klystron de faible pervéance, avec de plus faibles forces de charges d'espace ; les électrons sont ainsi plus facile à mettre en paquets. La puissance RF récupérée à la fin de la ligne d'interaction est la somme des contributions de chaque faisceau. De plus, les électrons, portés à des énergies plus faibles, émettent moins de rayons X, ce qui allège la structure qui nécessite un blindage moindre ; des électrons plus lents permettent également de raccourcir l'espace d'interaction. Un tel klystron est donc plus compact et plus léger. Ces tubes seront étudiés et développés à partir des années 1960[25], en raison d'une part de la quantité grandissante de données à traiter et transmettre par les radars et relais de télécommunications, et d'autre part par le besoin de systèmes embarqués de faibles masses et dimensions[26].

Plusieurs prototypes et klystrons commerciaux à 4, 10 voire 36 faisceaux ont été réalisés[27, 28, 29]. Les canons à électrons de klystrons multi-faisceaux sont en revanche plus difficiles à concevoir que ceux des klystrons classiques[30]. Les cavités de ces klystrons peuvent avoir deux configurations différentes, en anneau ou en tore. Dans le second cas, les cavités ont une géométrie proche de celles d'un klystron classique, dont le faisceau unique serait remplacé par plusieurs de pénétrance plus faible. Il est à noter que ces faisceaux nécessitent un champ magnétique plus difficile à obtenir ; le champ magnétique sur l'axe central du klystron doit être uniforme le long de la ligne afin que les faisceaux restent confinés.

1.2.2 L'optimisation des bunchs

Encouragée par le réel besoin de klystrons à haut-rendement, l'amélioration des méthodes de bunching des électrons est un axe de recherche majeur. Comme nous l'avons vu précédemment, l'énergie des bunchs est transmise au circuit extérieur lorsque d'une part les électrons des paquets entrant dans la cavité de sortie sont en opposition de phase avec le champ électrique dans le gap ; et d'autre part lorsque leurs vitesses sont suffisamment proches pour que le maximum d'électrons soient correctement décélérés, et transmettent leur énergie cinétique au circuit extérieur, sans toutefois qu'il y ait d'électrons réfléchis. Plusieurs architectures de klystrons sont en développement afin d'obtenir des paquets d'électrons ayant les propriétés adéquates.

La méthode COM (Core Oscillation Method)

La conception des cavités des klystrons classiques mène à imposer un fort gradient de vitesses des électrons dans les bunchs. Des électrons de vitesses extrêmes restent entre deux bunchs et leur énergie cinétique est dissipée dans le collecteur, sans contribuer à l'amplification du signal. La méthode COM consiste à allonger l'espace de glissement entre les cavités afin que ces électrons puissent se rapprocher du bunch suivant ou précédent. L'équilibre entre les forces de charge d'espace et les forces dues à l'interaction entre le faisceau et la cavité précédente s'exerçant sur les électrons est alors rétabli à l'entrée de la cavité suivante[8] (voir Figure 1.10) Le "cœur" (core) des paquets va voir sa densité osciller entre chaque cavité, ce qui permet l'atténuation des forces de charge d'espace. De récentes simulations avec MAGIC2D de klystrons mono-faisceau utilisant cette architecture présentent un rendement supérieur à 84,6% avec un faisceau de $0,256 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{V}^{-\frac{3}{2}}$ [31]. Les tubes de glissement considérés pour cette méthode sont cependant de 50% à 100% plus longs que dans un klystron conventionnel[8].

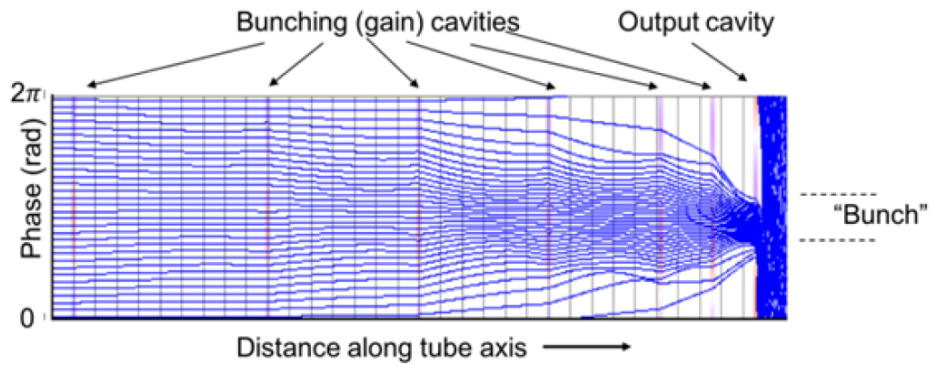


FIGURE 1.10 – Phase des électrons en fonction de leur position le long de l'espace d'interaction (résultat de simulation AJ-Disk pour un klystron appliquant la méthode COM) ; en bleu sont tracés les phases des électrons ; les lignes verticales rouges et mauves correspondent aux positions des cavités[8]

La méthode BAC (Bunch-Align-Collect)

La méthode BAC est une version optimisée de la méthode COM, dans le sens où les variations de densités de charges sont encouragées afin de rassembler davantage d'électrons périphériques en paquets[32]. Outre l'amélioration du bunching des électrons, cette méthode permet de raccourcir l'espace d'interaction des klystrons.

Ce procédé nécessite d'introduire trois cavités dédiées de la façon suivante (voir Figure 1.11) :

- La première cavité va augmenter la densité électronique des bunchs de manière classique ("Bunch").
- La deuxième cavité, ou cavité d'"alignement", va agir sur les bunchs de façon opposée à la première cavité, afin d'harmoniser les vitesses des charges ("Align").
- La troisième cavité est une cavité harmonique d'ordre 2 qui va principalement affecter les charges hors des bunchs et les ramener vers les paquets d'électrons ; cette cavité va par ailleurs "débuncher" les charges des paquets d'électrons, ce qui aura pour conséquence de diminuer la force résultant de la charge d'espace et faciliter le bunching des électrons périphériques ("Collect"). La conjonction de ces deux phénomènes va transformer le bunch d'origine en un ensemble de deux sous-bunchs virtuels, plus stables.

De tels prototypes de klystrons, utilisant plusieurs triplets de cavités tels que décrits précédemment, sont en cours de développement[33, 34]. Ces projets se concentrent avant tout sur l'optimisation des bunchs obtenus à l'entrée de la dernière cavité de la ligne, dans le cas de klystrons multi-faisceaux. Le klystron 5045 du SLAC, dont la ligne d'interaction a récemment été modifiée pour mettre en œuvre la méthode BAC, a vu son rendement passer de 45% à 55%, avec un faisceau d'une pervéance de $2.10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$; ce klystron présente en revanche des oscillations parasites qui empêchent le test du tube à sa largeur d'impulsion nominale, de $3.5\mu\text{s}$ [35].

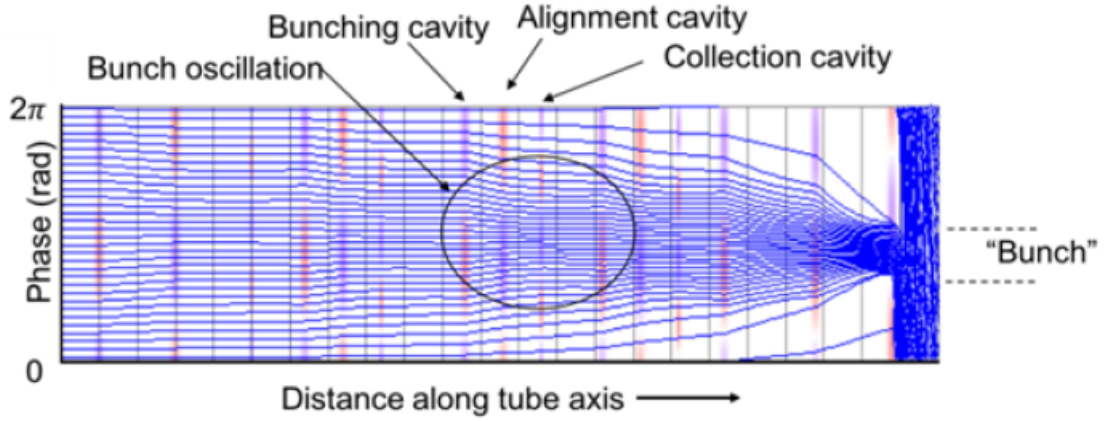


FIGURE 1.11 – Phase des électrons en fonction de leur position le long de l'espace d'interaction (résultat de simulation AJ-Disk pour un klystron appliquant la méthode BAC) ; en bleu sont tracés les phases des électrons ; les lignes verticales rouges et mauves correspondent aux positions des cavités[8]

La méthode CSM (Core Stabilization Method)

Suivant le développement des méthodes COM et BAC, la méthode de stabilisation du coeur permet d'accélérer la formation des bunchs en utilisant non seulement une cavité harmonique d'ordre 2 mais également une cavité harmonique d'ordre 3[9, 36] ; placée immédiatement après la cavité harmonique d'ordre 2, et de façon analogue à la méthode BAC, cette cavité va créer trois sous-bunchs virtuels pour ramener les électrons périphériques vers le centre des bunchs, tout en atténuant les forces de charges d'espace dans le coeur (voir Figure 1.12). Avec un faisceau d'une pervéance de $0,210 \cdot 10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$, les simulations d'un tel klystron ont permis d'atteindre un rendement de 88% avec AJ-Disk ; avec un faisceau d'une pervéance de $0,256 \cdot 10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$, cette méthode permet d'obtenir un rendement de 78% avec le logiciel MAGIC2D.

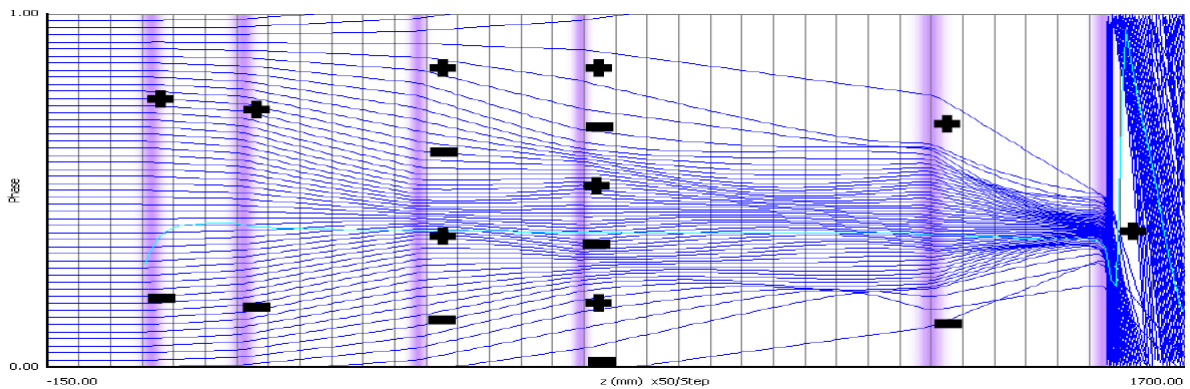


FIGURE 1.12 – Phase des électrons en fonction de leur position le long de l'espace d'interaction (résultat de simulation AJ-Disk pour un klystron appliquant la méthode CSM) ; en bleu sont tracés les phases des électrons ; les signes "+" et "-" correspondent aux phases pour lesquelles le champ électrique dans les gaps des cavités atteint ses valeurs extrêmes ; les gaps sont indiqués par les les lignes verticales mauves[9]

1.3 Le projet kladistron

Nous avons développé un type de klystron quasi-adiabatique, inspiré du fonctionnement des RFQ, que nous avons nommé kladistron. Le nom kladistron est la contraction de klystron et adiabatique. L'architecture d'un kladistron est différente de celle d'un klystron traditionnel avec un nombre plus élevé de cavités (au moins 10) très faiblement couplées au faisceau[10], ce qui rend la mise en paquets des électrons très progressive.

1.3.1 Le RFQ (Radio-Frequency Quadrupole)

Élément clé des accélérateurs linéaires d'ions à basse énergie, les RFQ permettent la mise en paquets des particules chargées de façon progressive. Un RFQ est composé de quatre électrodes disposées autour du faisceau ; ces électrodes ont une polarité s'inversant de façon périodique, de façon à confiner les particules au centre[37]. Les électrodes ont une forme ondulées, avec un décalage entre les électrodes verticales et les électrodes horizontales ; le potentiel sur l'axe varie alors et crée une composante de champ longitudinale. Cette géométrie et l'inversion de polarité des électrodes permet le synchronisme entre onde et particules, et l'accélération et la mise en paquets des charges au moyen des ondes radiofréquences. La mise en paquets des particules est très progressive et les pertes RF sont ainsi très faibles[10]. Cette méthode de bunching a servi de base de réflexion pour le développement du kladistron.

1.3.2 Une interaction faisceau-cavité quasi-adiabatique

Un système thermodynamique tel que le faisceau d'électrons d'un klystron est dit adiabatique lorsque les forces extérieures s'appliquant au système varient plus lentement que les forces intérieures ; dans l'exemple du faisceau d'électrons, les forces extérieures sont les forces résultantes du champ électromagnétique présent dans la ligne d'interaction ; les forces intérieures sont les forces de charge d'espace[10]. Ainsi, le système reste quasiment en équilibre thermodynamique et la création d'entropie est limitée. La démarche de conception du kladistron a été de minimiser la variation des forces permettant le bunching et de minimiser de cette façon l'échange d'énergie entre le faisceau et la ligne d'interaction, de façon analogue à la structure des RFQ.

1.3.3 Le kladistron

Le kladistron est caractérisé par une ligne d'interaction permettant la mise en paquets progressive des électrons. Le facteur de qualité et le paramètre $\frac{R}{Q}$ de ces cavités sont en conséquence deux à trois fois plus faibles que dans un klystron classique. Le gain par cavité, voulu comme étant plus faible, est en revanche croissant le long de la ligne d'interaction. Il est apparu très tôt lors de notre étude qu'un gain par cavité trop élevé rendait nos simulations très instables et que le régime permanent était impossible à atteindre dans nos codes temporels.

Plusieurs simulations avec le code AJ-Disk ont été effectuées afin de mettre en évidence le principe du kladistron (voir Figure 1.13). Nous observons en effet une harmonisation très progressive des phases des électrons le long de la ligne d'interaction ; la modulation de courant est très monotone et régulière et les vitesses des électrons sont peu affectées jusqu'à la 16^{ème} cavité. Les simulations AJ-Disk de ce kladistron à 12GHz, avec un faisceau d'une pénétrance de $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$, permettent d'atteindre un rendement à saturation de 78%.

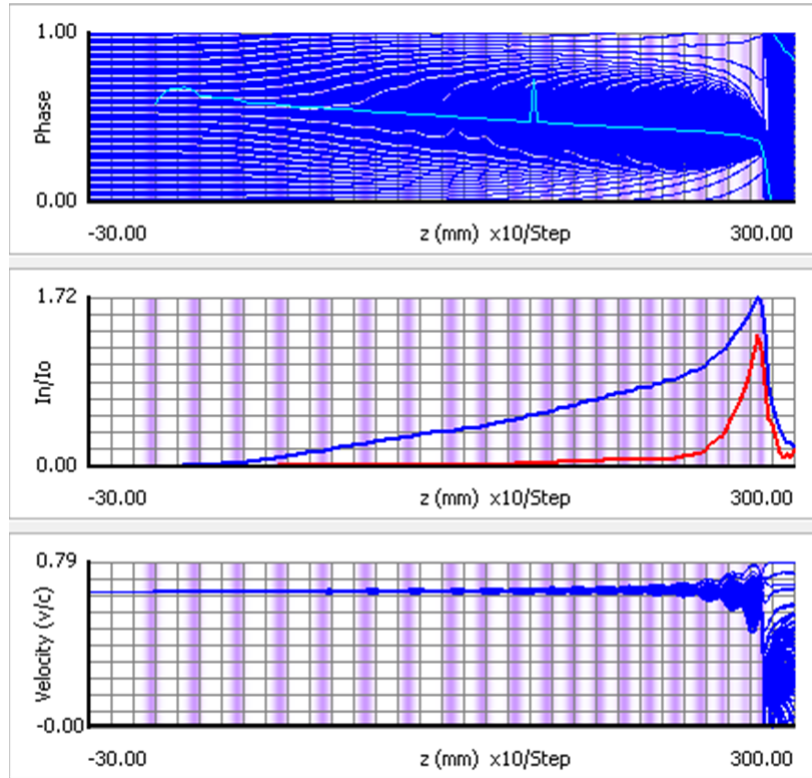


FIGURE 1.13 – Résultats de calcul AJ-Disk - cas d'un kladistron à 20 cavités ; de haut en bas : le diagramme d'Applegate, le courant du faisceau (première et deuxième harmoniques) et la dispersion des vitesses des électrons[10]

1.3.4 Le choix du klystron TH2166

Afin de valider le principe du kladistron en s'appuyant sur des technologies déjà existantes, nous avons choisi de modifier la ligne d'interaction d'un klystron existant, le klystron TH2166 ; ce tube électronique a été conçu en 2001 par Thales Electron Devices pour le Microtron de Mayence (MAMI). Ce klystron, d'une fréquence de 4,9GHz, fonctionne en régime continu. La puissance délivrée est de 55kW, avec un rendement de 50% ; il est muni d'un canon à électrons délivrant un faisceau d'une pervéance de $1,026 \cdot 10^{-6} \text{ A.V}^{-\frac{3}{2}}$, avec un potentiel cathode de 26kV et un courant de 4,3A. Ce klystron a été choisi principalement parce que c'est un tube bien connu des parties prenantes, et qu'un banc de test dédié est disponible. Ce klystron a de plus une fréquence et une pervéance élevées, ce qui implique des contraintes de développement et de fabrication proches de celles d'un klystron 12GHz pour le projet CLIC (notamment la taille des cavités réduite et d'importants effets de charge d'espace).

1.4 Conclusion du chapitre

Ce premier chapitre a permis de définir les paramètres principaux des klystrons et l'importance de la mise en paquets des électrons ; nous avons ensuite abordé le sujet des klystrons à haut-rendement, avant de décrire la nouvelle architecture que nous proposons de tester. Nous verrons dans le chapitre suivant comment nous avons choisi les paramètres des cavités grâce à des codes de calcul dédiés, et les problématiques technologiques que nous avons rencontrées pendant le développement des pièces de la ligne. Nous expliquerons notamment comment nous avons obtenu les formes de nos cavités, l'importance du réglage en fréquence et les développements technologiques entrepris pour le titanage.

Chapitre 2

Design du kladistron

Dans ce chapitre, nous présenterons notre travail de conception du premier kladistron, une version modifiée du klystron TH2166. Dans un premier temps, nous expliquerons le fonctionnement de nos principaux codes de simulations, et notamment de nos codes d'interaction. Nous nous intéresserons ensuite au klystron TH2166 de Thales avant d'explicitier la méthode de conception de la nouvelle ligne d'interaction.

2.1 Les codes de simulation de klystron

Nous avons utilisé et comparé les résultats de trois codes d'interaction afin de concevoir les cavités du kladistron.

2.1.1 AJ-Disk

AJ-Disk est un code unidimensionnel développé au Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) par Aaron Jensen à partir du code Japandisk, développé avec le langage C++[15]. Une version plus récente a été codée avec Java. Ce code utilise la modélisation de l'interaction entre les cavités et le faisceau avec des circuits électriques équivalents, en régime permanent. Le faisceau est quant à lui représenté soit par des anneaux de macrocharges de rayon constant soit par des rectangles (voir Figure 2.1). Nous pouvons distinguer quatre types de données d'entrée :

- Les données géométriques : rayon du tube de glissement et distances entre les cavités.
- Les données relatives au faisceau : rayon du faisceau (ou dimensions dans le cas d'un faisceau rectangulaire), fréquence du signal d'entrée f , tension cathode V_k et courant faisceau I_b . Dans la suite de notre étude, nous ne parlerons plus que de faisceaux circulaires.
- Les données relatives à l'interaction entre les cavités et le faisceau : $\frac{R}{Q}$, M , Q_e , Q_0 et fréquence.
- Les données relatives au calcul : le nombre de disques et d'anneaux composant le faisceau, le nombre de division de la période temporelle (*steps*, T) et le nombre d'itérations maximales (*Iterations* (MAX)).

Il est à noter que ce programme intègre la possibilité d'utiliser un faisceau simulé par un autre code. AJ-Disk peut également être utilisé avec Matlab afin de balayer plusieurs plages de paramètres de façon automatisée, et d'extraire des données de calcul.

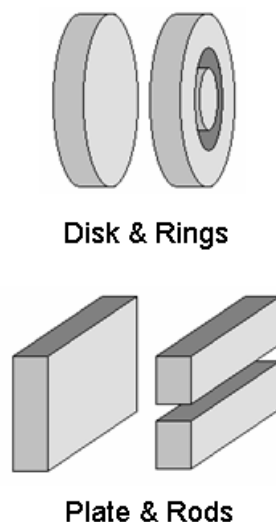


FIGURE 2.1 – Modélisation du faisceau d'électrons dans AJ-Disk

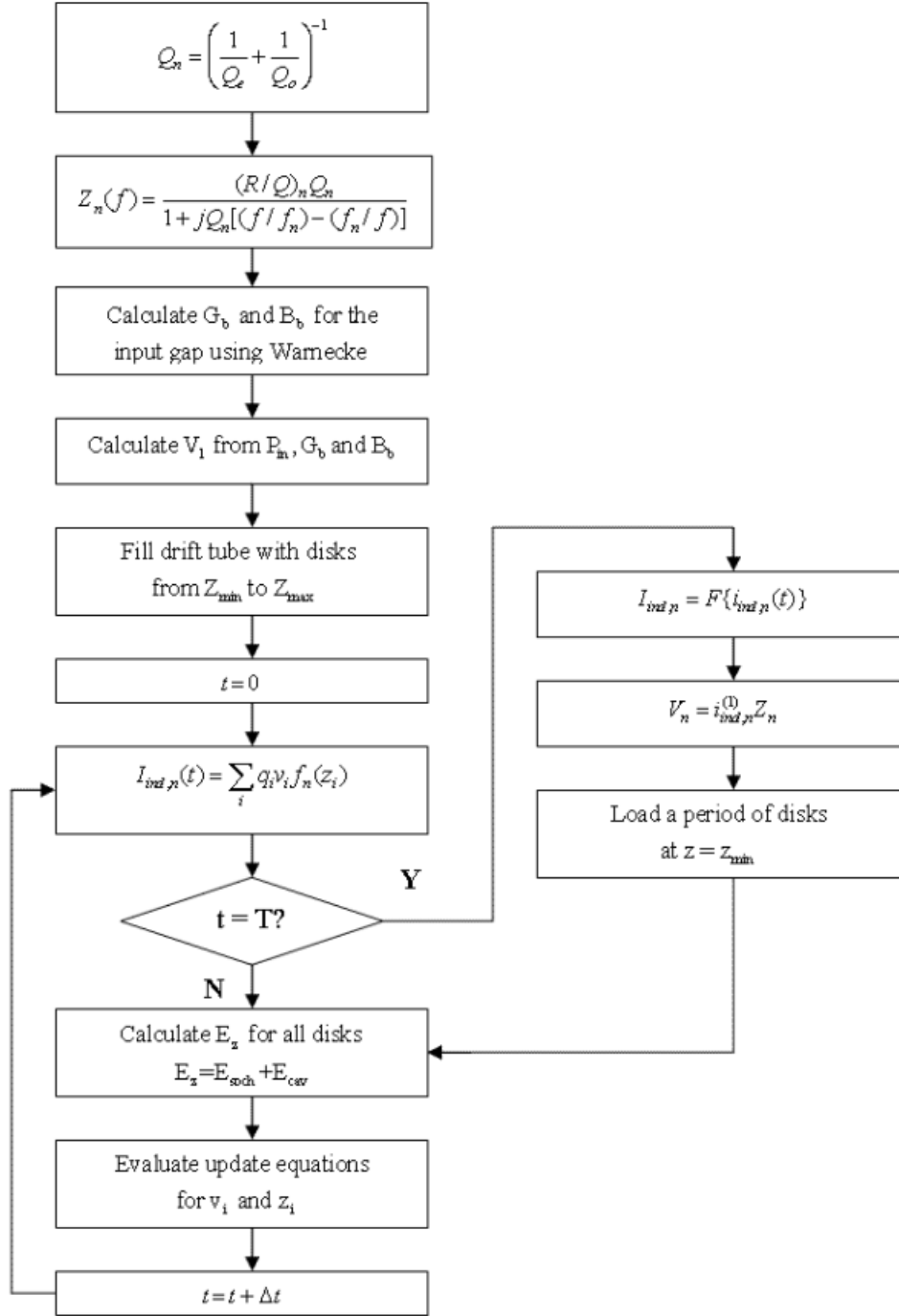


FIGURE 2.2 – Algorithme du programme AJ-Disk

Fonctionnement du programme

Dans un premier temps, le programme AJ-Disk calcule les différents paramètres de simulation : facteur de qualité global des cavités, impédances des cavités, conductance et susceptance de la cavité d'entrée, et la tension dans le gap de celle-ci.

Le faisceau, divisé en disques, est placé dans le tube de glissement, entre les cotes extrêmes (z) définies par l'utilisateur. Le pas de temps t et le nombre d'itérations sont initialisés à 0. Le programme calcule les contributions des cavités au courant de première harmonique, en sommant les éléments de courant des disques ; il estime pour cela l'effet du champ électrique sur les disques, en supposant que l'intensité du champ varie en suivant une fonction gaussienne, dont le maximum est au milieu du gap de la cavité considérée. Cette intensité dépend du facteur M .

Pour chaque pas, *steps*, d'une période de l'onde, T , et pour chaque disque, le programme calcule les contributions de chaque cavité au champ électrique et le champ électrique résultant de la charge d'espace, projetés sur l'axe du faisceau. Suivant l'équation du mouvement des électrons, la vitesse et la position des disques sont ensuite actualisées. Avec ces résultats, la première harmonique de courant est recalculée.

Lorsque la période de l'onde, T , est achevée, le programme calcule la transformée de Fourier des contributions des cavités au courant afin d'obtenir la composante fondamentale, ce qui permet d'obtenir de nouvelles valeurs des tensions dans les cavités, avec les impédances calculées au préalable.

Ces nouvelles valeurs des tensions sont comparées à celles du calcul précédent : si l'écart des valeurs est supérieur à l'erreur définie pour la convergence, le nombre d'itérations est incrémenté et le programme reprend à l'étape du calcul des champs électriques, avec ces valeurs de tension ; le paramètre temporel t est réinitialisé. Si le calcul a convergé, ou que le nombre d'itérations maximal est atteint, l'algorithme s'arrête.

Cet algorithme est résumé en Figure 2.2. Les valeurs finales d'amplitudes et de phases des tensions dans les cavités sont alors les dernières calculées. Ces valeurs permettent d'obtenir le rendement cinétique η_k , le rendement électrique η_e et le gain G .

Résultats des calculs et limites

Le programme AJ-Disk permet d'obtenir le diagramme d'Applegate des disques, la dispersion des vitesses longitudinales, et le courant faisceau de première et deuxième harmonique (voir Figure 2.3). Le gain en petit signal peut également être estimé.

AJ-Disk est un code unidimensionnel dont l'exécution est très rapide (de 1 à 2 minutes), ce qui permet de tester plusieurs architectures de klystrons afin d'estimer dans un premier temps les paramètres électromagnétiques.

Ces calculs ne tiennent pas compte des déplacements radiaux des charges ni de la géométrie de la structure. Les champs électriques utilisés dans les calculs, aux abords de cavités, sont de forme gaussienne et générés à partir des paramètres M , comme décrits au chapitre premier. Les résultats sont en outre basés sur l'hypothèse que le régime permanent est atteint.

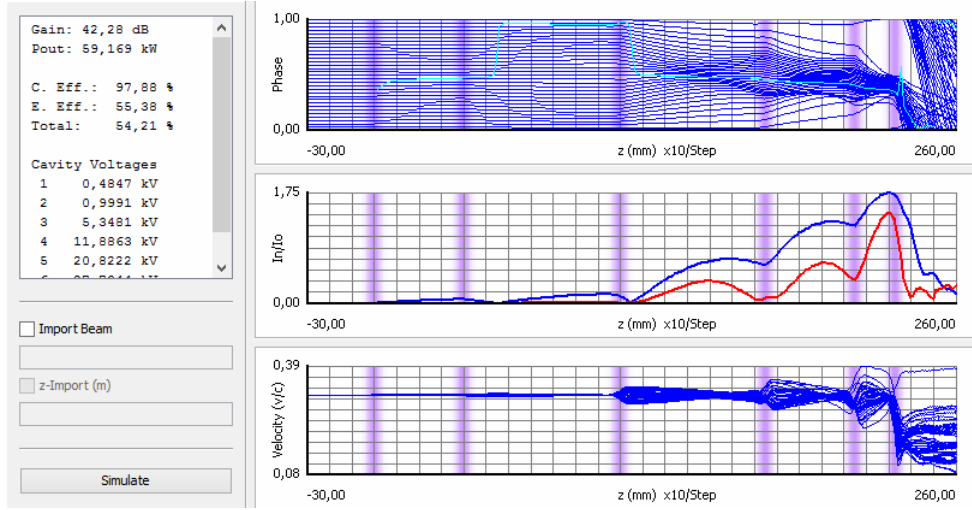


FIGURE 2.3 – Résultats de calculs du programme AJ-Disk

2.1.2 Klys2D

Le programme Klys2D, développé par le service modélisation numérique de Thales Electron Devices, est un code 2,5D utilisant un modèle superposant deux champs électromagnétiques, le champ de circuit, calculé en utilisant des méthodes similaires à AJ-Disk (interaction faisceau-cavité avec un circuit électrique équivalent), et un champ de sillage, calculé de la même façon que dans un code PIC (Particle-In-Cell)[11]. Les calculs des champs et des trajectoires de particules de toute la période temporelle considérée sont effectués cavité par cavité; les limites spatiales pour chaque cavité sont les demi-tubes de glissement précédent et suivant. Ainsi, les conditions d'entrée de chaque sous-domaine (cavité) sont les résultats, pour chaque pas de temps, des calculs effectués dans le sous-domaine précédent.

Les champs étant des fonctions périodiques du temps, ils sont décomposés en série de Fourier de l'ordre (nombre d'harmoniques) précisé par l'utilisateur. Le champ de circuit dans chaque cavité est calculé suivant une décomposition en terme $\alpha_i \vec{e}_i$ dans la base modale $(\vec{e}_i)_i$ (base des vecteurs propres associés aux modes propres de la cavité considérée).

Le champ de sillage est calculé en résolvant les équations de Maxwell en chaque nœud du maillage défini par l'utilisateur. Ces champs permettent de calculer les densités de charges et de courants en chaque nœud, puis de déterminer les vitesses et positions des électrons, modélisés par des anneaux. Cette modélisation est représentée en Figure 2.4.

La puissance radiofréquence transmise ou réfléchie dans la cavité d'entrée et évacuée ou réfléchie dans la cavité de sortie est paramétrée par des coefficients a et b , et reliés aux coefficients du premier mode des harmoniques (n) du champs de circuit et $\alpha_{n,1}$ et du courant induit dans le circuit équivalent $I_{n,1}$:

$$\begin{pmatrix} b \\ \alpha_{n,1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ I_{n,1} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Avec :

- La puissance incidente $P_i = \frac{a^2}{2}$
- La puissance réfléchie $P_r = \frac{b^2}{2}$
- Les coefficient m_{ij} liés au couplage du circuit avec le guide d'onde[11].

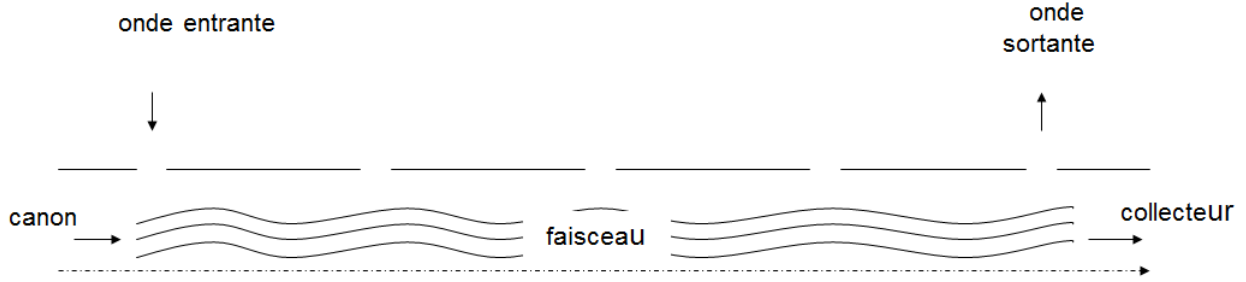


FIGURE 2.4 – Modélisation de l'espace d'interaction dans Klys2D[11]

Les paramètres d'entrée sont similaires à ceux de AJ-Disk ; on distingue également :

- Les données géométriques : rayon du tube de glissement, position des cavités le long de la ligne mais également les largeurs des gaps, les conditions aux limites géométriques (la distance entre le début de l'espace simulé et de la ligne d'interaction et la distance entre la fin de la ligne d'interaction et la fin de l'espace simulé), les variations du rayon du tube de glissement, notamment avant le collecteur.
- Les données relatives au faisceau : rayon du faisceau dans le tube et au niveau de la cathode, fréquence du signal d'entrée f , tension cathode V_k , courant faisceau I_b et le nombre d'harmoniques de courant à calculer.
- Les données relatives à l'interaction entre les cavités et le faisceau : $\frac{R}{Q}$, Q_e , Q_0 et fréquence.
- Les données relatives au calcul : les paramètres de maillage du tube de glissement et des gaps ($nrow$, $rtrans$, $ngap$, $nlap$, $zglis$ et $ztrans$), le nombre de disques et d'anneaux composant le faisceau, le nombre de division de la période temporelle ($steps$, T), le nombre d'itérations maximales ($Iterations (MAX)$), mais également la précision (ϵ) requise pour la convergence des calculs.

Klys2D permet aussi l'utilisation de paramètres supplémentaires propres aux cavités couplées, que nous n'aborderons pas dans notre étude.

Conjointement à Klys2D, les développeurs et ingénieurs calcul de Thales Electron Devices ont développé un code de simulation de canon à électron (Optic2D) et un code de simulation de bobines de focalisation (BOBCAN). Les résultats de calcul de ces codes peuvent être utilisés dans Klys2D.

Algorithme du programme

Pour chaque cavité, dans l'ordre de la ligne, Klys2D initialise d'abord les paramètres de simulation (les densités de charge ρ_0 , les densités de courant des n harmoniques J_n et les coefficients du premier mode des champs de circuit $\alpha_{n,1}$) à 0, sauf pour la cavité d'entrée. Les champs de sillage sont calculés en résolvant les équations de Maxwell aux nœuds. A chaque pas de temps, et jusqu'à la fin de la période temporelle, les charges sont injectées dans le domaine. Leurs positions et vitesses sont calculées avec ces champs de sillage ; ces résultats permettent de modifier les densités de courant J_n , les densités de charges et le courant injecté dans le circuit équivalent de la cavité considérée. Le pas de temps est alors indexé et de nouvelles positions et vitesses des électrons sont calculées, jusqu'à ce que les charges aient toutes traversé le domaine. Les coefficients $\alpha_{n,1}$ sont déduits des densités de courant J_n finales et des propriétés de la cavité (Q_0 , $\frac{R}{Q}$ et fréquence). Les puissances échangées entre le circuit de la cavité et le faisceau et les pertes sont alors estimées. Si la différence entre ces nouvelles valeurs et celles précédemment calculées est supérieure au critère de convergence, les champs de sillage aux nœuds sont recalculées avec les dernières valeurs des densités de courant et de charges.

Cet algorithme est schématisé en Figure 2.5.

Résultats des calculs et limites

Ce programme permet d'obtenir le rendement d'interaction du klystron et le gain, mais également les pertes dans chaque cavité. Les diagramme d'Applegate, le courant faisceau (jusqu'à 5 harmoniques) le long de la ligne d'interaction et la dispersion des vitesses peuvent également être tracés, à la manière du logiciel AJ-Disk. En outre, les anneaux composant le faisceau simulé peuvent être représentés en 2D au cours d'une période de l'onde, au pas de temps prédéfini (*ncliches*). En balayant plusieurs valeurs de puissance RF d'entrée avec le programme, nous pouvons tracer le graphe de la puissance de sortie (ou le rendement) en fonction de la puissance d'entrée, afin d'identifier la puissance de fonctionnement. Dans le cadre de la conception de klystrons, nous pouvons faire varier deux paramètres simultanément, suivant une table de valeurs prédéfinies.

Le temps d'exécution est légèrement plus long que celui d'AJ-Disk, de 1 à 3 minutes par klystron, ce qui reste très efficace pour tester de nombreuses architectures. La possibilité d'automatiser partiellement ces tâches est un atout majeur. Nous notons que les outils développés à Thales bénéficient d'un suivi certain et qu'un service est dédié à leur amélioration. La possibilité d'intégrer une carte de champ magnétique permet le dimensionnement simultané de l'optique électronique et de l'espace d'interaction.

Ces calculs ne tiennent pas compte de la géométrie globale des cavités mais seulement de la taille des gaps et des variations éventuelles des rayons du tube de glissement. Les calculs sont effectués en régime permanent, comme avec le logiciel AJ-Disk, et ne permettent donc pas de conclure sur la capacité du klystron à atteindre ce régime.

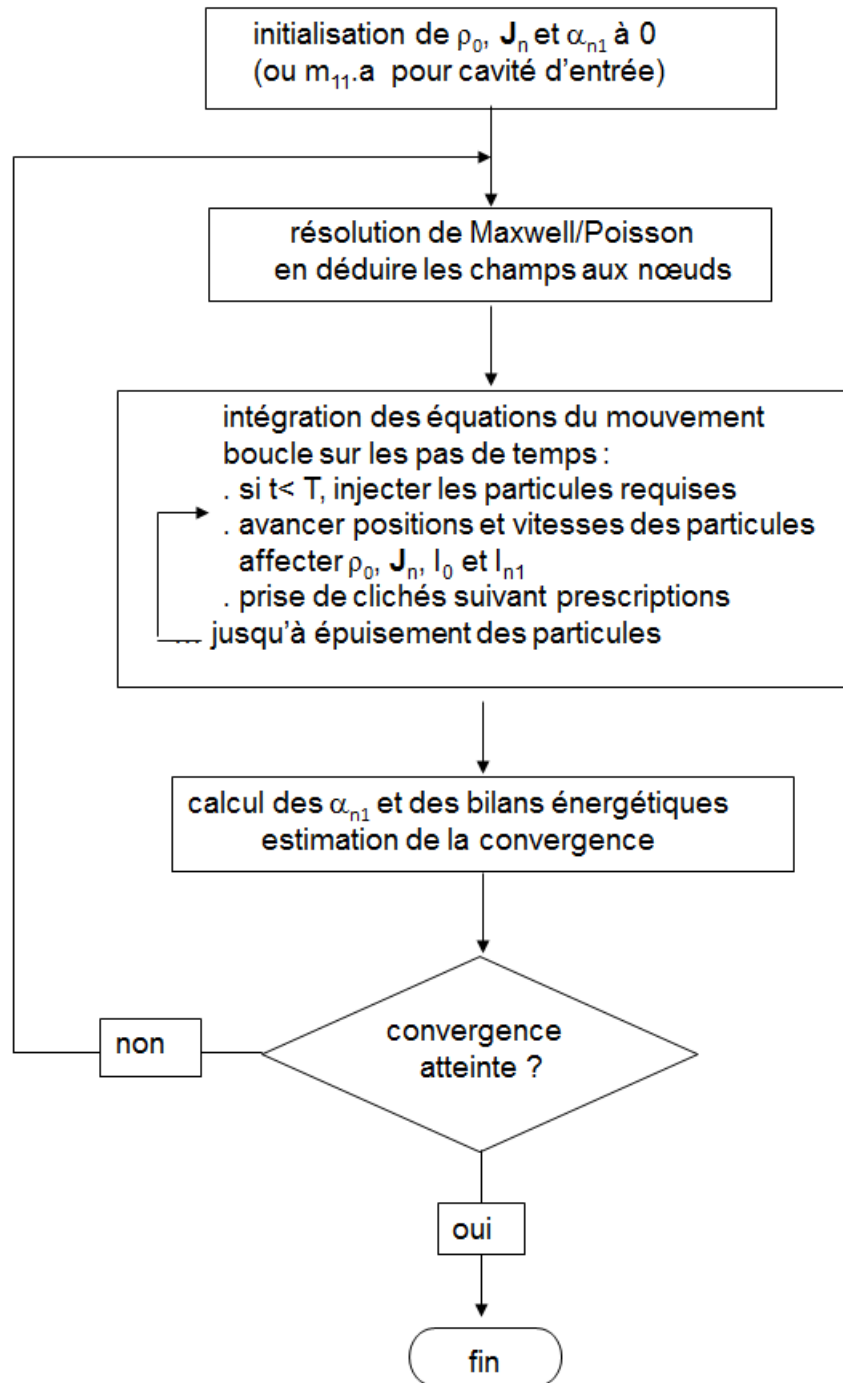


FIGURE 2.5 – Algorithme de Klys2D[11]

2.1.3 MAGIC2D

MAGIC2D est un code électromagnétique Particle-In-Cell (PIC) ; ce code 2.5D temporel utilise une méthode de calcul à différences finies. Ce logiciel permet la simulation de différents phénomènes physiques où des champs électromagnétiques interagissent avec des particules au cours d'une période de temps donnée[12]. Il a été développé par l'entreprise américaine d'armement Orbital ATK (Alliant Techsystems). Ce code propose un vaste champ d'applications[38], des calculs de physique des plasmas aux simulations de tubes électroniques.

Dans le cas d'une simulation de l'espace d'interaction d'un klystron, il est nécessaire de renseigner toutes les données relatives au tube :

- La géométrie complète de la structure, en deux dimensions, en précisant la condition de symétrie de révolution.
- Les paramètres électromagnétiques des cavités, tels que la fréquence, les facteurs de qualité et de couplage extérieur Q_0 et Q_{ext} et le facteur $\frac{R}{Q}$; ces paramètres sont assortis de variables SHIM et sigma, que nous expliciteront par la suite.
- Les matériaux constituant la ligne d'interaction, ainsi que les espaces vides et les conditions aux limites.
- Les données du faisceau, simulé ou importé.
- Les données du champ magnétique, simulé ou importé.
- Les données du signal d'entrée, telles que la fréquence et la puissance, mais aussi la fonction rampe permettant d'atteindre le régime nominal.
- Les données de calcul, comme le maillage, le pas de temps et la durée d'exécution du programme.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les valeurs de fréquence dépendent de la géométrie des cavités et les valeurs de Q_0 dépendent des matériaux et de la géométrie. La géométrie des cavités dans MAGIC2D est définie de façon très approximative, et les valeurs de ces paramètres électromagnétiques sont a priori différentes de celles prévues par l'utilisateur. Aussi, les calculs temporels de MAGIC2D doivent être précédés d'une étape de "réglage des cavités" ; le programme est alors exécuté en "test à froid" (*Cold Test*). Pour chaque cavité, il s'agit d'ajuster les termes SHIM et de sigma afin d'atteindre les valeurs respectivement de fréquence et de Q_0 ; le paramètre SHIM correspond à une légère déformation de la cavité et le paramètre sigma à la conductivité d'une partie du volume de la cavité, définie par l'utilisateur (en mauve sur la Figure 2.9, en bas). Une fois que les paramètres électromagnétiques ont été ajustés, le programme peut être exécuté "à chaud" (*Hot Test*).

Le code MAGIC2D est un code de calculs par différences finies. Il utilise un formalisme de "Yee cell", c'est à dire une superposition de deux cartes de champs décalés (une carte de champ magnétique et une carte de champ électrique) ; chaque maille comprend une valeur de champ sur chaque arête. Les cartes sont décalées de façon à ce qu'une valeur de champ électrique, orthogonale, soit placée au milieu d'une maille de champ magnétique, et inversement (une valeur de champ magnétique, orthogonale, est placée au milieu de chaque maille du champ électrique). Ce formalisme assure les conditions, pour tout vecteur ou scalaire u , $\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} u) = \vec{0}$ et $\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{u}) = 0$; elle transforme également les opérateurs ∇ et les dérivées partielles par rapport au temps ∂t en matrices composées de 0, -1 et 1[12]. Les cartes de champs sont ainsi générées sur le maillage paramétré par l'utilisateur.

Algorithme du programme

MAGIC2D génère tout d'abord la géométrie de l'espace d'interaction, les segments d'introduction et d'évacuation des électrons, et le maillage. Sont ensuite appliqués les matériaux des parois et les cartes de champs magnétiques extérieurs. Le programme génère l'antenne d'entrée et le signal associé. Il importe enfin le faisceau s'il vient d'un fichier annexe ou le produit en fonction des données de l'utilisateur. Le programme de simulation proprement dit peut alors s'exécuter.

Ce programme applique à chaque pas de temps les équations de Maxwell aux champs, en utilisant le formalisme décrit précédemment. La quantité de mouvement $\vec{p}$, puis la position des électrons $\vec{x}$, et enfin le courant $\vec{J}$ sont calculés. Il est à noter que le champ magnétique, la quantité de mouvement et le courant sont calculés à un pas de temps intermédiaire (voir Figure 2.6). Le programme s'arrête lorsque la durée de l'exécution du programme est atteinte.

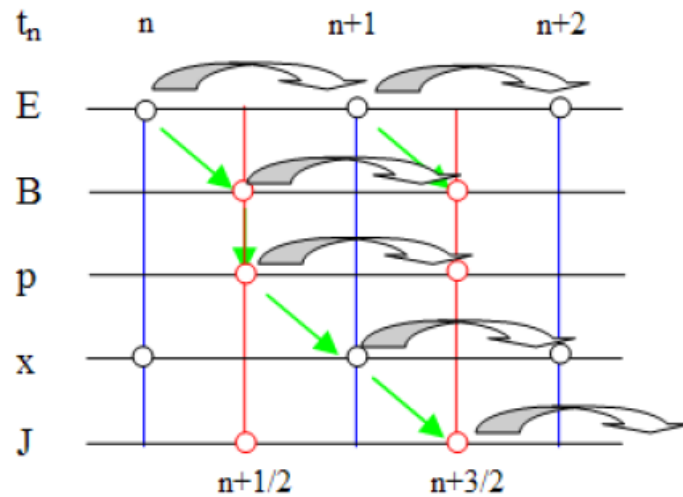


FIGURE 2.6 – Ordre des calculs de MAGIC2D[12]

Résultats des calculs et limites

Le programme MAGIC2D peut générer, à une fréquence donnée, la dispersion des vitesses des électrons et le courant du faisceau selon l'axe du tube, mais également les cartes des champs électrique et magnétique ; nous pouvons également obtenir la puissance de sortie et le gain en fonction du temps, ce qui permet d'étudier le régime transitoire du klystron. Il est possible d'utiliser une carte de champ magnétique ou un faisceau créé par ailleurs dans nos simulations. Plusieurs simulations avec des puissances de signal d'entrée sont nécessaires pour obtenir la courbe de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée, et ainsi la puissance de saturation.

MAGIC2D étant un code temporel, les données du faisceau et des champs sont disponibles en fonction du temps ; ces informations permettent de valider la viabilité de l'architecture du klystron. Malgré les approximations géométriques, il est possible de tester différentes formes de cavité.

Le programme calcule à chaque pas de temps d'environ 100ps (sur un temps total de 400ns) les équations de Maxwell sur chacune des mailles de la géométrie et détermine les positions et vitesses des électrons ; la durée des simulations est en conséquence très longue, jusqu'à plusieurs dizaines d'heures, en fonction de la puissance de calcul disponible. Il n'est par ailleurs pas possible à l'heure actuelle de travailler à partir d'un cluster de calculs.

2.1.4 Le champ magnétique et le faisceau d'électrons dans les codes de simulation

J'ai dans un premier temps effectué des simulations avec AJ-Disk, où les électrons sont modélisés par des disques de rayons uniformes le long de la ligne d'interaction ; le champ magnétique n'est donc pas intégré au programme. Par la suite, j'ai travaillé avec Klys2D et MAGIC2D à champ magnétique constant : ce champ magnétique, d'une valeur de 1760 Gauss, correspond à 2.3 fois le champ de Brillouin, suivant une règle de conception en vigueur à Thales. Le faisceau "laminaire" utilisé dans Klys2D et MAGIC2D, lors de cette première étape, correspond au faisceau dont les électrons ont une vitesse radiale nulle au début de la ligne d'interaction. Ce faisceau est généré par le code d'interaction considéré (Klys2D ou MAGIC2D).

Pour affiner nos simulations, j'ai ensuite intégré d'une part les valeurs "réelles" du champ magnétique mesuré lors des tests du klystron TH2166 (voir Figure 2.7), et d'autre part le faisceau d'électrons issu d'une simulation du canon du klystron avec le programme Optic2D (de Thales). Dans la suite de notre étude, en l'absence d'indication contraire, les champs magnétiques et faisceaux d'électrons utilisés seront indiqués suivant les deux configurations présentées en table 2.1 ; ces configurations sont communes aux simulations du klystron TH2166 et du kladistron.

Configurations	Faisceau	Champ magnétique
1	laminaire	uniforme
3	Optic2D	valeurs réelles

TABLE 2.1 – Faisceaux et champs magnétiques utilisés lors de nos simulations

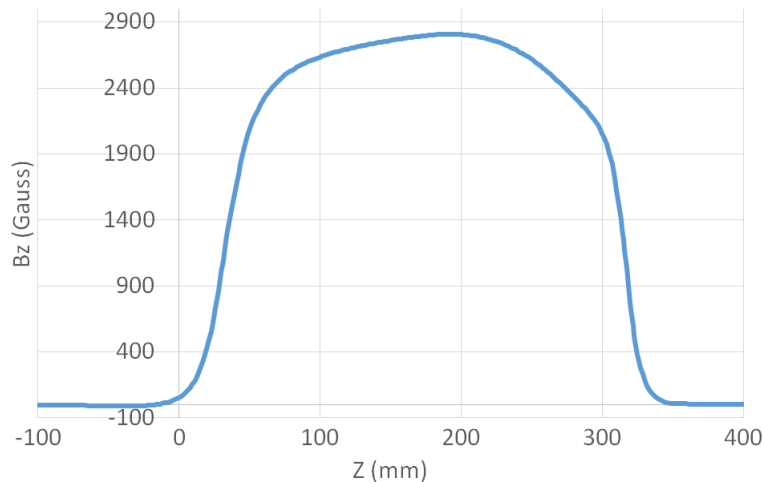


FIGURE 2.7 – Champ magnétique réel selon l'axe faisceau du klystron TH2166

2.2 Tests et comparaison des codes d'interaction dans le cas du klystron TH2166

Les principaux paramètres que nous avons retenus pour la validation des codes sont le rendement à saturation, le gain en petit signal et la dynamique du faisceau le long de la ligne d'interaction. Ces critères nous ont permis de comparer les résultats des codes de simulation avec les données issues des tests afin de déterminer leur cohérence et leur pertinence dans le cadre du développement du kladistron.

2.2.1 Régime permanent du klystron TH2166

Rendement du klystron à saturation

En Figure 2.8 sont présentées les courbes du rendement du klystron TH2166 en fonction de la puissance d'entrée, dans nos trois codes de calcul (AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D), et dans trois séries de mesures effectuées entre 2004 et 2007 à Thales. Les simulations ont été effectuées suivant les configurations 1 et 3 (voir paragraphe 2.1.4). Les courbes présentées sur la Figure 2.8 sont caractéristiques du comportement d'un klystron en fonction de la puissance d'entrée, avec, dans un premier temps, une augmentation linéaire, puis un seuil de saturation.

Nous constatons que la puissance correspondant à la saturation est très variable selon les codes de calcul et configurations utilisés, de 0,2w à 2,5w. Cette puissance de saturation dépend en effet du modèle employé et de la forme du faisceau, et notamment de son diamètre. Le rendement à saturation, compris entre 46% et 56%, est également très variable; nous notons qu'il est plus élevé dans les calculs effectués en configuration 3, et avec le programme MAGIC2D, qui correspondent aux conditions et aux modèles de calcul les plus réalistes.

Les résultats de calculs présentent des rendements et puissances d'entrée à saturation cohérents avec les tests effectués lors du conditionnement des klystrons TH2166 (en bleu sur la Figure 2.8); les rendements mesurés alors étaient compris entre 46% et 51%. Ces observations nous montrent que la modélisation d'un klystron ne permet pas de prévoir son comportement exact en fonction de la puissance d'entrée, mais de déterminer une plage de valeurs de résultats attendus.

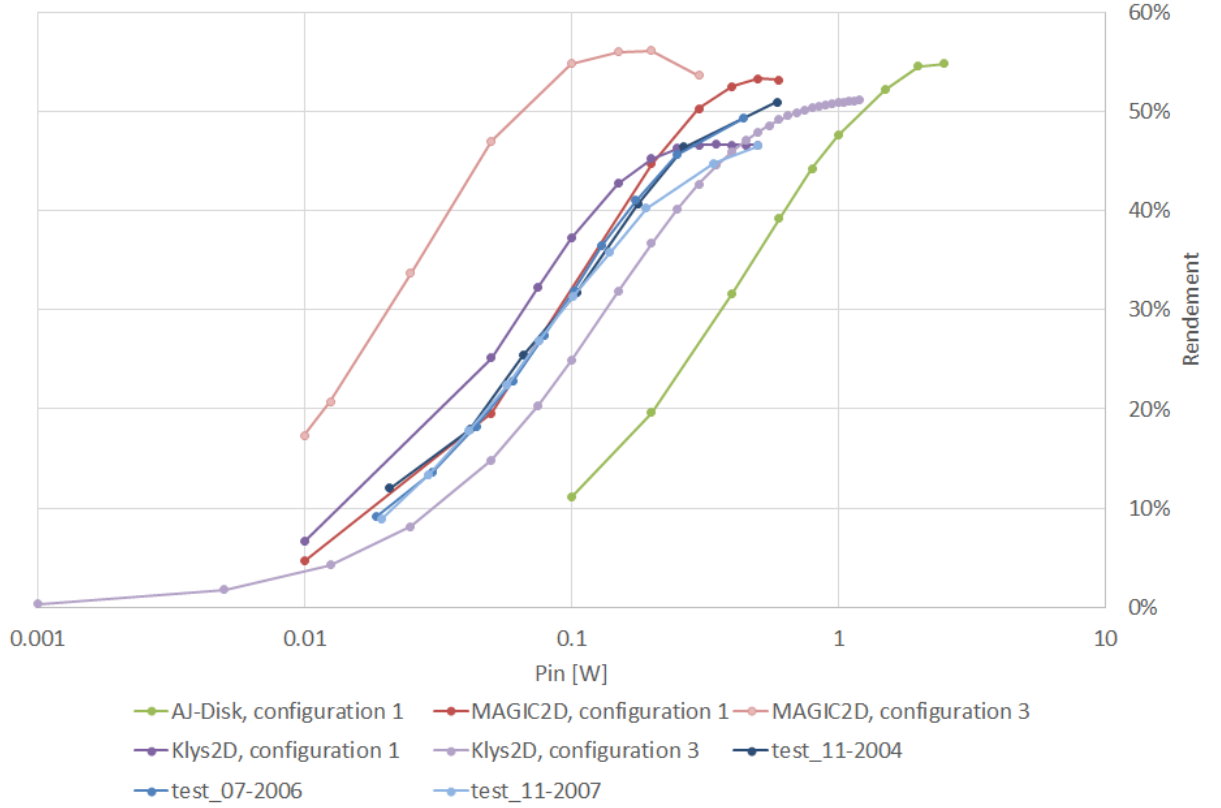


FIGURE 2.8 – Rendement du klystron TH2166 en fonction de la puissance d'entrée (échelle logarithmique) - Mesures expérimentales et simulations

Dynamique du faisceau d'électrons

En Figure 2.9 sont présentés deux simulations en configuration 3 du faisceau d'électrons le long de la ligne d'interaction du klystron TH2166, en régime permanent ; en haut, le résultat de Klys2D ; en bas, le résultat de MAGIC2D. Les faisceaux sont représentés dans le plan $(0, \vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$.

Sur le premier graphe, les cavités sont représentées par des espaces et les vitesses des macrocharges sont indiquées en couleurs (β). La formation des bunch apparaît clairement après la cinquième cavité, avec une dispersion importante des vitesses (de $\beta = 0.18$ à $\beta = 0.4$). Après la dernière cavité, un fort ralentissement des particules est visible (entre $\beta = 0.008$ et $\beta = 0.3$).

Sur le second graphe, les cavités sont représentées entièrement en deux dimensions. La formation des bunch apparaît clairement après la quatrième cavité, les taches plus sombres indiquant une plus importante densité de charges. Ces deux simulations, effectuées avec des modèles différents, permettent d'obtenir des faisceaux comparables en régime permanent.

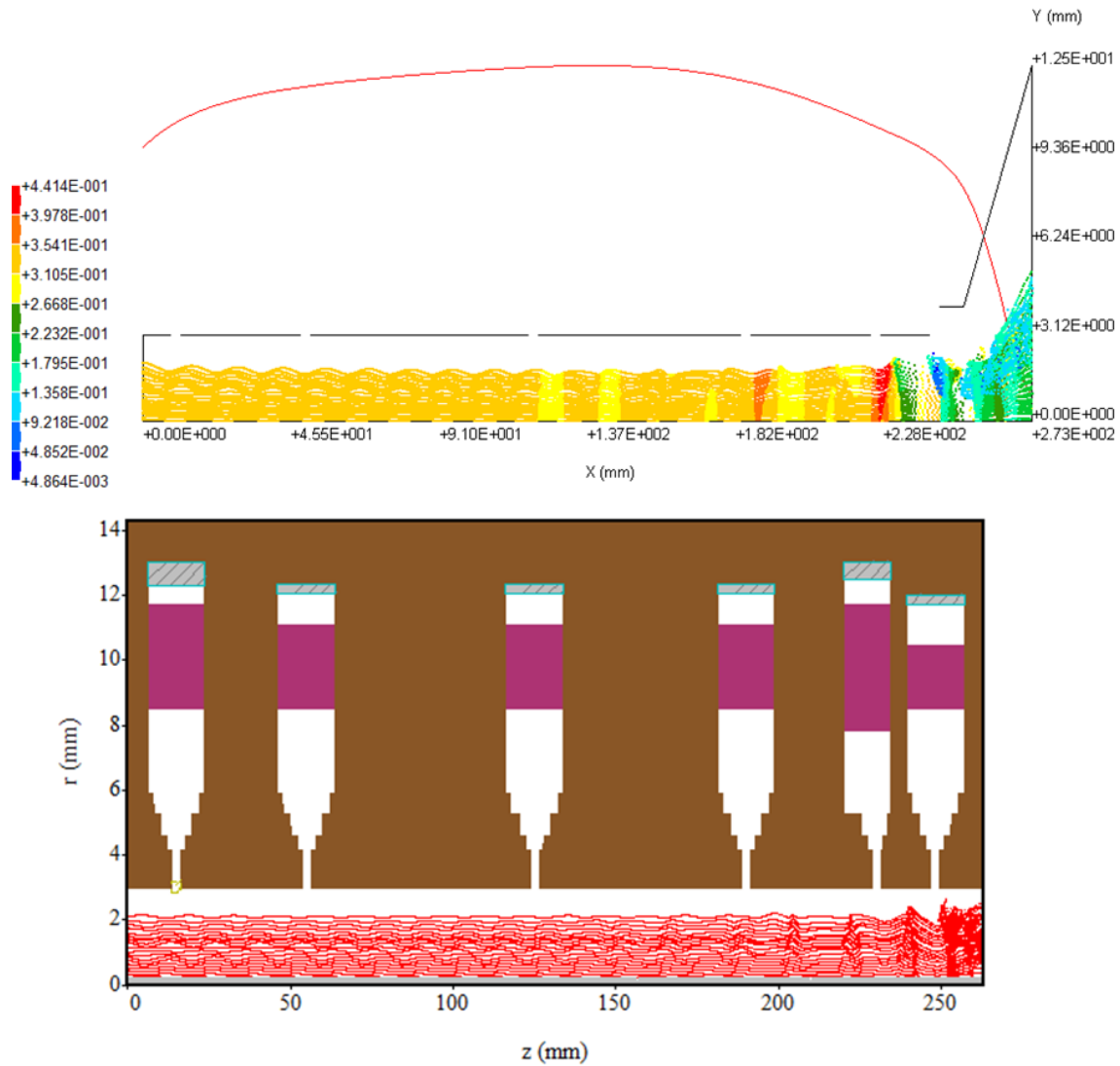


FIGURE 2.9 – Faisceau d'électrons le long de la ligne d'interaction du klystron TH2166 - Simulations Klys2D (en haut) et MAGIC2D (en bas), configuration 3

Courant du faisceau dans l'espace d'interaction

Sur la Figure 2.10 sont tracées les graphes du courant faisceau de première harmonique le long de l'axe du tube avec les trois codes d'interaction (AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D), dans les configurations 1 et 3. Les gaps des cavités sont indiqués en pointillés ; après chaque cavité, le courant connaît une augmentation importante, suivie d'une légère inflexion avant la cavité suivante. L'allure des courants de première harmonique est similaire quelque soit le code employé ou la configuration choisie. La modulation du courant dépend de la variation de la densité de charge, et donc de la forme du faisceau et de la qualité du bunching ; les légères variations de l'intensité et les positions des extrema locaux le long de la ligne sont donc dûs à la modélisation du faisceau.

Ce graphe permet de rendre compte de l'effet des cavités sur le bunching des électrons. Une intensité de courant faisceau élevée au niveau de la cavité de sortie, d'environ 1,8, est le signe d'une mise en paquets des électrons efficace.

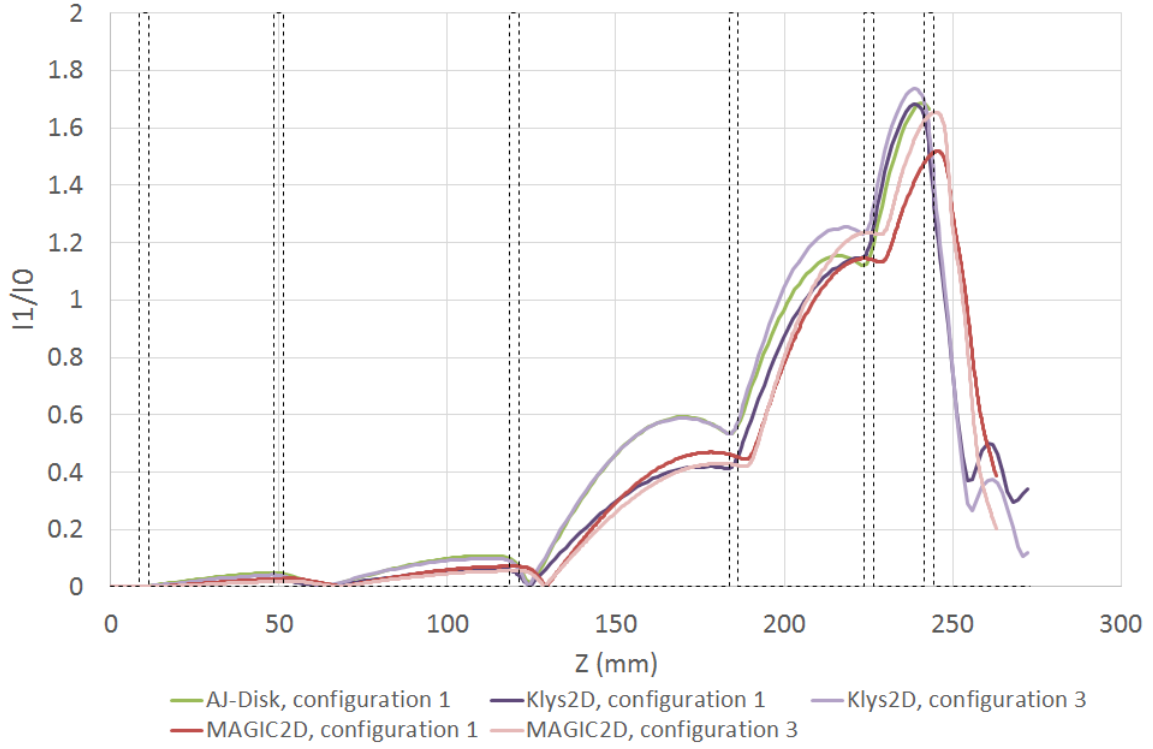


FIGURE 2.10 – Courants faisceau de première harmonique - résultats de simulations AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D, en configuration 1 et 3

2.2.2 Régime transitoire du klystron TH2166

Comme nous l'avons vu, à la différence d'AJ-Disk et de Klys2D, MAGIC2D est un code temporel, et peut donc être utilisé pour l'étude du régime transitoire. Sur la Figure 2.11 est tracée la puissance de sortie en fonction du temps dans une simulation du klystron TH2166, en configuration 1 et 3 ; la saturation est atteinte dans chaque cas. Le régime transitoire est dans chaque cas d'une durée d'environ 120 nanosecondes. La puissance maximale est atteinte de façon monotone, sans oscillation.

La comparaison des programmes de simulation dans le cas du klystron TH2166 nous a permis d'évaluer la dispersion des résultats des calculs utilisés ultérieurement pour la ligne d'interaction du kladistron. Le rendement à saturation du tube électronique d'origine mesuré lors des tests est paradoxalement plus proche des valeurs simulées avec les programmes Klys2D et MAGIC2D dans la configuration simplifiée 1, que la plus réaliste 3, qui intègre un champ magnétique réaliste et un faisceau issu de la cathode et généré par le programme Optic2D.

Outre le rendement, nos simulations ont également permis d'obtenir, dans les hypothèses de nos modèles, la dynamique du faisceau d'électrons, la modulation des courants de première harmonique et le comportement du faisceau lors du régime transitoire.

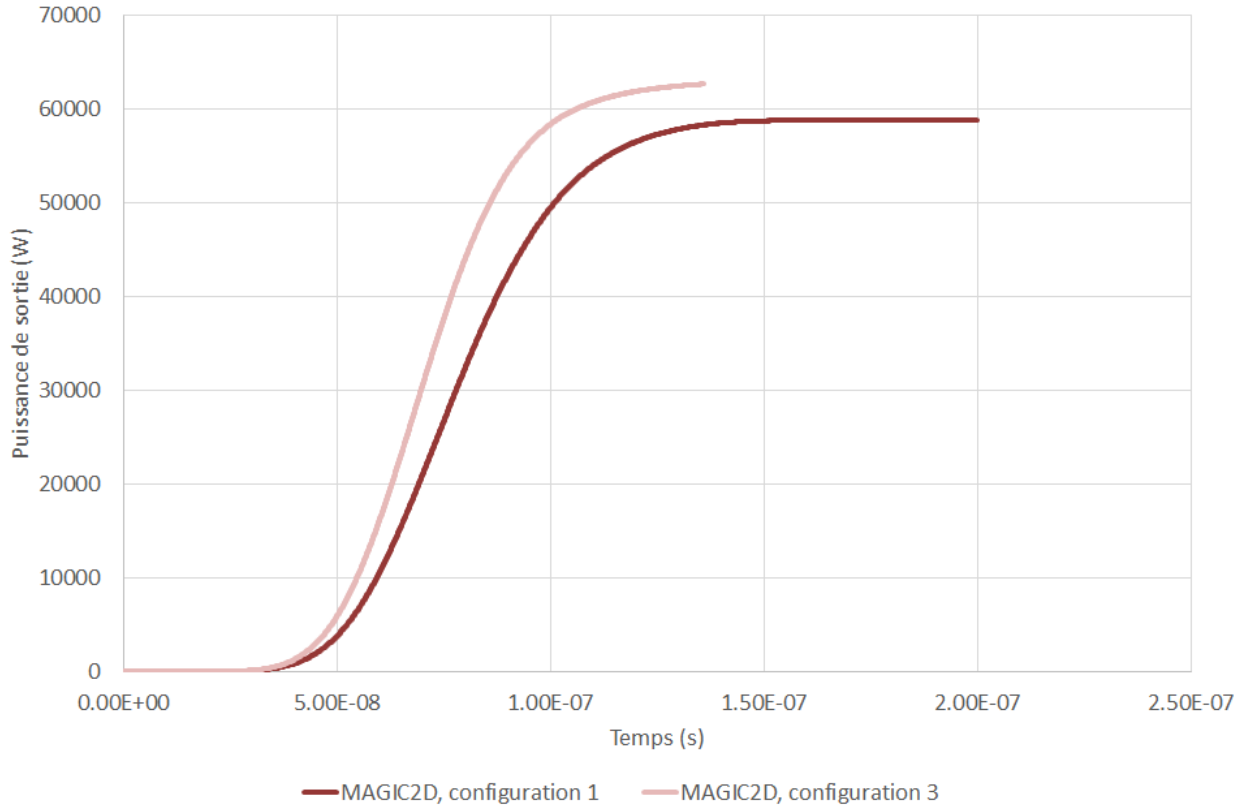


FIGURE 2.11 – Puissance de sortie du klystron TH2166 en fonction du temps, dans les configurations 1 et 3 - simulations MAGIC2D

2.3 Conception de la ligne d'interaction du kladistron TH2166

Lors de la conception de notre kladistron, j'ai eu pour priorité d'augmenter le rendement d'interaction, en ajoutant des cavités et en modifiant leurs paramètres. J'ai également veillé à améliorer le groupement des électrons en paquets et à lisser l'allure du courant faisceau le long de la ligne d'interaction.

Cette étape s'est déroulée en deux phases. La première a été le choix d'une architecture globale, avec la détermination du nombre de cavités, des facteurs de qualités, des paramètres $\frac{R}{Q}$ et des facteur Q_e des cavités. Lors de la deuxième phase, j'ai ajusté les fréquences et les longueurs de glissements de l'espace d'interaction afin d'améliorer le rendement et de préparer l'intégration de la ligne dans la structure du klystron TH2166.

2.3.1 Choix des paramètres électromagnétiques des cavités

Comme nous l'avons vu précédemment, les paramètres électromagnétiques des cavités sont leurs fréquences, le facteur de qualité Q_0 , le coefficient $\frac{R}{Q}$, et, dans le cas des cavités d'entrée et de sortie, le coefficient Q_e . Ces paramètres sont avant tout choisis de façon à optimiser la mise en paquets des électrons, ce qui permet l'amélioration du rendement. Dans un second temps, la stabilité en fonctionnement du klystron est estimée d'une part avec la réponse en petit signal du tube et d'autre part avec la simulation du klystron en régime transitoire. Enfin, nous veillons à ce qu'il n'y ait pas d'électrons réfléchis.

Nombre de cavités et longueurs de glissement

Notre démarche de conception a débuté par l'ajout d'un nombre de cavités donné. Cette première mise en œuvre expérimentale du principe du kladistron implique en effet la fabrication et l'assemblage d'un minimum de 12 cavités très faiblement couplées au faisceau, contre 6 dans le tube d'origine. Plusieurs designs de lignes, jusqu'à 19 cavités, ont été étudiés ; j'ai par ailleurs vérifié que les longueurs de glissement entre cavités étaient suffisamment importantes pour prévenir le couplage entre les cavités. Ce couplage est défini dans nos calculs comme le décalage de 500 kHz ou davantage entre le cas d'une cavité isolée et le cas de deux cavités de fréquence de résonance proches ; la différence entre ces fréquences est inférieure à 2 MHz. Ce critère de décalage en fréquence correspond à notre erreur de mesure radiofréquence.

Nos calculs COMSOL ont révélé que nos géométries exigent une distance minimale de 9mm entre le milieu de cavités successives (voir Table 2.2), afin de répondre au critère décrit ci-dessus. Au-delà de 9mm, la valeur de la fréquence de la cavité de référence correspond à celle calculée de façon isolée, à 500 kHz près. La longueur totale de la ligne ne pouvant excéder 233mm, cette règle implique qu'il ne peut y avoir plus de 27 cavités. Nous avons arbitrairement fixé le nombre de cavités à 16 afin de proposer un premier design de kladistron réalisable dans le temps imparti.

Distance (mm)	Fréquence (MHz)
6.5	4965.7
7.0	4965.9
7.5	4966.0
8.0	4966.0
9.0	4966.1
10.0	4966.1

TABLE 2.2 – Fréquence d'une des cavités du kladistron en fonction de la distance entre deux cavités consécutives - résultats de calculs COMSOL

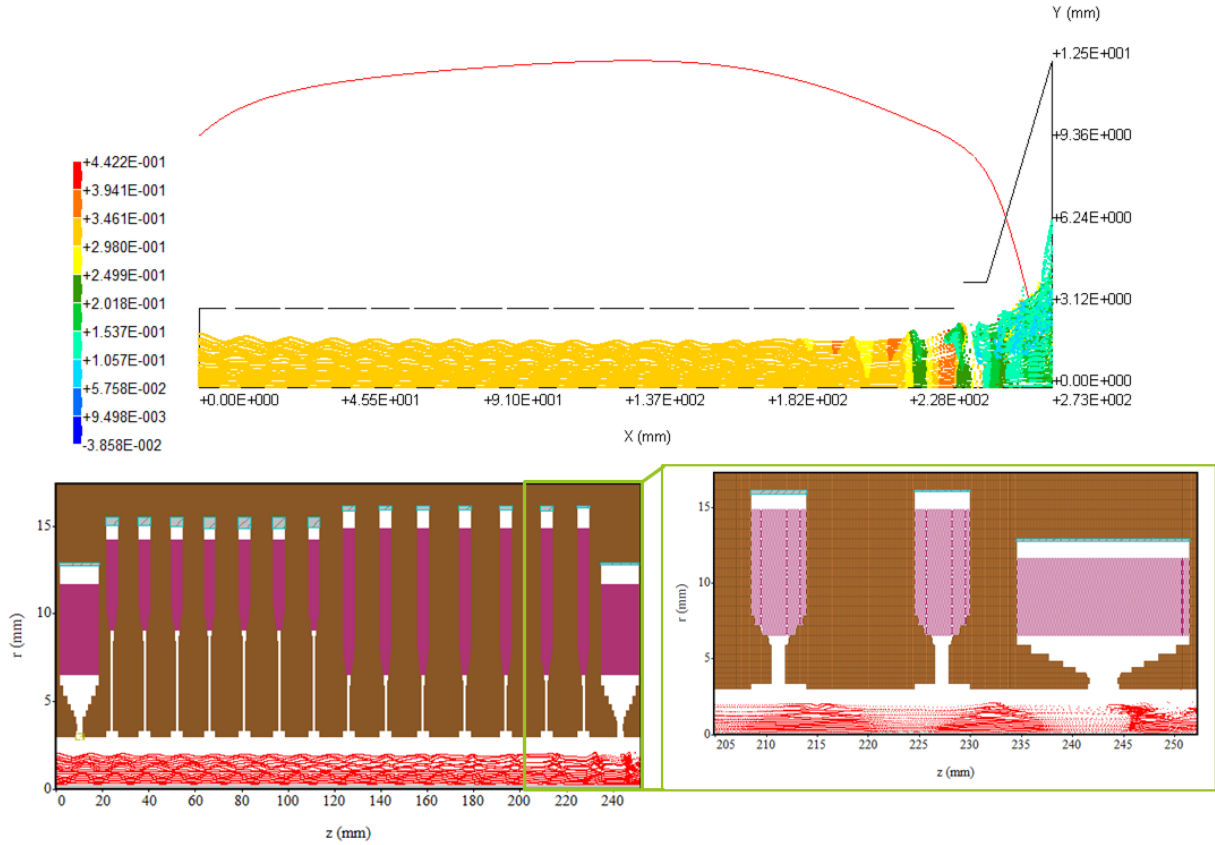


FIGURE 2.12 – Faisceau d’électrons dans la ligne d’interaction du klandistron - Simulations Klys2D et MAGIC2D, configuration 3

L’interaction faisceau/cavité

L’idée dominante dans l’étape de conception du klandistron a été l’amélioration de la mise en paquets des électrons. Les codes de calcul utilisés permettent le suivi de la trajectoire des électrons sur une période en régime permanent, ou sur une durée précisée par l’utilisateur en régime transitoire. Sur la Figure 2.12 sont présentés les faisceaux d’électrons dans les simulations Klys2D (en haut) et MAGIC2D (en bas). Nous constatons sur cette Figure que la mise en paquets des électrons est réalisée de façon légèrement plus nette et progressive que dans le cas du klystron TH2166 (voir Figure 2.9).

Afin d’obtenir un bunching progressif des charges, les cavités d’un klandistron doivent être faiblement couplées au faisceau d’électrons. De plus, le facteur de qualité de chaque cavité doit être minimisés, afin de réduire l’énergie stockée et les pertes par effet Joule. Par ailleurs, nous avons constaté très tôt grâce à nos simulations MAGIC2D que l’énergie échangée entre le faisceau et les cavités devait être très faible afin de prévenir toute auto-oscillation des cavités. Un gain trop élevé, c’est à dire supérieur à 60dB à saturation, empêche en effet notre klystron d’atteindre un régime permanent (voir Figure 2.13). Cette architecture à 19 cavités, développée au début de notre projet, reprenait les caractéristiques des cavités du klystron TH2166 ; en dépit d’une mise en paquets efficaces des électrons, la puissance de sortie ne se stabilise pas au cours du temps dans cette simulation de klystron.

Le choix des paramètres Q_0 et $\frac{R}{Q}$ a également obéi à des contraintes matérielles : comme nous le voyons ci-après, le facteur de qualité est en effet lié à la conductivité des matériaux et le paramètre $\frac{R}{Q}$ est principalement influencé par la taille des gaps des cavités. Il a donc été nécessaire d'opérer plusieurs cycles de conception des cavités (choix de paramètres électromagnétiques, vérification de la stabilité en régime transitoire, choix de la géométrie et des matériaux, vérification de la faisabilité des pièces et de leur intégration dans la ligne d'interaction) afin d'obtenir les paramètres définitifs.

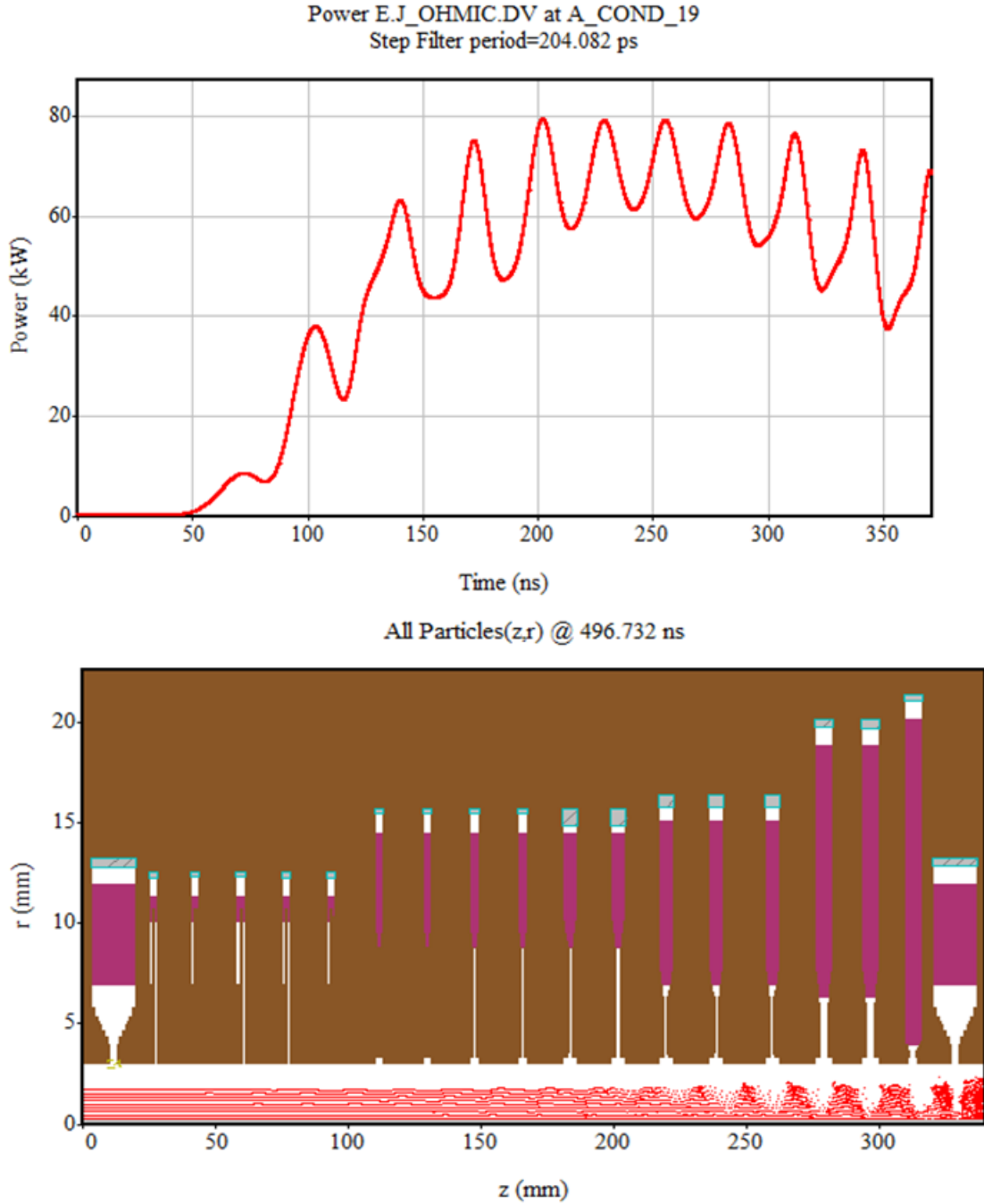


FIGURE 2.13 – Puissance de sortie en fonction du temps - faisceau d'électrons dans un glissement de kladistron ; design préliminaire à 19 cavités, non retenu - Simulation MAGIC2D

Sur la Figure 2.14 est présentée la courbe de la puissance de sortie obtenue dans MAGIC2D en fonction du temps, avec le design définitif du kladistron, à saturation (à une puissance d'entrée de 25mW). Nous observons que la puissance de sortie se stabilise à environ 260ns, à une valeur de 64,8kW, ce qui correspond à un rendement de 58%. D'après le modèle intégré dans le logiciel MAGIC2D, cette architecture permet donc d'atteindre le régime permanent du kladistron.

Comme nous l'avons vu précédemment, le bunching des électrons est lié à la modulation du courant faisceau le long de ligne d'interaction par la variation de la densité de charges. Nous pouvons observer sur la Figure 2.15 la modulation de la première harmonique du courant faisceau le long des lignes A et B/C. Cette modulation très progressive, le long de la ligne d'interaction finale (B et C), a été obtenue avec des cavités dont les facteurs de qualités sont trois fois plus faibles que ceux des cavités d'origine ; le coefficient $\frac{R}{Q}$ est croissant le long de la ligne et reste trois à cinq fois plus faible que dans le klystron TH2166. L'énergie échangée entre le faisceau et les cavités est donc croissante le long de la ligne.

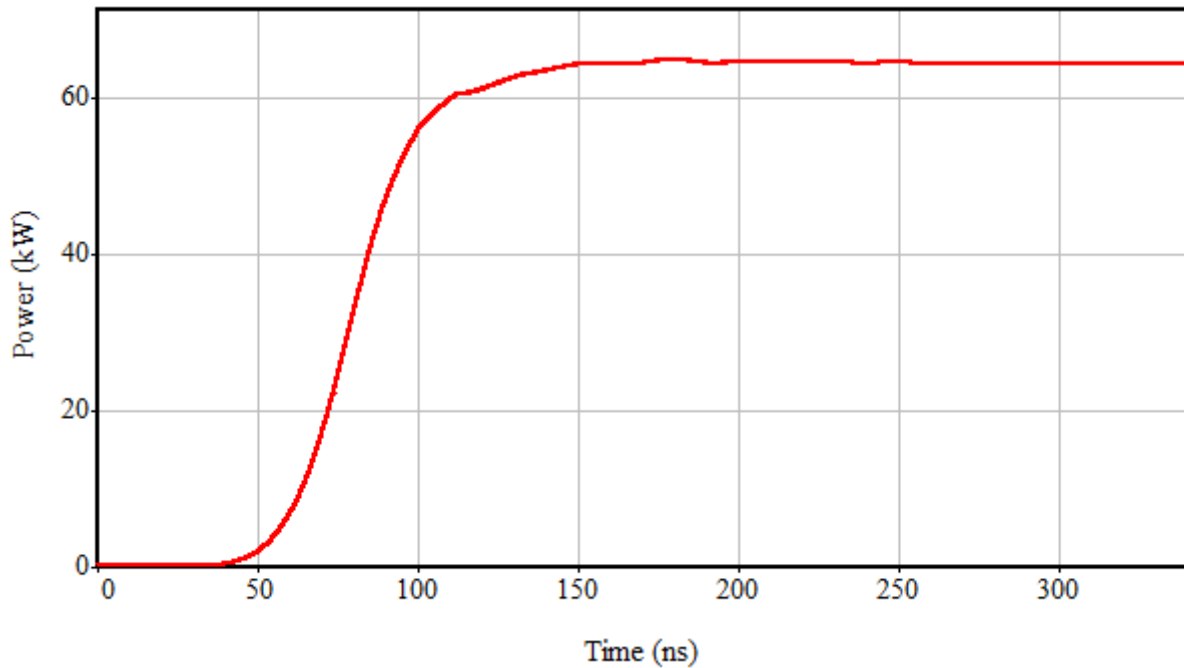


FIGURE 2.14 – Puissance de sortie en fonction du temps ; design définitif du kladistron - simulation MAGIC2D

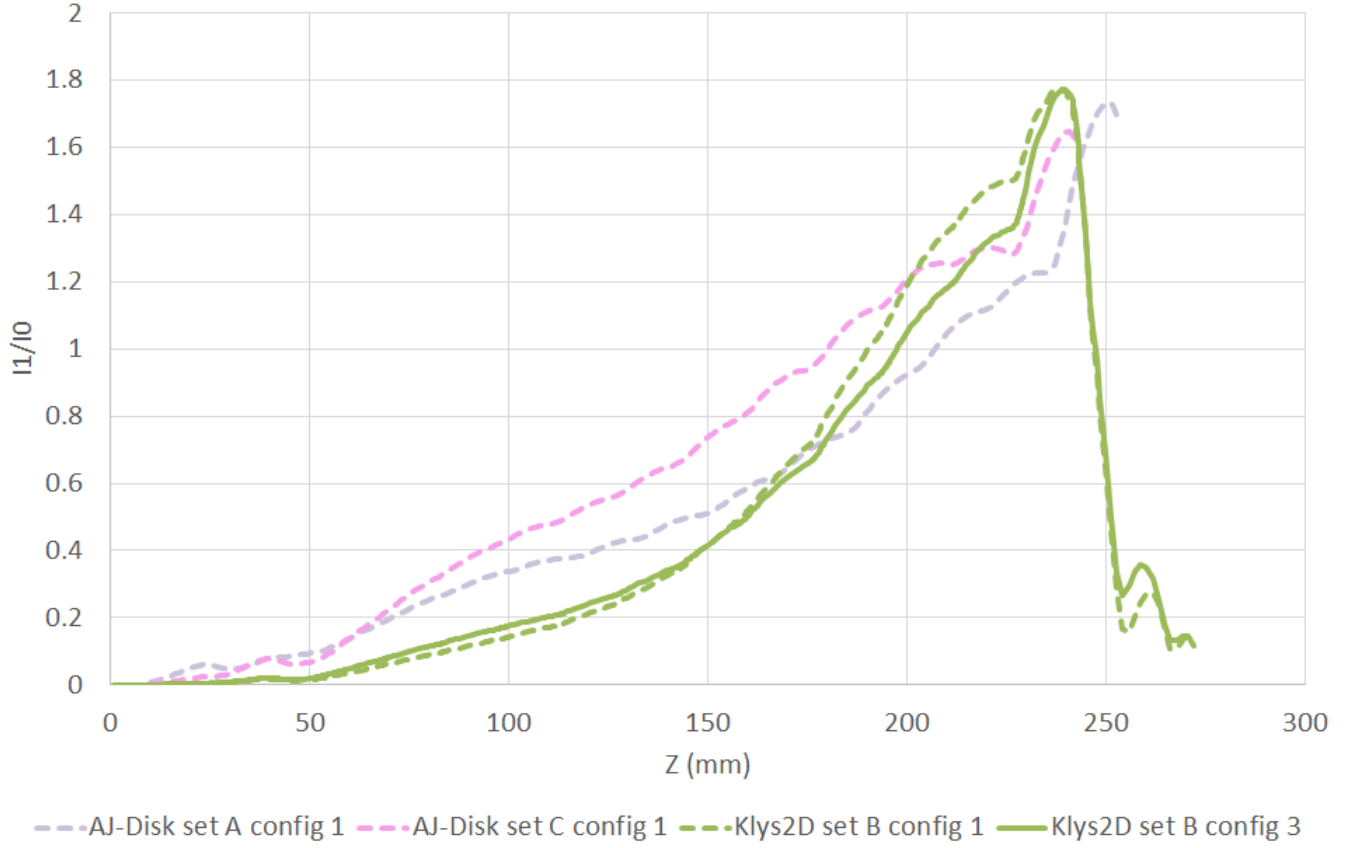


FIGURE 2.15 – Modulation du courant de première harmonique du faisceau le long de la ligne d'interaction, à saturation ; résultats de simulation AJ-Disk et Klys2D

Le couplage extérieur

L'extraction de l'énergie cinétique des électrons, rayonnée sous forme d'onde électromagnétique, s'effectue au moyen d'un guide d'onde connecté à une fenêtre. Le champ électromagnétique généré par le faisceau est transmis dans ce circuit extérieur. Le paramètre Q_e et la fréquence de résonance de la cavité de sortie sont réglés en déformant des pions placés dans le guide d'onde. Il est nécessaire, afin d'optimiser le rendement du tube, de maximiser la part d'énergie transmise au guide d'onde. Une valeur de Q_e trop élevée, en revanche, ainsi qu'un champ électrique intense au niveau de la cavité de sortie, risquent de provoquer le retour d'électrons dans la ligne d'interaction, et d'endommager la structure. En Figure 2.16 sont représentées les vitesses des macrocharges selon l'axe de la ligne d'interaction ; au passage des électrons devant le gap de la cavité de sortie, une partie d'entre eux sont accélérés dans le sens opposé au faisceau (en orange sur la Figure 2.16).

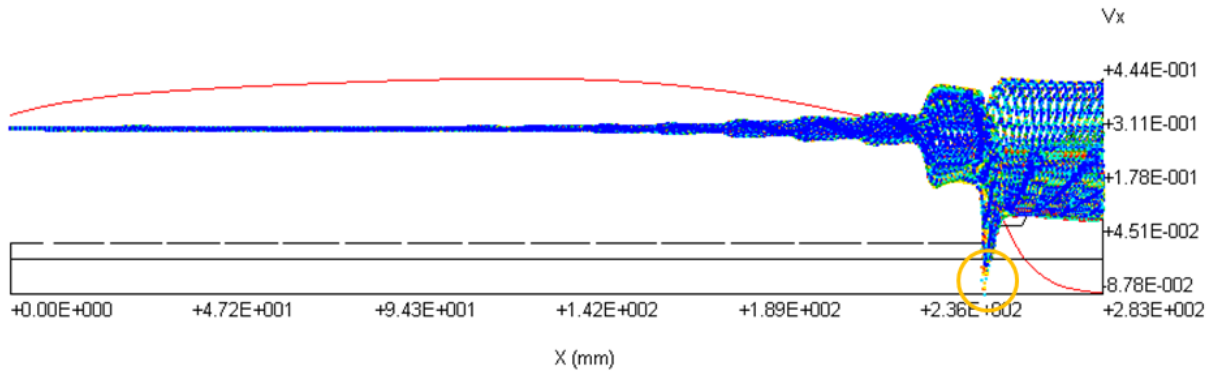


FIGURE 2.16 – Dispersion des vitesses des macrocharges le long de la ligne d'interaction ; les vitesses négatives (cercle orange) concernent les électrons réfléchis ; design provisoire de la ligne d'interaction - Simulation Klys2D

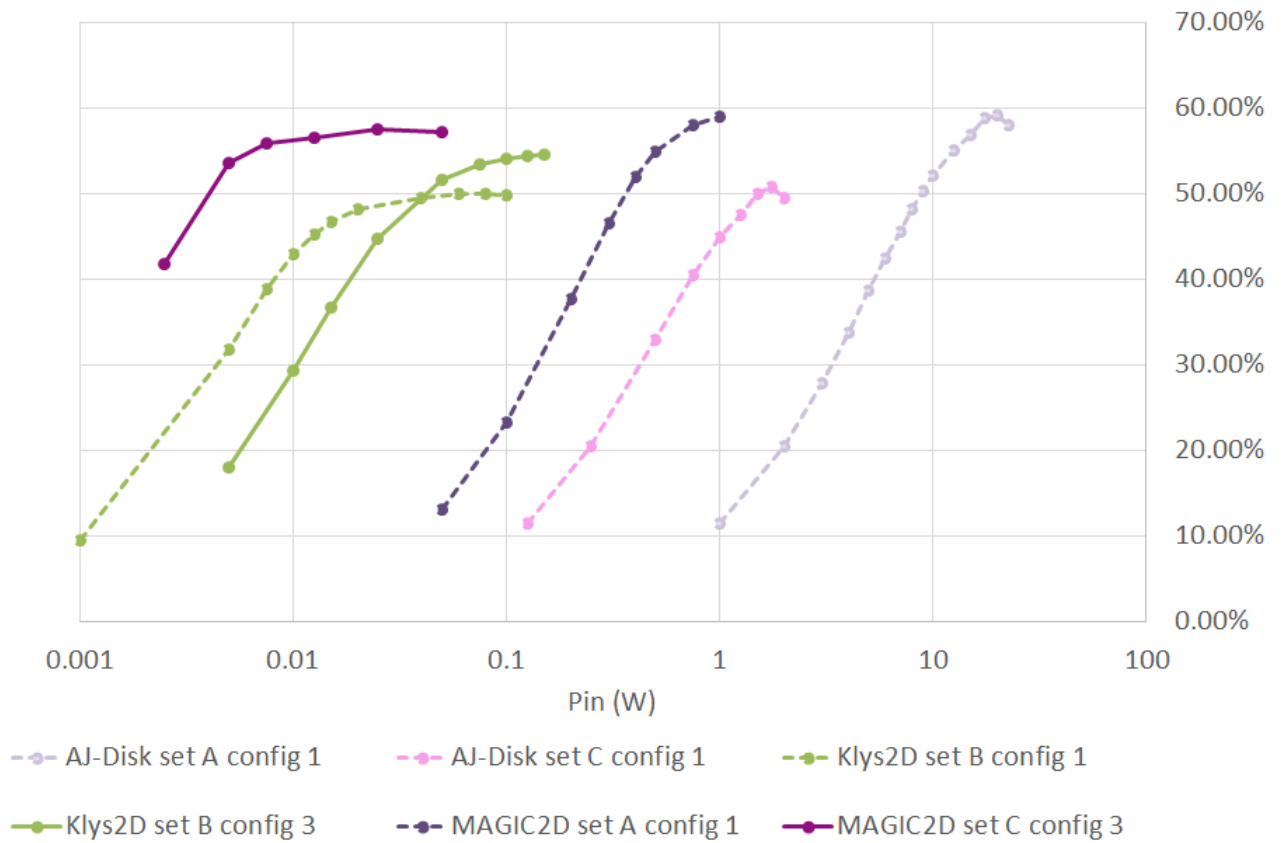


FIGURE 2.17 – Rendements de différentes architectures de kladistron en fonction de la puissance d'entrée - résultats de calculs AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D, dans les configurations 1 et 3

2.3.2 Ajustement des fréquences des cavités et des longueurs des glissements de la ligne

Après avoir déterminé une première architecture de kladistron, j'ai à la fois affiné notre structure afin d'en augmenter le rendement, et ce dans plusieurs codes de calcul, et à la fois adapté notre ligne aux pièces d'origine du klystron TH2166. J'ai pour cela étudié avec nos codes plusieurs "sets" de valeurs de paramètres, présentés en Annexe A. En Figure 2.17 sont présentées les courbes de rendement calculé dans nos principales simulations en fonction de la puissance d'entrée. Les sets de valeurs sont classés par couleurs ; les configurations sont identifiées par des pointillés fins pour la première, des pointillés plus large pour la deuxième (en Annexe A), et un trait plein pour la troisième ; les codes de calcul sont repérés grâce au ton de la couleur : AJ-Disk correspond aux couleurs les plus claires, puis Klys2D et enfin MAGIC2D, qui est associé aux couleurs foncées. L'architecture retenue correspond au set de valeurs B. Les paramètres de la ligne du set C sont identiques aux paramètres du set B ; les simulations effectuées avec le set C n'intègrent pas la présence du collecteur, contrairement aux simulations effectuées avec le set B. Une version plus complète des résultats de simulations est présente en Annexe A.

Nous notons que les cavités utilisées dans MAGIC2D sont symétriques, contrairement au design des cavités retenu (voir paragraphe 2.4.2) ; cette différence de conception n'est en revanche pas visible dans les calculs Klys2D, qui ne tient pas compte de la géométrie des cavités. Comme dans le cas des simulations du klystron TH2166, le rendement et la puissance de saturation est très variable en fonction du code employé, pour un même set de paramètres et une même configuration. Nos simulations présentent toutefois des rendements à saturation supérieurs à 50%, ce qui laisse augurer un rendement supérieur ou égal à celui du klystron TH2166 lors des tests du kladistron. Afin de pouvoir vérifier expérimentalement notre nouvelle architecture, nous avons préféré fixer au début de la deuxième année de thèse les paramètres des cavités. Une optimisation systématique de nos paramètres aurait permis d'atteindre un rendement encore meilleur. Les résultats actuels nous permettent de viser une augmentation du rendement du klystron TH2166 d'environ 5 points, et de passer de 50% à 55%.

Les simulations successives avec les différents codes d'interaction m'ont permis d'obtenir les paramètres électromagnétiques présentés en Table 2.3.

Cavité	Position (mm)	Fréquence (MHz)	$\frac{R}{Q}$ (Ω)	Q_0	Q_e
1	0.0	4899.0	100	3000	300
2	16.8	4901.0	20	1000	∞
3	30.6	4896.0	20	1000	∞
4	44.4	4930.0	20	1000	∞
5	58.2	4974.0	20	1000	∞
6	73.0	4959.0	20	1000	∞
7	87.8	4964.0	20	1000	∞
8	102.6	4939.0	20	1000	∞
9	117.4	4966.0	33	1000	∞
10	133.2	4956.0	33	1000	∞
11	149.0	4962.5	33	1000	∞
12	166.8	4948.0	33	1000	∞
13	184.5	4959.0	33	1000	∞
14	202.0	4967.0	33	1000	∞
15	218.0	4922.0	33	2000	∞
16	233.0	4899.0	100	3000	65

TABLE 2.3 – Paramètres électromagnétiques de la ligne d'interaction finale du kladistron

2.3.3 Choix de la géométrie des cavités

Après avoir déterminé les paramètres électromagnétiques des cavités, j'ai cherché avec le logiciel COMSOL les dimensions adéquates. Dans l'optique d'intégrer ces nouvelles pièces à la ligne d'interaction d'origine, j'ai débuté cette étape de conception en m'inspirant du design des cavités du klystron TH2166.

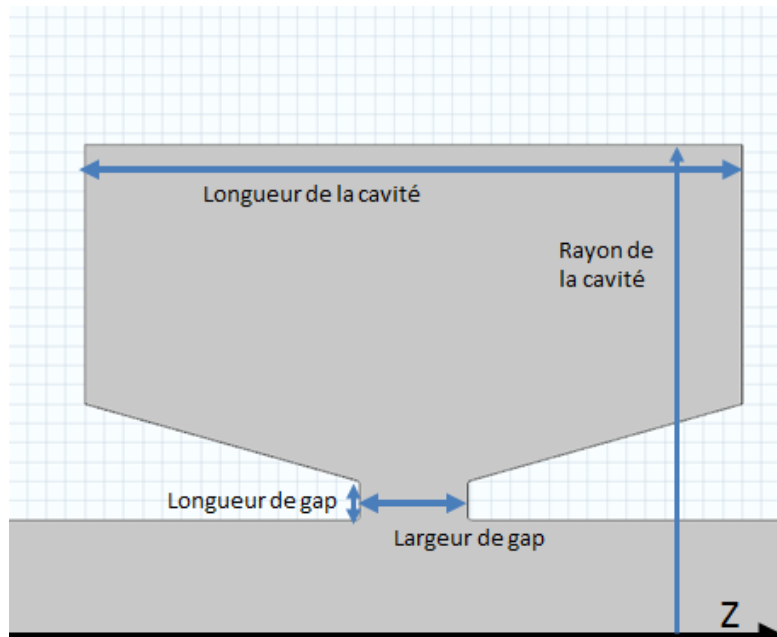


FIGURE 2.18 – Principaux paramètres géométriques des cavités de klystron

Comme nous l'avons abordé dans le premier chapitre, nous pouvons diviser chaque cavité de klystron en deux zones (voir Figure 2.19) :

- La partie inférieure, correspondant au gap de la cavité, proche du faisceau, est la partie dite "capacitive"
- La partie supérieure, éloignée du faisceau, dite partie "inductive"

En reprenant le modèle décrit dans le premier chapitre, nous pouvons assimiler le gap d'une cavité (voir Figure 2.18) à un condensateur plan ; les modifications de géométrie du gap ont donc un effet comparable au cas d'un condensateur. Ainsi, la capacité du circuit équivalent est une fonction croissante de la surface en vis à vis et décroissante de l'écartement du gap. Nous rappelons aussi l'expression suivante :

$$\frac{R}{Q} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.2)$$

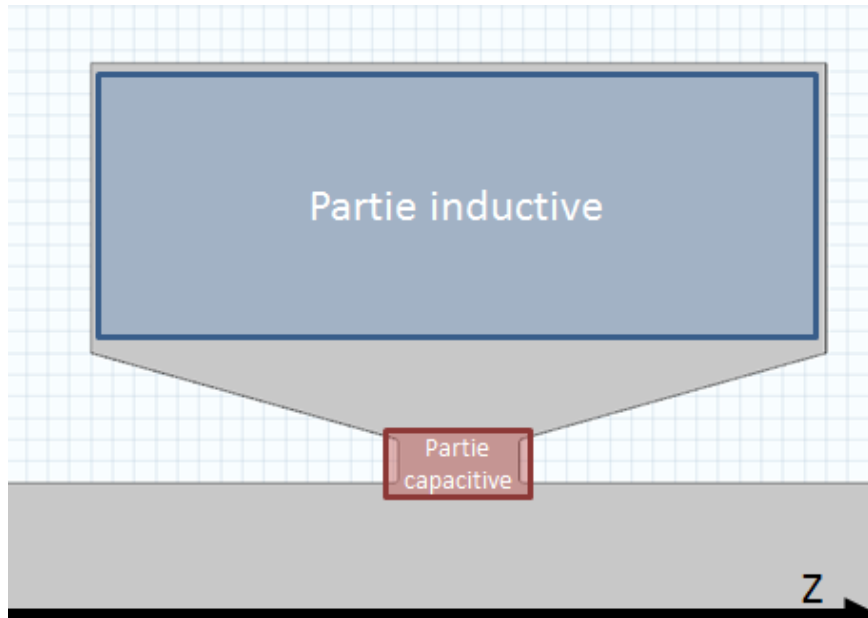


FIGURE 2.19 – Zones capacitive et inductive des cavités de klystron - exemple avec une cavité du klystron TH2166

Le facteur $\frac{R}{Q}$ est une fonction décroissante de la capacité du condensateur équivalent, et donc de la longueur de gap (voir Figure 2.18). La partie supérieure, inductive, est liée au facteur de qualité Q_0 , donc de l'énergie stockée et de la puissance dissipée dans les parois. L'énergie stockée dépend du volume de la cavité et les pertes par effet Joule dépendent de sa surface ; à volume égal, le facteur de qualité est donc une fonction décroissante de la surface exposée au champ hyperfréquence.

Dans le cadre de cette étude, j'ai travaillé à diminuer les facteurs Q_0 et $\frac{R}{Q}$, donc à augmenter la longueur du gap et la surface de la cavité exposée au champ électromagnétique. J'ai mis au point des cavités dont le facteur de qualité, donc l'énergie stockée, et la capacité de la cavité à échanger de l'énergie avec le faisceau, donc le coefficient $\frac{R}{Q}$, faibles. Ces cavités sont donc pourvues de gap long et étroits.

Comme nous l'avons vu précédemment, le facteur de qualité est grandement influencé par la conductivité des parois. Le cuivre étant un matériau bien meilleur conducteur que le titane, les méthodes de titanage étudiées au cours de cette thèse, que nous détaillons au chapitre 3, ont également été nécessaires pour réduire le facteur de qualité.

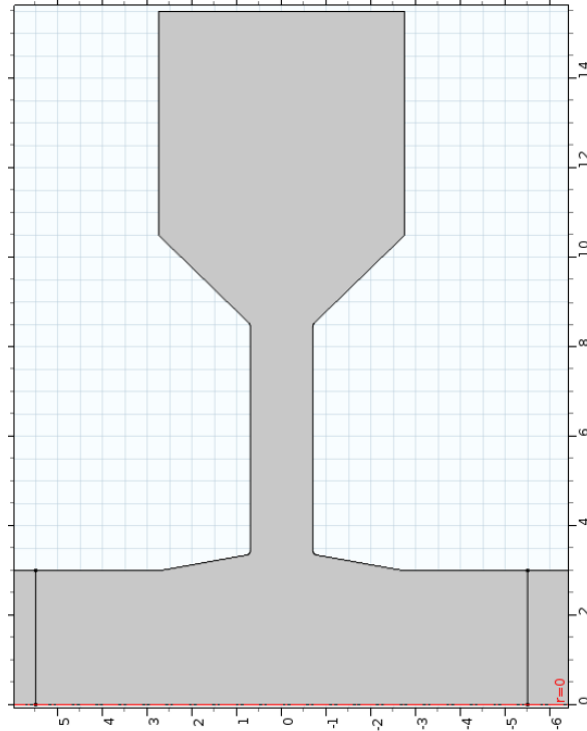


FIGURE 2.20 – Forme des cavités "type 2" - Calcul COMSOL

Afin de simplifier l'architecture de la ligne d'interaction et d'obtenir rapidement les pièces nécessaires, nous avons standardisé nos design de cavités selon deux modèles, présentées en Figures 2.20 et 2.21 ; l'intégration de ces cavités est présentée en Figure 2.22. Nous définissons également les paramètres géométriques associés :

- Le rayon de la cavité, noté R_{cavh} .
- Le rayon inférieur de la cavité, noté R_{cavb} .
- Le rayon du tube de glissement, noté R_{drift} .
- Le rayon supérieur des becs, noté R_{nose} .
- La largeur des chanfreins entre les becs et le tube de glissement, noté R_{cone} .
- La longueur des chanfreins entre les becs et le tube de glissement, noté D_{cone} .
- La demi-largeur du gap, notée Z_{gap} .
- La longueur de la cavité, notée L_{cav} .

Dans notre démarche de simplification du design de nos cavités, nous avons choisis de fixer, pour chaque type de cavité, l'ensemble des cotes, à l'exception du paramètre R_{cavh} : ce paramètre permet de distinguer les fréquences des cavités (voir Figure 2.26).

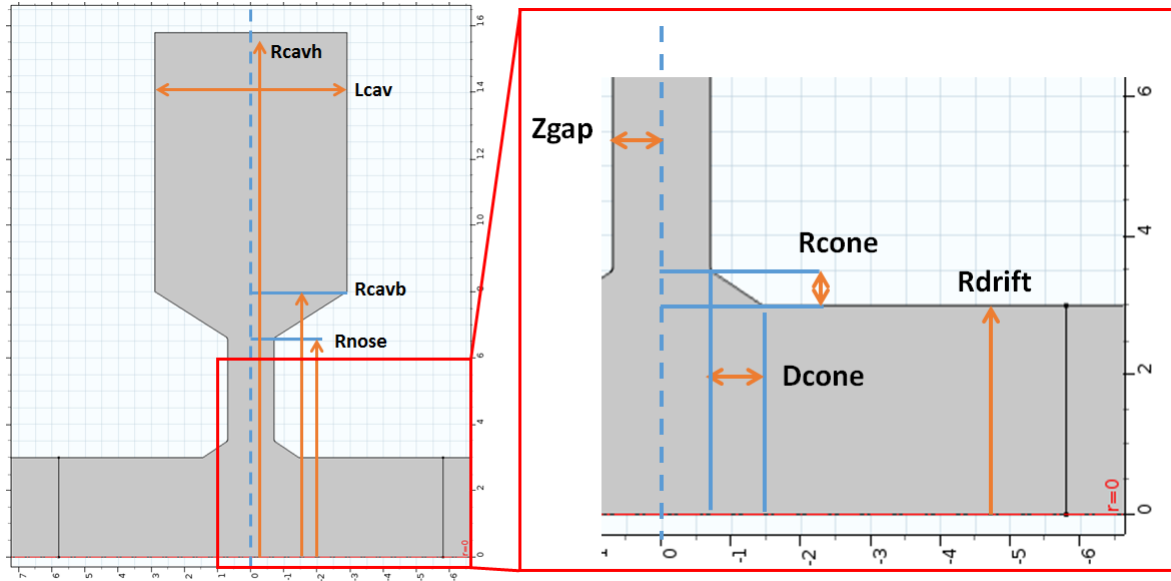


FIGURE 2.21 – Forme des cavités "type 3" et paramètres géométriques - Calcul COMSOL

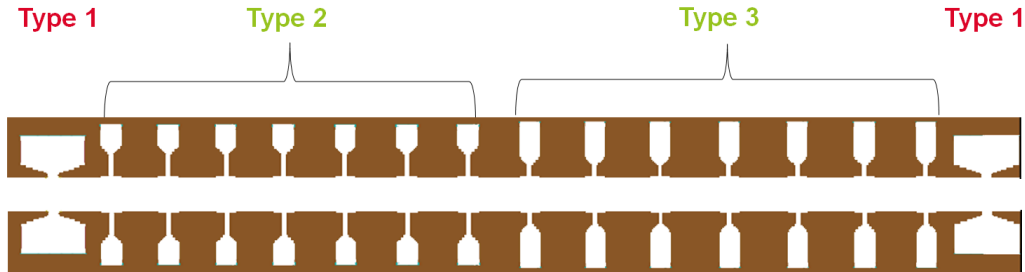


FIGURE 2.22 – Vue en coupe de la ligne d'interaction ; les cavités de type 1 correspondent aux cavités du klystron TH2166 - représentation obtenue avec MAGIC2D

La Figure 2.22 est une vue en coupe de la ligne d'interaction obtenue à l'issue de notre étape d'optimisation ; cette figure est issue d'une simulation réalisée avec MAGIC2D. Les formes de cavités type 2 et 3 ainsi définies et les espaces de glissements associés permettent d'obtenir les paramètres électromagnétiques désirés et cette architecture est validée. Le respect des dimensions de la ligne ainsi définie est essentiel pour obtenir les performances attendues lors des tests du kladistron. Cette problématique constitue une des étapes majeures de notre projet et exige des solutions techniques dédiées.

2.4 Solutions technologiques nécessaires au développement du kladistron

La conception des cavités du kladistron a fait apparaître des problématiques liées à leur réalisation : qualité d'usinage, de brasage, de titanage, mais également le réglage en fréquence des cavités.

2.4.1 Tolérances géométriques et nécessité de systèmes d'accord précis

Comme nous l'avons vu précédemment, le choix des fréquences est un élément majeur de la conception des klystrons. La conception, la fabrication et l'assemblage des cavités doivent donc s'accompagner de l'intégration d'un système d'accord performant afin de garantir le fonctionnement du klystron.

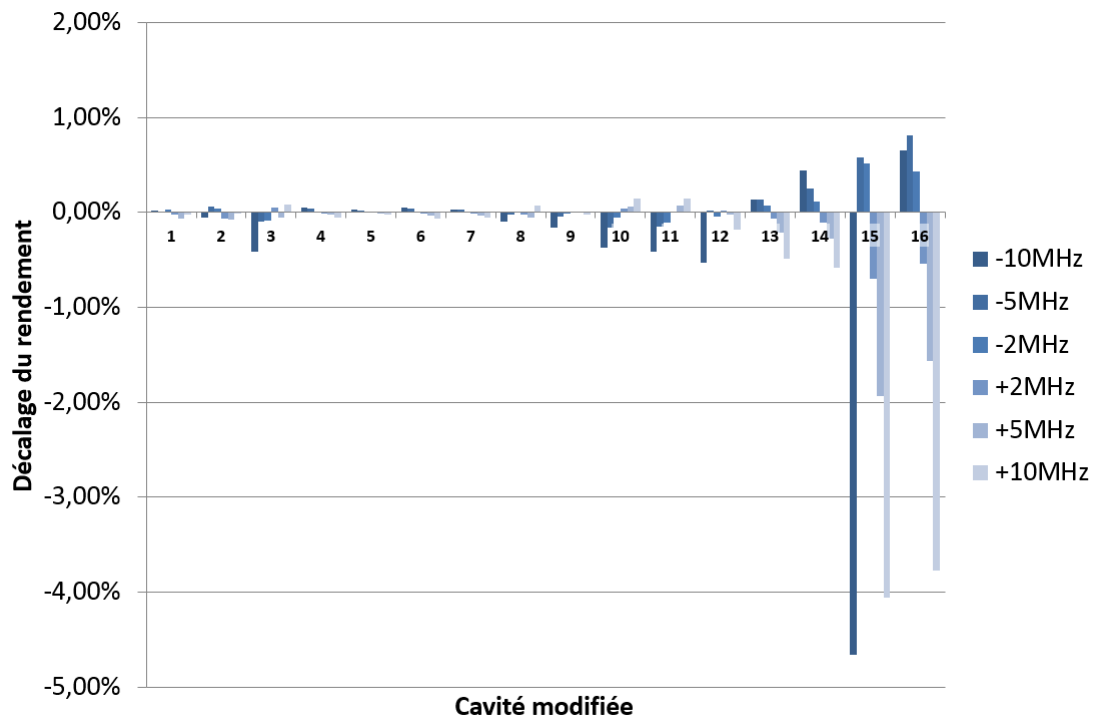


FIGURE 2.23 – Décalage du rendement du kladistron en fonction du décalage en fréquence des cavités. Résultats de simulations Klys2D avec un faisceau généré par Optic2D et les valeurs mesurées du champ magnétique

Décalages en fréquence, géométrie des cavités et rendement du kladistron

J'ai procédé à plusieurs simulations avec le code Klys2D afin d'évaluer l'impact du décalage en fréquence des cavités. Dans chaque simulation, les valeurs de champ magnétique sont celles relevées lors des tests du klystron TH2166 et le faisceau est simulé au préalable au moyen du code Optic2D ; une seule des fréquences des cavités est modifiée à la fois, tandis que les autres sont à leurs valeurs nominales. Les résultats de ces calculs d'interaction sont présentés Figure 2.23. Il apparaît donc que le décalage en fréquence a un fort impact sur les performances du klystron, en particulier dans les cavités 15 et 16, où un décalage de 10MHz de la fréquence d'une seule des cavités induit une perte de 4 points de rendement.

Comme nous l'avons vu précédemment, la fréquence des cavités est liée à leur géométrie. La qualité de fabrication et de brasage des pièces est donc essentielle afin de respecter les paramètres établis lors de la conception de la ligne.

Le théorème de Slater lie le changement de volume δV induit par une erreur de fabrication au changement relatif de fréquence $\frac{\delta f}{f}$:

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{1}{4W} \int_{\delta V} (\epsilon_0 E^2 - \mu_0 H^2) dV \quad (2.3)$$

Avec :

- f la fréquence nominale de la cavité
- δf le décalage en fréquence induit
- W l'énergie stockée dans la cavité
- δV le changement de volume considéré
- E le champ électrique aux abords de l'élément de volume δV
- H le champ magnétique aux abords de l'élément de volume δV

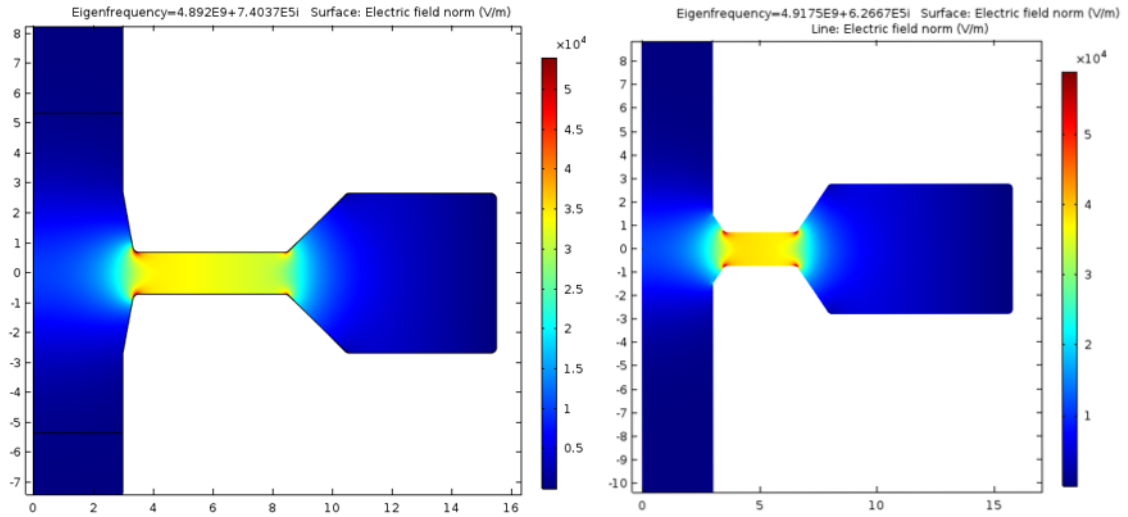


FIGURE 2.24 – Champ électrique dans les cavités type 2 et 3 du kladistron - Résultats COMSOL

Ce changement de fréquence est donc la résultante des contributions des champs électriques et magnétiques sur cet élément de volume. Au vu des champs électriques et magnétiques en présence dans nos cavités (voir Figures 2.24 et 2.25), une modification "positive" ($\delta V > 0$), c'est à dire augmentant le volume de la cavité, aurait un effet "positif" ($\frac{\delta f}{f} > 0$) sur la fréquence de la cavité dans la partie inférieure (gap), proche du faisceau, où le champ électrique est le plus intense; ce même volume aurait un effet "négatif" ($\frac{\delta f}{f} < 0$) dans la partie supérieure de la cavité, où le champ magnétique est le plus intense. Ce changement de fréquence dépend bien entendu des valeurs des champs électriques et magnétiques présents dans la cavité ainsi que de l'énergie stockée.

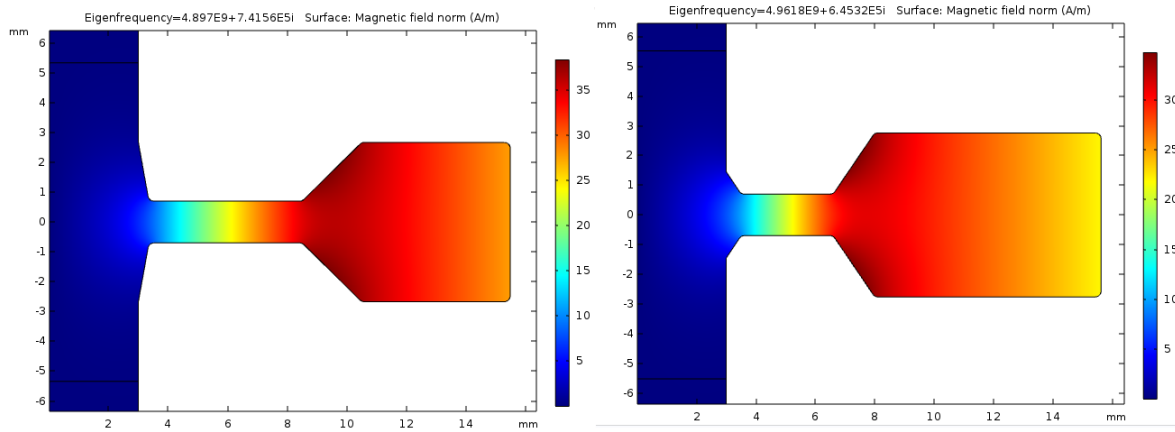


FIGURE 2.25 – Champ magnétique dans les cavités type 2 et 3 du kladistron - Résultats COMSOL

La Figure 2.26 représente les fréquences des cavités de la ligne d'interaction du kladistron en fonction du paramètre R_{cavh} . Nous notons que la fréquence varie de façon linéaire décroissante avec le rayon de la cavité; une variation de 1 micromètre induit un décalage en fréquence de $-0,34\text{MHz}/\mu\text{m}$ pour les cavités de type 2 et de $-0,25\text{MHz}/\mu\text{m}$ pour les cavités de type 3. L'augmentation de ce paramètre correspond en effet à une augmentation du volume de la partie inductive de la cavité, où l'effet du champ magnétique est prépondérant devant l'effet du champ électrique. La variation des autres paramètres des cavités induit également un décalage en fréquence linéaire, de $100\text{kHz}/\mu\text{m}$ à $2,5\text{MHz}/\mu\text{m}$ (Z_{gap}). Le tracé du décalage en fréquence en fonction des autres paramètres géométriques est en annexe B.

Au vu de ces résultats de simulations et des précédents, liant le décalage en fréquence des cavités et les performances du klystron, nous pouvons estimer qu'une erreur de fabrication de $4\mu\text{m}$ dans le gap d'une seule des cavités induirait un décalage en fréquence de 10MHz , et risquerait de baisser le rendement de 5 points (voir Figure 2.23).

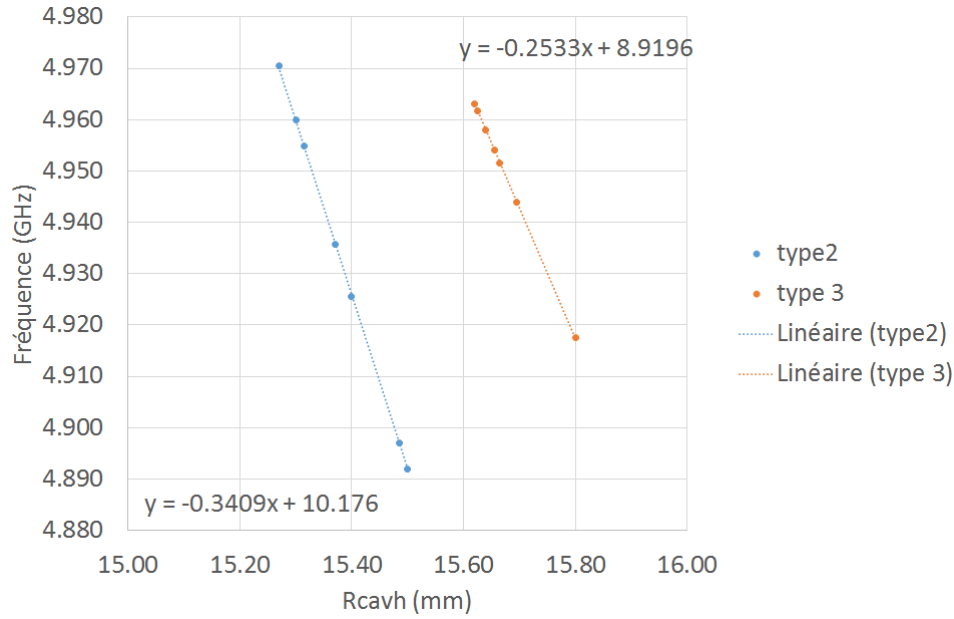


FIGURE 2.26 – Fréquences, en gigahertz, des cavités de type 2 et 3 en fonction de leur rayon R_{cavh} , en millimètres - résultats de calculs COMSOL

Conception du système d'accord

A la suite de cette étude, nous avons conçu un système d'accord permettant de régler les fréquences des cavités au cours de l'assemblage du kladistron. Ce système, développé en partenariat avec le Laboratoire de Conception, d'études et d'Avant-Projets (LCAP), est inspiré par la méthode de réglage des cavités de la ligne principale de l'accélérateur CLIC (voir Figure 2.27). Pour régler les cavités CLIC, des pions en aciers inoxydables sont brasés avec un alliage de cuivre, d'argent et de plomb (palcusil) au fond des alésages présents sur la circonférences des cavités ; une fine membrane déformable sépare les pions brasés de la cavité. Ces pions sont pourvus de trous taraudés à leur extrémité, ce qui permet de visser un pion démontable nécessaire à l'utilisation du "marteau" ; cet outil est composé d'un masselotte coulissant sur un axe et encadré de deux arrêts. Cette masselotte est poussée ou tirée afin d'exercer un effort sur le pion vissé dans le pion brasé, lui-même solidaire de la membrane de la cavité, qui est alors déformée. La fréquence de la cavité est alors modifiée. Ce décalage en fréquence est observé au moyen d'un analyseur de réseau et d'une antenne. L'imprécision de cette méthode exige une grande prudence.

Sur la Figure 2.28 est représentée la vue en coupe d'une cavité de notre kladistron pourvue de 4 trous à fonds plats, laissant une membrane de 0.5mm d'épaisseur entre la cavité et l'extérieur ; sur ces membranes sont brasés des pions filetés à leur extrémité. Ces pions sont vissés aux "pistons" du système d'accord, en acier inoxydable, reposant sur des paliers en bronze eux-mêmes posés sur une bague en alliage d'aluminium. Le réglage s'effectue en tournant le "piston", vissant ou dévissant ainsi le pion, solidaire de la membrane, qui translate alors le long du perçage. Ce système présente l'avantage de permettre un réglage précis et fiable au moyen du pas de vis.

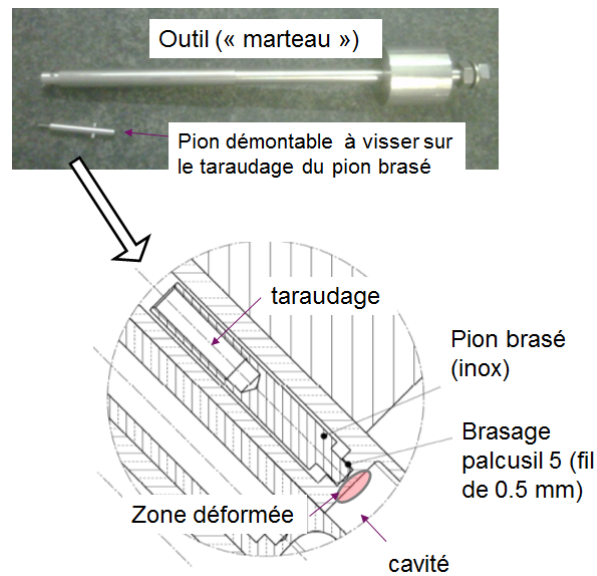


FIGURE 2.27 – Système d'accord des cavités CLIC

Les pions des systèmes d'accord sont fait d'un alliage de cupronickel, facile à braser à basse température sur du cuivre, avec un métal d'apport cuivre-argent. L'utilisation de 4 systèmes d'accord permet d'augmenter l'intervalle de réglage en fréquences.

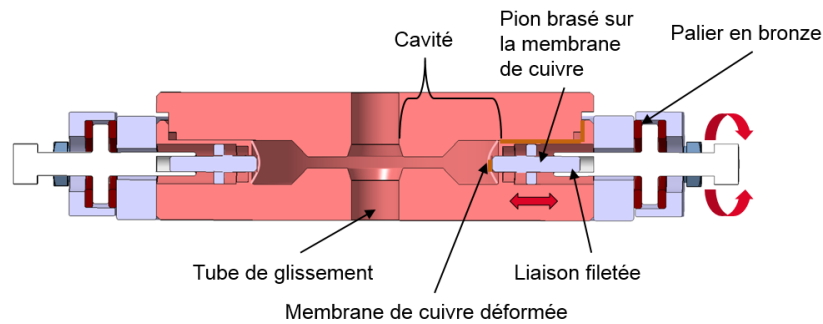


FIGURE 2.28 – Système d'accord des cavités du kladistron

2.4.2 Multipactor, titanage et changement de géométrie des cavités

Le titanage des cavités du klystron TH2166

Comme nous l'avons vu précédemment, le multipactor est un phénomène courant dans les tubes électroniques et les lignes accélératrices. Le klystron TH2166, comme nombre de tubes électroniques de Thales, possède une ligne d'interaction dont les surfaces sont en partie recouvertes d'une couche d'hydrure de titane de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur. Ce dépôt est effectué de manière préventive sur les zones les plus susceptibles d'être concernées par ce phénomène, en particulier le gap de la cavité.

Nous avons évalué avec Musicc3D l'importance du phénomène de multipactor dans les cavités du klystron TH2166. Ce programme, développé par l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay[7], permet d'évaluer le risque de multipactor dans les cavités radiofréquences, en fonction de leur géométrie générée avec le logiciel HFSS et des matériaux en présence. Chaque simulation représente 10000 calculs effectués comme suit :

- Un électron est extrait de la maille considérée (située sur le gap).
- Cet électron est soumis à un champ électrique variable d'une phase initiale et d'une intensité aléatoire (phase entre 0 et 360 degrés et intensité entre 0MV/m et 40MV/m).
- Cet électron suit sa trajectoire jusqu'à rencontrer une autre surface.
- En fonction de son énergie, et du coefficient d'émission secondaire de la surface considérée, cet électron va extraire d'autres charges, repartir, ou être absorbé par la surface.
- Le calcul est stoppé une fois que la charge a été absorbée ou a subi 20 chocs.

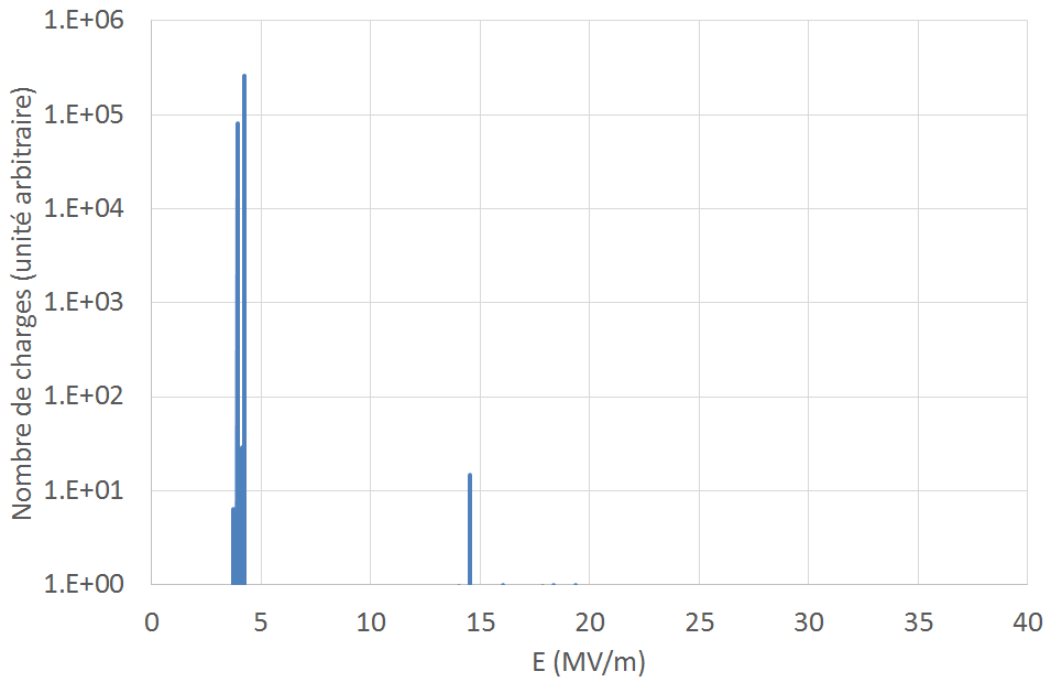


FIGURE 2.29 – Charges extraites dans le gap d'une cavité du klystron TH2166 en fonction de la valeur du champ électrique - Résultats MUSICC3D

La Figure 2.29 montre le résultat de simulation MUSICC3D ; le nombre de charges extraites dans le gap d'une cavité du klystron TH2166 non titanée est représenté en fonction du champ électrique. Nous notons que plusieurs centaines de milliers de charges sont extraites pour une valeur de champ électrique d'environ 4MV/m. Les résultats des tests du klystron TH2166 confirment les valeurs des simulations ; le phénomène de multipactor a été en effet un point important du développement de ce tube.

Choix des cavités asymétriques

La précision exigée pour la fabrication de nos cavités et la difficulté de mise en œuvre de la méthode de titanage "traditionnelle" nous ont amené à repenser le design de nos pièces. Des tests préliminaires de dépôts d'hydrure de titane nous ont en effet montré que l'épaisseur de titane effective serait comprise entre 0 et $40\mu\text{m}$, avec une géométrie difficile à ré-usiner. Or, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.4.1, une erreur de fabrication de $1\mu\text{m}$ peut induire jusqu'à un décalage de 2,5MHz.

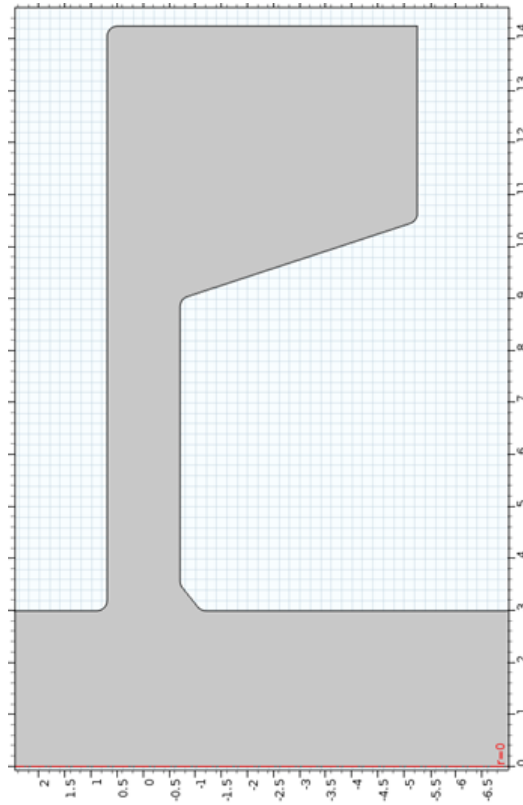


FIGURE 2.30 – Forme des cavités monobecs "type 2" - Calcul COMSOL

Les cavités asymétriques (voir Figure 2.30) présentent l'avantage de faciliter le titanage en présentant une surface plane; une reprise éventuelle est également possible au tour, sans besoin d'outillage sophistiqué. Si des tests de titanage "traditionnel" ont été effectués, nous avons développé, en collaboration avec Philippe Denis de Thales Electron Devices, une méthode de brasage de feuille de titane. Ces nouvelles cavités possèdent des propriétés électromagnétiques identiques à celles conçues précédemment. En Figure 2.31 sont présentés les résultats de simulation Musicc3D, pour le gap d'une cavité symétrique "type 3" sans titane, et d'une cavité asymétrique "type 3" sans titane et avec titane. Il apparaît qu'en l'absence de titane, un unique électron peut extraire jusqu'à un million de charges, tandis que le maximum enregistré dans une géométrie similaire mais pourvue d'une surface titanée est d'environ 60.

J'ai donc redéfini la forme des 14 cavités initialement symétriques afin d'obtenir des cavités asymétriques, dont les paramètres électromagnétiques sont identiques.

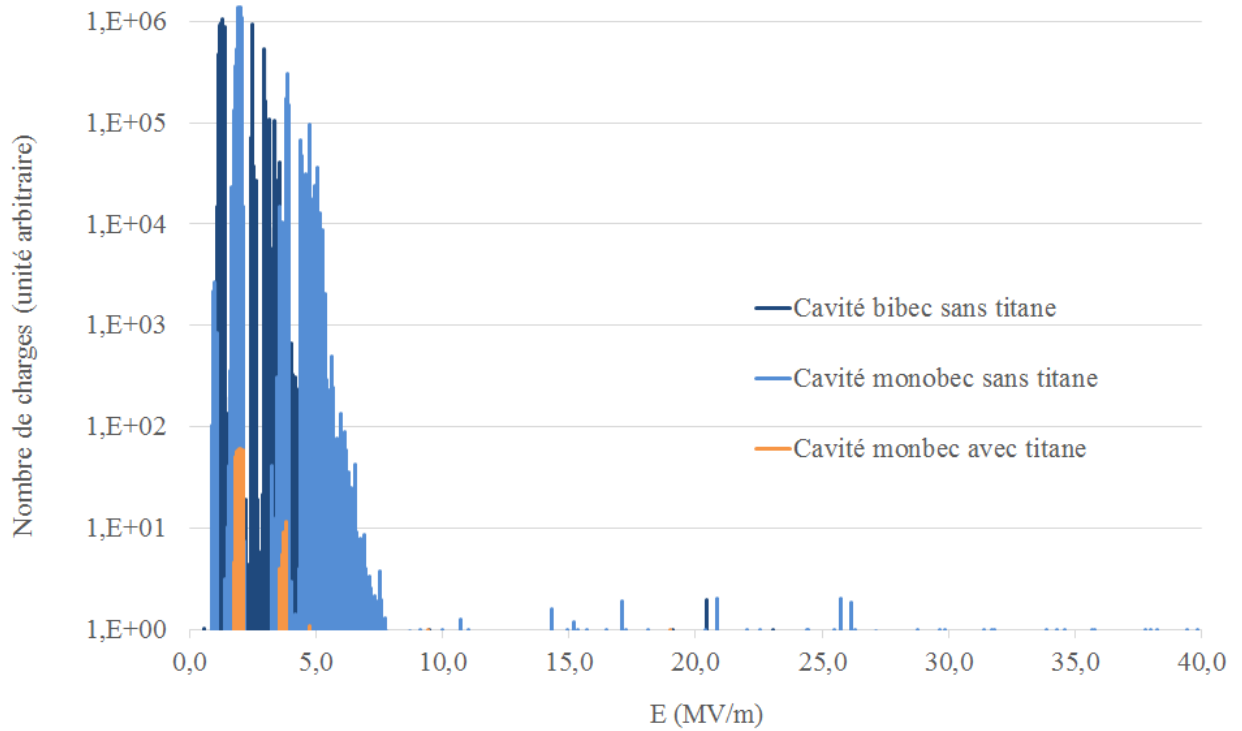


FIGURE 2.31 – Charges générées dans le gap des cavités bibecs et monobecs du kladistron, avec et sans dépôt de titane en fonction de la valeur du champ électrique - Résultats MUSICC3D

2.5 Conclusion du chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre les outils de simulation nécessaires à la conception de nos cavités. Nous avons comparé leurs résultats dans le cas du klystron TH2166. Nous avons ensuite déterminé les paramètres électromagnétiques adéquats et les formes de cavités correspondantes. La précision du réglage en fréquence a nécessité le développement d'un système d'accord spécifique. Les simulations avec le programme MUSICC3D ont montré l'importance du phénomène de multipactor dans nos cavités et nous a conduit à changer leurs géométries. En Figure 3.22 est présenté une vue en coupe des lignes d'interaction du klystron TH2166 et du kladistron.

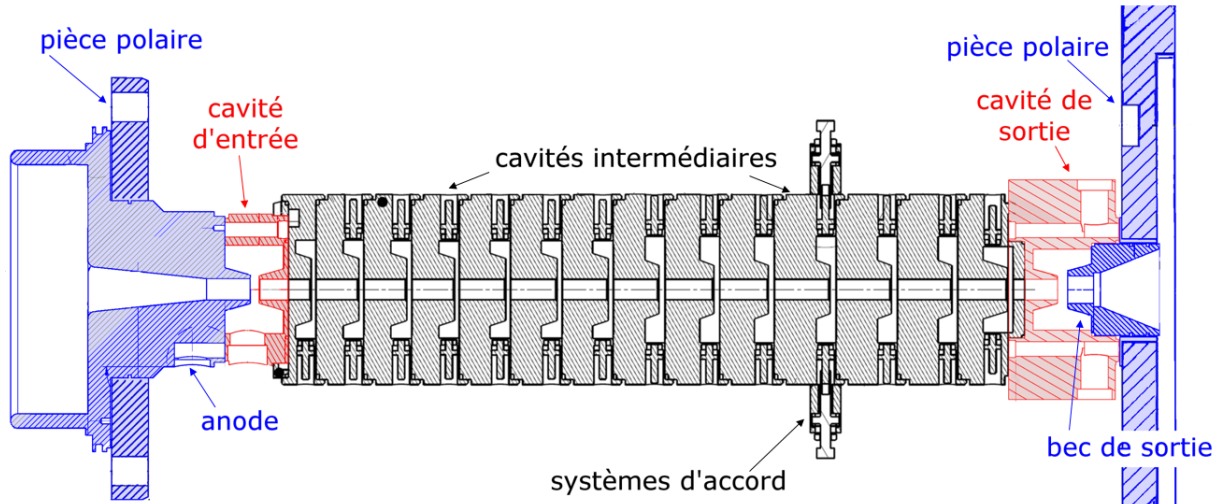


FIGURE 2.32 – Vue en coupe de la ligne d'interaction du kladistron ; les pièces originelles sont représentées en bleu, les pièces modifiées en rouge et les nouvelles pièces créées au cours de ce projet sont en noir

Chapitre 3

Réalisation technique de la ligne d'interaction

Dans ce chapitre nous détaillerons les étapes de la réalisation des pièces du kladistron. Nous aborderons d'abord la phase de prototypage, avec les tests des méthodes de titanage et de brasage, et la validation de nos systèmes d'accord. Nous nous intéresserons ensuite à la réalisation des pièces de la ligne finale et de l'adaptation des pièces du klystron TH2166.

3.1 Prototypes de cavités

Afin de tester notre système d'accord puis de déterminer notre méthode de titanage, nous avons réalisé deux séries de prototypes. La première série de pièces prototypes a été réalisée d'après notre conception initiale des cavités, symétrique, avant que nous ne validions l'architecture présentée à la fin du chapitre 2. Malgré ce changement de design, nos systèmes d'accord, validés au cours de nos tests, restent pleinement fonctionnels dans notre ligne finale. En revanche, notre deuxième série de cavités prototypes reprend la forme des pièces finales. Au cours des tests de nos pièces prototypes, nous avons réalisé des mesures radiofréquences afin de mesurer et de comparer les valeurs de fréquences et de facteur de qualité.

3.1.1 Mesures radiofréquences

Protocole d'étude

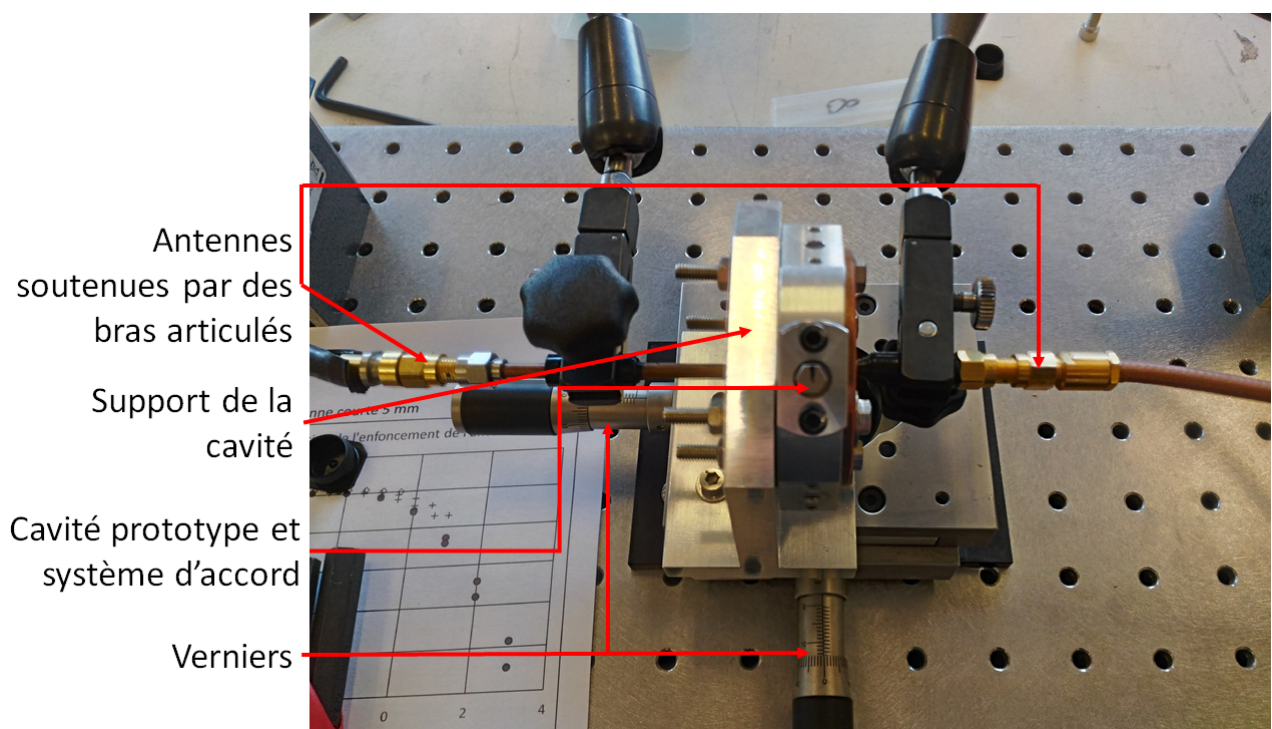


FIGURE 3.1 – Mesure des paramètres des cavités prototypes

Les mesures sont effectuées à l'aide de deux antennes radiofréquences reliées à un analyseur de réseau ; ces antennes sont maintenues par deux bras articulés fixés sur la table optique. Une fois que l'analyseur a été calibré, la cavité prototype à tester est fixée sur un support en alliage d'aluminium, au moyen de 4 boulons placés dans les canaux de refroidissement. Ce support est lui-même solidaire d'une plate-forme mobile dont la position dans le plan de la table optique est contrôlée par deux verniers (voir Figure 3.1).

Les antennes sont placées l'une après l'autre de façon à éviter qu'aucune n'interfère dans la mesure de l'autre. Pour ce faire, l'une des antennes est d'abord placée aux abords du tube de glissement puis la position de la cavité est ajustée au moyen du vernier transverse afin de centrer le tube de glissement par rapport à l'antenne. Le vernier longitudinal permet alors de positionner l'antenne le plus profondément possible dans la cavité. Nous pouvons alors détecter un signal en réflexion. Nous éloignons ensuite progressivement l'antenne, au moyen de ce même vernier, en observant le décalage de la fréquence de résonance mesurée. Malgré nos précautions lors des mesures, nous avons observé des fluctuations de nos mesures qui limitent leur précision à $\pm 500\text{kHz}$.

Lorsque la valeur de la fréquence ne dépend plus des déplacements de l'antenne, nous notons la fréquence de résonance de la cavité. Afin de nous assurer que la première antenne n'influe pas sur la mesure de la deuxième antenne, nous l'éloignons une nouvelle fois jusqu'à ce que la perturbation enregistrée, due à la cavité, soit légèrement supérieure à notre erreur de mesure. Nous plaçons alors la deuxième antenne de l'autre côté de la cavité, en veillant à ce que la fréquence mesurée avec la première antenne reste inchangée.

Paramètres S et mesures

Notre protocole expérimental permet de mesurer les paramètres S, caractérisant les propriétés électromagnétiques des cavités.

Chaque cavité prototype est pourvue de deux interfaces par lesquelles de l'énergie électromagnétique peut être échangée ; nous assimilons ces interfaces à des guides d'ondes. Pour chaque guide d'onde, ou port i , cette énergie est caractérisée par les tensions complexes incidentes a_i et réfléchies b_i [7, 39] :

$$a_i = \frac{V_i + Z_i I_i}{2\sqrt{|\Re(Z_i)|}}, b_i = \frac{V_i - Z_i^* I_i}{2\sqrt{|\Re(Z_i)|}} \quad (3.1)$$

Avec :

- V_i la tension mesurée au port i .
- I_i le courant mesuré au port i .
- Z_i l'impédance du port i (Z_i^* étant le complexe conjugué).

Dans le cas d'une cavité résonante, comme nos pièces prototypes, les tensions réfléchies b_1 et b_2 sont liées aux tensions incidentes a_1 et a_2 par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Avec S_{ij} , $(i,j) \in \llbracket 1, 2 \rrbracket$, les paramètres S (*Scattering parameters* [7]) définissant les propriétés de transmission et de réflexion de puissance électromagnétique de la cavité ; S_{11} et S_{22} sont les paramètres de réflexion respectivement de l'extrémité 1 et de l'extrémité 2 ; S_{12} et S_{21} sont les paramètres de transmission respectivement de l'extrémité 2 vers l'extrémité 1 et de l'extrémité 1 vers l'extrémité 2.

Nos mesures radiofréquences concernent l'étude du gain relatif à ces paramètres S en fonction de la fréquence :

$$G_{ij}(dB) = 10 \log_{10} (|S_{ij}|) \quad (3.3)$$

Lors d'une mesure en réflexion, l'énergie de l'onde est absorbée lorsque le signal est à la fréquence f de la cavité, ce qui se traduit par un minimum local sur les courbes du gain des paramètres S_{11} et S_{22} en fonction de la fréquence (voir Figure 3.2).

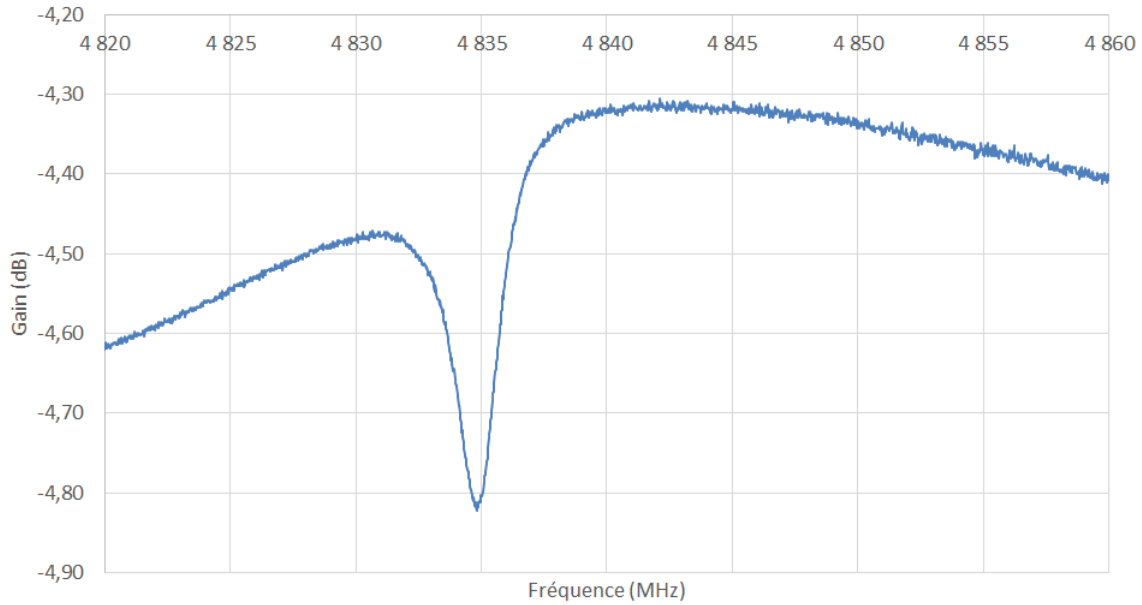


FIGURE 3.2 – Mesure en réflexion S_{11} de la fréquence de résonance de la cavité prototype "type 2"

Lors d'une mesure en transmission, le signal observé correspond à la proportion d'énergie transmise entre les antennes, qui est optimale à la fréquence de résonance de la cavité, ce qui se traduit par un maximum local sur les courbes du gain des paramètres S_{12} et S_{21} en fonction de la fréquence (voir Figure 3.3).

Notons la valeur maximale du gain et soustrayons à cette valeur 3 décibels ; cette nouvelle valeur correspond à la moitié de la puissance maximale mesurée. Notons f_1 et f_2 ($f_2 > f_1$) les fréquences correspondant à ce gain diminué. La largeur de la bande passante Δf (voir Figure 3.3) est égale à :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (3.4)$$

Le facteur de qualité de la cavité est donc :

$$Q_0 = \frac{f}{\Delta f} \quad (3.5)$$

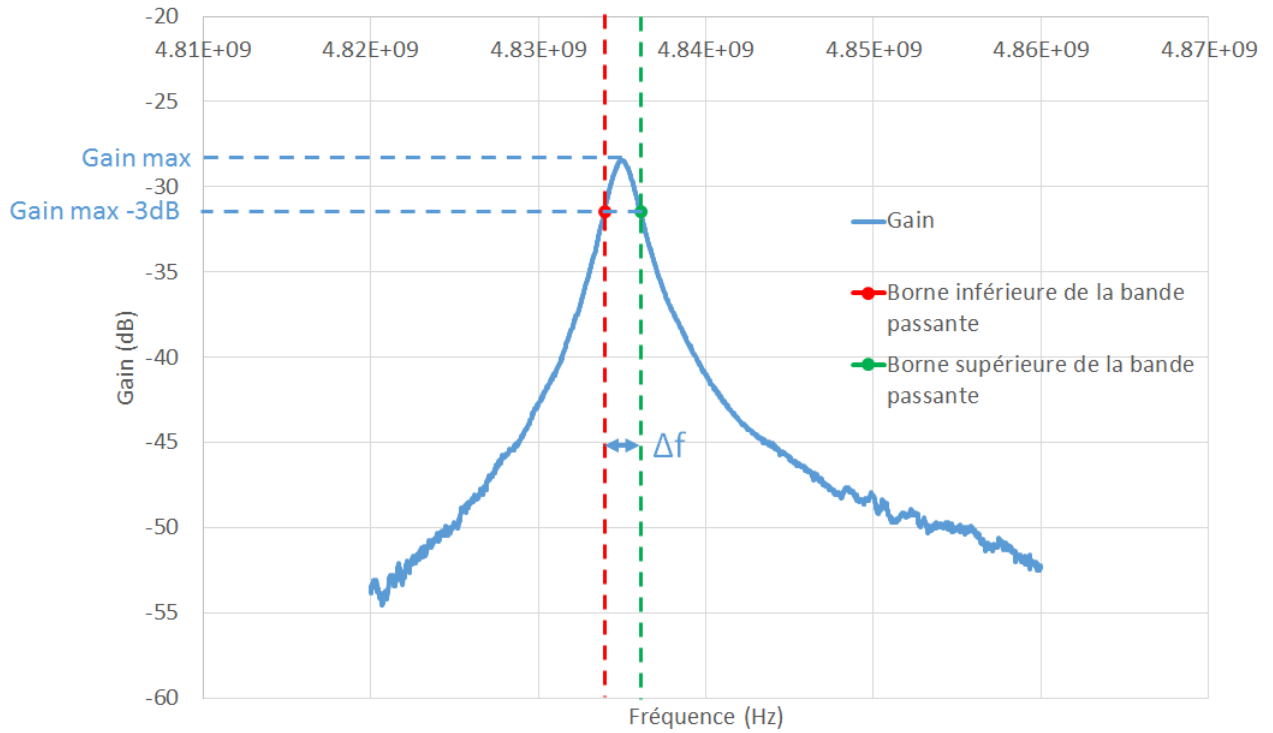


FIGURE 3.3 – Mesure en transmission S_{21} de la fréquence de résonance et de la bande passante de la cavité prototype "type 2"

Ce protocole de mesures radiofréquences est mis en application dans les différents tests de nos pièces prototypes.

3.1.2 Validation des systèmes d'accord

Cavités prototypes et protocole de test

Comme nous l'avons vu précédemment, il est nécessaire de pouvoir corriger les fréquences de nos cavités. Nous avons donc conçu des prototypes afin de tester le système d'accord présenté au chapitre précédent. La fabrication des pièces a été confiée à l'entreprise MPRO. Nous avons conçu et réalisé ces pièces prototypes sur le modèle de nos cavités symétriques, "type 2" et "type 3", présentées en Figures 3.4 et 3.5. Ces cavités sont composées de deux pièces en cuivre brasées ensemble ; une partie "concave" et une partie "plate". Ces cavités sont percées sur leurs circonférences de 4 trous chacune, comme dans l'architecture du système d'accord décrite dans le chapitre précédent.

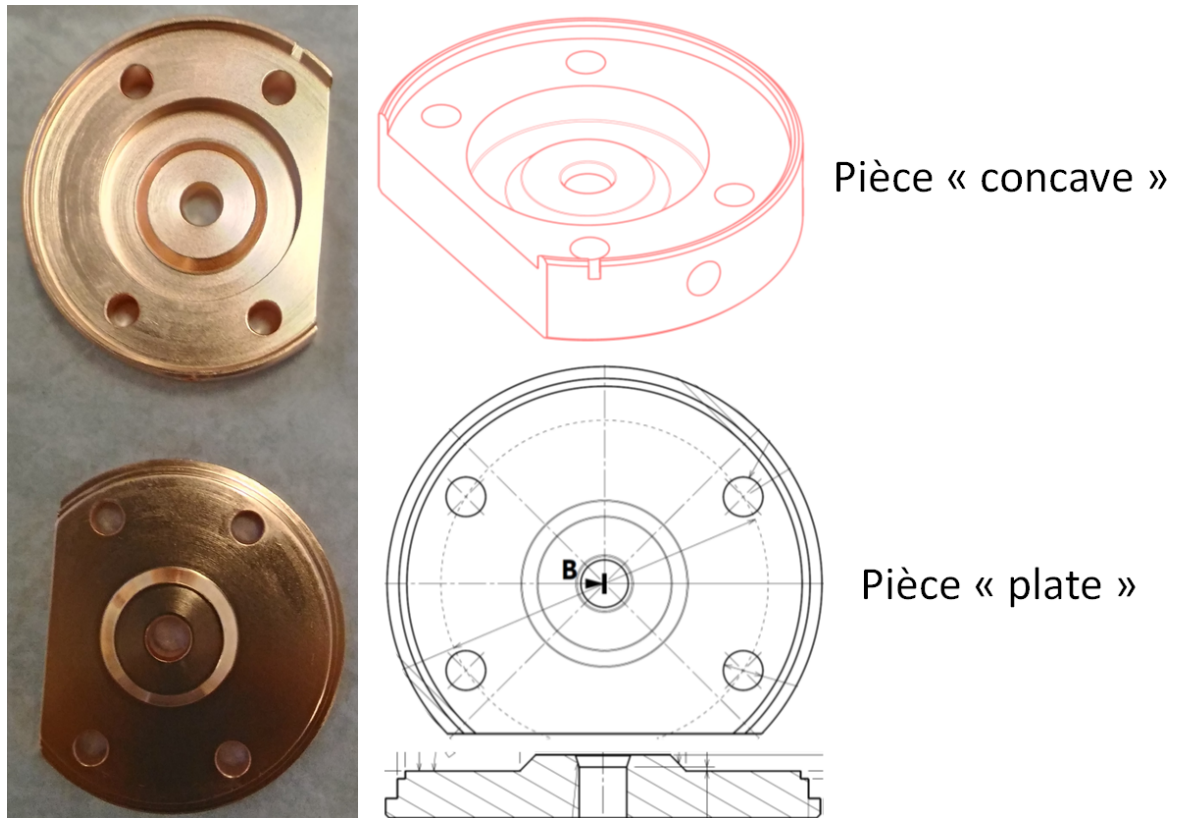


FIGURE 3.4 – Cavité prototype "type 2"

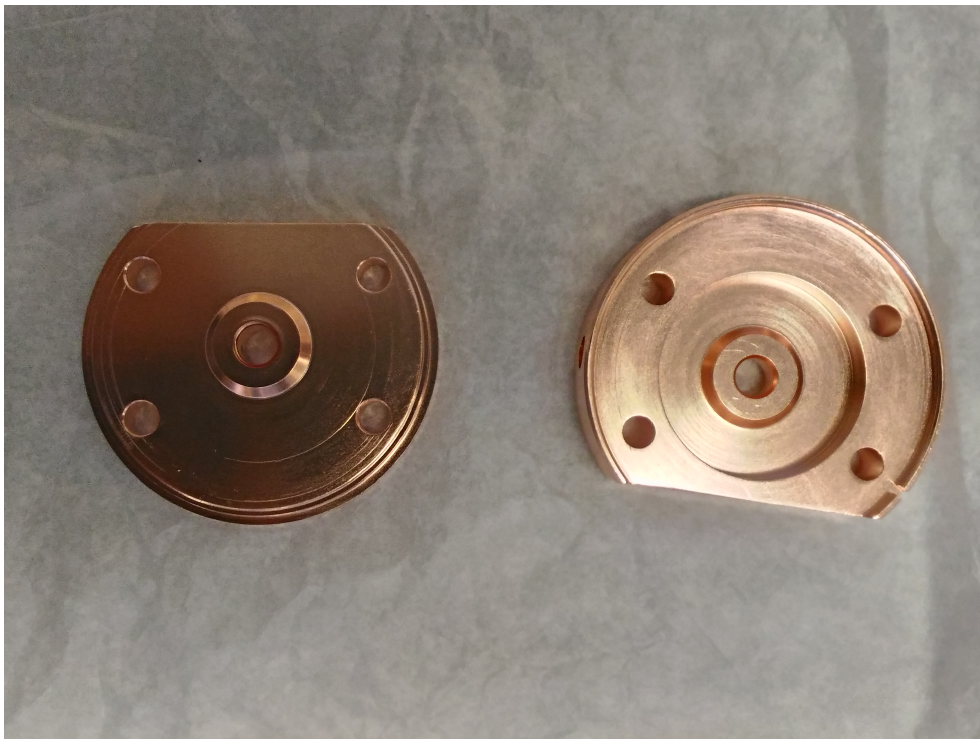


FIGURE 3.5 – Cavité prototype "type 3"

Nous obtenons les résultats de mesures présentés en table 3.1. Les valeurs de ce tableau sont celles obtenues grâce à nos calculs COMSOL, comme dans le chapitre précédent, les valeurs mesurées au CEA, et les valeurs mesurées à Thales.

Cavité	Mesure	Fréquence (MHz)	Q_0
Type 2	COMSOL	4842.1	3826
	CEA	4840.4	789
	Thales	4836.0	500
Type 3	COMSOL	4794.3	3224
	CEA	4806.2	2085
	Thales	4807.0	1400

TABLE 3.1 – Mesures de fréquences et de facteurs de qualité avant brasage

L'écart entre les valeurs mesurées à Thales et au CEA est de -1,0MHz à +4,5MHz, différence imputable à la méthode de mise en position des pièces et de mesure de fréquence. La différence entre les fréquences calculées et les valeurs mesurées est comprise entre -6,0MHz et +12,5MHz ; cet écart recouvre entièrement la disparité de nos mesures. La cause apparente de ces écarts est la qualité d'usinage des pièces. Cette différence reste dans l'intervalle de réglage de nos systèmes d'accord et représente une erreur maîtrisée.

Nous notons par ailleurs une importante variation des valeur de Q_0 ; ces valeurs fluctuent très nettement en fonction du serrage des boulons de de fixation. Le facteur de qualité dépend en effet de la puissance absorbée par les parois, donc de leurs surfaces exposées aux champs électromagnétiques. La mise en position des pièces lors des mesures avant brasage doit permettre un contact optimal des pièces, afin d'éviter qu'une partie de la puissance électromagnétique soit dissipée dans l'interstice résiduelle. La fermeture complète de la cavité est ainsi difficile à obtenir.

Tests des systèmes d'accord

Nous avons brasé 4 pions dans les trous des systèmes d'accord de la cavité 1 (type 2), indexés de 1 à 4. Le métal d'apport utilisé est un fil composé de cuivre et d'argent (28%Cu, 72%Ag). Ce fil est disposé autour des pions, au contact de la membrane des systèmes d'accord. Le brasage a été effectué dans un four sous atmosphère de dihydrogène (pression de 1080mbar), à une température de 800°C. Les pions ont été maintenus parallèles aux axes des trous des systèmes d'accord grâce à des tubes en acier oxydé et un fil de molybdène ; la pièce a été placée sur son méplat dans le four de brasage.

L'excès de métal d'apport nous a conduit à changer de procédé : comme nous le verrons au paragraphe 3.2.3, les pions de la ligne finale sont argentés et placés sans métal d'apport dans les trous des systèmes d'accord. Cet assemblage permet le brasage-diffusion cuivre-argent entre les pions argentés et la paroi en cuivre. Des tests ultérieurs, lors desquels nous avons placé la pièce à l'horizontal, ont montré que les pions basculaient lors du passage au four ; ainsi, les pions se retrouvaient brasés de façon latérale à la paroi du trou du système d'accord. Pour la méthodologie employée avec nos pièces finales, étant donné que le brasage à l'horizontal est impératif (voir paragraphe 3.2.3), nous avons décidé de retirer la couche d'argent de la surface latérale des pions.

Une fois que les pions ont été brasés sur les membranes des trous des systèmes d'accord, l'outillage de brasage est retiré et les éléments de réglage (soit la bague de support, le premier palier en bronze, le "piston", d'un pas de vis de 0,2mm/tour, le deuxième palier et enfin l'arrêt axial) sont assemblés. Par convention, un tour "positif" correspond au sens trigonométrique : le pion est vissé dans le "piston", la membrane est déformée de façon concave et le volume de la cavité est augmenté ; la fréquence de résonance est alors diminuée. Une première série de mesures nous a permis de tirer sur la membrane du système d'accord n° 3 afin de diminuer la fréquence de la cavité : nous avons ainsi décalé sa fréquence de -3.4MHz (voir Figure 3.6) en effectuant 8 tours.

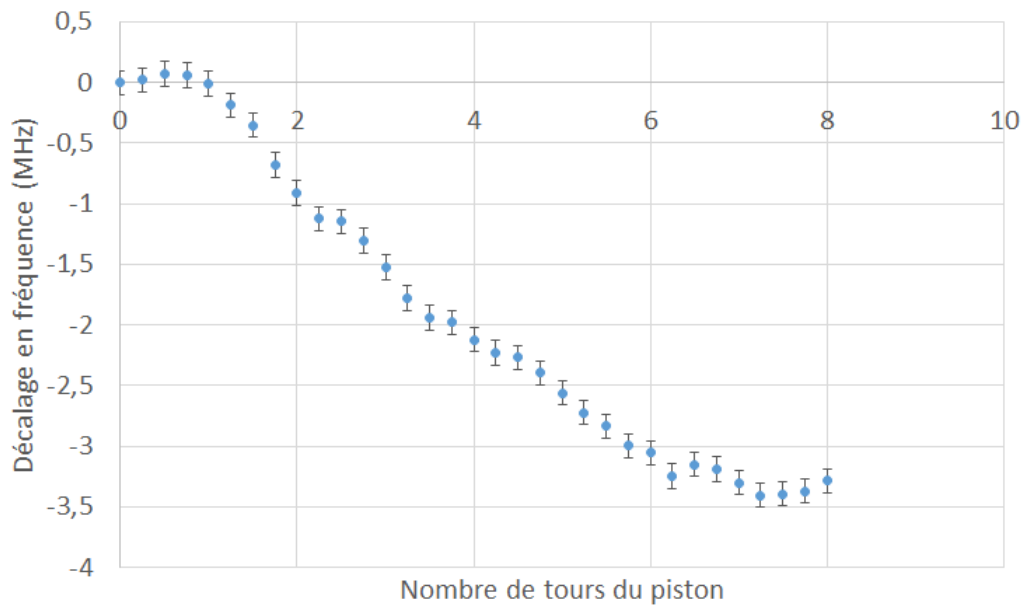


FIGURE 3.6 – Décalage de la fréquence de la cavité en fonction du nombre de tours du "piston" du système d'accord n° 3 - pion en Cupronickel brasé

Cette série de mesures laisse apparaître 3 phases :

- Un premier palier, jusqu'à environ un tour de piston, correspondant à la déformation des paliers en bronze et de la liaison filetée.
- Une partie linéaire, du premier au sixième tour de piston, au cours de laquelle la membrane est déformée et la fréquence de la cavité est donc modifiée linéairement.
- Un second palier, à partir de 6 tours de piston ; nous avons dans un premier temps interprété que ce palier était dû au fait que le pion était totalement vissé dans le piston.

Nous avons ensuite effectué une autre série de mesures avec le système d'accord n° 4, sur une course plus faible, de +4 tours de piston à -4 tours de piston, présentée en Figure 3.7. Par convention, par la suite un tour négatif revient à dévisser le pion dans le piston (et augmenter la fréquence) et un tour positif revient à visser le pion du piston (et diminuer la fréquence).

Nous avons donc commencé par effectuer 4 tours positifs du piston afin de diminuer la fréquence (segment 1) ; le décalage noté est de -1,6MHz. Nous observons, comme précédemment, un palier lors du premier tour, correspondant à l'élasticité de l'assemblage. Nous sommes ensuite revenus à la fréquence initiale en effectuant 4 tours négatifs (segment 2) ; le décalage global que nous calculons alors est d'environ 100kHz, soit bien inférieur à notre erreur de mesure. Le troisième segment correspond à l'augmentation de la fréquence sur 4 tours. Nous pouvons observer un palier à partir du 3^{ème} tour négatif ; le décalage au 3^{ème} est de +2,1MHz. En effectuant par la suite 4 tours négatifs (segment 4), la fréquence est également restée inchangée ; le système d'accord est donc devenu inopérant.

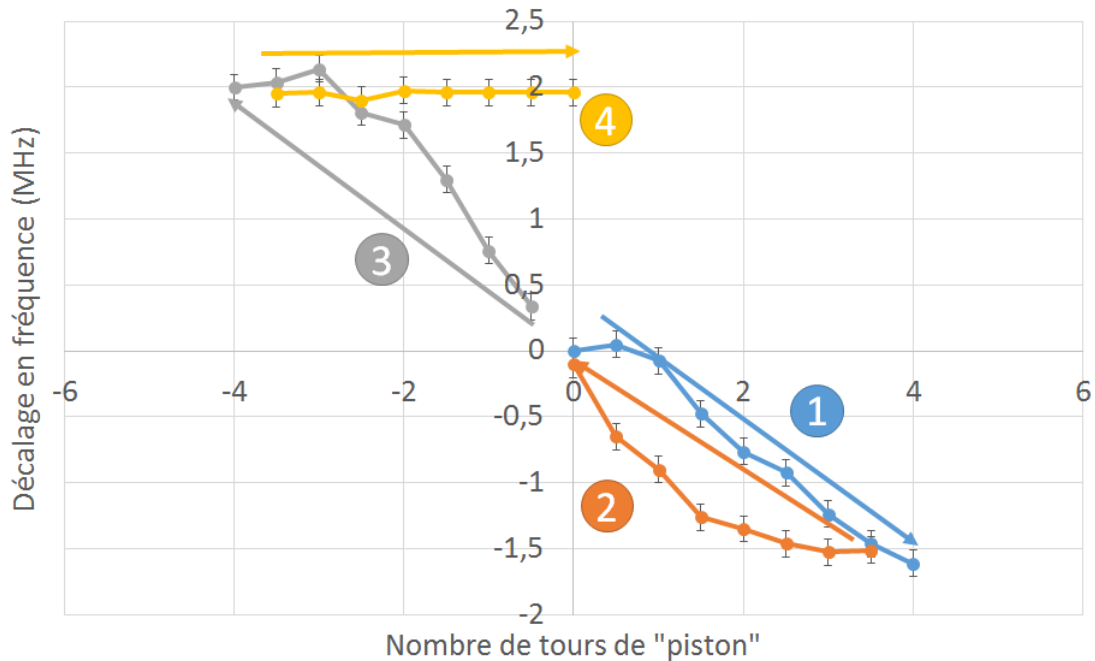


FIGURE 3.7 – Décalage de la fréquence de la cavité en fonction du nombre de tours du "piston" du système d'accord n° 4 - pion en Cupronickel brasé

Nous avons alors démonté notre assemblage pour constater que, le filetage de ce pion ayant été endommagé lors de nos tests, la vis tournait dans le vide. Nous en avons conclu que ces dommages étaient dus aux contraintes d'assemblage excessives ; cet assemblage aurait conduit le pion à se désaxer et à appliquer une contrainte mécanique importante sur le filetage.

Afin de diminuer ces contraintes d'assemblage, nous avons retiré un des paliers en bronze du système d'accord. Les résultats de mesure sont présentés en Figure 3.8. Ces mesures ont été effectuées en deux cycles :

- Un premier cycle de 9 tours négatifs correspondant à une augmentation de la fréquence de 2.2MHz ; puis un retour à position initiale, pour un décalage global calculé de 200kHz (segments 1 et 2).
- Un deuxième cycle de 4 tours positifs (soit un décalage de -1.5MHz) à 9 tours négatifs (+3MHz), puis un retour à la position initiale, pour un décalage global calculé de 800kHz (segments 2, 3 et 4).

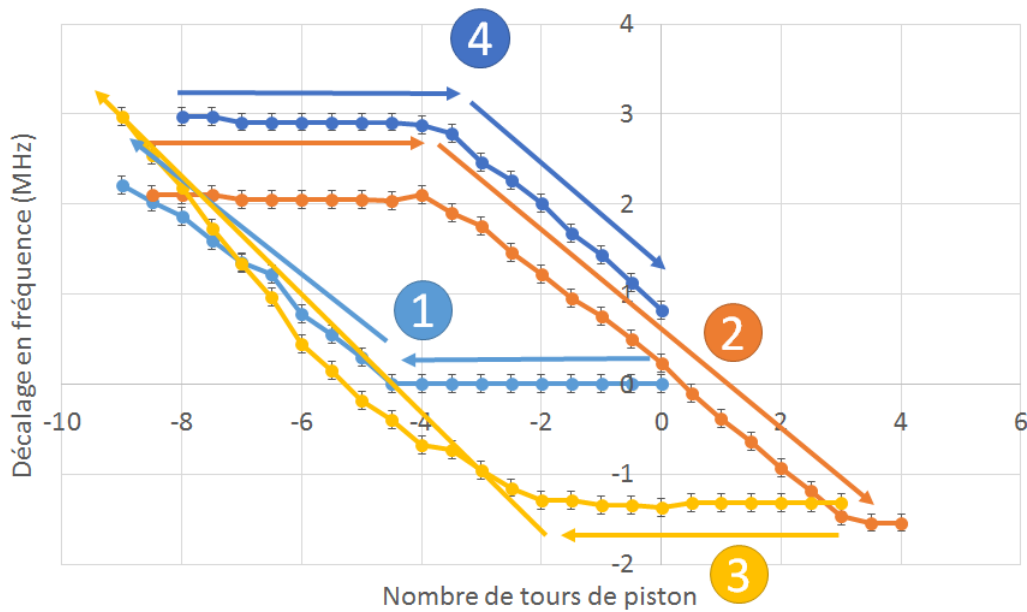


FIGURE 3.8 – Décalage de la fréquence de la cavité en fonction du nombre de tours du "piston" du système d'accord n° 1 avec un seul palier en bronze - pion en Cupronickel brasé

Les paliers, d'une longueur d'environ 5 tours (soit 1mm, avec un pas de 0,2mm), correspondent au jeu dû à l'absence d'un des supports en bronze et à l'élasticité globale de l'assemblage. Nous observons alors un phénomène d'hystérésis.

Nous définissons le décalage global en fréquence après un cycle complet comme la différence entre la dernière et la première valeur de fréquences mesurées ; dans cette étude, ce décalage est de +800kHz, ce qui est proche de notre erreur de mesure ; nous en déduisons que ce système d'accord est suffisamment fidèle pour nos réglages finaux.

En tenant compte des effets liés aux jeux d'assemblage et à l'élasticité des matériaux, nous pouvons sélectionner les valeurs des décalages en fréquence mesurées pour lesquelles l'effet des systèmes d'accord est prépondérant ; la tendance de variation de ces valeurs de décalage est un ensemble de fonctions linéaires du nombre de tours effectués. Une régression linéaire de ces séries de données permet d'obtenir les pentes des segments concernés en table 3.2. Les systèmes d'accord ont permis d'obtenir un décalage compris entre -0,8MHz/tour et -0,5MHz/tour.

Test	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4
1	-0,6 +/-0,3			
2	-0,6 +/-0,2	-0,5 +/-0,2	-0,6 +/-0,3	
3	-0,5 +/-0,1	-0,5 +/-0,1	-0,6 +/-0,2	-0,5 +/-0,1

TABLE 3.2 – Pentes (décalage en fréquence en mégahertz par tour de piston effectué) des différents segments des Figures 3.6, 3.7 et 3.8

Nous pouvons conclure que ce prototype de système d'accord est capable de décaler la fréquence de résonance sur une plage de -1.5MHz à +3MHz ; en extrapolant le résultat de nos tests aux 4 systèmes d'accord par cavité, nous obtenons un réglage possible de -6MHz à +12MHz. Il est à noter que cette plage de réglage asymétrique est due à la conception de nos pièces prototypes ; les pièces de la ligne finale sont en revanche conçues pour proposer des plages de réglage symétriques ; la plage de réglage de la ligne finale est donc, pour chaque cavité, de -12MHz à +12MHz.

La répétabilité de nos résultats permet d'anticiper les réglages des cavités finales. Cette nouvelle architecture, contrairement au système de réglage des cavités CLIC, permet l'ajustement précis, répétable et réversible des fréquences des cavités.

3.1.3 Validation de la méthode de brasage

Méthode de brasage des cavités

Le brasage est une méthode d'assemblage permanent de pièces. Les pièces concernées sont chauffées localement ou entièrement, et créent une liaison métallique à leur interface. Un métal d'apport est souvent nécessaire ; dans le cas contraire, nous parlerons de brasage-diffusion. Cette méthode permet l'assemblage de matériaux très variés, notamment les métaux et les céramiques, et en fait donc un procédé de choix dans la réalisation de tubes électroniques[40] et de pièces constitutives d'accélérateurs de particules. Le brasage de pièces permet en effet de garantir l'étanchéité à un vide poussé, avec des gradients de températures de plusieurs centaines de Kelvin et des contraintes électromécaniques soutenues.

Selon les matériaux en présence, le brasage de nos pièces est effectué dans un four sous vide, à une pression d'environ 5.10^{-5} mbar, ou sous une pression de dihydrogène d'environ 1080 mbar. Ces cycles de brasage, d'une durée de 6 à 8 heures, commencent par un pompage (ou une mise sous pression de dihydrogène) puis un chauffage progressif, avec un ou plusieurs paliers d'homogénéisation de la température, notamment dans le cas de pièces massives ; enfin le système de chauffage est stoppé et le refroidissement s'effectue dans le four.

Le brasage sous atmosphère de dihydrogène permet d'une part l'homogénéisation de la température dans le four grâce à la convection et, bien sûr, le contrôle de la pression, mais est source de création d'hydrures, notamment en présence de titane. Le pompage des fours sous vide, en revanche, ne permet pas de rétro-contrôle : la pression diminue parfois jusqu'à la valeur de la pression de vapeur saturante de certaines espèces en présence, ce qui nuit bien évidemment à la qualité des alliages et empêche le brasage des matériaux.

L'étape de brasage au four est précédée d'un dégazage des pièces : ces dernières sont soumises à un cycle de chauffage à une température proche des conditions de brasage ; dans le cas des cavités en cuivre, ce dégazage est effectué à 650°C. Ce cycle permet de désorber les gaz présents sur les pièces et de nettoyer les surfaces à braser.

Les pièces du klystron TH2166, en cuivre, ont été brasées ensemble en utilisant un alliage de cuivre (28% en masse) et d'argent (72% en masse). Cette méthode a été également employée pour le brasage des cavités du kladistron. Les pièces ont été conçues de façon adaptées : la rugosité arithmétique (R_a) des surfaces à braser est supérieure à $0,4\mu\text{m}$, afin de prévenir le piégeage de lubrifiant lors des phases d'usinage, et inférieure à $0,8\mu\text{m}$, afin de garantir la répartition du métal d'apport ; les jeux d'assemblages sont en outre inférieurs à $30\mu\text{m}$ pour permettre la diffusion de l'alliage par capillarité.

Brasage des cavités prototypes

Nous avons procédé au brasage des pièces constituant les cavités prototypes de la première série. Dans un premier temps, nous avons nettoyé et procédé à un dégazage des pièces à 650°C. Un fil du métal d'apport (Ag72%/Cu28%), d'un diamètre de 0.5mm, a ensuite été placé dans la gorge prévue à cet effet. L'opération de brasage effectuée, nous avons procédé à des mesures radiofréquences au CEA et à Thales ; nous avons ensuite comparé ces valeurs aux résultats de COMSOL. Nos résultats sont présentés en table 3.3.

Cavité	Mesure	Fréquence (MHz)	Q_0
Type 2	COMSOL	4842.1	3826
	CEA	4844.5	2800
	Thales	4844.0	2000
Type 3	COMSOL	4794.3	3224
	CEA	4809.5	3400
	Thales	4809.0	2800

TABLE 3.3 – Mesures de fréquences et de facteurs de qualité après brasage

Nos mesures de fréquences au CEA et à Thales sont identiques, à l'erreur de mesure près. En comparant ces résultats avec les valeurs du tableau 3.3, nous constatons que l'opération de brasage a augmenté la fréquence des cavités, de +2MHz à +8MHz. La différence de fréquence entre nos calculs préliminaires et nos résultats est de +2 à +15MHz.

La difficulté des mesures de fréquences et de calcul de facteur de qualité avant brasage, la disparité de nos valeurs et le faible nombre de véhicules-test ne nous permettent pas de conclure quant au décalage en fréquence ou du changement de facteur de qualité dû au brasage.

3.1.4 Validation de la méthode de titanage

Forts de nos résultats de calculs avec Music3D, nous étions pleinement conscients de l'importance des opérations de titanage des cavités. D'autre part, la précision requise pour la fabrication de nos pièces nous a amené à considérer différentes méthodes de titanage. Afin de déterminer la méthode optimale pour nos pièces finales, nous avons conçu et réalisé une deuxième série de pièces prototypes dont la géométrie reprend le design final des cavités.

Cavités prototypes et protocole de test

Les pièces prototypes de la deuxième série sont des assemblages d'une pièce concave, qui est la cavité proprement dite, et une pièce plate, qui sert de couvercle à la cavité. Nous avons réalisé 6 pièces concaves, ou monobec (MB₁ à MB₆ - voir Figure 3.9) et 11 pièces plates : 3 pièces plates "témoin" (Cu₁ à Cu₃), qui ne sont pas destinées à être titanées, et 8 pièces présentant une renforcement de 0,1mm permettant le dépôt de titane (Ti₁ à Ti₆ - voir Figure 3.10). Les fréquences et facteurs de qualités calculés avec COMSOL sont présentés en Table 3.4.

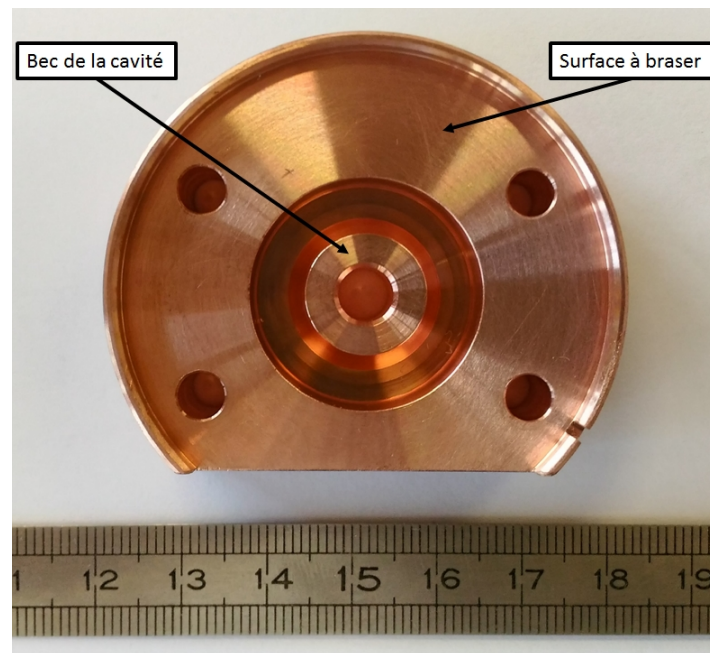


FIGURE 3.9 – Pièce prototype "concave" (MB) de la deuxième série

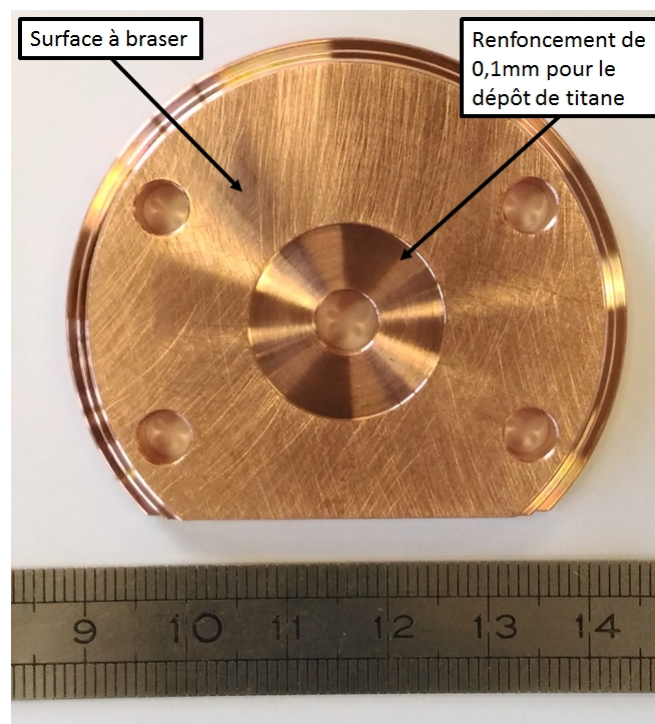


FIGURE 3.10 – Pièce prototype "à titaner" (Ti) de la deuxième série

Nos tests ont été réalisés en quatre étapes :

- Mesures des fréquences des cavités à la réception des pièces.
Mesure notamment des fréquences des cavités destinées à être brasées (Ti_1/MB_1 à Ti_6/MB_6).
- Mesures après le titanage des pièces Ti.
- Mesures après la reprise des pièces Ti après titanage.
- Mesures après le brasage des cavités.

Cavité	Fréquence (MHz)	Q_0
Cu_iMB_j	4872.0	3500
Ti_iMB_j , non titanée	4959.0	3500
Ti_iMB_j , titanée	4871.5	2000

TABLE 3.4 – Paramètres des cavités prototypes de la deuxième série : résultats de calculs COMSOL

Afin de réaliser au mieux les opérations de titanage et de reprise, nous avons effectué des mesures d'épaisseur entre chaque étape en définissant trois à quatre zones annulaires et huit directions de mesures (voir Figure 3.11) ; ces mesures nous ont permis d'évaluer approximativement les variations d'épaisseur de titane.

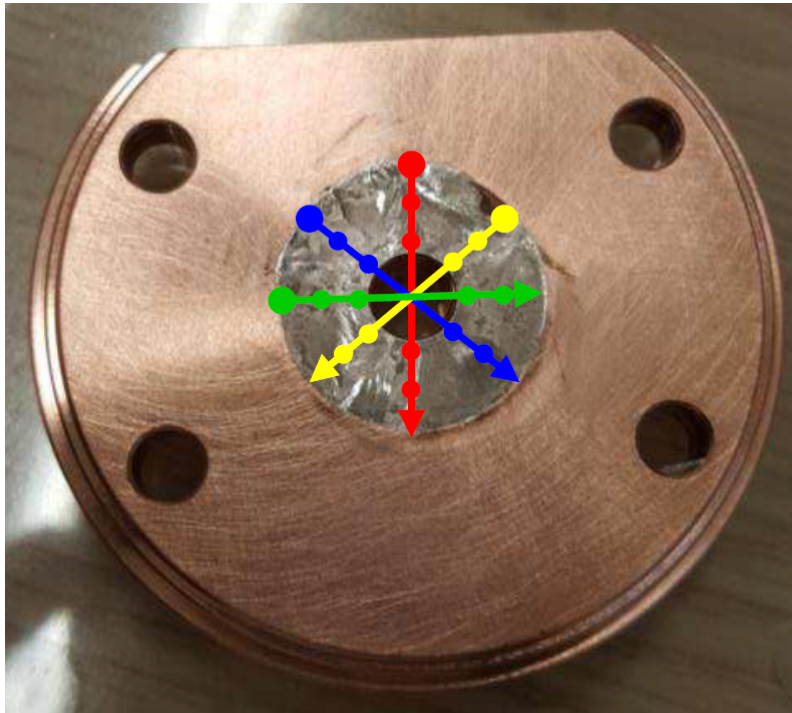


FIGURE 3.11 – Directions des mesures de l'épaisseur des pièces Ti titanées (hydrure de titane)

Dépôts d'hydrure de titane

La première méthode de titanage que nous avons voulu tester est celle mise en œuvre habituellement à Thales. Elle consiste à appliquer une couche d'hydrure de titane sur les zones concernées par le multipactor, comme les becs des cavités par exemple, à l'aide d'un pinceau ; le titane est ensuite fixé en maintenant les pièces à haute température (environ 900°C) dans un four. Cette méthode permet de disposer une très faible quantité de titane de façon localisée.

Nous avons entrepris d'effectuer un titanage de ce type sur deux de nos pièces prototypes, Ti_2 et Ti_3 (voir Figure 3.11).

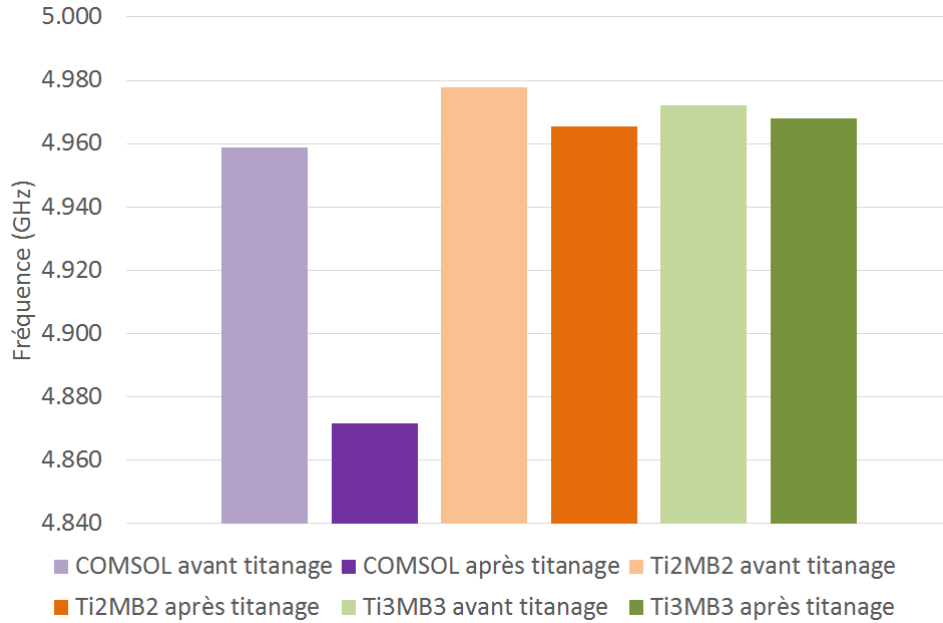


FIGURE 3.12 – Résultats de mesures des fréquences des cavités Ti_2MB_2 et Ti_3MB_3

Nous avons ensuite assemblé les pièces Ti_2 et MB_2 , et les pièces Ti_3 et MB_3 afin de procéder aux mesures de fréquences (voir Figure 3.12). Étant donné que l'épaisseur de la couche de titane déposée, de $6\mu\text{m}$ en moyenne pour la pièce Ti_2 , et de $20\mu\text{m}$ pour la pièce Ti_3 , est bien en-deçà de celle prévue ($100\mu\text{m}$), les valeurs de fréquences relevées sont proches des mesures effectuées précédemment ; la fréquence de la cavité Ti_2MB_2 titanée est ainsi de $4,9655\text{GHz}$, ce qui représente un décalage de $-12,2\text{MHz}$; la fréquence de la cavité Ti_3MB_3 titanée est de $4,9680\text{GHz}$, ce qui représente un décalage de $-4,2\text{MHz}$.

La différence d'épaisseur de titane d'un même dépôt (de $0,2\mu\text{m}$ à $64,2\mu\text{m}$ pour la pièce Ti_2 et de $0,0\mu\text{m}$ à $24,1\mu\text{m}$ pour la pièce Ti_3) montre que cette méthode de titanage est très imprécise et difficile à mettre en œuvre dans le cas de nos cavités. Ce procédé est adapté dans le cas de cavités "classiques", symétriques et aux becs de taille réduite.

Diffusion de feuilles de titane

La deuxième méthode de titanage envisagée consiste à diffuser un disque de titane de $100\mu\text{m}$ d'épaisseur dans le renforcement prévu à cet effet. Ces disques sont découpés par un procédé de forgeage à froid. Un des disques est présenté en Figure 3.13. Les feuilles de titane ainsi obtenues et les pièces "Ti" sont dégazées au four. Ces disques sont ensuite placés sur les pièces à titaner ("Ti"), et nous effectuons alors un cycle de brasage-diffusion à 885°C , sous vide. Lors de la montée en température, des atomes de titane et de cuivre sont échangés dans une couche d'une épaisseur de quelques micromètres ; il se forme alors un alliage eutectique cuivre-titane, totalement liquide à cette température (voir Figure 3.14). Au refroidissement, cette couche permet l'adhérence du titane sur le cuivre. La couche de titane étant irrégulière (voir Figure 3.17), une opération d'usinage de la pièce, présentée ci-après, est prévue. Sur la Figure 3.15 est présentée la pièce Ti_6 titanée. Lors de l'opération de titanage de cette pièce, le système de sécurité du four a détecté un échauffement anormal et libéré du diazote ; il s'est alors formé des nitrures de titane à la surface de la feuille, ce qui donne à la pièce cette couleur jaune.

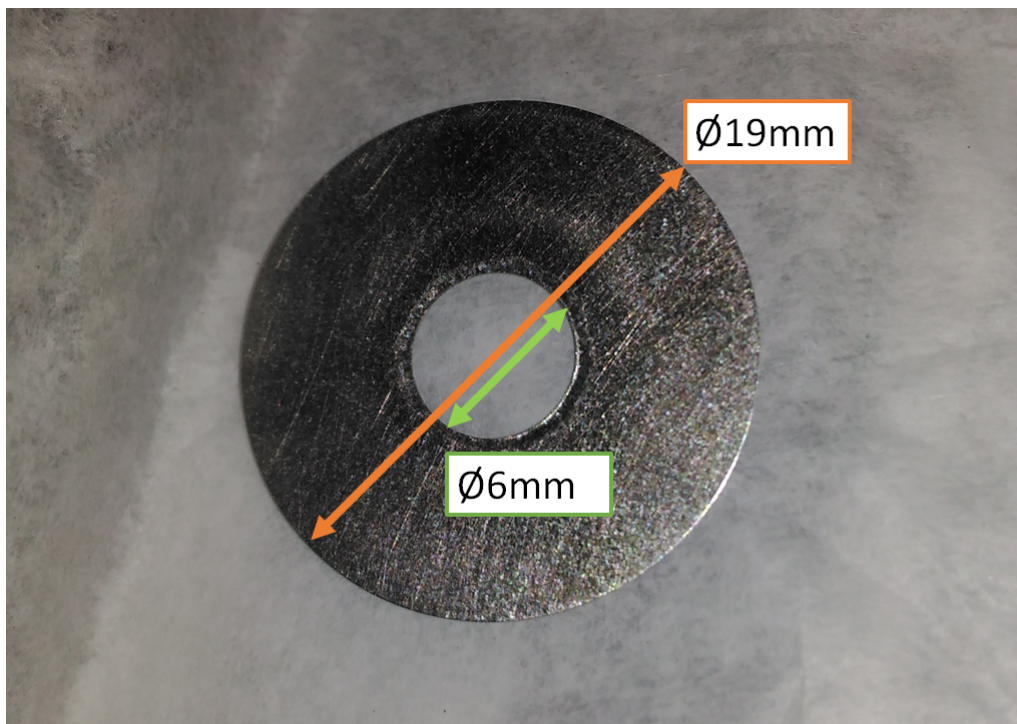


FIGURE 3.13 – Disque de titane usiné

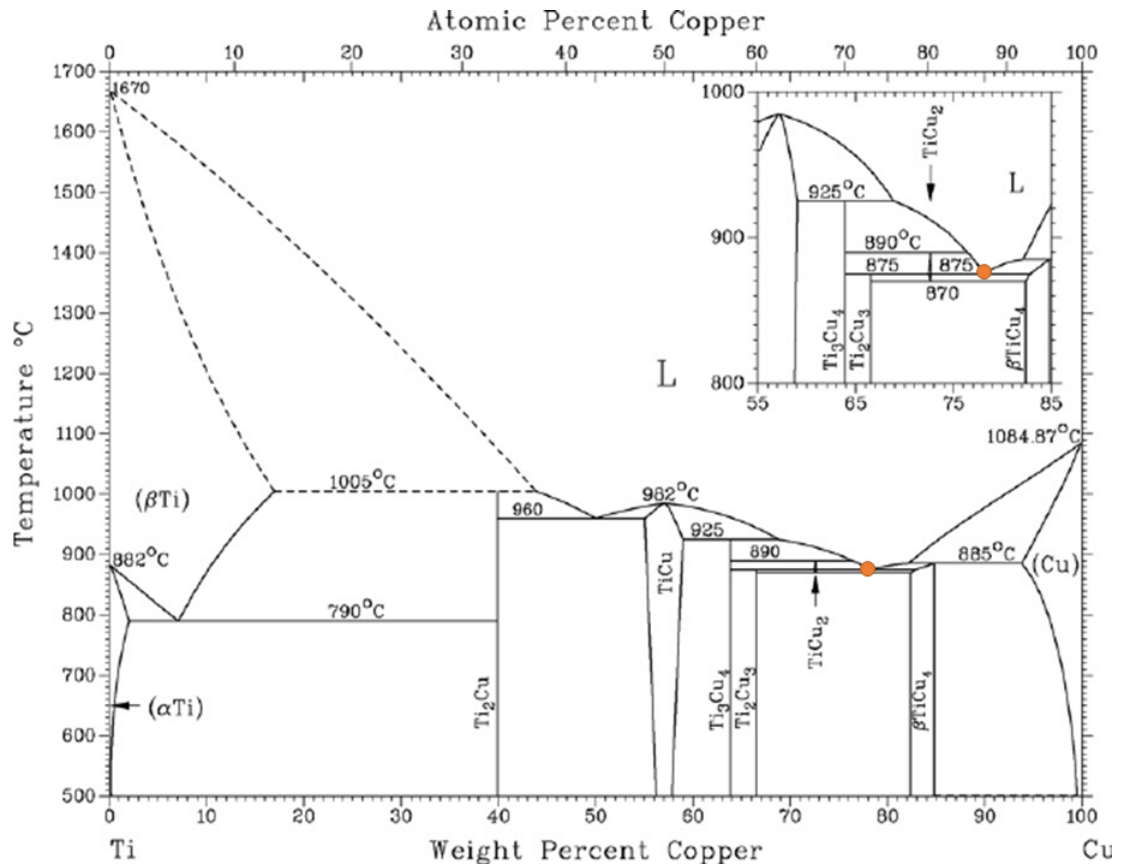


FIGURE 3.14 – Diagramme de phase cuivre-titane[13]; le point eutectique cuivre-titane est indiqué en orange

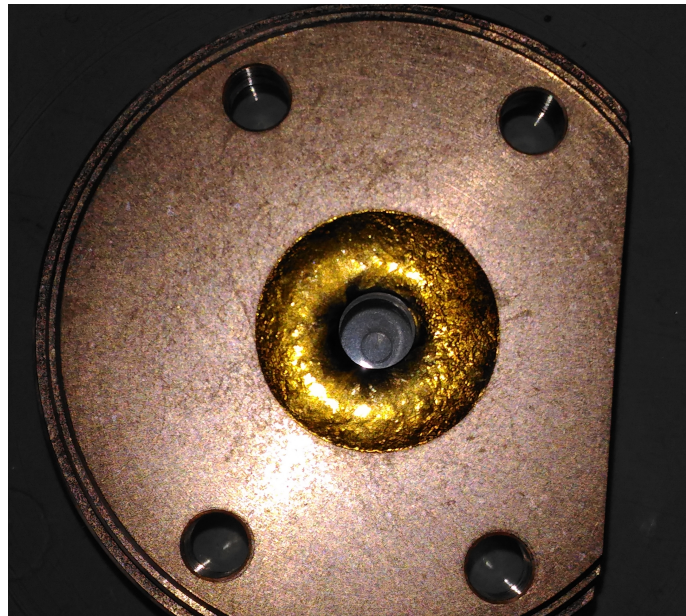


FIGURE 3.15 – Pièce prototype Ti_6 de la deuxième série titanée (feuille de titane diffusée)

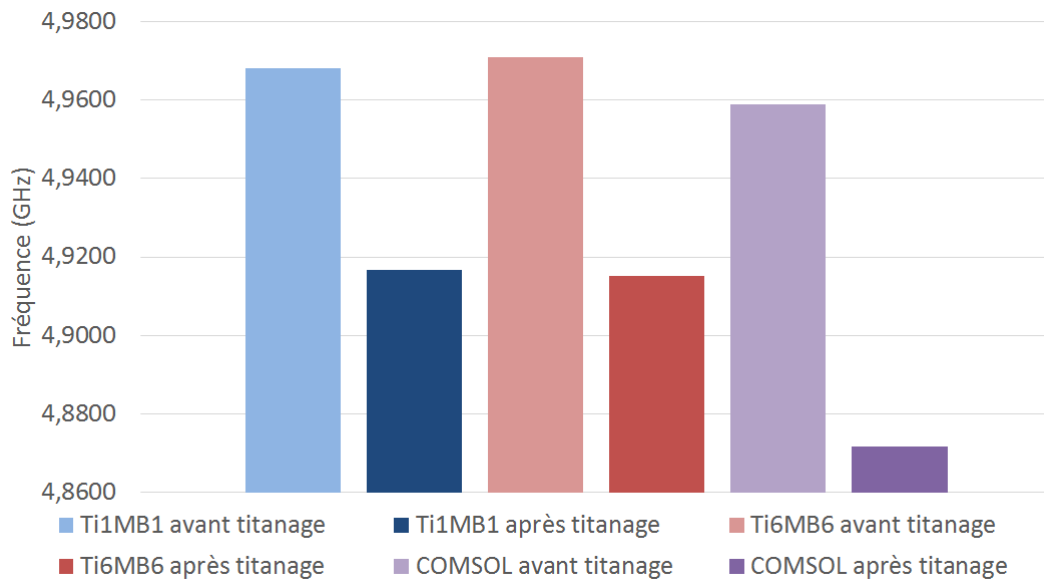


FIGURE 3.16 – Résultats des mesures de fréquence des cavités Ti_1MB_1 et Ti_6MB_6 avant et après titanage

En Figure 3.16 sont présentés les résultats de mesures de fréquences des cavités Ti_1MB_1 et Ti_6MB_6 avant et après titanage. Nous constatons un décalage de -52MHz pour la cavité Ti_1MB_1 et de -55MHz pour la cavité Ti_6MB_6 ; en revanche, nos simulations COMSOL présentent un décalage de -87MHz.

En utilisant la même méthodologie que dans le cas des pièces Ti_2 et Ti_3 , nous constatons que la couche de titane diffusée est très irrégulière; en reprenant la mesure d'épaisseur suivant quatre zones annulaires, comme décrit précédemment, nous constatons un écart d'épaisseur dans les trois zones "extérieures" (les plus éloignées du tube de glissement) de $-19\mu m$ à $+73\mu m$ par rapport à la couche de cuivre, pour une moyenne de $+29\mu m$ (pièce Ti_1). Par ailleurs, lors de la diffusion de la feuille de titane, l'extrémité au bord du tube de glissement s'est affaissée, modifiant considérablement la géométrie de la pièce. Nous avons tracé, avec le logiciel Matlab, une surface interpolant ces points de mesure, que nous présentons en Figure 3.17. La partie rouge sur la gauche représente la surface avant titanage, en cuivre. L'écart d'épaisseur est défini par rapport à la surface autour du renforcement prévu pour le titanage. L'épaisseur relevée près du tube de glissement est inférieure de $100\mu m$ à l'épaisseur d'origine, ce qui implique que la feuille de titane a déformé la pièce en cuivre Ti sous l'action de son poids propre et de l'effet de la dilatation thermique des matériaux. La géométrie de la pièce a donc été radicalement modifiée et la reprise d'usinage ultérieure prévue ne permet pas de retrouver la forme de cavité initialement prévue.

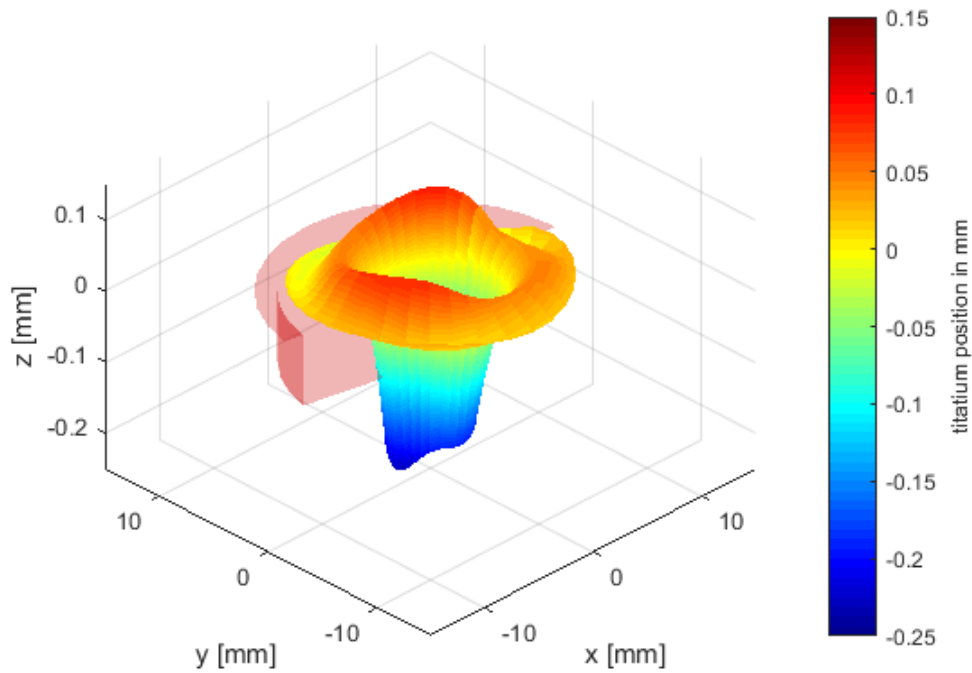


FIGURE 3.17 – Surface tracée en interpolant les résultats de mesure d'épaisseur de la pièce Ti_1 titanée (Matlab)

Afin de parer à cette déformation, nous avons modifié notre méthode de diffusion de titane (voir Figure 3.18). Nous avons placé dans le trou de glissement de la cavité Ti_5 un cylindre de cuivre ajusté ; nous avons ensuite placé une feuille de titane percée pour le centrage de l'assemblage et dont le diamètre extérieur est ajusté à l'espace prévu pour le titanage, comme dans le cas des pièces Ti_1 et Ti_6 .

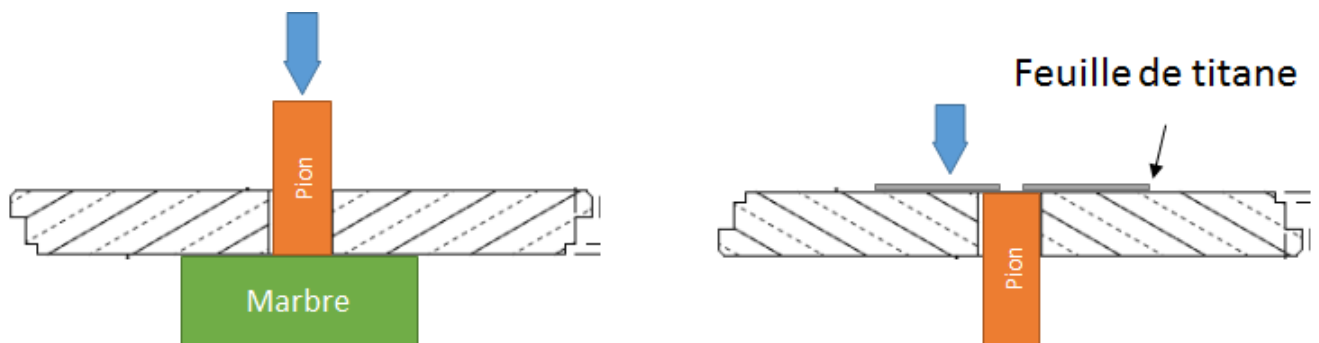


FIGURE 3.18 – Schéma de principe d'installation du cylindre de support pour titanage

Reprise mécanique des surfaces titanées

En raison des irrégularités d'épaisseur de titane relevées, et pour retirer l'outillage nécessaire dans notre méthode finale, nous avons ré-usiné les pièces titanées afin d'être en accord avec les cotes nominales prévues. En Figure 3.19 est présentée la pièce Ti_1 titanée et reprise.

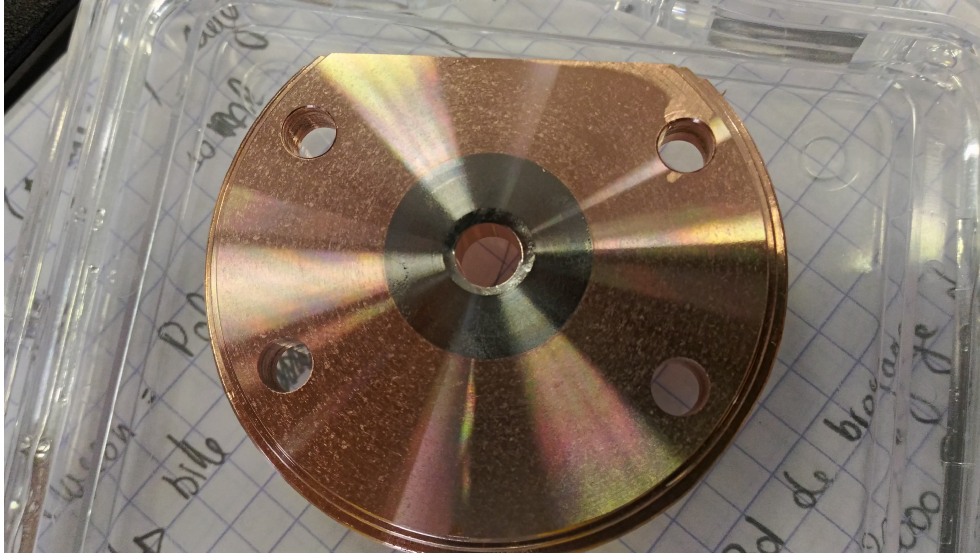


FIGURE 3.19 – Pièce Ti_1 titanée et reprise

3.1.5 Validation de la méthode de réglage par tapotage des becs

Le réglage par tapotage des becs

Le tapotage des becs est une méthode de réglage des cavités couramment utilisée sur les tubes électroniques de Thales. Le principe de ce réglage est de déformer les becs des cavités en utilisant un poinçon en acier inoxydable que l'on frappe à l'aide d'un marteau (voir Figure 3.20). Cette déformation permet d'ouvrir le gap de la cavité et augmente la fréquence. Une mesure de fréquence est effectuée entre chaque tapotage.

Dans le cas où les fréquences de nos cavités seraient très éloignées des valeurs cibles, ce système d'accord permettrait un premier réglage grossier des cavités.

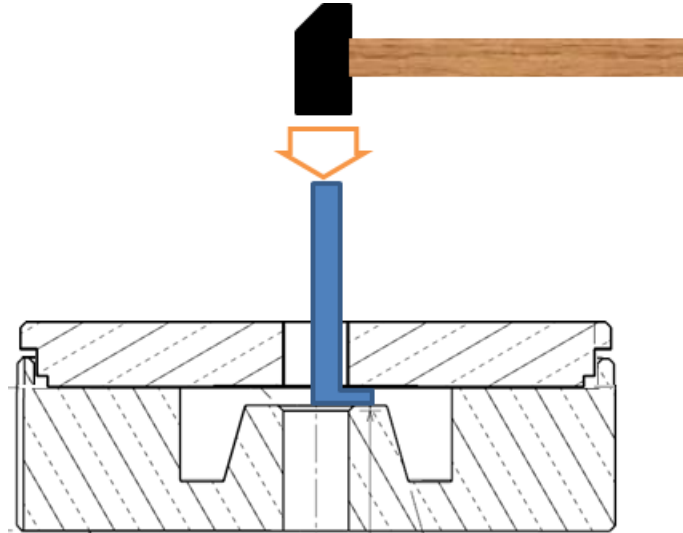


FIGURE 3.20 – Schéma de principe du tapotage des becs des cavités

Test de l'outillage de réglage

Afin d'être en mesure de régler en fréquence les cavités de notre ligne d'interaction, nous avons essayé cette méthode avec une de nos cavités prototypes de deuxième série, constituée de nos pièces Ti_1 et MB_1 brasées ensemble. Sur la Figure 3.21 sont présentés les résultats des tests de l'outil de tapotage. Nous avons effectué quatre mesures de la fréquence de résonance de la cavité test :

- Avant toute utilisation du poinçon.
- Après une utilisation ponctuelle, afin de tester l'outil.
- Après une utilisation ponctuelle très mesurée du poinçon, afin de connaître sa précision.
- Après une utilisation "classique" de l'outil, afin de connaître l'étendue de la plage de réglage en fréquence. Nous avons effectué dans ce cas une série d'utilisations ponctuelles comme lors de notre premier test.

Le premier tapotage a permis un décalage en fréquence de $+2,7\text{MHz}$; le suivant, plus léger, est deux fois moindre ($+1,3\text{MHz}$) ; enfin, l'utilisation classique de cet outil a permis un décalage de $+6,3\text{MHz}$, pour un décalage global lors de nos tests de $+10,3\text{MHz}$.

Cette méthode, bien que moins précise que les systèmes d'accord que nous avons conçus, est aisée à mettre en œuvre, et permet d'augmenter la fréquence des cavités de plusieurs dizaines de mégahertz.

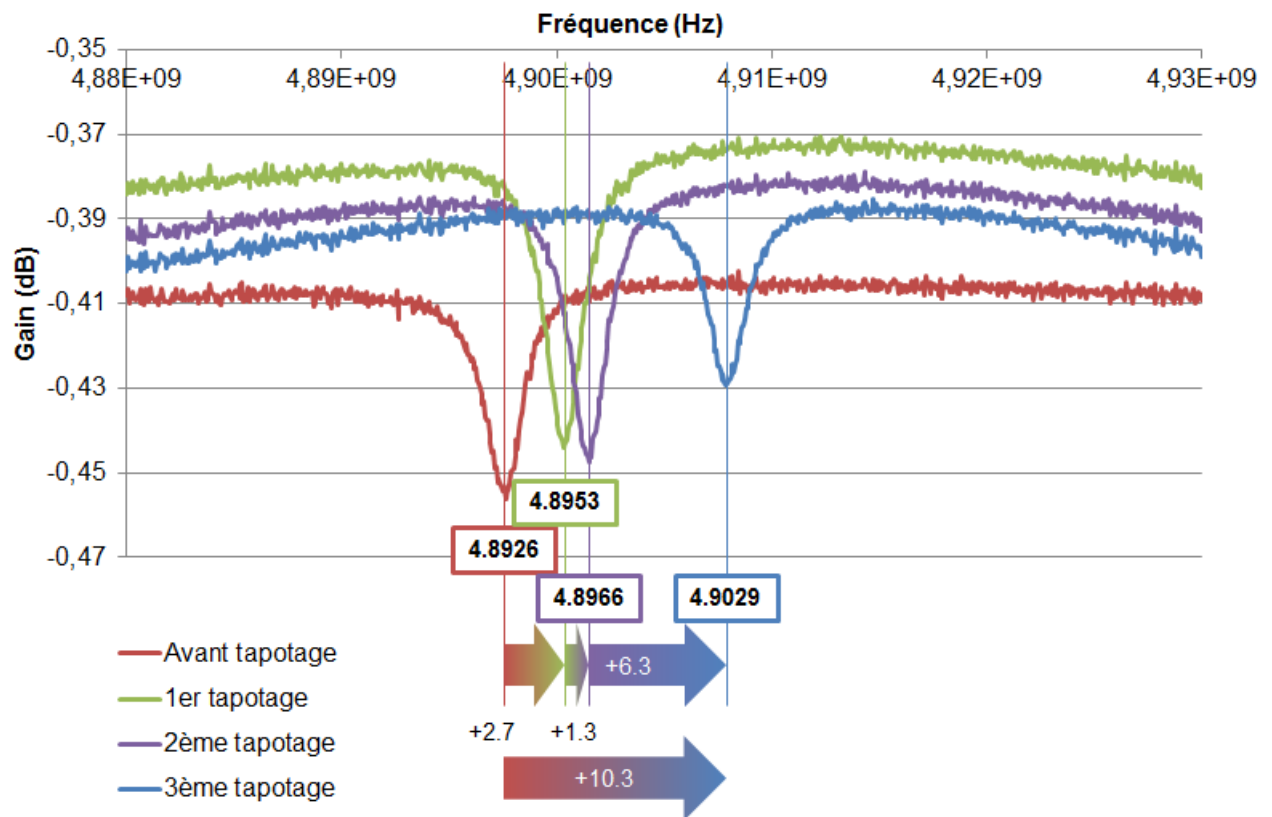


FIGURE 3.21 – Schéma de principe du tapotage des becs des cavités

3.2 La ligne d'interaction finale

Les tests effectués avec nos pièces d'essais nous ont permis d'achever la conception de nouvelles pièces, de valider les méthodes de réglage des cavités, de titanage et de brasage. Afin de réaliser notre prototype de kladistron, nous avons d'une part adapté les interfaces entre nos nouvelles cavités et le reste de la structure, et d'autre part confié à l'entreprise VDL la fabrication de nouvelles pièces. Nous avons pu ensuite effectuer l'assemblage complet du tube électronique.

3.2.1 Intégration de la ligne d'interaction

Afin d'assurer le bon fonctionnement du klystron TH2166, sa structure intègre un système de refroidissement à eau, constitué de canaux disposés autour de la structure d'interaction. L'épaisseur de cuivre entre l'espace sous vide et les canaux est d'environ 4mm, ce qui permet d'assurer l'étanchéité entre les différentes parties du tube. Notre nouvelle architecture a donc été conçue pour s'adapter à ce système de refroidissement.

J'ai également dû prendre en compte la géométrie des cavités d'entrée et de sortie et donc adapter les nouvelles pièces et modifier au besoin les pièces d'origine (voir Figure 3.22).

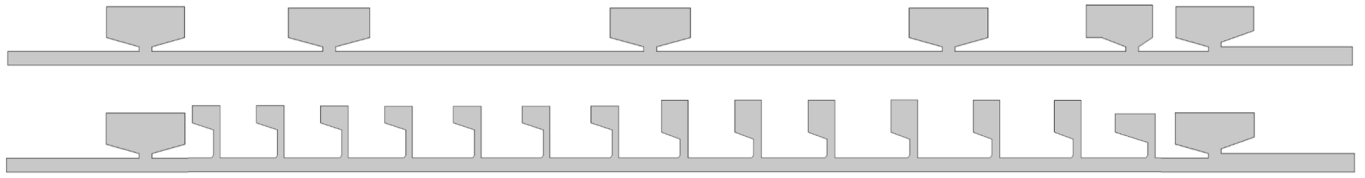


FIGURE 3.22 – Vue en coupe des lignes d'interaction du klystron TH2166 et du kladistron - simulation COMSOL

Interface avec la cavité d'entrée

Afin de réaliser la nouvelle ligne d'interaction, nous avons dû adapter la cavité d'entrée du klystron TH166. Le tube de glissement entre la première et la deuxième cavité est en effet plus court (16,8mm de long contre 40mm précédemment). D'autre part, les 6 canaux de refroidissement de la ligne du tube TH2166, répartis sur un cercle de rayon de 17,2mm, ont été remplacés par 4 canaux disposés suivant un cercle d'un rayon de 20,7mm. Cette modification permet de rediriger le circuit de refroidissement en raison du diamètre plus élevé des nouvelles cavités. Une nouvelle version de la pièce constituant la cavité 1 a donc été conçue pour adapter ce circuit ; cette nouvelle pièce a été réalisée par l'entreprise MGF Grimaldi. La conception d'une bague d'adaptation a également été nécessaire. Sur la Figure 3.23 est présentée la nouvelle version de la cavité d'entrée.

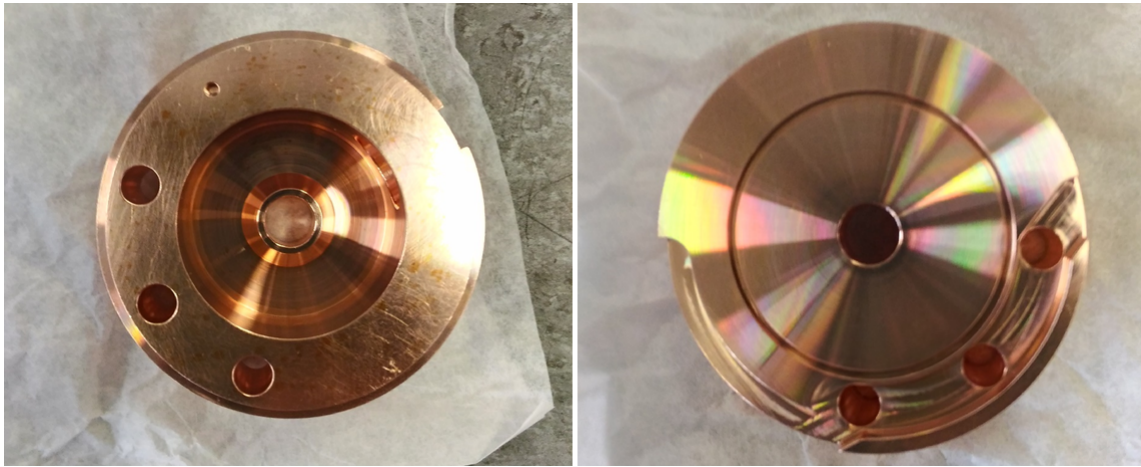


FIGURE 3.23 – Modifications effectuées sur la cavité d'entrée

Interface avec la cavité de sortie

La pièce constituant la cavité de sortie du klystron TH2166 a également été modifiée pour correspondre à notre architecture. Cette pièce a été réusinée en trois étapes (voir Figure 3.24) :

- La pièce a été entièrement surfacée afin de pouvoir adapter le circuit de refroidissement.
- Un alésage pour ajuster la longueur de glissement entre les cavités 15 et 16 a été réalisé.
- Le circuit de refroidissement a été modifié pour permettre la jonction avec les canaux des pièces précédentes.

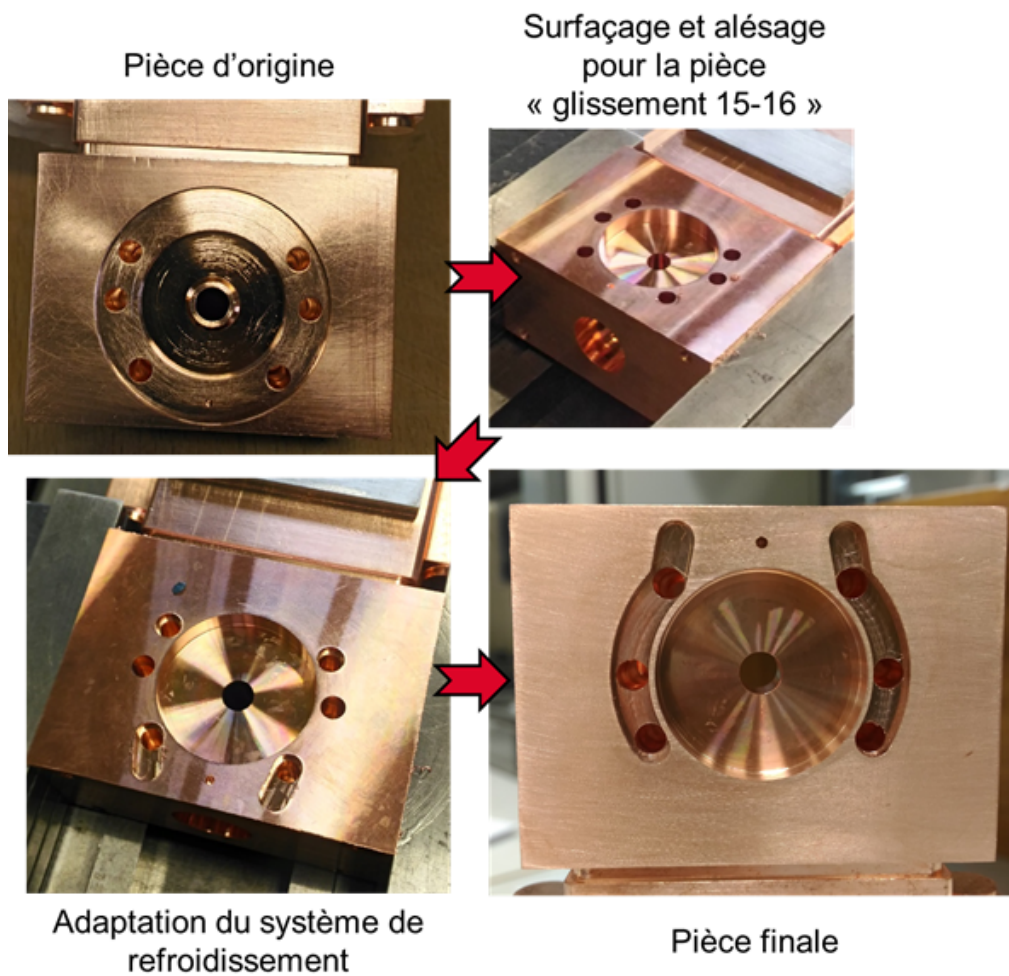


FIGURE 3.24 – Modifications effectuées sur la cavité de sortie

En complément de ces modifications, j'ai conçu une pièce supplémentaire, réalisée par VDL, appelée "glissement 15-16". Cette pièce permet d'obtenir une longueur de glissement adéquate et constitue la partie titanée de la cavité 15. Cette pièce, présentée sur la Figure 3.25, forme, avec la pièce précédente, la cavité 15 ; elle doit être brasée dans l'alésage effectué dans la cavité de sortie lors de l'assemblage final.

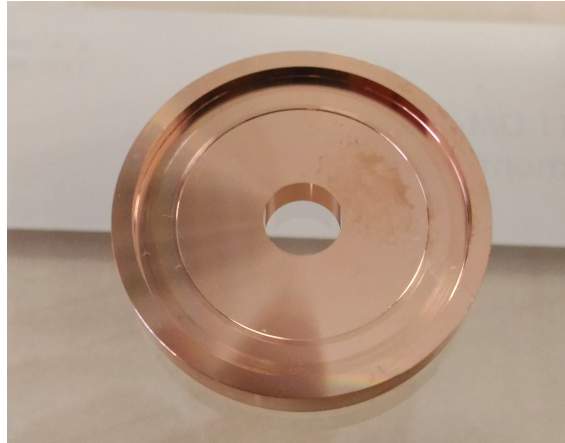


FIGURE 3.25 – Pièce "glissement 15-16" permettant d'adapter la cavité de sortie à notre architecture

3.2.2 Réalisation des pièces

Les pièces constituant les systèmes d'accord, les pièces d'adaptation des cavités d'entrée et de sortie, ainsi que les pièces constituant les cavités 2 à 15 ont été réalisées par l'entreprise VDL. Une des pièces constituant les cavités est présentée en Figure 3.26. L'extrémité "concave" constitue l'essentiel de la cavité considérée, fermée par la partie "à titaner" de la pièce suivante.

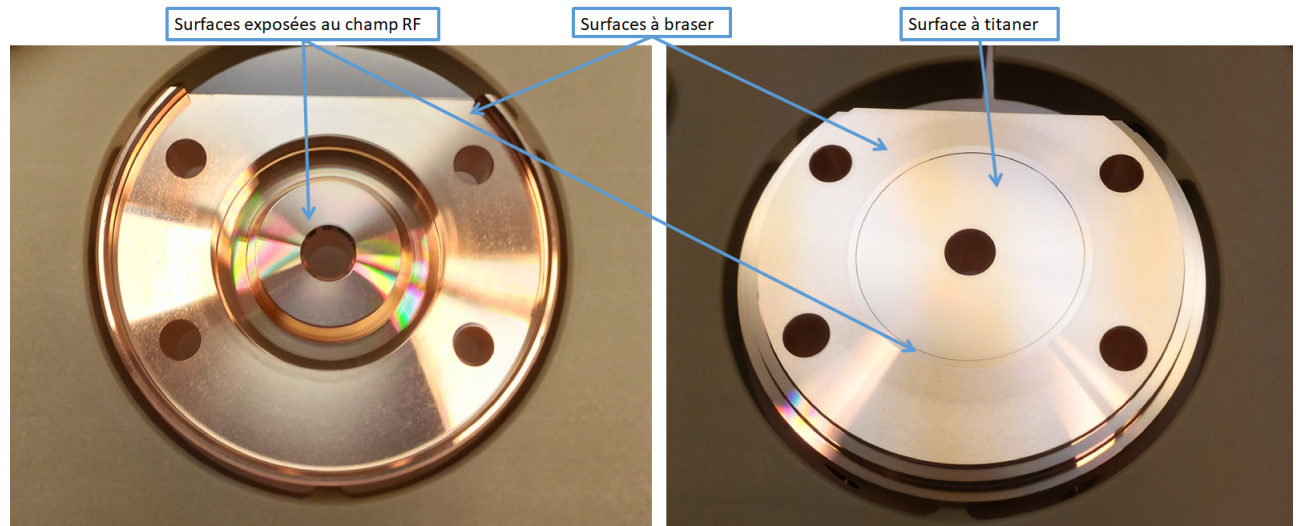


FIGURE 3.26 – Pièce de la ligne d'interaction usinée par VDL - face "concave" à gauche et "à titaner" à droite

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, le rendement du klystron est fortement dépendant de la précision des fréquences des cavités, conditionnées par la géométrie des cavités ; cette précision dépend donc de la qualité de réalisation des pièces. La fabrication des pièces a été conditionnée par les spécifications d'un cahier des charges précis. Toutes nos cotes de fabrication et la qualité exigée des matériaux ont été respectées.

Cette précision de réalisation a été rendue possible grâce à l'utilisation d'outils d'usinage spécifiques et de mesures systématiques des dimensions et de contrôles des surfaces. En Figure 3.27 sont représentées, pour le profil "concave" d'une des cavités, les courbes de cotes nominales (en bleu), des bornes supérieures et inférieures des tolérances (en vert) et de la mesure (en rouge). Précisons que l'intervalle de tolérance défini par les courbes vertes n'est pas à l'échelle sur la figure ; le défaut de forme admissible spécifié pour ces pièces est de $10\mu\text{m}$. Nous avons également veillé au respect des rugosités arithmétiques des surfaces, qui doit être inférieur à $0,2\mu\text{m}$ pour les surfaces exposées au champ électromagnétique et compris entre $0,4\mu\text{m}$ et $0,8\mu\text{m}$ pour les surfaces à braser (voir paragraphe 3.1.3).

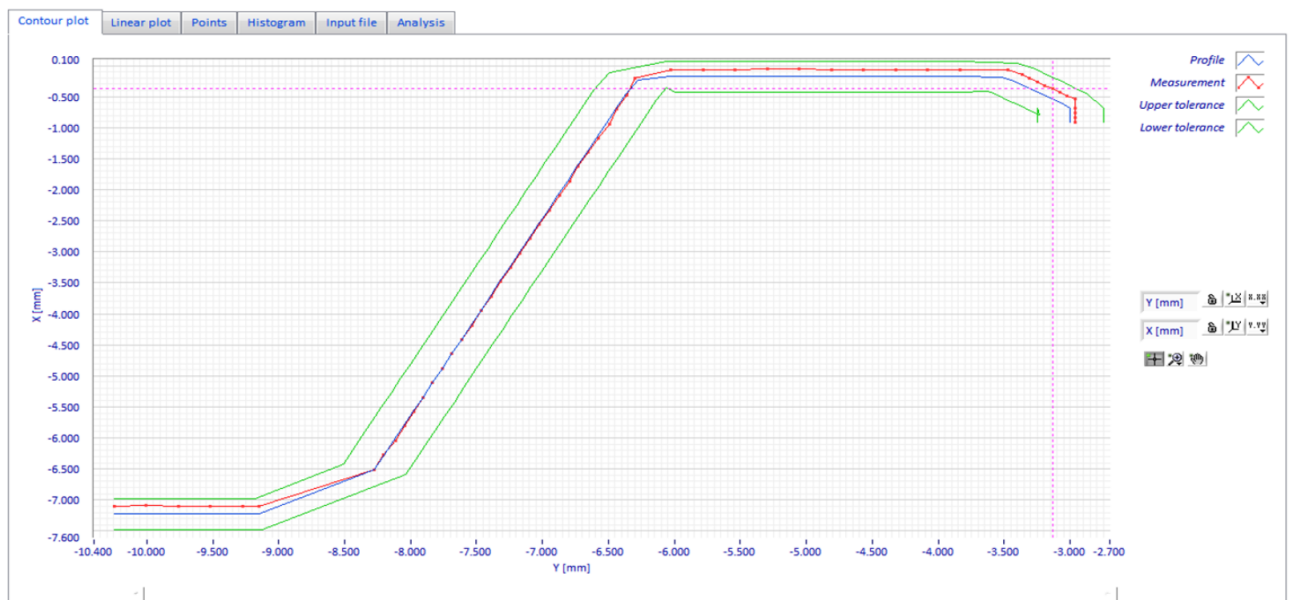


FIGURE 3.27 – Extrait des contrôles dimensionnels effectués sur les pièces usinées - profil d'une face "concave" de cavité

3.2.3 Gamme de fabrication du kladistron

Les pièces, rassemblées au site de Thales Electron Devices de Vélizy, sont d'abord nettoyées et traitées afin de retirer les parties oxydées et les poussières. Les pions en cupronickel sont argentés grâce à un procédé électrochimiques ; l'épaisseur déposée est de $4\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$. Les pièces d'origine du klystron TH2166 non modifiées (canon, pièces polaires, collecteur) ont suivi la gamme d'assemblage qui leur est propre. Avant toute opération de brasage, un cycle de dégazage est effectué (voir paragraphe 3.1.3).

Mise en place des systèmes d'accord et titanage des cavités

Les pièces constituant les cavités 2 à 15 sont pourvues de 55 trous de systèmes d'accord (3 pour la cavité 15 et 4 pour les 13 autres). Les pions argentés sont tout d'abord repris au tour afin d'ôter l'argent excédentaire sur l'épaule. Ils sont emboîtés par leur partie fileté dans un cylindre en acier oxydé, comme lors de nos tests préliminaires ; puis ils sont placés dans les trous des systèmes d'accord.

Les pièces constituant les cavités 3 à 15, ainsi que le "glissement 15-16", sont disposées chacune sur une surface plane, de taille réduite, afin que le tube de glissement débouchant sur la surface à titaner soit totalement borgne. Un cylindre en cuivre percé et ajusté est placé dans ce tube de glissement, comme lors des tests de titanage, afin que son extrémité affleure la partie à titaner. Les pièces assemblées sont disposées dans le four, leurs trous latéraux étant à l'horizontale, et la surface à titaner vers le haut. Des disques de titane d'une épaisseur de $100\mu\text{m}$, d'un diamètre extérieur de 29mm et dont le trou central a un diamètre de 3mm, sont placés sur les surfaces à titaner et sont centrés grâce aux perçages des cylindres en cuivre (voir Figure 3.28). Le cycle de brasage sous vide, à une température de 910°C , permet l'adhésion des feuilles de titane et des pions aux cavités en cuivre.

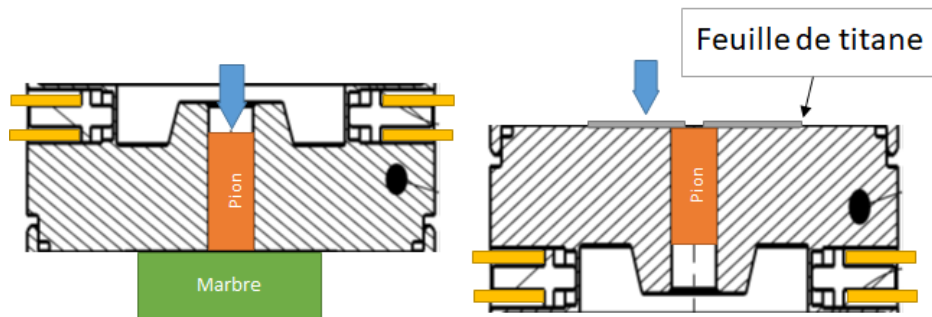


FIGURE 3.28 – Titanage des pièces et brasage des pions des systèmes d'accord

Les pièces extraites du four sont inspectées et séparées de l'outillage des pions des systèmes d'accord. Les pièces constituant les cavités 3 à 15, ainsi que le "glissement 15-16", sont reprises au tour afin d'ôter d'une part les cylindres en cuivre présents dans les glissements, et d'autre part l'excédent de titane.

Cette opération est délicate pour deux raisons :

- Cette surface est en partie exposée aux ondes radiofréquences ; comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les irrégularités géométriques impactent directement les propriétés électromagnétiques des cavités et le rendement du klystron. De plus, une rugosité arithmétique trop élevée, c'est à dire supérieure à $0,2\mu\text{m}$, provoque des effets de pointe et donc l'apparition d'arcs électriques dans les zones de champs intenses.
- L'autre partie de cette surface est destinée au brasage. Afin de permettre cette opération, il est nécessaire, d'une part, que le jeu entre les pièces soit d'environ $20\mu\text{m}$, ceci afin que le métal d'apport soit diffusé par capillarité ; d'autre part la rugosité arithmétique soit comprise entre $0,4\mu\text{m}$ et $0,8\mu\text{m}$, comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1.3.

Les pièces ainsi titanées et reprises, pourvues de leurs pions de systèmes d'accord, sont prêtes pour l'assemblage du klystron.

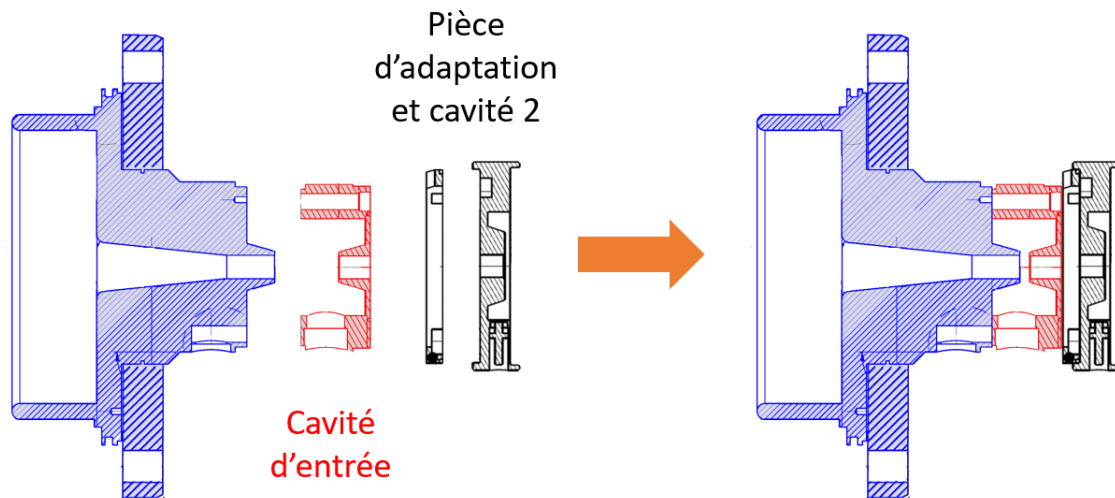
Anode et pièce polaire

FIGURE 3.29 – Assemblage du sous-ensemble constitué de l'anode et de la masse polaire, de la cavité d'entrée, de la couronne d'adaptation du circuit de refroidissement et de la cavité 2, ou sous-ensemble "anode" - extrait de la gamme d'assemblage.

Assemblage et brasage des pièces connexes à la ligne d'interaction

Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.2.1, le circuit de refroidissement a dû être adapté lors de la conception de nos pièces ; de plus, le circuit de refroidissement du klystron TH2166 a également présenté des problèmes d'étanchéité aux extrémités de sa ligne d'interaction. De ce fait, il est nécessaire de vérifier l'étanchéité des jonctions de ce circuit, en particulier entre les cavités 1 et 2, et de la version modifiée de la cavité 16 ; il convient d'autre part de brasier préalablement la pièce de "glissement 15-16" et la cavité 16. C'est pourquoi l'assemblage et le brasage des pièces sont effectués en trois étapes : le sous-ensemble constitué de l'anode et de la masse polaire, la cavité d'entrée, la couronne d'adaptation et la cavité 2 (voir Figure 3.29) ; puis le sous-ensemble constitué de la cavité de sortie avec sa masse polaire et la pièce de glissement vers le collecteur , et du "glissement 15-16" (sous-ensemble "sortie") ; enfin, ces deux sous-ensembles pourront être assemblés et brasés avec les autres cavités.

Le sous-ensemble "anode" est assemblé suivant la procédure mise en œuvre avec nos pièces prototypes (voir paragraphe 3.1.3) : des fils de cuivre-argent Ag72Cu28 sont logés dans les espaces prévus (voir Figure [photo à prendre pendant l'assemblage]). L'ensemble est disposé à la verticale, la partie inférieure de l'anode, c'est à dire celle du canon, en contact avec le plateau du four. Un cycle de brasage à 820°C est effectué sous vide. La pièce "glissement 15-16", titanée et reprise, est cerclée dans sa partie inférieure, en contact avec la cavité 16, d'un fil de cuivre-argent Ag72Cu28 puis assemblée avec la cavité de sortie reprise. La pièce définissant le glissement entre la cavité de sortie et le collecteur, brasée avec la masse polaire, est placée à l'autre extrémité. Cette pièce sert de socle pour le brasage à 820°C, sous vide.

Les deux sous-assemblages sont inspectés après brasage : il est essentiel de veiller à la qualité des brasures, et notamment de vérifier que le métal d'apport a été correctement réparti entre les pièces concernées. Cette inspection est complétée par une mesure d'étanchéité : les extrémités de ces sections de l'espace d'interaction sont obstruées et l'air contenu dans ces espaces clos est pompé jusqu'à une pression de 10^{-3} mbar ; la buse permettant le pompage est reliée à un spectromètre de masse pouvant détecter des taux de fuite d'hélium jusqu'à 10^{-12} mbar.l.s⁻¹. De l'hélium est dégagé à proximité des brasures à tester et on mesure le taux de fuite dans l'enceinte pompée. Cette procédure est répétée avec les canaux des circuits de refroidissement.

Assemblage de la ligne d'interaction et mesures avant brasage

Les pièces constituant les cavités 3 à 15, munies de leurs pions de systèmes d'accord, titanées et reprises, sont assemblées avec les fils de cuivre-argent Ag72Cu28 dans les logements prévus. L'orientation des pièces est effectuée avec leurs méplats.

Les fréquences des cavités sont mesurées en réflexion, au moyen d'une antenne de 25cm de long, en suivant la procédure décrite au paragraphe 3.1.1. Au vu de nos méthodes de réglage des fréquences, développées et testées au cours de ce projet (voir paragraphes 3.1.2, 3.1.3 et 3.1.5), le décalage en fréquence lié au brasage fluctue de +2MHz à +8MHz, notre capacité de réglage par tapotage de becs est comprise entre +1MHz et +30MHz, et notre capacité de réglage avec nos systèmes d'accord est comprise entre -12MHz et +12MHz ; le décalage en fréquence de chaque cavité par rapport à la valeur prévue doit donc être compris entre -44MHz et +4MHz, afin de pouvoir corriger cette erreur après brasage. Dans le cas contraire, une reprise mécanique des pièces est nécessaire.

Brasage de la ligne d'interaction et réglage final

La ligne d'interaction finale ainsi formée est placée au four sous vide et un cycle de brasage à 820°C est effectué. La pièce est inspectée de la même façon que pour les sous-ensembles "anode" et "sortie" ; une mesure d'étanchéité, de l'espace d'interaction et du circuit de refroidissement, est réalisée par la suite.

Les fréquences des cavités sont ensuite vérifiées. Au besoin, ces fréquences sont réglées, grossièrement avec l'outil de tapotage, lorsque le décalage en fréquence par rapport à la valeur nominale est inférieur à -12MHz, ou de façon précise avec le système d'accord dédié, lorsque le décalage est compris entre -12MHz et +12MHz. Les outils de réglage des fréquences sont ensuite retirés (couronne, pistons, paliers et arrêts axiaux).

3.3 Conclusion du chapitre

Grâce aux tests effectués avec nos cavités prototypes, nous avons pu valider des technologies essentielles pour la réalisation de notre projet. Nous avons ainsi mis en œuvre nos systèmes d'accord en fréquence, expérimenté et perfectionné différentes méthodes de titanage et testé les procédés de brasage de nos pièces.

Cette étape a confirmé certains de nos choix de conception et nous a conduit à modifier certaines de nos pièces, et a permis d'achever le cahier des charges de nos pièces finales. L'entreprise VDL a effectué la fabrication de la plupart de nos pièces, que nous avons nettoyées, titanées, assemblées et brasées avec Thales.

Une fois la fabrication du kladistron achevée, nous pourrons réaliser les tests sur le banc dédié au klystron TH2166. Ces tests seront effectués suivant la même procédure que celle mise en œuvre avec le tube d'origine. Nous pourrons ainsi vérifier l'adéquation entre nos résultats de simulations et de tests, et la qualité de réalisation du tube électronique.

Chapitre 4

Test du kladistron TH2166

Ce chapitre présente les étapes nécessaires à la formation des klystrons puis leur application à notre tube électronique et enfin les tests dans les conditions nominales. Nous verrons dans un premier temps le banc de tests et le protocole appliqué à Thales, dans le cas du klystron TH2166. Nous montrerons ensuite les résultats de conditionnement du kladistron TH2166 et des tests effectués.

4.1 Protocole de conditionnement et de test des klystrons

4.1.1 Le banc de test du klystron TH2166 : la station TV

Le banc de test "station TV" est dédié aux klystrons de Thales Electron Devices fonctionnant en régime continu (ou "continuous wave" CW, en anglais), et dont la tension cathode est comparable à celle du klystron TH2166 (voir Figure 4.1. Nous pouvons distinguer les commandes de puissance électrique des commandes du signal hyperfréquence.

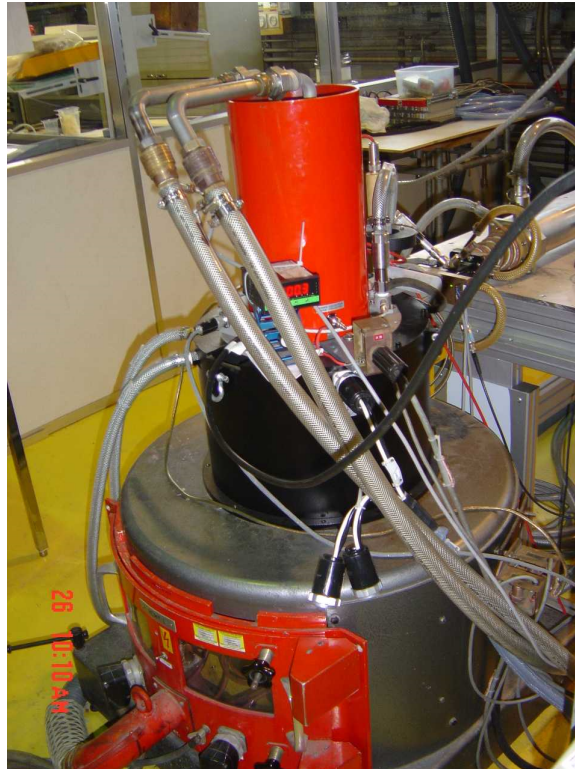


FIGURE 4.1 – Klystron TH2166 en cours de conditionnement sur le banc "station TV"[14]

L'opérateur peut régler la fréquence et la puissance du signal, les paramètres relatifs aux impulsions (en régime pulsé), tels que la fréquence, jusqu'à 1kHz, et la longueur des impulsions, de $1\mu s$ au régime continu ; nous définissons le taux de travail, ou facteur de forme, comme le produit de la fréquence et de la longueur des impulsions.

Les mesures radiofréquences effectuées concernent les puissances électromagnétiques incidentes et réfléchies, en entrée et en sortie, la fréquence du signal d'entrée. Il est également possible de mesurer la phase du signal de sortie. Afin de qualifier un tube électronique, il convient de tenir compte du circuit extérieur : ce circuit peut réfléchir une partie de la puissance électromagnétique du klystron, qui doit pouvoir l'absorber sans être endommagé. Lors des tests des klystrons, une charge est connectée au circuit de sortie radiofréquence afin de simuler cet échange d'énergie partiel.

Le schéma présentant les commandes de puissance électrique et les capteurs associés est présenté en Figure 4.2. Le tube est indiqué en jaune clair, au centre de la figure. Nous pouvons noter les quatre commandes suivantes :

- La tension de chauffage de la cathode , en bleu marine.
- La tension de la cathode et le pont de l'anode, qui permet le réglage de la tension de l'anode, lorsqu'elle n'est pas reliée à la masse (non utilisé), en bleu ciel.
- Le courant fourni à la bobine de focalisation, en vert.

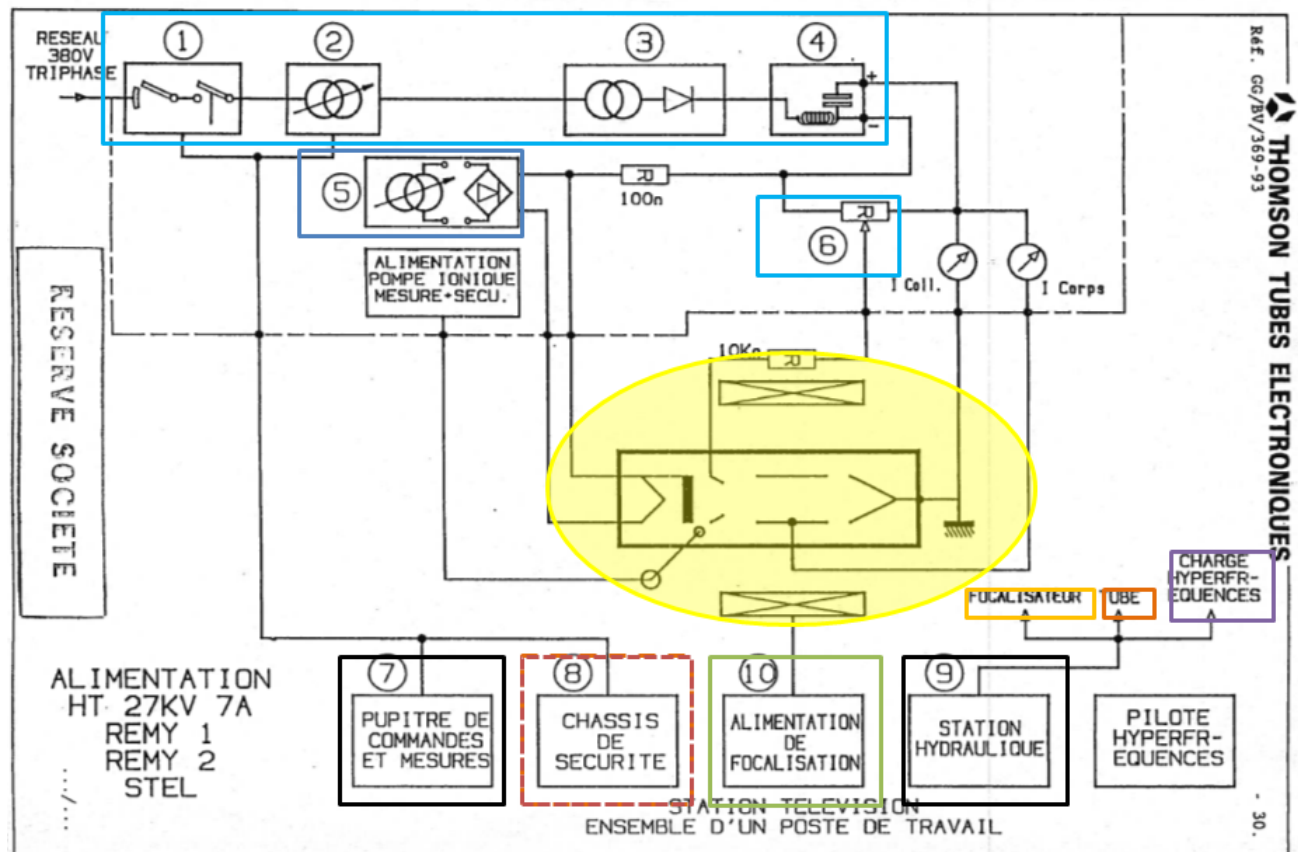


FIGURE 4.2 – Schéma de principe des commandes et capteurs de puissance électrique du banc "station TV"

L'opérateur est informé, grâce à des capteurs de températures (thermistances) et de courants (ampèremètres), de la puissance dégagée par les différents éléments du tube : courant dans le collecteur et courant corps (leurs courants au niveau du châssis de sécurité, en rouge, et les températures au niveau de la station de hydraulique, en orange), et température du guide d'onde de sortie (violet). La bobine de focalisation, refroidie par la station hydraulique (en jaune foncé), fait l'objet d'une qualification préalable par le fournisseur. Les courants d'alimentation et les tensions aux bornes des bobines de focalisation sont en revanche mesurés. La mesure du courant au niveau du collecteur, directement lié aux électrons arrivant en fin de ligne, est particulièrement importante car elle témoigne de la qualité du fonctionnement de la cathode et de la focalisation du faisceau.

4.1.2 Conditionnement du klystron

Préparation du banc et tests préliminaires

Le conditionnement débute par la mise en route du pompage ionique. Cette pompe permet de contrôler la qualité du vide en mesurant le courant entre deux électrodes espacées d'une distance connue. L'isolement entre la cathode et le corps, assuré par le pot en céramique, est ensuite vérifié de la façon suivante : au moyen d'une alimentation en tension extérieure, la tension de la cathode est portée progressivement de 0 à 30kV, par paliers de 5kV[41] ; à chaque palier, le courant de conduction dans le vide est mesuré (environ 0,1mA à 30kV). La source de tension extérieure est ensuite retirée.

Le chauffage de la cathode est ensuite alimenté en courant, ce qui permet de vérifier son isolation électrique ; lors d'un court-circuit, les tests ne peuvent être poursuivis. Le circuit de sortie radiofréquence est relié à une charge pour les tests. Le circuit de refroidissement est ensuite mis en fonctionnement ; un contrôle des fuites d'eau éventuelles est effectué. La vérifications des isolations électriques et le raccordement des éléments aux masses électriques sont effectués.

Formation diode

La formation diode consiste à tester et "roder" le klystron sans utiliser de signal radiofréquence. Au cours de cette étape, la puissance fournie au canon à électron est progressivement augmentée jusqu'au régime nominal. Il convient donc de vérifier au préalable le fonctionnement du circuit de refroidissement afin d'assurer que les pièces ne soient endommagées par un échauffement excessif.

Le courant dans le filament de chauffage de la cathode est ensuite monté progressivement, pendant environ 10 minutes ; la cathode atteint sa température nominale (1000 ° C) après environ 30 minutes. La bobine de focalisation est ensuite activée.

La tension de la cathode est montée à 2kV ; le courant mesuré au niveau du collecteur doit être de 50mA, ce qui correspond à l'intensité du faisceau d'électrons émis. Cette tension est progressivement augmentée par paliers de 1kV jusqu'à une tension de 22kV ; le courant mesuré dans le collecteur est alors de 3,3A. A chaque palier, d'une durée de 10 minutes, il convient de veiller à ce que le courant de conduction dans le vide ne dépasse pas 10 μ A ; le passage au palier suivant exige que ce courant soit inférieur à 5 μ A. Le courant dans le corps ne doit pas excéder 10mA. L'ajustement du courant de la bobine de focalisation permet de diminuer ce courant. Il ne doit pas non plus se produire de dégazage.

Il convient ensuite de régler le fonctionnement de la cathode en régime nominal, en optimisant sa durée de vie. Pour cela, la tension de la cathode est réglée à 20kV. La tension aux bornes du filament est diminuée jusqu'à obtenir une chute du courant cathode ; cette baisse signifie que le nombre d'électrons extraits diminue. La tension aux bornes du filament est à nouveau augmentée d'environ un volt. La tension de la cathode est ensuite fixée à 26kV et le même réglage est effectué. La Figure 4.3 présente les courbes du courant cathode et le courant dans le corps du tube en fonction de la tension de la cathode, au cours du conditionnement d'un klystron TH2166 (2003)[14]. Le courant dans le corps du tube, relié à la masse, permet d'évaluer la part d'énergie provenant du faisceau évacuée par rayonnement ou en raison d'une interférence.

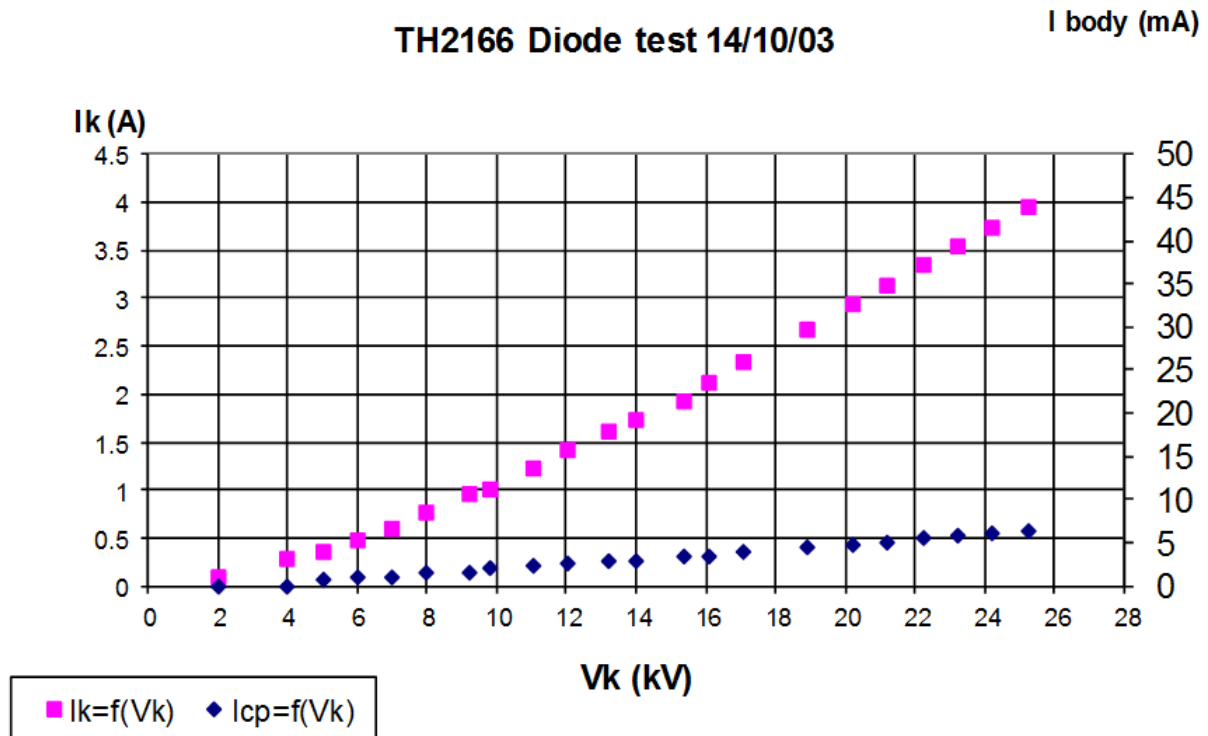


FIGURE 4.3 – Courbes du courant cathode et le courant dans le corps du tube en fonction de la tension de la cathode ; conditionnement d'un klystron TH2166 (2003)[14]

Formation hyperfréquence

La tension cathode est diminuée à 0V. La fréquence du signal d'entrée est tout d'abord réglée à sa valeur nominale, 4899MHz, puis les valeurs du courant dans le corps du tube (inférieur à 20mA) et du courant de conduction dans le vide (inférieur à $5\mu\text{A}$) sont vérifiées. Le signal d'entrée est réglé en régime pulsé, avec des impulsions de 5ms à une fréquence de 100Hz ("50% duty") ; la puissance du signal est fixée à 0,2W. La tension cathode est montée à 15kV ; on mesure alors un courant dans le collecteur de 1,9A. La tension est alors augmentée par paliers de un kilovolt, d'une durée de 10 minutes, jusqu'à la tension nominale de 26kV. A chaque palier, la puissance du signal d'entrée est augmentée jusqu'à la saturation, c'est à dire lorsque la puissance électromagnétique mesurée dans le guide d'onde de sortie atteint son maximum ; la puissance d'entrée est ensuite diminuée jusqu'à 0,2W pour passer au palier suivant[41]. En Figure 4.4 sont tracées des courbes de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée au cours du conditionnement d'un klystron TH2166.

Le klystron peut alors être testé en régime radiofréquences continu. La tension cathode est fixée à 20kV et la puissance d'entrée à 0,2W, en régime continu. Il convient de vérifier que le courant dans le collecteur est de 2,35A. La tension cathode est augmentée par paliers de 500V, jusqu'à 25,6kV ; à chaque palier, la puissance radiofréquence est augmentée jusqu'à saturation, pendant 10 minutes, puis diminuée jusqu'à sa valeur d'origine, avant de passer au palier suivant. Le courant finalement mesuré dans le collecteur est de 3,3A. La qualité du vide et le courant dans le corps du tube sont vérifiés à chaque étape.

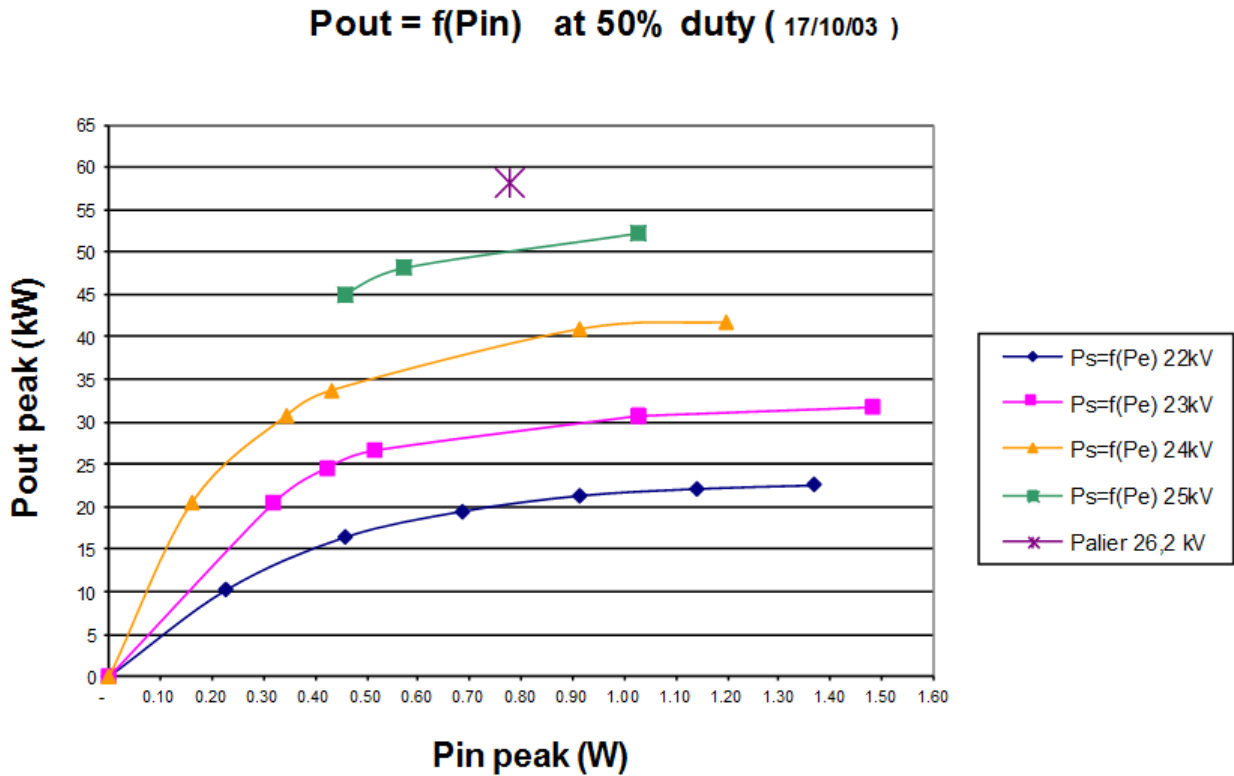


FIGURE 4.4 – Mesure de la puissance de sortie radiofréquence d'un klystron TH2166 en fonction de la puissance d'entrée, pour différentes valeurs de tension cathode (2003)[14]

Le klystron est ensuite "durci". A la puissance nominale, la fréquence du signal est modifiée, d'abord de -2MHz à +2MHz par rapport à la fréquence nominale, puis aux fréquences extrêmes de la bande passante et enfin pour un échantillonnage de valeurs aléatoires de la bande passante. Pour chaque valeur de fréquence, une montée en puissance est effectuée, jusqu'à la saturation, pendant quelques minutes[41].

La puissance de sortie est calculée grâce à la mesure de l'élévation de température observée dans le circuit de refroidissement au niveau du guide de sortie. La validation du tube électronique est déterminée par la valeur du rendement du klystron qui est le rapport de cette puissance et de la puissance électrique injectée dans le canon.

4.2 Résultats des tests du klystron TH2166

Les différents exemplaires du klystron TH2166 ont été conditionnés et testés selon le protocole décrit au paragraphe précédent. En Figure 4.5 sont présentés plusieurs courbes du rendement en fonction de la puissance d'entrée obtenues lors des tests de ces tubes. Les tensions cathode sont comprises entre 25,2kV et 26,0kV, et les courants faisceau sont compris entre 4,1A et 4,5A. Nous observons que les rendements calculés à partir des mesures sont compris entre 44% et 50%, tandis que la puissance à saturation est comprise entre 0,5W et 1,4W. Cette disparité de résultats montre l'importance de la qualité de réalisation et de conditionnement des tubes électroniques sur leurs performances.

Les tests effectués avec le klystron TH2166 ont montré les limites du circuit de refroidissement, qui a dû être à nouveau conçu. Plusieurs fuites de ce circuit ont été également observées et les méthodes de brasage ont été en conséquence modifiées.

La cavité de sortie a été conçue dans un premier temps pour être titanée, afin de prévenir les phénomènes de multipactor. Toutefois, des tests du klystron en fonctionnement ont révélé que ce dépôt de titane, difficile à appliquer, entraînait d'importantes pertes radiofréquences. Le glissement entre la cavité de sortie et le collecteur a été élargi, afin que les becs de cette cavité ne soient plus placés en vis à vis[42].

Ces changements de conception et de méthodes de fabrication montrent l'importance de l'aspect expérimental du développement des klystrons. Ce travail effectué lors du développement du klystron TH2166 a permis de valider plusieurs technologies et architectures que nous avons utilisées dans le kladistron, comme le circuit de refroidissement, la méthode de brasage, ainsi que la bobine de focalisation.

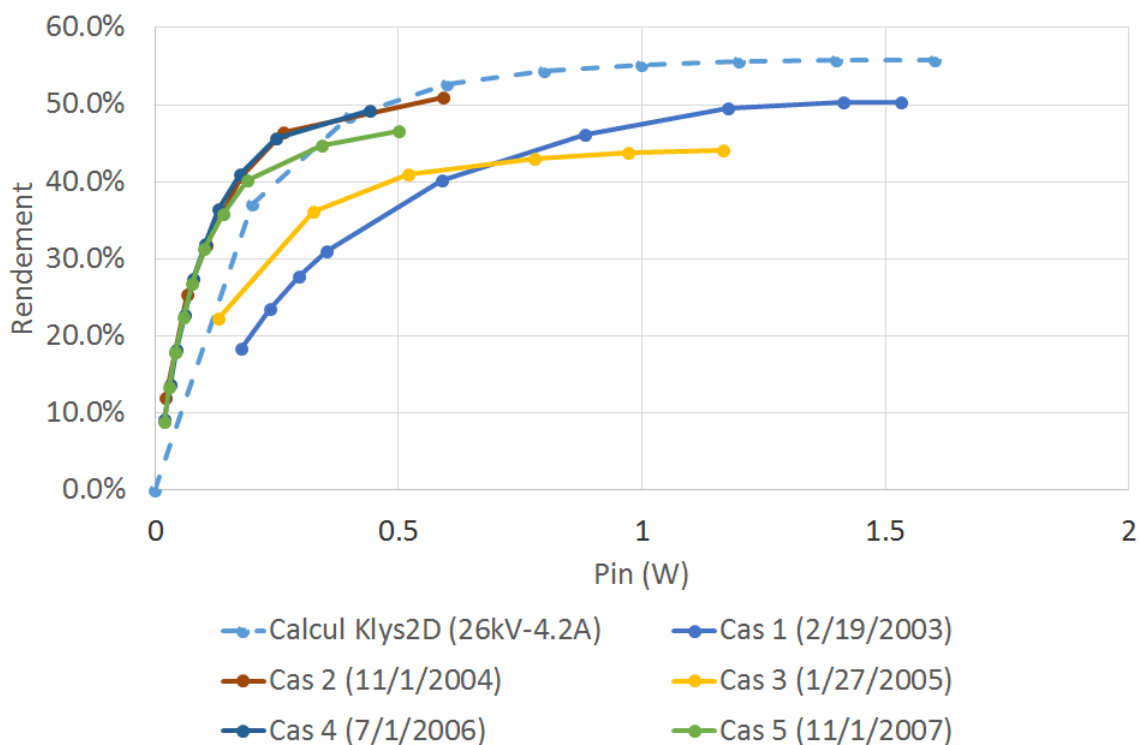


FIGURE 4.5 – Rendements de klystrons TH2166, obtenus avec les mesures expérimentales des puissances de sortie, en fonction de la puissance d'entrée, entre 2003 et 2007

4.3 Conditionnement et tests du kladistron TH2166

Le kladistron sera placé sur le banc prévu pour le conditionnement et les tests du klystron TH2166. Les étapes de conditionnements seront précédées de vérifications des circuits de refroidissement et de l'isolation électrique des différents sous-ensemble. Viendra ensuite le test "diode", c'est à dire sans signal d'entrée. La tension de la cathode sera progressivement augmentée jusqu'à la tension nominale, afin de "former" le klystron. Puis le kladistron sera testé avec un signal radiofréquence, en impulsions de quelques microsecondes. La tension de la cathode sera à nouveau augmentée, par paliers, durant lesquels la puissance du signal montera jusqu'à la saturation. Pour des raisons de dérives de planning liés à la difficulté de mise en oeuvre des procédures d'assemblage du kladistron, le tube n'a à ce jour pas encore été placé sur le banc de conditionnement et de tests.

Conclusion

Ce projet de thèse a permis l'expérimentation d'une nouvelle architecture de klystron, appelée kladistron. Ce prototype s'inscrit dans la recherche de sources hyperfréquences performantes et sobres en énergie. Cet axe de recherche est un élément essentiel de la collaboration européenne pour la recherche EUCARD-2, et le développement de produits innovants pour l'entreprise Thales Electron Devices. Les projets d'accélérateurs de particules, de tokamaks, ainsi que les différentes applications aéronautiques, civiles et militaires, ont montré l'importance des klystrons comme sources de puissance radiofréquence, et l'impact de l'augmentation du rendement énergétique des tubes électroniques.

Conclusion sur le projet de thèse

L'architecture de ce nouveau type de klystron a été inventée par Franck Peauger[10]. Plusieurs simulations préliminaires avec AJ-Disk ont montré l'intérêt de développer un klystron empruntant certaines propriétés des RFQ (Radio-Frequency Quadrupoles), qui sont des éléments essentiels des accélérateurs linéaires. Les RFQ permettent la mise en paquets progressive des particules ; l'adaptation de cette méthode aux klystrons permet un bunching quasi-adiabatique et un rendement énergétique en conséquence élevé.

Une version d'essai, adapté du klystron Thales TH2166 à 4,9GHz, a ainsi été développée au cours de ce projet afin de valider cette architecture. Le canon à électrons, le collecteur, les cavités d'entrée et de sortie ainsi que la bobine de focalisation d'origine ont été conservés. De nouvelles cavités, remplaçant les cavités intermédiaires, ont été conçues et réalisées.

Notre travail a débuté par la simulation du klystron TH2166, avec différents codes d'interaction. Les résultats de calculs effectués par AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D, et notamment les valeurs de rendements à saturation, ont été comparés aux résultats de tests du klystron TH2166, ce qui a permis de confirmer leur fiabilité. L'utilisation, d'une part des valeurs du champ magnétique relevées lors des tests de la bobine de focalisation du klystron TH2166, et d'autre part du faisceau simulé par le code Optic2D, ont amélioré le réalisme de nos simulations.

Plusieurs architectures de ligne d'interaction ont été testées afin de déterminer les paramètres de cavités adéquats. En plus de l'amélioration du rendement d'interaction, ces nouvelles cavités ont été pensées pour rendre progressive la mise en paquets des électrons, et ainsi de lisser le graphe du courant faisceau le long de la ligne. Dans un premier temps, nous avons choisis les valeurs des paramètres $\frac{R}{Q}$ et Q_0 des nouvelles cavités ; ces paramètres sont plus faibles que dans le klystron TH2166 et leurs valeurs sont croissantes le long de la ligne afin de graduer l'échange d'énergie entre le faisceau et les cavités. Les fréquences des cavités ont été ajustées dans un second temps dans l'optique d'optimiser le bunching des électrons.

Les géométries des cavités correspondant aux paramètres électromagnétiques ont été déterminées grâce au logiciel COMSOL. Le rayon de la cavité permet d'ajuster de différencier la fréquence des cavités. Cette étape de conception a permis de mettre en évidence l'importance du respect des paramètres géométriques au cours de la réalisation des pièces et de l'impact des erreurs de fabrication sur les fréquences des cavités et donc sur les performances des klystrons dans nos simulations. Un système d'accord en fréquence a été développé afin de garantir le respect de ces fréquences. D'autre part, plusieurs calculs réalisés avec MUSICC3D ont montré l'importance du phénomène de multipactor dans nos cavités. Nous avons alors modifié les géométries de nos cavités afin de faciliter le dépôt de titane. Ce changement de géométrie a également permis d'atteindre plus facilement les valeurs de Q_0 adéquates.

Le système d'accord en fréquence et différentes méthodes de titanage ont pu être testés grâce à de séries de pièces prototypes que nous avons conçues. Nos mesures radiofréquences, sur les pièces de la première série, ont permis de montrer que les quatre systèmes d'accord prototypes permettaient un décalage en fréquence de -6MHz à +12MHz ; la version finale de ces systèmes permet, pour chaque cavité, un décalage en fréquence symétrique. Ce système d'accord correspond à nos critères de fidélité et de justesse. Une méthode de réglage en fréquences annexe, basée sur la déformation des becs des cavités, a également été testée. Cette méthode permet d'approcher la fréquence nominale de façon plus grossière avant un réglage plus fin avec notre système d'accord. Avec notre seconde série de pièces prototypes, nous avons mis en œuvre deux méthodes de titanage . La première, utilisée couramment sur les cavités des klystron de Thales, consiste à déposer une couche d'hydrure de titane localement. Nos tests n'ont pas permis d'obtenir les résultats adéquats avec cette méthode. La solution retenue est la diffusion d'une feuille de titane suivie d'une reprise mécanique. La méthode de brasage des cavités, avec un métal d'apport de cuivre d'argent (72% d'argent et 28%), a été validée avec nos deux séries de cavités prototypes. Toutefois, le faible nombre de véhicules test ne permet pas de conclure sur un décalage en fréquence systématique au cours du brasage.

L'intégration de notre nouvelle ligne d'interaction a nécessité l'adaptation des cavités d'entrée et de sortie, et la création de pièces permettant le raccordement du système de refroidissement et de tenir compte de l'encombrement des sous-ensembles. Une nouvelle version a été fabriquée tandis que la cavité de sortie a été réusinée pour adapter son interface avec le reste de la structure d'interaction. Les pièces finales ont été réalisées par l'entreprise VDL. Leur fabrication a bénéficié d'outils d'usinage spécifiques et les dimensions et états de surface des pièces ont été soigneusement contrôlés. Ces pièces ont ensuite été assemblées à Thales Vélizy. Les cavités ont d'abord été titanées et les pions des systèmes d'accord ont été brasés. La reprise mécanique a ensuite permis d'obtenir l'épaisseur adéquate de titane. Puis la ligne a été brasée, en trois étapes. Cependant, la fabrication du kladistron n'ayant pas été achevée, nous n'avons pas pu effectuer pour l'instant les tests de ce tube électronique et conclure sur ses capacités.

Perspectives

Le développement de la ligne d'interaction avec nos outils de calculs a permis de définir dans un délai court une architecture satisfaisante composée de 16 cavités. Au cours de cette étape de simulations, nous avons avant tout cherché les paramètres électromagnétiques des cavités permettant un rendement plus élevé, mais également un faisceau stable au cours du temps et une mise en paquets des électrons efficace, c'est à dire en minimisant le nombre d'électrons hors bunches. En revanche, de nouvelles études systématiques des cartes de champs électriques et magnétiques le long de la ligne d'interaction et un travail sur l'optimisation des paramètres de calcul, tels que le pas de temps ou le maillage, sont souhaitables. L'utilisation de logiciels tridimensionnels tels que MAGIC3D permettrait une modélisation plus fine de l'espace d'interaction. Enfin, une démarche d'optimisation systématique des paramètres électromagnétiques permettrait d'augmenter davantage le rendement du kladistron.

Le changement de la ligne du klystron TH2166 a été conditionné par l'ensemble des autres éléments de ce tube électronique. Les cavités d'entrée et de sortie, la bobine de focalisation et le circuit de refroidissement ont constitué des contraintes techniques importantes avec lesquelles il nous a fallu composer. La réalisation d'un kladistron complet, dont les éléments annexes à la ligne d'interaction seraient adaptés, permettrait d'obtenir des résultats de tests bien différents.

Dans le cadre de notre projet, la validation préliminaire de cette nouvelle architecture de klystron doit permettre le développement d'un klystron à haut-rendement, pour le projet CLIC du Cern. Ce nouveau tube, fonctionnant à une fréquence de 12GHz, doit être conçu pour atteindre un rendement supérieur à 70%.

Ce changement d'architecture ouvre la voie à une méthode d'amélioration du rendement des klystrons. Les résultats de notre projet montrent en effet qu'il est possible d'améliorer le rendement des klystrons en ne changeant que la ligne d'interaction. De nombreux projets nécessitant des sources de puissance radiofréquence élevée, de l'ordre de plusieurs centaines de mégawatts, tels que les collisionneurs de haute énergie ou les tokamaks, pourraient bénéficier des résultats de cette thèse.

Cette architecture de klystron peut théoriquement être combinée avec d'autres méthodes d'amélioration du rendement, que nous avons abordées au paragraphe 1.2. Nous pouvons en effet imaginer des kladistrons à collecteur déprimé, ou à faisceaux multiples. L'utilisation de cavités harmoniques, comme avec les méthodes BAC et CSM est également possible.

Bibliographie

- [1] Thierry LEMOINE. Tubes électroniques hyperfréquences technologies, tubes à grille et klystrons. *Techniques de l'ingénieur Hyperfréquences. Circuits et émetteurs de puissance*, base documentaire : TIB281DUO.(ref. article : e1620), 2008.
- [2] Quentin Vuillemin. Rapport de stage sur la cavité de sortie d'un klystron 50mw en bande c. 2012-2013.
- [3] I. Syrathev. X-band high rf power testing activity at cern, clic seminar. 2014.
- [4] K.R. Spangenberg. *Vacuum Tubes*. International student edition / [Mcgraw-Hill]. McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1948.
- [5] A.S. Gilmour. *Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons*. Artech House microwave library. Artech House, 2011.
- [6] R.B. Palmer, R.C. Fernow, J. Fischer, J.C. Gallardo, H.G. Kirk, S. Ulc, H. Wang, Y. Zhao, B. Danly, W. Herrmannsfeldt, and et al. Status of the bnl-mit-slac cluster klystron project. *AIP Conference Proceedings*, 337(1), Jul 1995.
- [7] Thibault Hamelin. *Validation of a new Multipacting three-dimensional simulation software by calculation and experimentation*. Theses, Université Paris Sud - Paris XI, June 2015.
- [8] Aaron Jensen, Andy Haase, Erik Jongewaard, Mark Kemp, and Jeff Neilson. Increasing Klystron Efficiency Using COM and BAC Tuning and Application to the 5045 Klystron. In *Proceedings, 17th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2016) : Monterey, CA, USA, April 19-21, 2016*, pages 1–2, 2016.
- [9] V. C. R. Hill, C. Marrelli, D. Constable, and C. Lingwood. Particle-in-cell simulation of the third harmonic cavity f-tube klystron. In *2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, pages 1–2, April 2016.
- [10] F. Peauger. New klystron concept, clic seminar. 2014.
- [11] Rt 5120, documentation thales. 2000.
- [12] Mr. Lester Cavey Dr. Larry Ludeking, Mr. Andrew Woods. Magic 3.2.4 help manual. Avril 2014.
- [13] Wislei R Osório, Alessandra Cremasco, Protásio N Andrade, Amauri Garcia, and Rubens Caram. Electrochemical behavior of centrifuged cast and heat treated ti-cu alloys for medical applications. *Electrochimica Acta*, 55(3) :759–770, 2010.
- [14] Measurements on th2166 pt8 (14 to 31 october 2003), documentation thales. 2003.
- [15] George Caryotakis. High power klystrons : Theory and practice at the stanford linear accelerator center. *Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-PUB*, 10620 :139, 2004.
- [16] S.I. Molokovsky and A.D. Sushkov. *Intense Electron and Ion Beams*. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [17] Chiara Marrelli. Recent developments towards very high efficiency klystrons. 2016.

- [18] Philip Burrows, Walter Wuensch, and Theodoros Argyropoulos. High-gradient X-band RF technology for CLIC and beyond. *PoS, ICHEP2016* :829, 2017.
- [19] Chiara MARRELLI. *Development of a steady state simulation code for klystrons*. PhD thesis, Sapienza Università di Roma, Facoltà di Ingegneria, 2011.
- [20] C. B. Wilsen, J. W. Luginsland, Yue Ying Lau, T. M. Antonsen, D. P. Chernin, P. M. Tchou, M. W. Keyser, R. M. Gilgenbach, and L. D. Ludeking. A simulation study of beam loading on a cavity. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30(3) :1160–1168, Jun 2002.
- [21] Richard Carter. Radio-frequency power generation. 03 2013.
- [22] Manfred Thumm. Lecture on high power microwaves : Generation and transmission (ptf 5-2010). manfred.thumm@kit.edu, 2010.
- [23] R. Marchesin A.J. Durand. Performances des klystrons : état de l’art et limites. 2011.
- [24] W.D. Kilpatrick. *A CRITERION FOR VACUUM SPARKING DESIGNED TO INCLUDE BOTH R.F. AND D.C.* Sep 1953.
- [25] M. R. Boyd, R. A. Dehn, J. S. Hickey, and T. G. Mihran. The multiple-beam klystron. *IRE Transactions on Electron Devices*, 9(3) :247–252, May 1962.
- [26] A. N. Korolyov, E. A. Gelvich, Y. V. Zhary, A. D. Zakurdayev, and V. I. Poognin. Multiple-beam klystron amplifiers : performance parameters and development trends. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 32(3) :1109–1118, June 2004.
- [27] A. N. Korolev, S. A. Zaitsev, I. I. Golenitskij, Y. V. Zhary, A. D. Zakurdayev, M. I. Lopin, P. M. Meleshkevich, E. A. Gelvich, A. A. Negirev, A. S. Pobedonostsev, V. I. Poognin, V. B. Homich, and A. N. Kargin. Traditional and novel vacuum electron devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(12) :2929–2937, Dec 2001.
- [28] E Jensen, Peter Pearce, and i Syratcev. A novel idea for a clic 937 mhz 50 mw multibeam klystron. 01 2004.
- [29] Rodolphe Marchesin. 20mwp high-efficiency l band multi-beam klystron for clic drive beam. 2017.
- [30] Chris Lingwood. *High power high efficiency multiple-beam klystron design*. PhD thesis, Lancaster University.
- [31] Graeme Burt Igor Syratcev Andrey Yu. Baikov Richard Kowalczyk David A. Constable, Chris Lingwood. Magic2-d simulations of high efficiency klystrons using the core oscillation method. In *2017 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, pages 1–2, April 2017.
- [32] I. A. Guzilov. Bac method of increasing the efficiency in klystrons. In *2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*, pages 1–2, June 2014.
- [33] QUENTIN VUILLEMIN. *Klystrons et IOTs multifaisceaux à fort rendement*. PhD thesis, 2017. Thèse de doctorat dirigée par MUELLER, ALEX C. Physique PARIS SACLAY, ORSAY 2017.
- [34] Zhizhi Wan. A high efficiency s-band klystron for medical accelerator system. 2017.
- [35] E. Jongewaard M. Kemp J. Neilson A. Jensen R. Kowalczyk, A. Haase. Test of a bac klystron. In *2017 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, pages 1–2, April 2017.
- [36] David Constable Chris Lingwood Chiara Marrelli Igor Syratcev Victoria C. R. Hill, Graeme Burt. Particle-in-cell simulation of second and third harmonic cavity klystron. In *2017 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, pages 1–2, April 2017.

- [37] ROMUALD DUPERRIER. *Dynamique de faisceaux intenses dans les rfq*. PhD thesis, 2000. Thèse de doctorat dirigée par TKATCHEWKO, ANDRE Physique PARIS 11, ORSAY 2000.
- [38] Philippe Gouard, Stephanie Champeaux, Philippe Liger, and Didier Morisseau. Simulation of an Industrial Linac 5 MeV, 1 mA, 3 GHz with MAGIC Electromagnetic PIC Code. *Conf. Proc.*, C100523 :TUPEC046, 2010.
- [39] G. Jönsson L. Sundström and H. Börjeson. *Radio Electronics*. Department of Electrosience, Lund University, 2004.
- [40] Erik Jongewaard. Slac klystron lectures, fabrication, processing and vacuum techniques. 2004.
- [41] Formation tubes station tv, documentation thales.
- [42] Technical modifications th2166, novembre 2005, documentation thales. 2005.

Annexe A

Données de calculs utilisées lors des simulations de kladistron

Configurations	Faisceau	Champ magnétique
1	laminaire	uniforme
2	laminaire	valeurs réelles
3	Optic2D	valeurs réelles

TABLE A.1 – Faisceaux et champs magnétiques utilisés lors de nos simulations

Cavité	Franck Peauger (07/2015)	Glissements définitifs	Glissements provisoires 1	Glissements provisoires 2
1	10	10	10	10
2	15	16.8	16.8	14
3	15	13.8	13.8	14
4	15	13.8	13.8	14
5	15	13.8	13.8	14
6	16	14.8	14.8	15
7	16	14.8	14.8	15
8	16	14.8	14.8	15
9	16	14.8	14.8	15
10	17	15.8	15.8	16
11	17	15.8	15.8	16
12	18	17.8	17.8	18
13	17.7	17.7	17.5	17.7
14	17.5	17.5	17.3	17.5
15	16	16	15.8	16
16	15.8	15	15.6	15.8

TABLE A.2 – Longueurs de glissement, en millimètres, entre le milieu du gap de la cavité considérée et le milieu du gap de la cavité précédente; valeurs utilisées dans les calculs d'interaction

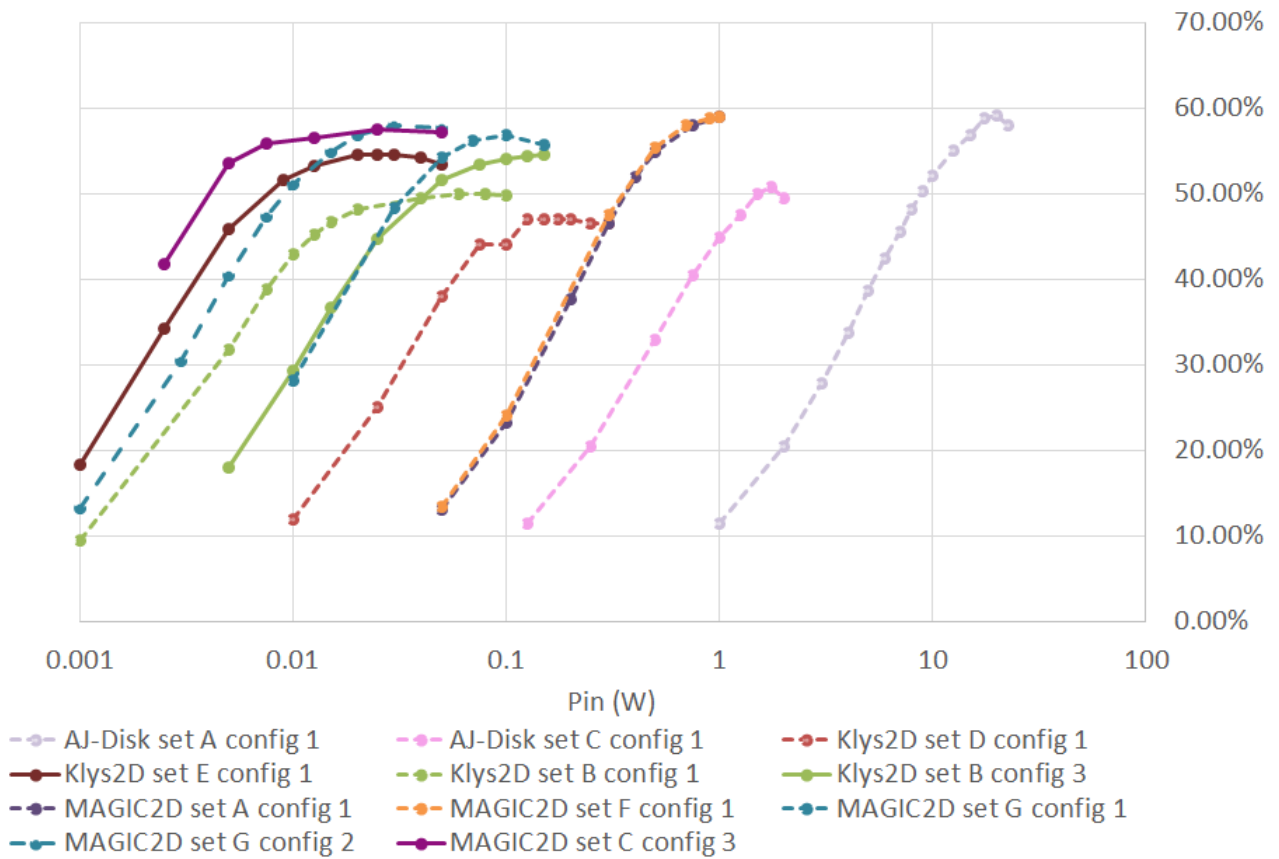


FIGURE A.1 – Rendements des principales architectures de kladistron simulées en fonction de la puissance d'entrée - résultats de calculs AJ-Disk, Klys2D et MAGIC2D, dans les configurations 1, 2 et 3

Cavité	Franck Peauger (07/2015)	Fréquences définitives (FP+4MHz)	Fréquences provisoires 1 (FP+9MHz)
1	4895	4899	4904
2	4897	4901	4906
3	4892	4896	4901
4	4926	4930	4935
5	4970	4974	4979
6	4955	4959	4964
7	4960	4964	4969
8	4935	4939	4944
9	4962	4966	4971
10	4952	4956	4961
11	4958.5	4962.5	4967.5
12	4944	4948	4953
13	4955	4959	4964
14	4963	4967	4972
15	4918	4922	4927
16	4890	4894	4899

TABLE A.3 – Fréquences, en mégahertz, des cavités utilisées dans nos calculs d'interaction

Configurations	Fréquences	Glissements	Longueur de la ligne (mm)	Q_e	Collecteur présent
A	Franck Peauger (07/2015) (FP)	Franck Peauger (07/2015)	243	76	non
B	Fréquences définitives (FP+4MHz)	Glissements définitifs	233	65	oui
C	Fréquences définitives (FP+4MHz)	Glissements définitifs	233	65	non
D	Franck Peauger (07/2015)	Glissements provisoires 1	233	76	oui
E	FP +9MHz	Glissements provisoires 2	233	76	oui
F	Franck Peauger (07/2015)	Glissements provisoires 2	233	76	non
G	FP +9MHz	Glissements provisoires 2	233	76	non

TABLE A.4 – Paramètres des configurations utilisées dans nos calculs d'interaction

Annexe B

Étude de l'influence des tolérances de fabrication sur la fréquence des cavités

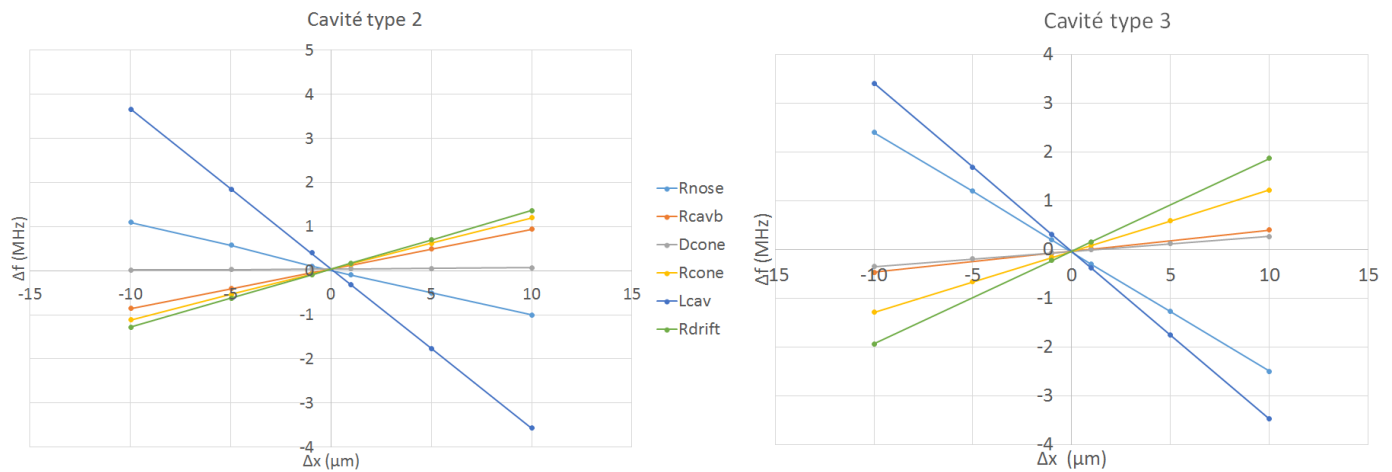


FIGURE B.1 – Décalage en fréquence des cavités type 2 et type 3 en fonction de l'écart des cotes par rapport à leurs valeurs nominales - Résultats de simulations COMSOL