

UNIVERSITE PARIS-SUD
ÉCOLE DOCTORALE : STITS
LABORATOIRE : IEF
DISCIPLINE : PHYSIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue le 04/07/2012

par

Iännis ROLAND

Conception et évaluation des performances
d'un microgyromètre vibrant triaxial
en GaAs à structure plane

Directeur de thèse : Alain BOSSEBOEUF

Directeur de Recherches CNRS à l'IEF, Université Paris Sud

Composition du jury :

Président :

Elie LEFEUVRE

Professeur à l'IEF, Université Paris Sud

Rapporteurs :

Bernard DULMET

Professeur à l'ENSMM

Skandar BASROUR

Professeur à l'Université Joseph Fourier

Examineurs :

Lionel BUCHAILLOT

Directeur de l'IEMN

Rose-Marie SAUVAGE

Directrice responsable du domaine Nanotechnologies à la DGA

Stève MASSON

Ingénieur de Recherche à l'Onera

Olivier LE TRAON

Chef d'Unité Capteurs et Microtechnologies à l'Onera

Remerciements

Grâce aux nombreuses personnes qui m'ont aidé et soutenu j'ai pu mener cette thèse jusqu'au bout. Je tiens à les en remercier.

Je remercie mes collègues de l'Onera et de l'IEF où j'ai été encadré. La DGA qui a financé cette thèse, et la CTU IEF-MINERVE financée par le Conseil Général de l'Essonne, dont j'ai utilisé les équipements scientifiques pour mon travail de thèse.

Je remercie Pierre Touboul, précédent directeur du Département Mesures Physiques (DMPH) de m'avoir accueilli dans son département. Je remercie Olivier Le Traon, chef de l'unité Capteurs et Micro-Technologies (CMT) pour m'avoir accueilli dans son équipe. Je remercie mon directeur de thèse Alain Bosseboeuf, directeur du département MicroNanoBio et MicroSystèmes de l'IEF pour m'avoir ouvert les portes de son département et pour s'être assuré du bon déroulement de ma thèse. Je remercie Stève Masson pour m'avoir encadré quotidiennement dans mon travail de thèse.

Je remercie les membres de mon jury de thèse, les rapporteurs : Bernard Dulmet et Skandar Basrour pour leurs analyses détaillées de mon manuscrit, Elie Lefeuvre pour avoir présidé ce jury, Lionel Buchaillet et Rose-Marie Sauvage pour leur implication en tant qu'examineurs.

De plus, de manière moins formelle et quitte à revenir sur certaines personnes déjà citées précédemment, je tiens tout particulièrement à remercier :

Mon encadrant Stève Masson qui a joué son rôle avec une grande implication. Il a su m'expliquer ce que je ne comprenais pas, me guider quand j'étais perdu, me coacher quand j'étais découragé, me mettre la pression quand je traînais trop, me relire et puis me re-relire pour corriger des tonnes de fautes et le tout dans une ambiance sympathique. Grâce à Stève j'ai terminé ma formation : je vais pouvoir couper ma tresse de padawan et manier une épée en mousse.

Je remercie mon directeur de thèse Alain Bosseboeuf, pour l'intérêt et l'enthousiasme qu'il a porté à ma thèse, ainsi que pour la mémorable clé USB en forme de sushi qu'il m'a offerte.

Je remercie mes collègues de CMT, mon équipe, au sein de laquelle j'ai travaillé dans une bonne ambiance. Mes anciens co-bureau : Mick et Mélanie pour leurs idées passionnantes telles que le mobilier en cannette de Coca, la théorie de la tasse bleue et la journée sans conséquence. Mes nouveaux co-bureaux : Baptiste qui a instauré les vendredi Top Gun et Guigui de dlà, duo capable de débattre du cours des pièces détachées pour vaisseaux spatiaux ou de la consommation énergétique des yeux. Vince (mon presque collègue de bureau puisqu'il a sa chaise) pour l'ambiance de cool qu'il apporte et pour le super concert de Noflipe. Antoine pour son étude très enthousiaste du Rubik cube. Jean pour les débats scientifiques du midi : informatique des années 80, projet spatiaux artisanaux et mesure astronomique antique. Junior qui m'a refilé tous ses meilleurs plans pour mon voyage à Tokyo. Raph pour ses applaudissements enthousiastes à la moindre annonce. Mon pote Denis pour les nombreux paris insensés dans lesquelles il s'est engagé, et pour les bouteilles de vin qu'il a offert en conséquence. Olivier Senior pour sa bonne humeur sympathique et aussi pour ses coups de gueule finalement assez sympathiques aussi. François, pour ses anecdotes sur les tardigrades, sur les voyages aux USA et sur les pêches miraculeuses qu'il a effectuées. Et une deuxième fois, Denis, Olivier Senior et François pour leurs encouragements appuyés de l'été dernier. Jean-Paul pour les discussions politiques très engagées, Rachid pour les discussions sur le cinéma d'action et Claude pour les discussions sur le cinéma dramatique. Marc pour son soutien discret au groupe des buveurs de café. Et Sylvie et Hélène pour leur travail administratif et leur sympathie.

Je remercie aussi mes collègues de MicroNanoBio. Xavier pour les heures passées avec moi en salle blanche à travailler et discuter. Les sympathiques responsables ICP : Nathalie et Jean René pour toutes les images MEB qu'ils ont faites pour moi. Hervé pour les très beaux prototypes qu'il m'a aidé à fabriquer. Samson pour les coups de main qu'il m'a donné. Les responsables d'équipement qui m'ont formé : David, Cédric, Marie-Paule, José. Marion pour sa solution verdâtre de nickel et pour les chocolats. Mes co-bureaux occasionnels Johan et Fabien pour leur bon gros humour bourrin. Les doctorants pour leur accueil sympathique et car ils sont toujours prêts à donner un coup de main: Pierre, Mériam, Katia, Vincent, Magdalena, Olivier, Sébastien, Guillaume, Iman et Hervé. Merci spécial à Pierre pour les super discussions sur wikipedia, le chinois et les dinosaures, à Vincent pour la petite fête chez lui et à Magdalena pour ses tenues affriolantes.

Je remercie ma famille. Ma maman qui m'a organisé un super pot de thèse et mes tantes qui l'ont aidé. Ma sœur qui a réussi à me caser dans son agenda et qui a fait un aller retour express pour me voir. Mes cousines qui sont venues et tous mes autres cousins qui ne pouvaient pas venir mais qui ont pensé à moi. Mes oncles, tantes et cousins qui m'ont hébergé à la fin de ma thèse : Irène et Léa puis Michel Ace et Ségolène et puis Jean-Charles et Anne-Laure.

Enfin, je remercie les nombreuses personnes qui se sont déplacées parfois de loin pour venir assister à ma soutenance. Et tous ceux qui m'ont encouragé à aller jusqu'au bout de cette thèse.

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières	7
Introduction	9
1 Etat de l'art des capteurs de rotation	13
1.1 Etat de l'art des différents types de capteurs de rotation.	16
1.2 Etat de l'art des CVG MEMS.	29
1.3 Conclusion.....	48
2 Conception de la structure vibrante du CVG triaxial	49
2.1 La sensibilité mécanique.	50
2.2 Etude du coefficient de couplage Coriolis.....	55
2.3 Conception de la structure du CVG triaxial.	65
2.4 Prototypes de CVG triaxial en silicium.....	70
2.5 Conclusion.....	80
3 Modélisation et conception du système d'excitation/détection du CVG triaxial.....	81
3.1 Chaîne de mesure dans un CVG.....	82
3.2 Système d'excitation/détection.	83
3.3 Choix du matériau piézoélectrique	88
3.4 Dimensionnement du CVG triaxial en GaAs.	90
3.5 Conception du système d'excitation/détection piézoélectrique.	92
3.6 Performances du CVG triaxial.	97
3.7 Conclusion.....	99
4 Etude de la gravure traversante du GaAs	101
4.1 Gravure chimique humide du GaAs.	102
4.2 Gravure plasma du GaAs.....	110
4.3 Comparaison des deux méthodes de gravure du GaAs.	121
5 Réalisation de résonateurs en GaAs et estimation des performances du CVG triaxial	123
5.1 Conception et réalisation de résonateurs en GaAs.	124
5.2 Caractérisation de la fréquences de résonance	129
5.3 Comportement piézoélectrique.....	131
5.4 Marche aléatoire.	134
5.5 Conclusion.....	137
Conclusion.....	139

6 Annexes	143
6.1 Impact du dimensionnement sur la marche aléatoire des CVG piézoélectriques.	144
6.2 Le facteur de qualité.	146
Références	149

Introduction

Contexte

Il existe toute une gamme d'applications nécessitant des micro-capteurs de rotation (microgyromètres) présentant un faible encombrement et un faible coût de fabrication : le contrôle d'attitude de micro-drones, le contrôle dynamique de trajectoire d'automobiles ou l'enregistrement des mouvements humains pour interagir avec une interface numérique (jeux vidéo, smart phone). Ces applications nécessitent souvent la mesure des trois composantes de la rotation, or les microgyromètres sont généralement monoaxiaux : il est donc nécessaire d'utiliser trois microgyromètres ce qui s'avère assez encombrant. L'objectif de cette thèse est de concevoir et de préparer la réalisation d'un microgyromètre triaxial mesurant les trois composantes de la vitesse de rotation à partir d'une seule structure vibrante planaire et monolithique ; ce qui permet de réduire l'encombrement ainsi que le nombre de pièces et le coût de fabrication.

Les technologies de réalisation de microsystèmes électromécaniques, communément désignés sous le sigle anglophone MEMS (Micro Electro Mechanical System), permettent de miniaturiser fortement les microgyromètres et de réduire notablement leur coût de fabrication en les réalisant par usinage collectif. Le matériau qui possède le potentiel de miniaturisation le plus important est le silicium, loin devant le quartz qui présente cependant un autre avantage : son caractère piézoélectrique peut être utilisé pour la transduction électrique du signal mécanique mesuré. Les matériaux III-V présentent à la fois un potentiel de miniaturisation élevé et des coefficients piézoélectriques importants, leur utilisation dans le domaine des microgyromètres constitue une solution innovante.

L'unité "Capteurs et MicroTechnologie" du "Département Mesures Physiques" de l'Onera (le centre français de recherches aérospatiales) possède une grande expertise dans le domaine des MEMS inertiels (microgyromètres, microaccéléromètres) et de la

piézoélectricité. En effet, l'unité Capteurs et MicroTechnologie a été l'un des premiers laboratoires au monde à proposer des structures monolithiques d'accéléromètre à lame vibrante réalisées par procédé d'usinage collectif. Elle dispose d'une grande expérience dans les capteurs inertiels vibrants de types VBA (Vibrating Beam Accelerometer) et CVG (Coriolis Vibrating Gyro), en quartz, matériau cristallin piézoélectrique bien connu pour ses propriétés mécaniques exceptionnelles. Le gyromètre en quartz développé, nommé VIG (Vibrating Integrated Gyro) est un microgyromètre basé sur l'emploi d'un diapason monolithique et planaire exploitant le couplage Coriolis entre deux modes de vibration mécanique : le "mode pilote" et le "mode détection". Quand le CVG est soumis à une vitesse de rotation, les forces de Coriolis générées par le mode pilote excitent le mode détection dont l'amplitude est directement proportionnelle à la vitesse de rotation appliquée.

L'équipe "MNOEMS et instrumentation" du département "micro/nano bio et microsystème" de l'IEF (Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS-Université Paris-Sud) possède une grande expertise dans la conception et la réalisation de MEMS. Des moyens techniques et un savoir faire riche et polyvalent sont réunis dans la Centrale Technologique Universitaire de l'IEF. Ces moyens et ce savoir faire permettent la réalisation et la caractérisation de tous types de MNOEMS : nanométriques, micrométriques ou millimétriques, en silicium, en matériaux III-V, en silice ou sur substrat souple pour des applications mécanique, optique ou biologique. Ainsi, les savoir faire de l'Onera et de l'IEF se complètent et ont permis de lancer un projet de recherche sur la conception et la réalisation d'un microgyromètre en matériaux III-V.

Objectifs

L'objectif de cette thèse est de développer un CVG MEMS triaxial en GaAs et porte sur deux axes innovants : concevoir une nouvelle structure et exploiter les propriétés piézoélectriques des matériaux III-V jusque là peu utilisés dans les MEMS.

Le premier objectif est de développer un modèle théorique du CVG triaxial pour étudier les couplages par effet Coriolis entre un mode pilote unique et trois modes détection perpendiculaires entre eux. A partir de ce modèle, il s'agira de concevoir la géométrie du gyromètre triaxial et de choisir ses modes pilote et détection de manière à optimiser leur couplage Coriolis. Il faudra ensuite dimensionner la structure et estimer ses performances en simulation par éléments finis. Enfin, le comportement mécanique de la structure devra être caractérisé en réalisant des prototypes.

Le deuxième objectif est de mettre au point un système d'excitation/détection performant du CVG triaxial exploitant la piézoélectricité du GaAs. Il s'agira ensuite de développer des procédés permettant de graver le GaAs suffisamment profondément pour réaliser la structure triaxiale. Il s'agira enfin de caractériser le comportement piézoélectrique du GaAs grâce à des prototypes.

Organisation du mémoire

- Le premier chapitre commence par une étude bibliographique des différents types de capteurs de rotation, puis il traite plus spécifiquement de l'état de l'art des CVG MEMS.
- Le deuxième chapitre présente la modélisation, la conception et la caractérisation de la structure mécanique vibrante du CVG triaxial. Ce chapitre commence par une étude analytique de la sensibilité des CVG. Cette étude aboutit à la notion de coefficient de couplage Coriolis. La structure du CVG triaxial est ensuite conçue de manière à optimiser les coefficients de couplage Coriolis et les facteurs de qualité de ses modes. Puis une structure de CVG triaxial est réalisée en silicium et ses modes sont caractérisés au moyen d'un vibromètre optique.
- Le troisième chapitre traite de la conception du système d'excitation/détection du CVG triaxial. Ce chapitre commence par présenter les raisons qui ont poussé à choisir une excitation/détection basée sur la piézoélectricité du GaAs. Le comportement d'un résonateur piézoélectrique est modélisé, puis le système d'excitation/détection du CVG triaxial en GaAs est mis au point de manière à optimiser ses performances.
- Le quatrième chapitre présente deux procédés pour la réalisation de structures épaisses en GaAs : un procédé de gravure chimique humide et un procédé de gravure plasma. Ces deux procédés sont ensuite comparés.
- Le cinquième chapitre traite de la réalisation de résonateurs de test en GaAs et de leur caractérisation en température. Puis, les résultats expérimentaux sont utilisés pour estimer les performances du CVG triaxial et sa sensibilité à la température.

1

Etat de l'art des capteurs de rotation

La connaissance de la position d'un véhicule dans l'espace est une information essentielle qui permet de le piloter et de naviguer. La position peut être déterminée de manière autonome ou au moyen de dispositifs externes :

- La radionavigation est un système externe permettant de déterminer la position d'un véhicule. Le Global Positioning System (GPS) américain, le Glonass russe et le futur système européen Galileo sont des exemples de systèmes satellitaires, qui permettent par triangulation de positionner très précisément un véhicule muni d'un récepteur détectant les signaux des satellites. Ces systèmes sont cependant susceptibles de subir des coupures de communications qui privent temporairement le véhicule d'information.
- Les Unités de Mesure Inertielle (UMI) permettent la détermination autonome de la position d'un objet. Elles sont composées de capteurs de rotation et d'accélération embarqués mesurant les six degrés de liberté d'un objet. Elles permettent de déterminer l'évolution de la position et de l'orientation d'un objet par rapport à un repère initial par intégration temporelle des grandeurs inertielles. Une limitation des UMI est leur dérive dans le temps. Les UMI doivent donc être régulièrement recalées pour fournir une information précise sur la position du véhicule.
- La navigation hybride combine deux systèmes : une UMI autonome et un système permettant de recalibrer l'UMI comme par exemple : une triangulation satellitaire, un positionnement par rapport à la topologie terrestre ou par rapport à des référentiels stellaires.

Cette thèse porte sur un des deux types de capteurs nécessaires à la fabrication d'UMI : les capteurs de rotation. Les capteurs de rotation sont divisés en deux catégories : les gyroscopes qui mesurent directement des angles de rotation et les gyromètres qui mesurent la vitesse de rotation. Les gyromètres peuvent mesurer des angles par intégration de la vitesse de rotation.

Les performances des gyromètres sont principalement caractérisées par :

- La stabilité de biais qui désigne la confiance que l'on peut avoir sur la mesure de la vitesse angulaire, toutes erreurs confondues. Elle intègre les résidus de modélisation en température (l'hystérésis) et la dérive long terme du gyromètre (sur un mois, un an ou plus suivant l'application visée). Elle s'exprime en $^{\circ}/h$ et représente l'écart maximal de la sortie du gyromètre (en l'absence de rotation), pour les environnements et la durée spécifiés.
- Le minimum de la variance d'Allan, exprimé en $^{\circ}/h$ qui représente la stabilité à court terme du capteur dans un environnement extérieur optimal.
- La marche aléatoire angulaire, communément désignée sous le sigle anglophone ARW (Angular Random Walk), désigne le rapport entre l'erreur de mesure angulaire à 1 sigma et la racine carrée de la durée de la mesure.

La stabilité de biais et la marche aléatoire permettent de classer les gyromètres en trois gammes de performances :

- Les gyromètres de classe inertielle (hautes performances) ont une stabilité de biais meilleure que $0,01^{\circ}/h$ et une marche aléatoire meilleure que $0,001^{\circ}/\sqrt{h}$ [1]. Ces gyromètres sont utilisés en association avec des accéléromètres pour faire de la navigation inertielle, c'est-à-dire pour déterminer la position d'un engin en intégrant les mesures depuis son point de départ, sans communication avec l'extérieur. Grâce au bouclage de Schuler [2], la dérive temporelle est limitée indépendamment de la vitesse du véhicule. La dérive temporelle est inférieure au produit de la stabilité de biais par le rayon de la Terre soit $1,1 \text{ km}/h$ pour une stabilité de biais de $0,01^{\circ}/h$. Ce type de gyromètre est utilisé par exemple dans l'aviation civile comme organe de sécurité en cas de panne des autres dispositifs de localisation, mais aussi pour la navigation de tous types d'engins, du véhicule terrestre au sous-marin nucléaire.
- Les gyromètres moyennes performances ont une stabilité de biais meilleure que $10^{\circ}/h$ et une marche aléatoire meilleure que $0,5^{\circ}/\sqrt{h}$ [1]. Ils sont associés à des systèmes de radionavigation pour faire de la navigation hybride. Ils prennent le relais pour interpoler la position d'un objet entre deux

communications. Ils permettent de pallier les interruptions de communication pendant des durées de quelques minutes.

- Les gyromètres basses performances ont une stabilité de biais meilleure que $1000^\circ/\text{h}$ et une marche aléatoire meilleure que $30^\circ/\sqrt{\text{h}}$ [1]. Ces capteurs ne permettent pas de naviguer mais ils permettent de mesurer des vitesses de rotation instantanées, ce qui est utile pour un grand nombre d'applications : l'assistance au pilotage, le contrôle dynamique de trajectoire, le contrôle actif de suspensions, la compensation des mouvements d'un appareil photo ou l'interface homme / machine dans le domaine du numérique (smart phones, jeux vidéo).

La première partie de ce chapitre présente un tour d'horizon des différents types de capteurs de rotation existants et la deuxième partie traite plus spécifiquement des microgyromètres.

1.1 Etat de l'art des différents types de capteurs de rotation.

Il existe plusieurs phénomènes physiques permettant de mesurer la rotation, ceux qui sont généralement employés sont : la conservation du moment cinétique, l'effet Sagnac et la force de Coriolis. Dans cette partie, des capteurs de rotation exploitant ces différents phénomènes seront présentés.

1.1.1 Gyroscopes et gyromètres à toupie : conservation du moment cinétique.

La conservation du moment cinétique $\vec{L}$ peut être utilisée pour concevoir des gyroscopes ou des gyromètres. Pour la démontrer, on prend un point matériel ayant une vitesse $\vec{v}$ et une masse m , situé à la distance $\vec{r}$ d'un point d'origine O , comme le présente la figure 1.

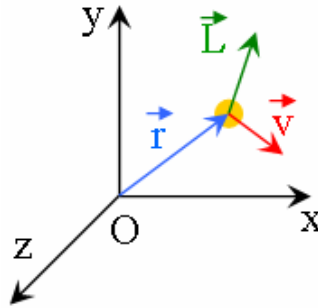


Figure 1 : Moment cinétique d'un point

Le moment cinétique $\vec{L}$ du point matériel est égal à :

$$\vec{L} = m\vec{r} \wedge \vec{v} = m\vec{r} \wedge \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \quad (1)$$

La dérivée du moment cinétique est donc égale à :

$$\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = m \frac{\partial (\vec{r} \wedge \vec{v})}{\partial t} = m \left(\vec{r} \wedge \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \wedge \vec{v} \right) = m \left(\vec{r} \wedge \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} + \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \wedge \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \right) = \vec{r} \wedge m \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} \quad (2)$$

Or, d'après le principe fondamental de la dynamique, dans un référentiel galiléen :

$$\vec{F} = m \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} \quad (3)$$

avec $\vec{F}$ la somme des forces extérieures appliquées au point matériel.

Donc :

$$\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = \vec{r} \wedge \vec{F} \quad (4)$$

Ce qui correspond à l'expression du couple total $\vec{M}$ appliqué au point matériel :

$$\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = \vec{r} \wedge \vec{F} = \vec{M} \quad (5)$$

Par conséquent :

- En l'absence de couple, le moment cinétique d'un corps se conserve donc son axe de rotation se conserve.
- Un corps dont l'axe de rotation est modifié applique un couple sur son axe.

La première de ces conséquences donne lieu au principe du gyroscope à toupie et la deuxième au principe du gyromètre à toupie.

1.1.1.1 Gyroscope à toupie.

La structure du gyromètre à toupie est présentée sur la figure 2. La toupie est un solide de révolution massif en rotation rapide qui possède un grand moment cinétique. L'axe de la toupie est supporté par un double cardan qui l'isole des couples extérieurs. Ainsi, l'axe de rotation de la toupie se conserve quels que soient les mouvements du véhicule dans lequel elle est embarquée. L'orientation du véhicule peut donc être déterminée par rapport à l'axe de rotation de la toupie. Un soin particulier est apporté à la réduction des frottements afin que la toupie puisse conserver son moment cinétique le plus longtemps possible. En 1852, Léon Foucault a conçu un gyroscope à toupie dont la rotation pouvait se maintenir une dizaine de minutes après son lancement à vitesse comprise entre 150 et 200 tours par seconde [3-4]. La stabilité de biais de ce gyroscope était suffisante pour mesurer la vitesse de rotation apparente de la terre ($11,3^\circ/\text{h}$ à la latitude de Paris).

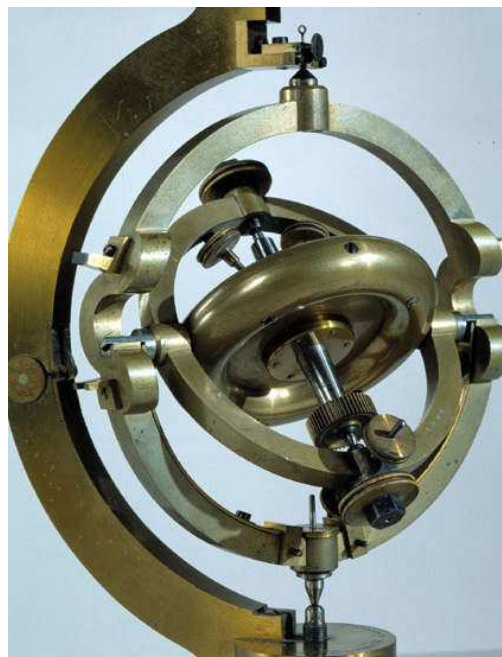


Figure 2 : Réplique du gyroscope de Foucault (musée des arts et métiers)

²Les gyroscopes à toupie permettent d'obtenir de très bonnes stabilités de biais pouvant atteindre et même dépasser 10^{-4} °/h. Cependant, ils sont généralement lourds et très coûteux. La principale limitation de leurs performances est due aux frottements qui limitent la stabilité de biais et qui génèrent de l'usure. A cause de cette usure, les gyroscopes à toupie nécessitent des maintenances régulières.

La figure 3 présente le gyroscope à toupie CMZ900 de Yokogawa [5]. Ce gyroscope exploite la conservation du moment cinétique d'une toupie sphérique appelée gyrosphère maintenue entre deux bols hémisphériques. Le CMZ900 pèse 43 kg et sa maintenance doit être effectuée tous les 12 mois.

La tendance actuelle est au remplacement des gyroscopes à toupie par des gyromètres à fibre optique (voir partie 1.1.2.2) qui atteignent des performances équivalentes, sont moins encombrants et ne nécessitent pas d'entretien [6].



Figure 3 : Gyroscope à toupie CMZ900 de Yokogawa

1.1.1.2 Gyromètre à toupie (strapdown).

La structure du gyromètre à toupie est présentée sur la figure 4. Il contient une toupie massive en rotation rapide autour de l'axe X. Ce gyromètre est appelé gyromètre lié car la rotation de la toupie autour de l'axe Y est bloquée et la rotation autour de l'axe Z est maintenue à l'aide d'un dynamomètre et d'un amortisseur. D'après le théorème du moment cinétique, quand l'axe de rotation de la toupie est modifié, elle exerce un couple de forces sur son axe. La composante selon Z du couple est mesurée par le dynamomètre et permet de déterminer la vitesse de rotation autour de Z. Les gyromètres à toupie sont moins complexes que les gyroscopes à toupie car ils comportent moins de pièces mobiles, cependant ils sont aussi moins précis.

L'unité de mesure de rotation SKIRU IV de Kearfott [7] est composée de trois gyromètres à toupie Gyroflex. L'unité de mesure a une masse totale de 4kg, une stabilité de biais de 0,009°/h et une marche aléatoire de 10^{-4} °/√h.

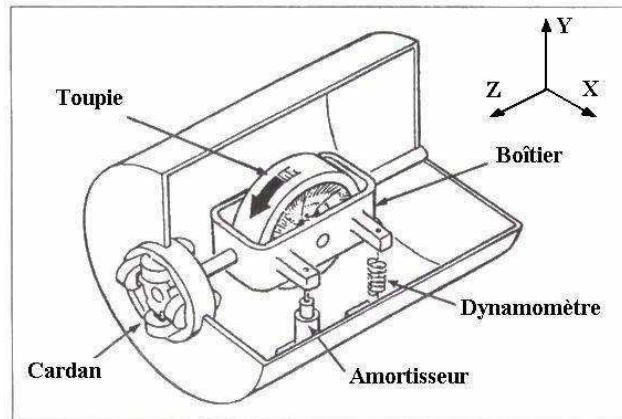


Figure 4 : Structure d'un gyromètre à toupie

1.1.2 Gyromètres optiques : effet Sagnac.

Les gyromètres à effet Sagnac exploitent l'anisotropie de la vitesse de la lumière dans les référentiels non galiléens. En effet, la vitesse de la lumière est isotrope dans les référentiels galiléens, mais quand elle est observée dans un référentiel en rotation, elle présente une anisotropie dont la mesure peut être utilisée pour déterminer la vitesse de rotation.

Le gyromètre à effet Sagnac est constitué d'une source lumineuse dont le faisceau est séparé en deux, les deux moitiés parcourent en sens inverse une même trajectoire fermée puis elles sont recombinaées pour provoquer une interférence. Le schéma de principe de ce gyromètre est présenté sur la figure 5. Si le gyromètre est en rotation, dans son référentiel, la vitesse du faisceau qui se propage dans le sens de la rotation est supérieure à celle du faisceau qui va à contresens. Cette différence de vitesse se traduit par une différence de phase entre les signaux qui peut être mesurée par interférence. La vitesse de rotation du gyromètre peut donc être déterminée en mesurant la différence de phase entre les deux signaux.

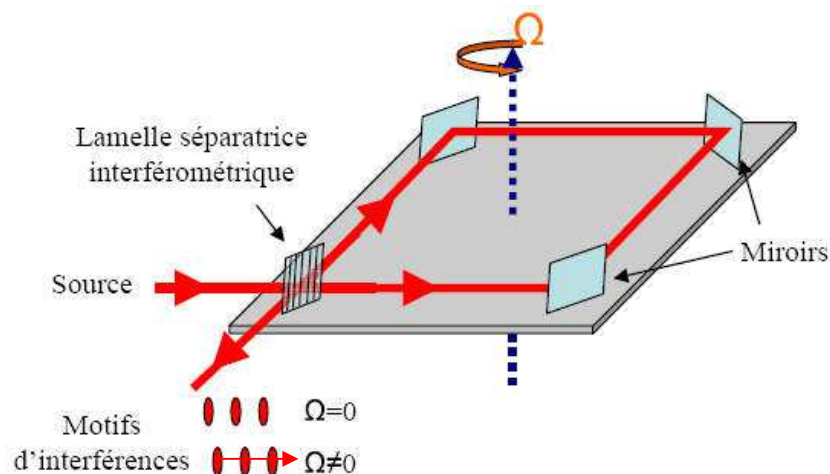


Figure 5 : Schéma de principe du gyromètre à effet Sagnac

La différence de phase $\Delta\phi$ entre les deux faisceaux est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω [8] :

$$\Delta\phi = \frac{8\pi S\Omega}{c\lambda} \quad (6)$$

avec S la surface délimitée par le chemin optique, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde.

Le gyromètre optique conçu par G. Sagnac en 1913 [8] avait une surface de 860cm^2 qui lui conférait un facteur d'échelle de $0,016 \text{ rad}/(\text{rad/s})$ dans l'indigo (450nm). Equipé d'un interféromètre actuel permettant de distinguer un déphasage de $0,3 \mu\text{rad}$, le gyromètre optique de G. Sagnac aurait une stabilité de biais de $4^\circ/\text{h}$.

Cependant, deux bonds technologiques ont permis d'augmenter énormément les performances des gyromètres optiques : l'invention du laser dans les années 60 et l'invention de la fibre optique dans les années 70.

1.1.2.1 Gyromètre laser.

Le gyromètre laser a été inventé par W. Macek en 1963 [9]. Dans ce gyromètre, le chemin optique est fermé pour former une cavité laser dans laquelle les ondes lumineuses font des allers-retours. Les longueurs d'onde λ sélectionnées par la cavité correspondent à des sous-multiples de sa longueur :

$$\lambda = l/n \quad (7)$$

avec l la longueur de la cavité et n entier.

Le laser émet alors une onde de fréquence :

$$f = \frac{nc}{l} \quad (8)$$

avec c la vitesse de la lumière.

Quand le référentiel du gyromètre est en rotation, la lumière observée dans ce référentiel se propage plus rapidement dans un sens que dans l'autre. Par conséquent, le temps de parcours de la cavité laser est donc plus long dans un sens que dans l'autre. Ainsi, deux fréquences lumineuses sont amplifiées simultanément. Par conséquent le faisceau laser émis est composé de deux fréquences. La mesure de l'écart entre ces deux fréquences permet de déterminer la vitesse de rotation du gyromètre :

$$\Delta f = \frac{8\pi S\Omega}{l\lambda} , \quad (9)$$

avec l la longueur du chemin optique, S la surface qu'il délimite et Ω la vitesse de rotation.

Une unité de mesure de rotation composée de trois gyromètres lasers est présentée sur la figure 6 : il s'agit du T24 de Kearfott Corporation [10]. Elle pèse 2,2 kg et permet de mesurer les vitesses de rotation dans les trois directions de l'espace. Le chemin optique de chaque gyromètre a une longueur de 24 cm et délimite une surface de 55 cm². Son facteur d'échelle est de 1,3 MHz/(rad/s) soit 6 Hz/(°/h), sa stabilité de biais est de 0,003°/h et sa marche aléatoire est de 0,003°/√h. De manière générale, les gyromètres laser présentent de bonnes stabilités de biais mais de mauvaises marches aléatoires.



Figure 6 : Unité de mesure de rotation formée de trois gyromètres laser : le T24 de Kearfott

1.1.2.2 Gyromètre à fibre optique.

Dans ce gyromètre à effet Sagnac, les faisceaux lumineux sont guidés par une fibre optique. Un chemin optique de très grande longueur est obtenu par bobinage de la fibre optique. De ce fait, la surface totale effectivement délimitée par le chemin optique est très importante (surface délimitée par une spire × nombre de spires). Comme la différence de phase mesurée est proportionnelle à la surface du chemin optique, les gyromètres à fibre optique permettent d'obtenir un grand facteur d'échelle.

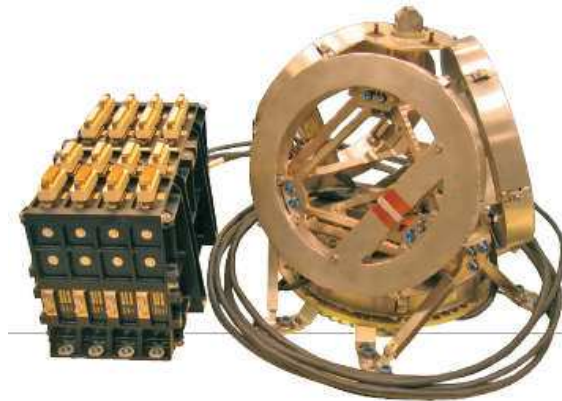
Dans un gyromètre à fibre optique, la différence de phase $\Delta\phi$ est égale à :

$$\Delta\phi = n \frac{8\pi S\Omega}{c\lambda} \quad (10)$$

avec n le nombre de spires du chemin optique, S la surface d'une spire, Ω la vitesse de rotation, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde.

L'Astrix 200 de IXSEA [11], présenté sur la figure 7, pèse 4,7 kg (plus 4 kg pour son électronique) et est constitué de trois gyromètres qui permettent de mesurer les vitesses de rotation dans les trois directions de l'espace. Chaque bobine comporte 8000 spires de 20 cm de diamètre ; ainsi la longueur du chemin optique est de 5 km et sa surface totale est de 250 m². Son facteur d'échelle est de 50 rad/(rad/s) ce qui permet grâce à un interféromètre de

résolution $0,3 \mu\text{rad}$ d'obtenir une stabilité de biais de $0,0012^\circ/\text{h}$. Sa marche aléatoire est de $2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{h}}$.



**Figure 7 : Unité de mesure de rotation formée de trois gyromètres à fibre optique :
le Astrix 200 de IXSEA**

1.1.3 Gyromètres vibrants à effet Coriolis.

Les CVG (Coriolis Vibrating Gyro) exploitent la force de Coriolis pour déterminer la vitesse de rotation d'un mobile. Il s'agit du principe gyrométrique qui a été exploité dans le cadre de cette thèse. Cette partie débute par une présentation de la force de Coriolis puis aborde le principe de fonctionnement et les caractéristiques des CVG.

1.1.3.1 La force de Coriolis.

La force de Coriolis, mise en évidence par Gustave Coriolis en 1835 [12], s'applique aux objets en mouvement dans un référentiel en rotation par rapport à un référentiel galiléen (voir figure 8).

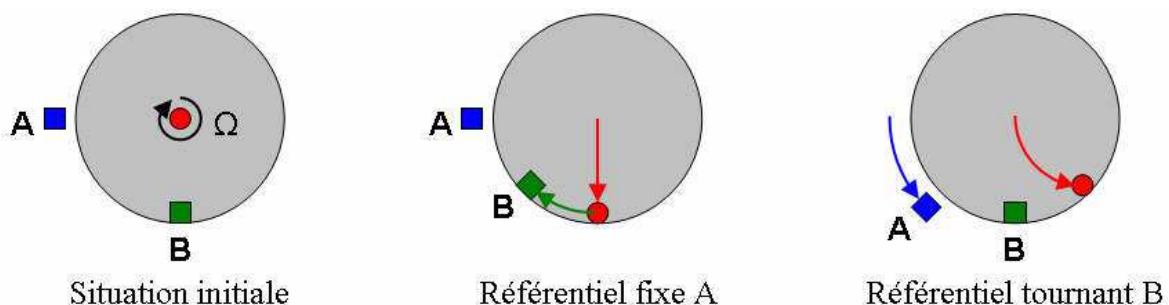


Figure 8 : un projectile est envoyé depuis le centre vers le point B situé dans un référentiel tournant. Observé dans le référentiel fixe A, le projectile a un mouvement rectiligne. Mais observé dans le référentiel en rotation B, le projectile semble soumis à une force perpendiculaire à sa vitesse relative et à l'axe de rotation.

L'expression de la force de Coriolis est démontrée en utilisant la loi de composition qui lie les mouvements observés dans un référentiel R non-galiléen à ceux observés dans un référentiel R_0 galiléen (voir figure 9). Soit $\vec{e}$ le vecteur partant de l'origine de R_0 vers l'origine de R. Le point P est caractérisé par le vecteur position absolue $\vec{r}_0$ dans le référentiel R_0 et par le vecteur position $\vec{r}$ dans le référentiel R.

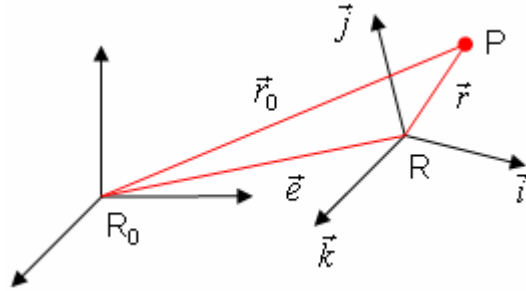


Figure 9 : Position du point P dans le référentiel galiléen R_0 et dans le référentiel en mouvement R

La position absolue est égale à :

$$\vec{r}_0 = \vec{e} + \vec{r} \quad (11)$$

La dérivation de $\vec{r}_0$ permet d'obtenir l'expression de la vitesse absolue $\vec{v}_0$, c'est-à-dire la vitesse de P dans le référentiel R_0 :

$$\vec{v}_0 = \frac{d\vec{e}}{dt} + \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (12)$$

L'expression de $\vec{r}$ est :

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \quad (13)$$

avec $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ les vecteurs directeurs de R et x , y et z les coordonnées de P dans R.

Donc :

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k} \right) + \left(x\frac{d\vec{i}}{dt} + y\frac{d\vec{j}}{dt} + z\frac{d\vec{k}}{dt} \right) \quad (14)$$

Les dérivées temporelles de $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ dépendent du vecteur rotation $\vec{\Omega}$ du référentiel R dans le référentiel R_0 . Les trois composantes du vecteur rotation $\vec{\Omega}$ correspondent à la vitesse de rotation de R autour de ses axes $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$.

$$\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_x\vec{i} + \vec{\Omega}_y\vec{j} + \vec{\Omega}_z\vec{k} \quad (15)$$

Par propriété du vecteur rotation :

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{i} \quad \frac{d\vec{j}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{j} \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{k} \quad (16)$$

Donc :

$$x\frac{d\vec{i}}{dt} + y\frac{d\vec{j}}{dt} + z\frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{r} \quad (17)$$

Donc :

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \left(\frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j} + \frac{dz}{dt} \vec{k} \right) + \vec{\Omega} \wedge \vec{r} \quad (18)$$

Soit :

- la vitesse d'entraînement $\vec{v}_e = \frac{d\vec{e}}{dt}$: la vitesse de l'origine de R dans R_0
- la vitesse relative $\vec{v}_r = \frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j} + \frac{dz}{dt} \vec{k}$: la vitesse de P dans le référentiel R
- la vitesse tangentielle $\vec{v}_t = \vec{\Omega} \wedge \vec{r}$: la vitesse due à la rotation de R dans R_0 .

Alors :

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}_r + \vec{v}_t \quad (19)$$

Et la vitesse absolue du point P est égale à :

$$\vec{v}_0 = \vec{v}_e + \vec{v}_r + \vec{v}_t \quad (20)$$

La dérivation de la vitesse absolue du point P permet d'obtenir l'expression de son accélération absolue $\vec{a}_0$, c'est-à-dire son accélération dans le référentiel R_0 :

$$\vec{a}_0 = \frac{d\vec{v}_e}{dt} + \frac{d\vec{v}_r}{dt} + \frac{d\vec{v}_t}{dt} \quad (21)$$

$$\vec{a}_0 = \frac{d^2\vec{e}}{dt^2} + \left(\left(\frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \vec{k} \right) + \left(\frac{dx}{dt} \frac{d\vec{i}}{dt} + \frac{dy}{dt} \frac{d\vec{j}}{dt} + \frac{dz}{dt} \frac{d\vec{k}}{dt} \right) + \left(\frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{r}}{dt} \right) \right) \quad (22)$$

D'après les équations 17 et 19 :

$$\vec{a}_0 = \frac{d^2\vec{e}}{dt^2} + \left(\left(\frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \vec{k} \right) + \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_r + \left(\frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{v}_r + \vec{v}_t) \right) \right) \quad (23)$$

$$\vec{a}_0 = \frac{d^2\vec{e}}{dt^2} + \left(\left(\frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \vec{k} \right) + 2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_r + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_t \right) \quad (24)$$

$$\vec{a}_0 = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_c + \vec{a}_t + \vec{a}_{ce} \quad (25)$$

L'accélération absolue dans R_0 est la somme de :

- l'accélération d'entraînement $\vec{a}_e = \frac{d^2\vec{e}}{dt^2}$: l'accélération de l'origine de R dans R_0
- l'accélération relative $\vec{a}_r = \frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \vec{k}$: l'accélération de P dans R
- l'accélération tangentielle $\vec{a}_t = \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r}$: l'accélération due à l'accélération de la rotation de R dans R_0 .
- l'accélération centrifuge $\vec{a}_{ce} = \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_t$
- l'accélération de Coriolis $\vec{a}_c = 2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_r$

En appliquant le principe fondamental de la dynamique dans le référentiel R_0 qui est galiléen, on a :

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a}_0 = m\vec{a}_e + m\vec{a}_r + m\vec{a}_c + m\vec{a}_t + m\vec{a}_{ce} \quad (26)$$

avec $\Sigma \vec{F}$ la somme des forces appliquées au point matériel P.

Par conséquent, pour un observateur situé dans le référentiel mobile R, le point P est soumis à quatre forces apparentes, en plus de la somme des forces externes :

$$\Sigma \vec{F} + \vec{f}_e + \vec{f}_c + \vec{f}_t + \vec{f}_{ce} = m\vec{a}_r \quad (27)$$

Ces forces apparentes sont :

- la force d'entraînement $\vec{f}_e = -m \frac{d^2 \vec{e}}{dt^2}$ (28)

- la force tangentielle $\vec{f}_t = -m \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r}$ (29)

- la force centrifuge $\vec{f}_{ce} = -m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_t$ (30)

- **la force de Coriolis** $\vec{f}_c = -2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_r$ (31)

La force de Coriolis est orientée perpendiculairement à la vitesse relative du point P et à l'axe de rotation et elle est proportionnelle à la vitesse relative et à la vitesse de rotation. La force de Coriolis peut donc être utilisée pour mesurer la vitesse de rotation quand elle est dominante devant les autres forces apparentes, ce qui est généralement le cas dans bon nombre d'applications.

1.1.3.2 Principe des gyromètres vibrants à effet Coriolis (CVG).

On vient de voir que la vitesse de rotation peut être déterminée en mesurant les effets de la force de Coriolis. Or la force de Coriolis nécessite une vitesse relative. Un objet à vitesse constante ne pouvant évidemment pas être embarqué, on exploite la vitesse alternative de vibration d'un résonateur : d'où la dénomination de gyromètre vibrant à effet Coriolis.

Les CVG possèdent deux modes de vibrations de fréquences proches que l'on appelle "mode pilote" et "mode détection", comme le présente la figure 10. Le mode pilote est excité à sa résonance pour générer une vitesse $\vec{v}$. Ainsi, le CVG subit une force de Coriolis $\vec{f}_c$ proportionnelle à la vitesse de rotation $\vec{\Omega}$. Le mode détection est choisi de manière à être sensible à la force de Coriolis. Ainsi, l'amplitude du mode détection est proportionnelle à la vitesse de rotation. Celle-ci peut donc être déterminée grâce à un système mesurant l'amplitude du mode détection.

On notera que cette amplitude bénéficie d'une amplification importante lorsque les fréquences de résonance des deux modes sont proches l'une de l'autre. Ainsi, même si tous les phénomènes s'effectuent à la fréquence de résonance du mode pilote, la valeur de la fréquence de résonance du mode détecteur intervient dans la sensibilité du gyromètre.

Les CVG mesurent uniquement la projection du vecteur rotation sur leur axe sensible. L'axe sensible est à la fois perpendiculaire au mouvement pilote et au mouvement détection. De plus, leur bon fonctionnement nécessite que le mode pilote et le mode détection soient efficacement couplés par la force de Coriolis. Cette efficacité est appelée coefficient de couplage Coriolis et est étudiée en détail dans la partie 1.1. Il est en outre nécessaire que les vibrations des deux modes présentent des facteurs de qualité élevés : les sources de dissipation doivent donc être limitées, en particulier la dissipation d'énergie dans le support.

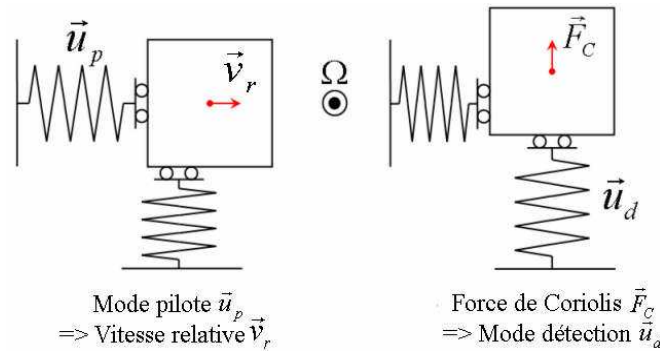


Figure 10 : schéma des deux modes d'un CVG

1.1.3.3 CVG macroscopiques.

En 1890, Lord Bryan a étudié l'effet de la force de Coriolis sur la vibration d'un verre à pied en cristal en rotation autour de son axe, il s'agissait du premier CVG [13]. Il est intéressant de noter que les CVG qui produisent actuellement les meilleures performances ont aussi une géométrie proche de celle d'un verre à pied. Le milli-HRG (millimetric Hemispheric Resonant Gyro) [14] de Northrop Grumman est présenté sur la figure 11. Il est formé d'un hémisphère de silice de 3,5 cm de diamètre dont le mode pilote et le mode détection sont les deux déformations elliptiques montrées sur la figure 11. L'unité de mesure de rotation fabriquée par Northrop Grumman est constituée de trois milli-HRG qui mesurent la rotation selon les trois axes de l'espace. Elle pèse 752 g, sa stabilité de biais est de $3,5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{h}$ et sa marche aléatoire est de $3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{h}}$.

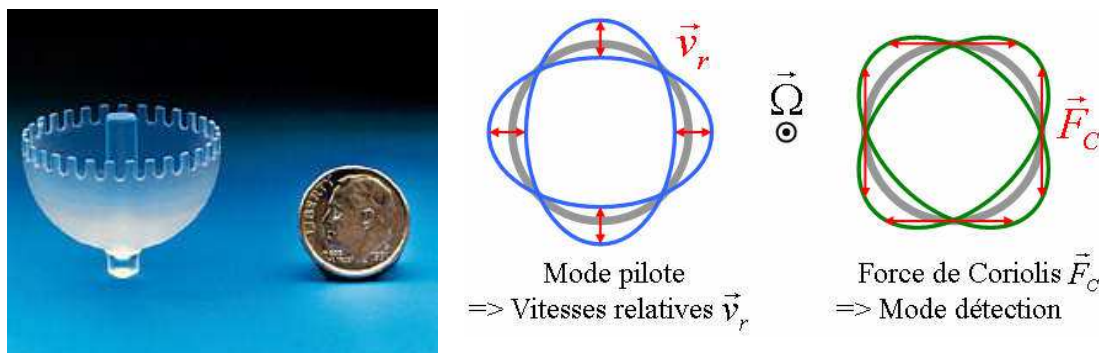


Figure 11 : Gyromètre milli-HRG de Northrop Grumman

1.1.3.4 Les CVG MEMS.

Le principe de fonctionnement des CVG se prête bien à des réalisations sous forme de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). En effet, la structure d'un CVG peut être monolithique et planaire, ce qui permet de la réaliser par micro usinage d'une plaque de cristal (wafer). Le micro usinage des wafers est une technologie très mature qui a donné lieu à de nombreux développements pour les besoins de la microélectronique et des systèmes intégrés. La réalisation de structures mécaniques grâce à des technologies issues de la microélectronique a donné naissance à la fin des années 70 à l'industrie des MEMS. La filière MEMS permet de réaliser des structures extrêmement miniaturisées. De plus, les MEMS peuvent être réalisés par usinage collectif d'un wafer. Ainsi chaque opération de fabrication s'applique simultanément à tous les MEMS d'un même wafer, ce qui est avantageux en terme de coût de production. La figure 12 montre neuf CVG MEMS réalisés par usinage collectif. Différents modèles de CVG MEMS seront présentés dans la partie 1.2. Les performances des CVG MEMS sont inférieures à celles des macro CVG car la miniaturisation a un impact sur les performances (voir annexe 6.1). Les CVG MEMS ont des stabilités de biais comprises entre $1^\circ/\text{h}$ et $3600^\circ/\text{h}$ et des marches aléatoires comprises entre $0,002^\circ/\sqrt{\text{h}}$ et $60^\circ/\sqrt{\text{h}}$: ils font donc partie des gammes basses et moyennes performances. Leur petite taille, leur faible coût et leur faible consommation électrique les destinent à de nombreuses applications : le contrôle dynamique de trajectoire d'automobile, le contrôle d'attitude d'aéronef, la stabilisation d'appareil photo, l'interface homme / machine dans le domaine des manettes de jeux vidéo ou des smart phones. Un état de l'art détaillé des CVG MEMS sera présenté dans la partie 1.2.

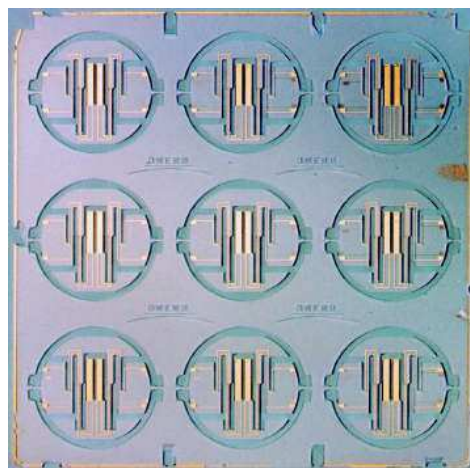
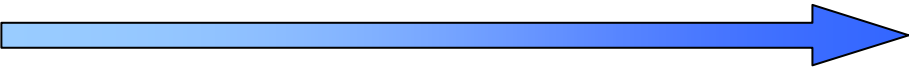


Figure 12 : usinage collectif de neuf VIG (Vibrating Integrated Gyro) dans un wafer de quartz de dimensions : $38 \times 38 \times 0.5 \text{ mm}^3$ (Onera)

1.1.4 Conclusion.

Les six catégories de capteurs de rotation qui ont été présentées dans cette partie sont regroupées dans le tableau 1. Pour chaque catégorie, quelques valeurs typiques sont proposées : la stabilité de biais, la masse, le nombre de pièce [15] et la date de commercialisation. Il faut toutefois noter que ces valeurs sont indicatives et qu'il est souvent possible d'augmenter les performances des capteurs en augmentant leur masse et réciproquement. On remarque que la tendance est à la diminution du nombre de pièces nécessaires à la réalisation. Ceci permet une réduction du coût et facilite l'optimisation globale des performances. Les gyroscopes à toupie sont chronologiquement les premiers, ils bénéficient d'une grande maturité qui a permis d'atteindre des performances très élevées mais leur coût n'est plus compétitif. Ils ont progressivement été remplacés par les gyromètres à toupie puis par les gyromètres laser dont les performances sont suffisantes pour la navigation et dont le prix est inférieur. Les gyromètres laser sont à leur tour en train d'être remplacés par les gyromètres à fibre optique qui comportent moins de pièces et qui permettent d'atteindre des performances plus élevées. Les CVG macroscopiques HRG (Hemispheric Resonator Gyro) présentent des performances très élevées pour un poids très réduit : ils remplaceront probablement les gyromètres à fibre optique dans un futur proche. Enfin les CVG MEMS qui sont monolithiques présentent un fort potentiel de développement, leur poids et leur coût réduits ont permis de répondre à nombreuses applications nouvelles dans la gamme basse performance. De plus, les CVG MEMS sont maintenant entrés dans la gamme moyenne performance et pourraient à terme être utilisés pour faire de la navigation.

Tableau 1 : Evolution des capteurs de rotation

Type de capteur	Gyroscope à toupie	Gyromètre à toupie (strapdown)	Gyromètre laser	Gyromètre à fibre optique	HRG	CVG MEMS
Stabilité de biais (°/h)	$\approx 10^{-4}$	10^{-2}	3×10^{-3}	10^{-3}	3×10^{-4}	1
Marche aléatoire (°/√h)	$\approx 10^{-5}$	10^{-4}	3×10^{-3}	2×10^{-4}	3×10^{-4}	10^{-2}
Masse (kg)	40	4	2	5	1	0,01
Nombre de pièces [15]	125	70	44	30	5	1
Date de commercialisation	1950	1960	1970	1980	1985	1995
Evolution du marché						

1.2 Etat de l'art des CVG MEMS.

Un panorama des différents types de capteur de rotation ayant été présenté, cette partie porte plus précisément sur le type de gyromètre qui a été étudié durant cette thèse : les CVG MEMS. L'objectif est de faire un tour d'horizon des CVG MEMS et de comparer leurs géométries et leurs caractéristiques afin de déterminer le parti à prendre pour concevoir un CVG triaxial. Dans cet état de l'art les CVG MEMS sont classés en fonction de leur nombre d'axes sensibles (monoaxiaux, biaxiaux ou triaxiaux), puis en fonction de leur géométrie.

Différentes caractéristiques des CVG seront étudiées :

- le coefficient de couplage Coriolis : il traduit l'efficacité avec lequel le mode pilote excite le mode détection par effet Coriolis et a en conséquence un impact important sur la sensibilité (voir partie 2.2).
- la dissipation d'énergie dans le support : c'est une des sources de limitation du facteur de qualité (voir annexe 6.2).
- le couplage en quadrature : il s'agit d'un couplage mécanique indésirable produisant une excitation du mode détection sans l'intervention de l'effet Coriolis.
- le couplage en phase : il s'agit d'un couplage indésirable dû à une influence des électrodes pilotes sur les électrodes de détection par effet électrostatique.
- le couplage d'axes : il s'agit d'un couplage indésirable nuisant à la sélectivité des CVG multiaxes. Le couplage d'axes est le rapport entre le signal provenant d'un mode détection répondant à une rotation et le signal provenant d'un autre mode détection que cette rotation ne devrait pas affecter.

Pour chaque géométrie, nous présenterons des exemples de réalisation en précisant les dimensions, le matériau, les moyens d'excitation/détection et la marche aléatoire angulaire.

1.2.1 CVG MEMS monoaxiaux.

Les CVG MEMS monoaxiaux sont les plus simples et les plus courants. Ils permettent de mesurer une des trois composantes de la vitesse de rotation en exploitant deux modes de vibration : un mode pilote et un mode détection.

Les standards IEEE [16] recensent cinq géométries de CVG MEMS planaires présentées sur la figure 13 : les poutres, les diapasons, les doubles diapasons, les plateaux et les anneaux. Nous nous baserons sur cette classification pour présenter l'état de l'art des CVG MEMS monoaxiaux.

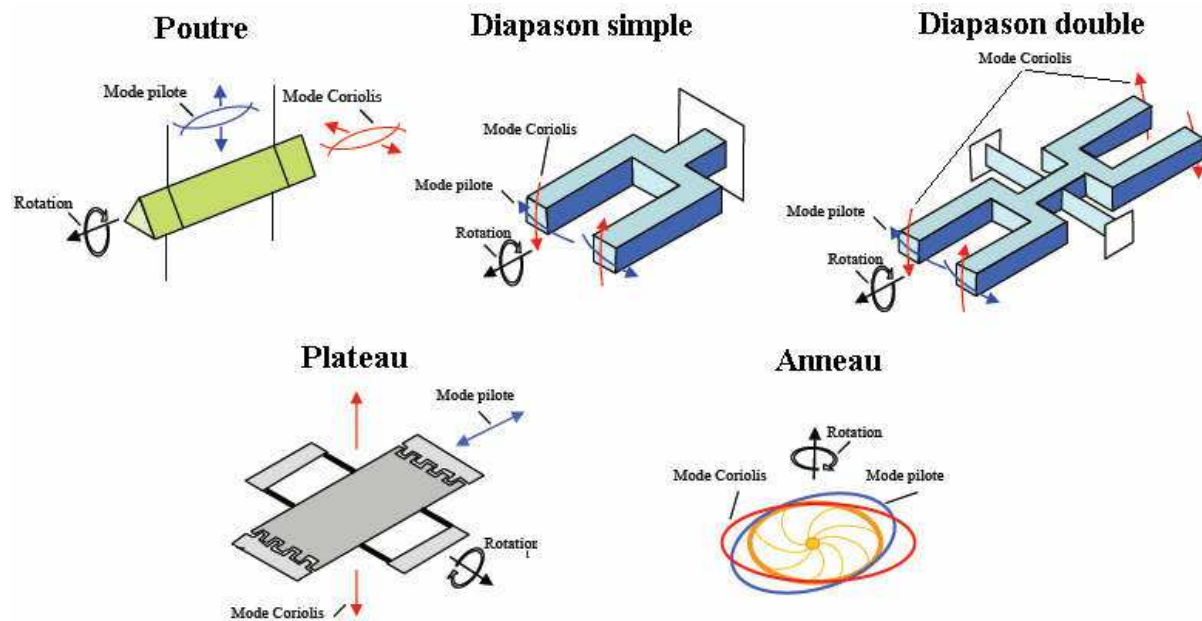


Figure 13 : Géométries de CVG MEMS planaires recensés par les standard IEEE

1.2.1.1 CVG à poutre simple.

Le CVG à poutre simple exploite les deux modes de flexion d'une poutre encastree-libre ou libre-libre. Le mode détection est alors l'image du mode pilote par une rotation de 90° autour de l'axe longitudinal de la poutre. Il s'agit d'un cas idéal pour le coefficient de couplage Coriolis (voir partie 1.1) : il est proche de 100%. L'axe sensible du CVG est orienté suivant l'axe longitudinal de la poutre.

Les CVG à poutre simple sont principalement limités par le fait qu'ils ne comportent pas de nœud de vibration pour lesquels il n'y a ni déplacement ni rotation. En conséquence, leur tenue par des fixations entraîne une dissipation d'énergie dans le support qui limite le facteur de qualité. Pour limiter la dissipation, certains CVG à poutre simple sont tenus par des fils métalliques semi-rigide [17].

Exemples de CVG à poutre simple [17-20] :

Le Gyrostar de Murata [17-18] a été réalisé en 1991 : sa structure est un prisme triangulaire équilatéral en élinvar (alliage métallique) sur lequel sont collées des plaques de PZT (céramique piézoélectrique) qui permettent son excitation/détection. La poutre du Gyrostar mesure 17 mm de long et 2 mm de large, sa résolution est de $360^\circ/\text{h}$ pour une bande passant de 7 Hz soit une marche aléatoire de $2,3^\circ/\sqrt{\text{h}}$.

Le Ceramic Gyro de Nec/Tokin [19-20] a été réalisé en 1992 : sa structure (présentée sur la figure 14) est un cylindre réalisé en céramique piézoélectrique pour permettre son excitation/détection. La poutre du Ceramic Gyro a une longueur de 9 mm, un diamètre de 0,8 mm et une résolution de $360^\circ/\text{h}$ pour une bande passante de 100 Hz soit une marche aléatoire de $0,6^\circ/\sqrt{\text{h}}$.

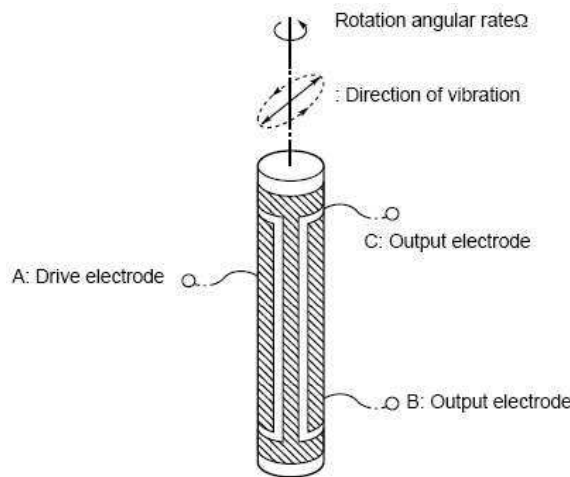


Figure 14 : Schéma du Ceramic Gyro de Nec/Tokin [19]

1.2.1.2 CVG en diapason.

Le CVG en diapason exploite les modes de flexion dans le plan et hors plan d'un diapason. De même que pour le CVG à poutre simple, le mode détection est l'image du mode pilote par une rotation de 90° autour de l'axe longitudinal de la poutre. Ainsi, le coefficient de couplage Coriolis est proche de 100% et l'axe sensible est orienté suivant l'axe longitudinal des poutres.

Le CVG en diapason présente un avantage par rapport au gyromètre à poutre simple : quand il vibre dans son plan, les mouvements de ses deux branches s'équilibrent dans son pied qui peut être vu comme un nœud de vibration. Le pied du diapason peut donc être fixé sans provoquer de dissipation d'énergie dans le support ce qui autorise un facteur de qualité élevé. Cependant, quand le diapason vibre hors plan, son pied n'est pas un nœud de vibration car il subit une rotation alternative. Dans le cas du VIG de l'Onera, un dispositif de découplage situé

entre le pied du diapason et la zone de fixation permet de préserver le facteur de qualité du mode hors plan.

Exemples de CVG en diapason [21-23] :

Le premier CVG MEMS en diapason est le TFG (Tuning Fork Gyro) réalisé au Draper Laboratory en 1993, il s'agit d'un gyromètre en silicium avec une excitation/détection électrostatique, sa surface est de $0,7 \times 0,7 \text{ mm}^2$ et sa marche aléatoire de $10^\circ/\sqrt{h}$ [21]. Dès 1998, le Draper Laboratory a développé des CVG en diapason avec des marches aléatoires de $0,25^\circ/\sqrt{h}$ [22].

Actuellement, le VIG de l'Onera est l'un des CVG en diapason qui présente les meilleures performances. Le VIG est réalisé en quartz avec une excitation/détection piézoélectrique. Sa structure est présentée sur la figure 15, elle comporte un dispositif de découplage breveté par l'Onera [23] qui lui confère des facteurs de qualité de 150 000 pour les deux modes. Avec ce dispositif intégré à la structure monolithique du capteur, le VIG a la forme d'une pastille circulaire de 9 mm diamètre et de 0,5 mm d'épaisseur. En 2010, sa marche aléatoire était de $0,2^\circ/\sqrt{h}$, son minimum de variance d'Allan de l'ordre de $1^\circ/h$ et sa stabilité de biais de $20^\circ/h$ [24]. Dans sa version 2012, une marche aléatoire de $0,04^\circ/\sqrt{h}$, un minimum de variance d'Allan de $0,1^\circ/h$ et une stabilité de biais de $1^\circ/h$ sont attendus, tirant partie principalement d'une amélioration de l'architecture électronique.

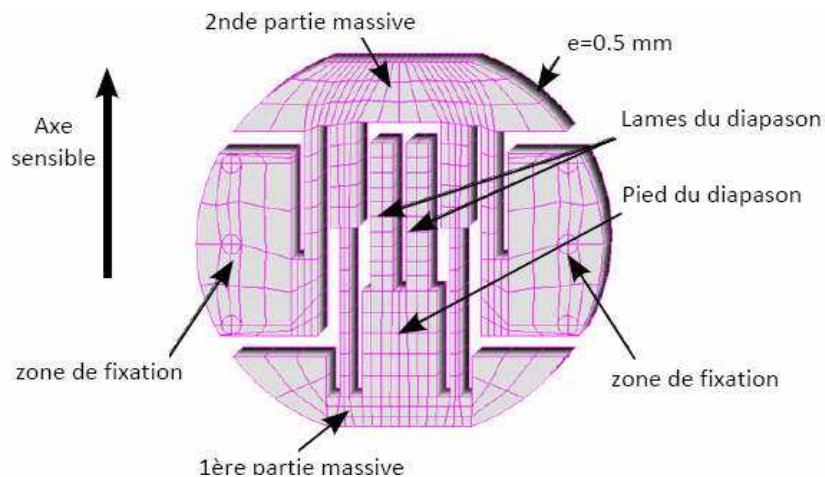


Figure 15 : Schéma du CVG diapason VIG de l'ONERA [23]

1.2.1.3 CVG en double diapason.

Le CVG en double diapason est constitué de deux diapasons opposés, sa géométrie est présentée sur la figure 16. Sa géométrie permet de préserver les facteurs de qualité de ses deux modes : le mode pilote qui est la vibration dans le plan d'un des diapasons et le mode détection qui est la vibration hors plan des deux diapasons. Lors de leur vibration hors plan, les deux diapasons vibrent de manière opposée, donc leurs mouvements se compensent et la partie centrale est un nœud de vibration. La détection est effectuée uniquement sur le diapason qui n'est pas excité par le mode pilote. Cette séparation de l'excitation et de la détection permet de réduire drastiquement les couplages en phase et en quadrature (couplages indésirables dus à une influence directe du mode pilote sur le mode détection sans l'intervention de la force de Coriolis).

Cet avantage entraîne un compromis sur le coefficient de couplage Coriolis qui est environ égal à $\sqrt{1/2} \approx 71\%$.

Exemple de CVG en double diapason [25-26] :

Le premier gyromètre en double diapason est le QRS de Systron Donner réalisé en 1992 [25]. Le QRS est réalisé en quartz avec un système d'excitation/détection piézoélectrique. La structure du QRS116 mesure 16 mm de long, sa marche aléatoire angulaire est de $0,12^\circ/\sqrt{h}$ et sa stabilité de biais de $14^\circ/h$ [26].

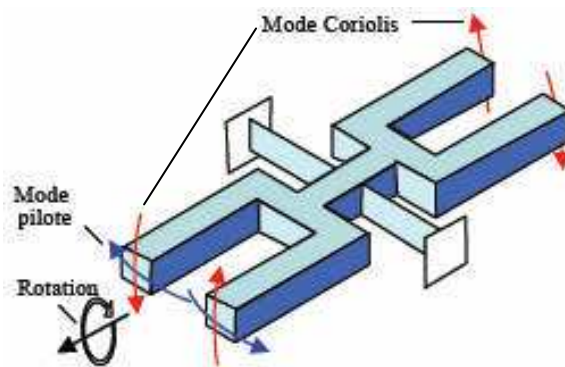


Figure 16 : Schéma du QRS de Systron Donner [26]

1.2.1.4 CVG en anneau.

La structure du CVG en anneau est un anneau déformable suspendu par des ressorts (figure 17).

L'axe sensible de ce CVG est situé hors plan. Ce CVG exploite les deux modes de déformation elliptique de sa structure en anneau. Son mode détection est l'image du mode pilote par une rotation de 45°. Ce CVG en anneau peut être vu comme une tranche du CVG en forme de verre à pied (voir partie 1.1.3.3). La formule de Lord Bryan peut être utilisée pour déterminer le coefficient de couplage Coriolis de ce gyromètre [13] [27] :

$$K = \frac{2n}{n^2 + 1}$$

avec n l'ordre des deux modes de déformation de l'anneau.

Pour une déformation elliptique, n vaut 2 donc le coefficient de couplage Coriolis est égal à 80%.

Le facteur de qualité des modes est préservé car le centre de l'anneau est un nœud de vibration qui peut être fixé sans dissipation d'énergie dans le support.

Exemples de CVG en anneau [28-30] :

Le premier gyromètre en anneau a été réalisé à l'université du Michigan en 1994, il a été réalisé en nickel micro-moulé avec une excitation/détection électrostatique [28]. Une version en silicium a été réalisée en 2002 dans la même université, sa marche aléatoire est de $0,17^\circ/\sqrt{h}$ et son minimum de variance d'Allan de $7,2^\circ/h$ [29]. En 2011, toujours à l'université du Michigan, une nouvelle version du CVG en anneau a été réalisée : sa marche aléatoire est de $0,06^\circ/\sqrt{h}$ pour un diamètre de 5 mm mais son minimum de variance d'Allan est moins bon que dans la version précédente [30].

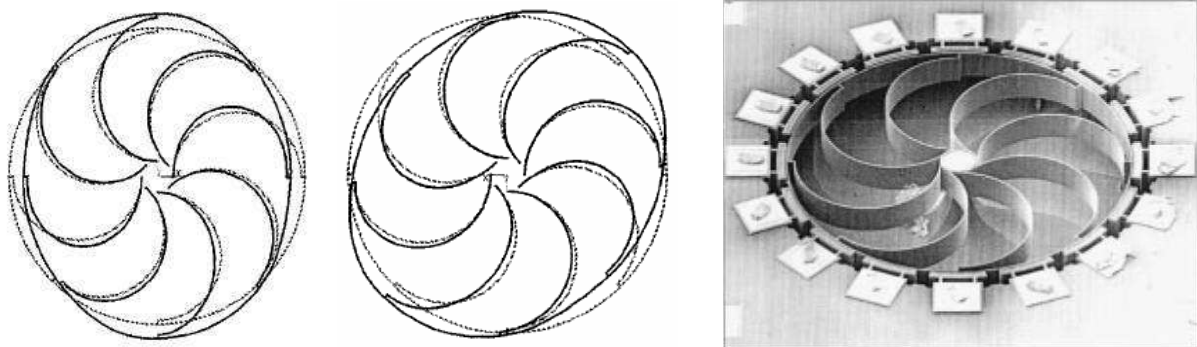


Figure 17 : Modes de vibration et image MEB du gyromètre en anneau de l'université du Michigan [29]

1.2.1.5 CVG à plateau.

Les CVG à plateau sont constitués d'un plateau suspendu par des ressorts. Ces CVG exploitent le couplage Coriolis entre deux modes de translation ou deux modes de rotation du plateau. Leurs facteurs de qualité sont préservés par la finesse des ressorts qui supportent le plateau.

Exemples de CVG à plateau [31-37] :

Le gyromètre à plateau réalisé au Draper Laboratory en 1991 est le premier CVG MEMS réalisé [31-32]. La structure de ce gyromètre est présentée sur la figure 18, elle est constituée d'un plateau maintenu par un double cardan. Ce CVG a été réalisé en silicium avec une excitation/détection électrostatique. Le mode pilote de ce CVG est la rotation alternative du plateau autour de l'axe X et son mode détection la rotation alternative autour de l'axe Y. Pour un plateau d'épaisseur négligeable, ces deux modes ne produisent que des déplacements selon Z qui ne sont pas couplés par effet Coriolis. Pour pallier ce problème, un dépôt métallique d'une épaisseur de 25 à 120 μm est réalisé sur le plateau. Ainsi, lors du mode pilote, le mouvement est de ce dépôt épais possède également une composante selon Y, et lors du mode détection il possède une composante selon X, ce qui permet d'obtenir un couplage Coriolis sensible selon l'axe Z. Cependant, pour chaque mode la quantité de mouvement couplable par effet Coriolis est faible devant la quantité de mouvement totale donc le coefficient de couplage Coriolis de ce CVG est faible. La stabilité de biais de ce CVG était de 14 000°/h.

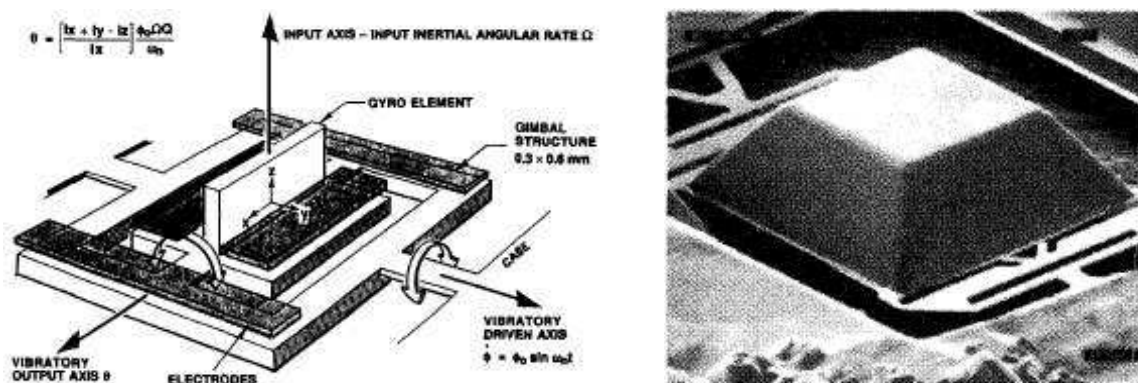


Figure 18 : Schéma et image MEB du premier CVG MEMS réalisé (Draper Laboratory) [31-32]

Le CVG à plateau réalisé par Murata en 1995 [33] est équipé d'électrodes inter-digitées [34] qui permettent l'excitation/détection de la translation dans le plan (figure 19). La translation dans le plan est couplée à la translation hors plan avec un couplage Coriolis proche de 100%. La stabilité de biais de ce CVG était de $25\,000\text{ }^\circ/\text{h}$.

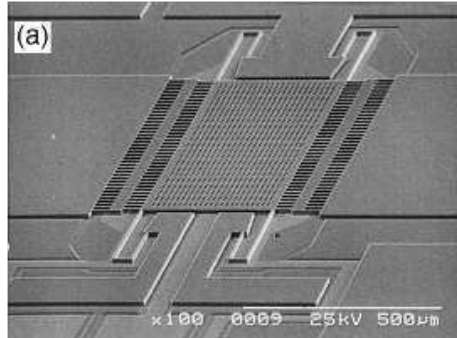


Figure 19 : Image MEB du CVG à plateau équipé d'électrodes inter-digitées de Murata [33]

Le CVG à plateau réalisé à l'université de Carnegie-Mellon en 1997 [35-36] est constitué d'un plateau intérieur imbriqué dans un plateau extérieur comme le montre la figure 20. Cette structure imbriquée permet de différencier les ressorts exploités par le mode pilote et ceux qui sont exploités par le mode détection. La différenciation des ressorts du pilote et de la détection permet de réduire fortement le couplage en quadrature. Son axe sensible est dans le plan et sa marche aléatoire est de $1,5\text{ }^\circ/\sqrt{\text{h}}$.

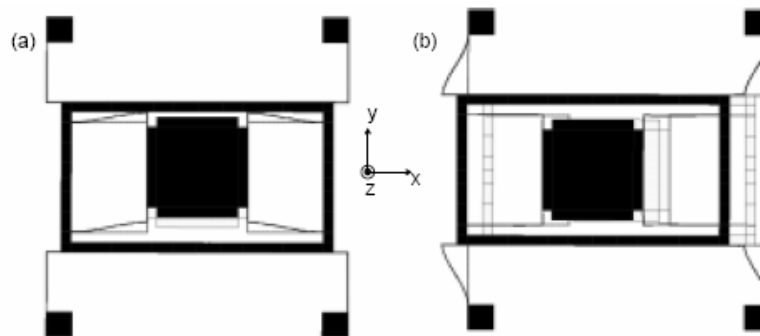


Figure 20 : Schéma du CVG à plateaux imbriqués de l'université de Carnegie-Mellon [35]

Le M^2 -TFG réalisé à l'université d'Atlanta en 2008 [37] est constitué de deux plateaux qui forment un diapason (car leurs mouvements se compensent) sensible hors-plan comme le montre la figure 21. Ce CVG présente les mêmes avantages qu'un CVG en diapason car les mouvements de ses deux plateaux se compensent ce qui permet d'atteindre un facteur de qualité élevé. L'axe sensible est situé hors plan et les modes des plateaux sont des translations dans le plan. L'excitation et la détection sont réalisées au moyen d'électrodes interdigitées qui permettent d'obtenir un facteur d'échelle très élevé. Cette géométrie a permis d'atteindre une marche aléatoire de $0,007^\circ/\sqrt{\text{h}}$ et un minimum de variance d'Allan de $0,15^\circ/\text{h}$.

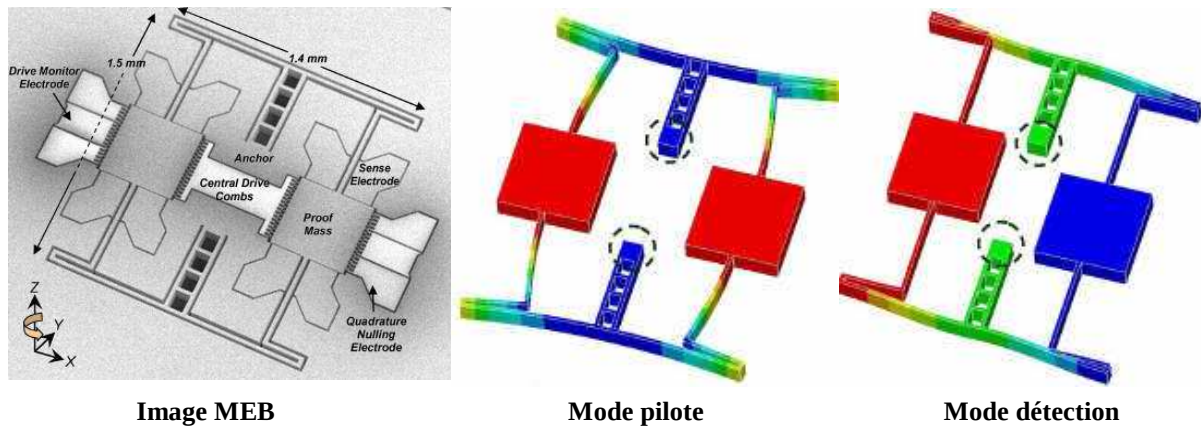


Figure 21 : Présentation du CVG à plateaux en diapason de l'université d'Atlanta [37]

Le CVG réalisé par Thalès en 2009 [38] est aussi un gyromètre à plateaux en diapason sensible hors-plan. Le CVG de Thalès est de plus équipé de plateaux imbriqués similaires à ceux qui ont été développés à l'université de Carnegie-Mellon. Sa marche aléatoire est de $0,01^\circ/\sqrt{h}$ et son minimum de variance d'Allan de $0,1^\circ/h$ en 2009.

L'OPG réalisé par Honeywell et le Draper Laboratory en 2010 [39] est aussi un gyromètre à plateaux en diapason sensible hors-plan. Grâce à des facteurs d'échelle très élevés, sa marche aléatoire est de $0,002^\circ/\sqrt{h}$ et son minimum de variance d'Allan de $0,03^\circ/h$, la surface de son packaging est d'environ 1cm^2 .

Le SAR500 réalisé par Sensoror en 2010 [40] est aussi constitué de deux plateaux dont les mouvements se compensent cependant ils ne vibrent pas en translation mais en rotation : il s'agit d'un ButterflyGyro (voir figure 22). L'axe sensible du ButterflyGyro est dans le plan et sa marche aléatoire est de $0,004^\circ/\sqrt{h}$ et son minimum de variance d'Allan de $0,04^\circ/h$.

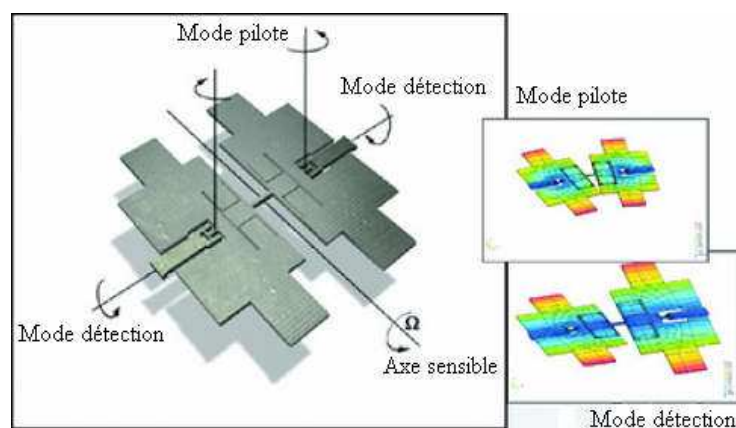


Figure 22 : ButterflyGyro de Sensoror [40]

1.2.1.6 Bilan sur les CVG MEMS monoaxiaux.

Le Tableau 2 résume les principales caractéristiques des CVG présentés précédemment.

Il y a d'une part les CVG à poutres simples, qui sont cantonnés aux faibles facteurs de qualité à cause de leur géométrie. Ils sont réalisés en métal ou en céramique, fabriqués à très bas coût et font partie de la gamme basse performances.

Et d'autre part les CVG dont la géométrie autorise des facteurs de qualité importants : les diapasons, les double diapasons, les anneaux et les plaques. Ces CVG sont réalisés en silicium ou en quartz. Ils font partie de la gamme moyenne performance et leurs performances connaissent une évolution rapide qui les a récemment menés à des stabilités de biais meilleures que 1°/h.

Tableau 2 : Résolutions et tailles des CVG actuels en fonction de leur géométrie et du matériau de réalisation.

Labo.	Géométrie	Matériau	Surface (mm ²)	Marche aléatoire (°/√h)	Minimum de la variance d'Allan (°/h)	Stabilité de biais (°/h)	Date des perfo. citées	Réf.	Gamme de perfo.
Murata	Poutre simple	Métal	17×2	2,3	-	360	2003	[18]	Basse
Nec/Tokin		Céramique	9×0,8	0,6	-	360	2004	[20]	
Univ. du Michigan	Anneau	Si	5×5	0,06	7,2	-	2011	[30]	Moyenne
Onera	VIG 2010	Quartz	9×9	0,2	1	20	2011	[23]	
Systron Donner	Double diapason	Quartz	16×8	0,12	-	14	2008	[26]	
Thalès	Double plateau	Si	10×10	0,01	0,1	10	2009	[38]	
Honeywell	Double plateau	Si	10×10	0,002	0,03	-	2010	[39]	
Onera	VIG 2012	Quartz	9×9	0,04	0,1	1	2012	...	

1.2.2 CVG MEMS biaxiaux et triaxiaux.

Les CVG biaxiaux permettent de mesurer deux des trois composantes de la vitesse de rotation et les CVG triaxiaux permettent de mesurer les trois.

Les CVG triaxiaux sont avantageux car ils constituent à eux seuls des unités de mesure de rotation monolithique et planaire qui sont plus légères, plus compactes et moins coûteuses que les unités de mesure de rotation composées de trois CVG monoaxiaux. De plus, comme l'unité de mesure de rotation est composée d'un seul capteur, elle est exempte d'erreurs d'alignement entre capteurs. Enfin, toutes les mesures de rotations provenant de la même source, leurs dérives relatives sont limitées.

La notion de CVG triaxial désigne parfois un groupe de trois CVG monoaxiaux adjacents réalisés sur un même wafer et dont les axes sensibles forment un trièdre [41]. Cependant, ce type de réalisation ne présente pas les mêmes avantages que les CVG triaxiaux composés d'une seule structure vibrante qui sont le sujet de cette thèse.

Un CVG triaxial peut théoriquement exploiter trois modes pilotes et trois modes détection différents [42], cependant le système d'excitation devient alors très complexe et les couplages dus à l'influence des trois modes pilotes sur les trois modes détections deviennent très difficiles à éliminer. Généralement les CVG biaxiaux et triaxiaux n'exploitent qu'un seul mode pilote. Ce cas est celui considéré dans cette thèse.

Pour mémoire, certains capteurs inertiels multiaxiaux sont dits 4-axes, 5-axes ou 6-axes. Il s'agit alors de MEMS ou d'ensemble de MEMS qui détectent à la fois la rotation et l'accélération.

Cette partie présente quatre catégories de CVG MEMS biaxiaux et triaxiaux : les CVG en étoile, les CVG à plateau, les CVG en anneau et les CVG en cadre.

1.2.2.1 GVG biaxial en étoile.

La structure de ce gyromètre est présentée sur la figure 23. Ce CVG est constitué d'un moyeu central duquel rayonnent six poutres divisant le plan en secteurs angulaires égaux.

Les deux axes de mesure sont contenus dans le plan de la structure. Ils proviennent des couplages Coriolis entre les deux modes de flexion de chacune des poutres. Le mode pilote est constitué de la flexion hors plan des six poutres (trois poutres vers le haut et trois vers le bas). Les modes détections sont des combinaisons linéaires des flexions dans le plan de chaque poutre (figure 23). Nous verrons plus loin que les coefficients de couplage Coriolis des deux axes sensibles sont alors égaux à $\sqrt{1/2} \approx 71\%$.

Les facteurs de qualité des trois modes de ce CVG sont préservés car le moyeu central est un nœud de vibration des trois modes.

Le CVG en étoile a été conçu par la Société de Fabrication d'Instrument de Mesure (SFIM) en 1996 [43]. Une version en quartz avec une excitation/détection piézoélectrique a été réalisée à l'Institut des Microtechnologies de Franche Comté IMFC en 2001 [44] et une version en silicium avec une excitation électrostatique et une détection optique a été réalisée par l'institut FEMTO-ST en 2009 [45]. Ces projets n'ont pas encore abouti à des caractérisations complètes.

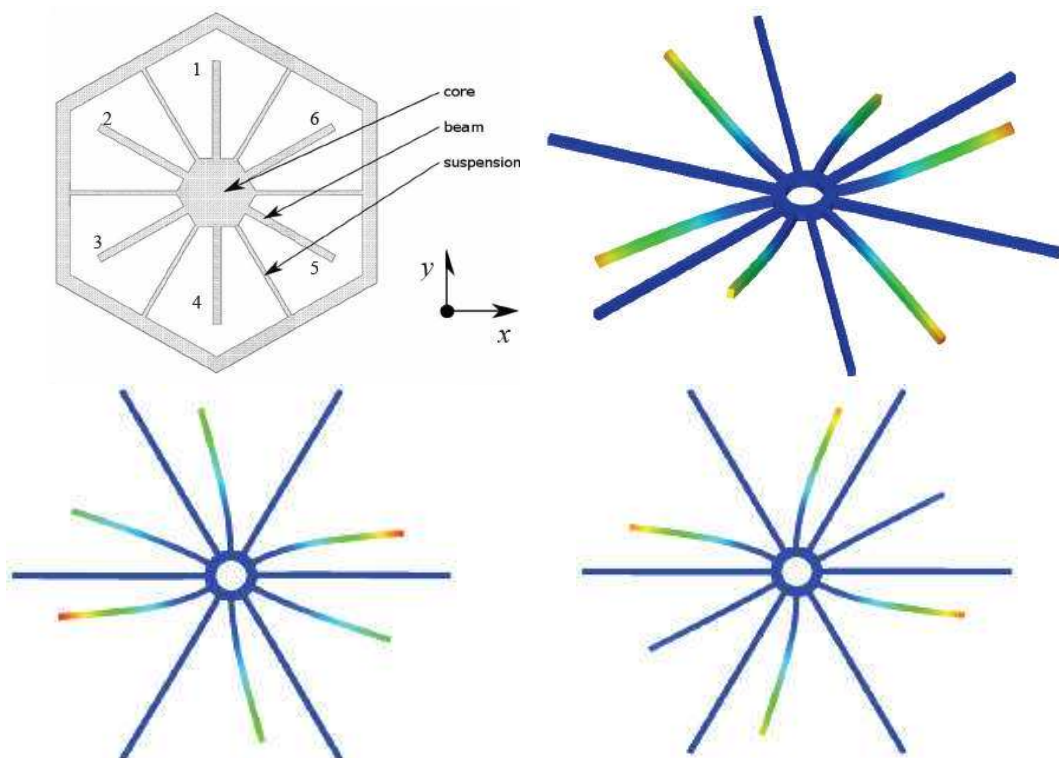


Figure 23 : Structure et modes de vibration du CVG en étoile de FEMTO-ST [45].

En haut : mode pilote, en bas : modes détection X et Y.

1.2.2.2 CVG biaxial et triaxial à plateau.

Le premier CVG biaxial à plateau a été réalisé à l'université de Berkeley en 1997 [46]. La structure de ce CVG est présentée sur la figure 24, elle est constituée d'un plateau circulaire suspendu par des ressorts. Le mode pilote de ce CVG est la rotation alternative du plateau autour l'axe Z, le mode détection X est la rotation alternative autour de l'axe Y et le mode détection Y la rotation alternative autour de l'axe X. La rotation alternative autour de l'axe Z produit des déplacements selon X qui sont exploités par la détection Y et des déplacements selon Y qui sont exploités par la détection selon X. Chacun des modes détection n'exploite donc que la moitié de la quantité de mouvement pilote, donc les coefficients de couplage Coriolis sont égaux à $\sqrt{1/2} \approx 71\%$. La structure de ce CVG a été réalisée en silicium et l'excitation/détection est électrostatique. Les marches aléatoires sont de $10^\circ/\sqrt{h}$ et les couplages d'axes (voir introduction de la partie 1.2) sont de 16%.

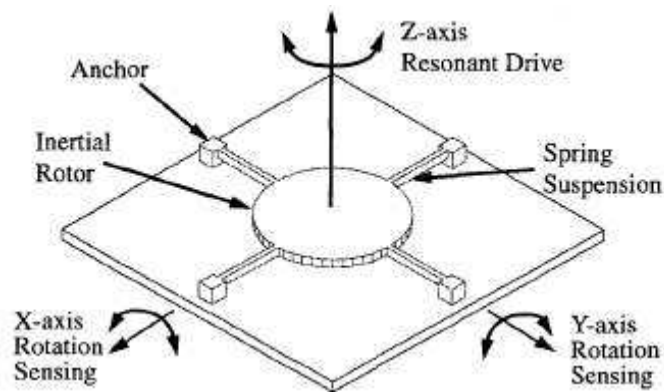


Figure 24 : CVG biaxial à plateau de l'université de Berkeley [46]

Un CVG biaxial à plateaux constitué de deux disques concentriques a été conçu à l'université de Tainan en 2006 [47]. La structure de ce CVG est réalisée en silicium et son excitation/détection est électrostatique.

Les modes de ce CVG sont présentés sur la figure 25. Le mouvement pilote est la rotation alternative de l'ensemble de la structure autour de l'axe Z, le mode détection X est la rotation alternative de l'anneau extérieur autour de l'axe Y et le mode détection Y la rotation alternative du disque intérieur autour de l'axe X.

Comme pour le CVG précédent, chaque mode détection n'exploite qu'une des deux composantes de déplacement du mode pilote. Mais en plus, pour ce CVG, chaque mode détection n'exploite qu'une partie de la masse activée par le pilote. Cette division de la masse active du pilote permet de réduire les couplages d'axes mais elle réduit aussi les coefficients de couplage Coriolis. Si on considère que chaque mode détection exploite une des deux composantes du mouvement pilote sur une zone qui ne contient que la moitié de la quantité de mouvement du pilote, alors les coefficients de couplage Coriolis sont égaux à $\sqrt{1/2} \times \sqrt{1/2} = 50\%$.

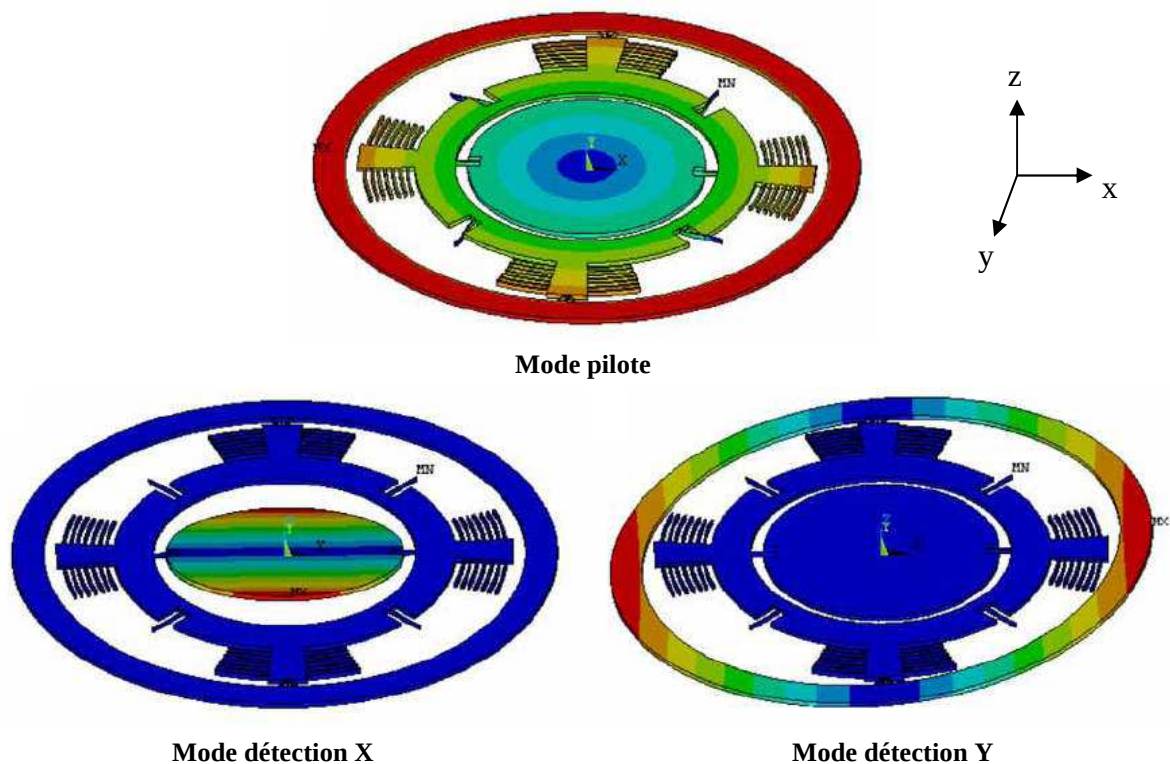


Figure 25 : Modes du CVG biaxial à plateaux de l'université de Tainan [47]

En 2010, le CVG à plateaux de l'université de Tainan a ensuite été transformé en un CVG triaxial [48]. La structure de ce CVG est réalisée en silicium et son excitation/détection est électrostatique. C'est un plateau circulaire découpé en trois zones concentriques : un disque situé au centre, un anneau en périphérie et quatre masses carrées situées dans la zone intermédiaire.

Les modes de ce CVG sont présentés sur la figure 26. Le mode pilote est la rotation autour de l'axe Z de l'ensemble du plateau. Le mode détection X est la rotation du disque central autour de l'axe X. Le mode détection Y est la rotation de l'anneau extérieur autour de l'axe Y. Le mode détection Z est la translation radiale des quatre masses carrées qui s'éloignent et se rapprochent simultanément du centre.

Le partage du plateau en trois zones réduit les couplages d'axes mais il réduit aussi les coefficients de couplage Coriolis. Si on considère que ce partage divise la quantité de mouvement pilote en trois tiers, les coefficients de couplage Coriolis des détections X et Y (qui n'exploitent chacun qu'une des deux composantes du pilote) sont égaux à $\sqrt{1/3} \times \sqrt{1/2} \approx 41\%$ et le coefficient de couplage Coriolis de la détection Z (qui exploite les deux composantes du pilote) est égal à $\sqrt{1/3} \approx 58\%$.

Les marches aléatoires selon X, Y et Z sont respectivement égales à $43^\circ/\sqrt{h}$, $9^\circ/\sqrt{h}$ et $25^\circ/\sqrt{h}$ et les couplages d'axes sont compris entre 2 et 22 %.

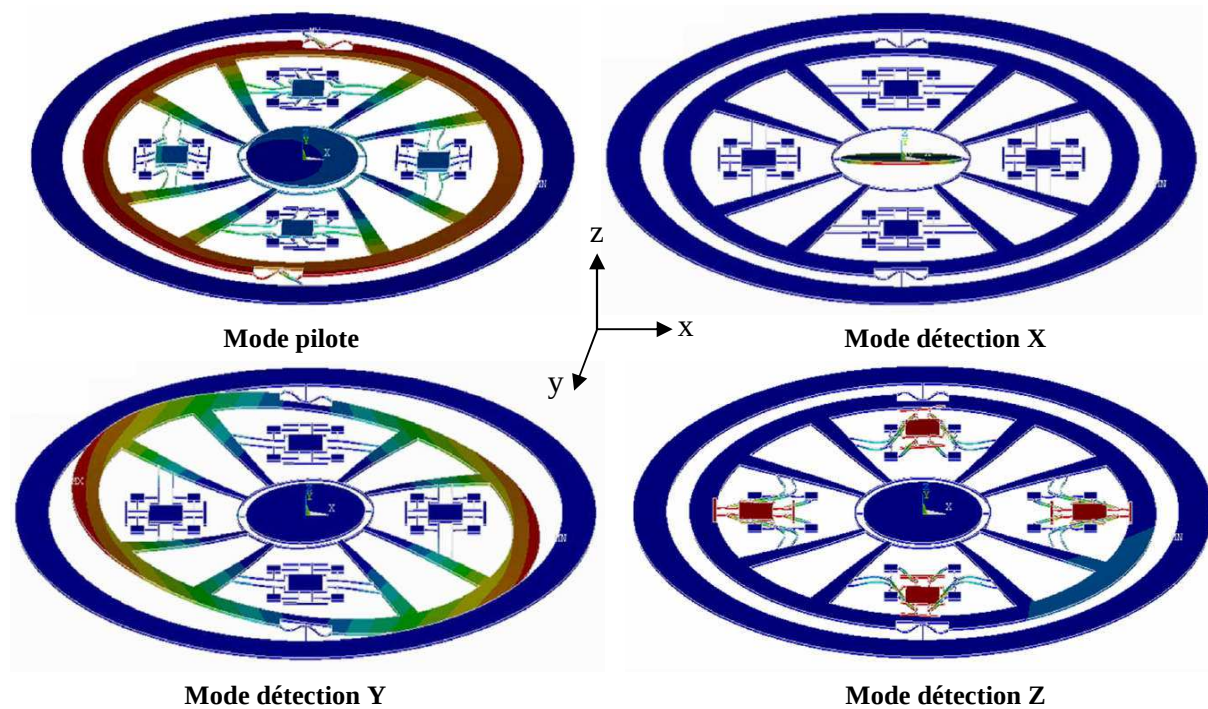


Figure 26 : Modes du CVG triaxial à plateaux de l'université de Tainan [48]

1.2.2.3 CVG biaxial et triaxial en anneau.

Un CVG biaxial en anneau a été réalisé à l'université d'Atlanta en 2011 [49]. La structure de ce CVG est en silicium et son excitation/détection est électrostatique. Les modes de l'anneau sont présentés sur la figure 27. Le mode pilote est une déformation elliptique planaire. Les modes détections X et Y sont des déformations hors plan comportant six ventres de vibrations, ils sont images l'un de l'autre par une rotation de 30° (modulo 60°).

La structure de ce CVG est très pure et son centre est un nœud de contraintes pour tous les modes, il peut donc théoriquement être fixée sans dissipation d'énergie dans le support.

Les coefficients de couplage Coriolis des détections X et Y sont égaux à 23% d'après nos simulations par éléments finis.

Les minima de variance d'Allan X et Y sont respectivement égales à $650^\circ/\text{h}$ et $1100^\circ/\text{h}$ [49] et ses marches aléatoires seront de l'ordre de $1,5^\circ/\sqrt{\text{h}}$ [49].

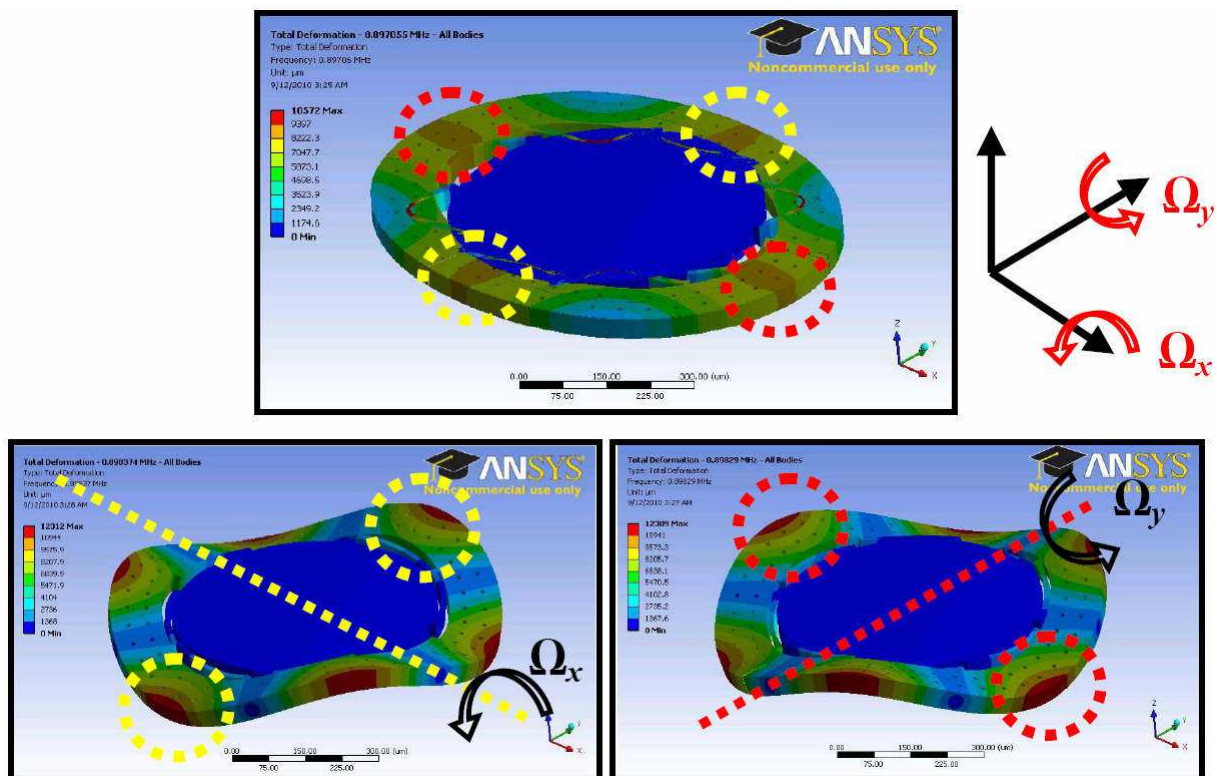


Figure 27 : Modes de vibration du CVG biaxial en anneau de l'université d'Atlanta [49]

Pour mémoire, un CVG triaxial en anneau a été conçu à l'université de Newcastle en 2001 [50] et il a été réalisé dans la même université en 2006 [51]. Aux modes détection énoncés précédemment s'ajoute le mode détection Z qui est l'image du mode pilote par une rotation de 45° . Le coefficient de couplage Coriolis de la détection Z est de 80% d'après la formule de Lord Bryan. Sa structure a été réalisée en silicium et son excitation/détection est électrostatique. Le projet n'a pas abouti à une caractérisation complète.

1.2.2.4 CVG triaxial à cadre.

Le CVG triaxial à cadre a été conçu à l'université de Newcastle en 1996 [52]. La structure et les modes de vibration de ce CVG sont présentés sur la figure 28. Il s'agit d'un cadre déformable qui comporte une masse d'épreuve au milieu de chacun de ses cotés.

Le mode pilote est une déformation du cadre qui provoque l'éloignement simultané des quatre masses. Les modes détection X, Y et Z sont respectivement apparentés aux rotations alternatives autour des axes X, Y et Z.

Une réalisation en silicium avec une excitation magnétique et une détection électrostatique a été envisagée pour ce CVG mais elle n'a pas été effectuée. Nous pensons, après avoir tenté un dimensionnement en simulation par élément finis, qu'il est difficile d'obtenir des fréquences proches pour les quatre modes.

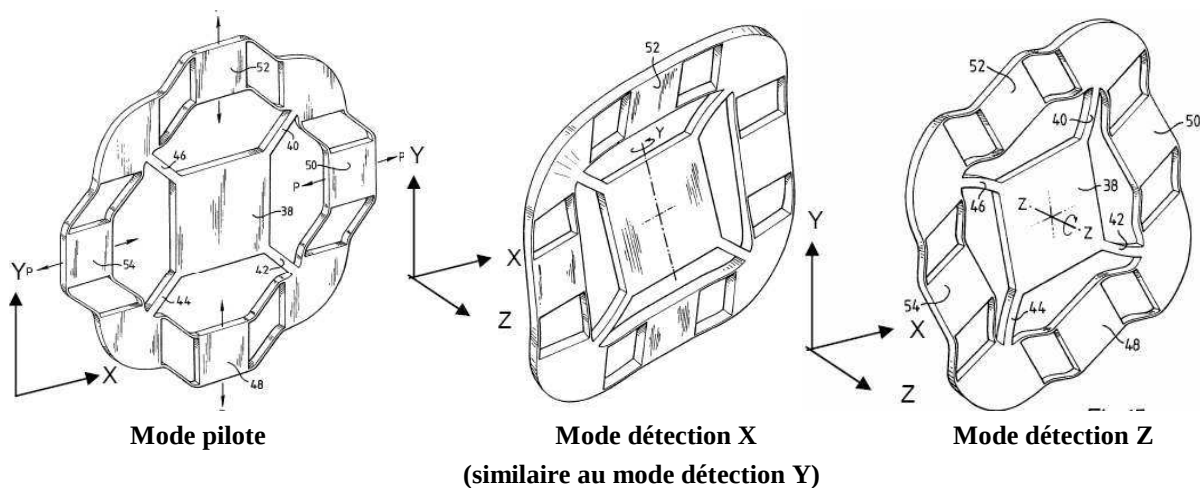


Figure 28 : Modes de vibrations du concept de CVG triaxial à cadre de l'université de Newcastle [52]

1.2.2.5 Bilan des CVG MEMS triaxiaux.

En comparant les CVG triaxiaux qui ont été étudiés, on peut relever des points communs :

- Le mode pilote est un mouvement planaire qui crée des mouvements selon les directions X et Y simultanément.
- Les modes détections X et Y des CVG triaxiaux sont des mouvements hors plan.
- Le mode Z est un mouvement dans le plan.

Le CVG conçu durant cette thèse présente les mêmes caractéristiques.

Peu d'informations sont disponibles sur les résolutions des CVG triaxiaux. Seule l'université de Tainan a publié une caractérisation complète de son CVG triaxial. Ses marches aléatoires sont de $43^\circ/\sqrt{h}$, $9^\circ/\sqrt{h}$ et $25^\circ/\sqrt{h}$ ce qui est environ 1000 fois moins bon que les marches aléatoires des CVG monoaxiaux actuels. Une vaste marge d'amélioration est donc envisageable.

1.2.3 Bilan des CVG MEMS.

Les différentes géométries de CVG MEMS qui ont été présentées sont comparées dans le tableau 3. Ce tableau met en valeur le compromis entre le coefficient de couplage Coriolis et les autres avantages que peuvent présenter les CVG. En effet, l'augmentation du nombre d'axes sensibles, l'obtention d'un nœud de vibration, la séparation des déformations pilote et détection ou la séparation des différents modes détection se font généralement au détriment du coefficient de couplage Coriolis. Au niveau des matériaux de réalisation, les CVG en silicium ou en quartz présentent des performances bien meilleures que les CVG en métal ou en céramique. Quant aux moyens d'excitation/détection ils sont quasiment tous électrostatiques ou piézoélectriques. Parmi les CVG MEMS présentés, les moyens d'excitation/détection optiques [45] et galvaniques [52] correspondent uniquement à des prototypes ou des concepts expérimentaux.

Tableau 3 : comparaison des gyromètres de l'état de l'art

Géométrie	Nombre d'axes sensibles	Modes	Axes de détection	Nœud de vibration	Séparation déformat° pilote et détection	Séparation des modes détection	Coef. de couplage Coriolis	Réf.
Poutre simple	Monoaxial	Flexions	X ou Y	Non	Non	-	100%	[17-20]
Diapason				Oui			100%	[21-23]
Double diapason							Oui	71%
Etoile	Biaxial		X et Y		Non	Non	71% 71%	[43-45]
Plateau	Monoaxial	Translat°	X, Y ou Z	Non	Oui	-	100%	[33-39]
		Rotations	X ou Y		Non		71%	[40]
	Biaxial	Rotations	X et Y		Non	Non	71% 71%	[46]
						Oui	50% 50%	[47]
							41% 41% 58%	[48]
	Triaxial	Rotat° et translat°	X, Y et Z					
Anneau	Monoaxial	Déformat°	Z	Oui	Non	-	80%	[28-30]
	Biaxial		X, Y			Non	23% 23%	[49]
	Triaxial		X, Y et Z				23% 23% 80%	[50-51]
Cadre	Triaxial	Déformat°	X, Y et Z	Non	Non	Non	inconnus	[52]

1.3 Conclusion.

Les nombreuses applications des CVG MEMS présentent de gros enjeux commerciaux qui ont motivé de nombreuses recherches. Par conséquent, l'état de l'art des CVG MEMS présente une grande richesse. En effet les CVG MEMS se distinguent des autres capteurs de rotation par leur encombrement et leur coût de fabrication très réduit. Mais ce n'est pas tout, grâce à des facteurs de qualité très élevés et des mises en œuvre permettant de supprimer les couplages indésirables, certains CVG MEMS monoaxiaux atteignent de très bonnes résolutions de mesure.

En ce qui concerne les CVG MEMS triaxiaux, leur performances sont aujourd'hui très en retrait compte tenu des nombreuses difficultés à surmonter, notamment les couplages entre les quatre modes (un pilote et trois détections). Cependant, ils sont vraisemblablement appelés à constituer le stade ultime de l'évolution des CVG MEMS, en permettant de réaliser des unités de mesure d'attitude sous la forme la plus avantageuse en termes de miniaturisation et de coût de fabrication.

L'objet de cette thèse est de contribuer à cette évolution.

2

Conception de la structure vibrante du CVG triaxial

Un gyromètre vibrant à effet Coriolis (CVG) est composé d'une structure mécanique vibrante et d'un système d'excitation/détection. Dans ce chapitre, la structure vibrante du CVG sera étudiée indépendamment du système d'excitation/détection et du matériau de réalisation.

Ce chapitre commence par la mise au point d'un modèle du comportement mécanique de la structure vibrante permettant d'évaluer sa sensibilité mécanique à la vitesse de rotation. Ce modèle révèle l'importance du coefficient de couplage Coriolis qui représente la capacité du mode pilote à exciter un mode détection par effet Coriolis. Le coefficient de couplage Coriolis est étudié dans différents cas simple, puis une structure de CVG triaxial permettant d'obtenir trois couplages Coriolis importants est conçue. Enfin, des structures de CVG triaxiaux en silicium sont réalisées et leur comportement vibratoire est caractérisé.

2.1 La sensibilité mécanique.

Le facteur d'échelle d'un capteur est le rapport entre le signal de sortie et le signal d'entrée. Dans le cas d'un gyromètre, il s'agit du rapport entre le signal de sortie et la vitesse de rotation. Le facteur d'échelle d'un CVG dépend à la fois de la sensibilité de sa structure mécanique et de la sensibilité de son système de détection. Dans ce chapitre, on étudiera la sensibilité mécanique du CVG indépendamment du système de détection. La sensibilité mécanique est définie comme le rapport entre l'amplitude du mode détection et la vitesse de rotation mesurée.

Pour déterminer analytiquement la sensibilité mécanique d'un CVG, il faut étudier la dynamique de sa structure vibrante. Cette étude sera menée en étudiant la réponse harmonique de la structure par décomposition sur base modale. Pour cela, nous allons commencer par rechercher les modes propres de la structure.

2.1.1 Recherche des modes propres de la structure.

La structure vibrante d'un CVG est un solide qui subit des déformations élastiques. Les déformations de la structure sont régies par la loi de Hooke :

$$\bar{\bar{T}} = \bar{\bar{c}} \bar{\bar{S}} \quad (32)$$

Avec $\bar{\bar{T}}$ le tenseur d'ordre deux des contraintes, $\bar{\bar{S}}$ le tenseur d'ordre deux des déformations et $\bar{\bar{c}}$ le tenseur d'ordre quatre des constantes d'élasticité.

Quand la structure se déforme, le champ de déplacement $\vec{u}(u_x, u_y, u_z)$ de la structure est associé à son tenseur de déformation $\bar{\bar{S}}$ dont les neuf coefficients sont définis dans le cas des petites déformations par :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \text{ avec } i, j \in [x, y, z] \quad (33)$$

On se propose d'étudier le comportement de la structure vibrante par décomposition sur la base modale de ses modes propres [53]. Comme toute structure mécanique, la structure du CVG possède des modes propres $\vec{k}_i$, caractérisés par un champ de déplacements $\vec{\bar{k}}_i$ et une pulsation ω_i . Par définition, les modes propres s'écrivent sous la forme :

$$\vec{\bar{k}}_i = \vec{\bar{k}}_i e^{j\omega_i t} \quad (34)$$

Chaque mode propre répond au principe fondamental de la dynamique en l'absence de forces extérieures :

$$\text{div} \bar{\bar{T}}_i = \rho \frac{\partial^2 \vec{\bar{k}}_i}{\partial t^2} = -\rho \omega_i^2 \vec{\bar{k}}_i \quad (35)$$

Les solutions de l'équation 35 étant connues à un facteur multiplicatif près, les vecteurs propres $\vec{\bar{k}}_i$ sont normalisés.

La normalisation d'un champ de vecteur $\vec{a}$ est notée $\|\vec{a}\|$ et définie par :

$$\|\vec{a}\| = \sqrt{\langle \vec{a} | \vec{a} \rangle} \quad (36)$$

où $\langle \vec{a} | \vec{b} \rangle$ est le produit scalaire entre les champs de vecteur $\vec{a}$ et $\vec{b}$ défini par:

$$\langle \vec{a} | \vec{b} \rangle = \frac{1}{V} \iiint_V \vec{a} \cdot \vec{b} dV \quad (37)$$

La normalisation de $\vec{k}_i$ équivaudra donc à considérer que :

$$\|\vec{k}_i\|^2 = \langle \vec{k}_i | \vec{k}_i \rangle = \frac{1}{V} \iiint_V \vec{k}_i \cdot \vec{k}_i dV = 1 \quad (38)$$

Les modes propres ont la propriété d'être orthogonaux les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire que leur produit scalaire est nul :

$$\langle \vec{k}_i | \vec{k}_j \rangle = \frac{1}{V} \iiint_V \vec{k}_i \cdot \vec{k}_j dV = 0 \quad \text{si } i \neq j \quad (39)$$

Les modes propres $\vec{k}_i$ forment donc une base orthonormée sur laquelle n'importe quel mouvement peut être décomposé [53]. Le mouvement est une combinaison linéaire de tous les modes propres de la structure qu'on peut approximer à une combinaison linéaire des N premiers modes avec N suffisamment grand :

$$\vec{u} = \sum_i A_i \vec{k}_i \approx \sum_i^N A_i \vec{k}_i \quad (40)$$

où $A_i = \langle \vec{u} | \vec{k}_i \rangle$ est la $i^{\text{ème}}$ composante de $\vec{u}$ dans la base modale des $\vec{k}_i$.

Par linéarité :

$$\bar{\bar{S}} = \sum_i^N A_i \bar{\bar{S}}_i \quad (41)$$

Avec $\bar{\bar{S}}_i$ le tenseur des déformations du mode propre $\vec{k}_i$.

$$\bar{\bar{T}} = \sum_i^N A_i \bar{\bar{T}}_i \quad (42)$$

Avec $\bar{\bar{T}}_i$ le tenseur des contraintes du mode propre $\vec{k}_i$.

$$\text{div} \bar{\bar{T}} = \sum_i^N A_i \text{div} \bar{\bar{T}}_i \quad (43)$$

D'après l'équation 35, on en déduit que :

$$\text{div} \bar{\bar{T}} = -\rho \sum_i^N A_i \omega_i^2 \vec{k}_i \quad (44)$$

2.1.2 Dynamique de la structure en présence de rotation.

La structure vibrante d'un CVG est soumise à une force externe : la force de Coriolis $\vec{f}_c$ et une force interne : les contraintes élastiques $\bar{\bar{T}}$. Le mouvement $\vec{u}$ des éléments volumiques de la structure est défini par le principe fondamental de la dynamique :

$$\text{div} \vec{T} + \vec{f}_c = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (45)$$

La force de Coriolis par unité de volume $\vec{f}_c$ dépend de la vitesse de rotation par rapport au référentiel galiléen $\vec{\Omega}$, de la masse volumique ρ et du mouvement $\vec{u}$:

$$\vec{f}_c = -2\rho \vec{\Omega} \wedge \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (46)$$

Or la structure est excitée à la résonance du mode pilote donc la dérivée temporelle du déplacement $\vec{u}$ est égale à :

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = j\omega_p \vec{u} = j\omega_p \sum_i^N A_i \vec{k}_i \quad (47)$$

Avec ω_p la pulsation pilote.

En remplaçant les équations 44 et 47 dans l'équation 45, on a :

$$-\rho \sum_i^N A_i \omega_i^2 \vec{k}_i + \vec{f}_c = -\rho \omega_p^2 \sum_i^N A_i \vec{k}_i \quad (48)$$

2.1.3 Réduction du déplacement aux modes pilote et détection.

Le mode pilote $\vec{k}_p$ et le mode détection $\vec{k}_d$ sont les principaux contributeurs du mouvement donc les contributions des modes propres $\vec{k}_i$ pour lesquels $i \neq d$ et $i \neq p$ sont négligeables.

$$\vec{u} = A_p \vec{k}_p + A_d \vec{k}_d \quad (49)$$

Avec $\vec{k}_p$ mode pilote et $\vec{k}_d$ le mode détection d'amplitudes respectives A_p et A_d , et de pulsations propres respectives ω_p et ω_d .

Pour obtenir l'expression de l'amplitude du mode détection, l'équation 48 est projetée sur le mode détection $\vec{k}_d$, en utilisant les équations 38 et 39 :

$$-\rho \omega_d^2 A_d + \langle \vec{f}_c | \vec{k}_d \rangle = -\rho \omega_p^2 A_d \quad (50)$$

L'amplitude de détection A_d s'écrit alors :

$$A_d = -\frac{\omega_p}{\rho(\omega_p^2 - \omega_d^2)} \langle \vec{f}_c | \vec{k}_d \rangle \quad (51)$$

Or, d'après l'équation 46 :

$$\langle \vec{f}_c | \vec{k}_d \rangle = -\frac{2\rho}{V} \iiint_V \left(\vec{\Omega} \wedge \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) \cdot \vec{k}_d dV \quad (52)$$

D'après l'équation 47 :

$$\langle \vec{f}_c | \vec{k}_d \rangle = -\frac{2j\rho\omega_p}{V} \iiint_V (\vec{\Omega} \wedge \vec{u}) \cdot \vec{k}_d dV \quad (53)$$

Par propriété du produit mixte :

$$\langle \vec{f}_c | \vec{k}_d \rangle = -\frac{2j\rho\omega_p}{V} \iiint_V (\vec{u} \wedge \vec{k}_d) \cdot \vec{\Omega} \cdot dV \quad (54)$$

D'après l'équation 49 :

$$\langle \vec{f}_c | \vec{k}_d \rangle = -\frac{2j\rho\omega_p}{V} \iiint_V (A_p \vec{k}_p + A_d \vec{k}_d) \wedge \vec{k}_d \cdot \vec{\Omega} dV \quad (55)$$

$$\langle \vec{f}_c | \vec{k}_d \rangle = -\frac{2j\rho\omega_p}{V} \iiint_V (A_p \vec{k}_p \wedge \vec{k}_d) \cdot \vec{\Omega} dV \quad (56)$$

D'après les équations 51 et 56 :

$$A_d = \frac{2jA_p}{V} \frac{\omega_p}{\omega_p^2 - \omega_d^2} \iiint_V (\vec{k}_p \wedge \vec{k}_d) dV \cdot \vec{\Omega} \quad (57)$$

Afin de maximiser la sensibilité, les pulsations des deux modes de résonances sont proches :

$$\Delta\omega = |\omega_p - \omega_d| \ll \omega_p \quad (58)$$

Donc :

$$\frac{\omega_p}{\omega_p^2 - \omega_d^2} = \frac{\omega_p}{(\omega_p + \omega_d)(\omega_p - \omega_d)} \approx \frac{\omega_p}{2\omega_p(\omega_p - \omega_d)} = \frac{1}{4\pi\Delta f} \quad (59)$$

avec Δf l'écart de fréquence entre le mode pilote et le mode détection.

D'après les équations 57 et 59, l'expression de l'amplitude A_d s'écrit :

$$A_d = \frac{jA_p}{2\pi\Delta f} \frac{1}{V} \iiint_V (\vec{k}_p \wedge \vec{k}_d) dV \cdot \vec{\Omega} \quad (60)$$

Note : le terme imaginaire j représente le décalage de phase de $\frac{\pi}{2}$ entre le mode pilote et le mode détection.

2.1.4 Expression de la sensibilité.

L'expression de l'amplitude du mode détection A_d s'écrit :

$$A_d = \frac{jA_p}{2\pi\Delta f} \frac{1}{V} \iiint_V (\vec{k}_p \wedge \vec{k}_d) dV \cdot \vec{\Omega} \quad (61)$$

A partir de cette relation on définit le vecteur de couplage Coriolis $\vec{K}$, il représente l'aptitude du mode pilote à exciter le mode détection par effet Coriolis.

$$\boxed{\vec{K} = \frac{1}{V} \iiint_V (\vec{k}_p \wedge \vec{k}_d) dV} \quad (62)$$

Avec $\vec{k}_p$ et $\vec{k}_d$ les modes pilote et détection.

Il s'agit de l'expression analytique du coefficient que Lord Bryan avait déterminé expérimentalement dans le cas des bols vibrants en 1890 [13, 27].

L'expression de A_d s'écrit alors :

$$A_d = \frac{jA_p}{2\pi\Delta f} \vec{K} \cdot \vec{\Omega} \quad (63)$$

L'amplitude du mode détection est proportionnelle au produit scalaire entre le vecteur rotation et le vecteur de couplage Coriolis. La mesure est donc une mesure linéaire. Cependant, elle prend uniquement en compte la projection de $\vec{\Omega}$ sur $\vec{K}$. La sensibilité du CVG est donc maximale quand la rotation est suivant l'axe de $\vec{K}$, qui représente "l'axe sensible".

La sensibilité mécanique S d'un CVG est le rapport entre l'amplitude du mode détection A_d et la vitesse de rotation Ω quand l'axe de rotation est suivant l'axe sensible.

$$S = \frac{\|A_d\|}{\Omega} = \frac{A_p K}{2\pi\Delta f} \quad (64)$$

Avec A_p l'amplitude du mode pilote, Δf l'écart de fréquence entre les modes et $K = \|\vec{K}\|$ le coefficient de couplage Coriolis.

La sensibilité d'un CVG dépend de trois paramètres : l'amplitude du mode pilote, l'écart de fréquence entre les modes et le vecteur de couplage Coriolis. L'optimisation de la sensibilité d'un CVG requiert donc :

- La plus grande amplitude pilote possible : la plus grande amplitude que la structure puisse supporter sans que ses oscillations ne deviennent non-linéaires ou que le matériau ne rompe.
- Le plus petit écart de fréquence possible : le plus petit écart de fréquence suffisant pour supporter la bande passante souhaitée. Au minimum, l'écart de fréquence doit être égal au double de la bande passante [54]. Dans les cas qui nous intéressent, la bande passante est de 100 Hz donc l'écart de fréquence doit être de 200 Hz.
- Le plus grand coefficient de couplage Coriolis K possible. K est compris entre 0 et 1, et il dépend uniquement de la déformée des modes. **Ainsi, lors de la conception les modes pilote et détection doivent être choisis de manière à optimiser K et la géométrie de la structure doit être conçue de manière à favoriser ces modes.**

2.2 Etude du coefficient de couplage Coriolis.

Comme nous l'avons vu précédemment, le vecteur de couplage Coriolis $\vec{K}$ représente l'aptitude du mode pilote à exciter le mode détection par effet Coriolis. Sa direction indique l'axe sensible du couple de mode considéré, la sensibilité mécanique est proportionnelle à sa norme notée K .

Cette partie commence par montrer les valeurs maximales des coefficients de couplage Coriolis dans le cas d'un CVG triaxial, puis des coefficient de couplage Coriolis sont calculés dans trois cas simples : un plateau, une poutre et un cadre afin de préparer la conception du CVG triaxial.

2.2.1 Coefficients de couplage Coriolis maximaux d'un CVG triaxial.

Les CVG triaxiaux possèdent trois axes sensibles perpendiculaires les uns aux autres et généralement ils exploitent un seul mode pilote et trois mode détection [48-52]. Cette partie démontre qu'il est possible d'obtenir trois vecteurs de couplages Coriolis perpendiculaires entre eux à partir d'un seul mode pilote mais que dans ce cas les valeurs de leurs normes sont limitées.

Pour cette démonstration, on s'intéresse à un CVG triaxial avec un seul mode pilote et trois modes détections notés de la façon suivante :

$$\begin{array}{ll} \text{Mode pilote : } \vec{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} & \text{Mode détection X : } \vec{sx} = \begin{pmatrix} sx_1 \\ sx_2 \\ sx_3 \end{pmatrix} \\ \text{Mode détection Y : } \vec{sy} = \begin{pmatrix} sy_1 \\ sy_2 \\ sy_3 \end{pmatrix} & \text{Mode détection Z : } \vec{sz} = \begin{pmatrix} sz_1 \\ sz_2 \\ sz_3 \end{pmatrix} \end{array}$$

Les trois couplages Coriolis $\vec{K}_x$, $\vec{K}_y$, $\vec{K}_z$ orientés respectivement selon les axes X, Y et Z sont définis par :

$$\vec{K}_x = \frac{1}{V} \iiint_V \vec{p} \wedge \vec{sx} dV \quad \vec{K}_y = \frac{1}{V} \iiint_V \vec{p} \wedge \vec{sy} dV \quad \vec{K}_z = \frac{1}{V} \iiint_V \vec{p} \wedge \vec{sz} dV \quad (65)$$

Le mode pilote et les modes détection sont normalisés à une valeur de 1 :

$$\|\vec{p}\| = \|\vec{sx}\| = \|\vec{sy}\| = \|\vec{sz}\| = 1 \quad (66)$$

Puisque $\vec{K}_x$ est parallèle à l'axe X :

$$K_x = \vec{K}_x \cdot \vec{x} = \frac{1}{V} \iiint_V (\vec{p} \wedge \vec{sx}) \cdot \vec{x} dV = \frac{1}{V} \iiint_V p_2 sx_3 - p_3 sx_2 dV \quad (67)$$

On peut exprimer K_x sous la forme d'un produit scalaire :

$$K_x = \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \middle| \begin{pmatrix} 0 \\ sx_3 \\ -sx_2 \end{pmatrix} \right\rangle \quad (68)$$

D'après l'inégalité de Cauchy-Schwartz:

$$K_x^2 \leq \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \right\|^2 \times \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ sx_3 \\ -sx_2 \end{pmatrix} \right\|^2 \quad (69)$$

Or :

$$\left\| \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \right\|^2 = \frac{1}{V} \iiint_V p_2^2 + p_3^2 dV \quad \text{et} \quad \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ sx_3 \\ -sx_2 \end{pmatrix} \right\|^2 = \frac{1}{V} \iiint_V sx_3^2 + sx_2^2 \leq \|sx\|^2 = 1 \quad (70)$$

Donc :

$$K_x^2 \leq \frac{1}{V} \iiint_V p_2^2 + p_3^2 dV \quad (71)$$

De même, on peut montrer que :

$$K_y^2 \leq \frac{1}{V} \iiint_V p_1^2 + p_3^2 dV \quad (72)$$

$$K_z^2 \leq \frac{1}{V} \iiint_V p_1^2 + p_2^2 dV \quad (73)$$

En sommant les trois relations précédentes, on obtient :

$$K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 \leq \frac{1}{V} \iiint_V 2p_1^2 + 2p_2^2 + 2p_3^2 dV = 2\|\bar{p}\|^2 = 2 \quad (74)$$

$$\boxed{K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 \leq 2} \quad (75)$$

Avec un seul mode pilote, les trois coefficients de couplage Coriolis d'un CVG triaxial ne peuvent donc pas être tous les trois proches de 100%. Si les trois coefficients de couplage Coriolis sont égaux, leur maximum est égal à $\sqrt{2/3} \approx 82\%$.

Cas d'un mouvement pilote planaire :

Dans le cas d'un gyromètre triaxial à structure planaire, le mode pilote est généralement un mouvement inclus dans le plan (voir partie 1.2.2), dans ce cas $p_3 = 0$:

$$\bar{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (76)$$

On peut donc montrer que :

$$K_x^2 \leq \frac{1}{V} \iiint_V p_2^2 dV \quad \text{et} \quad K_y^2 \leq \frac{1}{V} \iiint_V p_1^2 dV \quad (77)$$

En sommant les deux équations précédentes :

$$K_x^2 + K_y^2 \leq \frac{1}{V} \iiint_V p_1^2 + p_2^2 dV = \|\bar{p}\|^2 = 1 \quad (78)$$

$$\boxed{K_x^2 + K_y^2 \leq 1} \quad (79)$$

De plus, les modes détection X et Y étant souvent l'image l'un de l'autre par une rotation de 90° , en général $K_x = K_y$ donc : $K_x \leq \sqrt{1/2} \approx 71\%$ et $K_y \leq \sqrt{1/2} \approx 71\%$.

Dans les mêmes conditions K_z n'est pas limité et il peut atteindre 100%.

En conclusion, dans un CVG triaxial excité par un mode pilote unique et planaire et dont les modes détection X et Y sont symétriques par une rotation de 90° , les coefficients de couplage Coriolis K_x et K_y sont limités à un maximum de 71% alors que K_z peut s'approcher de 100%.

2.2.2 Exemples de coefficients de couplage Coriolis.

Le coefficient de couplage est optimal quand les modes pilote et détection sont l'image l'un de l'autre par une rotation de 90° . Ainsi, K dépend des déformées des modes et donc de la géométrie de la structure. Pour visualiser les valeurs que peut prendre ce coefficient en fonction de la configuration de la structure, nous allons étudier trois exemples correspondant à des CVG de géométrie simple : un plateau, une poutre et un cadre.

2.2.2.1 Coefficients de couplage Coriolis entre les modes d'un plateau non déformable.

On s'intéresse aux modes d'un plateau non déformable maintenu par des ressorts. Dans cet exemple, on ne considère pas les modes propres du plateau mais uniquement ses déplacements. Le plateau est situé dans le plan XY et son épaisseur est faible devant son diamètre. Les six modes de ce corps rigide sont ses trois translations et ses trois rotations présentées sur la figure 29.

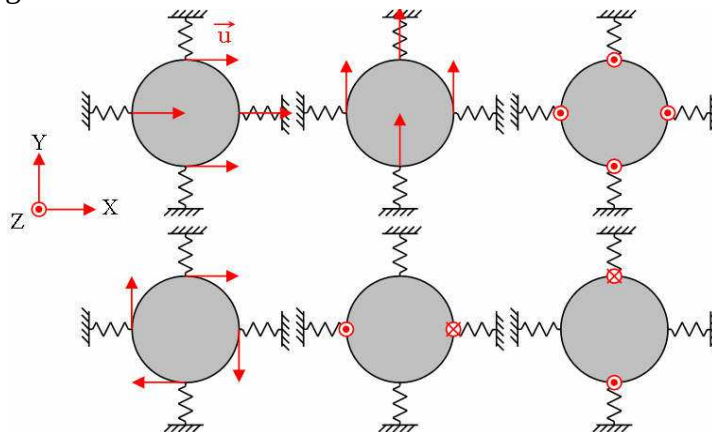


Figure 29 : Les six modes d'un plateau indéformable maintenu par des ressorts, les flèches représentent le vecteur déplacement $\vec{u}$

Sur la figure 30, différents couples de modes sont présentés, un des modes est représenté en rouge et l'autre en bleu. Dans chaque cas, le produit vectoriel entre les deux modes est calculé en quatre points. Ce produit représente la contribution locale du vecteur de couplage Coriolis et il est représenté en vert. Etant donné les symétries de la structure et des modes, ces quatre contributeurs locaux permettent d'évaluer le coefficient de couplage Coriolis global.

Dans le 1^{er} cas, l'un des modes est la translation selon X et l'autre la translation selon Z. En chaque point les vecteurs déplacement sont perpendiculaires ; les contributeurs locaux à $\vec{K}$ qui sont leurs produits vectoriels ont donc une norme égale à 1. De plus, tous les contributeurs locaux sont orientés selon Y et ont le même sens, le vecteur $\vec{K}$ qui est leur moyenne est donc orienté selon Y et a une norme égale à 1.

Dans le 2^{ème} cas, l'un des modes est la rotation selon X et l'autre la rotation selon Y. Etant donné que le plateau a une épaisseur négligeable ces deux rotations produisent uniquement des déplacements selon Z. Ainsi, pour tous les points, les vecteurs déplacement des modes sont parallèles donc leur produit vectoriel est nul. Le K total est donc nul.

Dans le 3^{ème} cas, l'un des modes est la translation selon X et l'autre la rotation selon X. En chaque point les vecteurs déplacement sont perpendiculaires, la norme des contributeurs locaux est donc égale à 1. Cependant, les contributeurs situés de part et d'autre de l'axe X sont de sens opposés donc ils se compensent et le K total est nul.

Dans le 4^{ème} cas, l'un des modes est la rotation selon X et l'autre la rotation selon Z. En chaque point les vecteurs déplacement sont perpendiculaires, la norme des contributeurs locaux est donc égale à 1. Cependant les contributeurs locaux n'ont pas tous la même direction, au total leurs composantes selon X s'annulent alors que leurs composantes selon Y s'ajoutent. Il en résulte un vecteur $\vec{K}$ orienté selon Y dont la norme est égal à $\sqrt{1/2} \approx 71\%$.

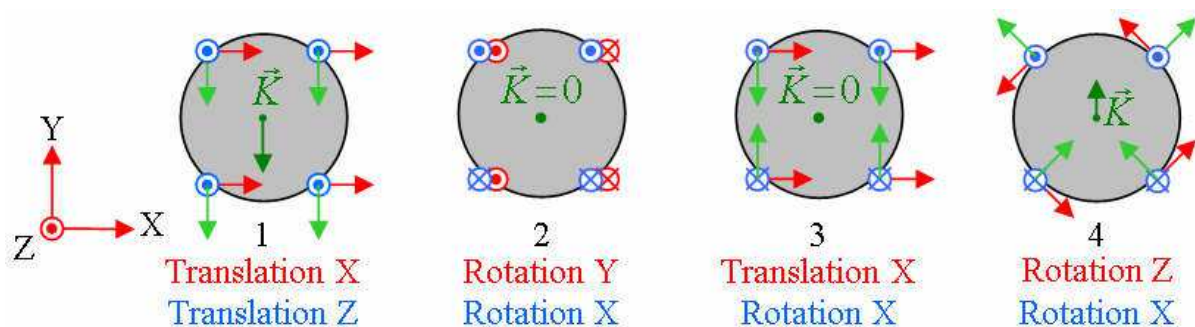


Figure 30 : Exemples de couplage Coriolis. Localement, l'un des modes est représenté par des flèches rouges et l'autre par des flèches bleues. Les contributeurs locaux du couplage Coriolis sont représentés en vert clair et le vecteur de couplage Coriolis $\vec{K}$ qui est leur moyenne volume est représenté en vert foncé.

2.2 Etude du coefficient de couplage Coriolis.

Les coefficients de couplage Coriolis et les axes sensibles des couples de modes de la structure sont synthétisés dans le tableau 4. Le calcul des coefficients de couplage Coriolis a été réalisé par simulation par éléments finis et vérifié analytiquement.

Tableau 4 : Vecteurs de couplage Coriolis de couple de modes d'un plateau indéformable situé dans le plan XY. Les normes des vecteurs de couplage Coriolis sont indiquées en % et leurs orientations selon X, Y ou Z sont indiquées et surlignées respectivement en bleu, vert ou jaune.

	Translat° X	Translat° Y	Translat° Z	Rotation X	Rotation Y	Rotation Z
Translat° X		Z 100%	Y 100%	0	0	0
Translat° Y	Z 100%		X 100%	0	0	0
Translat° Z	Y 100%	X 100%		0	0	0
Rotation X	0	0	0		0	Y 71%
Rotation Y	0	0	0	0		X 71%
Rotation Z	0	0	0	Y 71%	X 71%	

Le couplage de deux modes de translation permet d'obtenir un vecteur de couplage Coriolis de 100% orienté selon X, Y ou Z selon le couple de mode choisi. Ce couplage est exploité dans les CVG monoaxiaux à plateau (voir partie 1.2.1.5).

Le couplage de la rotation Z avec la rotation X ou la rotation Y permet d'obtenir un vecteur de couplage Coriolis de 71% orienté selon X ou Y selon les rotations choisies. Ces deux couplages sont exploités dans les CVG biaxiaux à plateau (voir partie 1.2.2.2).

Le coefficient de couplage Coriolis entre une translation et une rotation est nul. De même, le coefficient de couplage entre les rotations autour des axes X et Y est nul (sauf si le plateau a une épaisseur importante : c'était le cas du tout premier CVG, voir partie 1.2.1.5).

Enfin, aucun des modes ne permet d'obtenir des axes sensibles selon les trois directions de l'espace par association avec trois autres modes. **Il est donc impossible de réaliser un CVG triaxial avec un seul mode pilote à partir d'un plateau seul.**

2.2.2.2 Coefficients de couplage Coriolis entre les modes d'une poutre encastrée libre.

On s'intéressera aux modes de déformation basse fréquence d'une poutre encastrée-libre : ses deux flexions fondamentales, sa torsion fondamentale et les modes que son support peut lui conférer : les trois translations et la rotation autour de son axe longitudinal. Ces modes sont présentés sur la figure 31.

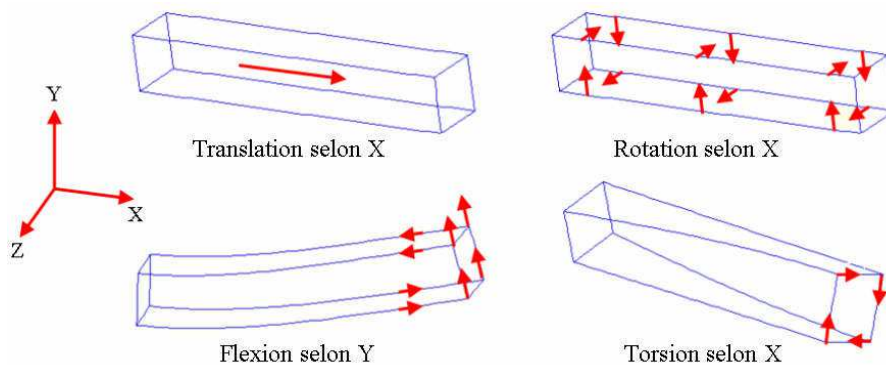


Figure 31 : modes de vibration d'une poutre encastrée-libre

Le tableau 5 donne les coefficients de couplage Coriolis et les axes sensibles des couples de mode d'une poutre encastrée-libre. Le calcul des coefficients de couplage a été réalisé par simulation par éléments finis et vérifié analytiquement en utilisant les équations de la flexion et de la torsion de S. Timoshenko [55]. Les calculs ont été effectués pour une poutre ayant un élanement égal à six, similaire à celui des poutres du VIG. La poutre est orientée selon l'axe X.

Tableau 5 : Vecteurs de couplage Coriolis de couple de modes d'une poutre orientée selon X.

Les normes des vecteurs de couplage Coriolis sont indiquées en % et leurs orientations selon X, Y ou Z sont indiquées et surlignées respectivement en bleu, vert ou jaune.

	Translat° X	Translat° Y	Flexion Y	Translat° Z	Flexion Z	Rotation X	Torsion X
Translat° X		Z 100%	Z 79%	Y 100%	Y 79%	0	0
Translat° Y	Z 100%		0	X 100%	X 79%	0	0
Flexion Y	Z 79%	0		X 79%	X 99%	Z 7%	Z 7%
Translat° Z	Y 100%	X 100%	X 79%		0	0	0
Flexion Z	Y 79%	X 79%	X 99%	0		Y 7%	Y 7%
Rotation X	0	0	Z 7%	0	Y 7%		0
Torsion X	0	0	Z 7%	0	Y 7%	0	

Comme dans le cas du plateau, les coefficients de couplage Coriolis entre deux translations sont de 100% et peuvent être orientés selon X, Y ou Z. Cependant, une des translations étant utilisée comme mode pilote, les deux translations restantes permettent de former un CVG biaxial mais pas un CVG triaxial.

Le couplage des deux modes de flexion permet d'obtenir un vecteur de couplage Coriolis de 99% orienté selon X l'axe longitudinal de la poutre. Ce couplage est exploité dans les CVG à poutre simple, en diapason ou en double diapason (voir parties 1.2.1.1 à 1.2.1.3). En combinant plusieurs poutres d'orientations différentes, il est possible de réaliser des CVG biaxiaux, c'est le cas du CVG biaxial en étoile (voir partie 1.2.2.1). Cependant comme l'axe longitudinal des poutres ne peut pas être hors du plan du wafer, il n'est pas possible de réaliser un CVG triaxial uniquement avec des modes de flexion.

Le couplage entre la translation longitudinal d'une poutre (selon X) et les deux modes de flexions permet d'obtenir des vecteurs de couplage Coriolis de 79% orientés perpendiculairement à la poutre (selon Y et selon Z). Ces couplages ne présentent pas encore d'application.

Les coefficients de couplages Coriolis entre la rotation et les autres modes sont tous nuls ou faibles (<10%). De même, les couplages entre la torsion selon X et les autres modes sont nuls ou faibles.

Si l'on utilise qu'une seule poutre, aucun des modes ne peut être utilisé comme unique mode pilote pour obtenir par association avec trois modes détections des axes sensibles selon les trois directions de l'espace. **Il est donc impossible de réaliser un CVG triaxial à partir d'une seule poutre vibrante.**

Cependant, en utilisant des poutres orientées selon X et des poutres orientées selon Y, il est possible d'obtenir des axes sensibles selon X, Y et Z. Les trois axes sensibles sont obtenus en utilisant les quatre modes ayant les caractéristiques suivantes :

- le mode pilote constitué de la translation longitudinale de toutes les poutres
- le mode détection X constitué de la flexion selon Z des poutres d'axe Y
- le mode détection Y constitué de la flexion selon Z des poutres d'axe X
- le mode détection Z constitué de la flexion selon Y des poutres d'axe X et de la flexion selon X des poutres d'axe Y

Remarque : le mode pilote et le mode Z peuvent être inversés.

La difficulté est de trouver une géométrie de structure permettant d'obtenir ces quatre types de modes. Le plus complexe étant d'obtenir la translation longitudinale simultanée de poutres perpendiculaires les unes aux autres.

2.2.2.3 Coefficient de couplage Coriolis entre les modes d'un cadre déformable.

Un cadre déformable est formé de quatre poutres perpendiculaires pouvant fléchir, il s'agit donc d'une structure intéressante pour former un triaxe. Le cadre est maintenu par quatre poutres émergeant d'un moyeu central fixe qui est encastree de manière rigide. Les modes étudiés sont présentés sur la figure 32. Il s'agit de trois modes planaires, des trois rotations et de deux déformations hors plan. Le premier mode planaire (MP1) est une déformation planaire des quatre cotés du cadre : deux cotés opposés fléchissent vers le centre au moment où les deux autres fléchissent vers l'extérieur. Le deuxième mode planaire (MP2) est une flexion planaire des quatre cotés du cadre lors de laquelle les quatre cotés se rapprochent et s'éloignent simultanément du centre. Lors du troisième mode planaire (MP3), les coins du cadre s'éloignent et se rapprochent du centre : lorsque deux coins opposés se rapprochent les deux autres s'éloignent, ce qui donne au cadre la forme d'un losange. Les rotations RX, RY et RZ correspondent aux axes de rotation X, Y et Z. L'un des modes hors plan (MHPX) est une flexion hors plan en sens opposés des deux cotés du cadre qui sont orientés selon X et l'autre mode hors plan (MHPY) est une flexion hors plan en sens opposés des deux cotés du cadre qui sont orientés selon Y.

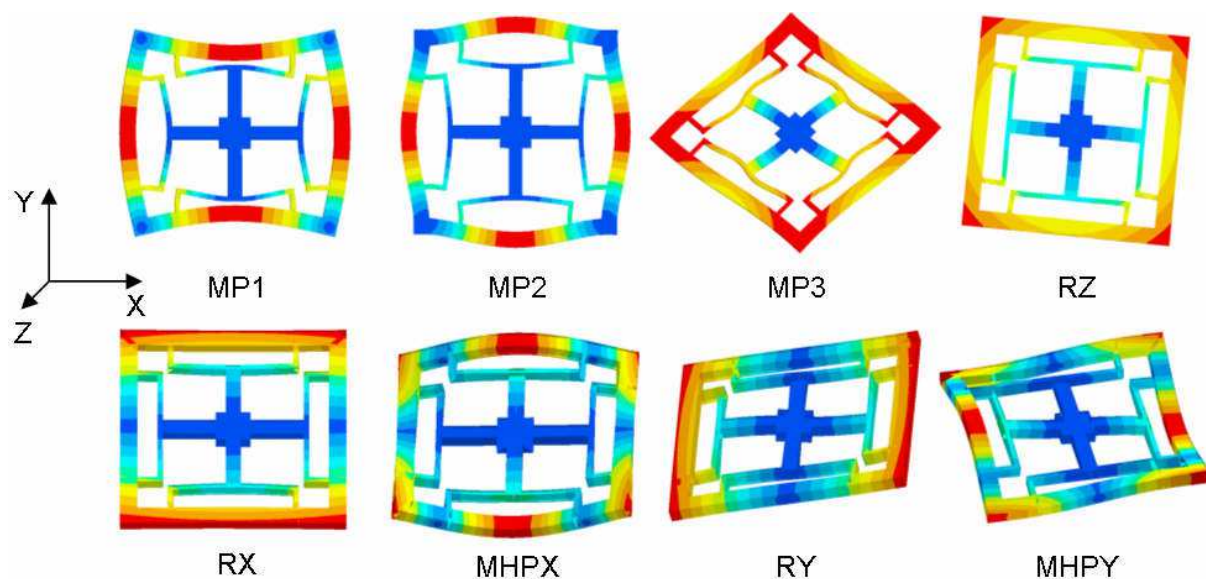


Figure 32 : modes de vibration du cadre

2.2 Etude du coefficient de couplage Coriolis.

Le tableau 16 donne les coefficients de couplage Coriolis des différents couples de modes du cadre déformable.

Tableau 6 : Vecteurs de couplage Coriolis de couple de modes d'un cadre déformable.

Les normes des vecteurs de couplage Coriolis sont indiquées en % et leurs orientations selon X, Y ou Z sont indiquées et surlignées respectivement en bleu, vert ou jaune.

	MP1	MP2	MP3	RZ	MHPX	RX	MHPY	RY
MP1		0	Z 75%	0	X 43%	X 54%	Y 43%	Y 54%
MP2	0		0	Z 75%	X 44%	X 51%	Y 35%	Y 44%
MP3	Z 75%	0		0	0	X 68%	0	Y 68%
RZ	0	Z 75%	0		X 2%	X 71%	Y 2%	Y 71%
MHPX	X 43%	X 44%	0	X 2%		0	0	0
RX	X 54%	X 51%	X 68%	X 71%	0		0	0
MHPY	Y 43%	Y 44%	0	Y 2%	0	0		0
RY	Y 54%	Y 51%	X 68%	X 71%	0	0	0	

Quatre des modes du cadre déformable peuvent être utilisés comme mode pilote unique pour concevoir un CVG triaxial : les MP1, MP2, MP3 et RZ. Il est donc possible de concevoir un CVG triaxial à mode pilote unique à partir d'un cadre déformable. Pour chaque mode pilote, les trois modes détection qui permettent d'obtenir des vecteurs de couplage Coriolis selon X, Y et Z sont listés dans le tableau 7.

Tableau 7 : mode détection X, Y et Z associés à chaque mode pilote utilisable pour concevoir un CVG triaxial à partir d'un cadre déformable

Pilote	Détection X	Détection Y	Détection Z
MP1	MHPX ou RX	MHPY ou RY	MP3
MP2	MHPX ou RX	MHPY ou RY	RZ
MP3	RX	RY	MP1
RZ	RX	RY	MP2

2.2.3 Conclusion.

Dans cette partie, nous avons montré qu'un couple de mode utilisé pour concevoir un CVG est caractérisé par un vecteur de couplage Coriolis dont la norme conditionne la sensibilité du CVG et dont la direction détermine l'axe sensible à la rotation. Le vecteur de couplage Coriolis dépend des déformées des modes et de la géométrie de la structure vibrante. Ainsi, pour concevoir un CVG triaxial, il faut utiliser une structure qui permette d'obtenir un mode pilote couplé à trois modes détection avec des vecteurs de couplages Coriolis dont les normes sont importantes et dont les directions correspondent aux trois directions de l'espace. Une étude a permis de repérer deux structures répondant à ces exigences :

- un cadre déformable
- une association de poutres perpendiculaires entre elles

Dans la partie suivante les avantages et les inconvénients de ces deux géométries seront comparés.

2.3 Conception de la structure du CVG triaxial.

Dans cette partie, deux géométries sont comparées afin de concevoir un CVG triaxial : un cadre déformable et un ensemble de poutres perpendiculaires.

2.3.1 CVG triaxial à cadre déformable.

On se propose de concevoir un CVG triaxial dont la structure est un cadre déformable. D'après le tableau 8, il existe quatre modes pilotes qui permettent par association avec trois autres modes d'obtenir des axes sensibles selon les trois direction de l'espace.

Trois de ces quatre modes pilotes fonctionnent par association avec des modes détection qui sont des rotations. Or, les rotations présentent plusieurs inconvénients en terme de facteur de qualité :

- Les modes de rotation ne présentent pas de nœud de vibrations, pour obtenir un facteur de qualité important, il faut donc utiliser des ressorts très fins pour découpler le cadre des fixations.
- Cependant pour que la fréquence de résonance des rotations soit proche de celle du mode pilote utilisé (ce qui est nécessaire pour obtenir une sensibilité mécanique importante, voir partie 2.1.4) il faut que les ressorts supportant le cadre soient à peu près de la même raideur que les cotés du cadre.

Ces deux inconvénients ne laissent donc aucun moyen d'obtenir un facteur de qualité important.

Le mode pilote utilisé sera donc le MP1 qui permet de concevoir un CVG triaxial sans utiliser de mode de rotation. Les modes détection X, Y et Z seront donc respectivement les modes MHPX, MHPY et MP3 comme le montre la figure 33. **Ainsi, les coefficients de couplage Coriolis des axes X, Y et Z du CVG triaxial sont respectivement égaux à 43%, 43% et 75%.**

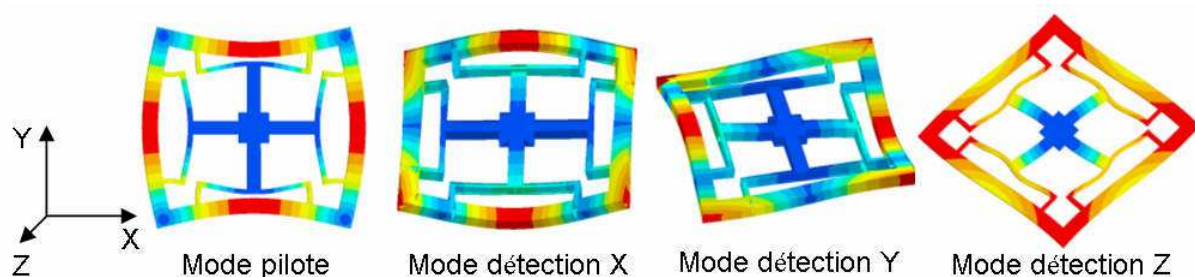


Figure 33 : mode du CVG triaxial à cadre déformable

La structure a été dimensionnée dans le cas d'une réalisation en GaAs et a fait l'objet d'une publication [56]. L'épaisseur de la structure est de 450 μm et les cotés du cadre mesurent 7,7 mm de long et 600 μm de large. Le mode pilote a alors une fréquence de 28 580 Hz et les modes détection X, Y et Z ont des fréquences proches de 28 180 Hz.

La dissipation d'énergie dans le support est une des sources de limitation du facteur de qualité (voir annexe 6.2). La dissipation d'énergie dans le support est due à la dissipation viscoélastique de l'énergie de vibration présente dans le support. Un majorant de la fraction d'énergie dissipée peut être déterminé en simulation par élément finis en considérant que la totalité de l'énergie présente dans le support est dissipée. L'inverse de ce majorant est le minorant du facteur de qualité propre à la dissipation d'énergie dans le support.

Les minorants du facteur de qualité propre à la dissipation d'énergie dans le support (voir annexe 6.2) du mode pilote et des modes détection X, Y et Z ont été déterminés en simulation par élément finis, ils sont respectivement égaux à 975 000, 75, 75 et 1320 ce qui est insuffisant pour un CVG. En effet la zone de fixation n'est pas un nœud de vibration des modes détection X et Y.

De plus, les déformations et les déplacements du mode pilote et des modes détections sont tous localisés au même endroit : dans le cadre du CVG. Que la détection soit capacitive ou piézoélectrique, les électrodes pilote et détection seront donc situées sur la même zone. **Par conséquent, le CVG risque de subir des couplages indésirables entre le mode pilote et les modes détections.**

En conclusion, un CVG triaxial à cadre déformable a été conçu mais il présente des défauts. Pour éviter ces problèmes, on se propose de concevoir un autre CVG triaxial pour lequel il faudra :

- Choisir les modes de manière à ce que la zone de fixation soit un nœud de contraintes de tous les modes.
- Découpler la zone de fixation du reste de la structure grâce à un système de suspensions.
- Réserver une zone consacrée à la détection qui ne soit pas soumise à des contraintes du mode pilote pour réduire les couplages indésirables entre le mode pilote et les modes détection.

2.3.2 CVG triaxial à poutres.

L'objectif de cette partie est de concevoir un CVG triaxial qui possède des coefficients de couplage Coriolis importants mais aussi un bon découplage entre pilote et détection et de bons facteurs de qualité.

Pour limiter le couplage entre le mode pilote et les modes détection (couplage quadratique), on se propose d'exploiter des translations longitudinales de poutres comme mode pilote. En effet, les translations permettent de déplacer les poutres sans les déformer pour en faire des zones réservées à la détection et ainsi réduire les couplages indésirables entre le mode pilote et les modes détection.

Les translations longitudinales d'un ensemble de poutre perpendiculaires orientées selon X et selon Y peuvent être utilisées comme mode pilote d'un CVG triaxial (voir partie 2.2.2.2). Pour des raisons de symétrie, on utilisera quatre poutres : deux poutres selon X et deux poutres selon Y. Afin de mettre ces quatre poutres en translation, elles sont encastrées au milieu des quatre cotés d'un cadre qui se déforme dans le plan suivant le mode MP1 : deux cotés opposés du cadre fléchissent vers le centre au moment où les deux autres fléchissent vers l'extérieur.

La structure ainsi formée est présentée sur la figure 34. Elle est fixée par le centre, les zones de fixation sont séparées du cadre par des suspensions filtrantes en forme de L permettant de préserver le facteur de qualité des vibrations. Pour des raisons de symétrie la structure est fixée en quatre points. La structure comporte aussi des masselottes au quatre coin du cadre dont le rôle est précisé dans la suite de cette partie.

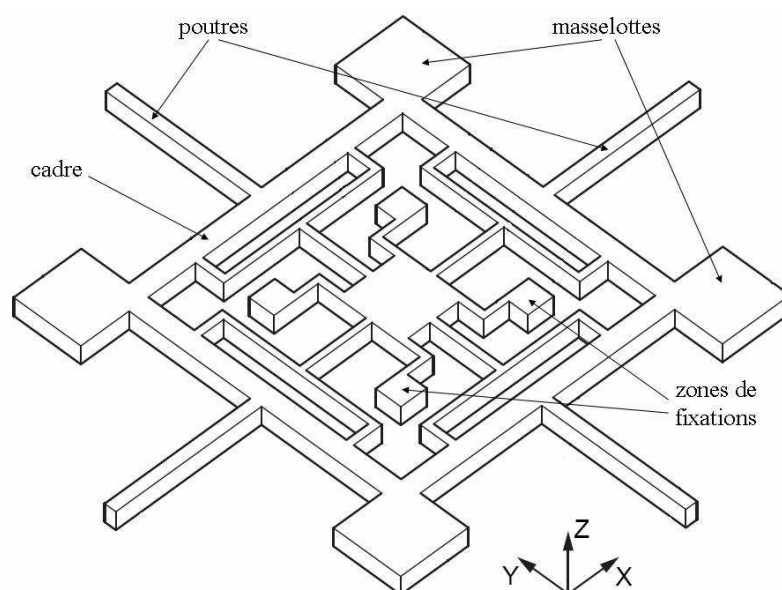


Figure 34 : Structure du gyromètre triaxial

Les modes de vibration du gyromètre triaxial sont présentés sur la figure 35. Le mode pilote est une déformation du cadre entraînant la translation longitudinal des quatre poutres.

Le mode pilote permet de déplacer les poutres sans les déformer et ainsi d'en faire des zones réservées aux déformations des modes détection.

Le mode détection X est une flexion hors plan des poutres selon Y et le mode détection Y est une flexion hors plan des poutres selon X. Pour ces deux modes, le mouvement des poutres crée un couple de force appliqué aux fixations qui entraîne une importante dissipation d'énergie. Pour compenser ce mouvement, les coins du cadre qui se déplacent en sens opposés sont lestés par des masselottes dimensionnées pour compenser le couple de force crée par les poutres. Ces masselottes ont été dimensionnées numériquement en effectuant des essais successifs avec pour objectif de minimiser la proportion d'énergie vibratoire située à l'intérieur des fixations.

Le mode détection Z est une flexion dans le plan des quatre poutres dont les mouvements se compensent naturellement.

Ainsi, la géométrie et les modes de cette structure de CVG triaxial permettent de répondre de manière innovante à la problématique de la réduction du couplage en quadrature. Cette innovation a été brevetée [57]. Cependant la séparation des déformations est avantageuse uniquement si la détection est basée sur une mesure de contraintes et non sur une mesure de déplacement (voir partie 3.2).

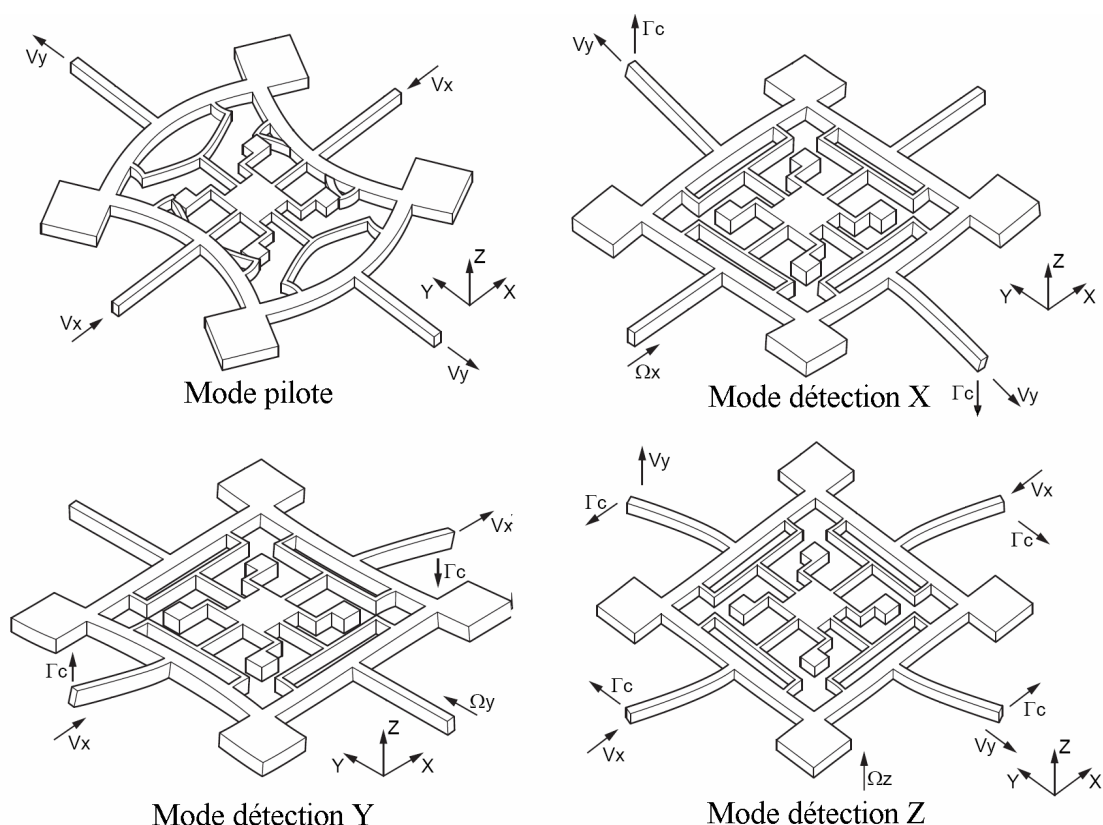


Figure 35 : modes de vibration du gyromètre triaxial

Les coefficients de couplage Coriolis de cette structure ont été déterminés par simulation par élément finis. **Les coefficient de couplage Coriolis selon X, Y et Z sont respectivement égaux à 50%, 50% et 43%.**

La taille des masselottes a été ajustée à 1% près de manière à compenser précisément le mouvement des poutres lors des modes détection X et Y. De plus, les zones de fixation sont séparées du reste de la structure par des suspensions de 90 μm de large.

Les minorants du facteur de qualité propre à la dissipation d'énergie dans le support (voir annexe 6.2) du mode pilote et des modes détection X, Y et Z ont été déterminés en simulation par élément finis, ils sont respectivement égaux à $8,6 \times 10^6$, $1,0 \times 10^8$, $2,1 \times 10^7$ et $6,8 \times 10^5$ ce qui est largement suffisant pour un CVG.

2.3.3 Conclusion.

Deux structures de CVG triaxial ont été conçues, dans le premier cas la structure est uniquement formée d'un cadre déformable et de son système de fixation alors que dans le deuxième cas le cadre est équipé de quatre poutres encastrées au milieu de chacun de ses cotés.

La structure formée d'un cadre sur lequel sont encastrées des poutres a été retenue pour la réalisation du CVG triaxial car elle présente :

- **des coefficients de couplage Coriolis importants ;**
- **une faible dissipation d'énergie dans le support favorable à l'obtention de facteurs de qualité élevés ;**
- **une séparation des déformations pilote et détection favorable à la réduction du couplage en quadrature.**

2.4 Prototypes de CVG triaxial en silicium.

La conception d'une structure de CVG triaxial a été présentée précédemment. Dans la suite, nous allons analyser ses modes de vibration et dimensionner la géométrie de la structure à l'aide de simulations par élément finis. Puis nous présenterons les travaux expérimentaux qui ont été effectués pour confronter ces simulations à des caractérisations de prototypes de structures vibrantes. Pour faciliter leur fabrication, ces prototypes ont été réalisés en silicium. En effet les techniques de micro fabrication associées au silicium étant très bien connues et très bien maîtrisées, des procédés standards peuvent être utilisés. De plus, la structure cristalline cubique du silicium est bien adaptée à la géométrie de la structure formée d'un cadre et de poutres perpendiculaires. Pour se placer dans des conditions mécaniques proches de celles du CVG triaxial en GaAs (100) (voir partie 3.5.2), les structures ont été réalisées dans un substrat de silicium (100).

Pour vérifier le comportement mécanique indépendamment des moyens d'excitation/détection, les prototypes ont été excités et détectés par des moyens externes.

2.4.1 Dimensionnement des prototypes en silicium.

La structure en silicium a été dimensionnée pour que les fréquences du mode pilote et des modes détections coïncident. Ses dimensions sont présentées sur la figure 36. Son épaisseur est de $375\text{ }\mu\text{m}$, le cadre mesure $4300\times 4300\text{ }\mu\text{m}^2$ et sa largeur est de $290\text{ }\mu\text{m}$. Les poutres mesurent $1880\text{ }\mu\text{m}$ de longueur et $210\text{ }\mu\text{m}$ de largeur. Les fréquences de résonance des quatre modes sont proches de 50 kHz .

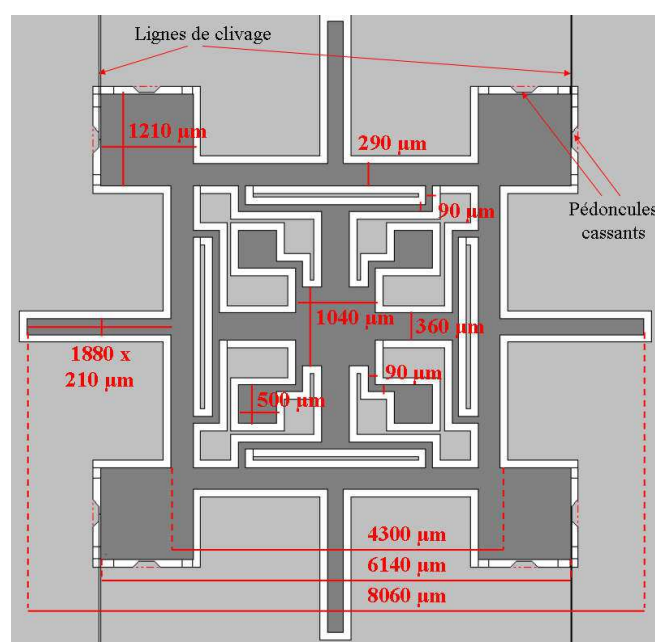


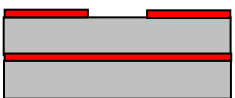
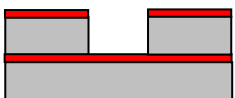
Figure 36 : dimensions des prototypes en silicium

2.4.2 Réalisation des prototypes en silicium.

Les prototypes ont été réalisés par gravure ionique réactive profonde (DRIE) traversante d'un wafer de silicium de 375 μm d'épaisseur avec un bâti de la société STS. Cette gravure profonde est réalisée en utilisant le procédé Bosch [58] qui alterne des cycles de gravure du silicium à l'aide d'un plasma $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ suivie d'une passivation des flancs de gravure. Ce procédé permet d'obtenir des gravures très profondes avec une bonne verticalité des flancs.

Les étapes et les paramètres de la réalisation des structures en silicium sont détaillés dans le tableau 8. Etant donné que l'usinage du wafer le sépare en plusieurs pièces, le wafer à usiner est collé sur un wafer support. Les wafers sont assemblés par une couche de graisse thermique. Afin d'éviter le contact direct entre le wafer à usiner et la graisse thermique, la face arrière du wafer est préalablement protégée par une couche de résine. Le masque de gravure est constitué d'une couche de résine de 6 μm d'épaisseur située sur la face avant du wafer.

Tableau 8 : procédé pour la réalisation de structures de gyromètre 3 axes en silicium

Etapes :	Paramètres :	Schémas :
Déshydratation du wafer	Température : 115°C, durée : 5 minutes	
Dépôt d'une couche protectrice sur la face arrière	Promoteur d'adhérence PRIMER : Accélération : 4000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30 s, Recuit à 115°C pendant 1min30 Résine S1828 : Accélération : 4000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30 s, Recuit à 115°C pendant 1 min 30	
Dépôt d'une couche de résine positive de 6 μm en face avant	Promoteur d'adhérence TIPRIME : Accélération : 4000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30 s, Recuit à 120°C pendant 2 min Résine AZ4562 : Accélération : 2000 rpm/s, vitesse : 2000 rpm, durée : 30 s, Repos : 15 min, Recuit : rampe de T ambiante à 90°C pendant 1 h, Repos : 2 h	
Insolation et développement	Dose : 250 mJ/cm ² , λ : 365 nm Pression du masque sur le substrat : 500 mbar Développeur AZ400K / EDI : 1/4, durée : ~2min30	
Collage du substrat sur un wafer support	Mélange : graisse thermique / isopropanol : 1/1 Etaler 0,4 mL du mélange à l'aide d'une seringue sur le wafer support, laisser sur le bord du wafer une zone de 1.5cm sans graisse. Chauffage du wafer support à 85°C pendant 10 minutes. Assemblage du wafer à graver sur le wafer support, S1828 contre la graisse, avec appui sur les bords. Chauffage à 85 °C 2 minutes, retrait de la plaque et appui à nouveau sur les bords. Nettoyage de la face arrière du wafer support avec une lingette imbibée d'acétone	
Gravure traversante du wafer de silicium	DRIE STS : procédé Bosch Cycle : 9,5 s de gravure / 3,0 s de passivation Gravure : SF_6 450 sccm, O_2 45 sccm, puissance : 2200 W Passivation : C_4F_8 200 sccm, puissance 1500 W Pression initiale : 5 mT, pression de travail : 945 mT Durée : 50 min (240 cycles)	

Décollage / nettoyage	Chauffage des plaques à 120°C et séparation en faisant glisser le substrat à la surface de la plaque support Nettoyage : Acétone pour retirer le gros de la graisse puis AZ100 Remover, 10 min à 70°C	
-----------------------	--	---

Afin de faciliter la séparation des structures, des lignes de clivages sont réalisées entre les structures. Il s'agit de gravures de faible largeur : 20 μm , ce qui limite leur profondeur à environ 200 μm en raison de la dépendance de la vitesse de gravure avec le rapport d'aspect des tranchées. Ces lignes permettent de découper le wafer en puces carrées puis de découper chaque puce pour en détacher la structure sans l'endommager. Les figures 37 et 38 présentent le wafer gravé, le wafer séparé en puces et les structures complètement détachées.

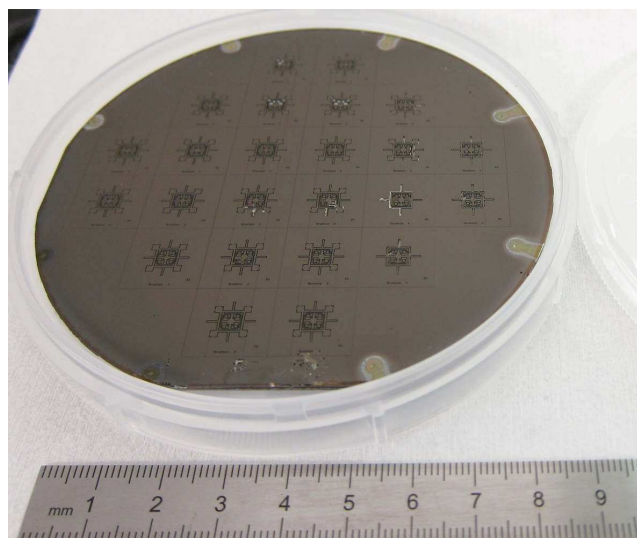


Figure 39 : Structures de CVG triaxiaux réalisées sur un wafer de silicium.

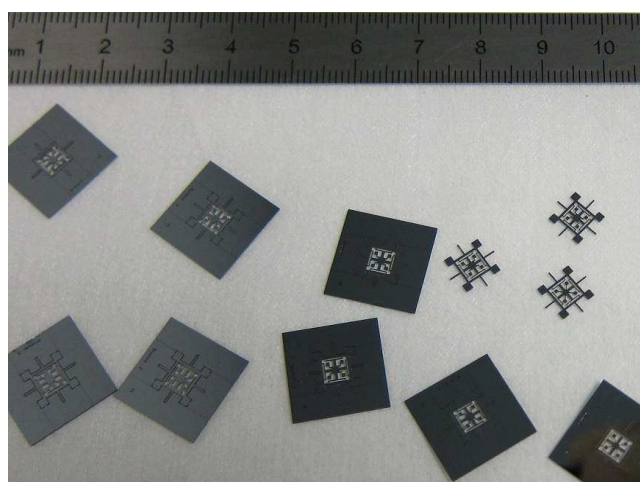


Figure 40 : Structures de CVG triaxiaux détachées de leur wafer par clivage

2.4 Prototypes de CVG triaxial en silicium.

Pour les mesures, des supports adaptés aux dimensions de la structure en silicium ont été réalisés. Ils sont constitués de quatre piliers de 150 μm de haut et 500 μm de côté qui viennent recevoir les quatre zones de fixation de la structure comme le montre la figure 41. Ces supports sont réalisés par gravure d'un wafer de silicium. La structure est fixée sur les piliers avec de la colle Araldite. Une photographie de la structure en silicium collée sur son support est présentée sur la figure 42.

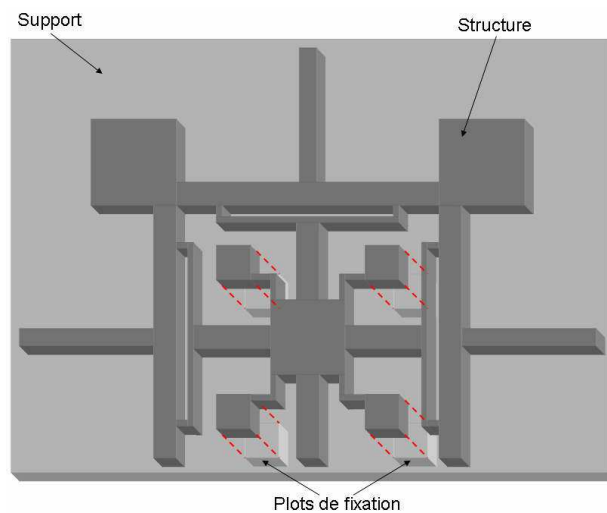


Figure 41 : Schéma du collage de la structure sur son support

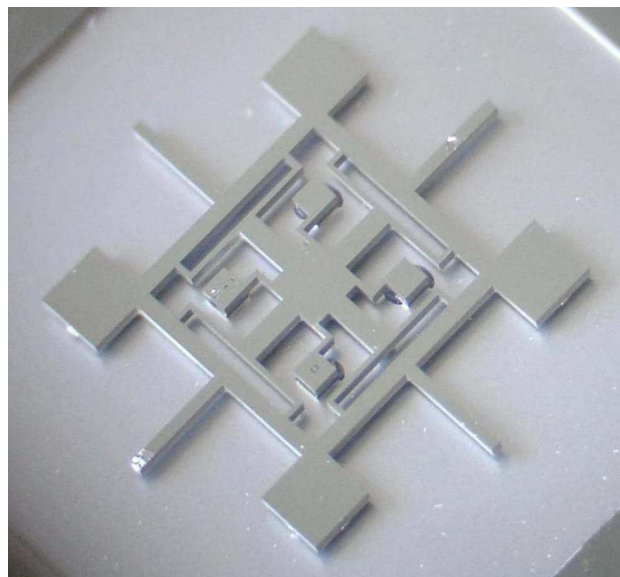


Figure 42 : structure en silicium collée sur son support

2.4.3 Caractérisation dimensionnelle des prototypes.

Une image de la surface de la structure a été réalisée par microscopie optique (figure 43). Cette image a permis contrôler les dimensions de la structure : les longueurs mesurées sur la structure correspondent aux longueurs prévues à $\pm 4 \mu\text{m}$. Ceci correspond à une erreur de $\pm 2\%$ au niveau de la largeur des poutres et de la largeur du cadre. De même l'épaisseur du wafer est connue à $\pm 2\%$. La fréquence de résonance des modes de flexion étant proportionnelle à l'épaisseur vibrante, une erreur de $\pm 2\%$ est à prévoir sur les fréquences de résonance des différents modes.

L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) des flancs de la structure (figure 44) montre que la verticalité et la rugosité des flancs sont très bonnes : le comportement de la structure devrait donc être conforme aux simulations. De même, un gros plan sur les points de fixations (figure 44) montre que le collage de la structure est tout à fait réussi.

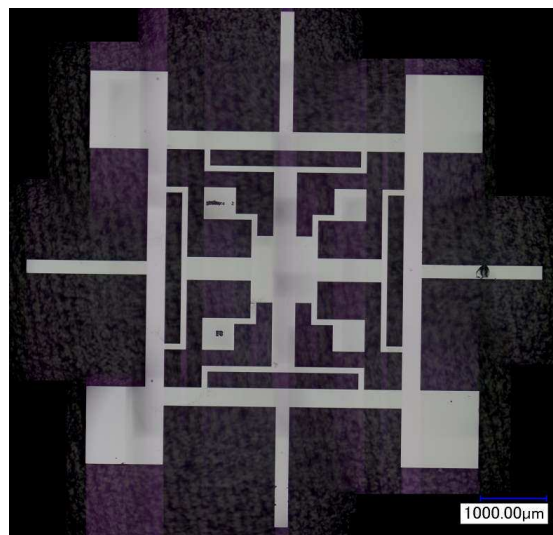


Figure 43 : image de la structure en silicium observée au microscope optique

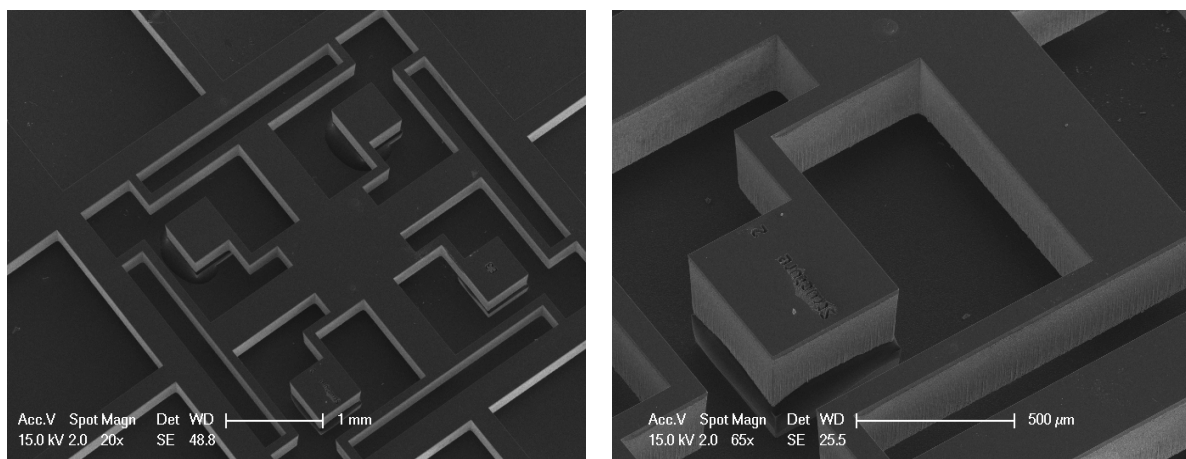
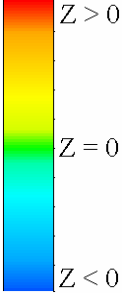
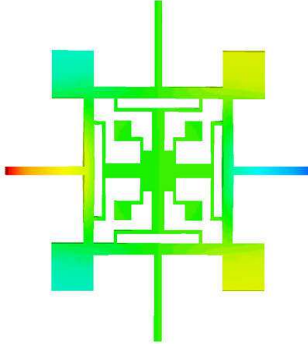
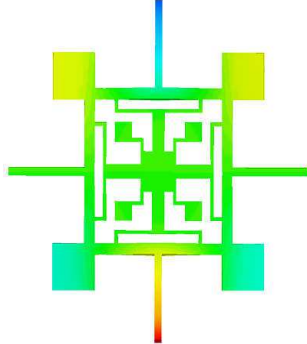
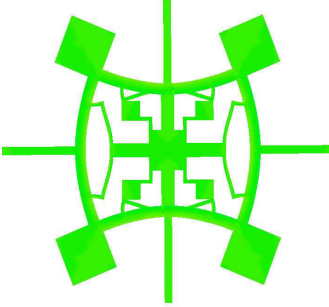
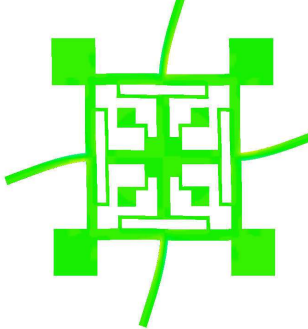
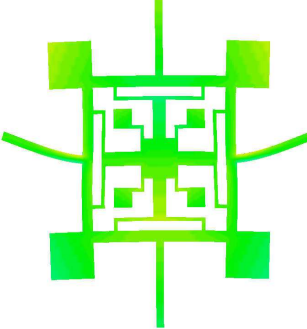
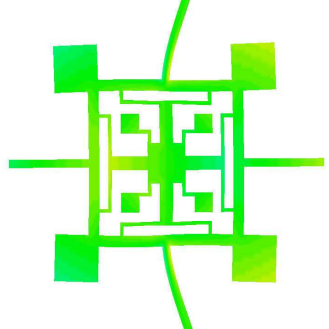
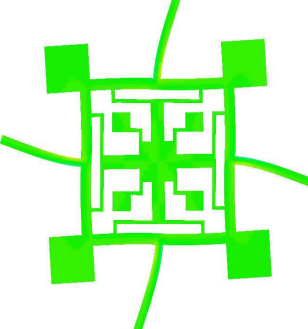
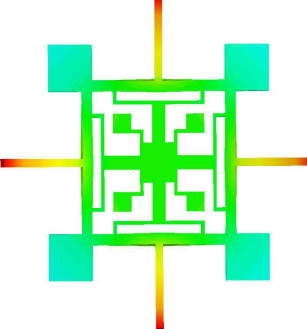


Figure 44 : images MEB de la partie centrale de la structure en silicium (à gauche) et zoom sur un point de fixation(à droite).

2.4.4 Simulation des modes de la structure en silicium.

Les modes de la structure en silicium ont été déterminés à partir de simulations par éléments finis en analyse modale grâce au code multi-physique Oofelie développé par la société Open Engineering appartenant au groupe Samtech. Les modes dont les fréquences de résonance sont situées à moins de 10 kHz des fréquences utiles (50 kHz) sont présentés dans le tableau 9. Huit modes ont une résonance comprise entre 40 et 60 kHz : le mode pilote P, les modes détections X/Y et Z, et quatre modes non utilisés nommés par ordre de fréquences croissante A, B, C et D. On constate que sept résonances se situent à environ 50 kHz et qu'une résonance se situe à environ 56 kHz.

Tableau 9 : Modes de la structure en silicium ayant une fréquence de résonance située à moins de 15 kHz des résonances des modes utiles. Les couleurs représentent l'axe hors plan Z : le vert représente les zones situées dans le plan, les couleurs chaudes représentent les zones situées au dessus de plan et les couleurs froides représentent les zones situées en dessous du plan.

 $Z > 0$ $Z = 0$ $Z < 0$	 Modes X : $f = 49\,070\text{ Hz}$	 Modes Y : $f = 49\,070\text{ Hz}$
 Mode P : $f = 49\,746\text{ Hz}$	 Mode Z : $f = 50\,044\text{ Hz}$	 Mode A : $f = 50\,978\text{ Hz}$
 Mode B : $f = 50\,978\text{ Hz}$	 Mode C : $f = 51\,005\text{ Hz}$	 Mode D : $f = 55\,990\text{ Hz}$

2.4.5 Caractérisation des modes de la structure en silicium.

Les modes de la structure en silicium ont été excités en fixant celle-ci sur une céramique piézoélectrique métallisée et alimentée avec une tension sinusoïdale. Cette céramique permet d'exciter la structure selon X, Y ou Z. La fréquence et la déformée des modes de résonance ont été caractérisées par vibrométrie optique plein champ moyennée ou stroboscopique avec le profilomètre-vibromètre Zoomsurf de la société Fogale nanotech. L'objectif de cette caractérisation est de vérifier la conformité entre les modes simulés et les modes réels. Cette étude est réalisée sous vide à une pression inférieure à 1 mbar.

Pour repérer les principales zones d'intérêt du spectre de la structure un balayage en fréquence a été effectué entre 44 et 56 kHz. Ce spectre a été effectué en excitant la structure suivant l'axe hors plan Z et en détectant les mouvements hors plan par microscopie interférométrique monochrome moyennée dans le temps avec démodulation par transformée de Fourier [59]. Ce spectre a été effectué sur l'extrémité d'une poutre car il s'agit d'une zone où les déplacements sont importants pour quasiment tous les modes. Ce spectre est présenté sur la figure 45. Deux pics de résonance sont nettement visibles : l'un à 47,8 kHz à proximité des fréquences déterminées en simulation pour les modes utiles et l'autre à 54,9 kHz à proximité de la fréquence déterminées en simulation pour le mode D.

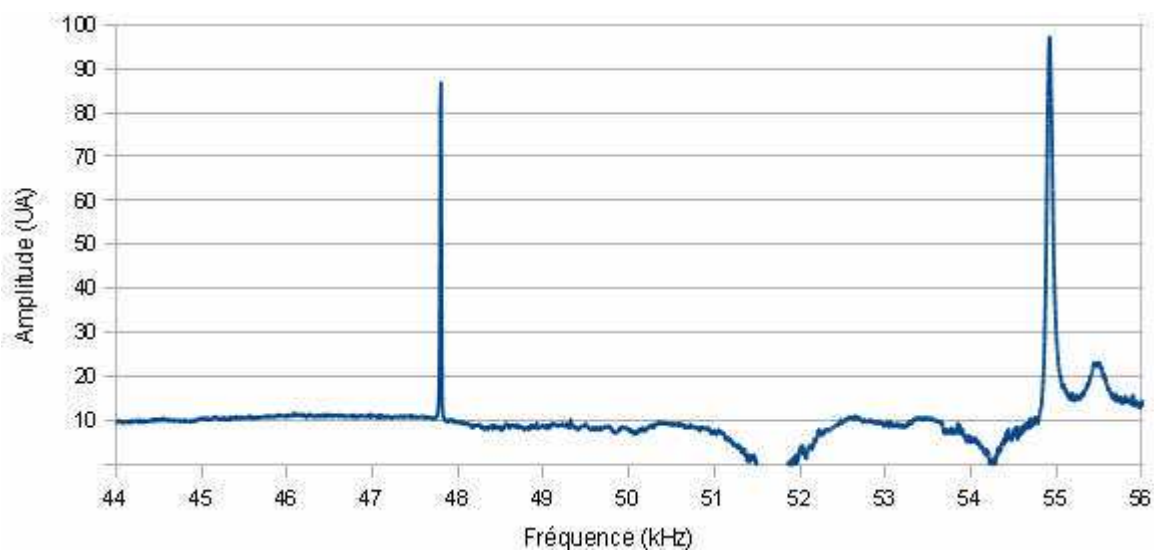


Figure 45 : Spectre de vibration d'une structure de CVG triaxial

Des balayages plus fins ont ensuite été effectués autour du pic de résonance à 47,8 kHz. Comme le précédent, ces spectres ont été effectués en excitant la structure suivant l'axe hors plan et en détectant les mouvements hors plan par microscopie interférométrique. Ces balayages ont permis de distinguer quatre pics de résonance de fréquence proches. Ces résonances ont des facteurs de qualité de l'ordre de 5 000 à pression ambiante.

Trois spectres ont été effectués sur des zones différentes afin d'identifier les quatre pics de résonance. Un spectre a été effectué au bout d'une poutre d'axe X, un autre au bout d'une poutre d'axe Y et le troisième a été effectué sur une des masselottes. Ces spectres sont présentés sur la figure 46. Sur la poutre X, la résonance la plus importante est à 47 775 kHz et sur la poutre Y la résonance la plus importante est à 47 803 kHz : on peut donc supposer que ces deux modes sont les modes détection X et Y. Ces deux modes sont aussi visibles sur la masselotte ce qui est en accord avec les simulations de leurs déformées vibratoires. La masselotte présente aussi une résonance moins intense à 47 420 Hz : on peut supposer qu'il s'agit du mode pilote car parmi les modes restant c'est le seul qui génère un mouvement important sur les masselottes. Sur la poutre X, un pic à 47 280 Hz est bien visible malgré son faible facteur de qualité, il s'agit probablement du mode A qui, de par sa géométrie a un faible facteur de qualité mais répond fortement à l'excitation selon X. Sur la poutre Y, un pic à 47 340 Hz présente un faible facteur de qualité et est à peine visible, il s'agit probablement du mode B qui, de par sa géométrie présente un faible facteur de qualité et répond peu à l'excitation X. Les modes Z et C sont de par leur géométrie très difficile à exciter sans transduction intégrée, ils ont donc probablement été excités très faiblement par la céramique piézoélectrique externe et n'ont pas pu être caractérisés.

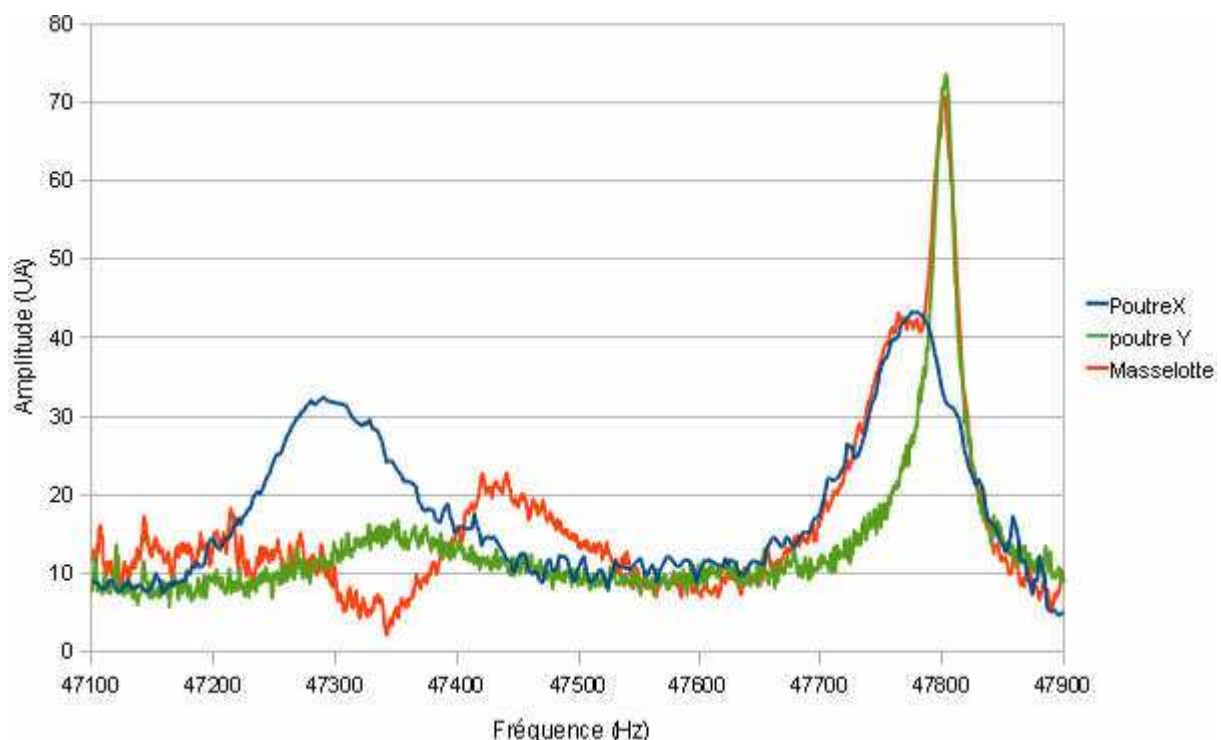


Figure 46 : Spectre de vibration mesuré en différents points de la structure

Afin d'identifier les résonances repérées précédemment, la déformée hors plan de chaque résonance a été cartographiée par microscopie interférométrique stroboscopique avec démodulation par double décalage de phase [60]. Les déformées hors plan des résonances à 47 803 Hz et 47 775 Hz sont présentées sur la figure 47. Elles sont clairement identifiables : il s'agit des modes détection X et Y. En revanche les déformées hors plan des modes à 47 340 Hz, 47 280 Hz et 47 420 Hz ne comportent que du bruit de mesure, ce qui tend confirmer qu'il s'agit de modes de vibration dans le plan.

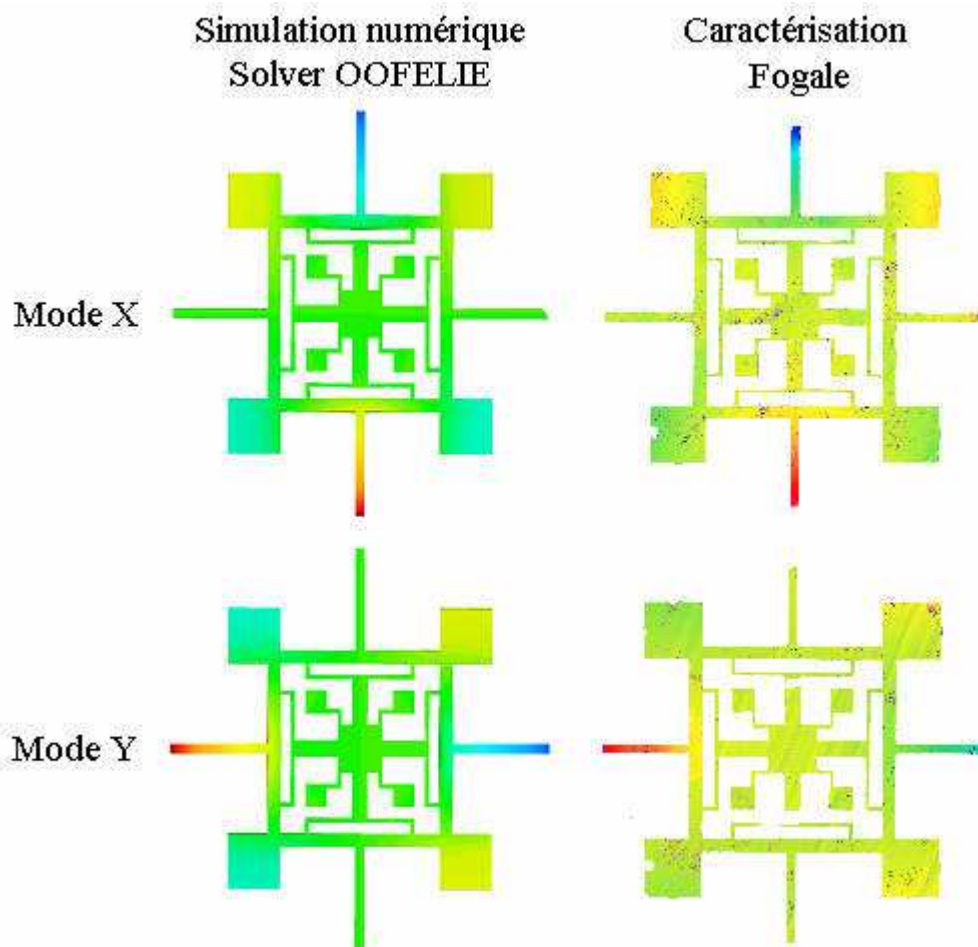


Figure 47 : Identification au profilomètre optique Fogale des modes détection X et Y

Les mouvements dans le plan peuvent être identifiés par recalage subpixel d'images [61,62] cependant, dans le cas des modes à 47 340 Hz, 47 280 Hz et 47 420 Hz, les amplitudes de vibration à la tension maximale de la céramique piézoélectrique étaient insuffisantes pour sortir du bruit de mesure.

Le tableau 10 résume les résultats de l'identification des modes et permet de comparer les fréquences mesurées et les fréquences simulées. Les modes X et Y ont été identifiés avec certitude et leurs déformées vibratoires correspondent très bien aux déformées prévues en simulation. Le mode pilote a probablement été observé lui aussi et même si le mode Z n'a pas été observé, l'observation de plusieurs autres modes de la structure confirme qu'elle se comporte conformément aux simulations. Les écarts relatifs entre les fréquences simulées et les fréquences mesurées sont compris entre 2% et 7% et peut être en partie expliquée par les incertitudes de réalisation qui sont d'environ 2% sur la largeur des poutres.

**Tableau 10 : Identification des résonance de la structure et comparaison
entre les fréquences simulées et les fréquences mesurées**

Mode	Fréquence simulée	Fréquence mesurée	Ecart relatif
X	49,07	47,78	3 %
Y	49,07	47,80	3 %
P	49,75	47,42	5 %
Z	50,04	-	-
A	50,98	47,28	7 %
B	50,98	47,34	7 %
C	51,01	-	-
D	55,99	54,90	2 %

2.5 Conclusion.

Une analyse théorique du comportement mécanique des CVG a été menée et a abouti à l'expression de la sensibilité mécanique. Cette analyse a mis en évidence la notion de coefficient de couplage Coriolis. Une bonne sensibilité mécanique nécessite un coefficient de couplage Coriolis important. Pour se familiariser avec cette notion, les coefficients de couplage Coriolis de différents résonateurs simples ont été étudiés, puis un CVG triaxial présentant trois coefficients de couplage Coriolis élevés a été conçu. Ce CVG triaxial constitué de quatre poutres encastrées sur un cadre déformable présente un avantage innovant : les contraintes du mode pilote sont situées uniquement dans le cadre alors que les contraintes du mode détection sont situées uniquement dans les poutres. Cet avantage, qui a donné lieu au dépôt d'un brevet d'invention, permet de réduire le couplage en quadrature entre le mode pilote et les modes détection. Pour caractériser cette structure, des prototypes en silicium ont été réalisés et leurs modes ont été excités par transduction externe et caractérisés au profilomètre optique Fogale. Les caractérisations ont permis d'observer trois des quatre modes de vibration utiles et ont montré que la structure mécanique se comporte conformément aux simulations. La structure mécanique du CVG triaxial ayant été mise au point, il nous faut maintenant concevoir son système d'excitation/détection intégré.

3

Modélisation et conception du système d'excitation/détection du CVG triaxial

Dans le chapitre précédent, la structure vibrante d'un CVG triaxial a été présentée. Cette structure mécanique a été optimisée de manière à obtenir une sensibilité mécanique importante. Dans ce chapitre, nous présenterons la conception d'un système pour l'excitation et la détection intégrées des modes de la structure du CVG triaxial. L'objectif sera d'obtenir la meilleure transduction possible afin d'obtenir, en combinaison avec la sensibilité mécanique, un facteur d'échelle le plus élevé possible.

Le chapitre commence par la présentation de la chaîne de mesure du CVG. Les liens entre la structure mécanique et le système d'excitation détection ainsi que le facteur d'échelle seront présentés. Ensuite, les moyens d'excitation/détection électrostatique et piézoélectrique sont comparés et le choix de la transduction piézoélectrique est justifié. Ensuite, différents matériaux piézoélectriques sont comparés et le choix du GaAs est justifié. La structure du CVG triaxial est alors dimensionnée pour une réalisation en GaAs puis les électrodes sont conçues pour optimiser la détection. Les facteurs d'échelle potentiels du CVG triaxial piézoélectrique sont alors estimés.

3.1 Chaîne de mesure dans un CVG.

La chaîne de mesure d'un CVG est présentée sur la figure 48. Un CVG détecte un signal d'entrée : la vitesse de rotation Ω et il fournit un signal électronique de sortie qui permet de déterminer la vitesse de rotation.

Le mode pilote est excité à sa fréquence de résonance par le système d'excitation. Son amplitude et sa fréquence de vibration doivent rester constants, ils sont donc mesurés par un système de détection qui asservit la tension appliquée au système d'excitation. En présence d'une rotation, la vitesse générée par le mode pilote, engendre une force de Coriolis qui excite le mode détection par le biais du coefficient de couplage Coriolis. Le mode détection est alors excité à une amplitude qui est le produit de la vitesse de rotation et de sa sensibilité mécanique (voir partie 2.1.4). Ensuite, grâce à un système de détection, l'amplitude du mode détection est transformée en un signal de sortie qui permet de déterminer la vitesse de rotation. Dans notre cas, le signal de sortie sera une quantité de charges électriques.

Le facteur d'échelle est le rapport entre le signal de sortie et la vitesse de rotation. Le facteur d'échelle représente la performance globale du CVG : il est le produit de la sensibilité mécanique de la structure et la sensibilité du système de détection.

Dans ce chapitre, l'objectif sera d'optimiser les facteurs d'échelle du CVG triaxial en concevant un système d'excitation/détection optimal pour la structure qui a été conçue dans le chapitre précédent.

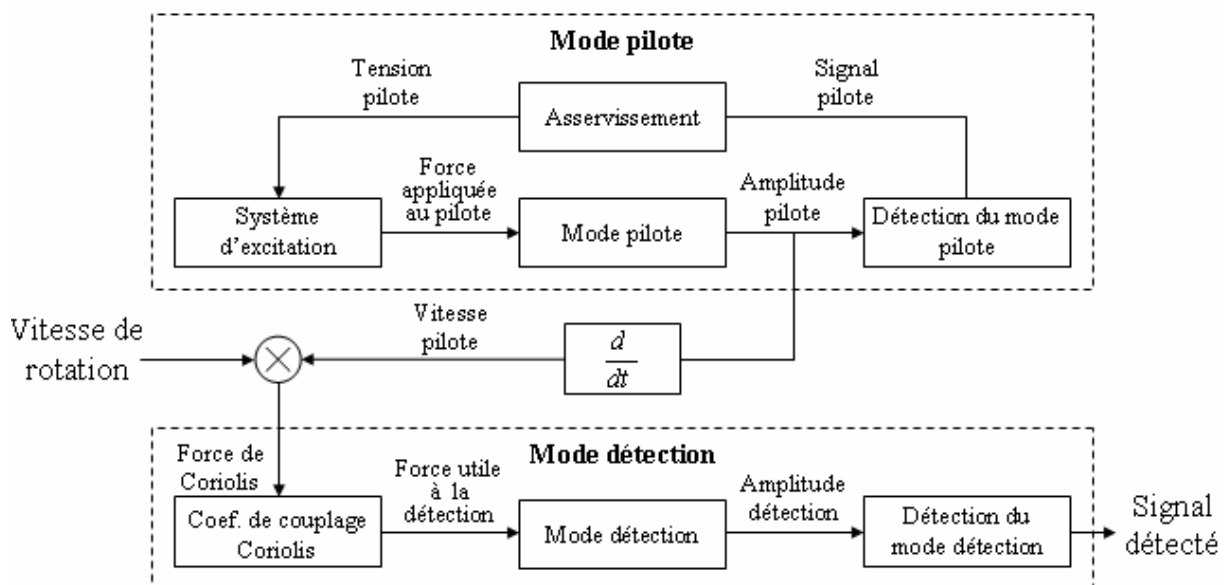


Figure 48 : Schéma d'ensemble de la chaîne de mesure dans un CVG monoaxial

3.2 Système d'excitation/détection.

Le fonctionnement de la structure du CVG triaxial qui a été conçue au chapitre précédent nécessite des transductions intégrées pour exciter le mode pilote et des systèmes pour détecter le mode pilote et chacun des trois modes détection.

Il existe de nombreux moyens d'exciter et détecter les vibrations mécaniques des MEMS : électrostatique, piézoélectrique, piézorésistif [63], électrothermique [64], optique [65], ... Parmi ces moyens, nous avons choisis de nous intéresser principalement au couplage électrostatique et à la piézoélectricité car se sont les plus utilisés dans le domaine des CVG MEMS. Dans la suite de cette partie, les moyens d'excitation/détection électrostatiques et piézoélectriques sont présentés et comparés, dans le but de sélectionner le système d'excitation/détection du CVG triaxial.

3.2.1 Excitation/détection électrostatique.

L'excitation électrostatique exploite l'attraction électrostatique entre les électrodes d'un condensateur [66] et la détection électrostatique exploite le changement de capacité dû à la déformation d'un condensateur [67]. Le condensateur est formé d'une électrode mobile située sur un résonateur et d'une contre-électrode située en face de la précédente sur un support fixe. Les deux électrodes sont séparées par une couche isolante d'air ou de vide.

Considérons le cas simple du condensateur plan présenté sur la figure 49. Lorsqu'une tension est imposée entre les électrodes du condensateur, une force d'attraction électrique s'établit entre les électrodes et la structure qui porte l'électrode mobile se déforme.

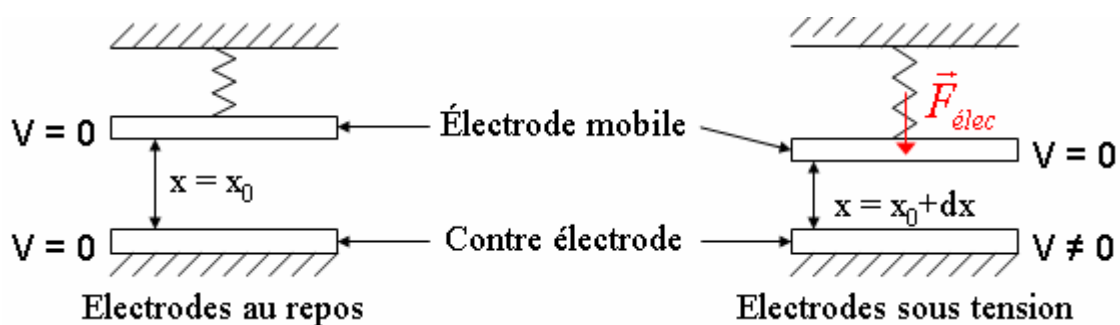


Figure 49 : Schéma d'un système d'excitation/détection électrostatique

La détection est effectuée en mesurant les variations de capacité dues à la modification de la distance inter-électrodes. La capacité C entre les électrodes est égale à :

$$C = \frac{S\varepsilon}{g} = \frac{S\varepsilon}{x_0 + dx} \quad (80)$$

Avec ε la permittivité du milieu isolant, S la surface des électrodes, x la distance inter électrodes en chaque instant, x_0 la distance inter électrodes en l'absence d'attraction et dx l'amplitude de déplacement.

La variation de capacité n'est pas proportionnelle à l'amplitude de déplacement donc la détection électrostatique n'est pas linéaire.

Appliquée au CVG triaxial qui a été conçu, l'excitation/détection électrostatique présente des avantages et des inconvénients :

- **Le principal avantage de l'excitation/détection électrostatique est sa compatibilité avec tous matériaux (semi)conducteurs ou métallisés et notamment le silicium.**
- **La détection électrostatique est non linéaire, l'information mesurée nécessite donc un traitement.** Cette détection est donc plus adaptée au capteur dont le déplacement est asservi à une valeur nulle.
- L'excitation/détection électrostatique nécessite des contre-électrodes. Dans le cas du CVG triaxial, il faudra placer des contre-électrodes sur les cotés du cadre pour le mode pilote, sous les poutres pour les modes détection X et Y et sur les cotés des poutres pour le mode détection Z (voir figure 50). **Les contre-électrodes pour l'excitation/détection électrostatique du CVG triaxial ajoutent beaucoup de complexité à la réalisation.**
- Enfin, le principal problème est que la détection électrostatique est sensible au déplacement des éléments vibrants. Or le mode pilote déplace les poutres, donc le mouvement pilote sera détecté et parasitera le signal du mode détection. Il s'agit d'un couplage en quadrature. **Par conséquent, la détection électrostatique ne permet pas de réduire le couplage en quadrature (voir partie 2.3.2).**

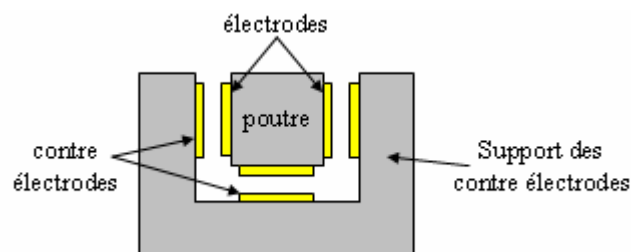


Figure 50 : Vue en coupe d'une poutre du CVG triaxial et des contre électrodes qui sont nécessaires pour la détection capacitive des modes détection.

En conclusion, l'excitation/détection électrostatique n'est pas adaptée à la réalisation du CVG triaxial, pour pallier ces difficultés on utilisera une excitation détection piézoélectrique.

3.2.2 Excitation/détection piézoélectrique.

La piézoélectricité est une propriété de certains cristaux non centro-symétrique et de certaines céramiques. Dans ces matériaux, un champ électrique génère une contrainte mécanique et inversement une déformation génère un déplacement de charges électriques.

Les contraintes et les déplacements de charge dans les matériaux piézoélectriques sont régis par le système d'équations constitutives suivantes [68] :

$$\begin{cases} \bar{\bar{T}} = \bar{\bar{c}}\bar{\bar{S}} - \bar{\bar{e}}\vec{E} \\ \vec{D} = \bar{\bar{e}}\vec{E} + \bar{\bar{\epsilon}}\bar{\bar{S}} \end{cases} \quad (81)$$

Avec $\bar{\bar{T}}$ le tenseur des contraintes, $\bar{\bar{S}}$ le tenseur des déformations, $\vec{D}$ le déplacement électrique, $\vec{E}$ le champ électrique, $\bar{\bar{c}}$ le tenseur d'élasticité, $\bar{\bar{e}}$ le tenseur piézoélectrique et $\bar{\bar{\epsilon}}$ le tenseur de permittivité électrique.

L'excitation est effectuée en imposant une tension électrique aux bornes du matériau piézoélectrique. Cette tension crée un champ qui contraint le matériau par effet piézoélectrique et qui aboutit à sa déformation élastique.

La détection est effectuée en mesurant les charges électriques q_+ et q_- collectées par les électrodes positive et négative. D'après le théorème de Gauss appliqué à une interface isolant/conducteur, la quantité de charges recueillies sur une surface conductrice est donné par :

$$q_+ = \iint_{S_+} \vec{D} \cdot \vec{n}_+ dS \quad q_- = \iint_{S_-} \vec{D} \cdot \vec{n}_- dS \quad (82)$$

Avec S_+ et S_- les surfaces des électrodes et $\vec{n}_+$ et $\vec{n}_-$ les vecteurs unitaires orthogonaux aux surfaces des électrodes.

Le déplacement électrique $\vec{D}$ est composé de deux termes : un terme piézoélectrique $\bar{\bar{e}}\bar{\bar{S}}$ en phase avec la déformation et un terme capacitif $\bar{\bar{\epsilon}}\vec{E}$ en phase avec la tension d'excitation. A la résonance du mode pilote, la déformation est en quadrature avec la tension d'excitation donc $\bar{\bar{e}}\bar{\bar{S}}$ est en quadrature avec $\bar{\bar{\epsilon}}\vec{E}$. Comme le terme $\bar{\bar{\epsilon}}\vec{E}$ peut être éliminé grâce à des astuces de conception ou par un traitement électronique éliminant ce terme en quadrature, on peut négliger le terme $\bar{\bar{\epsilon}}\vec{E}$. On obtient alors :

$$\Delta q = q_+ - q_- = \iint_{S_+} \bar{\bar{e}}\bar{\bar{S}} \cdot \vec{n}_+ dS - \iint_{S_-} \bar{\bar{e}}\bar{\bar{S}} \cdot \vec{n}_- dS \quad (83)$$

En supposant que les électrodes sont sélectives c'est-à-dire que seul le mode pour lequel elles ont été conçues génère une différence de charge entre elles, la quantité de charges collectées est égale à :

$$\Delta q = A_d \left(\iint_{S_+} \bar{\bar{e}}\bar{\bar{S}}_d \cdot \vec{n}_+ dS - \iint_{S_-} \bar{\bar{e}}\bar{\bar{S}}_d \cdot \vec{n}_- dS \right) \quad (84)$$

Avec A_d l'amplitude de détection et $\bar{\bar{S}}_d$ la déformation normalisée du mode de détection.

La différence de charge entre les électrodes est proportionnelle à l'amplitude donc la détection piézoélectrique est linéaire.

Appliquée au CVG triaxial qui a été conçu, l'excitation/détection piézoélectrique présente des avantages et des inconvénients :

- **L'excitation/détection piézoélectrique requiert l'utilisation d'un matériau piézoélectrique.**
- **La détection piézoélectrique est linéaire.**
- **L'excitation/détection piézoélectrique ne nécessite pas de contre électrode.**
- La détection piézoélectrique est sensible aux déformations. Or, le mode pilote met en translation les poutres utilisées pour la détection sans les déformer donc il ne parasitera pas la détection. **Par conséquent, le CVG triaxial sera peu sensible au couplage en quadrature (voir partie 2.3.2).**

En conclusion, le CVG triaxial sera équipé d'un système d'excitation/détection piézoélectrique car il permet grâce à la géométrie qui a été conçue au chapitre précédent d'obtenir de faibles couplages en quadrature.

3.2.3 Expression du facteur d'échelle.

Le facteur d'échelle FE est le rapport entre le signal de sortie d'un capteur et le signal détecté, c'est le produit de :

- **la sensibilité mécanique $S_{méca}$ qui est le rapport entre l'amplitude de détection A_d et la vitesse de rotation Ω**
- **la sensibilité piézoélectrique $S_{piézo}$ qui est le rapport entre la différence de charge Δq des électrodes et l'amplitude de détection A_d**

$$S_{méca} = \frac{A_d}{\Omega} = \frac{A_p K}{2\pi \Delta f} \quad (85)$$

$$S_{piézo} = \frac{\Delta q}{A_d} = \iint_{S_+} \bar{\bar{e}} \bar{\bar{S}}_d \cdot \bar{n}_+ dS - \iint_{S_-} \bar{\bar{e}} \bar{\bar{S}}_d \cdot \bar{n}_- dS \quad (86)$$

$$FE = \frac{\Delta q}{\Omega} = S_{méca} S_{piézo} \quad (87)$$

Avec A_p l'amplitude pilote, K le coefficient de couplage Coriolis, Δf l'écart de fréquence entre les modes, S_+ et S_- les surfaces des électrodes, $\bar{\bar{e}}$ le tenseur piézoélectrique, $\bar{\bar{S}}_d$ la déformation normalisée du mode détection, $\bar{n}_+$ et $\bar{n}_-$ les vecteurs unitaires perpendiculaires aux surfaces des électrodes.

Pour optimiser la sensibilité piézoélectrique, il faut :

- sélectionner un matériau qui présente des coefficients piézoélectriques importants (voir partie 3.3) ;
- maximiser la taille de la structure pour maximiser la taille des électrodes (voir partie 3.4) ;
- concevoir des électrodes qui collectent les charges piézoélectriques de manière optimale (voir partie 3.5).

3.3 Choix du matériau piézoélectrique

Pour réaliser la structure du CVG triaxial, il faut un matériau compatible avec les technologies MEMS et pour mettre en œuvre son excitation/détection piézoélectrique il faut un matériau qui possède des coefficients piézoélectriques élevés (et de faibles constantes diélectriques [69]). Dans le cadre de cette thèse, nous avons préféré éviter les assemblages bimorphe pour simplifier le procédé de réalisation et éviter les problèmes liés à la dilation thermique de matériaux différents. Notre objectif est donc de concevoir une structure monolithique à partir d'un matériau qui présente de bons coefficients piézoélectriques et un fort potentiel de miniaturisation.

Le PZT est l'un des matériaux qui présentent les coefficients piézoélectriques les plus importants : 40 à 50 C/m (contre 0,17 C/m pour le quartz), cependant le potentiel de miniaturisation de ce matériau est limité car il s'agit d'une céramique. Par conséquent, la précision de l'usinage du PZT est limitée par la taille des grains de ce matériau [69], et sa viscosité élastique est importante ce qui limite fortement le facteur de qualité de ses vibrations.

Le quartz est le matériau piézoélectrique le plus utilisé, notamment dans l'industrie horlogère. Plusieurs CVG MEMS, dont le VIG de l'Onera [23], ont été réalisés en quartz. L'usinage chimique du quartz est très mature et très précis, cependant il génère des figures d'attaque qui ont un impact sur les modes de vibrations. Dans le cas du VIG, cet impact a été pris en compte et compensé; cependant, dans le cas du CVG triaxial, la prise en compte des figures d'attaques s'avère très complexe. Au début de cette thèse (2008), la gravure plasma profonde du quartz était très récente et pas encore disponible, ni à l'Onera ni à l'IEF par conséquent son utilisation n'a pas été envisagée [70].

Les matériaux III-V semblent plus prometteurs pour atteindre le compromis recherché. En effet, la plupart des matériaux III-V sont piézoélectriques. De plus, certains d'entre eux, tel que GaAs, InP et α -GaN sont abondamment employés dans l'industrie des semi-conducteurs et bénéficient d'une grande maturité technologique. Ainsi, ces matériaux présentent un fort potentiel de miniaturisation qui pourrait être utilisé pour la réalisation du CVG triaxial.

Pour la réalisation du CVG triaxial un cristal cubique est préférable car il est plus adapté à la symétrie de la structure. Or, les III-V à base de nitrure ont généralement une structure cristalline hexagonale mais ils existent aussi sous forme cubique et les autres III-V ont généralement une structure cubique.

3.3 Choix du matériau piézoélectrique

Les III-V cubiques ont une structure cristalline de type Zinc-Blende, leur tenseur piézoélectrique est de la forme :

$$e_{\text{Zinc-Blende}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{14} \end{pmatrix} \quad (88)$$

Les coefficients piézoélectriques des III-V cubiques sont présentés dans le tableau 11. Les cinq matériaux III-V cubiques les plus piézoélectriques : *c*-AlN, *c*-BN, β -GaN, BP et AlAs sont rarement utilisés en microélectronique donc ils ne sont pas disponibles sous forme de substrats massifs ou sont très onéreux. Ils sont usuellement disponibles sous forme de couches minces épitaxiées ou sous forme de petits cristaux, donc ils ne conviennent pas pour la réalisation du CVG triaxial. **En revanche, le GaAs (100) présente une maturité technologique importante et est disponible sous forme de substrats massifs, de plus son coefficient piézoélectrique est égal à -0,16 C/m, il est donc quasiment aussi élevé que celui du quartz. Le GaAs est donc préconisé pour la réalisation du CVG triaxial,** cependant cette réalisation pourrait aussi être transposée à d'autres matériaux III-V cubiques.

**Tableau 11 : coefficients piézoélectriques des matériaux III-V cubiques
par ordre décroissant en valeur absolue [71]**

Matériau	e_{14} (C/m)	Matériau	e_{14} (C/m)
<i>c</i> -AlN	1,13	GaP	0,10
<i>c</i> -BN	-1,04	InP	-0,083
β -GaN	0,61	InSb	0,071
BP	-0,36	AlSb	0,068
AlAs	-0,23	AlP	-0,06
GaAs	-0,16	InAs	0,045
GaSb	0,126		

La réalisation de MEMS en GaAs a été étudiée par J. Söderkvist et K. Hjort [72,73]. D'après leurs conclusions, le GaAs réunit les avantages du quartz et du silicium cependant sa résistivité pourrait être problématique. En effet, le GaAs est un semi-conducteur. Or, la résistivité du GaAs pourrait nuire à l'asservissement du mode pilote et détériorer la marche aléatoire du CVG (voir parties 5.3 et 5.4). Pour limiter ce phénomène, il faut choisir le GaAs le plus résistif possible : parmi les différents produits que nous avons consultés le plus résistif est le GaAs semi-isolant dopé au carbone fournit par AXT [74]. Le dopage au carbone d'une concentration de $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ crée des niveaux profonds dans la bande interdite qui le rendent plus isolant : sa résistivité est supérieure à $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ à température ambiante. **Le GaAs semi isolant dopé C est donc préconisé pour la réalisation du CVG triaxial.**

3.4 Dimensionnement du CVG triaxial en GaAs.

Le CVG triaxial a été dimensionné pour que son épaisseur corresponde à celle des wafers de GaAs (100) standards, c'est-à-dire 450 μm (les wafers (100) sont plus avantageux d'un point de vue piézoélectrique, voir partie 3.5.2).

Cette épaisseur importante est avantageuse car :

- Par homothétie, si l'épaisseur de la structure est importante, sa surface sera importante et permettra de réaliser de grandes électrodes générant une sensibilité piézoélectrique importante.
- Le GaAs est un matériau fragile et une épaisseur importante est préférable pour lui donner de la tenue mécanique (robustesse).
- La taille importante de la structure facilitera sa manipulation notamment le collage des zones de fixation.

Cependant, les MEMS en GaAs existants sont généralement réalisés dans des membranes suspendues de quelques micromètres d'épaisseur [75] et les méthodes usuelles de gravure du GaAs sont plus adaptées aux épaisseurs faibles qu'aux fortes épaisseurs. Nous avons donc développé des méthodes de gravure appropriées qui seront décrites dans la partie 4.

La structure en GaAs (100) aura la même géométrie que les prototypes en silicium (100) (voir partie 2.4). Seule la taille diffère puisque les prototypes en silicium ont une épaisseur de 375 μm alors que la structure en GaAs aura une épaisseur de 450 μm . Ce redimensionnement a été effectué de manière homothétique puis les dimensions ont été légèrement retouchées pour compenser la dispersion des fréquences de résonance des quatre modes due à la différence entre les propriétés mécaniques du silicium et du GaAs. La modification de la longueur des poutres permet de changer les fréquences des modes détection en changeant peu la fréquence du mode pilote ; et la modification de la largeur des poutres permet de modifier la fréquence du mode Z en changeant peu les fréquences des trois autres modes.

Les dimensions du CVG triaxial en GaAs sont présentées sur la figure 51. Son épaisseur est de 450 μm . Le cadre mesure 5080×5080 μm^2 et sa largeur est de 340 μm . Les poutres mesurent 2620 μm de longueur et 240 μm de largeur. Les fréquences des modes ont été déterminées à partir de simulations par éléments finis : le mode pilote et les modes détection X, Y et Z ont des fréquences respectivement égales à 22 254 Hz, 21 663 Hz, 21 667 Hz et 21 774 Hz.

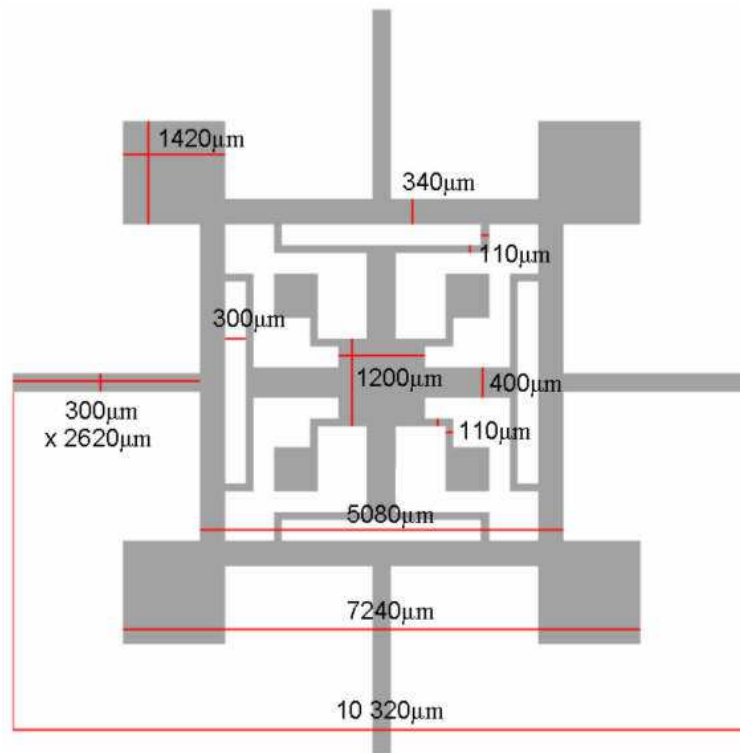


Figure 51 : Dimensions de la structure du CVG triaxial

3.5 Conception du système d'excitation/détection piézoélectrique.

L'objectif de cette partie est de concevoir des électrodes pour l'excitation/détection piézoélectrique du CVG triaxial en GaAs (100). Ces systèmes d'électrodes doivent présenter des sensibilités piézoélectriques optimales. De plus, pour limiter le couplage en phase et le couplage en quadrature, les électrodes pilotes seront situées uniquement sur le cadre déformable et les électrodes de détection uniquement sur les poutres (voir partie 2.3.2).

Les modes du CVG triaxial s'apparentent à des flexions : les modes détection X et Y sont composés de flexions hors plan des poutres, le mode détection Z est composé de flexion dans le plan des poutres et le mode pilote est composé de flexion dans le plan des cotés du cadre qui sont des poutres.

Par conséquent, pour concevoir les électrodes du CVG triaxial on commencera par concevoir des électrodes pour les flexions dans le plan et hors plan de poutre en GaAs puis on en déduira les électrodes des quatre modes du CVG triaxial.

L'objectif de cette partie est de sélectionner l'orientation cristalline et le système d'électrodes optimales pour l'excitation/détection des flexions hors plan et dans le plan de poutres en GaAs.

Or, la flexion d'une poutre génère deux types de contraintes [55] :

- La contrainte principale est une extension/compression longitudinale qui est de signe opposée de part et d'autre du plan médian.
- La contrainte secondaire est un cisaillement dans le plan de flexion qui a lieu au niveau de l'encastrement et qui est négligeable quand l'élancement de la poutre est grand. Ce cisaillement est de même signe dans tout le volume de la poutre.

On étudiera les propriétés piézoélectriques d'une poutre en GaAs orientées selon $\langle 100 \rangle$ puis on étudiera leur évolution quand la poutre tourne dans le plan (001) afin de déterminer l'orientation cristalline optimale.

3.5.1 Système d'excitation/détection piézoélectrique pour une structure orientée selon $\langle 100 \rangle$.

Le tenseur piézoélectrique du GaAs est de la forme :

$$e_{GaAs} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{14} \end{vmatrix} \quad (89)$$

Les trois premières colonnes du tenseur contiennent uniquement des coefficients nuls ce qui signifie que les extensions/compression ne produisent pas de déplacement de charges électrique. Seules les trois dernières colonnes contiennent des coefficients non nuls ce qui signifie que seul le cisaillement produira des déplacements de charges dans les poutres d'orientation $\langle 100 \rangle$. Lors de la flexion d'une poutre le cisaillement est secondaire, donc un système d'électrodes exploitant uniquement le cisaillement aura une sensibilité piézoélectrique faible.

Le cisaillement est de même sens dans tout le volume de la poutre donc le champ électrique généré est unidirectionnel, il suffira donc de deux électrodes monopistes parallèles au plan de flexion pour recueillir les charges piézoélectriques (figure 52 (a) et (b)).

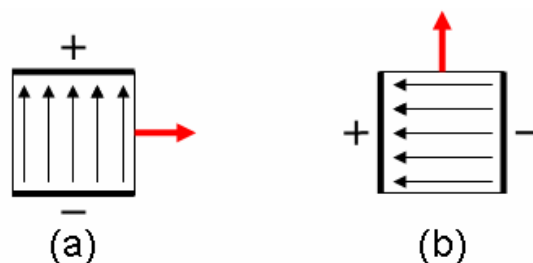


Figure 52 : Sections de poutre $\langle 100 \rangle$ équipées d'électrodes pour l'excitation/détection de la flexion.
(a) : électrodes idéales pour la flexion dans le plan, (b) : électrodes idéales pour la flexion hors plan

On en déduit le système d'électrodes présenté sur la figure 53 pour le CVG triaxial.

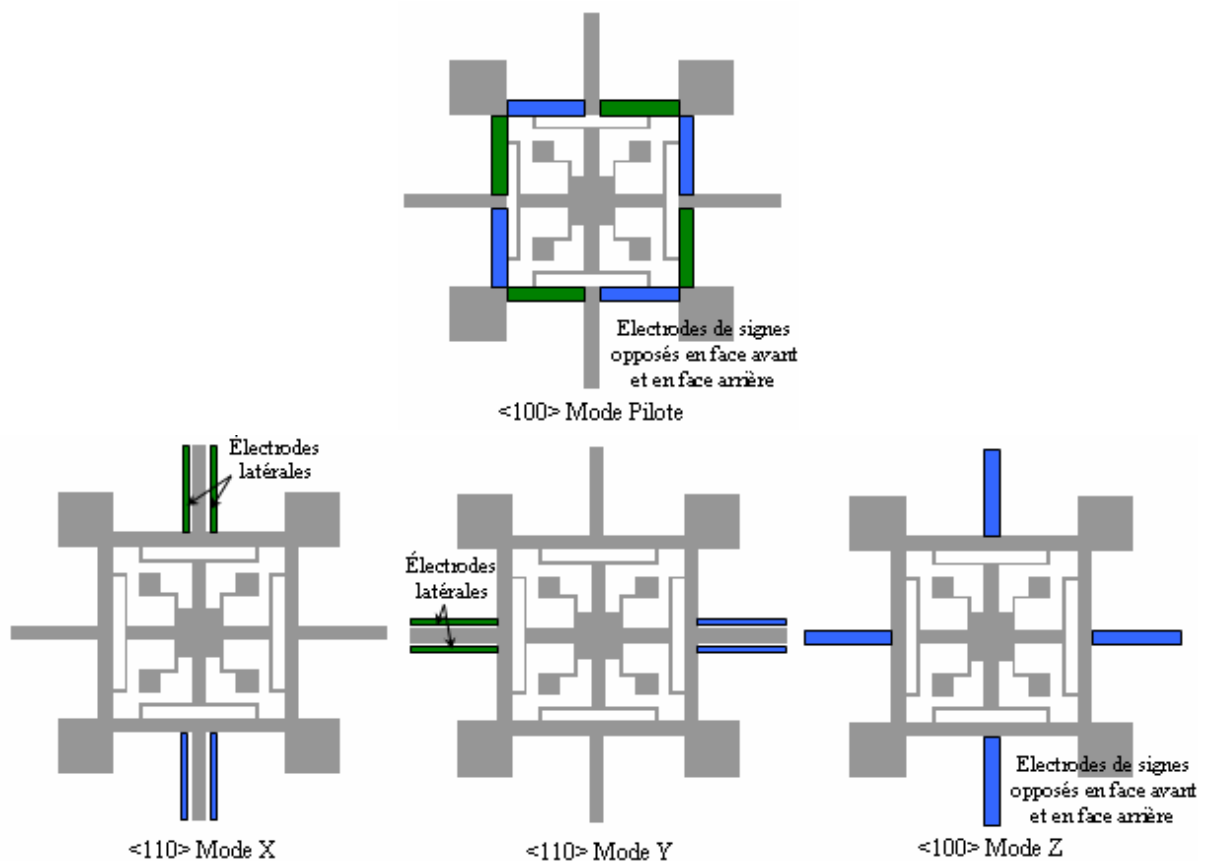


Figure 53 : Electrodes des quatre modes du CVG triaxial orienté selon <100>
Les électrodes bleues et les électrodes vertes sont alimentées avec des tensions alternatives opposées

Ces électrodes ne détectent que les contraintes de cisaillement qui sont faibles devant les contraintes d'extension/compression donc leur sensibilité piézoélectrique est sous-optimale. Pour améliorer celle-ci, on recherche l'orientation cristalline optimale.

3.5.2 Système d'excitation/détection piézoélectrique pour une structure orientée selon <110>.

Pour analyser l'évolution de la piézoélectricité en fonction de l'orientation cristalline on fait tourner le tenseur piézoélectrique du GaAs dans le plan (001) du wafer.

Pour un angle θ avec la direction principale, le tenseur pris dans le repère de la poutre est égale à :

$$e_{GaAs} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & e_{14} \cos(2\theta) & -e_{14} \sin(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{14} \sin(2\theta) & e_{14} \cos(2\theta) & 0 \\ -\frac{e_{14} \sin(2\theta)}{2} & \frac{e_{14} \sin(2\theta)}{2} & 0 & 0 & 0 & e_{14} \cos(2\theta) \end{vmatrix} \quad (90)$$

Les coefficients e_{31} et e_{32} deviennent alors non nuls et ils sont maximaux quand $\theta = \pi/4$ c'est-à-dire pour une poutre d'orientation <110> ou <-110>.

Remarque : il est possible d'obtenir des coefficients e_{31} et e_{32} non nuls par rotation d'un wafer (111) cependant ils sont inférieurs d'un facteur $1/\sqrt{3}$ à ceux d'un wafer (100) tourné de 45° .

Lors de la flexion d'une poutre selon <110>, les extensions/compressions qui sont de signe opposé de part et d'autre du plan médian produisent des déplacements électriques selon Z de signes opposés.

Lors de la flexion dans le plan, le plan médian est perpendiculaire au plan du substrat et est situé à mi-largeur de la poutre. Par conséquent, les déplacements électriques selon Z divisent la largeur de la poutre en deux volumes subissant des déplacements électriques opposés. Ainsi, en face avant et en face arrière, les électrodes optimales sont constituées de deux "pistes" de signe opposés (figure 54 (a)).

En revanche, lors de la flexion hors plan, le plan médian est parallèle au plan du substrat et situé à mi-épaisseur de la poutre. Par conséquent, les déplacements de charge qui sont toujours selon Z divisent l'épaisseur de la poutre en deux volumes subissant des déplacements électriques de signes opposés. Ainsi, les électrodes optimales piézoélectriques sont constituées d'une seule piste mais sont situées en face avant, en face arrière et à mi-

épaisseur de la poutre (figure 54 (b)). La réalisation de l'électrode à mi-épaisseur est irréaliste donc on la remplace par des électrodes placées sur les flancs de la poutre (figure 54 (c)).

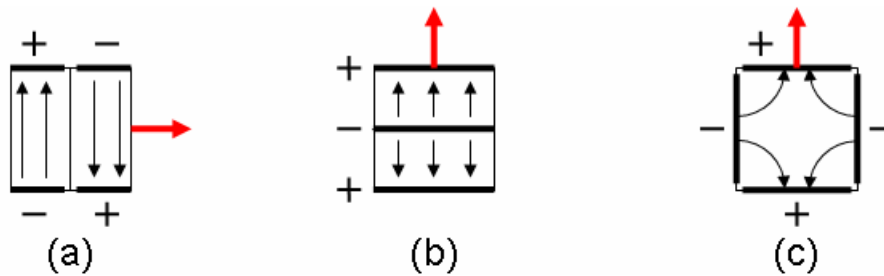


Figure 54 : Sections de poutre $\langle 110 \rangle$ équipée d'électrodes pour l'excitation/détection de la flexion. (a) : électrodes idéales pour la flexion dans le plan. (b) : électrodes idéales pour la flexion hors plan. (c) : électrodes réalistes pour la flexion hors plan

On en déduit le système d'électrodes présenté sur la figure 55 pour le CVG triaxial.

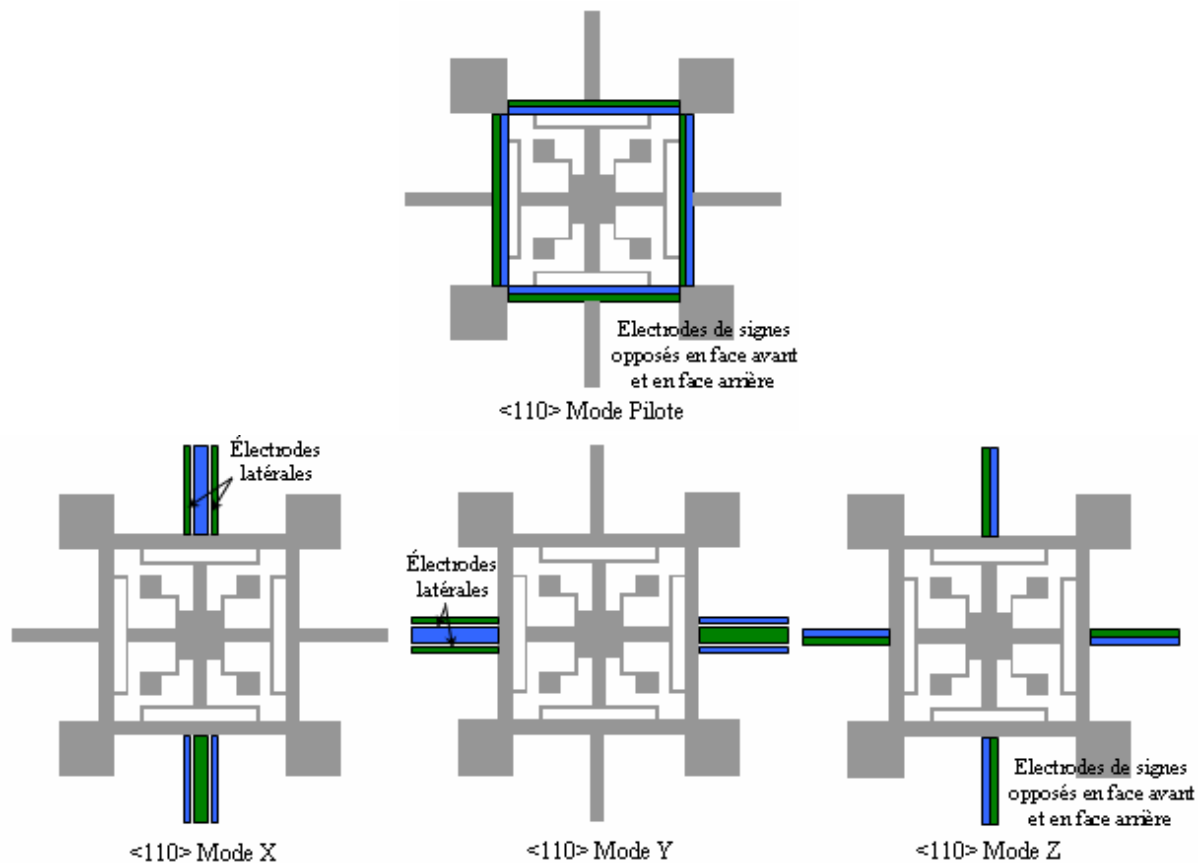


Figure 55 : Electrodes des quatre modes du CVG triaxial orienté selon $\langle 110 \rangle$

Les électrodes bleues et les électrodes vertes sont alimentées avec des tensions alternatives opposées

3.5.3 Comparaison des résistances motionnelles de poutres en GaAs.

Les sensibilités piézoélectriques des systèmes d'électrodes présentés précédemment ont été déterminées à l'aide de simulations par éléments finis et sont présentées dans le tableau 12 et dans le tableau 13. Le tableau 12 montre que les sensibilités piézoélectriques d'une poutre selon $\langle 110 \rangle$ sont environ 7 fois plus élevées que celles d'une poutre selon $\langle 100 \rangle$.

Par conséquent, le CVG triaxial dont les poutres sont orientées selon $\langle 110 \rangle$ a des sensibilités piézoélectriques plus élevées que celles du CVG triaxial dont les poutres sont orientées selon $\langle 100 \rangle$ comme le montre le tableau 13. Les poutres du CVG triaxial seront donc orientées dans la direction $\langle 110 \rangle$.

Tableau 12 : Sensibilités piézoélectriques des flexions d'une poutre de dimensions $2620 \times 300 \times 450 \mu\text{m}^3$ pour les orientations $\langle 100 \rangle$ et $\langle 110 \rangle$

	Orientation $\langle 100 \rangle$	Orientation $\langle 110 \rangle$
Flexion dans le plan	$1,05 \times 10^{-6} \text{ C/m}$	$7,55 \times 10^{-6} \text{ C/m}$
Flexion hors plan	$3,48 \times 10^{-6} \text{ C/m}$	$28,7 \times 10^{-6} \text{ C/m}$

Tableau 13 : Sensibilités piézoélectriques des CVG triaxiaux d'orientations $\langle 100 \rangle$ et $\langle 110 \rangle$

	Orientation $\langle 100 \rangle$	Orientation $\langle 110 \rangle$
Pilote	$3,04 \times 10^{-6} \text{ C/m}$	$81,7 \times 10^{-6} \text{ C/m}$
Détection X	$5,47 \times 10^{-6} \text{ C/m}$	$38,7 \times 10^{-6} \text{ C/m}$
Détection Y	$5,47 \times 10^{-6} \text{ C/m}$	$38,7 \times 10^{-6} \text{ C/m}$
Détection Z	$3,54 \times 10^{-6} \text{ C/m}$	$43,1 \times 10^{-6} \text{ C/m}$

3.6 Performances du CVG triaxial.

3.6.1 Facteur d'échelle.

Les facteurs d'échelle du CVG triaxial ont été déterminés de deux manières différentes :

1) Les facteurs d'échelle ont été déterminés en utilisant l'équation :

$$FE = S_{méca} S_{piézo} = \frac{A_p K}{\Delta f} S_{piézo} \quad (91)$$

Avec :

- A_p l'amplitude pilote égale à 3,48 μm , ce qui correspondant à des contraintes locales maximales de 50 MPa, et à une tension d'excitation de 1 V pour $Q = 100\,000$.
- Δf l'écart de fréquence entre les modes : 200 Hz
- K les coefficients de couplage Coriolis du CVG triaxial égaux à 50% pour les modes X et Y et 43% pour le mode Z, déterminés par simulation par éléments fini en régime modal.
- $S_{piézo}$ les sensibilités piézoélectriques égales à $38,7 \times 10^{-6}$ C/m pour les modes X et Y et $43,1 \times 10^{-6}$ C/m pour le mode Z, déterminées par simulations par éléments fini en régime modal.

2) Les facteurs d'échelle du CVG triaxial ont été déterminés grâce à des simulations par éléments finis en régimes harmoniques incluant l'excitation pilote (à une tension de 1 V pour $Q = 100\,0000$) et la rotation du référentiel. Lors des simulations incluant la rotation du référentiel, la force de Coriolis s'exerce sur tous les points auxquels l'excitation piézoélectrique confère une vitesse.

Les facteurs d'échelle déterminés suivant ces deux méthodes sont présentés dans le tableau 14. On constate que les deux méthodes coïncident à $\pm 9\%$. **En conclusion les facteurs d'échelle X, Y et Z du CVG triaxial sont tous les trois environ égaux à 9×10^{-16} C/(°/s).**

Tableau 14 : Facteurs d'échelle du CVG triaxial

Axe de détection	Sensibilité mécanique	Sensibilité piézoélectrique	Facteur d'échelle $FE = S_{méca} S_{piézo}$	Facteur d'échelle déterminé en simulation harmonique
X	$2,41 \times 10^{-11}$ m/(°/s)	$38,7 \times 10^{-6}$ C/m	$9,3 \times 10^{-16}$ C/(°/s)	$10,1 \times 10^{-16}$ C/(°/s)
Y	$2,41 \times 10^{-11}$ m/(°/s)	$38,7 \times 10^{-6}$ C/m	$9,3 \times 10^{-16}$ C/(°/s)	$10,1 \times 10^{-16}$ C/(°/s)
Z	$2,07 \times 10^{-11}$ m/(°/s)	$43,1 \times 10^{-6}$ C/m	$8,9 \times 10^{-16}$ C/(°/s)	$8,2 \times 10^{-16}$ C/(°/s)

3.6.2 Couplage en quadrature.

Le couplage en quadrature désigne le signal parasite que la déformation pilote génère par effet piézoélectrique sur les électrodes détection. Le couplage en quadrature peut être annulé par effet différentiel en exploitant la différence des charges électriques perçues entre deux électrodes détection exposées aux mêmes déformations pilote. Cependant, du fait des imperfections de réalisation, l'annulation du couplage en quadrature n'est pas totale. Il est donc important pour les performances que les électrodes captent un minimum de charges électriques en l'absence de rotation.

Le tableau 15 présente les quantités de charges mesurées sur les électrodes détection en l'absence de rotation et lorsque le mode pilote est excité à sa tension de fonctionnement : 1 V ce qui correspond à des contraintes locales maximales de 50 MPa. Les vitesses de rotations équivalentes ont été calculées pour un facteur d'échelle de $9,0 \times 10^{-16} \text{ C}/(^{\circ}/\text{s})$ soit $2,5 \times 10^{-19} \text{ C}/(^{\circ}/\text{h})$. Ces vitesses de rotations équivalentes sont comprises entre 140 et 720 $^{\circ}/\text{h}$. Dans le cas où 99% du couplage en quadrature est annulé par effet différentiel, le biais de mesure sera de 1,4 à 7,2 $^{\circ}/\text{h}$. Cette valeur, propre à la géométrie de CVG triaxial présenté est largement meilleure que celle des CVG où les déformations pilote et détection sont localisées dans la même zone. Dans ces CVG, il y a environ un ordre de grandeur qui sépare les charges que le pilote produit sur les électrodes détection et celles qui sont produites sur les électrodes pilote (ici $1,4 \times 10^{-10} \text{ C}$). Par conséquent, dans ces CVG, les électrodes détection perçoivent environ 10^{-11} C en provenance du pilote, ce qui correspond à une vitesse de rotation de l'ordre de $10^8 \text{ }^{\circ}/\text{h}$. Dans le cas où 99% du couplage en quadrature est annulé par effet différentiel, le biais de mesure restant est de $10^6 \text{ }^{\circ}/\text{h}$.

En comparaison, on constate donc que la séparation des déformations pilote et détection a permis de réduire de 5 ordres de grandeur l'influence de la déformation pilote sur la détection.

Tableau 15 : Charge en quadrature que la déformation pilote produit par effet piézoélectrique sur les électrodes de détection

Electrode	Quantité de charge détectée	Vitesse de rotation équivalente
Détection X	$3,4 \times 10^{-17} \text{ C}$	140 $^{\circ}/\text{h}$
Détection Y	$3,4 \times 10^{-17} \text{ C}$	140 $^{\circ}/\text{h}$
Détection Z	$1,8 \times 10^{-16} \text{ C}$	720 $^{\circ}/\text{h}$

3.7 Conclusion.

Au chapitre 2, une structure de CVG triaxial a été conçue : elle permet de bénéficier d'une réduction du couplage en quadrature grâce à une séparation des déformations du mode pilote et des modes détection. Pour bénéficier de cet avantage, nous avons choisi, dans ce chapitre, d'utiliser un système d'excitation/détection sensible aux déformations : la transduction piézoélectrique. Parmi les différents matériaux piézoélectriques envisagés, le GaAs s'est avéré particulièrement intéressant car son coefficient piézoélectrique est quasiment aussi élevé que celui du quartz et son potentiel de miniaturisation est quasiment équivalent à celui du silicium.

L'étude de la sensibilité piézoélectrique du GaAs a montré que les poutres du CVG triaxial devaient être orientées dans la direction cristalline $\langle 110 \rangle$ pour bénéficier d'une meilleure sensibilité. Des électrodes d'excitation/détection optimales ont ensuite été mises au point. Combiné à la sensibilité mécanique du CVG triaxial, son système de transduction piézoélectrique lui confère un facteur d'échelle d'environ 9×10^{-16} C/(°/s) et semble compatible avec la moyenne performance, comme nous le confirmerons dans le chapitre 5.

Le CVG triaxial et son système d'excitation/détection ayant été conçu, nous allons maintenant mettre au point son procédé de réalisation. La principale difficulté est de mettre au point un moyen de gravure du GaAs compatible avec la structure du CVG triaxial. La gravure produite doit être verticale et sans défauts d'usinage qui produiraient des couplages mécaniques indésirables. De plus, elle doit permettre de réaliser des poutres dans la direction $\langle 110 \rangle$ pour bénéficier d'une sensibilité piézoélectrique optimale. Enfin, elle doit permettre de traverser un wafer de GaAs afin de déposer des électrodes sur la face avant et la face arrière de la structure.

4

Etude de la gravure traversante du GaAs

La réalisation d'une structure de CVG triaxial nécessite un procédé permettant la gravure verticale traversante de wafers de GaAs de 450 μm qui soit compatible avec la réalisation de poutre dans la direction $\langle 110 \rangle$. De plus, la réalisation nécessite d'utiliser le GaAs le plus résistif : le GaAs dopé C, sinon la conductivité du GaAs pourrait nuire à l'asservissement du mode pilote et détériorer la marche aléatoire du CVG (voir parties 5.3 et 5.4).

Pour atteindre ces objectifs, deux procédés de gravure du GaAs ayant des avantages et des inconvénients différents ont été testés :

- la gravure chimique qui est mature mais produit des figures d'attaques,
- la gravure plasma qui ne produit pas de figure d'attaque mais qui est actuellement limité aux gravures inférieures à 110 μm [76] et pour laquelle des techniques de gravure plus profonde sont à développer.

4.1 Gravure chimique humide du GaAs.

La gravure humide du GaAs a été étudiée en premier lieu car elle est plus simple à mettre en œuvre que la gravure plasma et sa vitesse de gravure est généralement plus rapide.

4.1.1 Choix de la solution de gravure.

Les solutions de gravure du GaAs sont généralement composées d'un mélange de deux espèces [77-78], elles contiennent :

- Un agent oxydant qui réagit avec la surface du GaAs pour former des oxydes de gallium et d'arsenic : GaO_2 , Ga_2O_3 , As_2O_3 , As_2O_5 [79].
- Un agent solvant qui fournit des ligands négatifs aux oxydes pour former des complexes solubles. Par exemple, avec les oxydes de GaAs, le HNO_3 forme les complexes GaNO_3 , $\text{Ga}_2(\text{NO}_3)_3$, $\text{As}_2(\text{NO}_3)_3$, $\text{As}_2(\text{NO}_3)_5$ [79].

L'agent oxydant le plus couramment employé est le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 [77-82].

Les agents solvants peuvent être très variés car les oxydes de GaAs forment des complexes solubles aussi bien en milieu acide qu'en milieu basique. Il peut s'agir d'un acide tel que l'acide chlorhydrique HCl [78], l'acide sulfurique H_2SO_4 [78], l'acide nitrique HNO_3 [79], l'acide phosphorique H_3PO_4 [80] ou une base telle que l'ammoniaque NH_4OH [81-82].

Lors de la réalisation du CVG triaxial, la gravure du GaAs sera réalisée au moyen d'un masque comportant des fentes délimitant le contour de la structure. Or, les gravures réalisées à travers ces fentes dépendront de la solution de gravure utilisée. En effet, selon la nature et la composition de celle-ci, la gravure du GaAs est plus ou moins isotrope.

Si la gravure est isotrope, elle s'effectue à la même vitesse dans toutes les directions indépendamment de l'orientation cristalline. Les flancs de gravure seront donc en quart de cercle comme le montre la figure 56.

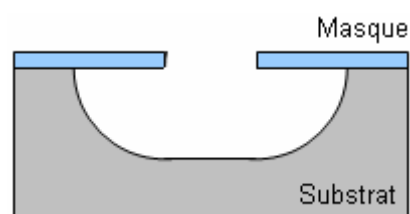


Figure 56 : Gravure isotrope.

Si la gravure est anisotrope, la géométrie générée dépend de l'orientation de la fente du masque par rapport à la structure cristalline du GaAs. La figure 57 présente la géométrie de la gravure du GaAs (001) pour différentes orientations de la fente du masque dans le cas d'une gravure très anisotrope :

- Si la fente du masque est dans la direction $\langle 100 \rangle$ ou la direction $\langle 010 \rangle$, la gravure aura des flancs verticaux d'orientation (010) ou (100) qui feront un angle de 90° avec la surface.
- Si la fente du masque est dans la direction $\langle -110 \rangle$, la gravure aura des flancs sortants d'orientation (-111) qui feront un angle de 55° avec la surface.
- Si la fente du masque est dans la direction $\langle 110 \rangle$, la gravure aura des flancs rentrants d'orientation (111) qui feront un angle de 125° avec la surface.

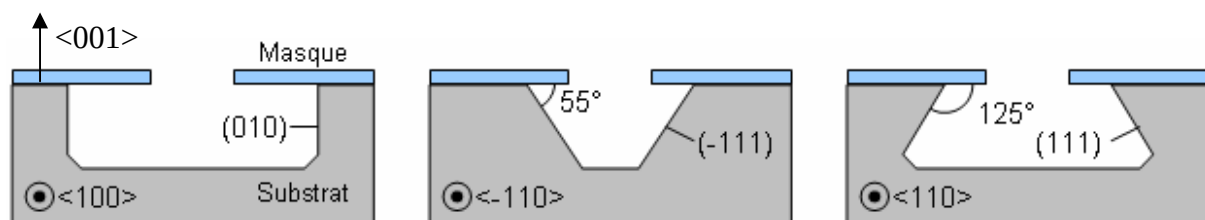


Figure 57 : schéma de la vue en coupe de gravures chimiques anisotropes du GaAs (001) suivant les directions $\langle 100 \rangle$, $\langle -110 \rangle$ et $\langle 110 \rangle$ [78].

Enfin, si la gravure est faiblement anisotrope, elle aura une géométrie intermédiaire entre les deux cas extrêmes présentés précédemment.

En conclusion, pour obtenir une gravure verticale, il faut utiliser une solution de gravure très anisotrope et orienter les gravures selon les directions cristallines $\langle 100 \rangle$ et $\langle 010 \rangle$. Cependant, comme nous l'avons vu dans la partie 3.5.3, ces directions cristallines sont moins avantageuses d'un point de vue piézoélectrique.

De plus, pour pouvoir atteindre une profondeur de $450 \mu\text{m}$ en un temps raisonnable, une vitesse de gravure supérieure à $1 \mu\text{m}/\text{min}$ est préférable.

On utilisera le système $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2$ car il produit une gravure rapide et très anisotrope. Pour obtenir une vitesse de gravure maximale, NH_4OH et H_2O_2 seront mélangés dans un rapport 1 : 4 qui correspond au maximum de la vitesse de gravure [81] (le mélange est réalisé avec des solutions aqueuses commerciales de H_2O_2 et de NH_4OH dont les concentrations volumiques sont respectivement égales à 30% et 28%).

4.1.2 Procédé de gravure.

Lors d'une gravure chimique, le fond et les flancs de la gravure sont consommés simultanément, la gravure se propage donc à la fois verticalement et horizontalement, comme le montre la figure 58. La gravure latérale qui est généralement indésirable est appelée sous-gravure.

Lors d'une gravure anisotrope dans la direction $\langle 100 \rangle$, les plans (001) et (010) qui forment le fond et les flancs de la gravure sont de même nature. Les vitesses de gravure verticale et horizontale sont donc égales. Une gravure de $450\text{ }\mu\text{m}$ de profondeur produira donc $450\text{ }\mu\text{m}$ de sous-gravure de chaque côté, la largeur minimale des ouvertures du wafer sera donc de $900\text{ }\mu\text{m}$ ce qui n'est pas compatible avec la géométrie du CVG triaxial. **Pour réduire la sous-gravure de moitié, le substrat sera usiné par gravure double face.** La sous-gravure sera donc d'environ $225\text{ }\mu\text{m}$.

Comme le montre la figure 58, une arête résiduelle apparaît à mi-hauteur des flancs, cependant en augmentant la durée de la gravure d'environ 10% ce résidu disparaît. **Ainsi, la sous-gravure finale est d'environ $250\text{ }\mu\text{m}$, cette valeur doit être prise en compte dans lors de la réalisation du masque.**

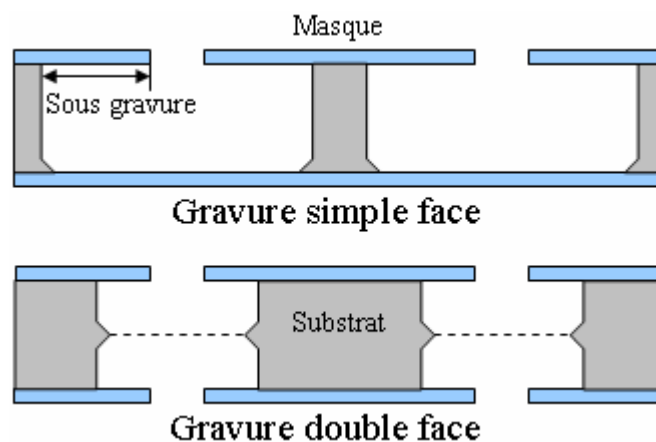


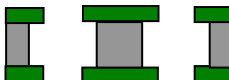
Figure 58 : Schéma illustrant la sous-gravure et la gravure verticale d'un substrat

Le procédé utilisé pour la gravure chimique traversante du GaAs est détaillé dans le tableau 16. Des masques de nitrure Si_3N_4 de 400 nm sont réalisés en face avant et en face arrière du wafer. Le nitrure en face avant et en face arrière est déposé par PECVD. Un masque de résine est réalisé sur la couche nitrure en face avant, puis le nitrure est gravé dans un bain de BHF. Un masque de résine est alors réalisé sur la couche de nitrure en face arrière. Ce masque est aligné sur la face avant grâce à un aligneur double face. La précision de l'alignement double face est d'environ $2\text{ }\mu\text{m}$, ce qui est relativement peu par rapport aux dimensions du CVG triaxial.

4.1 Gravure chimique humide du GaAs.

Après la réalisation des deux masques de nitrure, la gravure double face du GaAs est réalisée par immersion dans une solution de $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2$ dans un rapport 1 : 4. Le wafer est retiré du bain 3 minutes après le moment où la jonction des gravures en face avant et arrière a été constatée visuellement. A température ambiante et avec une agitation magnétique, la gravure traversant de $450\mu\text{m}$ de GaAs dure 28 à 30 minutes. La gravure est très rapide et très sélective : sa vitesse de gravure est de $7,8\mu\text{m}/\text{min}$ et environ 40 nm de masque sont consommés en fin de gravure ce qui correspond à une sélectivité supérieure à 5 000.

Tableau 16 : Procédé pour la gravure chimique traversante du GaAs

Etape	Paramètres	Schéma
Nettoyage	Nettoyage à l'acétone : 1 min Nettoyage à l'isopropanol : 1min	
PECVD d'une couche de Si_3N_4 de 400nm d'épaisseur	Bâti : STS Fréquence : 13.56 MHz, puissance : 20 W Vide initial : 5 mT, pression de travail : 900 mT Débit SiH_4 : 2000 sccm, débit NH_3 : 55 scm Température électrode supérieure : 250°C Température électrode inférieure : 300°C Durée : 40 min (10 nm/min)	
Dépôt et lithographie d'une couche de résine positive de $1,3\mu\text{m}$ d'épaisseur sur la face avant	Enrésinement : S1813, accélération : 5000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30s Recuit : 115°C, durée: 1 min30 Insolation : dose : 46 mJ/cm ² , λ : 365 nm Développement : MS 319, durée: 1min Rinçage EDI : 1 min	
Dépôt de résine pour protéger de la face arrière	Dépôt de résine S1813 au pinceau	
Ouverture du masque de Si_3N_4	Bain de BHF (35% NH_4F , 5% HF) wafer en position verticale pendant 10 min Rinçage à l'EDI pendant 3 min avec agitation	
Retrait de la couche résine	Acétone : 1 min Isopropanol : 1 min Rinçage EDI : 1 min	
Ouverture du masque de Si_3N_4 en face arrière	Mêmes paramètres que pour la face avant	
Gravure du GaAs	Wafer en position verticale, agitation de la solution + agitation du wafer pour chasser les bulles Solution : NH_3 à 28% : H_2O_2 à 30% 1 : 4 Durée : 28 à 30 min (environ $7,8\mu\text{m}/\text{min}$) Rinçage EDI : 1min	

4.1.3 Caractérisation de la gravure.

4.1.3.1 Vitesse de gravure en fonction de la direction cristalline.

Pour caractériser la vitesse de gravure en fonction de la direction cristalline, quatre motifs en forme de croix décalés de 15° les uns par rapport aux autres ont été réalisés. La gravure verticale a été mesurée, puis la sous-gravure latérale a été mesurée pour chaque branche de chaque croix.

La vitesse de gravure a été normalisée pour que les vitesses de gravure dans les directions principales $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ et $\langle 001 \rangle$ soient égale à 1, une projection polaire des vitesses de gravure mesurées dans le plan du wafer est présentée sur la figure 59. La vitesse de gravure est maximale dans les directions $\langle 100 \rangle$ et $\langle 010 \rangle$ qui correspondent aux flancs verticaux, et elle est minimale dans les directions $\langle 110 \rangle$ et $\langle -110 \rangle$ qui correspondent à des flancs obliques.

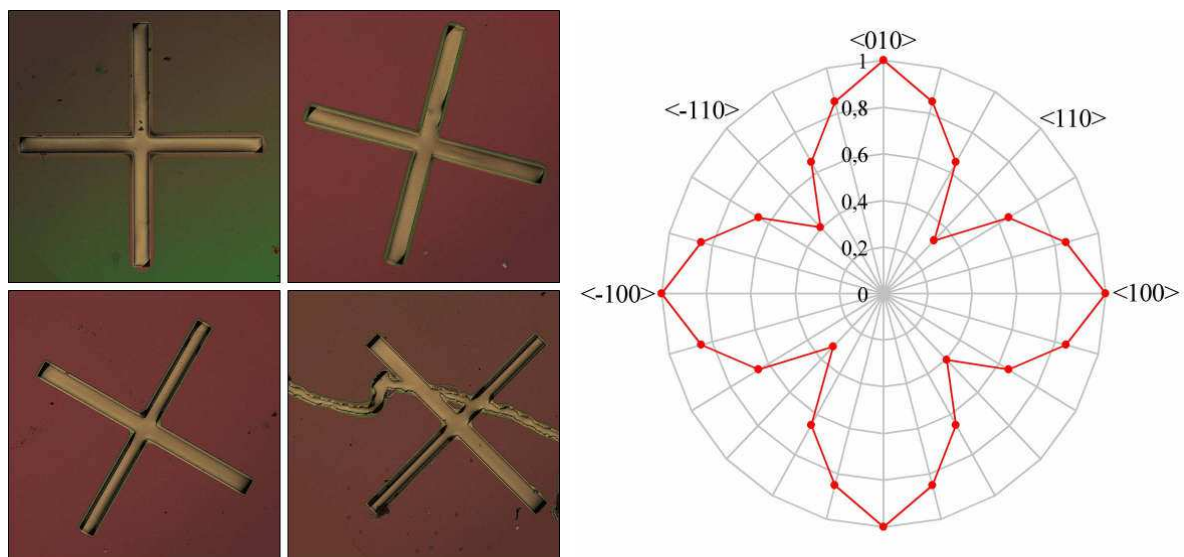


Figure 59 : Rapport entre la sous-gravure et la gravure verticale en fonction de la direction cristalline

La vitesse de gravure des plans obliques est inférieure à celle des plans verticaux. Par conséquent, lors d'une gravure chimique verticale des figures d'attaques formées de résidus délimités par des plans bloquants obliques risquent d'apparaître. Ces résidus apparaissent au niveau des zones les moins exposées à la solution de gravure, c'est-à-dire au niveau des coins concaves.

4.1.3.2 Figures d'attaque.

Un motif en diapason a été réalisé par usinage chimique du GaAs, le motif du masque et le motif gravé sont comparés sur la figure 60. La sous-gravure est conforme aux prévisions et les flancs de gravure sont verticaux, à l'exception d'une arête résiduelle à mi-hauteur. Les angles convexes sont conformes mais les angles concaves sont fortement modifiés. Les angles concaves s'arrondissent (ici deux arrondis se rejoignent pour former une ogive) et leurs flancs sont obliques. La taille des figures d'attaque et du même ordre que l'épaisseur sous gravée.

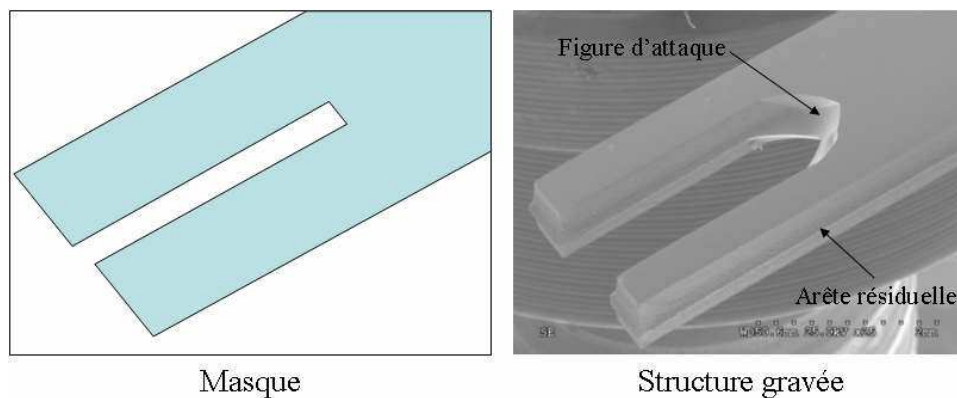


Figure 60 : Gravure chimique du GaAs : comparaison entre le motif du masque et le motif gravé

Dans le cas du CVG triaxial, la sous-gravure est de 250 μm , les figures d'attaque mesureront donc environ 250 μm de long ce qui est très important vis-à-vis de la largeur des parties fines de la structure qui est de 90 μm . Comme l'illustre la figure 61, les figures d'attaque ont une taille importante vis à vis des motifs de la structure du CVG triaxial. A cause des figures d'attaque, les modes risquent de fortement se coupler les uns aux autres, ce qui serait très néfaste pour le fonctionnement du gyromètre. **En conclusion, la gravure chimique serait très préjudiciable au fonctionnement du CVG triaxial.**

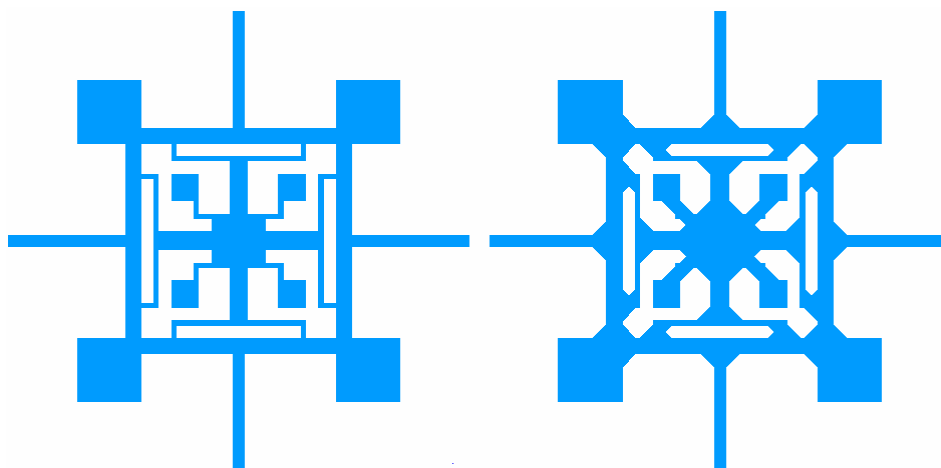


Figure 61 : Impact des figures d'attaques sur la structure.

A gauche : structure souhaitée, à droite : structure avec figures d'attaque

4.1.3.3 Précision de la gravure.

Les vitesses de gravure et de sous-gravure de l'usinage chimique présentent des inhomogénéités spatiales. Pour évaluer l'inhomogénéité spatiale, seize poutres présentant la même largeur sur le masque ont été réalisées simultanément par gravure traversante, puis leurs largeurs réelles ont été comparées. Les seize poutres sont réparties à la surface du wafer en quatre groupes de quatre afin d'évaluer l'inhomogénéité au niveau local (distance inférieure à 1 cm) et au niveau global (distances de plusieurs cm). Les mesures réalisées sont présentées dans le tableau 17. Sur le masque, la largeur de la poutre est de 1200 μm , et sur le wafer sa valeur moyenne est de 737 μm avec un écart type local de 11,5 μm et un écart type global de 37,7 μm . La sous-gravure moyenne est donc 231 μm de chaque côté de la poutre avec un écart type local de 1,5% et un écart type global de 5%. Les structures réalisées par gravure chimique présenteront donc des asymétries non négligeables qui entraîneront une dispersion des fréquences de résonances et une rupture de symétrie conduisant à une diminution du facteur de qualité due à la dissipation d'énergie dans le support.

Tableau 17 : Largeurs des poutres réalisées par gravure chimique traversante à partir d'un motif de 1200 μm de large.

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Largeurs mesurées (μm)	681	698	734	765
	691	698	756	782
	696	700	770	800
	705	724	784	803
Moyenne du groupe (μm)	693,25	705	761,75	787,5
Ecart type du groupe (μm)	7,25	9,5	15,25	14
Moyenne globale (μm)		Ecart type local (μm)		Ecart type global (μm)
737		11,5		37,7

4.1.4 Conclusion sur la gravure chimique.

La gravure chimique du GaAs présente plusieurs avantages :

- La gravure chimique est facile à mettre en œuvre
- La gravure chimique est très rapide : elle permet de réaliser la gravure traversante d'un wafer de GaAs de 450 μm en 30 minutes
- La gravure chimique est très sélective : un masque de nitrure de 400 nm suffit largement pour protéger la structure.

Cependant, dans le cas de la réalisation du CVG triaxial la gravure chimique présente des inconvénients majeurs :

- **Pour que les flancs du CVG triaxial soient verticaux il faut orienter ses poutres dans la direction $\langle 100 \rangle$, or dans cette orientation, la détection piézoélectrique est peu efficace.**
- **La gravure chimique humide produit des figures d'attaque qui créeraient un couplage mécanique important entre le mode pilote et les modes détection.**
- **La gravure chimique humide entraîne une sous-gravure inhomogène entraînant une rupture de symétrie conduisant à une diminution du facteur de qualité due à la dissipation d'énergie dans le support.**

En conclusion : la gravure chimique ne peut pas être utilisée pour la réalisation d'un CVG triaxial performant. Cependant elle pourra être utilisée pour réaliser des structures dont les modes sont moins sensibles aux figures d'attaque. Pour réaliser le CVG triaxial, nous avons donc entrepris de développer une gravure qui ne produit pas de figures d'attaque : la gravure ionique réactive (RIE) dans un plasma chloré.

4.2 Gravure plasma du GaAs.

La gravure plasma du GaAs est intéressante pour la réalisation du CVG triaxial car elle permet de réaliser des gravures verticales et sans figures d'attaque. Cependant la gravure plasma est généralement utilisée pour graver de faibles épaisseurs de GaAs. Actuellement les MEMS réalisés par gravure plasma du GaAs ont des épaisseurs sub-micrométriques [83,84]. La plus profonde gravure plasma verticale du GaAs qui ait, à notre connaissance, été publiée est de 110 μm [76]. La réalisation du CVG triaxial nécessite de mettre au point un procédé de gravure du GaAs plus profonde qui atteignent 450 μm .

L'objectif est de développer un procédé de gravure plasma d'un GaAs ayant la particularité d'être dopé C. Pour cette gravure il est nécessaire d'avoir :

- **Un masque dont la sélectivité soit suffisamment élevée pour atteindre une profondeur de 450 μm .**
- **Une vitesse de gravure suffisamment élevée pour atteindre 450 μm en un temps raisonnable.**
- **Une bonne verticalité des flancs de gravure.**

Pour mettre au point cette gravure, il faut déterminer la composition chimique et les paramètres physiques du plasma de gravure et le matériau utilisé comme masque.

4.2.1 Principe de la gravure plasma.

La gravure ionique réactive (RIE : Reactive Ion Etching) est une technique de gravure physico-chimique. Un bâti de gravure RIE est constitué d'un plateau et d'une cloche métallique dans laquelle un vide secondaire est généré par un système de pompage. L'enceinte RIE forme un condensateur dont le plateau est la cathode et la cloche métallique l'anode. Des gaz réactifs sont introduits dans l'enceinte avec un débit régulé. La puissance électrique du condensateur est utilisée pour transformer le mélange de gaz en un plasma très réactif. Le champ électrique du condensateur accélère les particules chargées du plasma et elles bombardent verticalement le substrat. La gravure RIE est due à la fois à la réactivité chimique des particules et à l'effet physique du bombardement qui permet d'obtenir une gravure anisotrope. La gravure RIE a été initialement développée pour les gravures de faible profondeur (inférieur à 20 μm) mais plusieurs technique appelées DRIE (Deep Reactive Ion Etching) permettent de modifier la RIE pour obtenir des gravures plus profonde.

A titre d'exemple, la DRIE du silicium permet de réaliser des gravures traversantes sur des wafers de 500 μm et plus avec une très bonne verticalité [58].

La gravure ICP (Inductively Coupled Plasma) est une gravure DRIE permettant d'obtenir un plasma dense grâce à un champ magnétique généré par une bobine qui entoure l'enceinte. Le bâti de gravure ICP est présenté sur la figure 62. Le champ magnétique généré permet d'augmenter la densité de particules chargées du plasma et donc d'augmenter le flux de particules bombardées. A notre connaissance, les gravures ICP verticales du GaAs les plus profondes ayant été publiées sont de 110 μm [76], notre objectif est d'aller bien au-delà et d'atteindre une profondeur de 450 μm .

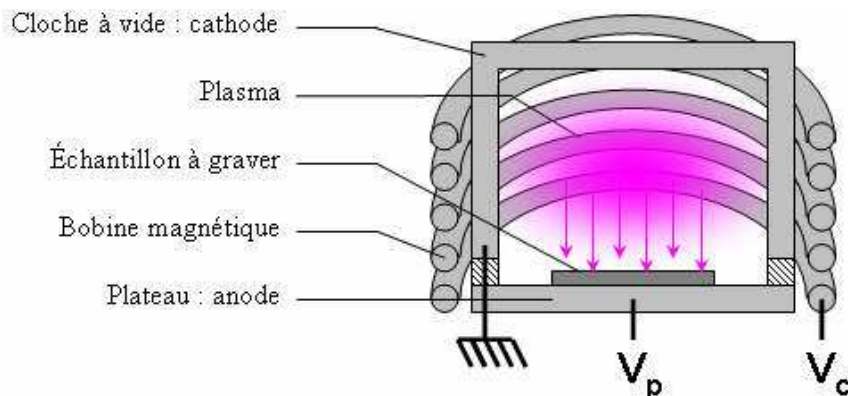


Figure 62 : vue en coupe schématique d'un bâti de gravure ICP

4.2.2 Composition du plasma.

La gravure ICP du GaAs exploite généralement l'action physico-chimique du chlore moléculaire Cl_2 et du trichlorure de bore BCl_3 sur le GaAs. Le Cl_2 et le BCl_3 sont parfois utilisés indépendamment l'un de l'autre [85] mais ils sont plus souvent associés ensemble [76, 85]. Le Cl_2 et le BCl_3 peuvent aussi être associés avec des gaz neutres tels que l'azote moléculaire N_2 ou l'argon Ar, pour former les mélanges Cl_2/N_2 [86,87], Cl_2/Ar [87], BCl_3/N_2 [87] ou BCl_3/Ar [87].

Les gaz de gravure sont ionisés puis les ions extraits du plasma bombardent le substrat. Les ions gravent alors le GaAs de différentes manières selon leur nature :

- Les ions provenant de la décomposition du Cl_2 réagissent avec le GaAs et le gravent. La forte réactivité du Cl_2 permet d'atteindre des vitesses de gravure importantes. Cependant la gravure n'est pas parfaitement verticale car certains ions interagissent avec les flancs de gravure et les consomment, ce qui génère de la sous-gravure latérale.
- Les ions provenant de la décomposition du BCl_3 réagissent avec le GaAs et le gravent mais ils génèrent aussi un phénomène de passivation des flancs. La passivation crée une couche protectrice qui préserve les flancs de la sous-gravure et assure leur verticalité.

- Les ions provenant de la décomposition du N_2 et de l'Ar ne réagissent pas avec le GaAs. Leur action est donc purement physique. Grâce à la verticalité du bombardement, la gravure qu'ils produisent est très anisotrope. Cependant la gravure physique est peu sélective : elle grave le masque qui doit donc être très résistant ou très épais.

Pour la gravure traversante du GaAs, il est préférable d'utiliser un plasma contenant :

- **du BCl_3 pour passiver les flancs de gravure et permettre une gravure verticale,**
- **du Cl_2 pour atteindre une vitesse de gravure importante,**
- **pas de N_2 ni d'Ar pour ne pas dégrader la sélectivité du masque.**

Il s'agit des mêmes gaz de gravure que ceux qui sont utilisés pour la gravure plasma verticale la plus profonde qui ait, à notre connaissance, été publiée [76]. Les gaz de gravure ayant été déterminés, le choix du matériau pour le masque est maintenant étudié.

4.2.3 Matériau pour la couche de masquage.

La couche de masquage utilisée doit être suffisamment épaisse et résistante pour protéger la surface du GaAs pendant toute la durée de la gravure. Le matériau pour le masque doit donc être sélectionné de manière à maximiser deux paramètres :

- la sélectivité : le rapport entre la vitesse de gravure du substrat et la vitesse de gravure du masque,
- l'épaisseur maximale : l'épaisseur maximale permise par la méthode de dépôt utilisée.

La profondeur maximale de la gravure sera limitée par le produit de ces deux paramètres.

Plusieurs essais ont été menés afin de déterminer la sélectivité et l'épaisseur maximale de différents matériaux (tableau 18). La sélectivité a été déterminée en comparant l'épaisseur du masque avant la gravure (mesurée au profilomètre mécanique à stylet) et l'épaisseur restante du masque après la gravure (mesurée par observation au MEB d'un échantillon clivé). Ces essais ont été menés en utilisant des paramètres conduisant à une vitesse de gravure de $1,9 \mu\text{m}/\text{min}$. L'objectif est d'obtenir une profondeur maximale de gravure supérieure à $450 \mu\text{m}$.

- Des masques en résine ont été réalisés. La résine est déposée par centrifugation et les motifs sont réalisés par photolithographie. En utilisant des résines visqueuses, des masques ayant jusqu'à 10 μm d'épaisseur peuvent être réalisés. La sélectivité de la résine est environ égale à 10. La résine permet de graver jusqu'à 100 μm de GaAs, ce qui demeure insuffisant.
- Des masques en résine FOX ont été réalisés. Il s'agit d'une résine à base d'organosilanes. Elle est déposée par centrifugation et les motifs sont réalisés par photolithographie. La résine est ensuite exposée à un plasma d'oxygène qui transforme les organosilanes en silice. La sélectivité de la silice FOX est environ égale à 70 ce qui est très supérieur à la sélectivité de la résine organique, cependant son procédé d'oxydation limite son épaisseur à environ 300 nm. Ainsi, la résine FOX ne permet pas de graver plus 20 μm de GaAs ce qui est insuffisant.
- Des masques en silice ont été déposés par PECVD avec des motifs réalisés par gravure plasma. La sélectivité de la silice PECVD est de 80 soit environ autant que pour la silice FOX cependant cette méthode permet de faire des masques ayant jusqu'à 2 μm d'épaisseur (au-delà, les tensions internes deviennent trop importantes et les masques craquent). Ainsi, la silice PECVD permet de graver jusqu'à 160 μm de GaAs, ce qui demeure insuffisant.
- Des masques métalliques en chrome et en nickel ont été réalisés. Ils sont déposés par évaporation et les motifs ont été réalisés par lift off. Cette méthode permet de réaliser des masques ayant jusqu'à 1 μm d'épaisseur. La sélectivité du chrome est environ égale à 50 et celle du nickel est environ égale à 200 soit beaucoup plus que la sélectivité de la silice. Ainsi, le chrome et le nickel déposés par évaporation permettent de graver respectivement 50 μm et 200 μm de GaAs, ce qui demeure insuffisant.
- Des masques en nickel ont été réalisés par dépôt électrolytique à l'intérieur d'un moule de résine afin d'obtenir des épaisseurs supérieures. Cette méthode permet de réaliser des masques en nickel ayant jusqu'à 5 μm d'épaisseur. Le nickel micro-moulé a la même sélectivité que le nickel évaporé donc il permet de graver jusqu'à 1 mm de GaAs ce qui est largement suffisant pour la réalisation du CVG triaxial. **Le masque pour la réalisation du CVG triaxial en GaAs sera donc réalisé en nickel micro-moulé.**

Tableau 18 : Sélectivité, épaisseur maximum et profondeur maximum de la gravure ICP du GaAs pour différents masques. Paramètres ICP : puissance de la bobine : 800W, puissance du plateau : 125W, pression : 20mT, $\text{BCl}_3 / \text{Cl}_2$: 15/1, dans ces conditions la vitesse de gravure est d'environ 1,9 $\mu\text{m}/\text{min}$

Masque	Méthode de dépôt	Sélectivité mesurée	Epaisseur maximum du masque	Profondeur maximale de la gravure
Résine classique	Spin-coating	≈ 10	$\approx 10\mu\text{m}$	$\approx 100\mu\text{m}$
Résine FOX	Spin-coating	≈ 70	$\approx 300\text{nm}$	$\approx 20\mu\text{m}$
Silice	PECVD	≈ 80	$\approx 2\mu\text{m}$	$\approx 160\mu\text{m}$
Chrome	Micromoulage	≈ 50	$\approx 5\mu\text{m}$	$\approx 250\mu\text{m}$
Nickel	Micromoulage	≈ 200	$\approx 5\mu\text{m}$	$\approx 1\text{ mm}$

La sélectivité du nickel a été déterminée avec plus de précision grâce des mesures MEB effectuées après différents temps de gravure (figure 63). L'épaisseur de nickel gravée est proportionnelle à l'épaisseur de GaAs gravée et sa sélectivité est égale à 205, ce qui correspond à 2,2 μm de nickel consommée lors de la gravure de 450 μm de GaAs. **Un masque de nickel de 3 μm d'épaisseur sera donc suffisant pour la réalisation du CVG triaxial en GaAs.**

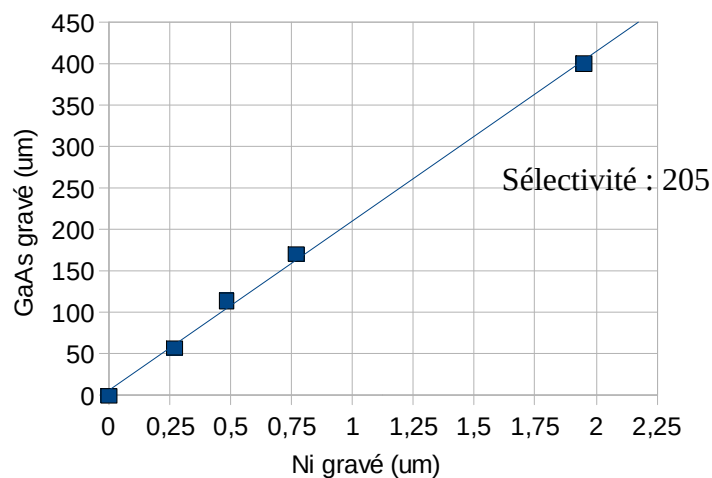


Figure 63 : Epaisseur de nickel gravée en fonction de l'épaisseur du GaAs gravée. Paramètres ICP : puissance de la bobine : 800W, puissance du plateau : 125W, pression : 20mT, $\text{BCl}_3 / \text{Cl}_2$: 15/1

4.2.4 Détermination des paramètres ICP.

Les quatre principaux paramètres de la gravure ICP sont : la puissance de la bobine, la puissance du plateau, la pression et la composition du plasma. La pression, la puissance de la bobine et la puissance du plateau ont été sélectionnées d'après l'état de l'art et la composition du plasma a été étudiée expérimentalement.

4.2.4.1 Paramètres physiques du plasma.

Trois paramètres déterminent la physique du plasma généré : la puissance de la bobine, la puissance du plateau et la pression.

La puissance électrique de la bobine contrôle le taux de particules ionisées dans le plasma [86]. L'augmentation du taux de particules ionisées permet d'augmenter le flux d'ions bombardant la surface et donc la vitesse de gravure.

La puissance électrique du plateau contrôle l'énergie des ions bombardés [86]. L'augmentation de l'énergie des ions permet d'augmenter la vitesse de gravure mais diminue la sélectivité du masque [76].

La pression du plasma détermine la densité de réactifs. L'augmentation de la pression entraîne l'augmentation de la composante chimique de la gravure, ce qui accroît la vitesse de gravure sans réduire la sélectivité.

R. Shul [76] a réalisé une gravure plasma du GaAs par BCl_3/Cl_2 de $110\mu\text{m}$ de profondeur en utilisant une puissance de bobine de 750W, une puissance de plateau de 100W et une pression de 10 mTor. Le bâti STS ne permet pas d'augmenter la puissance de la bobine, le maintien de la sélectivité du masque ne permet pas d'augmenter la puissance du plateau. **Dans cette thèse, on se propose d'augmenter la pression pour atteindre une vitesse de gravure et une profondeur plus importantes.** La puissance de la bobine sera de 800 W, la puissance du plateau de 125 W et la pression de 20 mTor.

4.2.4.2 Détermination du rapport BCl_3/Cl_2 .

Lors de la gravure du GaAs, le BCl_3 et le Cl_2 ont des rôles complémentaires : le Cl_2 grave rapidement et le BCl_3 passive les flancs ce qui permet d'obtenir une gravure verticale. **Le rapport entre BCl_3 et le Cl_2 doit être choisi de manière à obtenir le meilleur compromis entre vitesse de gravure et verticalité.**

Une série de test a été effectuée dans ce but. Un masque de nickel avec des ouvertures de $60\mu\text{m}$ de large a été déposée sur des échantillons de GaAs (100) puis chaque échantillon a été gravé pendant 10 minutes avec une puissance bobine de 800W, une puissance plateau de

125W, une pression de 20mTor et différents rapport $\text{BCl}_3 / \text{Cl}_2$. Chaque échantillon a ensuite été clivé et observé au MEB. Pour chaque échantillon, la gravure verticale et la sous-gravure ont été mesurées suivant les conventions présentées sur la figure 64.

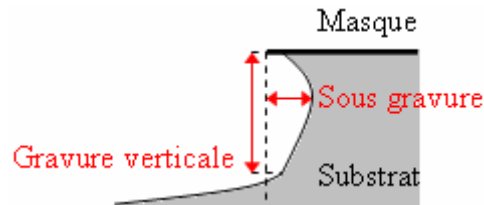


Figure 64 : Conventions utilisées pour mesurer la gravure verticale et la sous-gravure

La figure 65 présente l'évolution de la vitesse de gravure et de la vitesse de sous-gravure en fonction du rapport de BCl_3 . On constate que l'augmentation du rapport de BCl_3 améliore la verticalité mais diminue la vitesse de gravure. En comparant les résultats avec ceux que R. Shul [76] a obtenu à une pression plus basse, on constate que l'augmentation de la pression améliore la vitesse de gravure mais diminue la verticalité, on sait de plus qu'elle améliore la sélectivité. Pour maintenir la verticalité, il est donc nécessaire d'augmenter conjointement la pression et le rapport de BCl_3 .

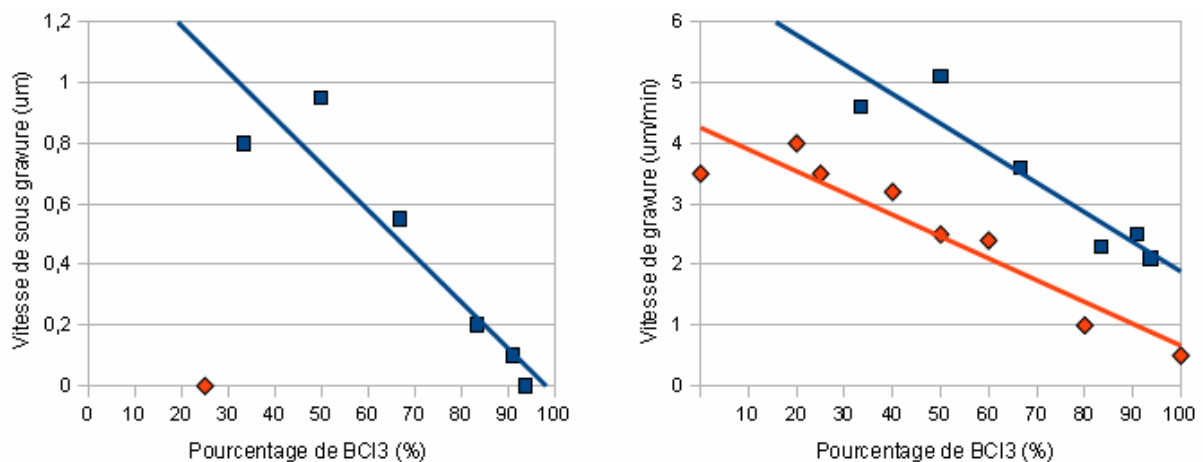


Figure 65 : Vitesse de gravure et de sous-gravure pour différent rapport BCl_3/Cl_2 . Carrés : résultats expérimentaux, puissance de la bobine 800W, puissance du plateau 125W, pression 20mTor. Losanges : résultats de R. Shul [76], puissance de la bobine 750W, puissance du plateau 150W, pression 5mTor.

4.2.4.3 Conclusion.

Les paramètres sélectionnés pour la gravure profonde ICP sont :

- puissance de la bobine : 800W
- puissance du plateau : 125W
- pression : 20mTor
- rapport $\text{BCl}_3 / \text{Cl}_2$: 15 /1.

Sur une durée de 10 minutes, ils permettent d'obtenir :

- une sélectivité de 205 vis-à-vis du nickel
- une vitesse de gravure assez importante environ égale à 2 $\mu\text{m}/\text{min}$
- une très bonne verticalité et un fond de gravure lisse (voir la figure 66).

Nous allons maintenant déterminer si ces caractéristiques de gravure se maintiennent pour des durées de gravure plus longues.

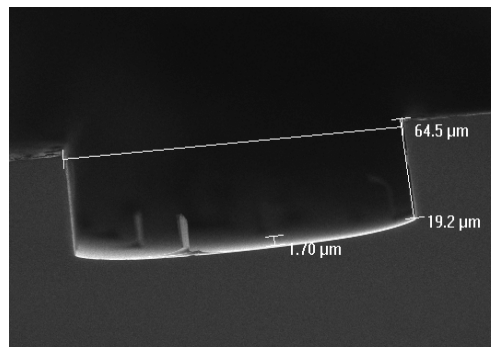


Figure 66 : image MEB du profil de la gravure ICP obtenue avec un rapport BCl_3/Cl_2 de 15/1 (puissance de la bobine 800W, puissance du plateau 125W, pression 20mT, durée : 10 min)

4.2.5 Evolution de la vitesse de gravure en fonction de la profondeur gravée.

On teste la proportionnalité entre le temps de gravure et la profondeur gravée sur des durées plus longues, les résultats sont présentés sur la figure 67. Deux largeurs de gravure ont été testées : pour une largeur de 60 μm , la vitesse de gravure est de 1,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ à $t = 30$ min, 1,2 $\mu\text{m}/\text{min}$ à $t = 60$ min et 0,6 $\mu\text{m}/\text{min}$ à $t = 90$ min alors que pour une gravure de 500 μm de large, la vitesse de gravure reste égale à 1,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ jusqu'à $t = 240$ min. On en déduit qu'il s'agit d'une limitation due au rapport d'aspect. Comme le montre la figure 67, on peut supposer que cette limitation commence à apparaître pour les rapports d'aspect supérieurs à 1,1.

En conclusion, une gravure de 450 μm de profondeur est réalisable en 270 minutes avec une vitesse de gravure moyenne de 1,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ à condition de réaliser des gravures ayant une largeur minimale de 410 μm .

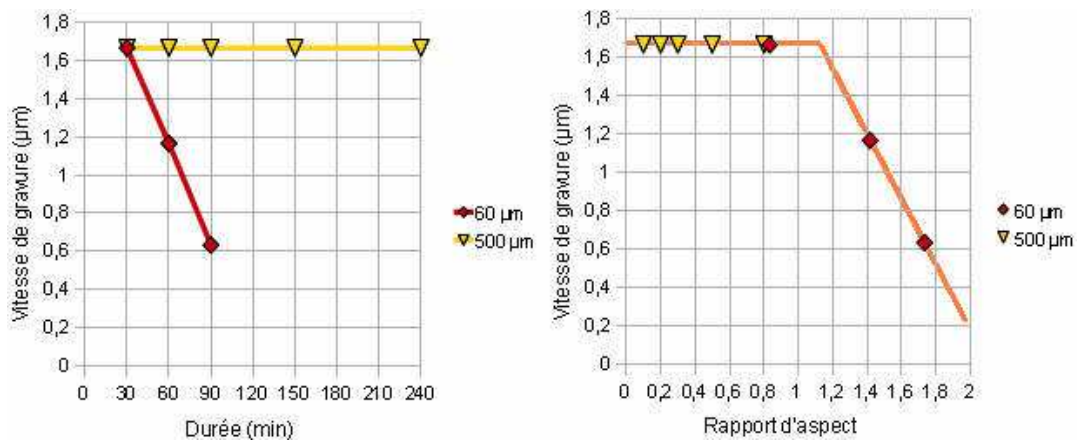


Figure 67: A gauche : vitesse de gravure en fonction de la durée, à droite : vitesse de gravure en fonction du rapport d'aspect.

Losanges rouges : gravure de 60 μm de large. Triangles jaunes : gravure de 500 μm de large

La figure 68 présente des images MEB du profil de trois gravures de 60 μm de large ayant des profondeurs égales à 20μm, 60μm et 110μm et d'une gravure de 500μm de large et de 400μm de profondeur. Ces images MEB montrent que la gravure du GaAs produit des flancs verticaux même aux plus grandes profondeurs. **La gravure traversante du GaAs permettra donc de réaliser une structure de CVG triaxial conforme.**

Des micropiliers dus à des phénomènes de micro-masquage sont présents sur le fond des gravures. Ces micropiliers ne portent pas préjudice à la réalisation car la gravure à réaliser est traversante. Ils pourraient aussi être éliminés au fur et à mesure de la gravure par de brèves gravures isotropes.

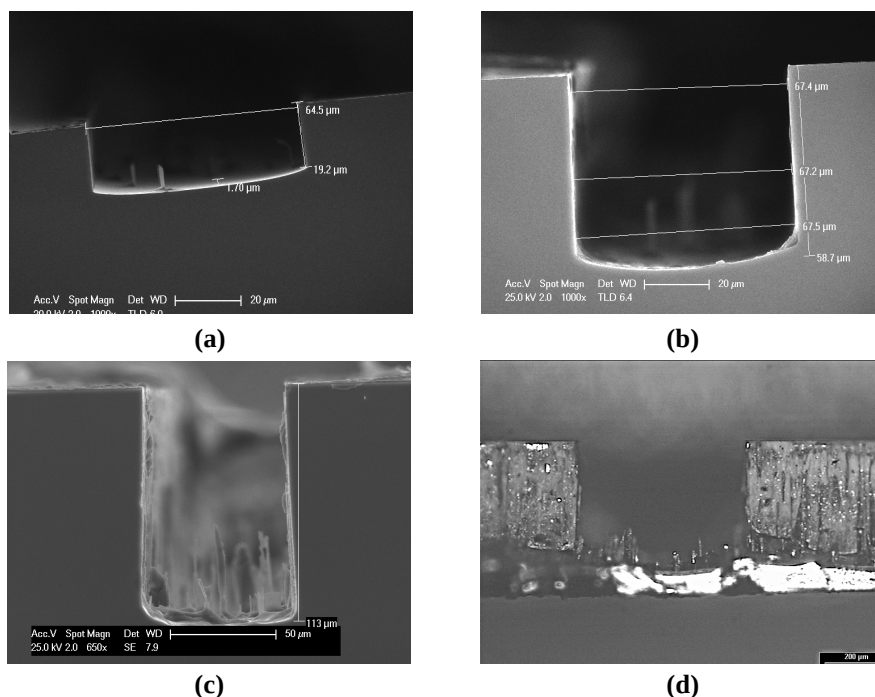
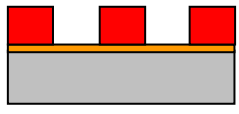
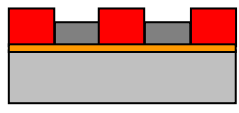
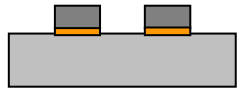
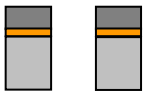
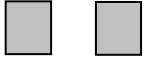


Figure 68 : images MEB de profils de gravure pour différentes profondeurs et différentes largeurs
(a) largeur = 60μm, profondeur = 20μm, (b) largeur = 60μm, profondeur = 60μm,
(c) largeur = 60μm, profondeur = 110μm, (d) largeur = 500μm, profondeur = 400μm

4.2.6 Procédé pour la gravure plasma traversante du GaAs.

Cette partie récapitule les étapes du procédé pour la gravure plasma traversante du GaAs. Les paramètres du procédé sont réunis dans le tableau 19. Une couche conductrice de Cu sur Ti est réalisée sur toute la surface du wafer. Ensuite, un moule est réalisé par lithographie d'une couche de résine très épaisse, puis un masque de nickel est réalisé par croissance électrolytique dans ce moule. Ensuite, la résine est dissoute et le Cu et le Ti à découvert sont retirés par voie chimique. La gravure plasma du GaAs est effectuée et le masque métallique est retiré par voie chimique.

Tableau 19 : Procédé pour la gravure plasma traversante d'un wafer de GaAs de 450µm

Etape :	Paramètres :	Schéma :
Dépôt d'une couche conductrice de 100nm d'épaisseur sur toute la surface du wafer	Pulvérisation cathodique par un plasma d'argon : 1, Dépôt d'une couche d'accroche de Ti de 10 nm d'épaisseur : Pression initiale : 0,01 µbar, Pression de travail : 8,0 µbar d'Ar Courant : 200 mA continu, Durée : 600 s de nettoyage de la cathode de Ti (cache fermé) puis 200s de dépôt (cache ouvert) 2, Dépôt d'une couche conductrice de Cu de 100 nm d'épaisseur : Pression initiale : 0,01µBar, Pression de travail : 8,0µBar d'Ar Courant : 400 mA continu, Durée : 120 s de nettoyage de la cathode de Ti (cache fermé) puis 225 s de dépôt (cache ouvert)	
Dépôt et photolithographie d'un moule de résine négative de 14 µm d'épaisseur	Résine AZ125nXT Accélération : 5000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30 s Recuit : rampe vers 140°C, durée : 10 min Insolation : 1000 mJ/cm ² , λ : 365 nm Développeur : AZ 726, durée : 2 min 30	
Dépôt d'une couche de nickel de 3µm	Dépôt électrolytique : Solution contenant 0,75 mol/L de NiSO ₄ , 0,4 mol/L de H ₃ BO ₄ , 0,02 mol/L de NiCl ₂ et Saccharine 0,016 mol/L Courant surfacique : 10 mA/cm ² Durée du dépôt : 15 min (0,2 µm/min)	
Retrait du moule de résine	Remover AZ100 à 70°C, durée : 10 min Rinçage à l'EDI, durée : 1 min	
Retrait du Cu et du Ti	Copper etch : 15 s, Rinçage à l'EDI : 1min BHF : 3 min, Rinçage à l'EDI : 1min	
Gravure profonde du GaAs	Bâtir de gravure ICP chlorée Graisie thermique sur la face arrière du wafer Gaz de gravure : BCl ₃ /Cl ₂ : 30/2, pression : 20 mT Puissance de la bobine : 800 W, puissance du plateau : 125 W Durée de la gravure : 275 min (pour une profondeur de 450 µ) Nettoyage de la face arrière à l'isopropanol	
Retrait du masque	Copper etch : 10 min, Rinçage à l'EDI : 1min BHF : 3 min, Rinçage à l'EDI : 1min	

4.2.7 Conclusion sur la gravure plasma.

La réalisation de la structure vibrante du gyromètre triaxial en GaAs est possible par gravure plasma traversante d'un wafer de 450 μm . Cette gravure nécessite un masque de nickel micro-moulé de 3 μm d'épaisseur et un temps de gravure de 4h30.

Malgré une mise en œuvre plus lourde, la gravure plasma demeure avantageuse car elle produit une gravure verticale quelque soit l'orientation cristalline de la structure. Si le CVG triaxial est réalisé par gravure plasma, il pourra donc être orienté suivant la direction cristalline la plus avantageuse au niveau piézoélectrique. De plus la gravure plasma ne produit aucune figure d'attaque et très peu de sous-gravure. Ainsi, les structures réalisées par gravure plasma seront très fidèles à la géométrie prévue et respecteront ses symétries, ce qui est nécessaire pour limiter les couplages indésirables et obtenir des facteurs de qualité élevés.

4.3 Comparaison des deux méthodes de gravure du GaAs.

Deux procédés de gravure traversante du GaAs dopé C ont été mis au point : un procédé de gravure chimique et un procédé de gravure plasma. Ces deux procédés permettent de réaliser des gravures traversantes sur des wafers de GaAs de 450 μm d'épaisseur. Ces procédés possèdent chacun des avantages et des inconvénients spécifiques qui sont présentés dans le tableau 20.

Tableau 20 : Comparaison des gravures traversantes d'un wafer de GaAs de 450 μm d'épaisseur par voie chimique et par plasma

Gravure	Gravure chimique	Gravure plasma
Solution / plasma	$\text{NH}_4\text{OH} / \text{H}_2\text{O}_2$	$\text{BCl}_3 / \text{Cl}_2$
Matériau du masque	Si_3N_4	Ni
Déposition du masque	PECVD	Micro moulage
Type de gravure	Gravure double face	Gravure simple face
Vitesse de gravure	8 $\mu\text{m}/\text{min} \times 2$	1,7 $\mu\text{m}/\text{min}$
Durée de la gravure traversante	30 min	4h30
Sélectivité du masque	> 5000	205
Epaisseur du masque	400 nm	3 μm
Verticalité	Seules les gravures suivant $\langle 100 \rangle$ et $\langle 010 \rangle$ sont verticales	Toutes les gravures sont verticales
Figure d'attaque	Figures d'attaque de 225 μm de long dans les angles concaves	Pas de figures d'attaque
Sous-gravure	225 μm	Quelques μm
Largeur minimale des gravures	450 μm	450 μm

La gravure plasma a été retenue pour la réalisation du CVG triaxial car elle permet d'obtenir une grande fidélité de réalisation puisque qu'elle n'engendre pas de sous-gravure ni de figures d'attaque.

La gravure chimique a été retenue pour réaliser les résonateurs de test qui seront utilisés pour caractériser le GaAs car elle est rapide et facile à mettre en oeuvre.

5

Réalisation de résonateurs en GaAs et estimation des performances du CVG triaxial

L'objectif de ce chapitre est de caractériser expérimentalement les propriétés du GaAs dopé C pour prévoir les performances du CVG triaxial.

Pour ce faire, des résonateurs en GaAs ont été dimensionnés puis réalisés, puis leurs comportements mécanique et piézoélectrique ont été caractérisés en température. Ensuite, l'influence de la température sur le facteur d'échelle, les conditions de résonance du mode pilote et le bruit de mesure du CVG triaxial ont été modélisés et déterminés au moyen des paramètres matériaux mesurés. Ces estimations ont permis de déterminer la gamme de performance dans lequel le CVG triaxial se situe.

5.1 Conception et réalisation de résonateurs en GaAs.

5.1.1 Conception de la structure vibrante des résonateurs en GaAs.

Pour que les résonateurs présentent une résonance nette et bien définie, il faut qu'ils aient un facteur de qualité important et notamment que la dissipation d'énergie dans le support soit minimale. Pour cette raison, on utilisera une géométrie en double diapason (voir figure 69) car les flexions dans le plan des quatre poutres se compensent grâce aux deux axes de symétrie du résonateur, ce qui minimise la dissipation d'énergie. De plus, cette structure présente des poutres qui vibrent en flexion, leur déformation est donc de même nature que les déformations du CVG triaxial qui exploitent elles aussi des flexions de poutres. Les paramètres déterminés en utilisant ces résonateurs pourront donc être appliqués au CVG triaxial.

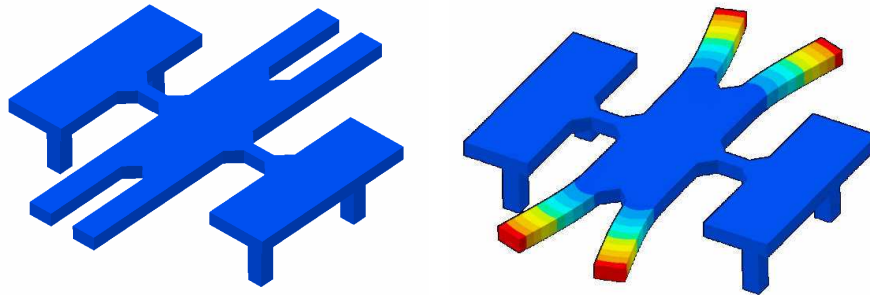


Figure 69 : Structure et mode de vibration du résonateur en GaAs

Le résonateur a été dimensionné pour que sa fréquence de résonance soit du même ordre de grandeur que les fréquences de résonance du CVG triaxial. Ses dimensions sont présentées sur la figure 70. L'épaisseur de la structure est égale à l'épaisseur du wafer de GaAs soit $450\mu\text{m}$, la largeur des poutres est de $750\mu\text{m}$ et leur longueur de $3000\mu\text{m}$. Sa fréquence de résonance déterminée en simulation par éléments finis est ainsi de $41,4\text{ kHz}$.

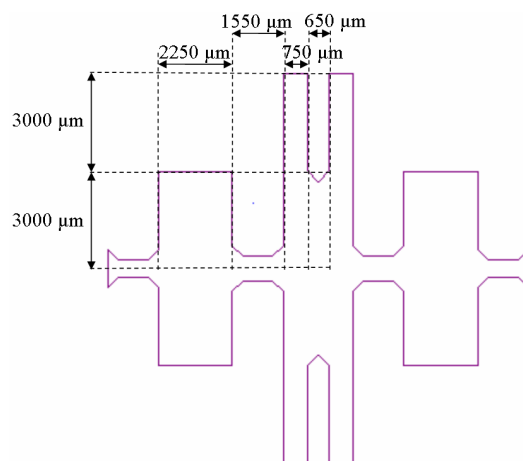


Figure 70 : Dimensions des résonateurs en GaAs.

Des électrodes ont ensuite été conçues pour l'excitation/détection piézoélectrique intégrée du résonateur. Ces résonateurs ont été réalisés avant le développement du procédé de gravure plasma, ils ont donc été usinés par gravure chimique pour faciliter la réalisation. Pour obtenir des flancs verticaux en gravure chimique, les poutres du résonateur ont été orientées selon $\langle 100 \rangle$ (voir partie 4.1.4). Par conséquent, seules les contraintes de cisaillement peuvent être détectées par effet piézoélectrique (voir partie 3.5.1). La flexion produit un cisaillement dans les poutres et un cisaillement de signe opposé au pied des poutres. Les électrodes réalisées exploitent le cisaillement situé au pied des poutres car il est plus facilement accessible (voir figure 71). Ce cisaillement produit des déplacements de charge verticaux qui sont détectées au moyen d'électrodes double face présentées sur la figure 71.

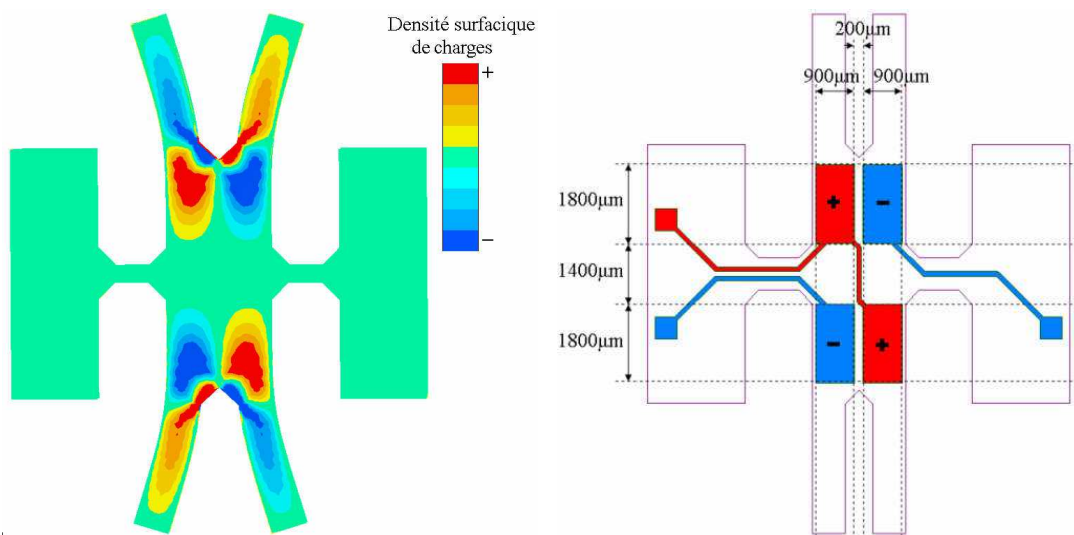
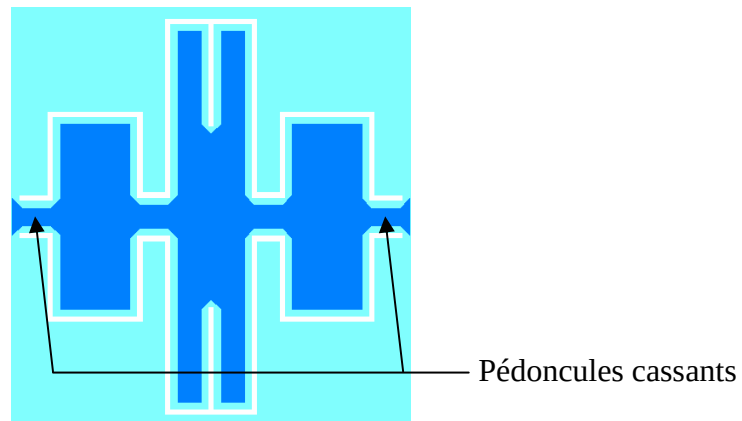


Figure 71 : Densité de charge à la surface du résonateur et plan des électrodes d'excitation/détection

5.1.2 Réalisation des résonateurs piézoélectrique en GaAs.

Les résonateurs ont été réalisés par gravure chimique traversante d'un wafer de GaAs dopé C de 450 μm d'épaisseur suivant le procédé présenté dans la partie 4.1.2. Pour obtenir des flancs verticaux, les poutres sont orientées dans la direction $\langle 010 \rangle$. Dans cette direction, le rapport de sous-gravure est de 1 (voir partie 4.1.3). La profondeur gravée est de 225 μm pour chaque face donc la sous-gravure est de 225 μm . Les ouvertures sur le masque ont été réalisées avec une largeur minimale de 200 μm afin de permettre un bon renouvellement de la solution de gravure. La distance entre les poutres des diapasons est donc de 650 μm . Le masque utilisé pour la gravure du résonateur est présenté sur la figure 72.



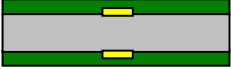
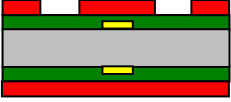
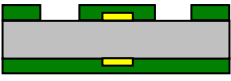
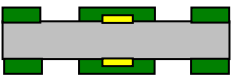
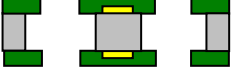
**Figure 72 : Motif sur le masque : zone ouverte en blanc, zones fermées : bleu clair + bleu foncé
Structure prévue en tenant compte de la sous-gravure : bleu foncé**

Le tableau 21 présente le procédé de réalisation des résonateurs piézoélectriques en GaAs. Ce procédé est similaire au procédé présenté dans la partie 4.1.2. mais il est précédé de la réalisation des électrodes d'excitation/détection. Les électrodes sont déposées par évaporation d'une couche d'or 200 nm avec une couche d'adhérence de chrome de 5 nm et le motif des électrodes est réalisé par lift off. La face sur laquelle les électrodes ont été réalisées est ensuite protégée par une couche de résine et l'opération est renouvelée sur la deuxième face. Une fois que les électrodes sont réalisées, le GaAs est usiné suivant le procédé de gravure présenté dans la partie 4.1.3.

Tableau 21 : Procédé de réalisation des structure en GaAs

Etape	Paramètres	Schéma
Nettoyage	Nettoyage à l'acétone : 1 min Nettoyage à l'isopropanol : 1min	
Dépôt et photolithographie d'une couche de résine négative de 1,4 µm d'épaisseur avec une casquette de 2,0 µm sur la face avant	Promoteur d'adhérence HMDS, accélération : 5000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30s Résine AZ5214, accélération : 5000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30s, recuit : 110°C, durée : 1min Insolation : 2 mJ/cm ² , λ : 365 nm, Recuit : température : 120°C, durée : 2 min Insolation pleine plaque: dose : 112 mJ/cm ² , λ : 365 nm, AZ Developer / EDI : 1/1, durée : 10s, Rinçage EDI : 1min	
Evaporation et lift off d'une couche d'or de 200nm sur une couche de Cr de 5nm	Bâti : Plassys MEB 550S Vide initial : 7x10 ⁻⁷ Tor, rotation planétaire Energie du faisceau d'électrons : 10kV Vitesse dépôt : Cr : 0.1 nm/s, Au : 0.3 nm/s Lift off dans un bain d'acétone, à l'aide une seringue	
Dépôt d'une couche de résine pour protéger la face avant	Résine : S1813 Accélération : 5000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30s Recuit : 115°C, durée: 1min30	

5.1 Conception et réalisation de résonateurs en GaAs.

Résine, dépôt d'or et lift off en face arrière	Mêmes paramètres que pour la face avant	
PECVD d'une couche de Si ₃ N ₄ de 400nm d'épaisseur sur chaque face	Bâti : STS, Fréquence : 13.56 MHz, puissance : 20 W Vide initial : 5 mT, pression de travail : 900 mT Débit SiH ₄ : 2000 sccm, débit NH ₃ : 55 scm T. électrode sup. : 250°C, T. électrode inf. : 300°C Durée : 40 min (vitesse de dépôt 10nm/min)	
Dépôt et lithographie d'une couche de résine positive de 1,3 µm d'épaisseur sur la face avant et protection de la face arrière	Résine : S1813, accélération : 5000 rpm/s, vitesse : 4000 rpm, durée : 30s, recuit : 115°C, durée: 1min30 Insolation : 46 mJ/cm ² , λ : 365 nm Développeur MS 319, durée: 1min, Rinçage EDI : 1 min Protection de la face arrière par de la résine étalée au pinceau	
Ouverture du masque de Si ₃ N ₄	Bain de BHF (35% NH ₄ F, 5% HF) wafer en position verticale pendant 10 min Rinçage à l'EDI pendant 3 min avec agitation Retrait de la résine : Acétone : 1min, Isopropanol : 1min, EDI : 1min	
Réalisation du masque de Si ₃ N ₄ en face arrière	Mêmes paramètres que pour la face avant	
Gravure du GaAs	Wafer en position verticale, agitation de la solution + agitation du wafer pour chasser les bulles Solution : NH ₃ à 28% / H ₂ O ₂ à 30% : 1 / 4 Durée : 30 min (vitesse de gravure : 8,0µm/min) Rinçage EDI : 1min	
Retrait du masque de Si ₃ N ₄	Mêmes paramètres que pour ouvrir le masque	

Le résonateur est relié au reste du wafer par deux pédoncules cassants situés au niveau des zones de fixation (voir figure 72). A la fin du procédé de réalisation, ces deux pédoncules sont clivés pour séparer le résonateur du substrat.

Les résonateurs ont ensuite été montés sur des embases comportant quatre broches métalliques utilisées comme fixations et auxquelles sont connectées les électrodes du résonateur. La structure est fixée sur les broches avec une colle époxy, puis les électrodes sont connectées aux broches par de la laque d'argent. Les broches sont ensuite connectées à une électronique d'excitation/détection. Une photographie du diapason sur son embase est présentée sur la figure 73.

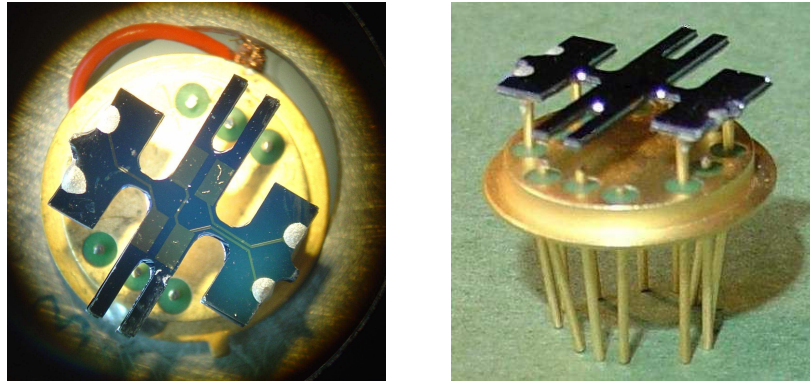


Figure 73 : double diapason en GaAs sur son embase

Une dispersion non négligeable a été observée sur les dimensions des résonateurs réalisés. La dispersion de la vitesse de gravure chimique du GaAs responsable de la dispersion des dimensions des résonateurs a été caractérisée dans la partie 4.1.3.3. L'écart type sur la largeur des poutres d'un même résonateur est de $11,5 \mu\text{m}$ et l'écart type entre les poutres des différents résonateurs est de $37,7 \mu\text{m}$ soit respectivement 1,5 % et 5% de la largeur des poutres. Comme nous allons le voir, ces asymétries ont perturbé le fonctionnement des diapasons.

5.2 Caractérisation de la fréquences de résonance

Les fréquences de résonance des résonateurs ont été repérées grâce à un balayage en fréquence effectuée au moyen d'un impédancemètre. Pour chacun des quatre résonateurs réalisés, nous avons repéré non pas une mais deux fréquences de résonance aux alentours de 41,4 kHz. Ces fréquences de résonance sont situées entre 39,5 kHz et 43,2 kHz et leurs facteurs de qualité sont compris entre 2000 et 136 000 à une pression de 0,1 mbar.

On en déduit que pour chaque résonateur, les deux diapasons d'une même structure n'ont pas la même fréquence de résonance et qu'ils vibrent séparément comme le montre la figure 74. L'écart type entre les fréquences de résonance mesurées et la fréquence de résonance théorique est de 5%. On peut supposer que la dispersion des fréquences de résonance et des facteurs de qualité est due à l'écart type sur la largeur des poutres qui est aussi de 5%.

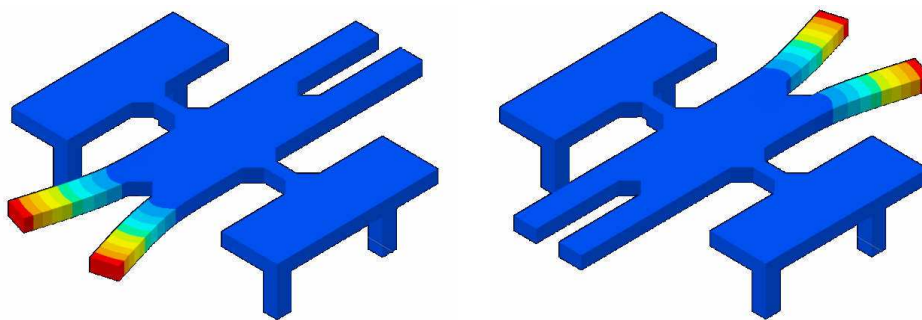


Figure 74 : Modes de vibration des résonateurs en GaAs asymétriques

La fréquence de résonance d'un capteur a été mesurée à différentes températures et son évolution est présentée sur la figure 75. La fréquence de résonance diminue linéairement avec l'augmentation de la température : sa dépendance est de -25 ppm/°C pour le GaAs dopé C. Cette dépendance ne correspond pas à la dépendance du GaAs intrinsèque qui est de -59 ppm/°C dans la direction $\langle 100 \rangle$ [72]. Des investigations supplémentaires seront nécessaires pour déterminer si cette faible dépendance en température est propre au GaAs dopé C ou si elle est due à l'évolution en température d'un paramètre extérieur (support, colle...).

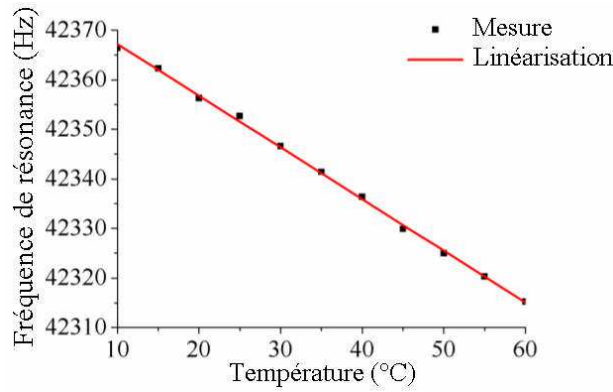


Figure 75 : Evolution de la fréquence de résonance d'un diapason en GaAs en fonction de la température

Si la faible dépendance en température de la flexion des poutres en GaAs dopé C est confirmée, elle sera avantageuse pour réduire la dépendance en température du facteur d'échelle du CVG triaxial car les modes du CVG triaxial sont comparables à des flexions de poutres.

5.2.1 Dépendance en température du facteur d'échelle.

L'expression du facteur d'échelle FE d'un CVG est :

$$FE = \frac{KA_p}{\Delta f} S_{transduc} \quad (92)$$

Avec K la coefficient de couplage Coriolis, A_p l'amplitude pilote, Δf l'écart de fréquence entre le mode pilote et un mode détection et $S_{transduc}$ la sensibilité de son système de transduction.

La dépendance en température de la fréquence de résonance du GaAs entraîne donc la dépendance en température des sensibilités mécaniques du CVG triaxial.

On admet que les quatre modes du CVG triaxial ont la même dépendance en température que le résonateur qui a été caractérisé car tous exploitent des modes basés sur des flexions de poutre. L'expression de la fréquence f des modes du CVG triaxial est donc :

$$f(T_0 + \Delta T) = f(T_0) \times (1 + a\Delta T) \quad (93)$$

Avec $a = -25 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, la dépendance en température de la fréquence de résonance.

L'expression de l'écart de fréquence Δf entre le mode pilote et un mode détection est donc :

$$\Delta f(T_0 + \Delta T) = \Delta f(T_0) \times (1 + a\Delta T) \quad (94)$$

L'expression du facteur d'échelle FE est donc :

$$FE(T_0 + \Delta T) \approx FE(T_0) \times (1 - a\Delta T) \quad (95)$$

La dépendance en température du facteur d'échelle est donc équivalente à la dépendance en température des fréquences de résonance mais de signe opposé soit $25 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$.

5.3 Comportement piézoélectrique.

Le mode pilote du CVG triaxial est excité et détecté à l'aide des mêmes électrodes. Le signal pilote détecté est amplifié et réinjecté afin d'asservir la fréquence du mode pilote. Cependant cet asservissement ne fonctionne que si les signaux parasites sont inférieurs au signal pilote. Pour déterminer dans quelles conditions cet asservissement fonctionne un modèle de résonateur piézoélectrique sera analysé théoriquement grâce à un circuit électrique équivalent. Les paramètres du circuit équivalent seront déterminés grâce à des mesures expérimentales effectuées sur les résonateurs réalisés et grâce à des simulations par éléments finis, et au final, la condition de résonance du CVG triaxial sera déterminée en fonction de la température.

5.3.1 Circuit équivalent à un résonateur piézoélectrique.

Un résonateur piézoélectrique isolant est équivalent à un circuit à deux branches parallèles [88]. Cependant, le GaAs dopé C n'étant pas parfaitement isolant, un résonateur piézoélectrique en GaAs est équivalent à un circuit à trois branches parallèles [72, 73] :

- Une branche motionnelle représentant la résonance mécanique du milieu piézoélectrique, elle est constituée d'une résistance R_m , d'une capacité C_m et d'une inductance L_m .
- Une branche capacitive représentant la capacité entre les électrodes, elle est constituée du condensateur C_0 .
- Une branche résistive représentant la résistance entre les électrodes, elle est constituée d'une résistance R_0 .

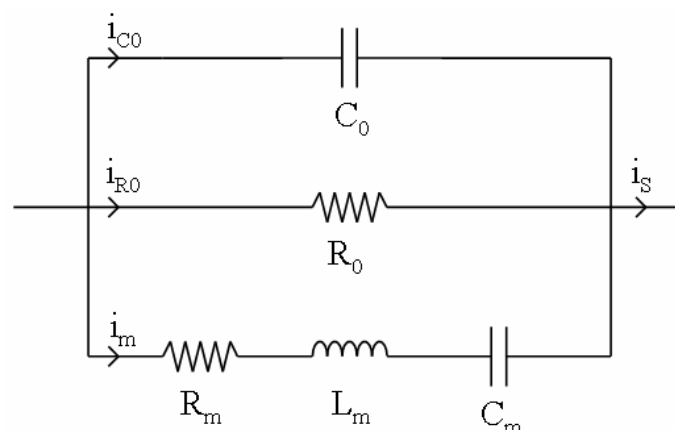


Figure 76 : Circuit électrique équivalent d'un résonateur piézoélectrique résistif

Pour que l'asservissement soit possible il est nécessaire que la branche motionnelle ne soit pas court-circuitée par la branche capacitive ou par la branche résistive. Ce qui équivaut à :

$$\begin{cases} R_m < Z_{C0} \\ R_m < R_0 \end{cases} \quad (96)$$

Avec Z_{C0} l'impédance de C_0 .

La résistance motionnelle et la capacité parasite du mode pilote peuvent être déterminée en simulation par élément finis en utilisant les paramètres du GaAs intrinsèque. Elles sont respectivement égales à 29 k Ω (pour $Q = 100\,000$) et 3,40 pF. A la fréquence de résonance du CVG triaxial (22 kHz) l'impédance Z_{C0} est de 2,1 M Ω : la première condition de résonance du mode pilote est donc remplie.

La résistivité du GaAs dopé C sera quand à elle déterminée expérimentalement.

5.3.2 Résistivité du GaAs dopé C.

La résistance R_0 d'un résonateur en GaAs a été mesurée avec un ohmmètre à différente température. Le GaAs étant un semi conducteur sa résistivité décroît exponentiellement avec la température [73], une décroissance exponentielle a donc été ajustée sur les points de mesures (figure 77).

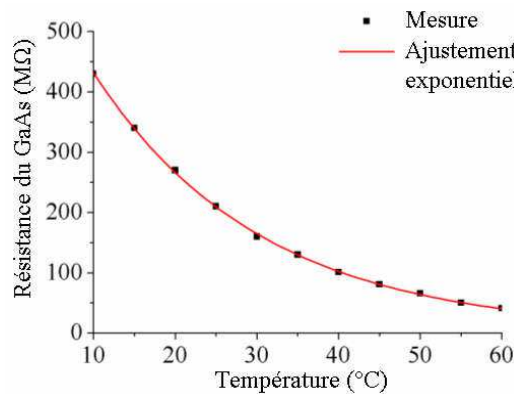


Figure 77 : Résistance électrique d'un diapason de GaAs en fonction de la température

L'équation de la décroissance exponentielle de la résistance du capteur est $R_0 = 6,9 \times 10^8 e^{-T/21} \Omega$. Pour en déduire la résistivité du GaAs il faut connaître le rapport d'aspect S/l des électrodes. La permittivité du GaAs étant connue, ce rapport d'aspect est déterminé en mesurant la capacité des électrodes. En effet :

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} \quad \text{et} \quad C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{l} \quad (97)$$

La capacité mesurée pour les électrodes est de 1,58 pF pour une permittivité de 97,3 pF.m⁻¹, le rapport S/l des électrodes est donc de 1,62 cm.

La résistivité du GaAs dopé C est donc égale à $1,1 \times 10^9 e^{-T/21} \Omega \cdot \text{cm}$. La résistivité du GaAs dopé C est supérieure à celle du GaAs intrinsèque : $1,7 \times 10^8 e^{-T/12} \Omega \cdot \text{cm}$ [73] et celle du GaAs dopé au chrome : $2,0 \times 10^8 e^{-T/17} \Omega \cdot \text{cm}$ [73].

L'importante résistivité du GaAs dopé C est avantageuse pour asservir le mode pilote et pour la marche aléatoire du CVG triaxial comme nous le verrons par la suite.

5.3.3 Condition de résonance du mode pilote.

L'excitation du mode pilote du CVG triaxial est possible uniquement si la branche motionnelle n'est pas court-circuitée par la résistivité du GaAs (voir partie 0). Ce qui équivaut à :

$$R_m < R_0 \quad (98)$$

Avec $R_m = 25 \text{ k}\Omega$ la résistance motionnelle du mode pilote et R_0 la résistance due à la résistivité du GaAs dopé C.

La résistance due à la résistivité est égale à :

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} \quad (99)$$

Avec $\rho = 1,1 \times 10^9 e^{-T/21} \Omega \cdot \text{cm}$ la résistivité et $S/l = 3,50 \text{ cm}$ le rapport d'aspect des électrodes pilote du CVG triaxial.

Ainsi, pour le pilote et $R_0 = 3,1 \times 10^8 e^{-T/21} \Omega$.

L'évolution en température de la résistance R_0 du mode pilote du CVG triaxial est présentée dans la figure 78. On constate que jusqu'à $T = 150^\circ\text{C}$, R_0 est supérieur à 10 fois R_m , la condition d'excitation du pilote est donc largement vérifiée.

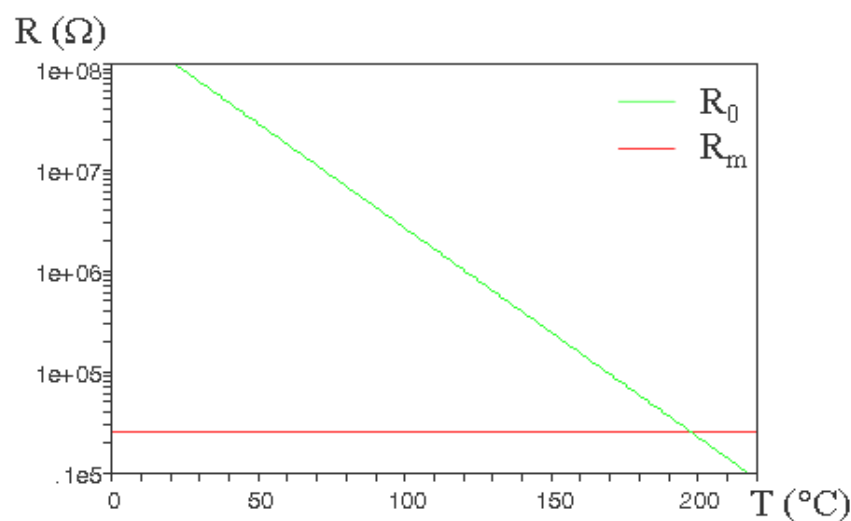


Figure 78 : Evolution en température de R_0 et R_m pilote

5.4 Marche aléatoire.

5.4.1 Modélisation de la marche aléatoire.

Dans le CVG triaxial, les mesures de vitesses de rotation sont effectuées en détectant les charges collectées par les électrodes. Le schéma équivalent d'une électrode de détection et des bruits électroniques associés est présenté sur la figure 79.

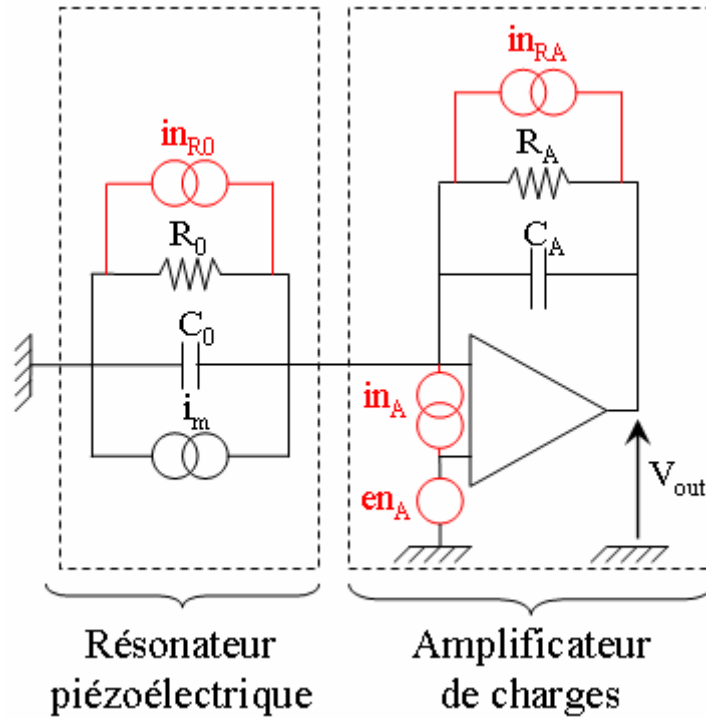


Figure 79 : Schéma équivalent d'une électrode de détection (en noir) et bruits électroniques associés (en rouge)

Avec R_0 la résistance inter-électrode, C_0 la capacité inter-électrode, i_m le courant piézoélectrique généré par la branche motionnelle, R_A la résistance de contre réaction, C_A la capacité de contre réaction, in_{R0} le bruit en courant de la résistance R_0 , in_{RA} le bruit en courant de la résistance R_A , in_A le bruit en courant de l'amplificateur et en_A le bruit en tension de l'amplificateur.

Pour un micro capteur détectant des charges électriques, les sources de bruit électronique prépondérantes sont l'amplificateur et les résistances [69]. Les bruits de l'amplificateur sont des paramètres propres à l'amplificateur et fournis par le constructeur; et les bruits électroniques des résistances sont des bruits thermiques, dit bruits de Johnson [89] dont l'expression est :

$$in_R = \sqrt{\frac{4k_b T}{R}} \quad (100)$$

Ces bruits sont rapportés en sortie de l'amplificateur en utilisant des fonctions de transfert. Ainsi, la Densité Spectrale de Bruit (DSB) en sortie de l'amplificateur est composée des DSB thermiques de R_0 et R_A et des DSB en courant et en tension de l'amplificateur respectivement nommées DSB_{R0} , DSB_{RA} , DSB_{inA} et DSB_{enA} , leurs expressions sont :

$$DSB_{R0} = \frac{R_A}{1 + j\omega R_A C_A} \sqrt{\frac{4k_b T}{R_0}} \quad (101)$$

$$DSB_{RA} = \frac{R_A}{1 + j\omega R_A C_A} \sqrt{\frac{4k_b T}{R_A}} \quad (102)$$

$$DSB_{inA} = \frac{R_A}{1 + j\omega R_A C_A} in_A \quad (103)$$

$$DSB_{enA} = \frac{1 + j\omega R_A (C_A + C_0) + R_A/R_0}{1 + j\omega R_A C_A} en_A \quad (104)$$

La DSB totale en sortie de l'amplificateur DSB_{ampli} est égale à :

$$DSB_{ampli} = \sqrt{DSB_{RA}^2 + DSB_{R0}^2 + DSB_{enA}^2 + DSB_{inA}^2} \quad (105)$$

La DSB à la sortie de l'amplificateur est définie comme :

$$DSB_{ampli} = \frac{V}{\sqrt{f}} \quad (106)$$

Avec f la fréquence d'échantillonnage et V de l'erreur sur la tension de sortie.

Cette DSB en tension peut être exprimée sous forme d'une DSB en vitesse de rotation $DSB(\Omega)$:

$$DSB(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{f}} \frac{d\theta}{dt} = \frac{q}{FE\sqrt{f}} = \frac{C_A V}{FE\sqrt{f}} = \frac{C_A DSB_{ampli}}{FE} \quad (107)$$

Avec $\frac{d\theta}{dt}$ l'erreur sur la vitesse de rotation, C_A la capacité de contre réaction de l'amplificateur et FE le facteur d'échelle.

Or, la marche aléatoire ARW est égale à la DSB en vitesse de rotation [90] :

$$ARW = DSB(\Omega) \quad (108)$$

La seule différence entre ces deux grandeurs est l'unité dans laquelle sont exprimées, la DSB est généralement exprimée en $(^\circ/h)/\sqrt{Hz}$ et la marche aléatoire en $^\circ/\sqrt{h}$.

$$1 (^\circ/h)/\sqrt{Hz} = 60 ^\circ/\sqrt{h} \quad (109)$$

5.4.2 Calcul de la marche aléatoire du CVG triaxial.

Pour le CVG triaxial : $C_0 = 2,51$ pF pour les modes détection X et Y et 2,05 pF pour le mode détection Z ; et $FE = 9 \times 10^{-16}$ C/(°/s) pour les modes détection X, Y et Z et d'après la résistivité du GaAs dopé C, $R_0 = 4,3 \times 10^8 e^{-T/21} \Omega$ pour les modes détection X et Y et $5,2 \times 10^8 e^{-T/21} \Omega$ pour le mode détection Z. Le CVG triaxial est équipé d'un amplificateur faible bruit donc : $en_A = 7$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, $in_A = 0,6$ fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$, $R_A = 100$ M Ω et $C_A = 10$ pF.

Les marches aléatoires selon X, Y et Z du CVG triaxial ont été déterminées en fonction de la température, ainsi que leurs quatre principaux contributeurs : les marches aléatoires dues au bruit thermique de R_0 et de R_A , le bruit en courant et le bruit en tension de l'amplificateur respectivement nommées ARW_{R_0} , ARW_{R_A} , ARW_{inA} et ARW_{enA} et sont présentées sur la figure 80.

On constate qu'à basse température les deux principaux contributeurs sont le bruit thermique de R_A qui est constante en température et le bruit en tension de l'amplificateur qui augmente lentement avec la température. La résistivité du GaAs augmente exponentiellement avec la température et à partir de 30°C elle devient la principale source de bruit.

A température ambiante, la marche aléatoire estimée est de 0,009°/ $\sqrt{\text{h}}$ pour les détections X, Y et Z ; et à 80°C elle est de 0,021°/ $\sqrt{\text{h}}$ pour les détections X et Y et de 0,023°/ $\sqrt{\text{h}}$ pour la détection Z. Ces marches aléatoires estimées se situent dans la gamme moyenne performance : 0,001 à 0,5°/ $\sqrt{\text{h}}$ et sont du même ordre que les performances des CVG MEMS monoaxiaux les plus performants 0,002°/ $\sqrt{\text{h}}$ [39].

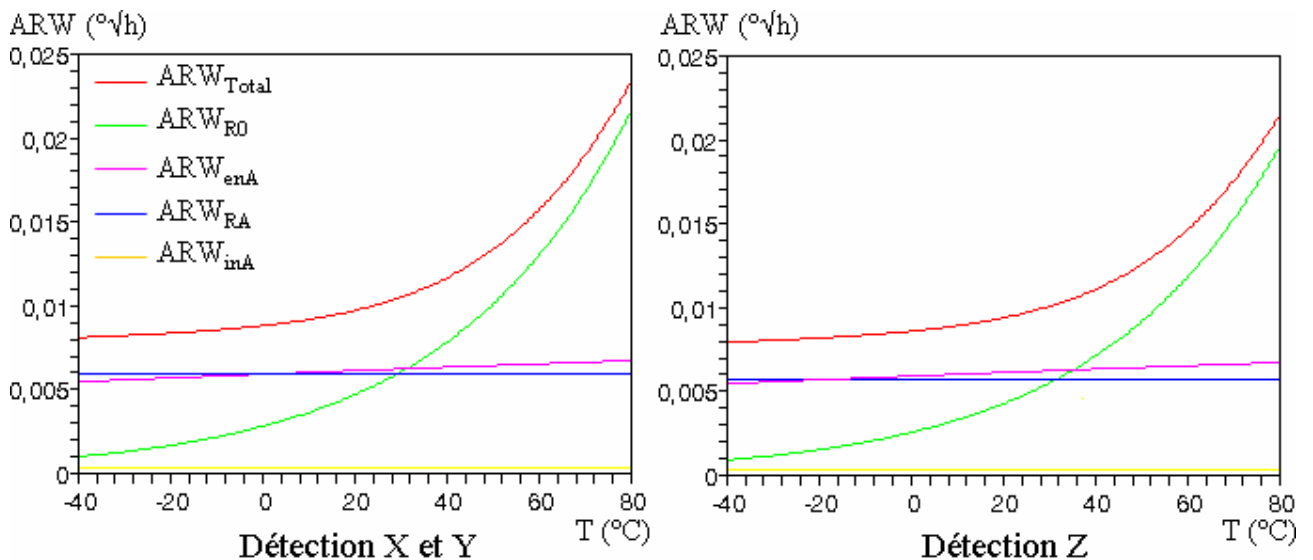


Figure 80 : Marche aléatoire des détections X, Y et Z en fonction de la température.

5.5 Conclusion.

Des résonateurs en GaAs dopé C ont été réalisés par gravure chimique et ont été utilisés pour déterminer la dépendance en température de la fréquence de résonance et de la résistivité.

La dépendance en température de la fréquence de résonance du GaAs dopé C est moitié moins importante que celle du GaAs intrinsèque, ce qui conduirait à une dérive du facteur d'échelle de seulement 25 ppm/°C. Ce résultat surprenant est toutefois à confirmer.

L'étude de la résistivité du CVG triaxial et de sa résistance motionnelle montre que jusqu'à 150°C la condition de résonance du mode pilote est vérifiée ce qui est largement compatible avec la gamme d'application : [-40°C ; +80°C].

Enfin, l'étude du bruit de mesure a montré que la principale source de bruit était la résistivité du GaAs. Quand la température augmente, la résistivité du GaAs diminue donc le bruit de mesure augmente mais il reste limité.

En effet, sur la gamme [-40°C ; +80°C] la marche aléatoire estimée ne dépasse pas 0,023 °/√h pour chacun des trois axes. D'après cette estimation, CVG triaxial se situe dans la gamme moyenne performances (de 0,5°/√h à 0,001°/√h), bien au delà des CVG triaxiaux de l'état de l'art (9 à 43°/√h) et à proximité des CVG monoaxiaux les plus performants (0,002°/√h).

Conclusion

La structure mécanique et le système de transduction intégré d'un CVG triaxial ont été conçus. La conception a débuté par une analyse théorique du comportement mécanique des CVG afin de déterminer l'expression de leur sensibilité. Cette analyse a mis en évidence la notion de coefficient de couplage Coriolis indispensable à l'optimisation de la sensibilité mécanique. Un CVG triaxial présentant trois coefficients de couplage Coriolis élevés a été conçu. Ce CVG triaxial constitué de quatre poutres encastrées sur un cadre déformable présente un avantage innovant : les contraintes pilote sont situées uniquement dans le cadre alors que les contraintes détection sont situées uniquement dans les poutres. Cet avantage, qui fait l'objet d'un brevet, permet de réduire le couplage en quadrature entre le mode pilote et les modes détection. Pour caractériser cette structure, des prototypes en silicium ont été réalisés. Leurs caractérisations ont permis d'observer trois des quatre modes de vibrations utiles et ont montré que la structure mécanique se comporte conformément aux simulations.

Le choix d'un système d'excitation/détection piézoélectrique a été retenu afin de pouvoir tirer profit de la séparation des déformations pilote et détection du CVG triaxial. Le GaAs a été sélectionné pour la réalisation car il s'agit d'un matériau piézoélectrique qui présente un fort potentiel de miniaturisation ; ainsi, il combine potentiellement les avantages du quartz et du silicium. L'étude de la sensibilité piézoélectrique a conduit à l'orientation des poutres du CVG triaxial dans la direction cristalline $\langle 110 \rangle$ et à la définition d'électrodes optimales.

L'usinage du GaAs a ensuite été étudié. Deux procédés permettant de graver verticalement le GaAs dopé C sur une profondeur de 450 μm ont été développés. Un procédé de gravure chimique humide a été mis au point mais les figures d'attaque qu'il génère se sont avérées incompatibles avec la réalisation du CVG triaxial. Un procédé de gravure plasma a donc été mis au point, ce procédé a permis de réaliser des gravures plasma verticales et sans figure d'attaque de 450 μm de profondeur soit quatre fois plus que les plus profondes gravures plasma du GaAs publiées précédemment.

Enfin, des résonateurs en GaAs dopé C ont été réalisés et ont permis de mesurer l'évolution en température de la résistivité et des propriétés électromécaniques du GaAs dopé C. Ces mesures ont permis d'estimer l'évolution en température de la marche aléatoire du CVG triaxial. Pour les détections X, Y et Z, les marches aléatoires du CVG triaxial estimées sont de $0,009^\circ/\sqrt{h}$ à 20°C et elle est d'environ $0,02^\circ/\sqrt{h}$ à 80°C .

En conclusion, les avantages du CVG triaxial en GaAs sont nombreux : sa nature triaxial permet de réduire son encombrement et d'obtenir des mesures de rotations toutes les trois issues de la même source avec des facteurs d'échelle équivalents; la séparation des déformations pilote et détection permet d'obtenir un couplage en quadrature très faible; et ses performances théoriques permettraient de le situer dans la gamme moyenne performance, parmi les CVG MEMS monoaxiaux les plus performants.

Perspectives

Au-delà de cette thèse, la recherche devra s'orienter vers une réalisation complète du CVG triaxial, de son système de transduction piézoélectrique et de son électronique. La réalisation de la structure vibrante en GaAs pourra être réalisée par gravure plasma traversante. Le procédé de réalisation des électrodes supérieures, inférieures et latérales et de leurs pistes de rappel devra préalablement avoir été étudié. Le CVG triaxial devra ensuite être équipé d'une électronique d'excitation/détection analogique ou numérique, puis ses performances pourront être caractérisées et confrontées aux estimations réalisées durant cette thèse.

Plusieurs améliorations de cette structure seront envisageables :

- Le CVG triaxial pourrait être réalisé dans un matériaux présentant un coefficient piézoélectrique plus important que le GaAs : comme par exemple le GaN. Des simulations par éléments finis devront alors être effectuées pour adapter le dimensionnement de la structure et la géométrie des électrodes aux paramètres mécaniques et piézoélectriques du GaN.
- Le CVG triaxial pourrait être associé à un capteur de température intégré qui permettrait de corriger la dérive en température du facteur d'échelle. Dans ce cas, la température mesurée devra être traitée par l'électronique de détection pour compenser l'erreur sur le facteur d'échelle.
- Le CVG triaxial pourrait être réalisé dans une membrane suspendue de 100 à 200 μm d'épaisseur. Ce principe permettrait de faciliter la réalisation par gravure plasma et de réaliser une encapsulation sur tranche. Cette réalisation

nécessiterait toutefois de reprendre la conception de la structure pour la suspendre non pas par le centre comme dans cette thèse mais par l'extérieur ce qui nécessitera une nouvelle phase d'optimisation. Réalisé sur une membrane, le CVG triaxial pourrait être miniaturisé d'un facteur 3 ou 4 et être réalisé sur une surface carrée de 3 ou 4 mm de côté, pour répondre à des besoins en miniaturisation plus poussés.

6 Annexes

6.1 Impact du dimensionnement sur la marche aléatoire des CVG piézoélectriques.

L'expression de la marche aléatoire nous permet de discuter de manière générale de l'impact du dimensionnement sur les performances des CVG piézoélectriques.

$$ARW = \frac{DSB(Q)}{FE} = \frac{DSB(Q)}{S_{méca} S_{piézo}} \quad (110)$$

Avec $S_{méca}$ la sensibilité mécanique, $S_{piézo}$ la sensibilité piézoélectrique et $DSB(Q)$ la densité spectrale de bruit en quantité de charges.

Pour étudier l'évolution de la marche aléatoire avec le dimensionnement il faut donc étudier l'évolution de la sensibilité mécanique, de la sensibilité piézoélectrique et de la DSB.

La sensibilité mécanique est égale à :

$$S_{méca} = \frac{KA_p}{2\pi\Delta f} \quad (111)$$

Avec K le coefficient de couplage Coriolis, A_p l'amplitude pilote et Δf l'écart de fréquence entre le mode pilote et le mode détection.

Le coefficient de couplage Coriolis est invariant par homothétie. L'amplitude pilote à contrainte constante est proportionnelle au dimensionnement (et son excitation nécessite une tension proportionnelle au dimensionnement). Dans le cas d'une homothétie pure l'écart de fréquence est inversement proportionnel au dimensionnement mais sa valeur est généralement ajustée en fonction de la bande passante souhaitée. **Par conséquent, à bande passante égale la sensibilité mécanique est proportionnelle au dimensionnement.**

La sensibilité de la détection piézoélectrique est égale à :

$$S_{piézo} = \frac{\Delta q}{A_d} = \iint_{S_+} \bar{\bar{e}} \bar{\bar{S}}_d \cdot \bar{n}_+ dS - \iint_{S_-} \bar{\bar{e}} \bar{\bar{S}}_d \cdot \bar{n}_- dS \quad (112)$$

Avec S_+ et S_- les surfaces des électrodes, $\bar{\bar{e}}$ le tenseur piézoélectrique, $\bar{\bar{S}}_d$ la déformation normalisée du mode détection, $\bar{n}_+$ et $\bar{n}_-$ les vecteurs unitaires perpendiculaires aux surfaces des électrodes.

Les surfaces des électrodes sont proportionnelles au carré du dimensionnement. Le tenseur piézoélectrique et les vecteurs de surface sont invariants avec le dimensionnement. La déformation du mode détection normalisée est le ratio entre la déformation et l'amplitude du mode détection, elle est donc inversement proportionnelle au dimensionnement. **Par conséquent, la sensibilité piézoélectrique est proportionnelle au dimensionnement.**

Si on considère que le matériau piézoélectrique employé est isolant, que le bruit en tension de l'amplificateur est la principale source de bruit et que la fréquence de coupure de l'amplificateur est très supérieure à la fréquence pilote du CVG, alors la densité de bruit en quantité de charge est égale à :

$$DSB(Q) = (C_A + C_0)en_A \quad (113)$$

Avec C_A et en_A la capacité et la DSB de l'amplificateur et C_0 la capacité inter électrode du mode détection du CVG.

La capacité de l'amplificateur C_A et la DSB de l'amplificateur en_A sont des paramètres propres à l'amplificateur et indépendants du dimensionnement de la structure. Quant à la capacité inter l'électrode, son expression est :

$$C_0 = \frac{S}{l} \varepsilon_0 \quad (114)$$

La capacité inter électrode C_0 est donc proportionnelle au dimensionnement.

Par conséquent, pour une "petite structure" c'est-à-dire quand $C_0 < C_A$ la DSB est invariante et pour une "grande structure" c'est-à-dire quand $C_0 > C_A$ la DSB est proportionnelle au dimensionnement.

En conclusion, à bande passante constante, la marche aléatoire d'une "petite structure" est inversement proportionnelle au carré du dimensionnement et la marche aléatoire d'une "grande structure" est inversement proportionnelle au dimensionnement.

Dans le cas du CVG triaxial $C_0 \approx 0,2C_A$, il s'agit donc d'une petite structure dont la marche aléatoire à bande passante constante est inversement proportionnelle au carré du dimensionnement.

6.2 Le facteur de qualité.

Les CVG exploitent les vibrations mécaniques d'un résonateur. Pour que ces vibrations soient nettement délimitées dans le domaine spectral, il faut qu'elles possèdent un grand facteur de qualité.

6.2.1 Les différentes sources de limitation du facteur de qualité.

Le facteur de qualité Q d'un mode représente sa capacité à conserver son énergie mécanique. Le facteur de qualité est inversement proportionnel à l'énergie dissipée. Il est égale à :

$$Q = \frac{2\pi W}{\Delta W} \quad (115)$$

Avec W l'énergie emmagasinée dans le résonateur et ΔW l'énergie dissipée en une période.

La dissipation peut être liée à différents phénomènes physiques :

$$W = \sum_i W_i \quad (116)$$

Avec ΔW_i l'énergie dissipée en une période par le phénomène i .

Un facteur de qualité propre Q_i peut être attribué à chaque source de dissipation.

$$Q_i = 2\pi \frac{W}{\Delta W_i} \quad (117)$$

Le facteur de qualité global est alors définit comme :

$$\frac{1}{Q} = \sum_i \frac{1}{Q_i} \quad (118)$$

Si un des facteur de qualité est très inférieur aux autres il est limitant :

$$Q \approx Q_{\min} \quad (119)$$

Dans le cas des MEMS, plusieurs phénomènes dissipatifs doivent être pris en compte et évités grâce à plusieurs précautions, notamment :

- La dissipation thermoélastique due aux flux de chaleur irréversibles générés par la vibration doit être évitée en dimensionnant la structure pour que sa fréquence de résonance soit très supérieur ou très inférieur à sa fréquence de relaxation thermique [91]
- La dissipation due au gaz entourant la structure doit être évitée en plaçant la structure sous vide à une pression inférieure à 1 mbar [92]
- La dissipation viscoélastique dans les électrodes doit être évitée en minimisant si possible la déformation des électrodes ou en réduisant leur épaisseur.

- La dissipation viscoélastique dans le support doit être évitée en équilibrant les modes de la structure lors de sa conception, ce point a donc été pris en compte lors de la conception du CVG triaxial.

6.2.2 Facteur de qualité propre à la dissipation d'énergie dans le support.

Une partie de l'énergie vibratoire d'un résonateur se situe dans son support, or, contrairement à la viscoélasticité du résonateur, la viscoélasticité de son résonateur est non négligeable. En effet, le support est constitué de divers matériaux viscoélastiques : métal, colle... contrairement au résonateur qui est monocristallin.

L'expression du facteur de qualité dû au support $Q_{support}$ est la suivante [93] :

$$Q_{sup} = \frac{E_{résonateur}}{E_{ext}} Q_{ext} \quad (120)$$

Avec $E_{résonateur}$ l'énergie stockée dans le résonateur, E_{ext} l'énergie stockée à l'extérieur du résonateur et Q_{ext} le facteur de qualité du milieu extérieur. Le facteur de qualité du milieu extérieur est inconnu mais il est possible d'obtenir un minorant du facteur de qualité dû au support en considérant que $Q_{ext} = 1$, c'est-à-dire en considérant qu'à chaque période la totalité de l'énergie stockée dans le support est dissipée :

$$Q_{sup\ min} < \frac{E_{résonateur}}{E_{sup\ port}} \quad (121)$$

Ce minorant peut être estimé par simulation par éléments finis : il s'agit du rapport entre l'énergie présente dans le support et l'énergie totale.

Pour optimiser $Q_{support}$, il faut que l'énergie vibratoire soit confinée à l'écart des fixations. Il existe deux manières d'obtenir ce confinement :

- En plaçant des ressorts de raideur très faible entre les parties en mouvement et la zone de fixation. L'énergie vibratoire est alors confinée dans les ressorts et elles ne se propagent pas jusqu'aux fixations. Cette solution est plus adaptée au MEMS en silicium pour lesquelles la gravure DRIE permet de réaliser des ressorts très fins.
- En utilisant un mode dont les mouvements se compensent pour créer un nœud de contrainte : une zone sur laquelle la vibration n'applique aucune contrainte. Par exemple, dans un diapason vibrant dans son plan, les mouvements de ses deux poutres se compensent et le pied du diapason n'est pas contraint par la vibration. Quasiment aucune énergie vibratoire n'est présente au niveau du nœud de contrainte et il peut être utilisé pour la fixation. C'est la solution qui sera utilisée pour optimiser les facteurs de qualité du CVG triaxial.

Références

- [1] N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi ; Micromachined Inertial Sensors ; Proc. IEEE vol. 86 no. 8 p.1640 ; 1998
- [2] M. Schuler ; Die Störung von Pendel und Kreiselapparaten durch die Beschleunigung des Fahrzeuges ; Physikalische Zeitschrift vol. 24 n°16; 1923
- [3] L. Foucault ; Sur les phénomènes d'orientation des corps tournants entraînés par un axe fixe à la surface de la terre - Nouveaux signes sensibles du mouvement diurne ; C. R. de l'Académie des Sciences de Paris vol. 35 p. 424 ; 1852
- [4] Observatoire de Paris ; website : www.foucault.science.gouv.fr/page12.pdf
- [5] Yokogawa ; Gyrocompass CMZ900 ; data sheet, 2007
- [6] S. Bennett, R. Dyott, D. Allen, J. Brunner, R. Kidwell, R. Miller ; Fiber optic rate gyros as replacements for mechanical gyros ; American Institute of Aeronautics and Astronautics p. 10 ; 1998
- [7] Kearfott ; conex mod i-s ; data sheet k130a124-06 ; 2008
- [8] M. Sagnac, C. Acad ; L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme ; C. R. de l'Académie des Sciences de Paris vol. 157 p. 708 ; 1913
- [9] W. Macek, D. Davis ; Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers ; Applied Physics Letters vol. 2 p. 67 ; 1963
- [10] Kearfott ; KI-4902S ; data sheet ; 2011
- [11] Ixsea ; Astrix 200 ; data sheet ; 2007
- [12] G. Coriolis ; Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps ; J. de l'école Polytechnique vol. 15 p. 142 ; 1835
- [13] G. Bryan ; On the beats in the vibration of a revolving cylinder or bell, Cambridge Philosophical Society Proc. vol. 7 p. 101 ; 1890
- [14] Northrop Grumman ; Scalable Siru ; data sheet ; 2011
- [15] I. Edu, R. Obreja, T. Grigorie ; Current technologies and trends in the development of gyros used in navigation applications - a review ; Proc. of WSEAS int. conf. on Communications and information technology p. 63 ; 2011
- [16] IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros ; Standards n°1431 ; 2004
- [17] S. Fujishima, T. Nakamura, K. Fujimoto ; Piezoelectric vibratory gyroscope using flexural vibration of a triangular bar ; Proc. Symp. Frequency Control p. 261 ; 1991

- [18] Murata ; Gyrostar ENV Series ; data sheet Designers'Choice n°2 ; 2003
- [19] H. Abe, T. Yoshida, K. Turuga ; Piezoelectric-ceramic cylinder vibratory gyroscope ; Japanese journal of applied physics vol. 31 n° 1 p. 3061, 1992
- [20] Nec/Tokin ; CG-L53 ; data sheet Nec Tokin Sensors vol. 1 ; 2004
- [21] J. Bernstein, S. Cho, A. King, A. Kourepenis, P. Maciel, M. Weinberg ; A Micromachined Comb-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope ; MEMS Proc. p. 143 ; 1993
- [22] A. Kourepenis, J. Borenstein, J. Connelly, R. Elliott, P. Ward, M. Weinberg ; Performance of MEMS inertial sensors ; IEEE Position Location and Navigation Symp. p. 49 ; 1998
- [23] D. Janiaud, O. Le Traon, B. Le Corre, S. Muller ; Monolithic vibrating rate gyro structure, Patent n° PCT/FR00/00211 Patent Application Publication US 2002/0033653 A1 ; 2000
- [24] M. Descharles ; Microcapteurs résonants et électroniques associées : modélisation conjointe et optimisation ; thèse de l'université Pierre et Marie Curie ; 2011
- [25] G. Baker ; Quartz rate sensor from innovation to application ; Symp. Gyro Technology p. 1 ; 1992
- [26] Systron Donner, QRS116, datasheet, 2008
- [27] P. Léger ; Gyroscopes mécaniques vibrants ; Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle R-1942 p. 1 ; 1999
- [28] M. Putty, K. Najafi ; A micromachined vibrating ring gyroscope ; Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop Proc. p. 213 ; 1994
- [29] G. He, K. Najafi ; High-frequency capacitive disk gyroscopes in (100) and (111) silicon ; IEEE 20th Int. Conf. on MEMS p. 47 ; 2007
- [30] J. Cho, J. Gregory, K. Najafi ; Single-crystal-silicon vibratory cylindrical rate integrating gyroscope (CING) ; Transducers Proc. p.2813, 2011
- [31] P. Greiff, B. Boxenhom, T. King, and L. Niles ; Silicon monolithic micromechanical gyroscope ; Transducers Proc. p. 966 ; 1991
- [32] P. Greiff, B. Antkowiak, J. Campbell, A. Petrovich ; Vibrating Wheel Micromechanical Gyro, IEEE Position Location & Navigation Symp. Proc. p. 31, 1996
- [33] K. Tanaka, Y. Mochida, M. Sugimoto, K. Moriya, T. Hasegawa, K. Atsuchi, K. Ohwada ; A micromachined vibrating gyroscope ; Sensors and Actuators A: Physical vol. 50 p. 111 ; 1995
- [34] W. Tang, T. Nguyen, R. Howe ; Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures ; Sensors and Actuators vol. 20 n° 1–2, p. 25 ; 1989
- [35] M. Kranz, G. Fedder ; Micromechanical vibratory rate gyroscopes fabricated in conventional CMOS ; Symp. Gyro Tech. n°3 ; 1997

- [36] H. Luo, G. Fedder, L. Carley ; An elastically gimbaled Z-axis CMOS-MEMS Gyroscope ; Int. Sym. Smart Structures & Microsystems p. 19 ; 2000
- [37] M. Zaman, A. Sharma, Z. Hao, F. Ayazi ; A mode-matched silicon-yaw tuning-fork gyroscope with subdegree-per-hour allan deviation bias instability ; J. of MEMS vol. 17 n°6 p.1526 ; 2008
- [38] B. Chaumet, B. Leverrier, C. Rougeot, S. Bouyat ; A New Silicon Tuning Fork for Aerospace Applications ; Gyro Tech. Symp. ; 2009
- [39] B. Johnson, E. Cabuz, H. French, R. Supino ; Development of a MEMS Gyroscope for Northfinding Applications ; IEEE Position Location and Navigation Symp. ; 2010
- [40] B. Blixhavn, D. Lapadatu, R. Holm, T. Kvisterøy ; SAR500 – A novel high-precision gyroscope ; Gyro Tech. Symp. ; 2010
- [41] M. Traechtler, T. Link, J. Dehnert, J. Auber, P. Nommensen, Y. Manoli ; Novel 3-Axis Gyroscope on a Single Chip using SOI-Technology ; IEEE Sensors Proc. p. 124 ; 2007
- [42] J. John, T. Vinay ; Novel Concept of a Single-Mass Adaptively Controlled Triaxial Angular Rate Sensor ; IEEE Sensors J., vol. 6, n° 3 ; 2006
- [43] C. Charcosset, A. Stepanski, R. Bourquin, G. Marianneau ; Gyromètre résonateur mécanique ; Brevet d'invention n°9607670 ; 1996
- [44] O. Bel ; Gyrometre a quartz 2-D Micro-usiné ; thèse de l'université de Franche-Comté ; 2008
- [45] J. Maisonnet ; Optimisation et réalisation d'un micro-gyromètre deux axes à poutres vibrantes en silicium ; thèse de l'université de Franche-Comté ; 2009
- [46] T. Juneau, A. Pisano, J. Smith ; Dual axis operation of a micromachined rate gyroscope, Solid-State Sensors and Actuators Tech. Digest p. 883 ; 1997
- [47] D. Tsai, W. Fang ; Design and simulation of a dual-axis sensing decoupled vibratory wheel gyroscope ; Sensors and Actuators A vol. 126 p. 33 ; 2006
- [48] N. Tsai, C. Sue ; Experimental analysis and characterization of electrostatic-drive tri-axis micro-gyroscope ; Sensors and Actuators A 158 p. 231, 2010
- [49] W. Sung, M. Dalal, F. Ayazi ; A mode-matched 0.9 MHz single proff-mass dual-axis gyroscope ; Transducers proc. p.2821 ; 2011
- [50] B. Gallacher, J. Burdess, A. Harris ; Principles of a Three-Axis Vibrating Gyroscope ; IEEE transactions on aerospace and electronic systems vol. 37 n° 4 p. 1333 ; 2001
- [51] B. Gallacher, J. Neasham, J. Burdess, A. Harris ; Initial Test Results from a 3-axis Vibrating Ring Gyroscope ; J. of Physics : Conference Series vol. 34 p. 662 ; 2006
- [52] D. Wood, G. Cooper, J. Burdess, A. Harris, J. Cruickshank ; A monolithic silicon gyroscope capable of sensing about three axes simultaneously ; Silicon Fabricated Inertial Instruments Digest p. 227 ; 1996

- [53] A. Chatterjee ; An introduction to the proper orthogonal decomposition ; Current science vol. 78 n° 7 p. 808 ; 2000
- [54] C. Haye ; Conception et realisation d'un micro-gyromètre sur substrat silicium ; thèse de l'université de Franche-Comté ; 2004
- [55] S. Timoshenko ; Theory of elasticity ; McGraw-Hill Book Company ; 1934
- [56] I. Roland, S. Masson, O. Ducloux, O. Letraon, A. Bosseboeuf ; GaAs-based tuning fork microresonators : A first step towards a GaAs-based coriolis 3-axis Micro-Vibrating Rate Gyro ; Sensors & Actuators: A. Physical vol. 172 , p. 204 ; 2011
- [57] I. Roland, S. Masson, O. Ducloux ; Structure planaire pour Gyromètre tri-axe ; Brevet INPI n° 10.04967 ; 2010
- [58] F. Laermer, A. Schilp ; Method of anisotropically etching silicon ; US Patent 5 501 893 ; 1996
- [59] S. Petitgrand, R. Yahiaoui, A. Bosseboeuf, K. Danaie ; Quantitative time-averaged microscopic interferometry for micromechanical device vibration mode characterization. Lasers in Metrology and Art conservation ; Conference on Microsystems Engineering : Metrology and Inspection Proc. SPIE Vol.4400 p.51 ; 2001
- [60] S. Petitgrand, A ; Bosseboeuf ; Simultaneous mapping of phase and amplitude of MEMS vibrations by microscopic interferometry with stroboscopic illumination ; Microsystem Engineering : Metrology and Inspection Proc. SPIE 5145 p.33 ; 2003
- [61] A. Hafiane, S. Petitgrand, O. Gigan, S. Bouchafa, A. Bosseboeuf ; Study of sub-pixel image processing algorithms for MEMS in-plane vibration measurements by stroboscopic microscopy ; Microsystem Engineering : Metrology and Inspection, Proc. SPIE 5145, p.169 ; 2003
- [62] F. Parrain, A. Bosseboeuf, J.P. Gilles, S. Megherbi, X. Le Roux ; Dynamic characterization of microresonators by stroboscopic optical microscopy ; World congress on computational mechanics, European congress on computational methods in Applied Sciences and Engineering, Actes ; 2008
- [63] O. Tufte, E. Stelzer ; Piezoresistive properties of silicon diffused layers, J. of Applied Physics vol. 34 n°2 p. 313 ; 1963
- [64] Q. Huang, N. Lee ; Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator ; J. of Micromech. and Microeng. vol. 9 p. 64 ; 1999
- [65] B. Ilic ; S. Krylov ; K. Aubin ; R. Reichenbach ; H. Craighead ; Optical excitation of nanoelectromechanical oscillators ; Applied Physics Letters vol. 86 p. 193114 ; 2005
- [66] H. Fujita, A. Omodaka ; Electrostatic actuators for micromechatronics ; IEEE Micro Robotics and Teleoperators Workshop ; 1987
- [67] R. Puers ; Capacitive sensors: when and how to use them ; Sensors and Actuators A: Physical vol. 37 p. 93 ; 1993

- [68] D. Royer, E. Dieulesaint ; Ondes élastiques dans les solides ; Edition Masson p. 136 ; 1996
- [69] A. Parent ; Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des micro-gyromètres vibrants ; thèse de l'université Paris-Sud ; 2008
- [70] Y. Morikawa, T. Koidesawa, T. Hayashi, K. Suu ; A novel deep etching technology for Si and quartz materials ; Thin Solid Films vol. 515 n°12 p. 4918 ; 2007
- [71] S. Adachi ; Properties of Semiconductor Alloys: Group IV, III-V and II-VI Semiconductors p. 97 vol. 28 Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications ; 2005
- [72] J. Soderkvist, K. Hjort ; The piezoelectric effect of GaAs used for resonators and resonant sensors ; J. Micromech. Microeng. vol. 4 p. 28 ; 1994
- [73] K. Hjort, J. Söderkvist, J.A. Schweitz, Gallium arsenide as a mechanical material, J. Micromech. Microeng. vol. 4 p.1 ; 1994
- [74] AXT ; wafer GaAs-SI ; datasheet ; 2012
- [75] O. Blum Spahn, C. Sullivan, T. Bakke, A. Allerman, J. Reno, G. Grossetete, J. Lean, C. Fuller ; Promise and Progress of GaAs MEMS and MOEMS ; Digest GaAs Mantech ; 2001
- [76] R. Shul, A. Baca, R. Briggs, G. McClellan, S. Pearton, C. Constantine ; ICP etching of GaAs via hole contacts ; Electrochemical Society Proc. vol. 96 n°15 p.84, 1996
- [77] S. Adachi, K. Oe ; Chemical Etching Characteristics of (001) GaAs ; J. of Electrochem. Soc. vol. 130 p. 2427 ; 1983
- [78] D. Shaw ; Localized GaAs Etching with Acidic Hydrogen Peroxide Solutions ; J. Electrochem. Soc. vol. 128 p. 874 ; 1981
- [79] C. Li, B. Guan, D. Chuai, X. Guo, G. Shen ; Removing GaAs substrate by nitric acid solution ; J. Vac. Sci. Technol. B vol. 28 n°3 p.635, 2010
- [80] C. Tellier, G. Huve, T. Leblois ; Some Investigations on Gallium Arsenide MEMS. Simulation of Microstructure Shapes ; Advance in Science and technologies vol. 51 p.121 ; 2006
- [81] J. Gannon, C. Nuese ; A Chemical Etchant for the Selective Removal of GaAs Through SiO₂ Masks ; J. Electrochem. Soc. vol. 121 n° 9 p. 1215 ; 1974
- [82] S. Paik, J. Kim, S. Park, S. Kim, C. Koo, S. Lee, D. Cho, Novel Micromachining Technique to Fabricate Released GaAs Microstructures with a Rectangular Cross Section, Jpn J. Applied Physics vol. 42 n°1 p.326 ; 2003
- [83] J. Harris, D. Awschalom, K. Maranowski, A. Gossard ; Fabrication and characterization of 100-nm-thick GaAs cantilevers ; Rev. Sci. Instrum. vol. 67 n°10 p. 3591 ; 1996
- [84] S. Hascik, T. Lalinsky, Z. Mozolova, J. Kuzmík ; Patterning of cantilevers for power sensor microsystem ; Vacuum, vol. 51 n° 2 p. 307 ; 1998

- [85] C. Constantine, D. Johnson, C. Barrat, R. Shul, B. Clellan, R. Briggs, D. Rieger, R. Karlicek, J. Lee, S. Pearton ; Parametric study of compound semiconductor etching utilizing inductively coupled plasma source source ; Mater. Res. Soc. Symp. Proc. p.421 ; 1996
- [86] L. Jalabert, P. Dubreuil, F. Carcenac, S. Pinaud, L. Salvagnac, H. Granier, C. Fontaine ; High aspect rapport GaAs nanowires made by ICP-RIE etching using Cl_2/N_2 chemistry ; Microelectronic Engineering vol. 85 p. 1173 ; 2008
- [87] R. Shul, G. McClellan, R. Briggs, D. Rieger, S. Pearton, C. Abernathy, J. Lee, C. Constantine, C. Barratt ; High-density plasma etching of compound semiconductors ; Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films vol. 15 n°3 p. 633 ; 1997
- [88] K. S. Van Dyke ; The electric network equivalent of a piezoelectric resonator, Physical Revue, vol. 25 n°6 p. 895 ; 1925
- [89] J.B. Johnson ; Thermal agitation of electricity in conductor ; Physical Review vol. 32 n°1 p. 97 ; 1928
- [90] IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros ; Standards n°952 ; 1997
- [91] C. Zener ; Internal friction in solids II : general theory of thermoelastic internal friction ; physical revue vol. 53 p. 90 ; 1938
- [92] F. Blom, S. Bouwstra, M. Elwenspoek, J. Fluitman ; Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry ; J. Vac. Sci. B vol. 10 n°1 p.19 ; 1992
- [93] B. Le Foulgoc ; Evaluation du potentiel de performance de micro-accéléromètres inertiels vibrant en silicium ; thèse de l'université Paris-Est ; 2008