



HAL
open science

Analyse interdisciplinaire en 3D pour la conception de la cavité supraconductrice SPIRAL 2

H. Gassot

► **To cite this version:**

H. Gassot. Analyse interdisciplinaire en 3D pour la conception de la cavité supraconductrice SPIRAL 2. 2008, pp.20. in2p3-00270668v2

HAL Id: in2p3-00270668

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00270668v2>

Submitted on 20 May 2008

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.

ANALYSE INTERDISCIPLINAIRE EN 3D POUR LA CONCEPTION DE LA CAVITÉ SUPRACONDUCTRICE DE SPIRAL 2

H. GASSOT

Mars 2008

Table des matières

1	INTRODUCTION	2
2	Fréquence de résonance de la cavité en statique	3
2.1	Cavité 88 MHz $\beta = 0, 12$ pour SPIRAL 2	3
2.2	Variation de fréquence liée aux effets thermiques	3
2.3	Variation de fréquence liée aux pressions atmosphériques	6
3	Variation de fréquence de résonance due aux effets des forces de Lorentz	8
4	Modes de vibration de la structure	11
5	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	18

Chapitre 1

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet SPIRAL 2 du laboratoire Ganil, les cavités supraconductrices 88 MHz à $\beta = 0,12$ sont proposées pour le nouvel injecteur de deutérons pour la production des ions radioactifs. Cette cavité a une bande passante très étroite (88 Hz), les variations de fréquence de résonance liées aux déformations des parois métalliques, aussi bien sous l'effet des dilatations thermiques que sous l'effet des forces de Lorentz, doivent donc être évaluées pour garantir la stabilité de ces cavités. Ces études nécessitent des simulations couplées entre les études mécaniques et les études électromagnétiques. 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 à 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 des modèles géométriques compatibles 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 OPERA-3D/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 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.

Chapitre 2

Fréquence de résonance de la cavité en statique

Une cavité supraconductrice possède une fréquence de résonance fondamentale de fonctionnement qui est étroitement liée à la géométrie exacte de sa paroi. La conception théorique, compte tenu des exigences en physique, a pour but d'obtenir une forme optimale de la cavité. Cependant, outre les défauts de fabrication, les variations des paramètres physiques de l'environnement peuvent modifier de manière significative la géométrie et donc la fréquence de résonance de la cavité.

2.1 Cavité 88 MHz $\beta = 0,12$ pour SPIRAL 2

La cavité supraconductrice quart-d'onde 88 MHz $\beta = 0,12$ a été choisie pour accélérer des deutons de basse énergie [1]. Sa conception est basée sur un cahier des charges qui limite le champ électrique de surface à 40 MV/m et le champ magnétique de surface à 80 mT pour atteindre un champ accélérateur de fonctionnement de 6.5 MV/m, ce qui représente un gain en énergie d'environ 3 MeV par résonateur. La cavité est construite à partir de niobium de grande qualité d'une épaisseur de 4 mm et de 2.5 mm dont le RRR est de 250.

2.2 Variation de fréquence liée aux effets thermiques

Les cavités sont fabriquées à la température ambiante mais la température de fonctionnement est autour de 4 K. La partie intérieure de la cavité (espace sous vide) a été d'abord modélisée par le code Microwave Studio. Ce modèle a ensuite été exporté vers le code CAO CATIA (figure 2.1 côté gauche) pour être discrétisé en éléments finis. Grâce aux programmes d'interface [2], le maillage a pu être importé dans OPERA-3D qui permet de calculer la distribution des champs électromagnétiques ainsi que la fréquence de résonance.

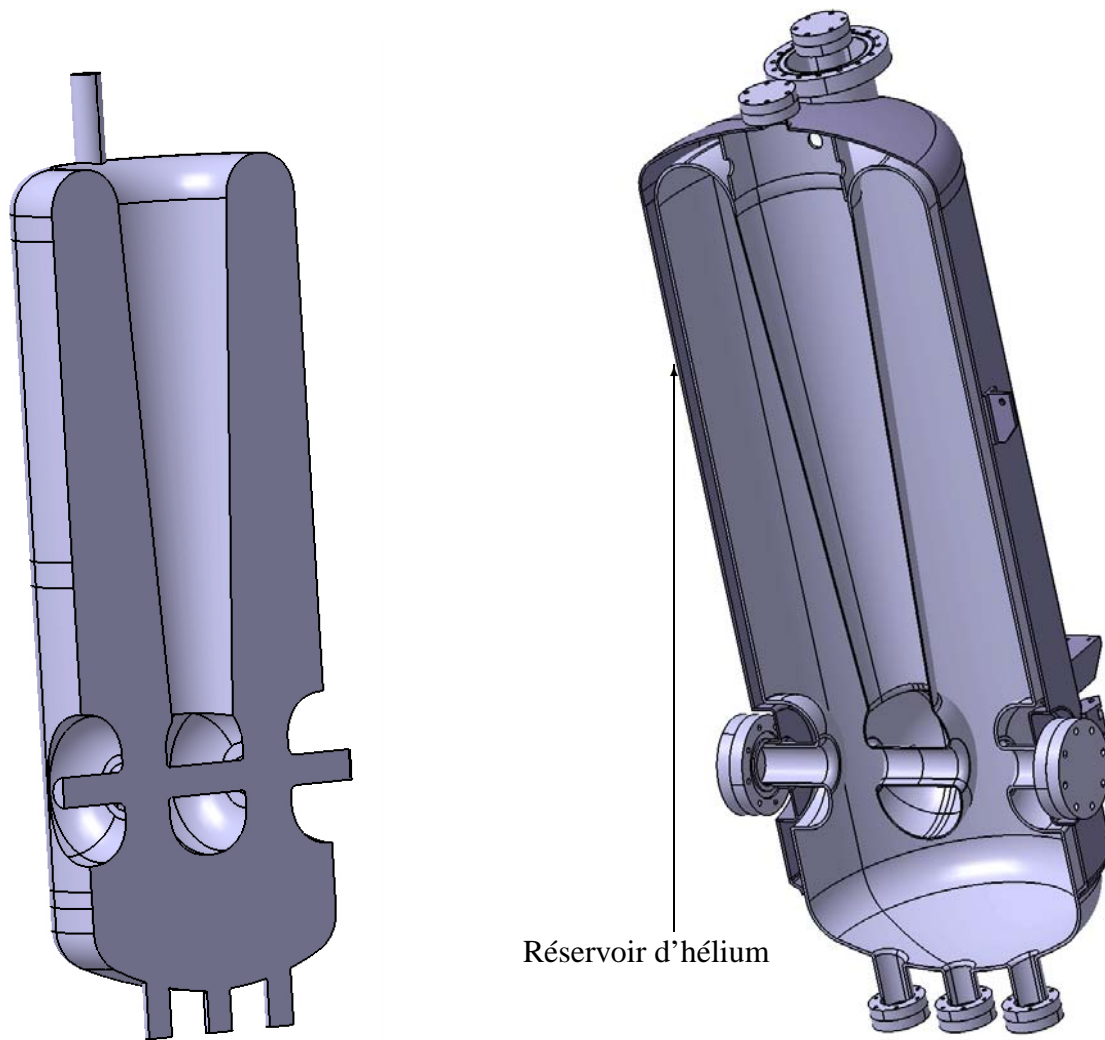


FIG. 2.1 – Modèle CAO de la cavité 88 MHz $\beta = 0,12$ sous CATIA

Sur la partie droite de la figure 2.1, la cavité est entourée de son tank d'hélium. La cavité est reliée en haut du *stem* au tank. Dans les simulations mécaniques, on attribue soit un encastrement sur l'anneau de liaison pour le cas idéal, soit une condition libre dans le cas le plus défavorable, soit une rigidité intermédiaire pour essayer d'approcher des conditions expérimentales. En bas de la cavité, sur un anneau cylindrique à l'extérieur du corps cylindrique, on impose une condition d'encastrement rigide.

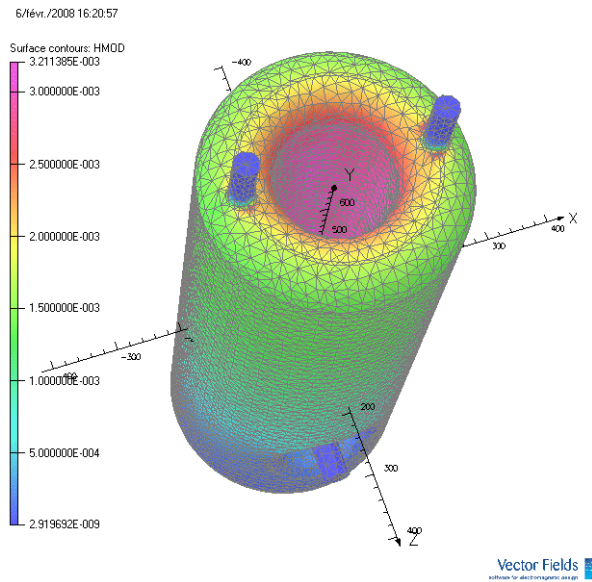


FIG. 2.2 – Distribution du champ magnétique dans la cavité SPIRAL 2

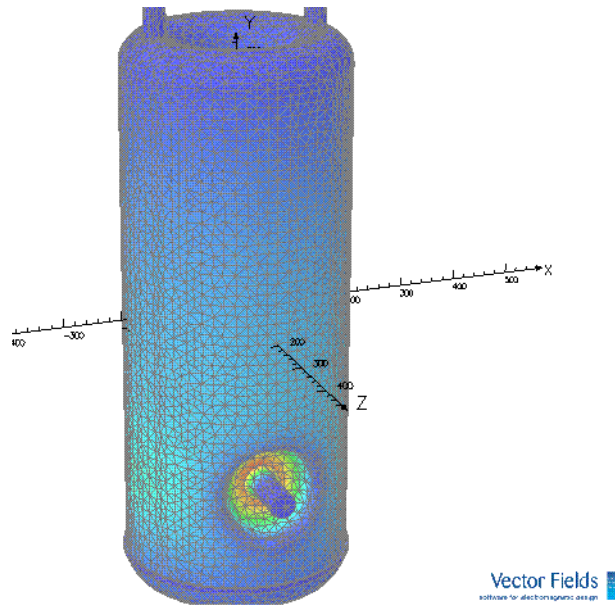


FIG. 2.3 – Distribution du champ électrique dans la cavité SPIRAL 2

La distribution des champs électromagnétiques de surface, calculée avec le code OPERA-3D, est présentée en figure 2.2 et en figure 2.3. On peut remarquer que la zone de fort champ magnétique H se situe à l'intérieur du *stem* conique, tandis que la zone de fort champ électrique se situe au niveau du noyau.

Après les calculs de déformations liées aux dilatations thermiques, les calculs sous OPERA-3D/SOPRANO prédisent une variation de fréquence de 118 369 Hz. Les calculs sous un autre code Microwave Studio donnent une variation de fréquence de 127 kHz [3].

2.3 Variation de fréquence liée aux pressions atmosphériques

Les calculs des déformations sous pressions sont effectués par le code CAST3M, le maillage surface qui modélise la paroi de la cavité a été reconstitué à partir du maillage volumique par l'intermédiaire des programmes d'interfaces. En effet, l'espace vide à l'intérieur de la paroi de la cavité a été discrétisé par des tétraèdres, une fonction qui permet de trier les facettes des tétraèdres appartenues à l'enveloppe extérieure de l'espace vide a été développée dans les programmes d'interface. Ainsi, le maillage surfacique a été créé en unissant toutes ces facettes pour les simulations mécaniques.

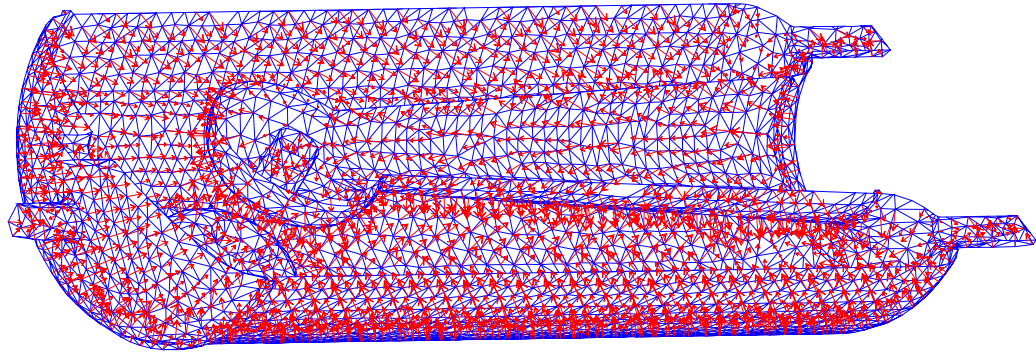


FIG. 2.4 – Répartition de pression atmosphérique

La figure 2.4 illustre la répartition de la pression sur la paroi de la cavité. Le mode de fixation de la cavité joue un rôle important sur l'ampleur de la déformation de la cavité. Ainsi deux cas extrêmes sont à évaluer : d'abord le cas où la cavité est fixée en deux endroits, en haut du *stem* et à l'extérieur du corps cylindrique ; ensuite seulement sur l'extérieur du corps cylindrique.

Les propriétés mécaniques du niobium RRR 250 utilisées dans les simulations sont résumées dans le tableau 2.1.

Module d'Young	Coefficient de Poisson	Masse volumique
108 GPa	0,39	8 580 kg/m ³

TAB. 2.1 – Quelques propriétés mécaniques du niobium

Δf calculées selon le mode de fixation de la cavité		
variation	l'extérieur du cylindrique fixe	<i>stem</i> et l'extérieur du cylindrique fixe fixes
Δf	16 522 Hz	3 604 Hz
Δf mesurées selon le mode de fixation sur deux prototypes		
variation	l'extérieur du cylindrique fixe	l'extérieur du cylindrique fixe et <i>stem</i> relié au tank
Δf	13 000 Hz (prototype ROCCO)	6 900 Hz (prototype TOKYO)

TAB. 2.2 – Variations de fréquence pour la cavité sous pression atmosphérique

La variation de fréquence suite à la déformation de la cavité sous vide par la pression atmosphérique dans chaque cas de fixation est reportée dans le tableau 2.2. Les valeurs calculées donnent un cadrage des valeurs réellement mesurées. En effet, les conditions des expériences se situent entre ces deux cas extrêmes. Si dans les expériences on peut toujours fixer l'extérieur du corps cylindrique, on ne peut pas réellement fixer le *stem*, ce dernier est en réalité seulement relié au réservoir d'hélium qui possède certes une très grande rigidité mécanique, mais limitée. Aussi, les prototypes ont des épaisseurs légèrement différentes. L'épaisseur de *stem* est de 3mm pour le prototype nommé ROCCO et de 2mm pour le prototype nommé TOKYO, la partie restante a une épaisseur de 4mm pour ces deux prototypes.

Chapitre 3

Variation de fréquence de résonance due aux effets des forces de Lorentz

Dans une cavité hyperfréquence, l'interaction du champ électromagnétique et du courant de surface donne naissance aux forces de Lorentz qui s'exercent sur la paroi intérieure de la cavité, ces forces déforment la structure de la paroi en niobium. La répartition de ces forces dépend de la répartition des champs électromagnétiques qui présentent des changements brusques de direction et de fortes non linéarités.

Dirigées perpendiculairement à la paroi, les forces de Lorentz sont caractérisées par une distribution de pression, appelée pression de radiation dont le module s'exprime comme :

$$P = \frac{1}{4}(\mu_0 H_s^2 - \epsilon_0 E_s^2) \quad (3.1)$$

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

Cette formulation illustre bien le couplage entre l'analyse électromagnétique et l'analyse mécanique. Le chargement mécanique P (3.1) ne peut s'obtenir qu'à partir des résultats des simulations électromagnétiques, alors que les déformations générées par cette distribution de forces ne peuvent 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.

Le point essentiel, pour passer de simulations électromagnétiques aux simulations mécaniques et vice versa, est d'assurer la cohérence entre les maillages utilisés dans les deux codes et donc la possibilité d'échanger les données nécessaires pour les calculs couplés tout en garantissant de meilleures précisions de calculs. Ce point est assuré par les programmes d'interface spécialement développés.

L'analyse des effets liés aux forces de Lorentz a aussi pour objectif de proposer des renforts nécessaires si la variation de fréquences due aux forces de Lorentz est supérieure à la bande passante de la cavité. Ces renforts sont en général ajoutés sur la surface extérieure de la cavité, par conséquent, la géométrie de cette dernière diffère de celle de la paroi intérieure de la cavité.

Dans ces conditions, il est plus intéressant d'utiliser le modèle massif de la paroi de la cavité à la place du modèle coque mince pour les simulations mécaniques.

Ainsi, dans ce volet de calcul, on commence d'abord par la modélisation de la paroi métallique de la cavité en éléments massifs (tétraédriques), cette modélisation est réalisée sous CATIA. Ensuite, les programmes d'interfaces permettent d'importer ce maillage de la paroi au code CAST3M. Dans le même temps, ces programmes trient les facettes des tétraèdres appartenant à l'enveloppe intérieure de la paroi. On construit alors l'enveloppe de l'espace sous vide à l'intérieur de la cavité et le maillage de cet espace est réalisé par le mailleur de CAST3M. Par la suite, les programmes d'interface convertissent ce maillage CAST3M en maillage OPERA-3D, les simulations électromagnétiques sont alors réalisées dans OPERA-3D.

Grâce aux programmes d'interfaces, la distribution de la pression de radiation (solicitation mécanique dans Cast3m) a pu être déterminée à partir des champs électromagnétiques (calculés par OPERA-3D). Cette distribution est non uniforme et non linéaire. Une représentation vectorielle de cette distribution est illustrée en figure 3.1.

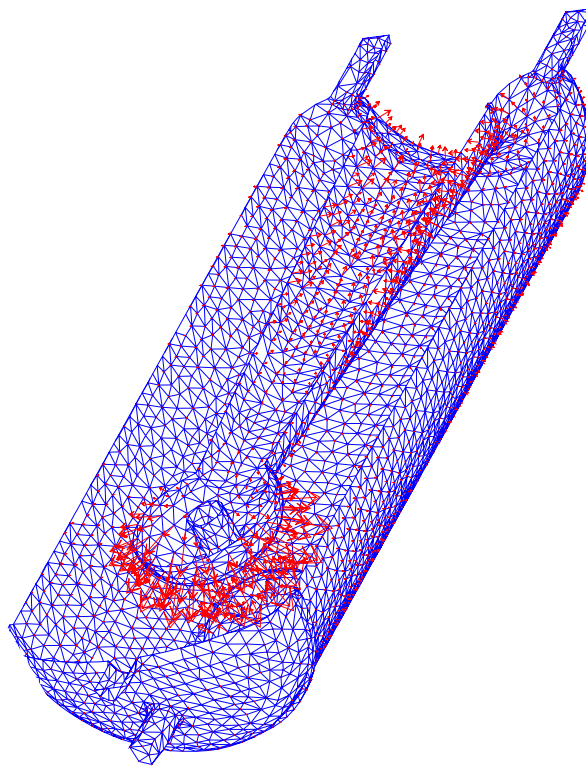


FIG. 3.1 – Répartition de la pression de radiation sur la paroi intérieure

Les résultats de calculs sont résumés dans le tableau 3.1. Ces résultats de calculs sont en très bon accord avec les résultats expérimentaux.

Résultats de calculs de Δf en fonction du carré du champ accélérateur	
fixations :	$\Delta f / E_{acc}^2$
<i>stem</i> et cylindre extérieur fixes	$-1,1 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$
cylindre fixe seulement	$-2,72 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$
Mesure de $\Delta f / E_{acc}^2$ sur le prototype ROCCO en cryostat vertical	
	$-1,58 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$
Mesure de $\Delta f / E_{acc}^2$ sur le prototype TOKYO en cryomodule	
	$-1,7 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$
Δf en fonction de la fluctuation de pression du bain He (Calculs)	
<i>stem</i> et cylindre extérieur fixes	3,6 Hz/mbar
cylindre fixe seulement	16,5 Hz/mbar
Δf en fonction de la fluctuation de pression du bain He (mesures sur Rocco)	
<i>stem</i> libre et cylindre fixe	13 Hz/mbar
Δf en fonction de la fluctuation de pression du bain He (mesures sur Tokyo)	
<i>stem</i> lié au tank et cylindre fixe	6,9 Hz/mbar

TAB. 3.1 – Variations de fréquence en fonctionnement

Selon les calculs, au cas où la cavité est parfaitement fixée et son épaisseur est égale à 4mm partout, le facteur de forces de Lorentz ($\Delta f / E_{acc}^2$) est de $-1,1 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$ alors qu'au cas où la cavité n'est fixée que sur le cylindre, ce facteur est de $-2,72 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$. Les conditions expérimentales se situent entre une fixation complète de la cavité et une situation où un bord est libre, le *stem* est relié à la réserve d'hélium qui a une grande rigidité mais non infinie. Par conséquent, le résultat de mesure doit se situer entre les deux valeurs extrêmes déterminées par les calculs. Comme la valeur de ce facteur mesurée est de $-1,58 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$, elle est donc bien conforme aux prévisions de calcul.

Le tableau 3.1 donne également la variation en fréquence en fonction de la fluctuation de la pression de bain d'hélium. La valeur mesurée par les premiers tests [4] de la fluctuation de la pression de bain d'hélium est de $13 \text{ Hz}/\text{mbar}$, très proche de la valeur obtenue par les calculs lorsque seul le cylindre extérieur est fixe ($16,5 \text{ Hz}/\text{mbar}$).

La bande passante de la cavité étant de 88 Hz, selon la prévision des calculs, au cas où les deux fixations sont assurées, aussi bien le long du *stem* que le long du cylindre extérieur, la variation de fréquence due aux forces de Lorentz est de 68 Hz au champ accélérateur maximal ($E_{acc} = 6,5 \text{ MV}/\text{m}$). Comme la cavité travaille en CW, pour que la variation de fréquence soit inférieure à 88 Hz, il suffit de décaler la fréquence de la cavité d'environ 68Hz avant d'établir le champ HF.

Chapitre 4

Modes de vibration de la structure

Les modes propres de vibration de la structure de la cavité sont à évaluer pour éviter toute sollicitation de la structure par résonance mécanique. Les résultats de simulations, obtenus à la fois sous CATIA et sous CAST3M, pour une épaisseur supposée uniformément égale à 4 mm, sont comparés aux résultats obtenus par des mesures.

Les expériences montrent que les modes de fixations de la cavité ont une grande influence sur les valeurs de modes de vibrations, ainsi dans le souci d'accroître la fréquence du premier mode de vibration afin d'éviter qu'il soit sollicité par les bruits environnants, notamment les 50 Hz, la cavité est fixée d'une manière axisymétrique sur une couronne de la paroi cylindrique. La partie conique du *stem* est fixée de manière également axisymétrique sur son réservoir d'hélium qui a une forte rigidité. Dans un premier temps, les deux parties de fixation de la cavité sont supposées avoir des liaisons infiniment rigides. Les résultats des simulations sont présentés dans les figures FIG. 4.1-FIG. 4.10. Ces images illustrent les déformées correspondant à chaque mode successif, calculées d'un côté avec le code Catia, de l'autre côté avec le code CAST3M. On peut remarquer un parfait accord entre les résultats obtenus par les deux codes.

Les deux premiers modes sollicitent les oscillations du *stem* autour de l'axe vertical du cylindre. Du mode 3 au mode 8, les déformations du cylindre extérieur sont sollicitées. Les modes 9 et 10 sont des modes de distorsion du *stem*.

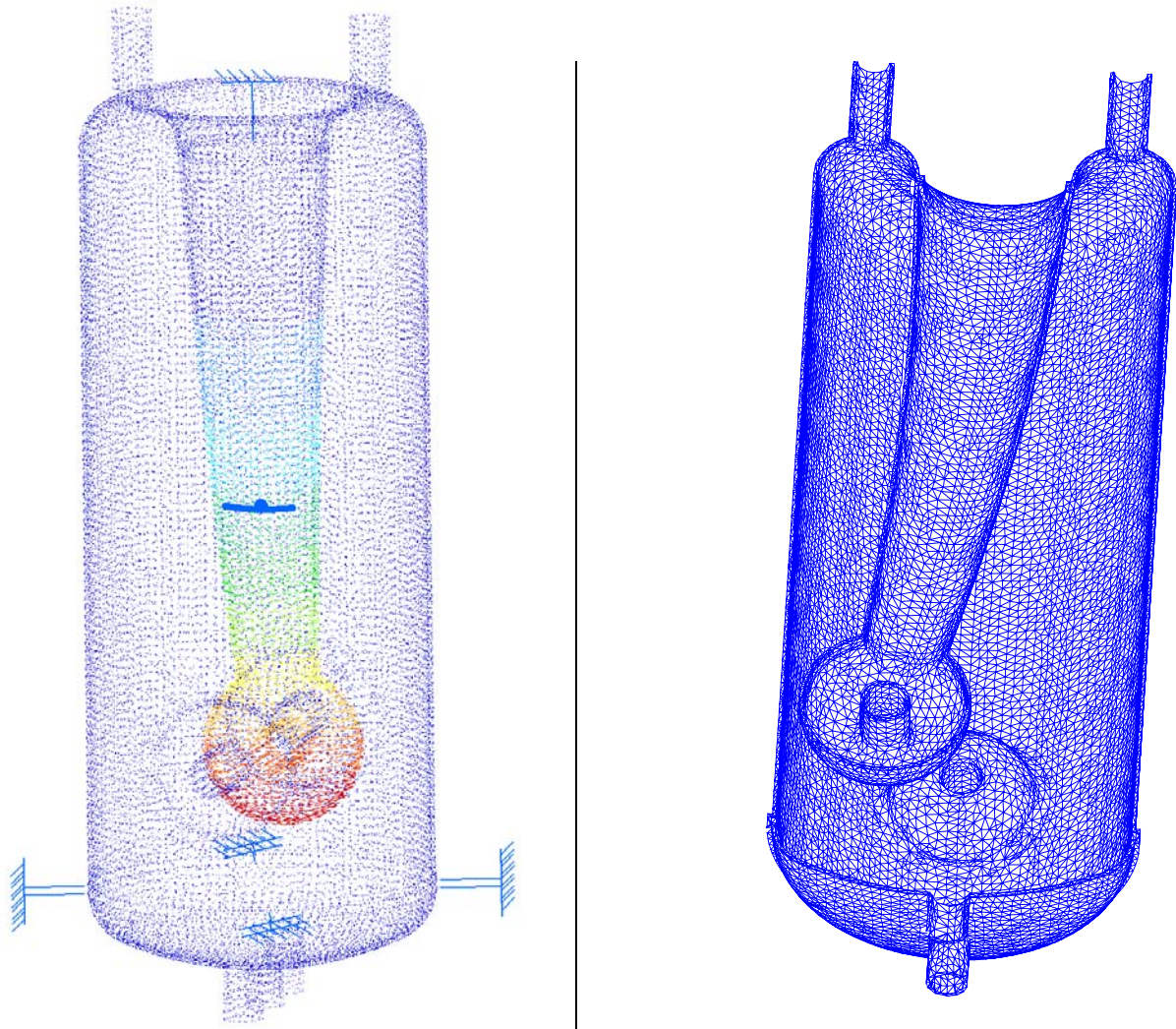


FIG. 4.1 – 1^{er} mode : à gauche CATIA $f_1 = 147,88$ Hz ; à droite : CAST3M $f_1 = 147,76$ Hz

Les figures 4.1 - 4.10 montrent un parfait accord entre les résultats de simulations obtenus sous CATIA et sous CAST3M pour tous les modes de vibration.

La valeur de la première fréquence de vibration est près de 148 Hz. Cette valeur est relativement élevée par rapport à la fréquence à éviter, à savoir 50 Hz. Compte tenu de légère dissymétrie par rapport à l'axe de cylindre, l'oscillation du *stem* dans l'autre plan perpendiculaire contenant à l'axe du cylindre a une fréquence proche de la première mais légèrement supérieure, figure 4.2.

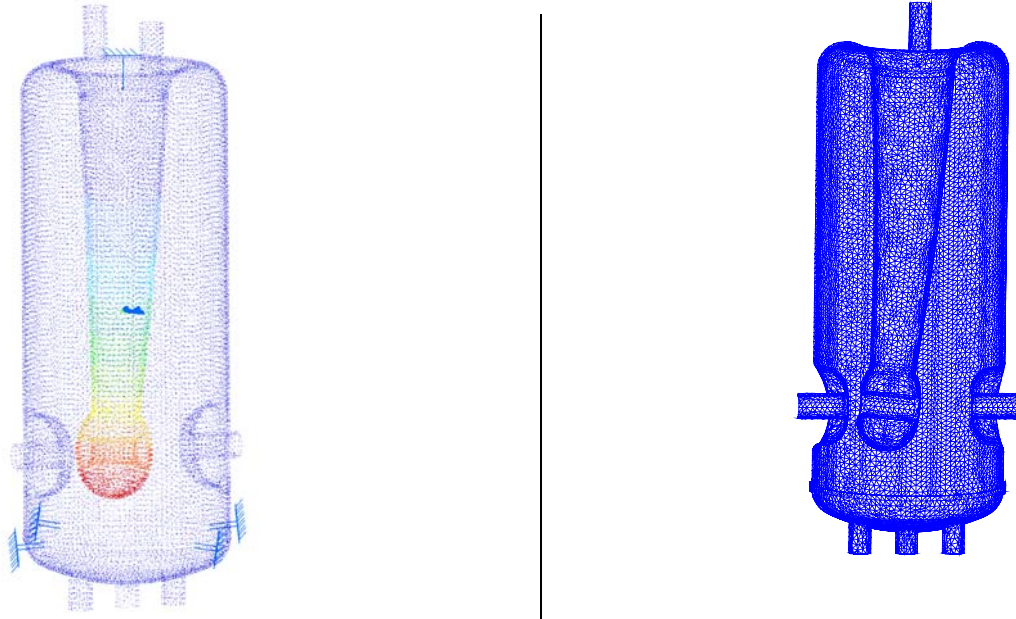


FIG. 4.2 – 2^{ème} mode : à gauche CATIA $f_2 = 148,17$ Hz ; à droite : CAST3M $f_2 = 148,04$ Hz

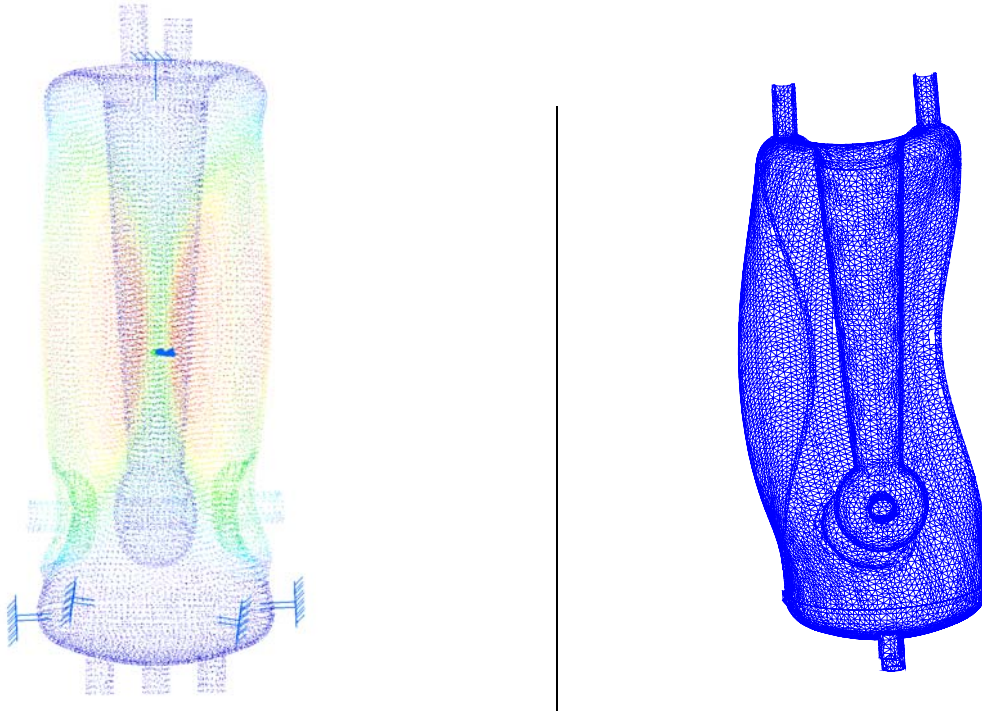


FIG. 4.3 – 3^{ème} mode : à gauche CATIA $f_3 = 361,11$ Hz ; à droite : CAST3M $f_3 = 360,81$ Hz

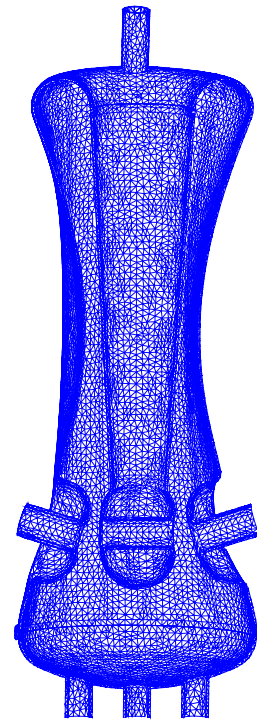
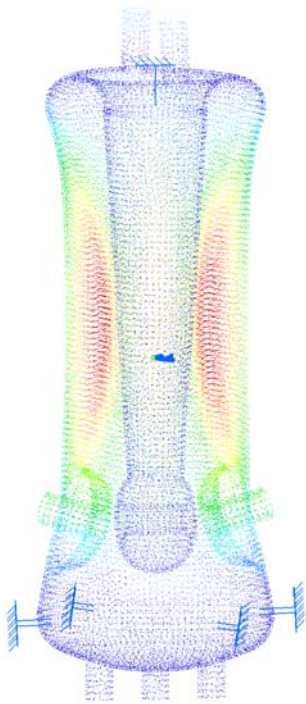


FIG. 4.4 – 4^{ème} mode : à gauche CATIA $f_4 = 364,43$ Hz ; à droite : CAST3M $f_4 = 364,13$ Hz

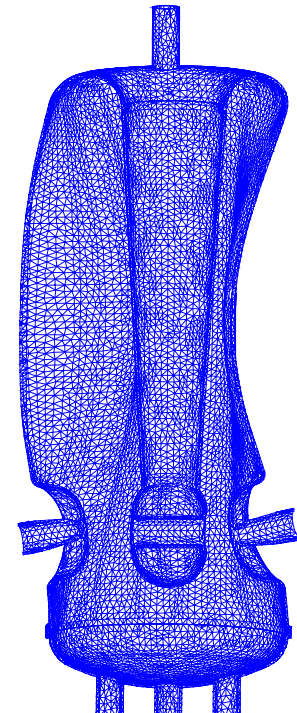
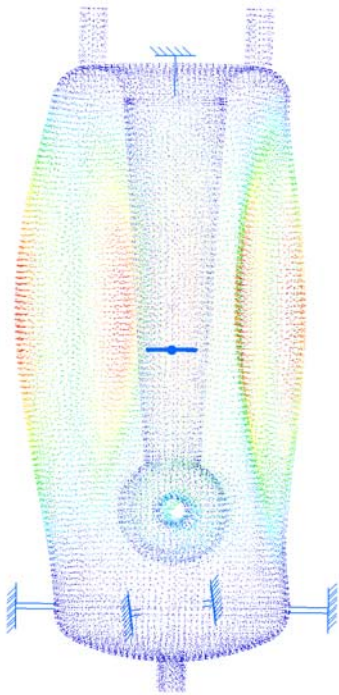


FIG. 4.5 – 5^{ème} mode : à gauche CATIA $f_5 = 430,69$ Hz ; à droite : CAST3M $f_5 = 430,34$ Hz

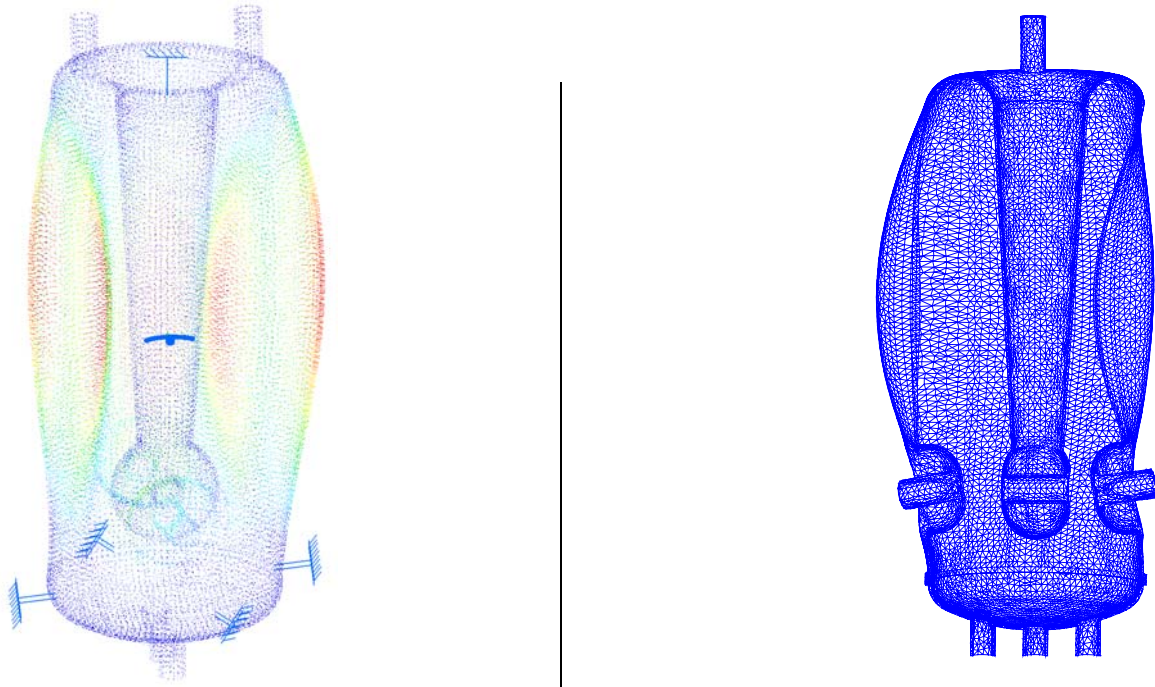


FIG. 4.6 – 6^{ème} mode : à gauche CATIA $f_6 = 437,87$ Hz ; à droite : CAST3M $f_6 = 437,51$ Hz

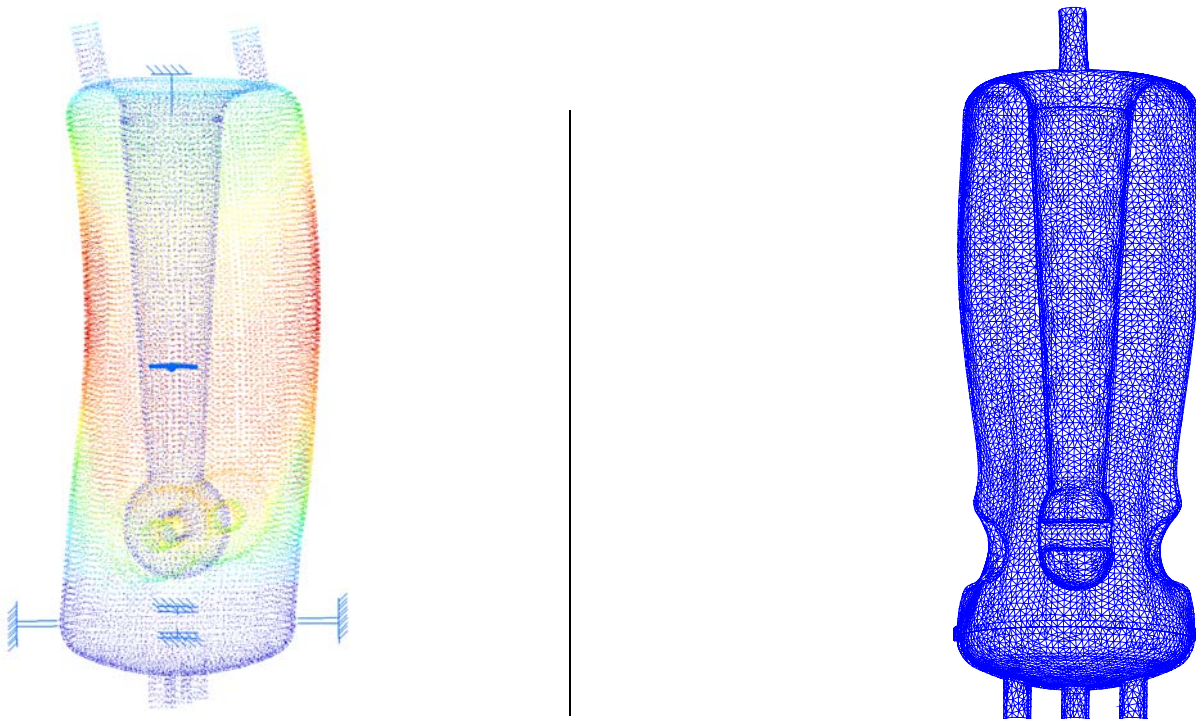


FIG. 4.7 – 7^{ème} mode : à gauche CATIA $f_7 = 546,09$ Hz ; à droite : CAST3M $f_7 = 546,65$ Hz

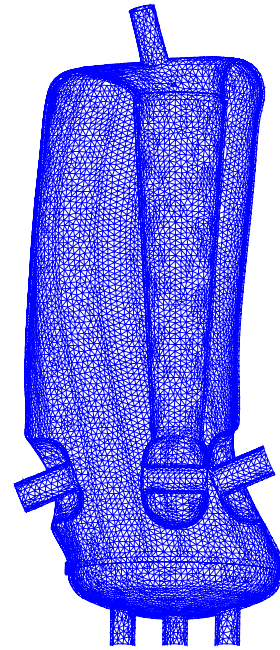
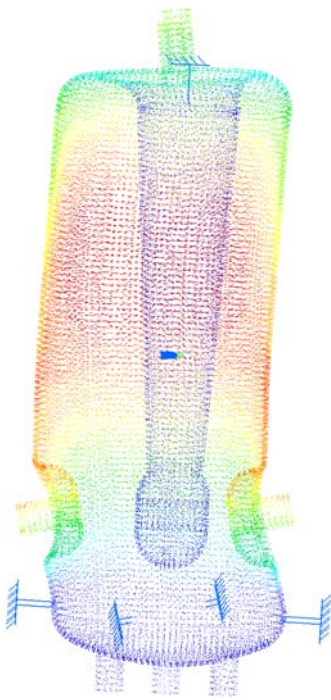


FIG. 4.8 – 8^{ème} mode : à gauche CATIA $f_8 = 597,41$ Hz ; à droite : CAST3M $f_8 = 596,65$ Hz

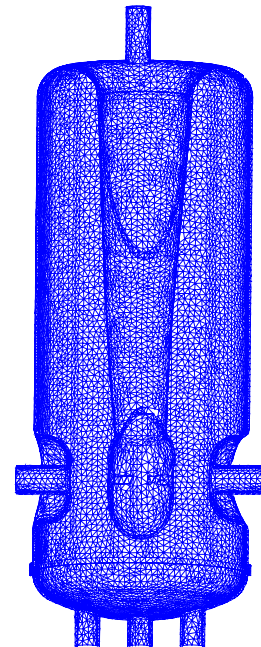
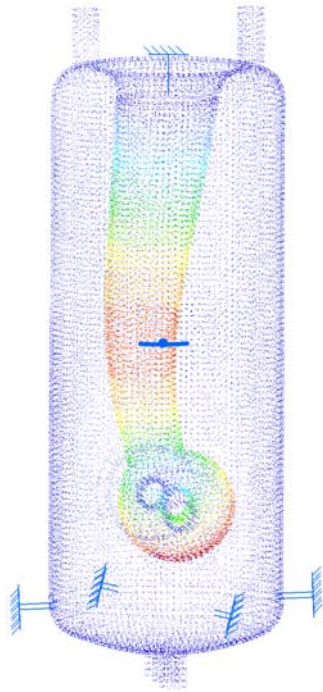


FIG. 4.9 – 9^{ème} mode : à gauche CATIA $f_9 = 625,63$ Hz ; à droite : CAST3M $f_9 = 625,07$ Hz

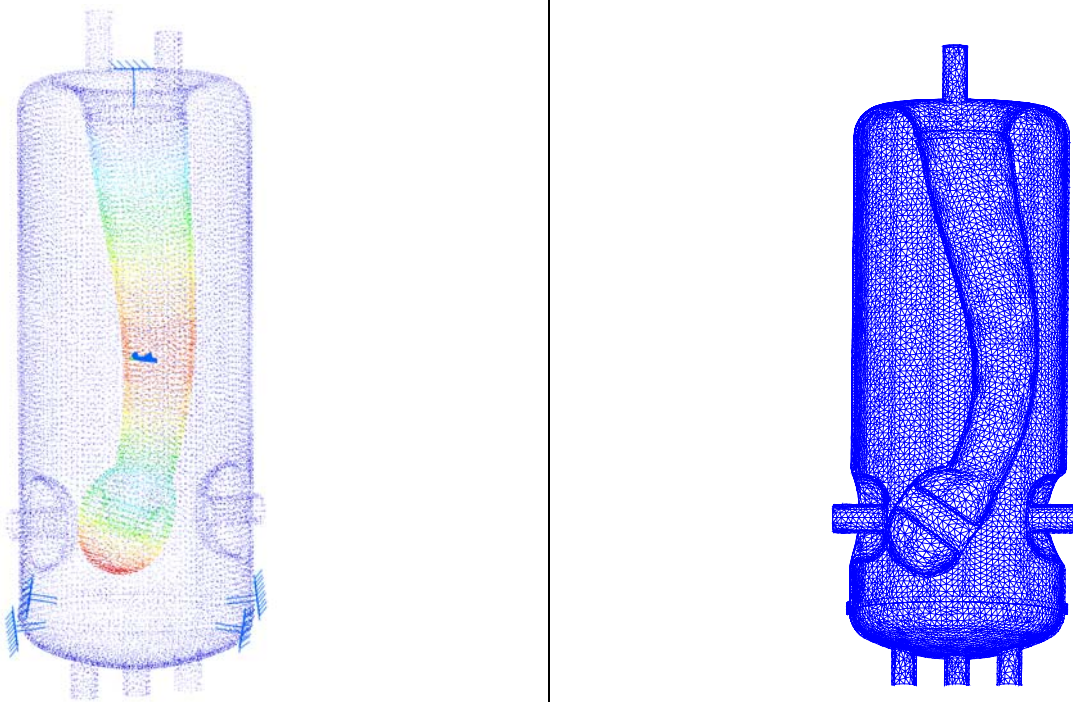


FIG. 4.10 – 10^{ème} mode : à gauche CATIA $f_{10} = 635,16$ Hz ; à droite : CAST3M $f_{10} = 634,60$ Hz

La cavité (4mm) est fixé par le <i>stem</i> et par l'extérieur du cylindre										
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
fréquence (Hz)	147	148	361	364	430	438	546	597	625	635
La cavité (4mm) n'est fixé que par l'extérieur du cylindre										
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
fréquence (Hz)	59	60	170	190	279	357	364	431	438	471

TAB. 4.1 – Fréquence de vibration mécanique de la cavité selon les modes de fixations

Les résultats de calculs illustrés en figures 4.1 - 4.10 concernent une cavité dont l'épaisseur est de 4 mm, si cet épaisseur est réduite à 3mm, mais la cavité est toujours fixée à deux endroits, par la couronne extérieure et au niveau du *stem*, alors les trois premières fréquences de résonances restent sensiblement les mêmes (149 Hz, 150 Hz et 361Hz respectivement). En revanche, si le *stem* reste libre, alors les deux premières fréquences de résonances sont respectivement 59 Hz et 60 Hz, ces fréquences peuvent être sollicitées facilement par les bruits ambiants. Les autres fréquences de vibration sont sensiblement baissées aussi, tableau 4.1. On voit l'impact important de fixer le *stem* dans ce domaine.

Une approche vers des conditions plus réalistes a été menée avec le code CAST3M. Cette approche consiste à substituer les conditions d'encastrement au niveau du *stem* par une grande rigidité au niveau des attaches. Cette modification d'une des conditions aux limites conduit à une légère baisse du premier mode de vibration, elle se situe autour de 128 Hz pour une rigidité de liaison estimée très grande. Il est néanmoins difficile de chiffrer exactement la valeur de la rigidité des pièces d'attache jusqu'au tank d'hélium, mais cette estimation indique une marge par rapport à la situation idéale.

Chapitre 5

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce rapport, les études de la cavité supraconductrice $\beta_{0,12}$ de type quart-d'onde pour SPIRAL 2 en 3D ont été présentées. Les études électromagnétiques ont été réalisées avec le module SOPRANO du code OPERA-3D. La géométrie de la cavité a été importée d'un autre code électromagnétique Microwave Studio via CATIA. Le maillage du modèle a été réalisé sous ce dernier.

Ainsi, ces simulation ont permis d'abord de confirmer certains résultats obtenus par Microwave Studio comme la variation de fréquence de résonance sous effets thermiques. Sur ces aspects, les précisions de calcul sont limitées par la capacité du PC actuel qui ne permet pas une meilleur exploitation du code commercial OPERA-3D. Pour des calculs multi-physiques, les interfaces développées à IPN Orsay entre OPERA-3D et CAST3M ont permis des simulations couplées entre électromagnétisme et mécanique. Les résultats obtenus sur les variations de fréquence en fonction des pressions extérieures sont confirmés par les expériences au cryodrome. La stabilité de ces cavités supraconductrices liée aux variations de fréquence sous l'effet des forces de Lorentz a été également étudiée. Les résultats de simulation ont permis de situer cette variation de fréquence par rapport à la bande passante. Ces résultats comportent deux volets, une situation idéale où deux attaches circulaires de la cavité sont parfaitement fixées ; l'autre situation où seule une attache est parfaitement fixe, l'autre attache est libre. Lors des expérience, le côté supposé libre est en réalité relié au tank d'hélium, les résultats expérimentaux doivent se trouver donc entre les deux situations étudiées.

Ces études ont apporté une première garantie pour la fabrication en série de ces cavités. Elles doivent se poursuivre parallèlement aux tests expérimentaux.

Bibliographie

- [1] T. JUNQUERA ET AL *High Intensity Linac Driver for the Spiral-2 Project : Design of Superconducting 88 MHz Quarter wave Resonator (BETA 0,12), Power Couplers and Cryomodules* Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Swizerland 3
- [2] H. GASSOT *De la CAO aux calculs par éléments finis* Rapport IPN, n0 IPNO0501, Orsay, janvier 2005 3
- [3] G. OLRYS Communication interne, 2008 5
- [4] G. OLRYS ET AL *Status of the beta 0.12 Superconducting cryomodule Development for the Spiral 2 Project* Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland 10

REMERCIEMENTS :

Grands remerciements à Guillaume Olry pour avoir fourni la géométrie de la cavité, à Sébastien Blivet et à Sébastien Rousselot pour les collaborations efficaces sous CATIA.