

**Etudes des effets des forces de Lorentz sur la cavité
spoke β 0,15 et sur la cavité SPIRAL 2 β 0,12**

H. Gassot

► **To cite this version:**

H. Gassot. Etudes des effets des forces de Lorentz sur la cavité spoke β 0,15 et sur la cavité SPIRAL 2 β 0,12. 2007. in2p3-00130923

HAL Id: in2p3-00130923

<http://hal.in2p3.fr/in2p3-00130923>

Preprint submitted on 14 Feb 2007

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.

ÉTUDES DES EFFETS DES FORCES DE
LORENTZ SUR LA CAVITÉ SPOKE $\beta_{0,15}$
ET SUR LA CAVITÉ SPIRAL 2 $\beta_{0.12}$

H. GASSOT

Table des matières

1	INTRODUCTION	2
2	Étude des effets des forces de Lorentz pour la cavité Spoke $\beta = 0,15$	3
2.1	Outils de calcul	3
2.2	Modélisation en aval de la CAO	3
2.3	Couplage électromagnétique-mécanique en 3D	4
2.4	Calculs électromagnétiques hyperfréquences sous SOPRANO	7
2.5	Calculs mécaniques en 3D	9
2.5.1	Forces de Lorentz	9
2.5.2	Propriétés du matériau	10
2.5.3	Conditions aux limites	10
2.6	Résultats et expériences	11
3	Calculs pour la cavité supraconductrice quart-d'onde du projet SPIRAL 2	12
3.1	CAO et Modélisation	12
3.2	Calculs électromagnétiques hyperfréquences sous SOPRANO	13
3.3	Calculs mécaniques en 3D	14
3.4	Premiers résultats	16
4	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	17

Chapitre 1

INTRODUCTION

Depuis quelques années, la conception des futurs accélérateurs privilégie de plus en plus l'utilisation des cavités supraconductrices comme structures accélératrices, en vertu de leur grande efficacité en gradient accélérateur, et surtout de l'avantage de pouvoir fonctionner en continu contrairement à des structures accélératrices normales. Ainsi, les cavités supraconductrices de type mono-Spoke ont été proposées pour la partie basse énergie ($\beta = 0,15$) des accélérateurs des projets européens EURISOL pour les productions des faisceaux d'ions radioactifs et EUROTRANS dédié à la transmutation des déchets nucléaires à très longue période de vie. Ces deux projets européens sont inscrits dans le cadre du 6^{me} PCRD.

La conception de ces cavités nécessite avant tout des études d'optimisation poussées. La géométrie et la spécificité très particulières de ces cavités supraconductrices Spoke orientent d'abord la réflexion vers le choix et la mise en œuvre des outils de calcul indispensables à la réussite de ces nouveaux développements.

Un des problèmes fondamentaux pour la conception d'une cavité supraconductrice fonctionnant est la variation de fréquence de résonance liée aux déformations des parois métalliques sous forces de Lorentz. En effet, dans une cavité hyperfréquence, l'interaction du champ électromagnétique et du courant de surface donne naissance aux forces de Lorentz exercées sur la paroi intérieure de la cavité, la répartition de ces forces est fortement non linéaire et variable. Leur modélisation dépasse le cadre classique de la mécanique : elle fait intervenir les grandeurs du domaine de l'électromagnétisme, à savoir la distribution de champs électromagnétiques de surface. A partir de là, des outils de simulations mécaniques et de simulations électromagnétiques de grande performance sont nécessaires et un travail de couplage entre les simulations mécaniques et les simulations électromagnétiques s'impose.

Récemment, dans le projet SPIRAL 2, un autre type de cavité supraconductrice 88 MHz à $\beta = 0,12$ a été proposé pour le nouvel injecteur de deutérons du Ganil. Cette cavité a une bande passante très étroite (60 Hz). Les études sur les variations de fréquence dues aux forces de Lorentz sont donc importantes pour la conception de cette cavité.

Chapitre 2

Étude des effets des forces de Lorentz pour la cavité Spoke $\beta = 0, 15$

Les cavités de type mono-Spoke, de fréquence de fonctionnement à 352 MHz et à $\beta = 0, 15$ ont été proposées dans le projet européen EURISOL pour les productions des faisceaux d'ions radioactifs, et dans le projet européen EUROTRANS dédié à la transmutation des déchets nucléaires à très longue période de vie.

2.1 Outils de calcul

Les codes de calculs effectuent des résolutions numériques des problèmes physiques en partant d'un modèle géométrique approché : le maillage. Les gros codes possèdent en général leur propre mailleur, donc on doit manipuler a priori autant de maillages que de codes mis en jeu. Pour les calculs couplés, la dispersion entre les maillages utilisés dans différents codes peut être source d'erreurs ou encore source de difficultés à interpoler les champs. Ainsi, la stratégie adoptée dans ce travail consiste à utiliser un même modèle géométrique aussi bien pour les calculs mécaniques que pour les calculs électromagnétiques. Pour cela, les interfaces entre le logiciel de la CAO CATIA et les logiciels de calculs spécifiques CAST3M et SOPRANO se situent au niveau de l'échange des maillages, on peut importer ou exporter les maillages d'un code vers l'autre. Ainsi, on passe instantanément de la phase de conception sous CATIA, à l'étape d'optimisation mécanique sous CAST3M, [1] et sous SOPRANO, on s'affranchit alors des erreurs d'interpolation des champs sur les nœuds qui apparaîtraient si chaque code utilisait son propre maillage.

2.2 Modélisation en aval de la CAO

La cavité Spoke possède une géométrie complexe, la paroi de la cavité supraconductrice Spoke est formée d'un conducteur extérieur de forme cylindrique, sur lequel est piquée la barre « Spoke », les extrémités du cylindre sont fermées par deux embouts de forme conique.

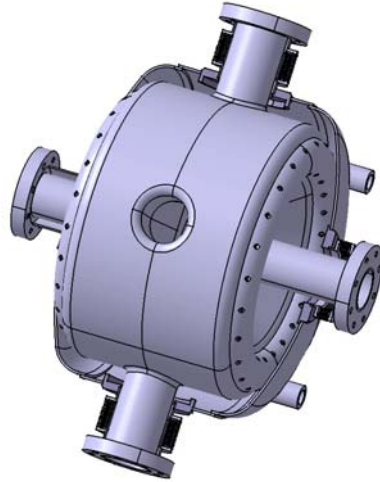


FIG. 2.1: Conception de la cavité Spoke 0,15 avec son tank d'hélium

L'utilisation d'un outil de CAO performant comme CATIA est indispensable à sa conception. Le logiciel CATIA est le logiciel de CAO préconisé par le CNRS. Depuis l'apparition de sa version CATIA V5 R13, ce logiciel permet de modéliser les objets conçus en éléments finis. Le mailleur de CATIA, peut exporter les informations concernant les maillages (les coordonnées des nœuds et les connectivités des éléments) sous format .DAT d'un code commercial NASTRAN.

2.3 Couplage électromagnétique-mécanique en 3D

Un des problèmes fondamentaux dans la conception d'une cavité supraconductrice est la perturbation de la fréquence de résonance liée aux déformations de la paroi de la cavité sous forces de Lorentz. En effet, pour procurer une forte énergie aux particules chargées, il est nécessaire de créer un fort champ électromagnétique dans la structure accélératrice, en injectant de la puissance HF dans la cavité via un coupleur de puissance. Le champ électromagnétique s'établit et génère des forces de Lorentz sur la paroi intérieure de la cavité.

Comme ces forces de Lorentz sont dirigées perpendiculairement à la paroi, on les caractérise par une distribution de pression, appelée pression de radiation dont le module s'exprime comme :

$$P = \frac{1}{4}(\mu_0 H_s^2 - \epsilon_0 E_s^2) \quad (2.1)$$

où H_s et E_s représentent la répartition de champ électromagnétique de surface calculée en général par un code électromagnétique.

La déformation sous pression de radiation donne naissance à une variation de volume à l'intérieur de la cavité. La fréquence de résonance, très sensible à cette variation de volume, est alors perturbée, sa variation s'exprime sous la forme :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{4W} \int \int \int_{\Delta V} (\mu_0 H^2 - \epsilon_0 E^2) dV \quad (2.2)$$

où : W est l'énergie totale de la cavité, f_0 est la fréquence de résonance sans perturbation.

Les deux formules illustrent bien la nécessité du couplage entre l'analyse électromagnétique et l'analyse mécanique. Les termes de droite de la formule (2.1) ne peuvent s'obtenir qu'à partir des simulations électromagnétiques résolvant les équations de Maxwell, alors que le terme à gauche de cette équation est une grandeur mécanique, c'est une répartition de force, les déformations générées par cette distribution de force ne peut s'obtenir qu'à partir des simulations mécaniques. Comme la fréquence de résonance d'une cavité supraconductrice est étroitement liée à sa forme géométrique, les déformations sous l'effet de forces de Lorentz génèrent une variation de fréquence qui doit être évaluée par les calculs électromagnétiques sur la géométrie déformée.

Pour faciliter les passages entre le code de simulation électromagnétique et le code de simulation mécanique tout en assurant de meilleures précisions de calculs, les programmes d'interface ont été développés. Ils permettent de rendre cohérents les maillages utilisés dans les deux codes. En effet, pour les simulations électromagnétiques, il est nécessaire de modéliser l'espace contenu à l'intérieur de la paroi de la cavité, alors que pour les simulations mécaniques, le support de l'étude est la paroi de la cavité. Les programmes d'interface récupèrent le maillage de l'espace contenu à l'intérieur de la paroi de la cavité élaboré par CATIA sous format NASTRAN, le traduisent sous format lisible par OPERA (format universel), ET reconstituent un maillage cohérent et bien orienté de la paroi de la cavité pour les calculs mécaniques sous CAST3M (format CAST3M), [3].

Le maillage de l'espace contenu à l'intérieur de la cavité est présenté en figure 2.2. Alors que le maillage en éléments surfaciques de la paroi de la cavité reconstitué partir du maillage en tétraèdres 2.2 est présenté en figure 2.3. Grâce aux programmes d'interface, les nœuds du maillage surfacique 2.3 sont exactement les mêmes que les nœuds de l'enveloppe du maillage en tétraèdres 2.2.

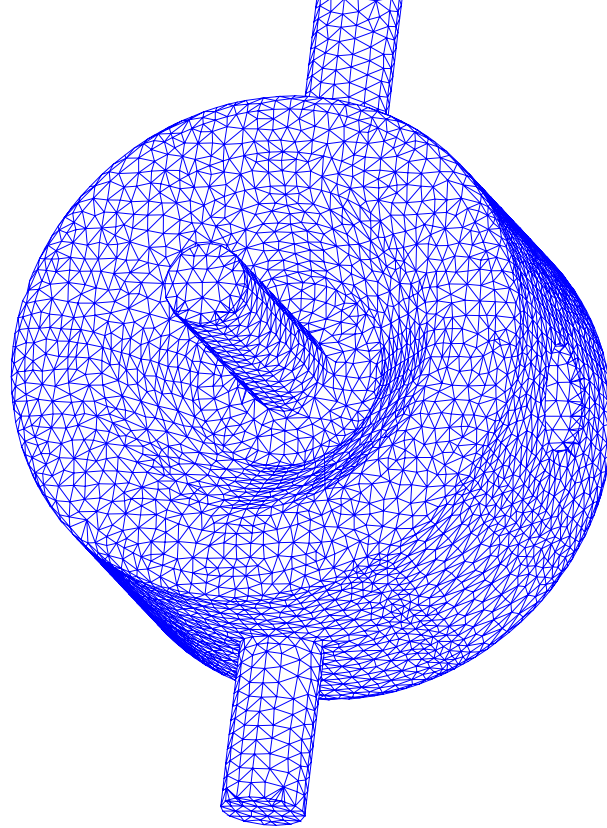


FIG. 2.2: Maillage en 82784 tétraèdres de l'espace vide

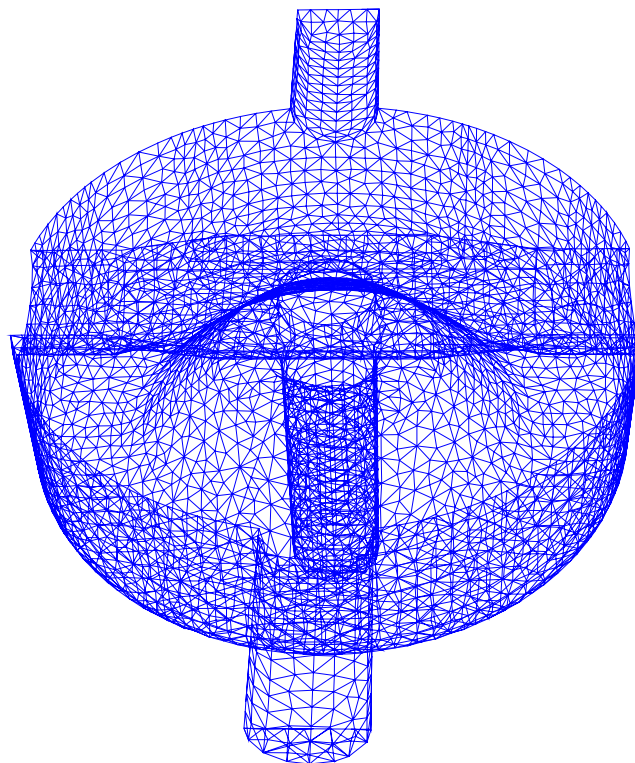


FIG. 2.3: Coupe du maillage coque en 15128 triangles de la paroi

2.4 Calculs électromagnétiques hyperfréquences sous SOPRANO

Les simulations électromagnétiques sont réalisées avec le code OPERA. Depuis vingt ans, le code commercial OPERA est développé et commercialisé par la société Vector Fields. Il représente un des codes de référence dans le domaine des simulations électromagnétiques. L'actuelle version (version 11) comporte des modules spécifiques dans plusieurs domaines particuliers de simulation électromagnétique. Le module SOPRANO est dédié spécialement aux calculs de champs électromagnétiques en haut fréquence, il permet d'optimiser la structure des cavités résonantes selon des lois électromagnétiques. SOPRANO calcule les fréquences propres d'une cavité résonante, et détermine la distribution des champs électromagnétiques pour une fréquence de résonance donnée.

OPERA dispose d'un pré-processeur en parallèle de son propre modelleur OPERA-3D. Ce pré-processeur de OPERA possède une entrée « I-DEAS universal file ». IDEAS est à la fois le nom d'une société « Design Engineering & Analysis Solutions » et de son logiciel de calculs. Développé à l'origine pour précisément créer une passerelle entre OPERA et le code IDEAS, l'entrée « I-DEAS universal file » d'OPERA permet de récupérer les modèles élaborés avec IDEAS, pour effectuer les simulations électromagnétiques sur ces modèles, complétant ainsi ce créneau qui n'est pas inclus dans IDEAS. Il faut préciser que le code IDEAS est un produit purement commercial que et le coût relativement onéreux d'une licence limite son utilisation.

Grâce aux programmes d'interface spécialement développés, on peut s'affranchir d'acquérir une licence d'IDEAS pour rentrer des modèles préconçus dans OPERA. Ainsi, les programmes d'interface relient directement CATIA à OPERA, le maillage tétraédrique 2.2 est directement utilisable par SOPRANO. Les informations réorganisées par les programmes d'interface sont :

- le maillage volumique.
- les parties limites du domaine modélisé.
- les caractéristiques pour l'espace modélisé

On peut ainsi définir aisément les conditions aux limites, et résoudre les équations de Maxwell dans un espace sans charges ni courant par SOPRANO, pour déterminer la répartition des champs électromagnétiques. Dans le cas de la cavité mono-Spoke à $\beta = 0, 15$, la distribution des champs électromagnétiques est représentée en figures 2.4 et 2.5.

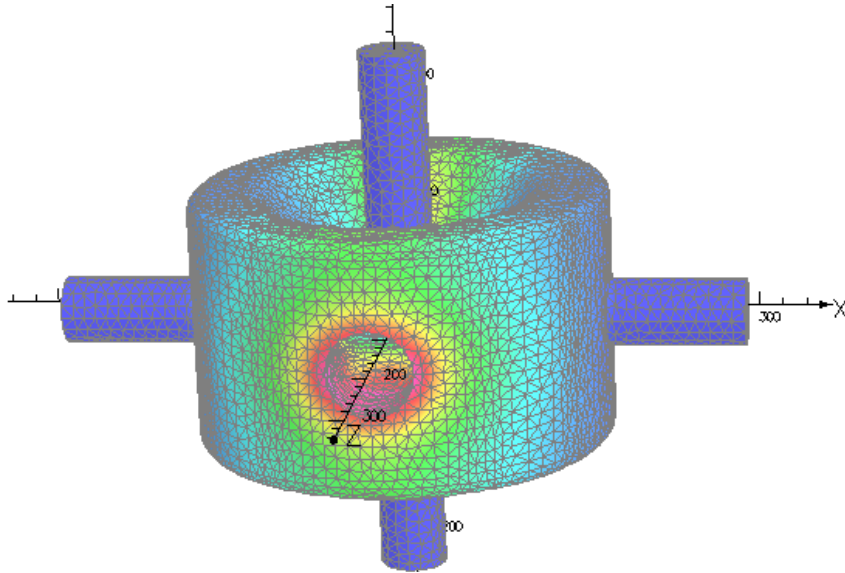


FIG. 2.4: Distribution du champ magnétique dans la cavité Spoke 0,15

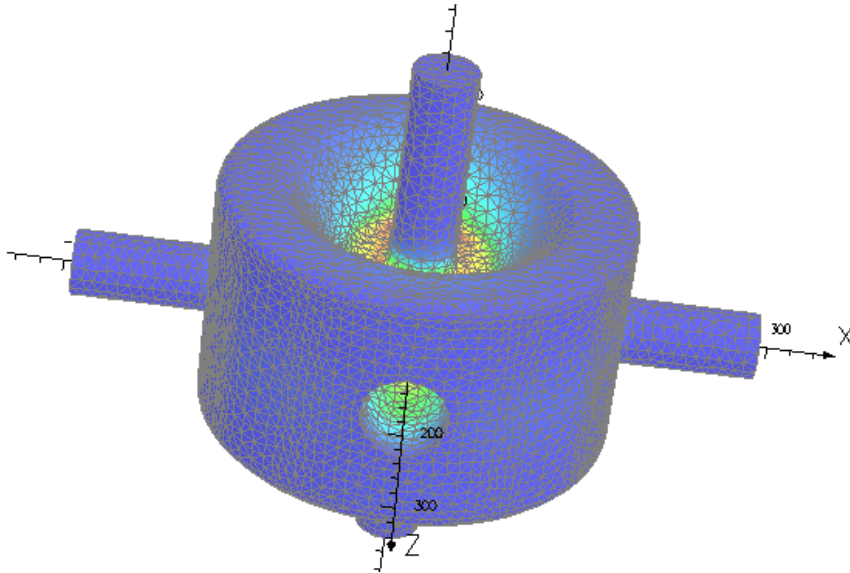


FIG. 2.5: Distribution du champ électrique dans la cavité Spoke 0,15

La distribution de champ magnétique de surface, figure 2.4, montre une forte concentration de champ H autour des extrémités du tube Spoke, alors que la figure 2.5 montre une concentration de champ E à l'intersection entre le fond conique et le tube faisceau, ainsi qu'à l'intérieur du tubes Spoke. La localisation des endroits à forte intensité de champs électromagnétiques permet de prévoir le lieu des plus importantes déformations mécaniques dues aux forces de Lorentz, puisque ces déformations sont proportionnelles aux carrés des modules des champs (équation (2.1)).

2.5 Calculs mécaniques en 3D

En présence de champs électromagnétiques, les forces de Lorentz sont générées au niveau de la paroi de la cavité. Ces forces sont réparties d'une manière non uniforme et elles sont exercées perpendiculairement sur la paroi, caractérisées par la pression de radiation.

Les calculs de ces déformations sous forces de Lorentz ne peuvent être accomplis que si le code de calculs mécaniques possède deux fonctions : la possibilité d'importer les champs électromagnétiques calculés par un code de simulations électromagnétiques comme par exemple SOPRANO et de les traduire en une répartition de pression non uniforme ; la possibilité d'exporter la géométrie déformée à SOPRANO afin de réévaluer la fréquence de résonance après déformation.

Le code de calculs mécaniques CAST3M (Calcul et Analyse de Structure et Thermique par la méthode des Éléments Finis) a le grand avantage d'être à la fois un code ouvert et de posséder un solveur complet dans le domaine mécanique et thermique, il offre ainsi de larges possibilités de communiquer avec l'extérieur. Mais dans l'état actuel, il n'est pas équipé de passerelles commerciales qui le relieraient directement à un outil de la CAO comme CATIA ou un code comme SOPRANO.

Par conséquent, en plus des interfaces nécessaires avec SOPRANO, il est nécessaire d'ajouter une interface avec CATIA, [2].

2.5.1 Forces de Lorentz

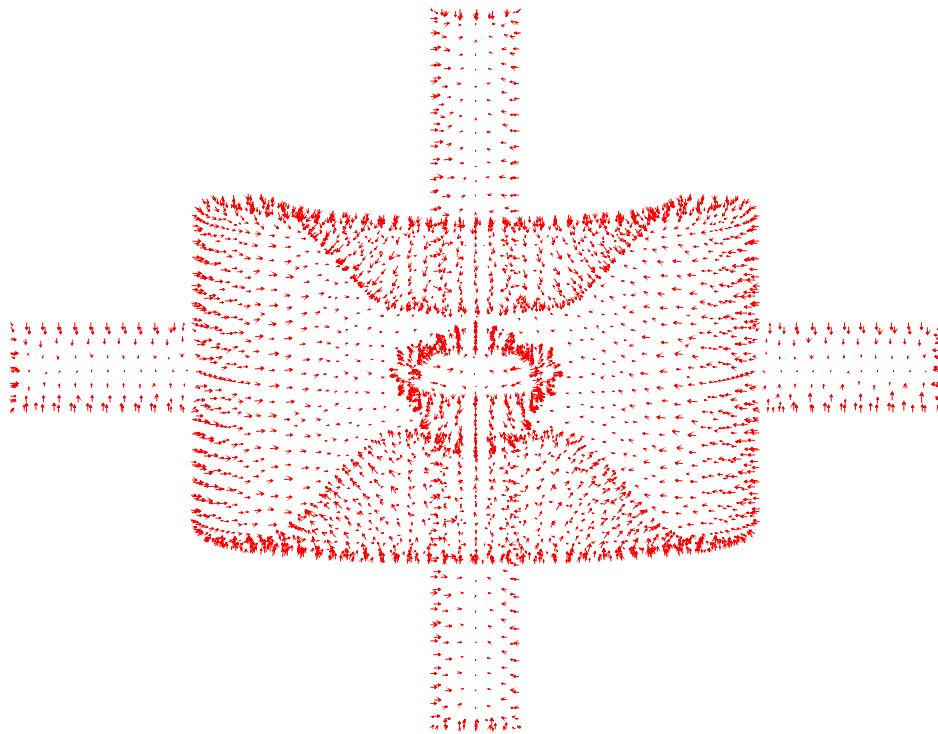


FIG. 2.6: Pression de radiation (CAST3M) selon les champs $E H$ calculés par SOPRANO

L'étape initiale consiste à importer directement la répartition des champs électromagnétiques du code SOPRANO au code CAST3M, grâce aux programmes d'interface développés spécifiquement pour cet usage.

Ainsi, la distribution de la pression de radiation est représentée en figure 2.6.

Les programmes d'interface permettent une orientation cohérente de toutes les facettes sur lesquelles est appliquée la pression de radiation. En effet, si CAST3M détecte deux facettes adjacentes d'orientations opposées, alors il ne peut pas interpréter la distribution de la pression. Pour cela, un travail préalable a été établi dans les programmes d'interface, ainsi, il permet entre autres d'inverser la normale d'un élément mal orienté.

2.5.2 Propriétés du matériau

Les propriétés élastiques du niobium utilisées dans les calculs sont :

- 107 GPa pour le module d'élasticité
- 0,3 pour le coefficient de Poisson
- 8 580 kg/m³ pour la masse volumique

2.5.3 Conditions aux limites

Pour des simulations concernant le fonctionnement des cavités supraconductrices, la définition des conditions aux limites a une grande importance sur les résultats obtenus. En pratique, ces conditions traduisent les conditions de fixation de la cavité. Ainsi, si l'on veut comparer ultérieurement les résultats de simulations aux résultats de mesures, la modélisation de la fixation de la cavité doit être la plus réaliste que possible.

Pour les cavités mono-Spoke 352 MHz, on peut majorer et minorer ce facteur selon deux types de conditions aux limites :

- dans le cas idéal, en supposant que la cavité est parfaitement fixée sur les deux extrémités du tube faisceau.
- dans le cas le plus pessimiste, seul une extrémité du tube faisceau peut être fixe, l'autre extrémité est entièrement libre.

2.6 Résultats et expériences

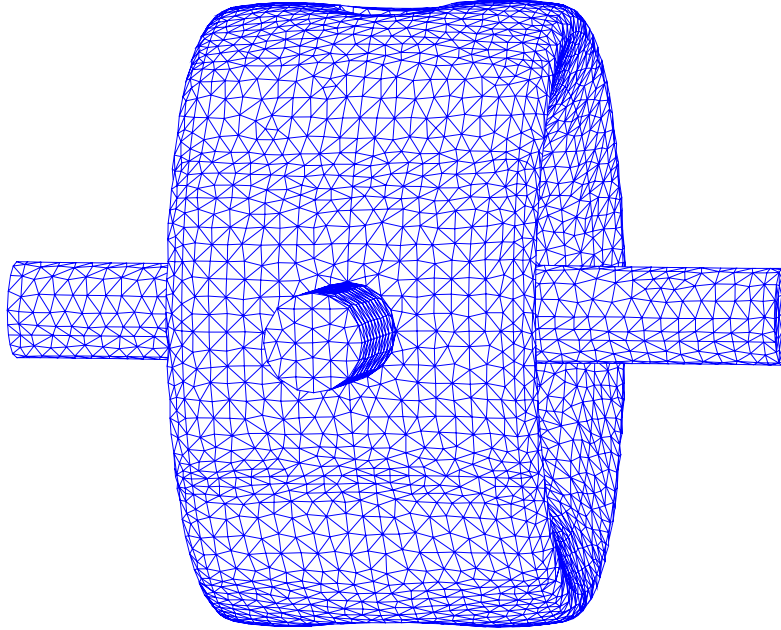


FIG. 2.7: Déformation de la cavité sous l'effet de forces de Lorentz

La variation de fréquence de résonance est proportionnelle au carré du champ accélérateur si l'on suppose que l'on reste dans le domaine de petites déformations. Ainsi, on présente les résultats obtenus par le facteur de Lorentz défini comme le rapport entre la variation de fréquence et le champ accélérateur exprimé en $(\text{MV}/\text{m})^2$.

– Lorsque deux extrémités du tube faisceau sont fixées : $\frac{\delta f}{E_{acc}^2} = -20,59 \frac{\text{Hz}}{(\text{MV}/\text{m})^2}$

– Lorsque une extrémité du tube faisceau est libre : $\frac{\delta f}{E_{acc}^2} = -72,43 \frac{\text{Hz}}{(\text{MV}/\text{m})^2}$

Les résultats de simulations obtenus dans les deux cas extrêmes permettent de cerner la plage de valeurs observables par les expériences. Les résultats obtenus par les expériences sont [4] :

– $-55 \frac{\text{Hz}}{(\text{MV}/\text{m})^2} < \frac{\delta f}{E_{acc}^2} < -47 \frac{\text{Hz}}{(\text{MV}/\text{m})^2}$

Les valeurs mesurées sont bien contenues dans la plage de valeurs déterminée par les calculs :

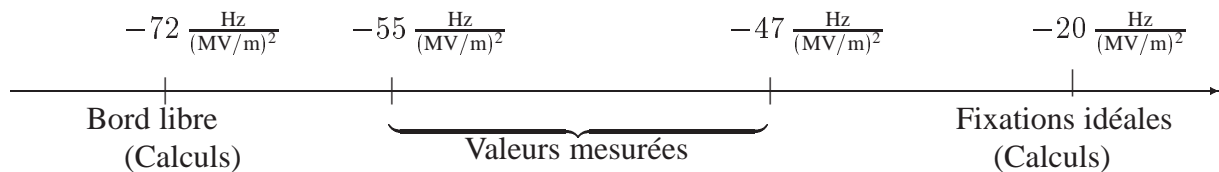


FIG. 2.8: Comparaison entre les résultats de calcul et les résultats mesurés

Chapitre 3

Calculs pour la cavité supraconductrice quart-d'onde du projet SPIRAL 2

Les calculs réalisés sur la cavité SPIRAL 2 sont basés sur le même principe. Seuls les résultats de calculs sont présentés.

3.1 CAO et Modélisation

La cavité SPIRAL 2 est représentée en figure 3.1. Le maillage de l'espace contenu à l'intérieur de la cavité est présenté en figure 3.2.

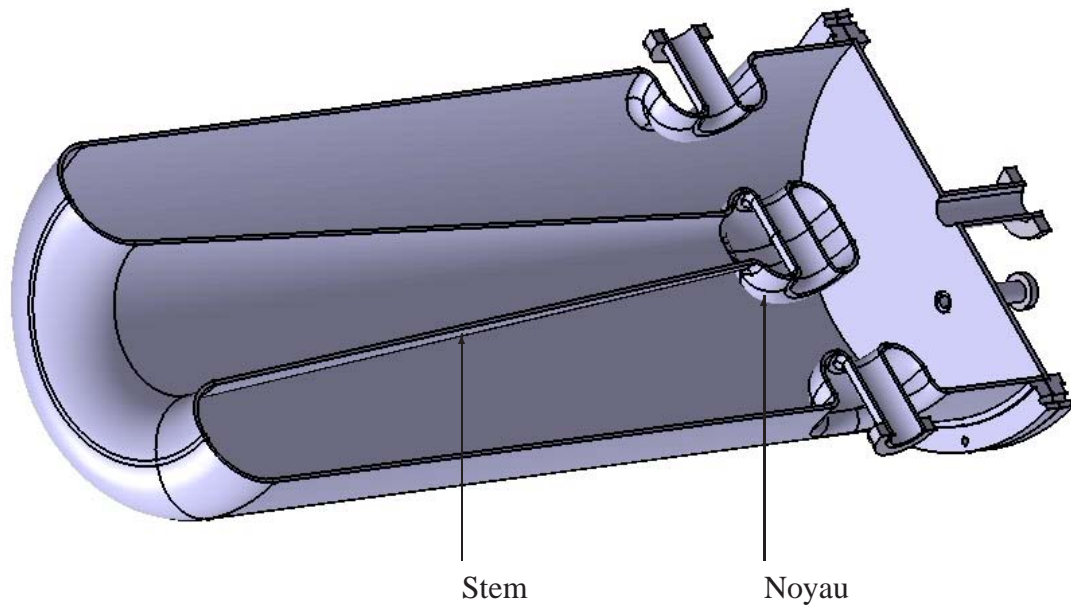


FIG. 3.1: Conception de la cavité 88 MHz $\beta = 0.12$ sous CATIA

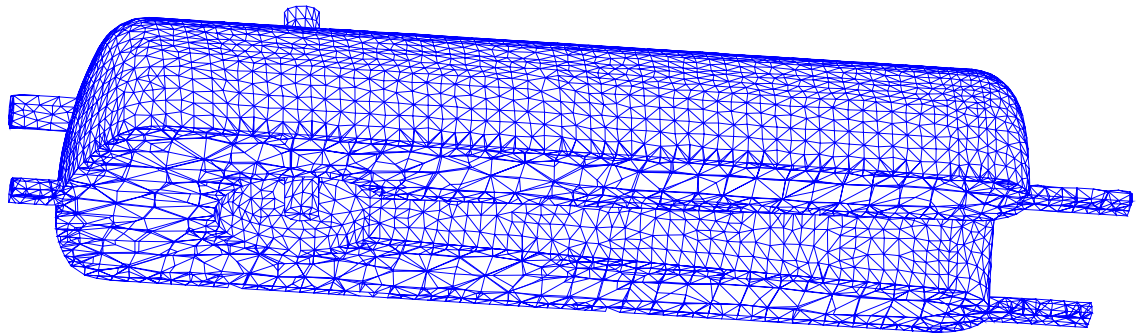


FIG. 3.2: Maillage de l'espace contenu dans la cavité 88 MHz $\beta = 0, 12$

3.2 Calculs électromagnétiques hyperfréquences sous SOPRANO

La distribution de champ magnétique de surface est présentée en figure 3.3.

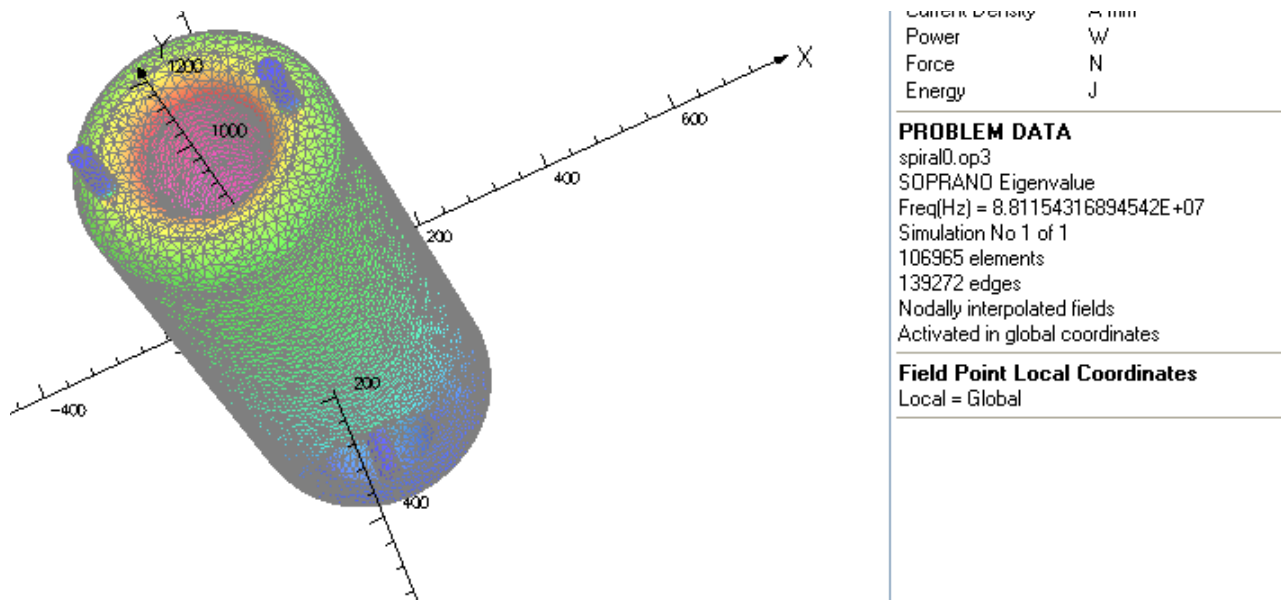


FIG. 3.3: Distribution du champ magnétique dans la cavité SPIRAL 2

On peut remarquer une concentration de champ H à l'intérieur du stem conique.

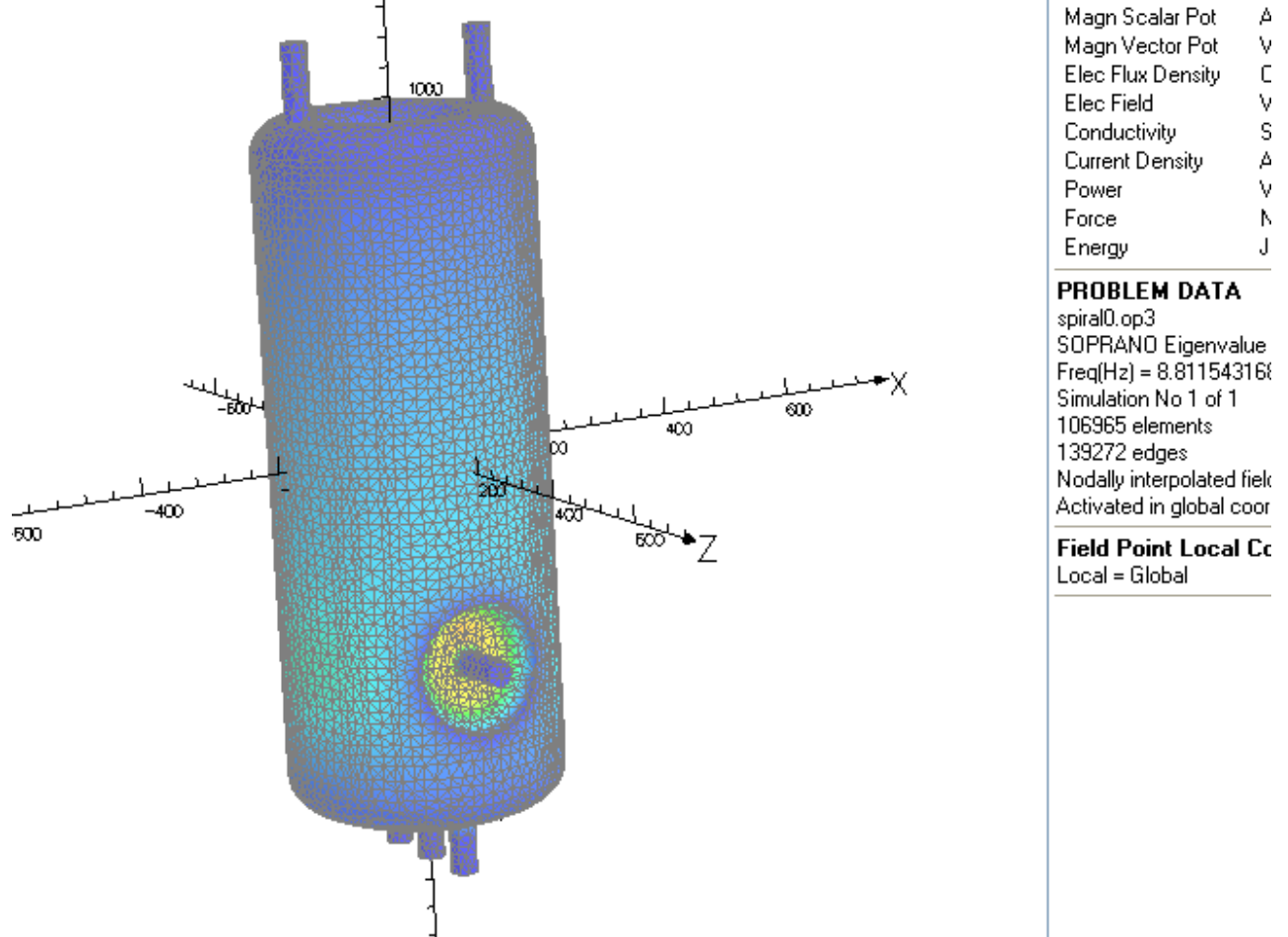


FIG. 3.4: Distribution du champ électrique dans la cavité SPIRAL 2

La figure 3.4 montre une concentration de champ E à l'intersection entre le noyau et le tube faisceau.

3.3 Calculs mécaniques en 3D

Les calculs de ces déformations sous forces de Lorentz sont effectués par le code CAST3M, après avoir reconstitué le maillage surface qui modélise la paroi de la cavité à partir du maillage volumique 3.2 et après avoir importé les champs électromagnétiques calculés par SOPRANO.

La figure 3.5 illustre la répartition de la pression de radiation sur la paroi de la cavité. La figure 3.6 montre la déformation de la paroi sous l'effet des forces de Lorentz.

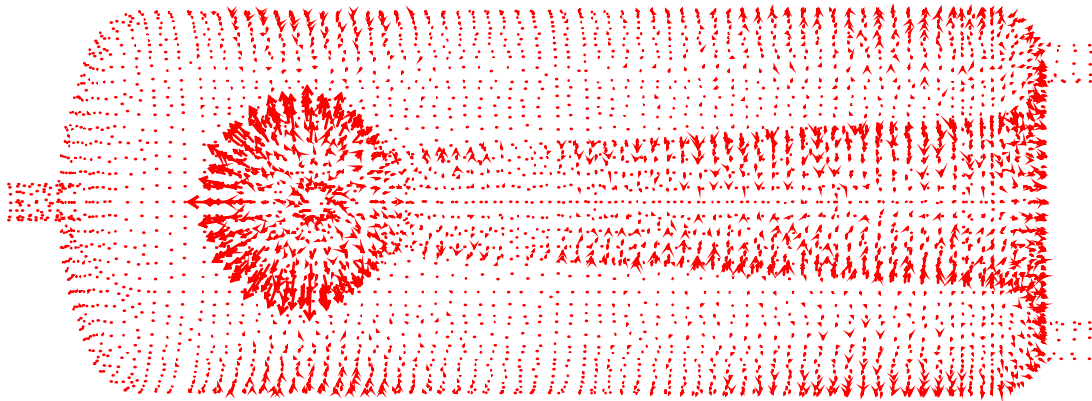


FIG. 3.5: Pression de radiation (CAST3M) selon les champs E H calculés par SOPRANO

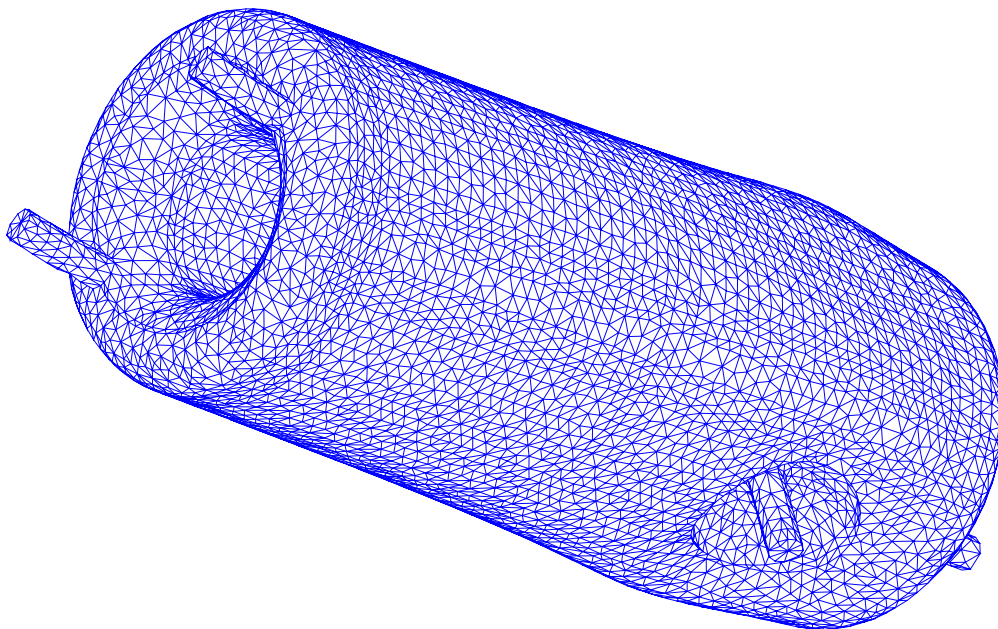


FIG. 3.6: Déformation de la cavité sous l'effet de forces de Lorentz

Δf en fonction de la longueur de cavité		
Codes	Soprano+cast3m(ép Nb = 4mm)	Micav/Cosmos
Δf	27500 Hz/mm	31600 Hz/mm
Δf en fonction de la fluctuation de pression du bain He		
Codes	Soprano+cast3m	mesures
Δf	10,3 Hz/mbar	15 Hz/mbar

TAB. 3.1: Variations de fréquence pour la cavité SPIRAL 2

3.4 Premiers résultats

Les premières testes sur les prototypes de la cavité Spiral 2 viennent de commencer, certaines données expérimentales ne sont pas encore disponibles. Une partie des résultats obtenus par les calculs sont comparés aux résultats présentés dans les rapports [5]. Dans le tableau (3.1), en première partie, les résultats obtenus concernant la variation de fréquence lorsque l'on impose un déplacement d'un millimètre à une extrémité de la cavité ont été comparés aux résultats obtenus par un autre code COSMOS ; en deuxième partie, la variation de fréquence de résonance liée à une fluctuation de pression de bain d'hélium lors de son fonctionnement est comparée aux mesures.

Chapitre 4

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce rapport, les études de la stabilité des cavités supraconductrices en 3D ont été présentées. La stabilité des cavités supraconductrices liée directement aux variations de fréquence sous l'effet des forces de Lorentz. Les études ont été rendues possibles grâce à un travail préliminaire, qui consiste à développer un ensemble de programmes interfaçant trois codes de trois domaines différents : Catia pour la CAO, SOPRANO pour les simulations électromagnétiques et CAST3M pour les simulations mécaniques. L'aboutissement des études de la stabilité des cavités supraconductrices en 3D ont résolu non seulement les difficultés de modélisation des cavités à géométries très complexes, mais également la complexité des calculs nécessitant un couplage entre les analyses électromagnétiques et les analyses mécaniques.

Les résultats concernant la cavité mono-SPOKE ont été comparés aux résultats des expériences, ce qui valide les simulations. Les premiers résultats concernant les cavités supraconductrices quart-d'onde 88 MHz à $\beta = 0, 12$ ont été présentés et comparés aux résultats obtenus par d'autres codes. Les études de cette cavité doivent se poursuivre en attendant les résultats des expériences.

Bibliographie

- [1] H. GASSOT ET AL *Mechanical studies of the multi-gap Spoke Cavity for European project HIPPI* Physica C, volume 441, issues 1-2, pp 190-192, proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconducting, Elsevier, 15 July 2006
- [2] H. GASSOT *De la CAO aux calculs par éléments finis* Rapport IPN, n0 IPNO0501, Orsay, janvier 2005
- [3] H. GASSOT *Réalisation d'une plateforme de calculs multi-disciplinaires* Rapport IPN à paraître
- [4] G. OLRY ET AL *Development of Spoke Cavities for the Eurisol an Eurotrans projects* Physica C, volume 441, issues 1-2, pp 201-204, proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconducting, Elsevier, 15 July 2006
- [5] H. SAUGNAC ET AL *Mechanical stability simulations on a quarter-wave resonator for SPIRAL 2 project* LINAC 2004, Lübeck, Germany, August 2004

Table des figures

2.1	Conception de la cavité Spoke 0,15 avec son tank d'hélium	4
2.2	Maillage en 82784 tétraèdres de l'espace vide	6
2.3	Coupe du maillage coque en 15128 triangles de la paroi	6
2.4	Distribution du champ magnétique dans la cavité Spoke 0,15	8
2.5	Distribution du champ électrique dans la cavité Spoke 0,15	8
2.6	Pression de radiation (CAST3M) selon les champs E H calculés par SOPRANO	9
2.7	Déformation de la cavité sous l'effet de forces de Lorentz	11
2.8	Comparaison entre les résultats de calcul et les résultats mesurés	11
3.1	Conception de la cavité 88 MHz $\beta = 0.12$ sous CATIA	12
3.2	Maillage de l'espace contenu dans la cavité 88 MHz $\beta = 0,12$	13
3.3	Distribution du champ magnétique dans la cavité SPIRAL 2	13
3.4	Distribution du champ électrique dans la cavité SPIRAL 2	14
3.5	Pression de radiation (CAST3M) selon les champs E H calculés par SOPRANO	15
3.6	Déformation de la cavité sous l'effet de forces de Lorentz	15

REMERCIEMENTS :

Très grands remerciements à Sébastien Blivet pour les collaborations efficaces au niveau de la CAO pour les cavités supraconductrices.