



HAL
open science

Étude et réalisation de gyromètres à détection thermique

Guillaume Kock

► **To cite this version:**

Guillaume Kock. Étude et réalisation de gyromètres à détection thermique. Electronique. Université Montpellier, 2017. Français. NNT : 2017MONT043 . tel-01926359

HAL Id: tel-01926359

<https://theses.hal.science/tel-01926359>

Submitted on 19 Nov 2018

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

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

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Électronique

École doctorale : Information, Systèmes et Structures (I2S)

Unité de recherche : Institut d'Électronique et des Systèmes – UMR 5214

Étude et réalisation de gyromètres à détection thermique

Présentée par Guillaume KOCK
Le 28 Novembre 2017

Sous la direction de M. Alain GIANI
et M. Philippe COMBETTE

Devant le jury composé de

Philippe CHRISTOL, Professeur, IES, Montpellier
Skandar BASROUR, Professeur, TIMA, Grenoble
Marc BENDAHAN, Professeur, IM2NP, Aix-Marseille
Rose-Marie SAUVAGE, Ingénieur DGA, Paris
Markus SCHNEIDER, Docteur en Physique, ISL, Saint-Louis
Philippe COMBETTE, Professeur, IES, Montpellier
Alain GIANI, Professeur, IES, Montpellier

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examineur
Co-Directeur de thèse
Directeur de thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

Remerciements

Cette thèse a été cofinancée par l'école doctorale Information Structures Systèmes et par la Direction Générale de l'Armement (DGA), dont je voudrais remercier Rose-Marie Sauvage, ingénieur DGA, de par son intermédiaire, d'avoir cofinancé ce projet.

Cette thèse a été effectuée à l'Institut d'Électronique et des Systèmes (IES) au sein de l'équipe Matériaux, MicroCapteur et Acoustique (M²A), dirigée par Emmanuel Le-Clezio, professeur à l'Université de Montpellier. Je remercie le directeur de l'IES, Alain Foucaran de m'avoir accueilli chaleureusement dans ce laboratoire.

Je tiens à remercier les membres de mon jury de thèse présidé par Philippe Christol, professeur à l'Université de Montpellier d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie Skandar Basrour, professeur à l'Université Grenoble-Alpes et Marc Bendahan, professeur à l'Université d'Aix-Marseille d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon manuscrit de thèse. Leurs commentaires sur mon manuscrit m'ont été utiles lors de la soutenance.

De même, je remercie Rose-Marie Sauvage et Markus Schneider, docteur en Physique à l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis d'avoir examiné mes travaux de thèse. De plus, je souhaite remercier Markus Schneider et Caroline Gauthier-Blum pour la réalisation des tests chocs sur mes prototypes.

Je remercie sincèrement Alain Giani et Philippe Combette, mes deux directeurs de thèse, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un projet aussi intéressant. Grâce à leur aimable supervision et soutien tout au long du projet, cela m'a aidé à faire face aux défis et m'a fourni un environnement d'apprentissage agréable.

Je remercie également tous les membres de l'équipe M²A pour la bonne ambiance qui règne au café, aux apéros, dans les couloirs, ou encore dans les bureaux, plus spécifiquement pour la Macumba team. Je remercie plus particulièrement Benoit Charlot pour son aide, sa bonne humeur et de m'avoir accompagné en conférences, mais aussi pour toutes ces pauses cigarettes remplies d'anecdotes.

Je n'oublie pas de remercier aussi le personnel de la CTM : Jean-Marie Peiris, Jean Lyonnet et Frédéric Pichot pour leur aide et leur remarquable travail avec mes échantillons.

Je remercie aussi Jean-Michel Gosalbes pour la réalisation et ses conseils sur les différentes électroniques associées à mes deux types de capteurs.

Tous mes amis méritent aussi un merci pour tous les bons moments et souvenirs.

Enfin, un immense merci à tous mes proches pour leur soutien indéfectible : mes parents, ma mamie, mes frères et ma petite nièce Cahouette, sans oublier JLS. Je remercie plus particulièrement ma sœur pour son soutien et son aide durant les derniers mois de ce projet jusqu'à la soutenance, ainsi que son travail pour la réalisation du pot.

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Table des tableaux	ix

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1

<i>Gyromètre : état de l'art, principes et utilisations</i>	4
--	----------

1.1 Principe de fonctionnement des gyroscopes	6
--	----------

1.1.1 Précession et moment angulaire.....	6
---	---

1.1.2 L'effet Coriolis.....	8
-----------------------------	---

1.1.2 Différence gyroscope/gyromètre.....	9
---	---

1.2 Différents types de gyromètres	9
---	----------

1.2.1 Gyro à masse vibrante.....	10
----------------------------------	----

1.2.1.1 Tuning Fork gyro	11
--------------------------------	----

1.2.1.2 Gyro à anneau vibrant.....	11
------------------------------------	----

1.2.1.3 Gyro à roue vibrante.....	12
-----------------------------------	----

1.2.2 Gyro optique	13
--------------------------	----

1.2.2.1 Gyro à anneau laser (RLG)	14
---	----

1.2.2.2 Gyro à fibre optique (FOG).....	15
---	----

1.2.3 Gyro fluidique	16
----------------------------	----

1.2.4 Synthèse des technologies.....	17
--------------------------------------	----

1.3 Gyro MEMS à gaz	19
----------------------------------	-----------

1.3.1 Gyro à jet de gaz	19
-------------------------------	----

1.3.1.1 Principe de fonctionnement du gyro à jet de gaz	19
---	----

1.3.1.2 Etat de l'art du gyro à jet de gaz	20
--	----

1.3.2 Gyro thermique à gaz.....	23
---------------------------------	----

1.3.2.1 Principe de fonctionnement du gyro thermique à gaz	23
--	----

1.3.2.2 Etat de l'art.....	25
----------------------------	----

1.3.2.3 Synthèse des technologies.....	29
--	----

1.4 Modèle analytique pour les gyros MEMS à gaz	31
--	-----------

1.4.1 Principe de conservation de l'énergie	31
---	----

1.4.2 Principe de conservation de la masse.....	31
---	----

1.4.3 Équation d'état	32
-----------------------------	----

1.4.4 Principe de conservation de la quantité de mouvement.....	32
---	----

1.4.5 Équation de la déviation du flux de gaz.....	34
--	----

1.5 Conclusion	36
-----------------------------	-----------

Chapitre 2

Moyens et études technologiques associés à la caractérisation des gyros	38
2.1 Caractérisation pour le gyro à jet de gaz	40
2.1.1 Prototypage des cavités	40
2.1.2 Visualisation du flux au sein de la cavité.....	41
2.1.3 Étalonnage de la vitesse du gaz à l'aide d'un micro-anémomètre	44
2.1.3.1 Principe de fonctionnement.....	44
2.1.3.2 Dispositif de mesure	47
2.1.3.3 Modèle analytique en 2D de l'écoulement et étude comparative de la vitesse	48
2.1.4 Détection thermique et électronique associée à la mesure.....	51
2.2 Technologies associées au gyro à expansion thermique	52
2.2.1 Fabrication du gyro à expansion thermique	53
2.2.2 Mesure des paramètres thermo-résistifs.....	56
2.2.3 Électronique associé au gyro à expansion thermique	57
2.3 Simulateur mono-axe de précision	61
2.4 Simulations numériques par éléments finis	62
2.5 Conclusion	66

Chapitre 3

Gyromètre à jet de gaz	68
3.1 Rappel sur le principe de fonctionnement	70
3.2 Présentation des différents modes de génération du jet de gaz	70
3.2.1 Micro-pompe.....	70
3.2.2 Réserve de gaz sous pression	71
3.2.3 Vent ionique – décharge Corona.....	72
3.2.4 La transpiration thermique	74
3.3 Simulation numérique par éléments finis du gyro à jet de gaz	76
3.3.1 Modélisation 2D.....	76
3.3.1.1 Étude de l'écoulement	77
3.3.1.2 Étude de la réponse du dispositif et influence de la vitesse du gaz.....	79
3.3.1.3 Impact de la géométrie sur l'écoulement et la sensibilité	82
3.3.1.3 Conclusion.....	84
3.3.2 Modélisation 3D.....	85
3.3.2.1 Influence de la forme des détecteurs	85
3.3.2.2 Optimisation de la position des détecteurs	88
3.3.2.3 Influence de la vitesse du gaz	90
3.3.3 Étude de la dimension de la cavité.....	91
3.3.4 Conclusion	93
3.4 Résultats expérimentaux	93
3.4.1 Influence de la vitesse du jet de gaz et comparaison expérience – simulation ...	94
3.4.2 Conclusion	97

3.5	Conclusion sur le gyro à jet de gaz.....	97
Chapitre 4		
	<i>Gyromètre thermique à gaz basé sur l'expansion thermique.....</i>	100
4.1	Rappel sur le principe de fonctionnement.....	102
4.2	Simulation numérique par éléments finis.....	102
4.2.1	Modélisation à deux dimensions avec un élément de chauffe	103
4.2.1.1	Évolution de la température et de la vitesse du gaz en fonction du rapport cyclique	103
4.2.1.2	Influence de la puissance injectée dans un élément chauffant.....	105
4.2.2	Modélisation à trois dimensions avec deux éléments de chauffe	106
4.2.2.1	Choix de géométrie	106
4.2.2.2	Étude des signaux issus de la simulation numérique.....	107
4.2.2.3	Influence du rapport cyclique sur la sensibilité	110
4.2.2.4	Optimisation de la position des détecteurs	111
4.2.3	Conclusion	113
4.3	Résultats expérimentaux	114
4.3.1	Choix du courant de détection	115
4.3.2	Linéarité et sensibilité du système	115
4.3.3	Influence de la puissance de chauffe sur la sensibilité.....	117
4.3.4	Influence de la nature du gaz sur la sensibilité	118
4.3.5	Influence du rapport cyclique sur la sensibilité	120
4.3.6	Essais chocs pour le gyro à expansion thermique.....	122
4.3.6.1	Moyens d'essais.....	122
4.3.6.2	Essais et résultats	124
4.4	Comparaison des deux gyros développés	125
4.5	Conclusion	128
	Conclusion et perspectives	130
	ANNEXES	133
	Annexe A : Schéma électronique associée à la mesure des deux micro-thermocouples ..	134
	Annexe B : Schéma électronique de la partie logique du gyro à expansion thermique....	135
	Annexe C : Montage en pont de Wheatstone.....	136
	Bibliographie.....	137

Table des figures

Figure 1.1 : Pendule de Foucault [2]	6
Figure 1.2 : Précession [9].....	7
Figure 1.3 : Modes primaire (drive) et secondaire (sense) du gyro à masse vibrante [21]	10
Figure 1.4 : Représentation schématique du tuning fork gyro [23].....	11
Figure 1.5 : Structure du gyro à anneau vibrant	12
Figure 1.6 : Principe de fonctionnement du gyro à anneau vibrant ; (a) Premier mode de flexion ; (b) Second mode de flexion décalé de 45° par rapport au 1 ^{er} dû à la force de Coriolis [27].....	12
Figure 1.7 : Gyro à roue vibrante.....	13
Figure 1.8 : Principe de fonctionnement du gyro optique basé sur l'effet Sagnac [32]	14
Figure 1.9 : Représentation schématique du gyro à anneau laser [35].....	15
Figure 1.10 : Interféromètre de Sagnac pour le FOG [37]	15
Figure 1.11 : Représentation schématique du principe du gyro utilisant un ECF [43].....	16
Figure 1.12 : Applications des gyros commerciaux en fonction de la stabilité de la sensibilité et de la stabilité du biais, source de 2015 [58].....	18
Figure 1.13 : Technologie des gyros selon la taille et la performance [59].....	18
Figure 1.14 : Principe de fonctionnement du gyro à jet de gaz.....	19
Figure 1.15 : Gyro 2 axes (2006).....	20
Figure 1.16 : Gyro 3 axes et Accéléromètre 2 axes (2009).....	20
Figure 1.17 : Coupe transversale de l'écoulement du gaz [65]	21
Figure 1.18 : Structure et dimension du gyro 3 axes [65]	21
Figure 1.19 : Configuration du gyro 3 axes à flux tourbillonnant ; (a) Vue générale ; (b) Structure de la carte de détection avec les 4 thermistances ; et (c) Structure de la thermistance [67].....	22
Figure 1.20 : Résultats expérimentaux de la sortie du gyro en fonction de la vitesse de rotation [67].....	22
Figure 1.21 : Représentation schématique du gyro thermique à gaz basé sur la convection thermique ; (a) profil de température dévié par l'accélération de Coriolis ; (b) profil de température dévié par l'accélération linéaire [41]	23
Figure 1.22 : Principe de fonctionnement du gyro à expansion thermique [48]	24
Figure 1.23 : Configuration du gyro basé sur la convection thermique [68, 69].....	25
Figure 1.24 : Représentation schématique du gyro à expansion thermique de Zhu et al.	26
Figure 1.25 : Configuration du capteur inertiel multiaxes [52].....	27
Figure 1.26 : Configuration du MIMU à expansion thermique [56].....	27
Figure 1.27 : Configuration des deux designs du gyro à expansion thermique de Leung et al. ; (a) PSC gyro ; (b) RSC gyro [48].....	28
Figure 1.28 : Structure des résistances de chauffe ; (a) PSC gyro ; (b) RSC gyro [48].....	28
Figure 1.29 : Résultats expérimentaux de la sortie des PSC et RSC gyros en fonction de la vitesse de rotation.	29
Figure 1.30 : Représentation schématique du gyro MEMS à gaz pour $\omega_z \neq 0$	35
Figure 2.1 : Représentation schématique (a) et une photo (b) du design pour le premier design du gyro à jet de gaz	40
Figure 2.2 : Photo du deuxième design du gyro à jet de gaz	41
Figure 2.3 : Visualisation par tomographie [74].....	42
Figure 2.4 : Visualisation du SF ₆ par Schlieren.....	42
Figure 2.5 : Photos des différents éléments composant le montage ; (a) camera embarqué wifi placé au-dessus du capteur gyroskopique ; (b) micro-pompe alimenté en tension ; (c) réservoir hermétique contenant le générateur de fumée	42
Figure 2.6 : Représentation schématique du montage dédié à la visualisation du flux au sein de la cavité	43
Figure 2.7 : Photo du banc de test pour la visualisation du flux au sein de la cavité.....	43
Figure 2.8 : Visualisation du jet de fumée pour $v_m = 2,5$ m/s ; (a) $\Omega = 0$; (b) $\Omega = 300$ °/s.....	44
Figure 2.9 : Sonde CTA	46
Figure 2.10 : Photographie des différents éléments permettant la réalisation de la mesure de vitesse via un micro-anémomètre	47
Figure 2.11 : Photographie pour la mesure de vitesse	47
Figure 2.12 : Représentation à échelle arbitraire en 2D du système.....	48

Figure 2.13 : Comparaison expérimentale, numérique et théorique de la vitesse de sortie du canal microfluidique de 200 μm de diamètre	49
Figure 2.14 : Vitesse mesurée en fonction de la distance dans la cavité pour différentes tensions appliquées à la micro-pompe.....	50
Figure 2.15 : Comparaison entre expérience et simulation de la vitesse en fonction de la distance au sein de la cavité	50
Figure 2.16 : Support expérimentale pour la réalisation de la mesure de température par thermocouples	51
Figure 2.17 : Design du gyro à expansion thermique.....	53
Figure 2.18 : Étapes de fabrication du gyromètre à expansion thermique.....	53
Figure 2.19 : Images MEB de la cavité micro-usinée avec les 3 ponts suspendus (a) ; zoom au niveau d'une chauffe avec les deux détecteurs de températures de part et d'autre de celle-ci (b).....	55
Figure 2.20 : Image MEB (a) et photo (b) d'un gyro monté sur un support PCB	56
Figure 2.21 : Gyro à expansion thermique et son électronique associée	57
Figure 2.22 : Photo du montage avec un zoom sur les signaux de la chauffe	58
Figure 2.23 : Signal de sortie pour différentes vitesses de rotation appliquées	59
Figure 2.24 : Schéma électronique de la partie analogique du gyro à expansion thermique.....	60
Figure 2.25 : Simulateur mono-axe de précision AC1120S.....	61
Figure 2.26 : AC1120S, Composants du système	62
Figure 2.27 : Exemples d'écoulement 2D via une cartographie en température (K) pour ; (a) le gyro à jet de gaz ; (b) le gyro à expansion thermique avec un seul élément.....	63
Figure 2.28 : Représentation d'un maillage structuré (a) et non structuré (b) [85]	63
Figure 2.29 : Représentation d'un maillage hybride [85]	64
Figure 3.1 : Principe de fonctionnement utilisé pour le gyro à jet de gaz.....	70
Figure 3.2 : Micro-pompe.....	71
Figure 3.3 : Mini bonbonnes de gaz [89]	71
Figure 3.4 : Vannes de régulation [89]	72
Figure 3.5 : Représentation schématique du type de décharge Corona [91]	72
Figure 3.6 : Schéma du flux d'ions et du flux d'air généré par une pompe électrohydrodynamique à vent ionique en courant continu (CC) où une haute tension est appliquée entre les électrodes Corona et collectrice [97].....	73
Figure 3.7 : Principe de la transpiration thermique ou diffusion Knudsen à travers un micro canal.....	74
Figure 3.8 : Principe de la transpiration thermique ou diffusion Knudsen à travers un micro canal avec une condition de diffusion Knudsen et d'un retour du flux de gaz par convection	75
Figure 3.9 : Représentation schématique de la géométrie modélisée en 2D	76
Figure 3.10 : Cartographie en température d'un exemple d'écoulement d'un jet de gaz chaud.....	77
Figure 3.11 : Illustration du ratio d'expansion (ER).....	78
Figure 3.12 : Cartographie en température d'un jet de gaz à travers une conduite et débouchant dans une cavité sans rotation ; (a) $Re = 9,4$; (b) $Re = 24$	78
Figure 3.13 : Différence de température entre les détecteurs virtuels en fonction du nombre de Reynolds.....	79
Figure 3.14 : Différence de température mesurée en fonction de la vitesse de rotation appliquée	80
Figure 3.15 : Évolution de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs	80
Figure 3.16 : Cartographie en température de la différence entre $\Omega = 1080$ °/s et $\Omega = 0$	81
Figure 3.17 : Sensibilité en fonction du nombre de Reynolds (vitesse du gaz) pour des détecteurs situés à 800 μm	81
Figure 3.18 : Géométries avec une expansion abrupte (en noir) et avec une expansion progressive (en bleu) ...	82
Figure 3.19 : Comparaison entre les géométries abruptes et progressives de la différence de température en fonction du nombre de Reynolds.....	82
Figure 3.20 : Différence de température en fonction de la rotation pour la géométrie avec une expansion progressive	83
Figure 3.21 : Comparaison de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs de la géométrie présentant une expansion abrupte et celle avec une expansion progressive pour des vitesses avant le Reynolds critique.....	84
Figure 3.22 : Dimensions de la géométrie du modèle 3D.....	85
Figure 3.23 : Géométrie cylindrique avec la position des détecteurs virtuels.....	86
Figure 3.24 : Différence de température en fonction de la vitesse de rotation appliquée pour les différents détecteurs virtuels utilisés.....	86

Figure 3.25 : Cartographie en température (K) dans le plan ($Y=0$) des détecteurs à $v_m = 2,4$ m/s ; (a) $\Omega = 0$; (b) $\Omega = 200$ °/s ; (c) la différence entre $\Omega = 200$ °/s et $\Omega = 0$; (d) $\Omega = 300$ °/s ; (e) la différence entre $\Omega = 300$ °/s et $\Omega = 0$	87
Figure 3.26 : Déviation du flux de gaz déterminée en fonction de la vitesse de rotation	88
Figure 3.27 : Sensibilité déterminée en fonction de la position des détecteurs pour $v_m = 2,4$ m/s.....	89
Figure 3.28 : L'étendue de mesure déterminée pour 1 % de linéarité en fonction de la position des détecteurs pour $v_m = 2,4$ m/s	89
Figure 3.29 : Différence de température en fonction de la rotation pour différentes vitesses d'écoulement du gaz	90
Figure 3.30 : Évolution de la sensibilité et de l'étendue de mesure en fonction de la vitesse moyenne de gaz	91
Figure 3.31 : Évolution de la sensibilité et de l'étendue de mesure en fonction de la dimension du système	92
Figure 3.32 : Images MEB d'une première ébauche de prototype ; (a) vue globale ; (b) zoom sur les détecteurs suspendus.....	92
Figure 3.33 : Photographie du montage du gyro à jet de gaz.....	94
Figure 3.34 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la différence de température en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses d'écoulement moyen du gaz ; (a) $v_m = 2,4$ m/s ; (b) $v_m = 5,2$ m/s ; (c) $v_m = 9,7$ m/s.....	95
Figure 3.35 : Comparaison entre la simulation et l'expérience de l'étendue de mesure en fonction de la vitesse d'écoulement du gaz	96
Figure 3.36 : Comparaison entre l'expérience et la simulation de l'évolution de la sensibilité en fonction de la vitesse d'écoulement du gaz.....	96
Figure 3.37 : Déviation du flux de gaz déterminée en fonction de la vitesse de rotation	97
Figure 4.1 : Principe de fonctionnement utilisé pour le gyro basé sur l'expansion thermique [4]	102
Figure 4.2 : Forme de l'écoulement du gaz à parti d'un élément central chauffant via une cartographie ; (a) en température ; (b) en champ vectoriel de vitesse	103
Figure 4.3 : Évolution de la température et de la vitesse au niveau d'un détecteur en fonction du temps ; (a) temps "infini" ; (b) zoom plus particulier pour définir les rapports cycliques utilisés	104
Figure 4.4 : Représentation schématique du rapport cyclique de 31,25 %	104
Figure 4.5 : Influence de la puissance injectée en fonction de la température au niveau ; (a) de l'élément chauffant ; (b) d'un détecteur virtuel	105
Figure 4.6 : Géométrie choisie pour le gyro à expansion thermique.....	106
Figure 4.7 : Cartographie en température ; (a) source G activée pour $\Omega = 0$; (b) source D activée pour $\Omega = 0$; (c) source G activée pour différence entre $\Omega = 300$ °/s et $\Omega = 0$; (d) source D activée pour différence entre $\Omega = 300$ °/s et $\Omega = 0$	107
Figure 4.8 : Formes des signaux numériques	108
Figure 4.9 : Signaux présentés par A. Leung [111].....	108
Figure 4.10 : Signaux numériques ; (a) réalisation de l'alternance de chauffe ; (b) forme du signal de la différence de température [112].....	108
Figure 4.11 : Représentation schématique de la méthode par détection synchrone [2]	109
Figure 4.12 : Traitement des signaux pour extraire la sortie du gyroscope ; (a) différence de température pour 360 °/s et le signal créneau de référence ; (b) le signal redressé et la valeur continue [112]	109
Figure 4.13 : Extraction de la sortie du gyro par le traitement des signaux de la détection ; (a) ΔT pour différentes vitesses de rotations ; (b) redressement du signal (a) ; (c) sortie du gyro en fonction de la vitesse de rotation	110
Figure 4.14 : $\Delta T = f(\Omega)$ pour les différents RC	111
Figure 4.15 : Évolution de la sensibilité en fonction du RC	111
Figure 4.16 : Gradient de vitesse entre le pont central et la position des détecteurs étudiés	111
Figure 4.17 : Évolution de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs	112
Figure 4.18 : Cartographie en champ de température, pour la source D activée, de la différence entre $\Omega = 300$ °/s et $\Omega = 0$	112
Figure 4.19 : Évolution de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs pour les différents rapports cycliques étudiés	113
Figure 4.20 : Photo du gyro à expansion thermique et son électronique associée	114
Figure 4.21 : Sortie du système en fonction de la vitesse de rotation	116
Figure 4.22 : Comparaison résultats expérimentaux et simulation pour le rapport cyclique de 50 %	117
Figure 4.23 : Vue en coupe des cavités expérimentale et simulée	117

Figure 4.24 : Évolution de la sensibilité en fonction de la puissance injectée dans les résistances de chauffe..	118
Figure 4.25 : Évolution de la sensibilité en fonction de la densité du gaz encapsulé	119
Figure 4.26 : Évolution de la sensibilité en fonction de la diffusivité thermique du gaz encapsulé	120
Figure 4.27 : Évolution de la sensibilité en fonction du rapport cyclique	120
Figure 4.28 : Évolution de la sensibilité normalisée selon la nature du gaz en fonction du rapport cyclique ...	121
Figure 4.29 : Résultats expérimentaux de A. Leung de l'influence du rapport cyclique sur la sensibilité avec du SF ₆ [48]	121
Figure 4.30 : (a) Accélérateur électromagnétique TICAT ; (b) installation SIBREF	122
Figure 4.31 : Véhicule cargo avec gyro embarqué.....	123
Figure 4.32 : Position et fixation de l'ensemble (gyro + support PCB) sur le cargo.....	123
Figure 4.33 : Courbes illustrant l'accélération subie pour les deux gyros.....	124
Figure 4.34 : Signal de sortie en fonction de la rotation pour le GTC 2-2 avant (en noir) et après (en rouge) le choc	125

Table des tableaux

<i>Tableau 1.1 : Performances exigées pour chaque classe [17].....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 1.2 : Résultats de recherche typique des gyros MEMS à gaz [41].....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 2.1 : Caractéristiques de la gravure RIE suivant la nature de la couche à graver [83].....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 2.2 : Méthodes de discrétisation de la pression [86, 87]</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 2.3 : Méthodes de discrétisations pour la densité, la quantité de mouvement et l'énergie [86, 87]</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 3.1 : Sensibilité et étendue de mesure absolues pour deux paires de détecteurs différentes.....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 4.1 : Propriétés thermophysiques dans les conditions standards des gaz étudiés</i>	<i>119</i>

Introduction générale

En fusionnant des systèmes électriques et mécaniques à l'échelle microscopique, la technologie des systèmes micro-électro-mécaniques, appelés MEMS, a révolutionné le marché du capteur inertiel. Depuis la première démonstration d'un gyromètre micro-mécanique par le laboratoire Drapper en 1991, diverses conceptions de micro-gyromètres ont rapidement émergé [1]. En effet, inspiré par le succès prometteur des micro-accéléromètres à la même époque, de vastes efforts de recherche vers la réalisation de micro-gyromètres commerciaux ont conduit à plusieurs topologies novatrices de gyromètres, à des approches d'intégration et de fabrication, ainsi qu'à des techniques de détection [2].

Les techniques de fabrication d'un MEMS sont souvent identiques à celles utilisées en micro-électronique. Cela regroupe la photolithographie, les techniques de dépôts de couches minces, les procédés d'oxydation ou encore le micro-usinage de volume par gravure chimique ou physique. L'ensemble est réalisé sur un substrat de silicium. L'amélioration constante de ces techniques a permis une croissance parallèle de l'emploi de la micro-électronique et des micro-capteurs.

D'une manière générale, l'engouement pour les micro-capteurs s'explique principalement par le fait que leur intégration couplée à celle de son électronique de traitement sur un même substrat permet de réduire fortement l'encombrement. C'est pourquoi, il est courant dans l'industrie, d'intégrer sur un même wafer un grand nombre de dispositifs, ce qui va permettre une fabrication à grande échelle et donc réduire le coût unitaire de fabrication d'un ensemble micro-capteur et électronique.

Ainsi, les micro-gyromètres ont été largement développés et ont connu un très grand succès dans de très nombreux domaines d'applications tels que les industries aérospace, le militaire, l'automobile et le grand public. Cependant, à notre connaissance, quasiment aucun gyromètre commercial ne peut être utilisé dans des conditions de vibrations et/ou d'accélération de très grande amplitude ($> 10\,000\text{ g}$). En effet, les micro-gyromètres commercialisés utilisent généralement une structure mécanique comprenant une masse d'épreuve solide mobile et ne sont pas adaptés à ces conditions extrêmes.

Au cours de cette thèse, les études vont porter sur un type de capteur basé sur la détection thermique d'une rotation appliquée à une masse isolée de fluide chauffé localement. Il est appelé gyromètre MEMS à gaz. Contrairement aux gyromètres dits traditionnels, la masse-test n'est pas un solide mais un fluide, ce qui permet une utilisation pour des applications présentant des conditions environnementales sévères. En effet, grâce à leur architecture, les gyromètres thermiques devraient être résistants à des accélérations de l'ordre de quelques $10\,000\text{ g}$. Après la phase d'accélération et leur survie à ces environnements extrêmes, le capteur devra permettre la mesure de vitesses angulaires allant de $300\text{ }^\circ/\text{s}$ à $3\,000\text{ }^\circ/\text{s}$ avec des stabilités de l'ordre de $10^\circ/\text{h}$. Ce principe de fonctionnement a déjà été étudié dans le monde académique, néanmoins de nombreuses recherches restent encore à mener en termes de modélisation analytique de la sensibilité, ainsi que des défis de sensibilité, d'étendue de mesure, de bande passante, de dérive de biais, etc.

Ce manuscrit est articulé en quatre parties, la première correspond à la remise en contexte de l'étude par une revue de l'état de l'art, le deuxième correspond au moyen de caractérisation mis en œuvre et les deux derniers portent chacun sur l'étude d'un type de capteur. Il se décline comme suit.

Dans une première partie, nous commençons par rappeler les différents types de gyromètres qui sont communément utilisés et les caractéristiques communes d'un gyromètre suivant le domaine d'application. Le principe de fonctionnement du gyromètre MEMS à gaz est présenté. Une liste des technologies de ce type de capteurs thermiques est dressée ainsi qu'un examen des performances atteintes. Cette description est suivie d'une étude analytique des phénomènes physiques et thermiques au sein de la cavité.

Deux types de capteurs ont été développés dont la principale différence est liée à la méthode régissant la mise en mouvement du fluide. Le chapitre 2 dresse donc les différents moyens et études technologiques mis en place pour la caractérisation de ces deux types de gyromètres.

Les deux chapitres qui suivent, traitent des résultats expérimentaux obtenus et des simulations numériques effectuées pour les deux technologies de gyromètres étudiées.

Le chapitre 3 est relatif à l'étude du gyromètre à jet de gaz comprenant le développement d'un modèle numérique en deux dimensions et trois dimensions qui a permis de déterminer l'influence de paramètres sur la sensibilité et l'étendue de mesure. En parallèle, une étude phénoménologique et comportementale du gyromètre est entreprise, ainsi qu'une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux issus des simulations. Une étude de paramètres impactant la sensibilité et l'étendue de mesure est aussi présentée.

Au cours du chapitre 4, un rappel sur le principe de fonctionnement sur le gyromètre thermique à gaz basé sur l'expansion thermique est décrit. Un premier modèle en deux dimensions est abordé afin d'observer et d'appréhender le comportement du gaz lié au phénomène d'expansion, en terme d'élévation de température et de vitesse d'écoulement. Puis, le phénomène gyroscopique de ce type de capteur est étudié par une modélisation numérique en trois dimensions et une mise en place d'un banc de test des dispositifs. Des paramètres sont identifiés et étudiés pour voir leurs influences sur les caractéristiques du capteur. Les performances atteintes par ces deux types de gyromètres sont présentées et commentées.

Chapitre 1

Gyromètre : état de l'art, principes et utilisations

Cette thèse porte sur l'étude et la réalisation d'un gyromètre MEMS à détection thermique dont le but est d'être utilisé dans des conditions environnementales sévères, et plus particulièrement dans le domaine de très fortes accélérations allant de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de g. Ainsi la première partie de ce manuscrit va porter sur le principe de fonctionnement de ce type de capteur et les phénomènes physiques mis en jeu.

Les différents types de gyromètres (mécanique, optique, fluidique), ainsi que les caractéristiques qui permettent la comparaison de leurs performances seront présentés. Compte tenu du développement des microtechnologies durant ces dernières années, les micro-gyromètres ont connu un très grand succès dans de très nombreux domaines d'applications. En effet, grâce à leur petite taille, à leur fabrication à faible coût (à grande échelle) et à leur faible consommation d'énergie, les capteurs inertiels MEMS jouent un rôle important dans les applications industrielles et militaires comme par exemple dans les domaines de la navigation, le contrôle de stabilité des véhicules, la réalité virtuelle, etc. De plus, ils ont aussi connu un succès pour les applications civiles avec des débouchés dans l'électronique grand public comme les manettes de jeu vidéo, et leur intégration dans les téléphones portables et tablettes pour la détection de gestes ou de mouvements.

Ensuite, un état de l'art plus particulier sur les gyromètres MEMS à gaz sera effectué avec une description des deux grandes familles, que composent ces derniers, lié à la méthode de génération du flux de gaz employé. Un modèle analytique lié au comportement de ce type de capteur sera développé.

Sommaire

1.1	Principe de fonctionnement des gyroscopes	6
1.1.1	Précession et moment angulaire.....	6
1.1.2	L'effet Coriolis.....	8
1.1.2	Différence gyroscope/gyromètre.....	9
1.2	Différents types de gyromètres	9
1.2.1	Gyro à masse vibrante	10
1.2.1.1	Tuning Fork gyro	11
1.2.1.2	Gyro à anneau vibrant.....	11
1.2.1.3	Gyro à roue vibrante.....	12
1.2.2	Gyro optique	13
1.2.2.1	Gyro à anneau laser (RLG)	14
1.2.2.2	Gyro à fibre optique (FOG).....	15
1.2.3	Gyro fluïdique	16
1.2.4	Synthèse des technologies.....	17
1.3	Gyro MEMS à gaz	19
1.3.1	Gyro à jet de gaz	19
1.3.1.1	Principe de fonctionnement du gyro à jet de gaz	19
1.3.1.2	Etat de l'art du gyro à jet de gaz	20
1.3.2	Gyro thermique à gaz	23
1.3.2.1	Principe de fonctionnement du gyro thermique à gaz	23
1.3.2.2	Etat de l'art.....	25
1.3.2.3	Synthèse des technologies.....	29
1.4	Modèle analytique pour les gyros MEMS à gaz	31
1.4.1	Principe de conservation de l'énergie	31
1.4.2	Principe de conservation de la masse.....	31
1.4.3	Équation d'état	32
1.4.4	Principe de conservation de la quantité de mouvement.....	32
1.4.5	Équation de la déviation du flux de gaz.....	34
1.5	Conclusion	36

1.1 Principe de fonctionnement des gyroscopes

Un gyroscope est un dispositif qui mesure un mouvement de rotation, ce qui permet donc de mesurer les changements d'orientation par rapport à un référentiel d'inertie. Les premiers gyroscopes mécaniques étaient basés sur le mouvement d'un disque tournant ou d'une roue montée sur des articulations ou des pivots en rotation libre. Par exemple, si une telle roue est mise en mouvement, elle reste presque fixe selon une orientation lorsque le gyroscope tourne. Cela se produit car un important moment angulaire est "stocké" dans la roue tournante, basé sur le principe physique de la conservation du moment angulaire. Les joints ou pivots à rotation libre minimisent le frottement associé à la roue tournante et tendent à maintenir son orientation. Dans les gyroscopes types MEMS, le moment angulaire est stocké dans un oscillateur harmonique plutôt qu'une roue, compte tenu de leur taille. Les applications classiques pour les gyroscopes incluent la navigation inertielle, le guidage, les applications de contrôle et de stabilisation [2, 3].

1.1.1 Précession et moment angulaire

L'effet gyroscopique a été découvert en 1817 par Johann Bohnenberger mais c'est le physicien français Léon Foucault, en 1852, qui lui donna ce nom et en exploita plus largement le principe, notamment sur une expérience impliquant la rotation de la Terre [2]. L'étymologie du mot gyroscope vient de la combinaison du grec "gyros" signifiant "cercle ou rotation" et "skopeein" signifiant "vision" [4]. À la suite d'une expérience basée sur les mouvements de la Terre, Foucault les met en évidence grâce au pendule (Fig 1.1).



Figure 1.1 : Pendule de Foucault [2]

Néanmoins, il se rend compte que le pendule effectue ses rotations à une vitesse constamment inférieure à celle de la Terre. Grâce à son partenaire Froment, il réalise qu'en bloquant certaines pièces de son pendule, ce dernier s'aligne sur le méridien et indique le nord : le compas gyroscopique est né. Plus tard, les moteurs électriques ont permis l'élaboration du premier compas gyroscopique marin fonctionnel qui a été développé entre 1905 et 1908 par l'inventeur allemand Hermann Anschütz-Kaempfe. D'autres inventeurs tel que l'américain

Elmer Sperry (1910) ont suivi les travaux d'Hermann, ainsi que d'autres nations qui se sont vite rendu compte de l'importance militaire de l'invention, dans des temps où la puissance navale devenait prépondérante. La société Sperry Gyroscope s'est par la suite rapidement développée pour fournir des stabilisateurs aériens et navals, et d'autres développeurs de gyroscopes ont également suivi cette voie [5]. Ainsi, le gyroscope a permis de fournir une direction de référence dans les systèmes de navigation. D'autres possibilités d'applications pour les gyroscopes ont émergé comme le pilotage automatique et les stabilisateurs dans les torpilles et les navires, ou bien encore le développement de systèmes d'orientation inertielle pour les missiles balistiques [6].

Le gyroscope mécanique à masse rotative est devenu de plus en plus petit et plus précis au cours du temps. Puis, les gyroscopes optiques à laser ont commencé à émerger dans les années 1960 et ont gagné une grande popularité dans les applications aéronautiques et militaires [7]. Alors que l'approche de la masse rotative était la méthode dominante de la construction mécanique du gyroscope, elle ne fut pas bien adaptée à la mise en œuvre de gyroscope MEMS, en raison des limites technologiques dans la précision de fabrication des roulements à faible frottements. Ainsi, les premiers gyroscopes à masse vibrante ont été introduits dans les années 1980, et des progrès considérables ont été réalisés, au cours de ces trente dernières années, pour créer des dispositifs plus petits, plus précis et permettant une fabrication en série plus importante [8].

La précession se produit lorsqu'un objet tournant autour d'un axe (axe de rotation) a un couple externe appliqué dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation (axe d'entrée). Dans un système en rotation, lorsque des couples extérieurs sont appliqués, le vecteur du moment angulaire (qui est le long de l'axe de rotation) se déplacera dans la direction du vecteur de couple appliqué. En raison du couple, l'axe de rotation tourne autour d'un axe perpendiculaire à l'axe d'entrée et à l'axe de rotation (appelé axe de sortie) (Fig. 1.2).

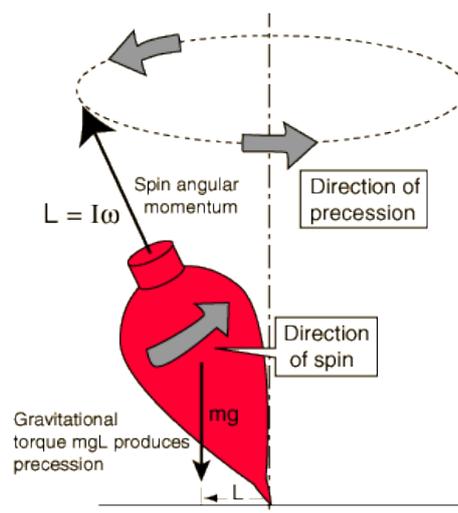


Figure 1.2 : Précession [9]

Le mouvement du gyroscope peut alors être décrit par l'équation fondamentale [3, 10] :

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(I\vec{\Omega})}{dt} = I\vec{\alpha} \quad (1.1)$$

où les vecteurs $\vec{\tau}$ et \vec{L} sont, respectivement, le couple et le moment angulaire, le scalaire I est le moment d'inertie, le vecteur $\vec{\Omega}$ est la vitesse angulaire et le vecteur $\vec{\alpha}$ est l'accélération angulaire du gyroscope.

Il en résulte que le couple $\vec{\tau}$ appliqué perpendiculairement à l'axe de rotation, et donc perpendiculaire à \vec{L} , aboutit à un mouvement perpendiculaire aux deux vecteurs $\vec{\tau}$ et \vec{L} . Ce mouvement est donc la précession. La vitesse angulaire de la précession $\vec{\Omega}_p$ est donnée par le produit vectoriel :

$$\vec{\tau} = \vec{L} \wedge \vec{\Omega}_p \quad (1.2)$$

Sous un couple constant τ dû à la gravité par exemple, la vitesse de précession Ω_p du gyroscope est inversement proportionnelle à L et la norme de son moment angulaire s'écrit :

$$\Omega_p = \frac{\tau}{L \sin(\alpha)} \quad (1.3)$$

avec α correspondant à l'angle entre les vecteurs $\vec{\Omega}_p$ et \vec{L} .

La friction peut provoquer un ralentissement de la rotation du gyroscope et ainsi, diminuer le moment angulaire du gyroscope. Cela signifie que la vitesse de la précession augmente à mesure que le moment angulaire diminue, comme le montre l'équation (1.3). Par conséquent, cela se poursuit jusqu'à ce que le dispositif ralentisse suffisamment et qu'il ne puisse plus supporter son propre poids. En conclusion, si la vitesse de précession du gyroscope cesse alors ce dernier va chuter de son support [3, 11, 12].

1.1.2 L'effet Coriolis

L'effet Coriolis, qui défie le bon sens et l'intuition, a été observé mais pas entièrement compris depuis des siècles. Néanmoins, ce n'est qu'en 1835 que Gaspard Gustave Coriolis démontre l'expression mathématique de la force de Coriolis dans son article « Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps » [13] où il étudie des particules en mouvement dans les systèmes rotatifs.

L'effet Coriolis est un phénomène physique qui affecte un mouvement de masse dans un système rotatif. Cet effet provient de la force inertielle (force de Coriolis) qui agit perpendiculairement à l'axe de rotation du système et à la direction du déplacement de la masse. Elle n'est pas une force au sens strict, soit l'action d'un corps sur un autre, mais plutôt une force fictive résultant du mouvement rotatif du référentiel lui-même.

La force de Coriolis peut être décrite par la formule :

$$\vec{F}_C = m\vec{a}_C \quad (1.4)$$

où \vec{F}_C est la force de Coriolis, m est la masse du corps et \vec{a}_C est l'accélération de Coriolis qui est donnée par la relation :

$$\vec{a}_C = 2\vec{v} \wedge \vec{\Omega}_p \quad (1.5)$$

avec \vec{v} : la vitesse relative du corps par rapport au référentiel en mouvement et $\vec{\Omega}_p$: la vitesse angulaire instantanée de rotation [2, 3].

1.1.2 Différence gyroscope/gyromètre

Dans la langue française, il existe deux mots “gyromètre” et “gyroscope” pour définir les appareils sensibles aux rotations. Ces deux mots ne sont pas synonymes et définissent deux types de capteurs différents :

- Un *gyromètre* est un appareil sensible aux vitesses de rotations, c'est-à-dire qu'il fournit une information de la vitesse angulaire par rapport à un référentiel inertiel. C'est donc un capteur de vitesse angulaire.
- Un *gyroscope* est un appareil sensible aux angles de rotation, c'est-à-dire qu'il fournit une information sur la position angulaire de son référentiel par rapport à un référentiel inertiel. C'est donc un capteur de position angulaire.

Cette distinction n'est pas faite en anglais, en effet, le mot “gyroscope” existe mais le mot “gyrometer” n'existe pas. La solution consiste alors à appeler le gyromètre : “rate gyroscope” et le gyroscope “angle gyroscope” ou “rate-integrating gyroscope”, même si la plupart du temps le terme utilisé est “gyro”, ce qui ne permet pas de donner d'information sur cette distinction. De plus, la différence n'est parfois pas évidente, car un seul appareil peut être utilisé comme un gyromètre et comme un gyroscope, et l'angle pourrait être trouvé par intégration de la vitesse angulaire [8].

Le terme “gyro” sera utilisé comme abréviation pour définir soit un gyromètre ou soit un gyroscope.

1.2 Différents types de gyromètres

Depuis plus d'un demi-siècle, les capteurs inertiels ont connu une amélioration constante de leurs performances et de leur technologie de fabrication. En comparaison des gyros traditionnels, les gyros MEMS présentent de nombreux avantages tels que le faible coût, la petite taille, la légèreté et une intégration plus facile incluant l'électronique de commande et de mesure, ainsi que bien d'autres fonctions (étalonnage, correction du zéro, etc). En conséquence, ils sont largement utilisés dans de nombreux domaines. Ils peuvent être associés à des accéléromètres, MEMS eux aussi, permettant d'être utilisés pour la navigation inertielle [14].

Cette association est appelée centrale inertielle [15]. Plus largement, quelques autres exemples de domaines d'applications possibles sont l'automobile pour le contrôle de stabilité de véhicule, la détection de retournement du véhicule et l'évitement de collision ; des applications électroniques pour le grand public tels que les smartphones, la stabilisation de la caméra vidéo et la réalité virtuelle ; l'industrie pour le contrôle d'équipements hydrauliques ou de robots et la métrologie sous-marine liée aux activités pétrolières [16]; ainsi qu'un large éventail d'autres applications pour l'aéronautique et le domaine de la défense [17, 18, 19].

1.2.1 Gyro à masse vibrante

Il existe une grande variété de concepts et de principes de fonctionnement du gyro MEMS. Néanmoins, la plupart des gyros MEMS utilisent des éléments mécaniques vibrants pour la mesure de la vitesse angulaire. L'utilisation d'éléments vibrants pour détecter la force de Coriolis a l'avantage de ne pas utiliser de pièces tournantes qui nécessitent des roulements, ce qui éliminent le frottement et l'usure. C'est la principale raison pour laquelle les gyros vibrants ont été miniaturisés avec succès par les techniques de la microélectronique et sont aussi devenus une alternative intéressante par rapport à leurs homologues de dimension macroscopique. Le principe de fonctionnement repose sur la force sinusoïdale de Coriolis induite par la vitesse angulaire, ce qui provoque le couplage de l'énergie entre deux modes de vibrations d'une masse d'épreuve. Le mode de vibration primaire est appelé mode d'excitation qui permet à la masse de vibrer dans une direction linéaire. Il est, pour la plupart des cas, généré par une force électrostatique ou électromagnétique. Le mode de vibration secondaire est appelé mode de détection. L'effet Coriolis induit par la rotation provoque un transfert d'énergie vers le mode de détection qui est proportionnel à la vitesse angulaire. Le déplacement des structures internes du gyro causé par les vibrations du mode secondaire peut être détecté de manière capacitive, piézoélectrique ou piézorésistive [2, 3, 17, 20]. Les deux modes de vibrations sont présentés sur la figure 1.3.

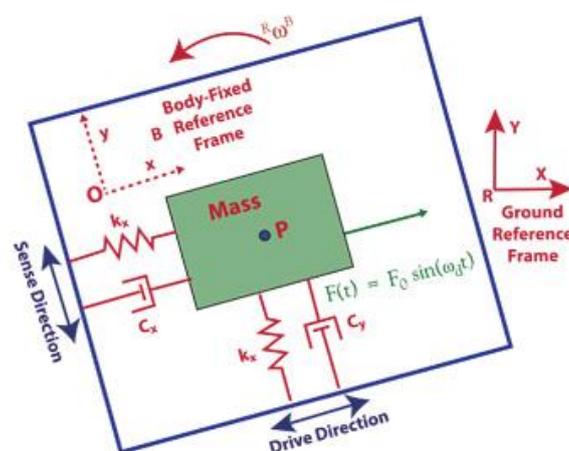


Figure 1.3 : Modes primaire (drive) et secondaire (sense) du gyro à masse vibrante [21]

1.2.1.1 Tuning Fork gyro

Le principe du “diapason” ou encore appelé “dual mass gyro” est basé sur deux masses d’épreuves. Ces dernières sont reliées entre elles par des structures de poutres et de peignes (Fig. 1.4). Cette paire de masse d’épreuve est mise en excitation de façon électrostatique dans des directions opposées, mais avec la même amplitude de vibration. La force de Coriolis due à la mise en rotation du système va créer une vibration orthogonale qui peut être détectée par des électrodes capacitives [1, 18, 22]. Ce capteur a été fortement développé et il peut présenter d’autres méthodes d’excitation et de détection. En effet, Y. Chen et al. de l’Institut des Microsystèmes et de la Technologie de l’Information de Shanghai propose avec leur “high Q-factor” d’utiliser une méthode d’excitation de façon électromagnétique, dans le but d’obtenir une grande amplitude de mouvement, et un mécanisme de détection capacitif [23]. X. Wu et al. ont développé un gyro proposant deux paires de masses d’épreuves excitées de façon électrostatique et une méthode de détection dite de cisaillement, ce qui permet de simplifier la structure et le processus de fabrication, donc de miniaturiser le capteur [24]. Néanmoins, ce gyro basé sur une excitation électrostatique de la paire de masse d’épreuve et la méthode de détection capacitif permet d’atteindre une précision relativement élevée. De plus, il est aussi considéré comme le plus performant des gyros MEMS d’un point de vue de la stabilité de biais ($\approx 0,15 \text{ }^\circ/\text{h}$) [1].

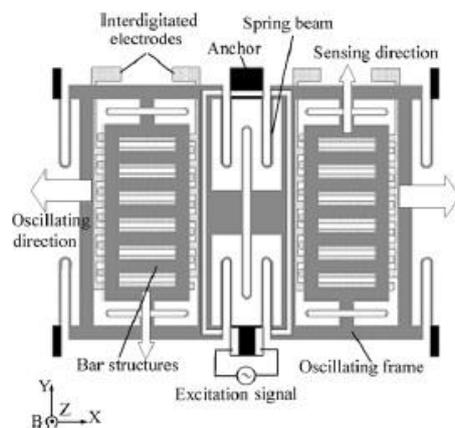


Figure 1.4 : Représentation schématique du tuning fork gyro [23]

1.2.1.2 Gyro à anneau vibrant

Ce gyro est constitué d’un anneau, de ressorts de support semi-circulaire et d’électrodes de commande, de contrôle et de détection (Fig. 1.5). Ces électrodes sont situées autour de la structure. Cette structure nécessite 8 ressorts afin d’obtenir un dispositif équilibré avec deux modes de flexion identiques en formes d’ellipse. Ces modes de flexion ont des fréquences identiques et le deuxième mode de flexion est décalé de 45° par rapport au premier. L’anneau est entraîné de façon électrostatique dans le premier mode de flexion avec une amplitude fixe. Lorsque le dispositif est soumis à une rotation autour de son axe normal, l’énergie provoquée par la force de Coriolis est transférée vers le second mode à partir du premier mode de flexion (Fig 1.6). Ce transfert d’énergie provoque une augmentation de l’amplitude d’oscillation du

second mode. Ainsi, cette augmentation est détectée de façon capacitive et elle est proportionnelle à la vitesse angulaire [1, 25, 26].

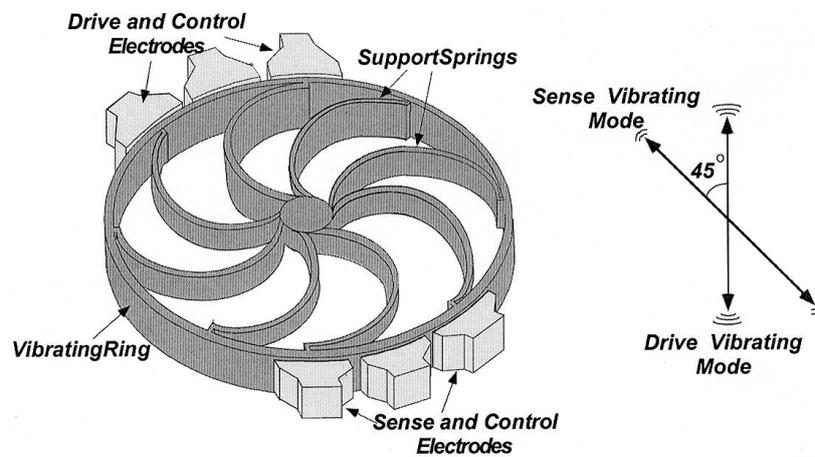


Figure 1.5 : Structure du gyro à anneau vibrant

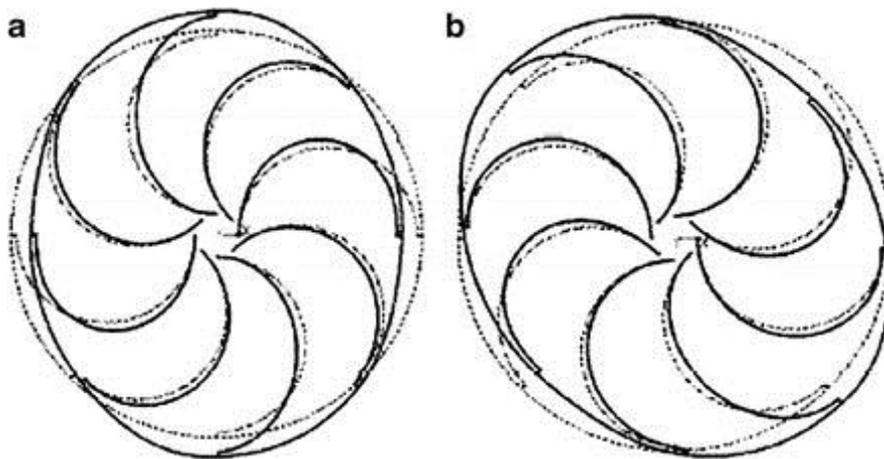


Figure 1.6 : Principe de fonctionnement du gyro à anneau vibrant ; (a) Premier mode de flexion ; (b) Second mode de flexion décalé de 45° par rapport au 1^{er} dû à la force de Coriolis [27]

1.2.1.3 Gyro à roue vibrante

Dans ce type de gyro, la roue est excitée de façon à vibrer autour de son axe de symétrie. Lorsque le système est en rotation, la force de Coriolis va entraîner l'inclinaison de la roue, et ce changement (par rapport à la vitesse angulaire) peut être détecté avec des électrodes capacitatives placées sous la roue (Fig. 1.7) [18, 28, 29, 30].

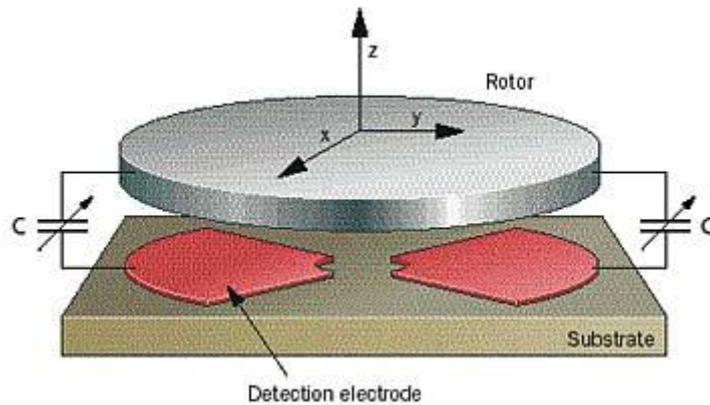


Figure 1.7 : Gyro à roue vibrante

Dans le cas des MEMS, le résonateur mécanique, l'électronique d'excitation et de détection peuvent être combinés sur une seule puce pour obtenir une miniaturisation plus efficace [18, 30]. La masse d'épreuve est généralement fabriquée par micro-usinage avec du polysilicium. Il est aussi possible de détecter deux axes de rotation avec une seule roue vibrante, ce gyro a été présenté par les chercheurs de l'UC Berkeley [1, 31].

1.2.2 Gyro optique

Par rapport aux gyros vibrants, les gyros optiques présentent notamment les avantages d'une absence de pièces mobiles, d'une très haute précision, d'une longue durée de vie et d'une large gamme d'étendue de mesure. Cependant, il existe des limites pour des applications destinées au grand public en raison de la grande taille et du coût très élevé de leur fabrication. De plus, avec les améliorations des technologies MEMS et les progrès de l'optique intégrée, des gyros Micro-Opto-ElectroMechanical Systems (MOEMS) très performants pourraient voir le jour dans un avenir proche. Les gyros optiques diffèrent des autres types de gyros. En effet, ils ne dépendent pas de la conservation du moment angulaire pour opérer. Au lieu de cela, leur fonctionnalité dépend des propriétés de la lumière.

Les gyros optiques sont principalement composés de deux grandes familles : le gyro à anneau laser (RLG) et le gyro à fibre optique (FOG) [3, 22]. Le principe de fonctionnement est basé sur l'effet Sagnac, on l'appelle parfois aussi l'interférence de Sagnac, découvert en 1913 par le physicien français Georges Sagnac. Dans l'effet Sagnac, un faisceau de lumière est divisé en deux et le dispositif est conçu pour que les deux faisceaux suivent une trajectoire en anneau dans des directions opposées (Fig. 1.8). Lors du retour au point d'entrée, on obtient un diagramme d'interférence entre les deux faisceaux. L'application d'une rotation à l'appareil induit une différence de temps entre les deux faisceaux de lumière en mouvement opposés, ce qui va introduire une modification des franges d'interférences. Ainsi, la position des franges d'interférences est une mesure directe de la vitesse angulaire de l'appareil.

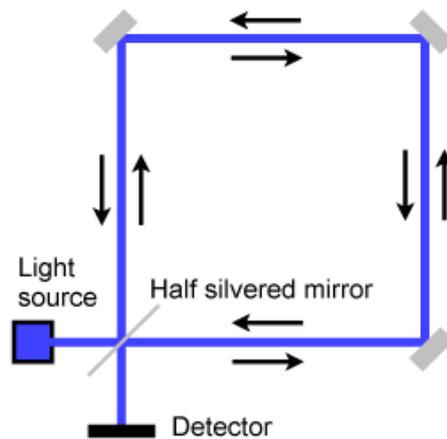


Figure 1.8 : Principe de fonctionnement du gyro optique basé sur l'effet Sagnac [32]

1.2.2.1 Gyro à anneau laser (RLG)

Un RLG utilise l'interférence de la lumière dans un anneau optique pour détecter les changements d'orientation et de rotation. Un RLG est composé de segments de chemins de transmission reliés par des miroirs, et à l'intérieur du chemin d'anneau, il existe deux faisceaux laser à contre-propagation (Fig. 1.9). En réalité, le chemin d'anneau est généralement configuré en triangle, carré ou rectangle rempli de gaz inerte avec des miroirs à chaque coin. Les faisceaux lasers se déplacent dans des directions opposées et interfèrent pour produire un motif d'interférence. La rotation du RLG provoque l'effet Sagnac, c'est-à-dire, qu'une différence de temps s'effectue entre les deux faisceaux lasers ce qui va déplacer les nœuds du motif d'interférence. Cela entraîne donc un déphasage du diagramme d'interférences au niveau du détecteur. La position angulaire est mesurée en comptant les franges d'interférences [3, 12, 33].

Bien que les RLG soient bien plus précis que les gyros mécaniques, ils souffrent d'un phénomène connu sous le nom de "verrouillage" à des vitesses de rotation très lentes. Lorsque le RLG tourne très lentement, les fréquences des faisceaux lasers à contre-rotation deviennent très proches (dans la bande passante du laser). Dans cette situation, la diaphonie entre faisceaux peut permettre le verrouillage afin que l'onde stationnaire soit coincée dans une phase préférée et verrouille la fréquence de chaque faisceau à la même valeur. Par conséquent, les franges d'interférences ne bougent plus par rapport au détecteur et donc l'appareil ne suivra pas précisément sa position angulaire au fil du temps. Pour éviter le verrouillage, la cavité laser est soumise à un mouvement de va-et-vient à fréquence fixe, appelé tramage mécanique, ce qui oblige le RLG à rester à l'extérieur de la zone de verrouillage. Néanmoins, ce tramage à la sortie se traduit par un bruit additif. Ainsi l'élimination des tramages est très importante dans le traitement du signal, car le résidu de tramage limite la précision avec laquelle le RLG mesure la vitesse angulaire et donc la position angulaire [3, 12, 34].

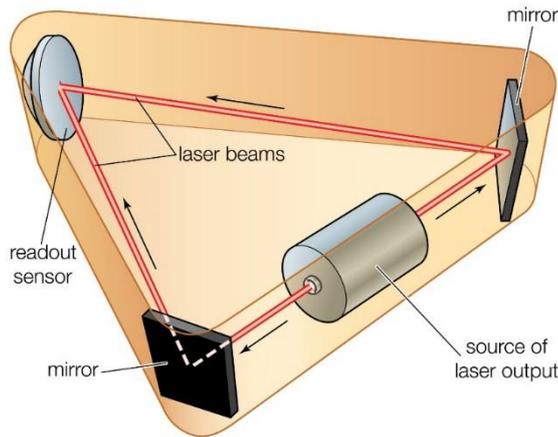


Figure 1.9 : Représentation schématique du gyro à anneau laser [35]

1.2.2.2 Gyro à fibre optique (FOG)

Un FOG est un dispositif qui, comme le RLG, utilise l'interférence de la lumière (effet Sagnac) pour détecter la rotation mécanique. Les premiers FOG ont été développés, en raison du développement du RLG et des progrès réalisés dans les fibres optiques pour l'industrie des télécommunications dans les années 1970. Par rapport aux RLG, le FOG définit son trajet lumineux par une bobine enroulée de fibres optiques au lieu des miroirs et de la cavité optique, ce qui les rend plus compact.

Un FOG fournit des informations sur la vitesse de rotation de façon extrêmement précise, en partie due à l'absence de sensibilité, sur l'axe transversal, à l'accélération, aux vibrations et aux chocs. Le FOG n'a pratiquement pas de parties mobiles, ce qui signifie qu'il n'y a pas de frottement (résistance inertielle au mouvement), et par conséquent, aucune dérive inhérente. Il affiche généralement une résolution supérieure au RLG, mais aussi une performance de dérive et de sensibilité plus élevée. Par conséquent, la technologie FOG est considérée comme l'une des technologies de gyro les plus fiables, ce qui permet leur utilisation pour des applications à très hautes performances [3, 20, 22, 36]. Dunzhu Xia et al. présentent les différentes avancées technologique et de fabrication, ainsi que les performances pour les micro-FOG [1].

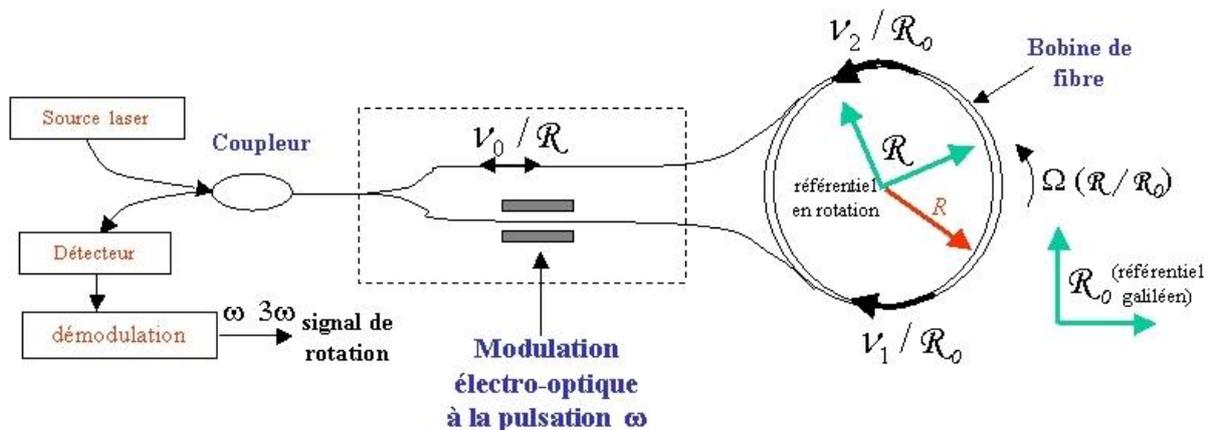


Figure 1.10 : Interféromètre de Sagnac pour le FOG [37]

1.2.3 Gyro fluïdique

Les gyros optiques fournissent des informations extrêmement précises, néanmoins, le prix est généralement trop élevé pour une large gamme d'utilisation dans le domaine du grand public. Bien que les gyros vibratoires conviennent aux applications destinés aux consommateurs, en raison de leur faible coût et de leur longue durée de vie, ils ne sont pas assez robustes pour des utilisations sensibles aux vibrations et aux chocs, à cause des pièces mécaniques mobiles présentes. Par rapport à ces derniers, le gyro fluïdique utilise un gaz (air, néon, hexafluorure de soufre (SF_6) par exemple) [38] ou un liquide (eau, fluide électro-conjugué correspondant à un liquide diélectrique) [39] comme éléments mobiles et sensibles au lieu d'une masse solide. Compte tenu du fait qu'ils ne présentent aucune masse d'épreuve solide, les gyros fluïdiques offrent les avantages de structures simples, à faible coût et de haute résistance aux chocs [40, 41]. Malgré ces avantages, ces derniers font face à des défis de sensibilités, de bande passante, d'étendue de mesure, de dérive du biais, etc.

De nombreuses études et divers modèles ont été présentés au cours des deux dernières décennies, principalement, au Japon dans des institutions telles que l'Institut de Technologie de Tokyo [42, 43] et l'Université Ritsumeikan [44, 45], en Chine telle que l'Université Tsinghua et l'Université de Science et Technologie de Nanjing [46, 47], et ainsi qu'au Canada avec l'Université Simon Fraser [48, 49]. En 2008, Takemura et al. ont proposé le concept d'un gyro utilisant un fluide électro-conjugué (ECF), comme illustré sur la figure 1.11. Le gyro se compose principalement d'une paire d'électrodes qui permet de générer le flux, d'une cavité remplie par un ECF, de deux parois de séparations pour donner une certaine direction au flux et de deux thermistances. Lorsqu'une rotation est appliquée au système, la force de Coriolis provoque une déviation de l'écoulement entraînant une différence de température entre les deux détecteurs. Or, la résistance électrique de ces deux détecteurs dépend de la température, et par conséquent, la tension de sortie du pont que forment ces thermistances va changer. On obtient alors une correspondance entre la tension de sortie et la vitesse angulaire. Ce gyro, compte tenu de la densité du liquide, est plus sensible que les gyros à gaz [42, 43]. Malgré cela, les gyros à gaz sont plus utilisés et étudiés que les gyros liquides (problème lié à la densité, à la bande passante, à la conductivité électrique des liquides, ...). Ces capteurs sont généralement appelés gyro MEMS à gaz.

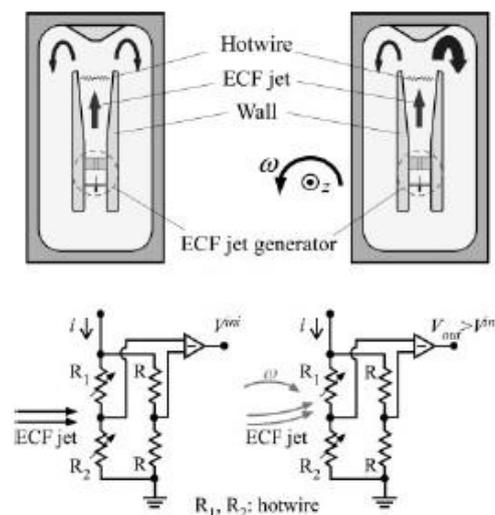


Figure 1.11 : Représentation schématique du principe du gyro utilisant un ECF [43]

En ce qui concerne ces derniers, il existe deux types de capteurs qui sont appelés les gyros à jet de gaz et les gyros thermique à gaz. Le gyro à jet de gaz utilise un flux de gaz laminaire généré, par exemple, par une micro-pompe, alors que le gyro thermique à gaz fonctionne avec un flux de gaz laminaire généré par convection thermique ou par expansion thermique. Le premier gyro à jet de gaz a été proposé par Takahashi et al., en 1991 [50], alors que le premier gyro thermique à gaz a été proposé en 2001 par Ding, Zhu et Yang [51]. Depuis, de nombreuses études ont été menées dans le but d'améliorer les performances de ce capteur en optimisant le design, les matériaux, la structure et les conditions de fonctionnement [44, 52, 53, 54]. Après les premiers prototypes, pour le gyro thermique à gaz, le travail s'est concentré sur la suppression du couplage entre la force de Coriolis et la force centrifuge inhérente au mouvement rotatoire [47, 49]. Une méthode de compensation thermique a aussi été étudiée pour éviter la dérive liée à la variation de la température ambiante [46]. Ensuite, les études ont porté sur l'association de gyros et d'accéléromètres thermiques dans le but de réaliser une centrale d'inertie [45, 55, 56]. Néanmoins, comme ces principes sont ceux utilisés dans les gyros présentés dans cette thèse, un état de l'art plus précis sera donné au paragraphe 1.3.

1.2.4 Synthèse des technologies

Tous les dispositifs de mesures sont caractérisés par un certain nombre de paramètres qui permettent d'évaluer leurs qualités et leurs performances. En effet, cela permet aussi de définir la précision que l'on peut attendre d'une mesure ou encore la gamme de mesure pour laquelle le système est conçu. Les performances d'un gyro sont déterminées en fonction de paramètres comme l'étendue de mesure, la linéarité, le nombre d'axes de détection, la gamme de température de fonctionnement, la stabilité du biais, la bande passante, la stabilité de la sensibilité, le biais, le parcours angulaire aléatoire, la tenue aux chocs, etc. Les paramètres les plus importants pour la caractérisation des gyros sont la stabilité du biais, la stabilité de la sensibilité et la bande passante [8]. En fonction de leurs performances, on peut distinguer trois classes principales de gyros qui sont liées à des applications dites industrielles, tactiques et inertielles. Le tableau 1.1 illustre la gamme de performances requises pour chaque classe.

Tableau 1.1 : Performances exigées pour chaque classe [17]

Paramètre	Classe Industrielle	Classe Tactique	Classe Inertielle
Parcours angulaire aléatoire ($^{\circ}/\sqrt{h}$)	0,5 <	0,5 – 0,05	< 0,001
Stabilité du biais ($^{\circ}/h$)	10 – 1000	0,1 – 10	< 0,01
Précision de la sensibilité (%)	0,1 – 1	0,01 – 0,1	< 0,001
L'étendue de mesure ($^{\circ}/s$)	50 – 1000	500 <	400 <
Bande passante (Hz)	70 <	100	100

La figure 1.12 illustre les applications pour la défense, l'industrie et l'aéronautique. On peut noter que la taille du capteur est aussi un paramètre important selon l'application souhaitée. La

figure 1.13 illustre les différents types de gyros selon leurs tailles et leurs performances. En regardant ces deux figures, on voit que les capteurs apparaissant dans la partie inférieure gauche concernent, principalement, les gyros optiques qui sont généralement de haute performance, de coût élevé, de grande taille et de quantité limitée. Ceux qui apparaissent en haut à droite, principalement les gyros MEMS, sont de faible performance, de moindre coût, de petite taille et fabriqués en grand volume [3, 17, 20]. Ainsi, on peut noter que les gyros MEMS jouent déjà un rôle important dans les applications civiles et militaires, mais pour des applications qui nécessitent une performance plus élevée ou des conditions d'environnement plus hostiles, il y a une pénurie de dispositifs. Les conditions difficiles dues à l'environnement incluent par exemple une température élevée, une forte pression, une humidité importante, la poussière, un environnement corrosif, le rayonnement, les chocs mécaniques et de vibrations, l'intensité des champs magnétiques et électriques, etc. Dans notre cas, le but est de réaliser un gyro MEMS fluide pouvant supporter des chocs supérieurs à plusieurs milliers de g, voir supérieure à 10 000 g, ce qui correspond au maximum actuel pour la tenue aux chocs des gyros MEMS vibrants [57].

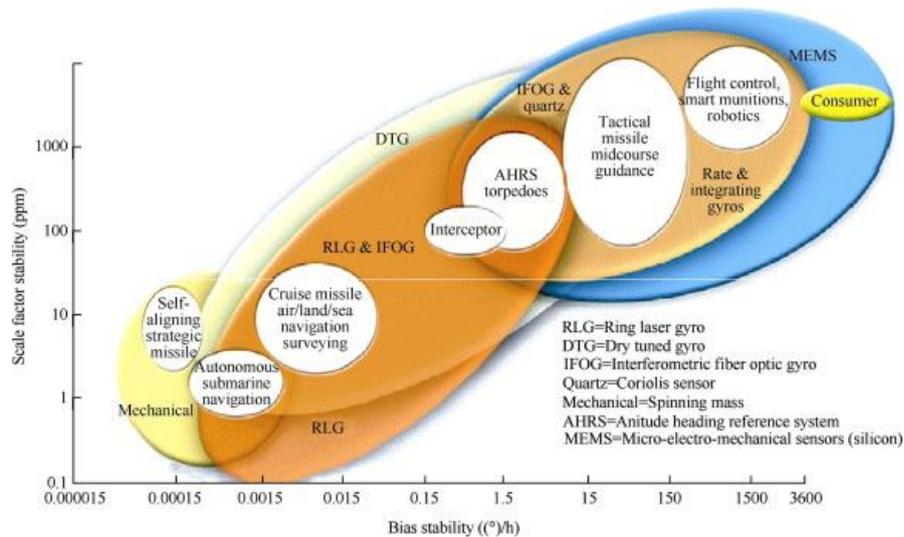


Figure 1.12 : Applications des gyros commerciaux en fonction de la stabilité de la sensibilité et de la stabilité du biais, source de 2015 [58]

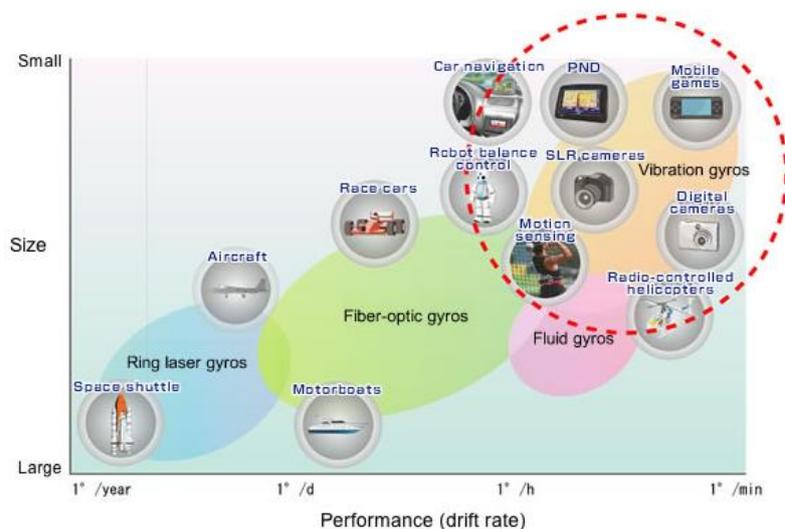


Figure 1.13 : Technologie des gyros selon la taille et la performance [59]

1.3 Gyro MEMS à gaz

Comme mentionné ci-dessus, les gyros MEMS à gaz peuvent être classés en deux grandes familles de capteurs, en fonction de la méthode de génération du flux : les gyros à jet de gaz et les gyros thermiques à gaz. Les premiers utilisent un flux de gaz laminaire généré par un dispositif intégré ou externe, alors que le gyro thermique à gaz fonctionne avec un flux de gaz laminaire généré par convection thermique ou par expansion thermique. Dans la partie qui suit, le principe de fonctionnement et l'état de l'art de ces deux types de capteurs seront abordés.

1.3.1 Gyro à jet de gaz

1.3.1.1 Principe de fonctionnement du gyro à jet de gaz

Un gyro à jet de gaz basé sur la variation des échanges thermiques par convection forcée a pour principe de mesurer la déviation par la force de Coriolis d'un jet de gaz au sein d'une cavité. Ce flux de gaz est, généralement, à température ambiante et il peut être généré par différents moyens. Deux détecteurs de température (des anémomètres à fil chaud par exemple) sont positionnés dans la cavité, symétriquement de part et d'autre du flux de gaz. Lorsque le système n'est pas soumis à une rotation, le déplacement du flux de gaz reste symétrique par rapport aux détecteurs, ce qui implique que leur différence de température reste nulle. Lorsqu'une rotation est appliquée, le flux de gaz est dévié par la force de Coriolis et il va refroidir un détecteur tandis que le second va se réchauffer (Fig 1.14). La différence de température entre les deux détecteurs va induire une différence entre les deux résistances qui sera ensuite convertie en un signal électrique de sortie. Ce signal de sortie, amplifié ou non, est proportionnel à la vitesse angulaire.

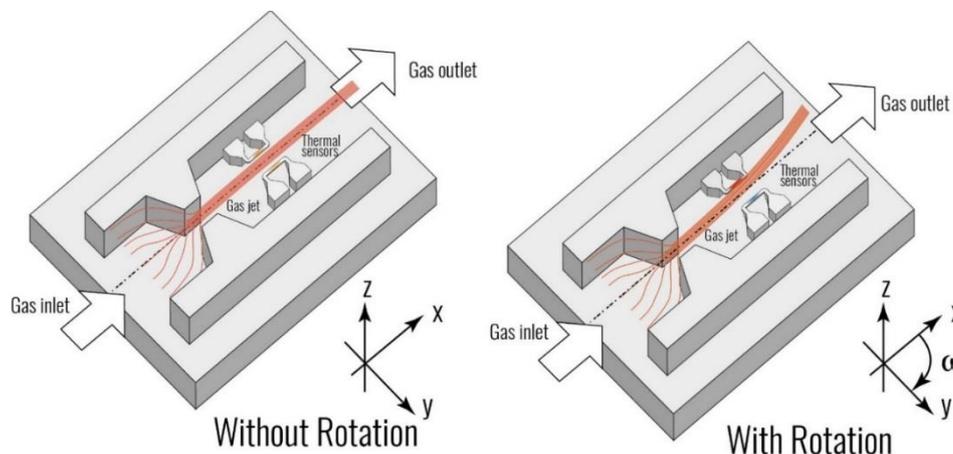


Figure 1.14 : Principe de fonctionnement du gyro à jet de gaz

Le coefficient de résistance de la température, ou TCR, est l'un des principaux paramètres utilisés pour caractériser une thermo-résistance. Le TCR définit le changement de résistance en fonction de la température ambiante. Le TCR des détecteurs a un effet important sur la sensibilité du gyro, ainsi que le matériau utilisé. Ils sont généralement en platine pour les thermo-résistances présentant un TCR élevé, et il est souvent choisi pour obtenir une sensibilité élevée [60]. Une étude réalisée par Sun et al. en 2008, montre que la taille des résistances et le courant qu'on y injecte a une influence sur la performance du gyro [61].

1.3.1.2 Etat de l'art du gyro à jet de gaz

La disposition et la forme des détecteurs de température (contrainte thermique), ainsi que l'emplacement de la buse du jet vont avoir une influence sur les caractéristiques du gyro. Selon le principe de fonctionnement mentionné ci-dessus, la vitesse d'écoulement du flux est un autre paramètre clé de ce type de capteur. En effet, une vitesse d'écoulement plus élevée devrait impliquer théoriquement une sensibilité plus élevée. Pour toutes ces raisons, on a pu voir dans les différentes études, l'évolution du design du gyro ainsi que le nombre important de travaux sur l'amélioration de la pompe intégrée dans le but d'obtenir un écoulement de fluide stable et à grande vitesse. En effet, comme le montre la figure 1.15, le capteur, présenté par Dau et al. [62], fait 25 mm de longueur pour un diamètre de 14 mm et il a deux axes de détection, utilisant deux paires de détecteurs de température. Les sensibilités ainsi obtenues sont de $0,107 \text{ mV}/(^{\circ}/\text{s})$ et de $0,102 \text{ mV}/(^{\circ}/\text{s})$, pour la détection selon l'axe X et l'axe Y, respectivement. L'étendue de mesure est de $\pm 200 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ et la pompe piézoélectrique oscille avec une fréquence de 7 kHz, ce qui permet de créer un flux de gaz continu avec une vitesse d'écoulement maximale de 3,5 m/s au niveau de la zone de détection. Sur ce même dispositif, Dau et al. [63] ont optimisé la structure, ce qui leur permet de minimiser la contrainte thermique sur les détecteurs, c'est-à-dire, que la thermistance peut se dilater librement quand la température augmente [44], et par conséquent, améliorer la sensibilité du capteur d'un facteur 10 sur chaque axe de détection. Ils ont aussi réalisé une analyse numérique et expérimentale de la fréquence de réponse et de la sensibilité entre les axes croisés.

Ce gyro est encore de taille importante et il présente des erreurs d'alignement en raison des limites d'assemblages. L'intégration monolithique est nécessaire pour résoudre ces problèmes. Dau et al. [45, 64] ont proposé une structure compacte et planaire ($20 \times 20 \times 1,4 \text{ mm}^3$) en utilisant une chambre avec une pompe à membrane et des micro-canaux en forme de croix pour générer des écoulements, comme le montre la figure 1.16. Avec ce design, ils ont prototypé un capteur qui détecte la vitesse angulaire selon 3 axes et l'accélération selon 2 axes. Concernant, la partie gyro, elle est formée par un réseau de 4 canaux perpendiculaires et d'une chambre contenant la pompe au centre. Chaque canal est composé d'une paire de détecteur et d'un détecteur placé, respectivement, parallèlement et perpendiculairement à la direction du flux. L'étude a porté sur la fabrication, le fonctionnement de la pompe et les caractéristiques des détecteurs thermiques mais les performances n'ont pas été communiquées.

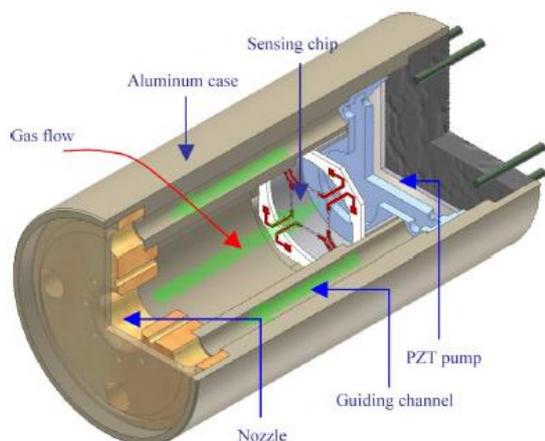


Figure 1.15 : Gyro 2 axes (2006) [62, 63]

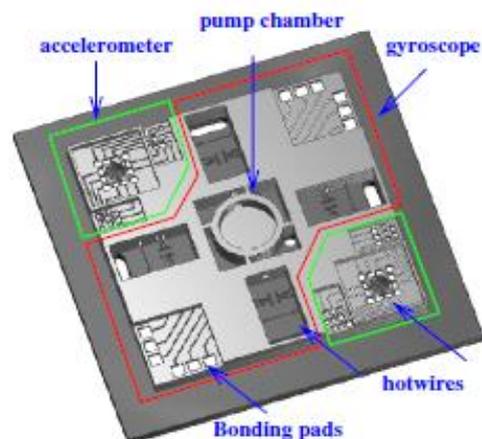


Figure 1.16 : Gyro 3 axes et Accéléromètre 2 axes (2009) [45]

Ensuite, Dau et al. [65] ont réalisé un nouveau design se rapprochant du précédent, mais cette fois-ci, le capteur réalise uniquement la détection selon 3 axes de la vitesse angulaire et l'air est utilisé comme gaz de travail. Sur le même principe que le précédent, le capteur se compose d'une pompe piézoélectrique qui va générer deux paires de flux de gaz perpendiculaires, c'est-à-dire, quatre flux de gaz. Les jets de gaz sont injectés dans un réseau fluïdique fermé sans clapet anti-retour, ce qui leur permet de dévier librement dans une chambre de détection confinée. La formation de ces jets est considérée comme un écoulement ayant une propriété axisymétrique, ce qui est le facteur clé pour surmonter le fort couplage et la sensibilité croisée. Sur la figure 1.17 qui représente une vue en coupe transversale de la structure fluïdique, on peut observer l'écoulement du gaz au sein de la structure. En effet, les flèches indiquent l'écoulement réalisé par le gaz, où l'écoulement est généré par la pompe à membrane, puis dirigé de la chambre d'entraînement à la chambre de détection.

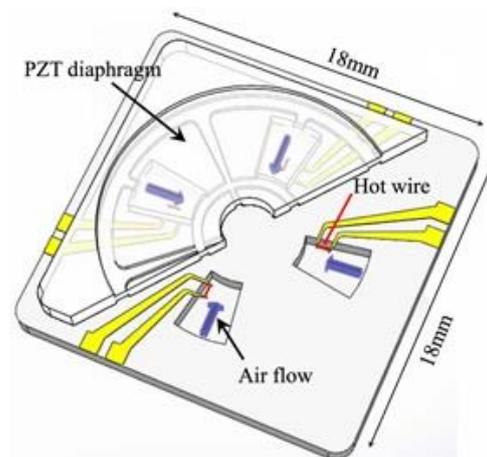
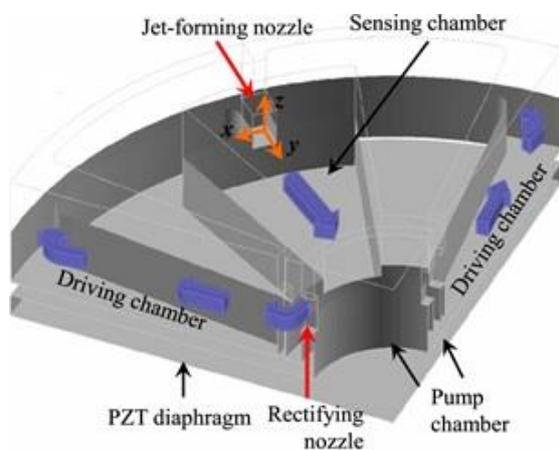


Figure 1.17 : Coupe transversale de l'écoulement du gaz [65] Figure 1.18 : Structure et dimension du gyro 3 axes [65]

La détection des 3 axes peut être assurée avec seulement 4 éléments de détection thermique, ce qui permet sa fabrication sur une seule puce en conservant une taille réduite. Les dimensions totales du dispositif sont de $18 \times 18 \times 2,5 \text{ mm}^3$, comme le montre la figure 1.18. Ces dimensions ont été choisies pour correspondre à une membrane PZT disponible dans le commerce qui fait 16 mm de diamètre. Cette étude a permis de montrer expérimentalement, que ce dispositif peut générer 4 flux dont 2 perpendiculaires, grâce aux travaux sur l'optimisation de la pompe à membrane intégrée. Néanmoins, bien qu'une meilleure stabilité ait été obtenue, seule une vitesse de 1 m/s a été atteinte [66], ce qui a limité son développement.

Parmi les gyro à flux qui utilisent la convection forcée, il y a une caractéristique commune qui est d'utiliser un flux de gaz linéaire créé, le plus souvent, par une micro-pompe piézoélectrique. Une technologie émergente est de réaliser un capteur qui utilise un flux de gaz tourbillonnant au lieu d'un flux de gaz linéaire traditionnel pour détecter la vitesse angulaire. En effet, un gyro convectif 3 axes avec un flux tourbillonnant, dans lequel les éléments de détection sont une thermistance en silicium avec une forme d'arc suspendue, a été proposé par Chang et al., en 2015 [67]. La structure en arc de la thermistance leur permet de réduire la contrainte thermique, et le fait d'être suspendu permet de réduire la dissipation de la chaleur avec le substrat par rapport à leur précédente structure qui était réalisée directement sur le

substrat. La configuration du capteur est représentée schématiquement sur la figure 1.19. Ce capteur est composé d'une chambre de détection cylindrique, de deux buses d'entrées, de deux sorties, de deux plaques de détection dont une pour la partie supérieure et l'autre pour la partie inférieure du capteur. Chaque plaque de détection est composée de 4 thermistances. Sur cette figure, le flux de gaz, représenté en bleu, généré par une pompe externe, est injecté dans la chambre de détection dans des directions opposées à travers deux buses pour former un flux tourbillonnant, puis le gaz sort par les sorties situées sur les parties inférieure et supérieure du capteur. La vitesse d'écoulement du gaz (air) peut atteindre 5 m/s. Lorsque le système est en rotation, le flux tourbillonnant sera dévié dû à l'effet Coriolis. Ainsi le gradient de vitesse du flux tourbillonnant entraînera une variation de la résistance de la thermistance induite par la température en raison du transfert de chaleur convective et de l'effet thermo-résistif. Néanmoins le principe général reste le même, c'est-à-dire, que la variation de la résistance entre les thermistances est fonction de la vitesse angulaire. Les résultats du test expérimental indiquent qu'ils ont obtenu des sensibilités sur les axes X, Y et Z de 0,648 ; 0,528 et 0,241 mV/(°/s), respectivement, pour une étendue de mesure de ± 100 °/s (Fig. 1.20).

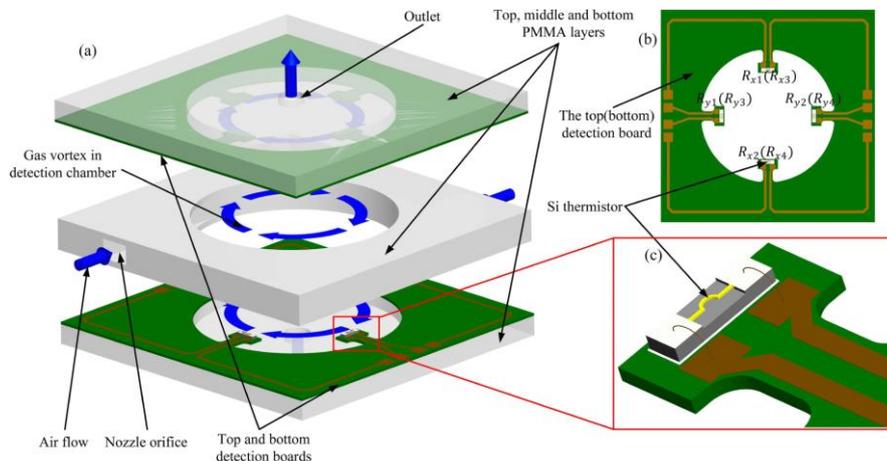


Figure 1.19 : Configuration du gyro 3 axes à flux tourbillonnant ; (a) Vue générale ; (b) Structure de la carte de détection avec les 4 thermistances ; et (c) Structure de la thermistance [67]

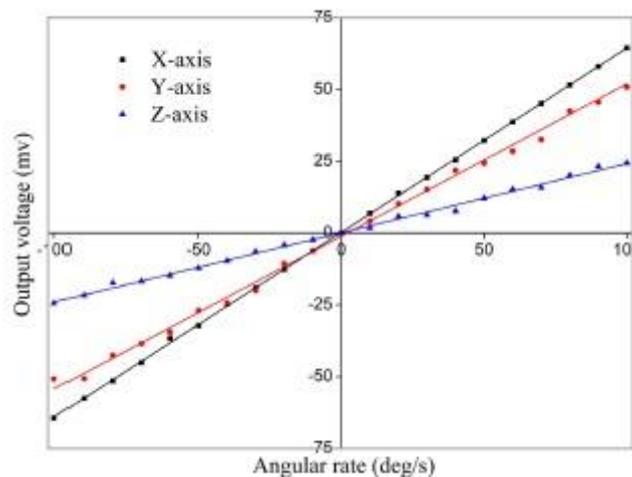


Figure 1.20 : Résultats expérimentaux de la sortie du gyro en fonction de la vitesse de rotation [67]

Les gyros à jet de gaz fonctionnent bien et il est même possible de réaliser une détection selon les 3 axes. Néanmoins, en raison de l'utilisation d'une pompe intégrée ou externe, ces dispositifs sont fragiles et ne permettent pas de résister à des chocs élevés. Ainsi, d'autres capteurs ont été étudiés et réalisés dans le but de palier à cet inconvénient, et ces capteurs correspondent à la deuxième famille des gyros MEMS à gaz appelés gyro thermique à gaz.

1.3.2 Gyro thermique à gaz

1.3.2.1 Principe de fonctionnement du gyro thermique à gaz

Le gyro thermique à gaz est basé sur un flux de gaz induit par convection naturelle ou par expansion thermique. Dans le gyro basé sur la convection libre, une résistance est chauffée par effet Joule à une température plus élevée que la température ambiante, ce qui va générer un mouvement convectif de gaz. Ce dernier forme un profil de température, comme le montre la figure 1.21. Les détecteurs de température, placés de façon symétrique sur les deux côtés de la chauffe, sont utilisés pour détecter l'asymétrie de ce profil de température due à la rotation de l'ensemble. En cas d'absence de rotation, le flux thermique est centré entre les détecteurs de température et le profil de température reste symétrique, comme illustré par la courbe pleine de la figure 1.21(a). Lorsqu'une rotation est appliquée, le flux thermique de gaz est dévié par la force de Coriolis ce qui va engendrer une asymétrie du profil de température comme on peut le voir avec la courbe en pointillée sur la figure 1.21(a). La différence de température est mesurée par les détecteurs et elle est fonction de la vitesse angulaire. En plus de cette mesure de rotation, ce gyro est également sensible à une accélération linéaire lors de la mesure. En effet, comme le montre la figure 1.21(b), les deux écoulements thermiques (profil de température) opposés sont déviés dans la même direction en présence d'une accélération linéaire. Cependant, en présence de la rotation, les deux écoulements thermiques opposés sont déviés dans le sens opposé due à la force de Coriolis. Dans ce type de capteur, deux paires de détecteurs de température sont nécessaires afin de détecter l'asymétrie des profils de température des deux côtés de la chauffe afin de pouvoir extraire simultanément l'information sur la rotation et l'accélération linéaire [41].

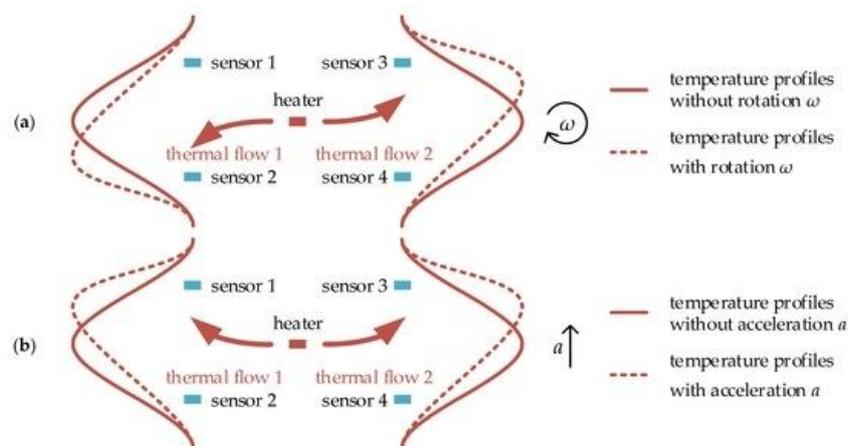


Figure 1.21 : Représentation schématique du gyro thermique à gaz basé sur la convection thermique ; (a) profil de température dévié par l'accélération de Coriolis ; (b) profil de température dévié par l'accélération linéaire [41]

Pour résoudre le couplage croisé entre les mesures de rotation et d'accélération dans les gyros thermiques à gaz basée sur la convection thermique, le gyro à expansion thermique a été proposé [48, 54]. Dans un gyro à expansion thermique, le principe nécessite d'activer de façon alternative deux résistances suspendues afin de chauffer le gaz encapsulé à l'intérieur d'une cavité créant une expansion de celui-ci. Le gaz chaud mis en mouvement sera alors dévié par la rotation du système. Deux détecteurs de température sont symétriquement placés dans la cavité de façon à détecter une différence de température qui est nulle dans le cas stationnaire. Lorsqu'une rotation a lieu, le jet de gaz est dévié par la force de Coriolis. Il apparaît alors une différence de température entre les deux détecteurs. La différence de température produit par l'accélération de Coriolis change de signe avec la direction du flux de gaz. En effet, comme illustré par la figure 1.22, qui représente le principe de fonctionnement du gyro à expansion thermique en deux phases. La première phase correspond à l'activation électrique de la chauffe H_1 et la chauffe H_2 est à température ambiante, et pour la seconde phase, H_2 est uniquement activée. Pour la première phase en état stationnaire, un flux de gaz chaud se déplace symétriquement de H_1 vers H_2 , et vers les deux détecteurs de température TD_1 et TD_2 (Fig. 1.22 (a)). Ensuite, lorsque le système est en rotation ω_z (dans le sens des aiguilles d'une montre, par exemple), comme illustré sur la figure 1.22 (b), le flux de gaz est dévié par la force de Coriolis vers TD_1 . On obtient une température T_1 supérieure à T_2 , la différence de température étant positive. Pour la deuxième phase sans rotation, un flux de gaz chaud se déplace symétriquement de H_2 vers H_1 , TD_1 et TD_2 , comme le montre la figure 1.22 (c). La figure 1.22 (d) illustre la deuxième phase en présence d'une rotation ω_z (dans le sens des aiguilles d'une montre) qui montre la déviation du flux de gaz vers TD_2 dû à la force de Coriolis. On obtient une température T_1 inférieure à T_2 , la différence de température étant négative [48]. C'est pourquoi, l'utilisation d'un "redresseur" de signal est nécessaire, afin d'obtenir un signal proportionnel à la vitesse de rotation, quel que soit la phase de chauffage. La puissance de chauffage doit être réglée correctement en fonction du compromis de sensibilité et de stabilité thermique des résistances.

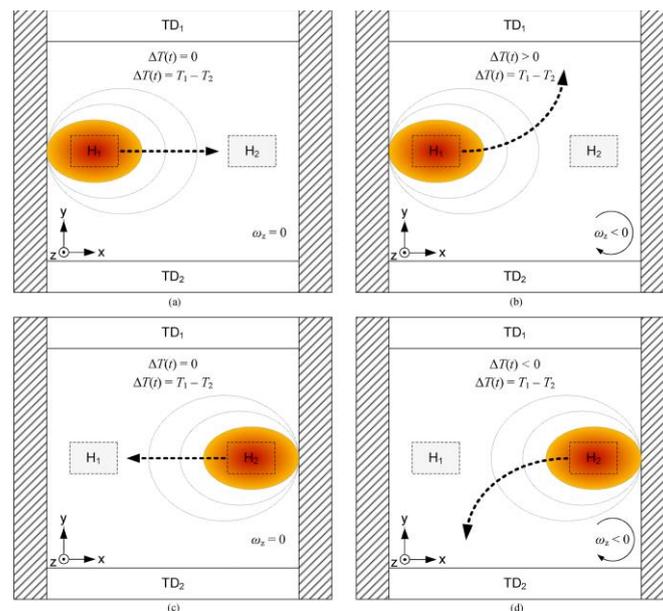


Figure 1.22 : Principe de fonctionnement du gyro à expansion thermique [48]

1.3.2.2 Etat de l'art

Le premier gyro à convection libre thermique type MEMS a été proposé par Ding, Zhu et Yang, en 2001 [51], puis le premier prototype a été présenté par Zhu et al., en 2005 [68]. Ce capteur basé sur le transfert de chaleur par convection peut mesurer simultanément la vitesse angulaire selon 1 axe et l'accélération selon 2 axes. L'ensemble du dispositif a été fabriqué sur une seule puce. Il a permis de mesurer les variations des gradients de température induits par l'accélération de Coriolis sur l'écoulement de gaz dans une micro chambre hermétique. La configuration du capteur se compose d'une petite cavité en silicium gravée, d'une seule chauffe centrale suspendue et de quatre thermistances suspendues, le tout est assemblé et packagé dans une cavité fermée, comme illustré sur la figure 1.23. La puissance de chauffe utilisée est d'environ 14 mW et la vitesse d'écoulement du gaz est de l'ordre du mm/s. La sensibilité du gyro obtenue était d'environ $20 \mu V/(\text{°}/\text{s})$ avec un gain électronique d'environ 36 000, pour une étendue de mesure de $\pm 600 \text{ °}/\text{s}$ [69]. En 2008, Zhu et al. ont montré que le capteur peut être fabriqué à faible coût, que son étendue de mesure peut atteindre $\pm 1000 \text{ °}/\text{s}$, et qu'il a une résistance aux chocs très élevée ($> 20\,000 \text{ g}$) [40].

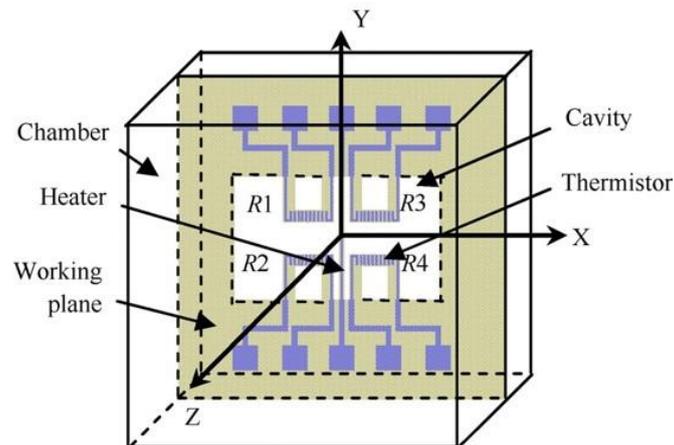


Figure 1.23 : Configuration du gyro basé sur la convection thermique [68, 69]

En 2010, un modèle analytique du capteur incluant le traitement du signal de ce dernier, basé sur un modèle simplifié du système masse-ressort-amortisseur a été proposé et agrémenté d'une vérification expérimentale et par simulation [70]. Le modèle analytique repose sur l'utilisation des fondamentaux de la mécanique des fluides et du transfert de chaleur, en association avec des techniques empiriques. Ils ont conclu que les sources de non-linéarité sont principalement attribuées à la rigidité variable du capteur (c'est-à-dire, un coefficient équivalent au modèle simplifié du système ressort-amortisseur pour le gyro thermique à gaz) et à l'asymétrie structurale due à une fabrication non idéale.

En 2013, Zhu et al. ont présenté un capteur inertiel basé sur l'expansion thermique du gaz [71]. Le dispositif représenté sur la figure 1.24 se compose de trois chaufes (ht1, ht2, ht3) et de deux paires de thermistances (R1, R2, R3, R4) en platine. Les trois chaufes sont suspendues sur une cavité gravée dans le substrat en silicium et les quatre thermistances sont suspendues symétriquement entre deux chaufes adjacentes. Les résistances de chauffe et les thermistances sont sur un même plan. Le capteur peut mesurer simultanément la vitesse angulaire selon 1 axe avec une étendue de $\pm 3000 \text{ °}/\text{s}$ avec une non-linéarité inférieure à 0,57 % et l'accélération selon 1 axe ($\pm 1 \text{ g}$) sur une seule puce, en utilisant un circuit de fonctionnement différentiel. Avec ce

principe de fonctionnement, l'effet de couplage croisé s'est révélé faible selon les 3 axes de la rotation et les 3 axes de l'accélération, contrairement à la génération du flux par convection libre. Le capteur a démontré une sensibilité à la vitesse angulaire d'environ $95 \mu\text{V}/(^{\circ}/\text{s})$ avec un gain électronique de 36 000 et une sensibilité à l'accélération de $300 \text{ mV}/\text{g}$ avec un gain électronique de 10 000. Les auteurs ont fait une analyse théorique du capteur inertielle, où le flux par expansion thermique et le flux par convection thermique ont été interprétés de manière globale pour les mesures inertielle. Il ont conclu que le capteur inertielle basé sur la convection thermique subit de forts effets de couplage croisé entre les mesures de rotation et d'accélération, tandis que le capteur inertielle basé sur l'expansion thermique a restreint le couplage croisé [72].

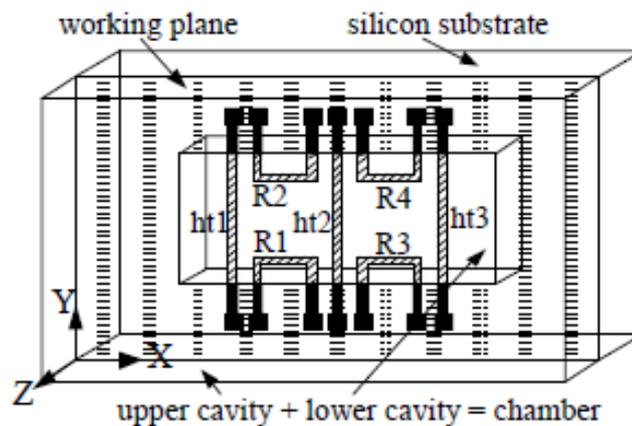


Figure 1.24 : Représentation schématique du gyroscope à expansion thermique de Zhu et al.

En 2015, Wang et al. ont développé un capteur inertielle qui permet de détecter simultanément la vitesse angulaire selon 1 axe (axe Z) et l'accélération selon les deux autres axes (axes X et Y) [52]. La configuration du capteur multiaxes est représentée schématiquement sur la figure 1.25. Le noyau du capteur est une puce de détection de silicium qui est emballée dans une chambre hermétique remplie d'air. La puce de détection est composée de quatre chauffages centraux entourés de huit thermistances identiques. Les 4 chauffages fonctionnent simultanément mais elles sont activées par un signal créneau permettant de générer un flux par expansion thermique continu. Le capteur a démontré une sensibilité de la vitesse angulaire de $548 \mu\text{V}/(^{\circ}/\text{s})$, une non-linéarité inférieure à 3,87 % pour une étendue de mesure de $\pm 2160 ^{\circ}/\text{s}$. La sensibilité de l'accélération pour les axes X et Y de $0,309 \text{ V}/\text{g}$ et $0,305 \text{ V}/\text{g}$, respectivement, avec un gain électronique de 4 000.

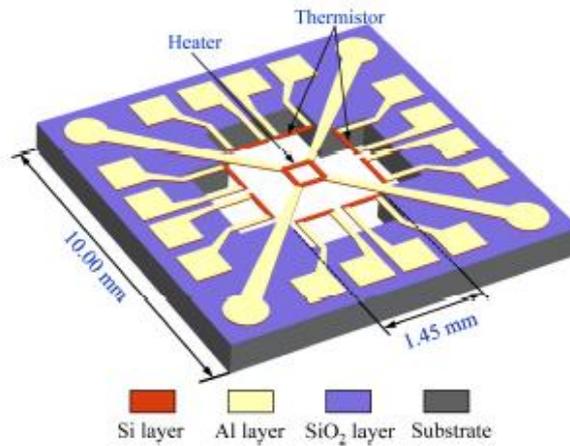


Figure 1.25 : Configuration du capteur inertielle multi-axes [52]

En 2016, Liu et Zhu ont développé une microcentrale d'inertie (MIMU) utilisant seulement trois capteurs inertiels à expansion thermique, illustrée sur la figure 1.26. L'étendue de mesure de la vitesse angulaire pour les 3 axes est de ± 4000 °/s, la gamme de mesure pour l'accélération selon les 3 axes est de $\pm 10g$ et la non-linéarité est inférieure à 2% [56]. En outre, les erreurs de mesures du système pour les 3 axes de l'accélération et les 3 axes de la rotation ont été réduites d'environ deux ordres de grandeur en utilisant un algorithme basé sur un réseau neuronal.

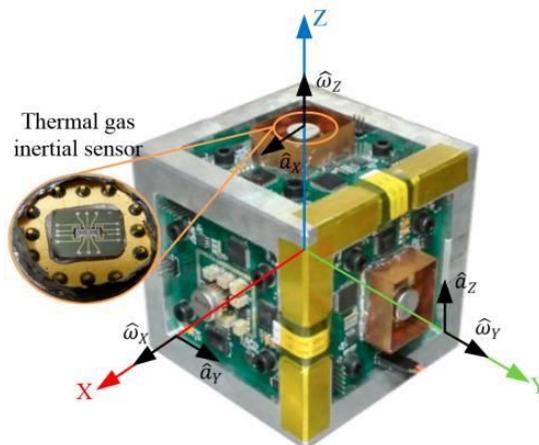


Figure 1.26 : Configuration du MIMU à expansion thermique [56]

Une autre conception du gyro à expansion thermique a été proposée par Leung et al., en 2012 [54]. La structure du dispositif se compose de deux détecteurs de température résistifs espacés symétriquement de deux micros chauffés résistives. Les chauffés et détecteurs de température en platine sont suspendus sur une cavité gravée dans le substrat en silicium. À partir de ces éléments, Leung et al. [48] ont proposé deux designs se différenciant par la géométrie des résistances de chauffe et de leurs orientations par rapport aux détecteurs de température. Ces choix sont basés sur le fait que l'allongement de la chauffe augmente l'expansion du gaz dans la direction normale à la longueur de celle-ci, par rapport à la direction normale à la largeur.

Le premier design (Fig. 1.27 (a)), appelé “Plus-Shaped-Cavity (PSC) gyro”, présente les résistances de chauffe de façon perpendiculaire aux détecteurs. Bien qu’un flux laminaire entre les résistances de chauffe soit prévu, ils spéculent sur le fait que le transfert de chaleur n’est pas efficace à cause d’une perte de puissance dans les limites adjacentes. Alors que le second design (Fig. 1.27 (b)), appelé “Rectangular-Shaped-Cavity (RSC)” gyro, présente les résistances de chauffe positionnées parallèlement aux détecteurs, ainsi la largeur de la chauffe est orientée vers les limites adjacentes, ce qui permettrait de minimiser les pertes de puissance. Ce dernier plus compact permettrait de générer plus d’expansion de gaz vers les détecteurs.

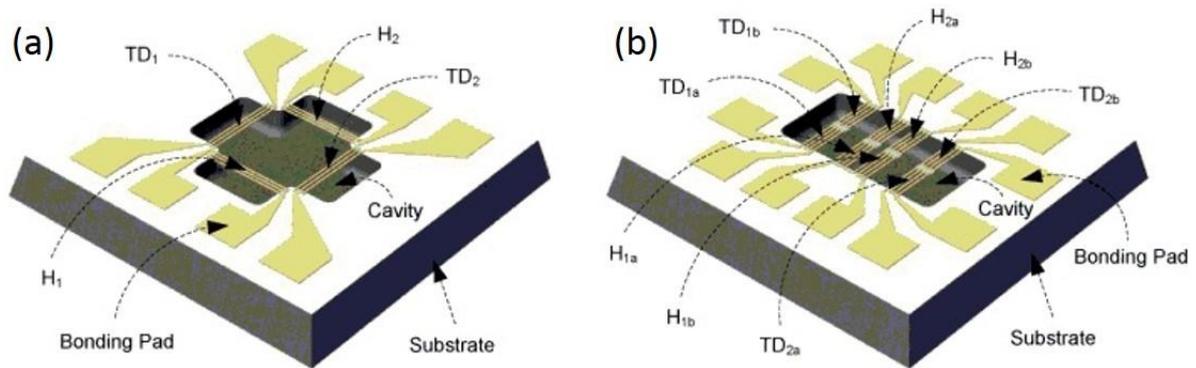


Figure 1.27 : Configuration des deux designs du gyro à expansion thermique de Leung et al. ; (a) PSC gyro ; (b) RSC gyro [48]

On peut noter que la structure des résistances de chauffe est réalisée par des blocs en série contenant plusieurs lignes résistives d’une largeur de 4 μm et espacé de 6 μm , afin d’obtenir une résistance de chauffe appropriée. Les détecteurs sont constitués d’un plus grand nombre de lignes résistives afin d’obtenir une valeur de résistance plus importante que celle de la chauffe, ce qui requiert moins de courant pour obtenir la même sortie, dans des conditions ambiantes similaires. De plus, pour le RSC gyro, deux ponts en série ont été réalisés pour les résistances de chauffe, dans le but d’obtenir une résistance de chauffe équivalente au premier design. La figure 1.28 illustre la configuration des résistances de chauffe pour les deux designs.

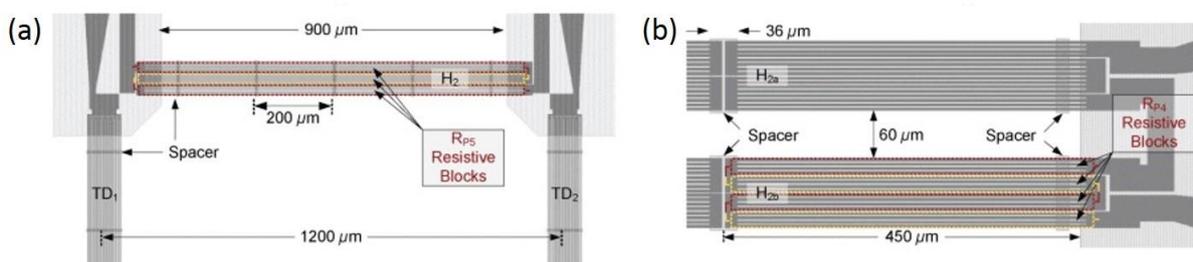


Figure 1.28 : Structure des résistances de chauffe ; (a) PSC gyro ; (b) RSC gyro [48]

Le principe de fonctionnement du dispositif est la détection de la différence de température due à l’effet Coriolis sur un flux de gaz oscillant créé en alternant l’activation des deux chauffes.

En utilisant comme gaz de travail du SF₆ et une puissance de chauffe de 20 mW, le PSC et le RSC gyros présenteraient une sensibilité de 0,947 mV/(°/s) et de 1,287 mV/(°/s) avec un gain électronique de 18 742 (Fig. 1.29), une bande passante de 40 Hz et 20 Hz, et une non-linéarité de la réponse de l'ordre de 0,1 % pour une étendue de mesure de ± 1260 °/s, respectivement. De plus, la robustesse du capteur a été validée pour des chocs de 2 722 à 16 398g [48].

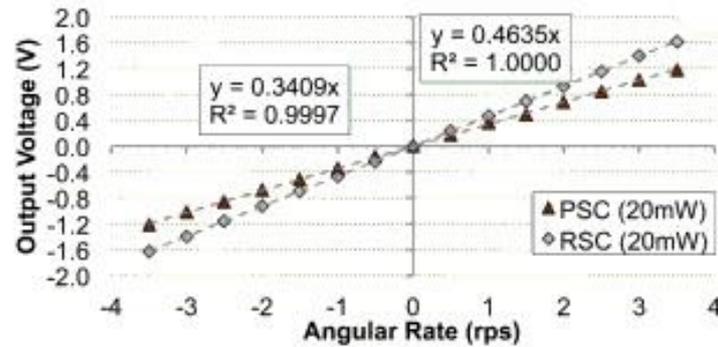


Figure 1.29 : Résultats expérimentaux de la sortie des PSC et RSC gyros en fonction de la vitesse de rotation [48]

Compte tenu de l'application que nous visons, c'est-à-dire, l'utilisation de ce capteur dans des conditions de vibrations ou de chocs élevés, nous avons choisi de nous baser sur les travaux de Leung, et plus précisément sur le design du RSC gyro, pour démarrer nos études.

1.3.2.3 Synthèse des technologies

Les gyros MEMS à gaz sont classés en deux types de capteurs : les gyros à jet de gaz qui utilisent un flux de gaz laminaire généré par une micro-pompe, et les gyros thermiques à gaz qui sont basés sur la convection thermique ou sur l'expansion thermique généré par une ou plusieurs résistances de chauffes. Ces deux types de capteurs utilisent des détecteurs de température positionnés symétriquement de l'axe du flux pour détecter le changement de la distribution de température induite par la rotation. En convection thermique, le mouvement du fluide est généré par les différences de densité dans le fluide (flottabilité) qui se produisent à cause des gradients de températures. Alors que, dans l'expansion thermique, le mouvement du fluide est généré par l'expansion du gaz en réponse à une variation de température, ce qui permet de limiter les effets de couplages croisés par rapport au système utilisant la convection thermique dont les explications seront présentées dans la suite du document.

Par rapport aux gyros à jet de gaz, les structures de capteurs des gyros thermiques à gaz sont beaucoup plus simples de mise en œuvre et plus robustes. En effet, il n'y a pas présence de pièces mécaniques mobiles mais ils présentent une sensibilité plus faible car la vitesse d'écoulement du gaz induit par la convection/expansion est plus lente que le flux généré par une micro-pompe. Les caractéristiques typiques issues de la littérature des gyros MEMS à gaz sont résumées dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Résultats de recherche typique des gyros MEMS à gaz [41]

Année	Institut de Recherche	Principe de fonctionnement	Sensibilité	Étendue de mesure	Tenue aux chocs	Bande Passante	Précision
2001-2016	Université de Tsinghua, Beijing, Chine	Expansion thermique MIMU	- 95 $\mu\text{V}/(^{\circ}/\text{s})$ (Gain 36 000) - 300 mV/g (Gain 10 000)	- ± 4000 $^{\circ}/\text{s}$ - ± 10 g	$\approx 20\,000$ g		
2004-2016	Université de Ritsumeikan, Kyoto, Japon	Jet de gaz	- X : 1,18 mV/($^{\circ}/\text{s}$) - Y : 1,26 mV/($^{\circ}/\text{s}$)	± 200 $^{\circ}/\text{s}$		65 Hz	0,625 $^{\circ}/\text{s}$
2010-2014	Université Simon Fraser, Burnaby, BC, Canada	Expansion thermique	- PSC gyro : 0,947 mV/($^{\circ}/\text{s}$) - RSC gyro : 1,287 mV/($^{\circ}/\text{s}$) (Gain 18 742)	± 1260 $^{\circ}/\text{s}$	16 398 g	- 40 Hz - 20 Hz	
2012-2015	Université Polytechnique du Nord-Ouest, Xi'an, Chine	Jet de gaz tourbillonnant	- X : 0,642 mV/($^{\circ}/\text{s}$) - Y : 0,528 mV/($^{\circ}/\text{s}$) - Z : 0,241 mV/($^{\circ}/\text{s}$)	± 100 $^{\circ}/\text{s}$			Théorique : - X : 0,04 $^{\circ}/\text{s}$ - Y : 0,05 $^{\circ}/\text{s}$ - Z : 0,2 $^{\circ}/\text{s}$

1.4 Modèle analytique pour les gyros MEMS à gaz

Pour tenter d'appréhender les phénomènes physiques mis en jeu dans le gyro thermique, un modèle de dynamique des fluides a été développé pour décrire le flux tridimensionnel dans un système fermé contenant une source de chaleur entouré par les particules fluides. L'analyse est limitée à un fluide newtonien visqueux subissant un écoulement laminaire incompressible [48, 72]. Il faut noter qu'un flux incompressible n'interdit pas nécessairement les variations de la densité des fluides. De plus, on peut considérer le fluide comme incompressible si on a un nombre de Mach (Ma) inférieur à 0,3. Le nombre de Ma est défini par la vitesse d'écoulement du flux de gaz v et la vitesse du son dans l'environnement considéré ($a = 340$ m/s) : $Ma = v/a$. Par rapport aux vitesses considérées dans notre étude, on calcule un nombre de Mach compris entre $1,5 \cdot 10^{-5} < Ma < 0,03$. On peut donc ainsi considérer l'hypothèse présentée précédemment comme valide.

1.4.1 Principe de conservation de l'énergie

Dans notre système, le transfert de chaleur de la source vers le fluide est régi par le principe de la conservation de l'énergie. Pour des températures basses jusqu'à 400-500K ce qui est le cas dans notre système, le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable par rapport au transfert de chaleur par conduction et convection. Par conséquent, la variation de la température en fonction du temps dans la région du fluide est décrite comme [48, 72]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \underbrace{\vec{U} \cdot \vec{\nabla} T}_{\text{Terme de la convection}} - \underbrace{\alpha \nabla^2 T}_{\text{Terme de la conduction}} = 0 \quad (1.6)$$

Où T est la température, α est la diffusivité thermique du fluide et $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)^T$ concerne le champ de vitesse. L'opérateur différentiel vectoriel $\vec{\nabla}$ est défini comme un gradient $\vec{\nabla} \equiv \vec{i}(\partial/\partial x) + \vec{j}(\partial/\partial y) + \vec{k}(\partial/\partial z)$.

1.4.2 Principe de conservation de la masse

Dans un système de fluide fermé, la masse totale du système reste constante lorsque le fluide se déplace le long du champ d'écoulement. Dans la mécanique des fluides, ce principe de conservation de la masse est connu sous le nom d'équation de continuité et défini par [48, 72]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1.7)$$

Où ρ est la densité du fluide et l'opérateur différentiel vectoriel $\vec{\nabla} \cdot$ est défini comme une divergence $\vec{\nabla} \cdot \vec{U} \equiv \partial U_x / \partial x + \partial U_y / \partial y + \partial U_z / \partial z$.

1.4.3 Équation d'état

À volume constant, la variation de température induit une variation de pression dans le fluide qui est donnée par l'équation d'état pour un gaz :

$$P = \rho R_s T \quad (1.8)$$

Où P est la pression et R_s est la constante spécifique du gaz.

1.4.4 Principe de conservation de la quantité de mouvement

La variation de pression crée des contraintes normales et de cisaillement dans le fluide. Par définition, les contraintes de cisaillement se traduisent par les forces visqueuses et perturbent le champ de vitesse du fluide en fonction du principe de conservation de la quantité de mouvement [48, 72] :

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho(\vec{U} \cdot \vec{\nabla})\vec{U} = - \underbrace{\vec{\nabla}P}_{\text{Gradient de Pression}} + \underbrace{\vec{F}}_{\text{Forces Externes}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \vec{U}}_{\text{Forces dues à la viscosité}} \quad (1.9)$$

En présence de la gravité, de l'accélération et de la rotation, les forces agissant sur les particules de fluides sont décrites par [48] :

$$\vec{F} = \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{Force gravitationnelle}} - \underbrace{\vec{U} \frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{Force d'Euler}} - \underbrace{2\rho \vec{\Omega} \wedge \vec{U}}_{\text{Force de Coriolis}} - \underbrace{\rho \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r})}_{\text{Force centrifuge}} \quad (1.10)$$

Où $\vec{r} = (x, y, z)$ vecteur position, $\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)^T$ vecteur accélération et $\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)^T$ vecteur vitesse angulaire. Ainsi, l'équation (1.9) peut être redéfinie, en y injectant l'équation (1.10) et en développant le terme de droite :

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho(\vec{U} \cdot \vec{\nabla})\vec{U} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} - \vec{U} \frac{\partial \rho}{\partial t} - 2\rho \vec{\Omega} \wedge \vec{U} - \rho \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r}) + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (1.11)$$

On définit le coefficient d'expansion thermique α_v en supposant qu'il y a une faible variation de densité avec la température :

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \Big|_P = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \Big|_P \approx \sim - \frac{1}{\rho} \frac{(\rho - \rho_0)}{(T - T_0)} \quad (1.12)$$

Et

$$\vec{\nabla}P = \rho_0 \vec{g} \quad (1.13)$$

Où T_0 correspond à la température ambiante et ρ_0 correspond à la densité du fluide à la température ambiante.

En injectant les équations (1.12) et (1.13) dans l'équation de la quantité du mouvement (1.11), celle-ci s'écrit :

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = \alpha_v (T - T_0) \vec{g} + \alpha_v \vec{U} \frac{\partial T}{\partial t} - 2\vec{\Omega} \wedge \vec{U} - \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r}) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{U} \quad (1.14)$$

On définit ensuite [72] :

$$[\vec{U}] = \vec{U}/(\nu/H) = (U_x/(\nu/H), U_y/(\nu/H), U_z/(\nu/H))^T ;$$

$$[\vec{r}] = \vec{r}/H = (x/H, y/H, z/H)^T ;$$

$$\Theta = (T - T_0)/(T_H - T_0) ;$$

$$[\vec{\Omega}] = \vec{\Omega}/(\nu/H^2) = (\Omega_x/(\nu/H^2), \Omega_y/(\nu/H^2), \Omega_z/(\nu/H^2))^T ;$$

$$\delta = t\nu/H^2 ;$$

où T_H correspond à la température de la source de chauffe, ν ($\nu = \mu/\rho$) est la viscosité cinématique et H est un nombre adimensionnel. Puis on injecte ces éléments dans l'équation (1.14) pour obtenir un modèle adimensionnel :

$$\frac{\partial [\vec{U}]}{\partial \delta} + ([\vec{U}] \cdot [\vec{\nabla}]) [\vec{U}] = \underbrace{\vec{Gr} \Delta \Theta}_{\text{Convection thermique}} + \underbrace{\alpha_v \frac{\partial T}{\partial \delta} [\vec{U}]}_{\text{Expansion thermique}} - \underbrace{2[\vec{\Omega}] \wedge [\vec{U}]}_{\text{Accélération de Coriolis}} - \underbrace{[\vec{\Omega}] \wedge ([\vec{\Omega}] \wedge [\vec{r}])}_{\text{Accélération centrifuge}} + \underbrace{[\nabla^2] [\vec{U}]}_{\text{Viscosité}} \quad (1.15)$$

où le nombre de Grashof :

$$\vec{Gr} = (Gr_x, Gr_y, Gr_z)^T = (\alpha_v (T_H - T_0) g_x H^3 / \nu^2, \alpha_v (T_H - T_0) g_y H^3 / \nu^2, \alpha_v (T_H - T_0) g_z H^3 / \nu^2)^T$$

Et on définit :

$$[\vec{\nabla}] = (\partial/\partial[x], \partial/\partial[y], \partial/\partial[z])^T$$

$$[\nabla^2] = (\partial^2/\partial[x^2], \partial^2/\partial[y^2], \partial^2/\partial[z^2])^T$$

Le premier terme ($\vec{Gr} \Delta \Theta$) à droite de l'équation (1.15) représente la force motrice pour générer le flux par convection thermique qui est en corrélation avec le nombre de Grashof et le second terme ($\alpha_v \partial T / \partial \delta [\vec{U}]$) à droite de l'équation (1.15) représente la force motrice pour générer le flux par expansion thermique qui est en corrélation avec la vitesse transitoire liée à la température, induit par l'alternance entre l'élévation de température et le refroidissement de la chauffe.

À partir de l'équation (1.15), on peut analyser le mécanisme de détection inertielle pour l'accéléromètre thermique et le gyro thermique. D'abord, pour détecter l'accélération, l'équation (1.15) peut être simplifiée, en définissant la rotation comme nulle et en ne prenant pas en compte le second terme de droite (flux uniquement généré dans le cas du gyro) :

$$\frac{\partial [\vec{U}]}{\partial \delta} + ([\vec{U}] \cdot [\vec{\nabla}]) [\vec{U}] = \vec{Gr} \Delta \Theta + [\nabla^2] [\vec{U}] \quad (1.16)$$

Le flux du fluide $[\vec{U}]$ est généré uniquement par la convection naturelle ($\Delta T = T_H - T_0$) et par l'accélération ($\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)^T$). Ce flux induit la déviation du profil de température basé sur l'énergie (Eq. (1.6)), qui est détecté en utilisant des détecteurs de température. On peut noter que la sortie de l'accéléromètre thermique est dominée par le nombre de Grashof.

Pour la détection de la vitesse angulaire, l'écoulement du fluide est considéré par les deux forces motrices qui sont la convection thermique (flottabilité) et l'expansion thermique. Deux sources génératrices aboutissent à deux vecteurs d'écoulement définis comme $[\vec{U}_c]$ pour le flux convectif et $[\vec{U}_e]$ pour le flux d'expansion. Lorsqu'une rotation est appliquée, les accélérations de Coriolis adimensionnelles $-2[\vec{\Omega}] \wedge ([\vec{U}_c] + [\vec{U}_e])$ sont engendrées de manière à induire la déviation du profil de température pour obtenir *in fine* la sortie gyroscopique. Évidemment, l'écoulement $[\vec{U}_c]$ est aussi lié à l'accélération alors que l'écoulement $[\vec{U}_e]$ est totalement indépendant de l'accélération. Par conséquent, le gyro basé sur la convection thermique présente un couplage élevé avec l'accélération alors que le gyro basé sur l'expansion thermique est complètement isolé. Cela est en corrélation avec le terme d'expansion thermique ($\alpha_v \partial T / \partial \delta$) qui est proportionnel à la vitesse transitoire liée à la température [48, 72, 73].

Ainsi dans le but de connaître l'effet de différents paramètres sur la performance du gyro MEMS à gaz, il faudrait extraire les solutions mathématiques de l'équation. Ce modèle pourrait nous permettre de mieux comprendre les caractéristiques du dispositif et d'optimiser les performances du gyro. Néanmoins, ce modèle basé sur les équations de Navier-Stokes sont des équations différentielles partielles appliquées à la mécanique des fluides et ne possèdent pas de solutions analytiques généralisées. Ce modèle n'admet pas de solution analytique simple. Par conséquent, nous avons utilisé la méthode des volumes finis pour étudier notre système. Grâce à cette méthode, il est possible de trouver des solutions approximatives aux équations différentielles partielles et donc d'approcher la solution exacte de notre système.

1.4.5 Équation de la déviation du flux de gaz

Nous venons de voir que la solution analytique des équations de notre système reste très compliquée à extraire et donc qu'une solution analytique permettant d'exprimer les champs de température en fonction du temps et des autres paramètres reste un objectif très ambitieux à atteindre. C'est pourquoi, afin d'appréhender *a minima* le comportement du gyro et en particulier celui à jet de gaz, nous proposons dans ce paragraphe de modéliser la déviation du flux de gaz à partir de l'expression de la force de Coriolis.

Quand une rotation est appliquée selon l'axe Z et que l'écoulement du flux de gaz est le long de l'axe X alors le flux sera dévié dans la direction de l'axe Y due à l'accélération de Coriolis (Fig. 1.30). Cette dernière s'exprime par :

$$\vec{a}_c = -2\vec{\omega}_z \times \vec{v}_x \quad (1.17)$$

où \vec{a}_c , $\vec{\omega}_z$, \vec{v}_x sont les vecteurs de l'accélération de Coriolis, de la vitesse angulaire appliquée selon Z et de la vitesse d'écoulement du gaz selon X, respectivement.

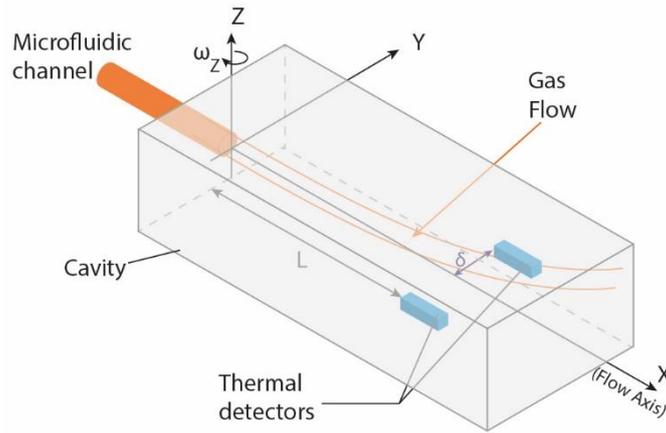


Figure 1.30 : Représentation schématique du gyro MEMS à gaz pour $\omega_z \neq 0$

La vitesse d'écoulement \vec{v}_ω dans la direction déviée (selon l'axe Y) est alors donnée par :

$$\vec{v}_\omega = \int \vec{a}_c dt = \int -2\vec{\omega}_z \wedge \vec{v}_x dt \quad (1.18)$$

Et dans le cas des petites déviations et en considérant la vitesse du gaz $\vec{v}_x \approx$ constante, la vitesse d'écoulement dans la direction déviée sera alors :

$$v_{\omega_y} = 2\omega_z v_x t_L \quad (1.19)$$

Avec t_L temps nécessaire pour qu'une particule dans le flux se déplace de la sortie du micro-canal jusqu'aux détecteurs de température à la distance x . Le temps t_L peut être exprimé et approximé par le produit de la distance L (distance entre la sortie du micro-canal et les détecteurs de température) et l'inverse de la vitesse moyenne (v_m) d'écoulement sur cette distance : $t_L = L/v_m$.

La déviation de l'écoulement ($\vec{\delta}$) est alors donnée par l'intégration de l'équation 1.18 :

$$\vec{\delta} = \int \vec{v}_\omega dt = \iint -2\vec{\omega}_z \wedge \vec{v}_x d^2t \quad (1.20)$$

On obtient donc l'équation de la déviation du flux de gaz dans la direction du plan des détecteurs :

$$\boxed{\delta = \omega_z \frac{L^2}{v_m}} \quad (1.21)$$

L'équation (1.21) montre que la déviation du flux est directement proportionnelle à la vitesse angulaire, mais identifie également d'autres paramètres comme la distance L et la vitesse d'écoulement du flux de gaz v_m , ces paramètres auront aussi un impact sur la sensibilité du capteur, ce que nous vérifierons expérimentalement.

1.5 Conclusion

Cette partie a permis d'avoir un aperçu des technologies disponibles pour la mesure de la vitesse angulaire, ainsi que l'intérêt de chacune des technologies en fonction de l'application visée. Il ressort notamment que quasiment toutes les technologies sont peu adaptées aux environnements extrêmes et en particulier les fortes vibrations et les chocs d'amplitude élevée. Néanmoins, les gyros fluidiques semblent être les seuls dispositifs susceptibles de répondre à ces exigences. En effet, selon leur version et grâce en particulier aux systèmes intégrés, ces derniers ne présentent pas de pièces mobiles solides qui constituent le maillon faible des autres gyros pour ce type d'environnement.

À la lecture de la bibliographie sur les gyro thermique MEMS à gaz, il ressort que les gyros à flux de gaz permettent d'obtenir une sensibilité plus importante, en raison d'une vitesse d'écoulement plus élevée, contrairement aux gyros thermiques à gaz. Néanmoins, ces derniers basés plutôt sur l'expansion thermique permettent d'obtenir une étendue de mesure plus large et un faible couplage croisé.

Le modèle analytique développé est composé des équations de Navier-Stokes qui sont des équations différentielles partielles appliquées à la mécanique des fluides. À partir de ce modèle, il ressort que le gyro basé sur l'expansion thermique présente un faible couplage croisé, contrairement au gyro basé sur la convection thermique dû au fort couplage avec l'accélération. Néanmoins, ce modèle n'admet pas de solution analytique simple à extraire permettant de définir le comportement du gyro. C'est pourquoi, l'utilisation de la simulation numérique basée sur la méthode des volumes finis est nécessaire pour l'étude de notre système.

D'autre part, il a été possible d'appréhender *a minima* le comportement du gyro à jet de gaz en réalisant une modélisation de la déviation du flux de gaz à partir de l'expression de Coriolis. Ainsi, il en résulte que la déviation du flux de gaz est directement proportionnelle à la vitesse angulaire, mais on peut noter également que la déviation est aussi liée à d'autres paramètres tels que la distance L entre l'entrée de la cavité et la position des détecteurs, ainsi que la vitesse d'écoulement du gaz au sein de la cavité. Ces paramètres auront une influence notamment sur la sensibilité du capteur et qui sera vérifié expérimentalement et numériquement par la suite.

Du fait de ses nombreux avantages et dans le cadre d'un besoin défense, deux types de gyro thermique MEMS à gaz vont être étudiés numériquement et expérimentalement dans la suite de ce document de façon à comprendre les mécanismes physiques mis en jeu et les paramètres qui permettent d'influencer ses performances en termes de sensibilité et d'étendue de mesure en particulier.

Chapitre 2

Moyens et études technologiques associés à la caractérisation des gyros

Le gyro étudié étant basé sur les échanges thermiques par convection, il a fallu développer et mettre en place toute une série d'expérimentation mettant en jeu des écoulements fluidiques et des mesures thermiques. En effet, au cours de ce chapitre, les moyens technologiques nécessaires à la caractérisation des gyros et leur élaboration seront présentés.

Comme par exemple, pour le gyro à jet de gaz, on décrira la méthode de visualisation du flux de gaz et la mesure de sa vitesse dans la cavité. Puis, on expliquera le choix pris pour réaliser la détection thermique ainsi que son électronique associée qui vont permettre de caractériser ce gyro.

Ensuite pour le gyro à expansion thermique, les étapes de sa fabrication en salle blanche seront présentées ainsi que la caractérisation thermo-résistive de ses résistances. L'électronique associée que nécessite ce type de capteur, sera détaillée.

Les moyens de tests seront présentés comme par exemple le plateau tournant mono-axe de précision utilisé pour le test en rotation des gyros.

Et enfin, la présentation de l'outil de simulation numérique par volumes finis sera faite.

Sommaire

2.1	Caractérisation pour le gyro à jet de gaz.....	40
2.1.1	Prototypage des cavités	40
2.1.2	Visualisation du flux au sein de la cavité.....	40
2.1.3	Étalonnage de la vitesse du gaz à l'aide d'un micro-anémomètre	43
2.1.3.1	Principe de fonctionnement.....	44
2.1.3.2	Dispositif de mesure	47
2.1.3.3	Modèle analytique en 2D de l'écoulement et étude comparative de la vitesse	48
2.1.4	Détection thermique et électronique associée à la mesure.....	50
2.2	Technologies associées au gyro à expansion thermique	52
2.2.1	Fabrication du gyro à expansion thermique	53
2.2.2	Mesure des paramètres thermo-résistifs.....	56
2.2.3	Électronique associé au gyro à expansion thermique	57
2.3	Simulateur mono-axe de précision	60
2.4	Simulations numériques par éléments finis.....	62
2.5	Conclusion	66

2.1 Caractérisation pour le gyro à jet de gaz

2.1.1 Prototypage des cavités

Bien que n'étant pas le système le plus intégré, le gyro à jet de gaz a été abordé, dans un premier temps, afin d'observer et comprendre les phénomènes physiques mis en jeu dans le dispositif. Pour cela, un design rectangulaire a été choisi et des cavités de différentes dimensions ont été réalisées. En effet, avec des dimensions mésoscopiques, il est plus aisé de réaliser les différentes mesures de la vitesse d'écoulement du gaz, de placer des détecteurs de température ou encore de visualiser l'écoulement au sein de la cavité. Ces différents prototypes ont été réalisés avec un polymère thermoplastique transparent (Polyméthacrylate de méthyle : PMMA) usiné de façon à obtenir deux parties. Ces dernières sont usinées de façon à obtenir une cavité rectangulaire ouverte qui sera par la suite, lors du fonctionnement, fermée dessus et dessous par des lames de verres. De plus, un canal est réalisé pour venir positionner le micro tube qui permet d'injecter le flux de gaz dans la cavité. Une ouverture à l'opposé de ce dernier est aussi usinée pour laisser le gaz s'échapper, quand les deux parties seront fixées ensemble. La figure 2.1 (a) illustre le design et les dimensions réalisées pour le premier dispositif et la figure 2.1 (b) montre une photo du dispositif. Après les premiers résultats de visualisation du flux sur ce prototype, un second avec une longueur de cavité de 42 mm et une ouverture plus importante pour la sortie du gaz a été fabriqué pour permettre d'améliorer les mesures (Fig. 2.2). Les dispositifs ont été usinés par l'atelier Mécanique de l'IES.

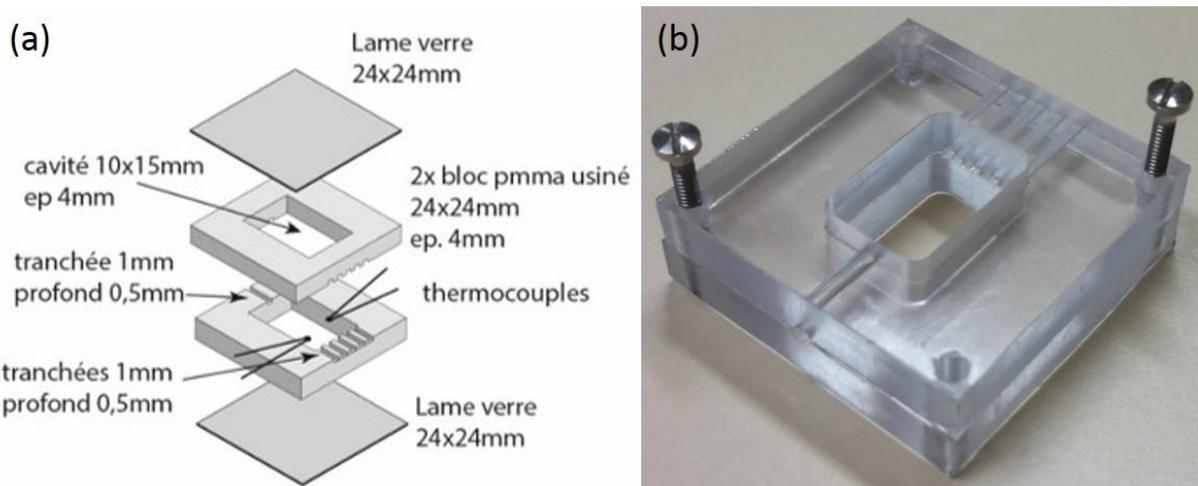


Figure 2.1 : Représentation schématique (a) et une photo (b) du design pour le premier design du gyro à jet de gaz

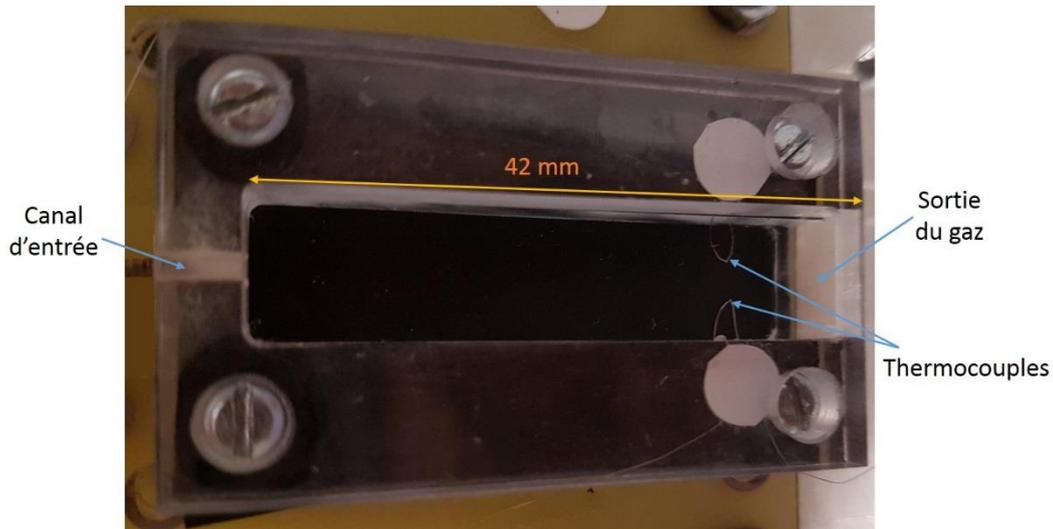


Figure 2.2 : Photo du deuxième design du gyro à jet de gaz

Ces dispositifs serviront alors à la visualisation du flux de gaz et aux différentes mesures gyroscopiques.

2.1.2 Visualisation du flux au sein de la cavité

La visualisation d'un gaz est possible par différentes techniques optiques telles que la tomographie, l'ombroscopie ou la strioscopie [74]. La tomographie observe un écoulement par la visualisation de coupes de cet écoulement. Pour cela, une tranche de l'écoulement (ensemencé par de fines particules) est éclairée par une nappe laser, puis on enregistre, à l'aide d'une caméra, l'image des particules éclairées, comme on peut le voir sur la figure 2.3. L'ombroscopie est, quant à elle, une technique non intrusive de visualisation d'écoulement qui consiste à placer le fluide à étudier entre une source lumineuse quasi-ponctuelle et une caméra placée dans le plan de visualisation. Cette technique permet de visualiser une modification de l'indice de réfraction du fluide proportionnelle à une variation de densité, donc de température ou de pression. La strioscopie, ou dite méthode Schlieren, est très proche de l'ombroscopie. Son principe consiste à réaliser une image de l'écoulement par un dispositif optique qui arrête presque tous les rayons lumineux réfractés normalement, et transmet seulement les rayons diffractés par les variations d'indices du fluide (densité, température), ce qui permet de visualiser facilement ces dernières. La figure 2.4 illustre un exemple réalisé avec un flux d'hexafluorure de soufre (SF_6), qui est plus dense que l'air. Néanmoins, toutes ces techniques nécessitent de nombreux et encombrants composants optiques, il est donc difficile de les embarquer sur notre plateau tournant.

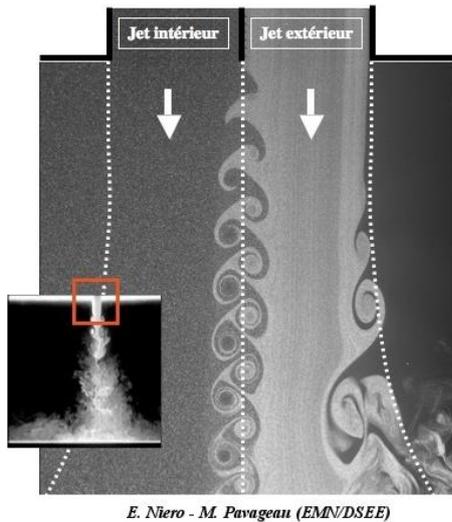


Figure 2.3 : Visualisation par tomographie [74]

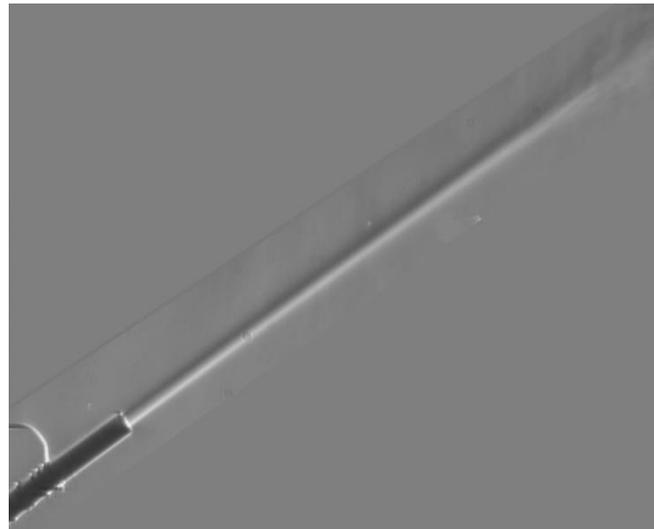


Figure 2.4 : Visualisation du SF₆ par Schlieren

Pour réussir à visualiser un flux au sein de la cavité, le choix s'est porté sur l'utilisation d'un jet de particules fines constituées de fumée (mélange eau + propylène de glycol). Le banc expérimental se compose alors principalement du capteur gyroscopique (Fig. 2.5 (a)), du générateur de fumée (Fig. 2.5 (c)), d'une micro pompe (Fig. 2.5 (b)), d'une source lumineuse, d'une caméra (Fig. 2.5 (a)), le tout embarqué sur un plateau tournant.

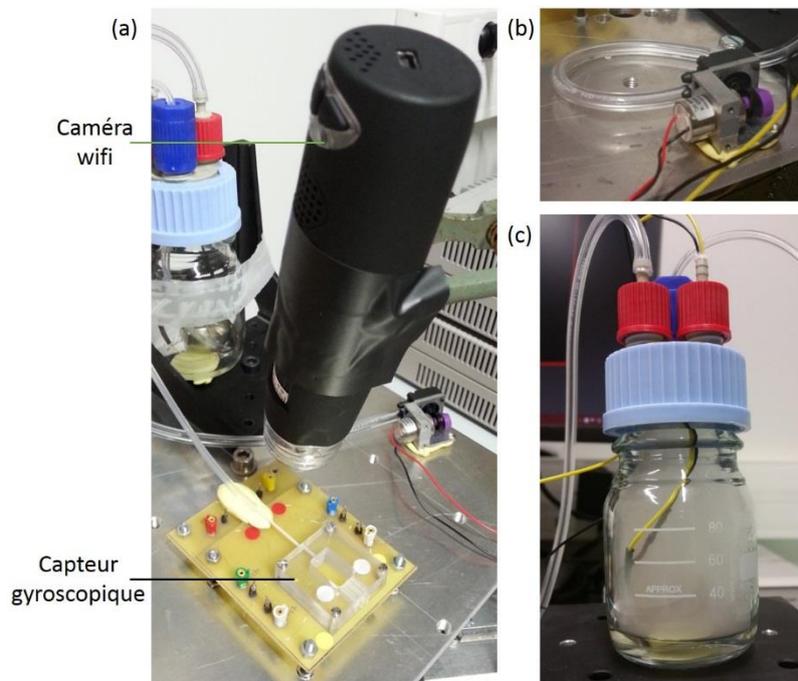


Figure 2.5 : Photos des différents éléments composant le montage ; (a) camera embarqué wifi placé au-dessus du capteur gyroscopique ; (b) micro-pompe alimenté en tension ; (c) réservoir hermétique contenant le générateur de fumée

De la fumée est ainsi créée au sein d'un réservoir hermétique (Fig. 2.5 (c)) et sa mise en circulation est réalisée par la micro-pompe, ce qui va permettre d'obtenir un flux de fumée à la sortie. Ce flux est acheminé par un réseau microfluidique jusqu'à un capillaire de 480 μm de diamètre débouchant dans la cavité. Cette dernière est éclairée par une source lumineuse permettant d'observer le flux de fumée au sein de celle-ci, via la caméra embarquée. Et enfin, l'ensemble est embarqué sur un simulateur mono-axe de précision (plateau tournant) qui sera décrit plus loin dans ce chapitre. La figure 2.6 illustre la représentation schématique du montage et la figure 2.7 montre une photo du montage.

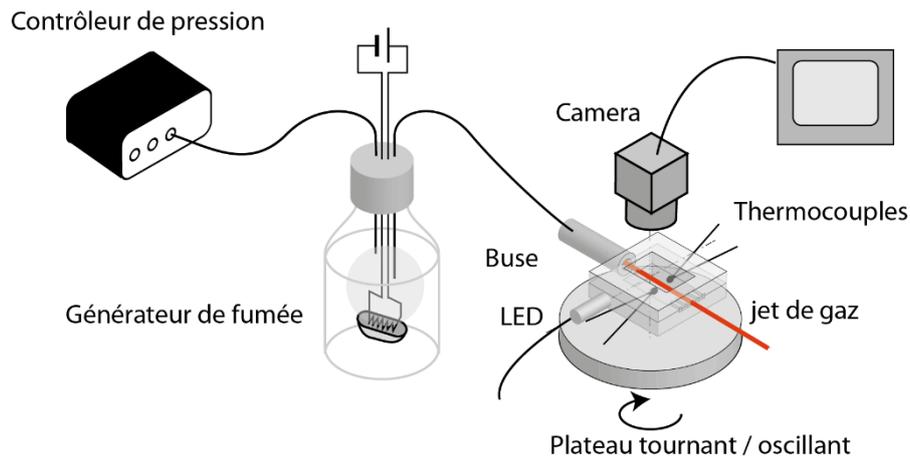


Figure 2.6 : Représentation schématique du montage dédié à la visualisation du flux au sein de la cavité

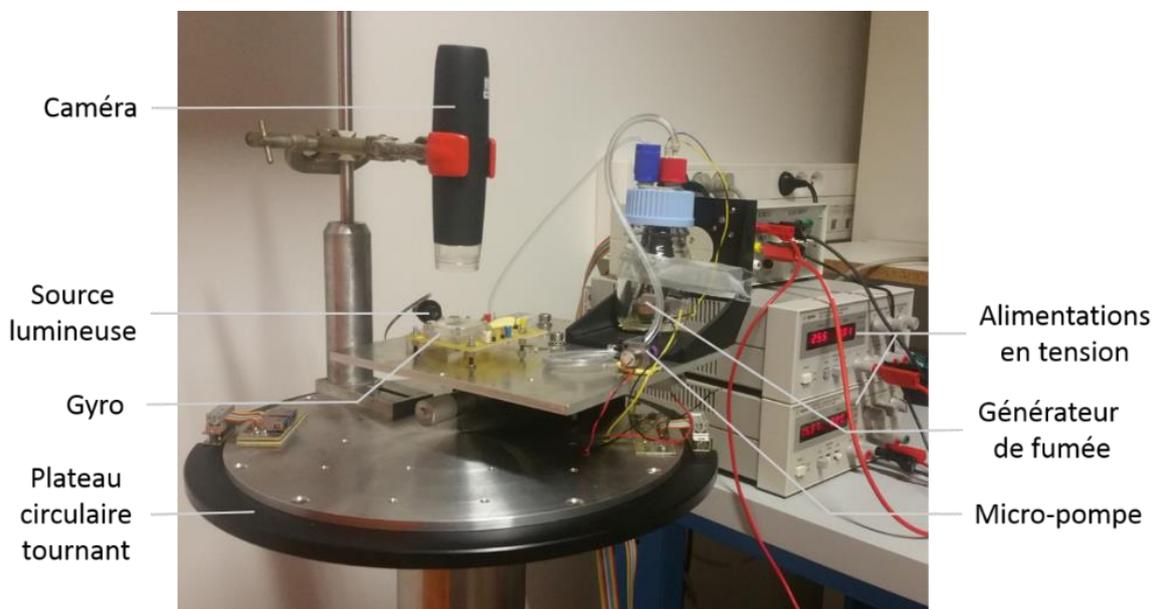


Figure 2.7 : Photo du banc de test pour la visualisation du flux au sein de la cavité

Certes l'ensemble est "peu" intégré mais ce système va nous permettre d'appréhender les phénomènes mis en jeu.

Cette étude a été réalisée pour deux dimensions de cavités et l'observation du flux de fumée a pu être faite dans les deux cas. Le premier dispositif (cavité de longueur de 15 mm) a été réalisé avec de petites ouvertures de sorties pour éviter les perturbations extérieures, mais lors de la mise en rotation, le gaz avait du mal à s'échapper ce qui a entraîné un remplissage de la cavité ne permettant plus de distinguer le flux. De plus, la déviation du jet se faisait à l'extrémité de la cavité ce qui ne permettait pas une visualisation nette de la déviation du fluide. C'est pourquoi, le second design a été réalisé pour permettre de s'affranchir de ces problèmes, ce qui a permis d'observer nettement le flux de fumée pour, par exemple, une vitesse moyenne $v_m = 2,5$ m/s, comme illustré sur la figure 2.8. Sur cette figure (a), on a représenté le système non soumis à une rotation, où on voit le jet de fumée fin et net qui est centré au milieu de la cavité. Tandis que sur la figure 2.8 (b), on peut voir la déviation du flux lors de la mise en rotation du système ($\Omega = 300$ °/s). Cette visualisation a permis d'observer la zone où la déviation est effective en fonction des différentes vitesses utilisées. Ce qui nous a permis, par la suite, de placer les détecteurs de température à une position qui nous semblait la plus optimale possible.

Les résultats portant sur ce système seront présentés dans le chapitre 3.

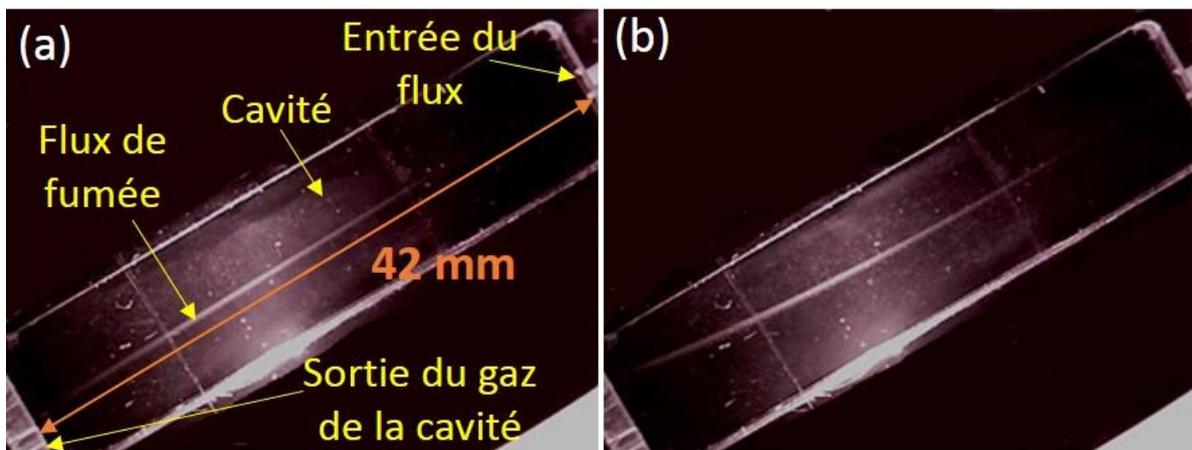


Figure 2.8 : Visualisation du jet de fumée pour $v_m = 2,5$ m/s ; (a) $\Omega = 0$; (b) $\Omega = 300$ °/s

2.1.3 Étalonage de la vitesse du gaz à l'aide d'un micro-anémomètre

2.1.3.1 Principe de fonctionnement

Pour le gyro, la vitesse d'écoulement du gaz apparaît comme un paramètre important lié aux performances du capteur. Comme on a pu le voir précédemment, ce paramètre est en lien direct avec la force de Coriolis. Il est donc important de mesurer la vitesse d'écoulement du gaz. Pour réaliser cette mesure, il existe différentes techniques permettant la mesure de la vitesse telles que les méthodes non intrusives qui sont en général des méthodes optiques (vélocimétrie laser à franges, vélocimétrie par images de particules, vélocimétrie laser à effet Doppler) mais qui nécessitent d'ensemencer de particules, le gaz. Les méthodes classiques dites intrusives telles que les débitmètres massiques à force de Coriolis, thermiques et par pression différentielle nécessitent, quant à elles, d'utiliser une sonde qui peut perturber l'écoulement. Le flux de gaz est relativement fin et le dispositif de mesure doit être placé sur notre banc de manipulation. Notre choix s'est donc porté sur l'utilisation d'un micro-anémomètre à fil chaud basée sur le

principe de l'Anémométrie à Température Constante (CTA). L'avantage du CTA par rapport à d'autres principes de mesure du débit est la facilité d'utilisation, bien que la sonde doive venir s'insérer dans la cavité. De plus, en utilisant des capteurs filaires très fins placés dans l'écoulement et un circuit électronique avec boucle de rétroaction, il est possible de mesurer de faibles fluctuations de vitesse (quelques cm/s).

Le principe de cette méthode est de chauffer, par effet Joule, une sonde avec un fil dont la résistance dépend de la température. Cela consiste à mesurer la puissance transférée depuis un fil fin chauffé, dont la température est maintenue constante, et refroidi par convection lors du passage du gaz. Le transfert de chaleur réalisée donne donc une mesure indirecte de la vitesse d'écoulement de façon locale. La loi d'échange thermique est caractérisée par le nombre de Nusselt (Nu) qui est fonction des paramètres suivants [75] :

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, Ma, l/d, (T - T_g)/T_g) \quad (2.1)$$

Avec Re, Pr, Gr et Ma qui font références aux nombres de Reynolds, Prandtl, Grashof et Mach, respectivement, l/d correspond au rapport de la longueur du fil à son diamètre et $(T - T_g)/T_g$ correspond au coefficient de surchauffe (T = température du fil et T_g = température du gaz).

Pour les éléments cylindriques (fils) dont l'axe est placé perpendiculaire à la vitesse, on peut utiliser la relation validée en convection forcée incompressible qui est la loi de Kramers [75, 76] :

$$Nu = 0,42Pr^{1/5} + 0,57Pr^{1/3}Re^{1/2} \quad (2.2)$$

Comme d'une part le nombre de Nusselt est proportionnel au flux de chaleur, donc à la puissance électrique RI^2 , et que d'autre part le nombre de Reynolds est proportionnel à la vitesse du gaz, pour un gaz et un capteur donnés, l'équation (2.2) peut s'écrire :

$$\frac{RI^2}{(R - R_a)} = A + B\sqrt{U} \quad (2.3)$$

Où R, R_a , I, U correspondent à la résistance du fil chaud, à la résistance du fil à température ambiante, à l'intensité du courant passant dans le fil, à la vitesse effective de refroidissement du fil, respectivement et A, B correspondent aux constantes liées aux caractéristiques physiques du fil et du fluide. Cette relation est l'équation fondamentale de l'anémométrie, connue sous le nom de loi de King [75, 76].

Le fonctionnement du CTA est basé sur la variation du courant I, que l'on mesure à travers les variations de la tension $e(t) = RI(t)$. L'équation (2.3) s'exprime alors :

$$e = RI = \sqrt{R(R - R_a)(A + B\sqrt{U})} \quad (2.4)$$

L'équation (2.4) s'écrit alors de la manière suivante :

$$e = \sqrt{\alpha + \beta\sqrt{U}} \quad (2.5)$$

avec $\alpha = R(R - R_a)A$ et $\beta = R(R - R_a)B$

Puisqu'il est très difficile de calculer analytiquement toutes ces constantes intervenant dans la loi d'échange thermique, une sonde CTA doit nécessairement être calibrée de façon empirique. C'est-à-dire que l'on effectue une série de mesures de la tension de sortie e pour différentes vitesses imposées U , et on détermine les coefficients α et β de la relation (2.5) [75].

La sonde que nous avons utilisée est une sonde CTA, commerciale de chez Dantec Dynamics, avec un fil de $5 \mu\text{m}$ de diamètre pour une longueur de $1,2 \text{ mm}$ (Fig 2.9) et c'est la plus petite du marché. La sonde a été calibrée pour un fonctionnement dans une gamme de vitesse comprise entre 0 et 20 m/s et une température comprise entre 20 et $25 \text{ }^\circ\text{C}$ pour ajuster le coefficient de surchauffe. La bande passante de la sonde est de 10 kHz et la précision de la vitesse est de l'ordre de $0,5 \%$ pour des vitesses mesurées supérieures à 5 m/s , sinon elle est de $0,2 \%$ pour des vitesses inférieures.

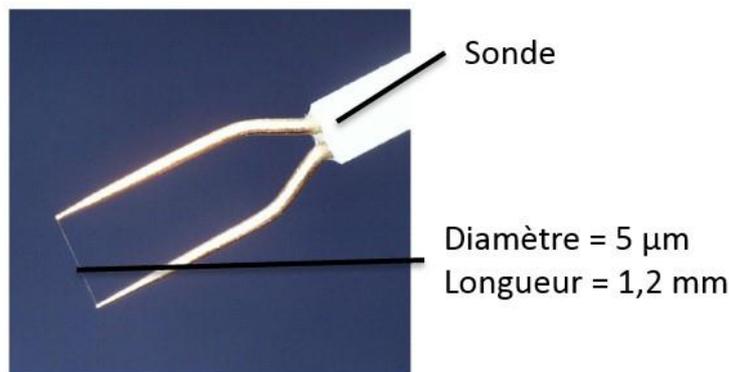


Figure 2.9 : Sonde CTA

Un logiciel, StreamWare Basic, est aussi fourni permettant de réaliser la configuration de paramètres (type de sonde, longueur de câble, la calibration, le conditionneur de signaux, la bande-passante, etc.). Ce logiciel permet de réaliser les mesures de façon manuelle ou automatisée (en reliant un système de déplacement 3 axes motorisés) et il contient des modules qui effectuent l'analyse de données les plus communes tels que la vitesse moyenne, l'écart type de la vitesse et l'intensité de turbulence (flux laminaire ou turbulent). La figure 2.10 montre une photographie des éléments associés à la sonde permettant la mesure de vitesse, le tout relié à un ordinateur.

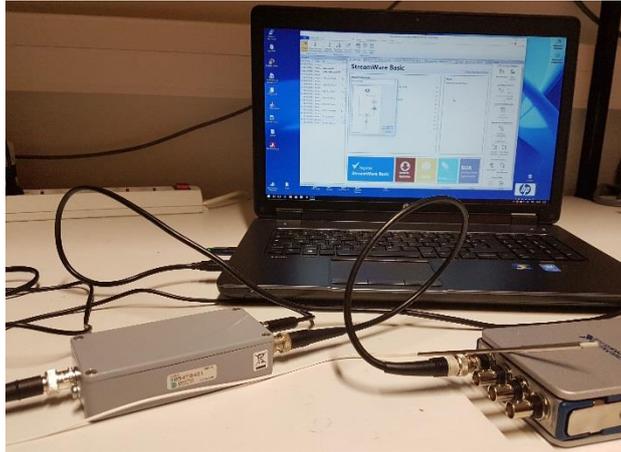


Figure 2.10 : Photographie des différents éléments permettant la réalisation de la mesure de vitesse via un micro-anémomètre

2.1.3.2 Dispositif de mesure

La mesure de la vitesse avec une sonde CTA est une mesure locale. Dans un premier temps, elle a été réalisée dans la cavité de dimension 10x15x8 mm, en utilisant un contrôleur de pression utilisé en microfluidique avec une précision de 1 mbar. Le contrôleur de pression comprend un compresseur, un contrôleur à 3 voies relié à un ordinateur et le système est piloté par un logiciel spécifique à son utilisation. La mesure de la vitesse a pu être comparée à des résultats de simulation numérique et de calcul analytique, qui seront présentés dans la partie 2.1.3.3. Cela nous permettra de valider le modèle numérique et de confirmer les vitesses mesurées par l'étude analytique. Cependant, l'ensemble ne pouvait pas être embarqué sur le plateau tournant, le contrôleur de pression sera remplacé, plus tard, par une micro-pompe qui sera elle-même étalonnée. Le croisement de ces deux mesures nous permettra de faire le lien entre vitesse du gaz et différence de pression à appliquer pour le modèle numérique. La figure 2.11 montre une photo de la sonde placée au sein de la cavité.

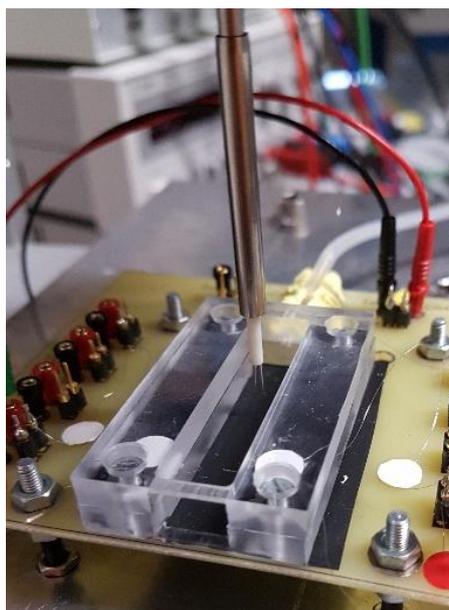


Figure 2.11 : Photographie pour la mesure de vitesse

2.1.3.3 Modèle analytique en 2D de l'écoulement et étude comparative de la vitesse

Pour cette étude analytique, le système est composé d'une conduite horizontale de longueur $L = 5$ mm avec un diamètre de $200 \mu\text{m}$ et d'une cavité de 10×15 mm (Fig. 2.12). L'étude analytique nécessite de séparer notre problème en deux parties.

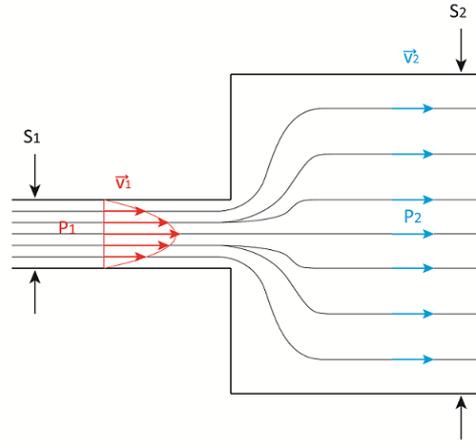


Figure 2.12 : Représentation à échelle arbitraire en 2D du système

D'abord, l'écoulement de l'air avec une température d'entrée de $T = 300$ K sera étudié au sein de la conduite horizontale en utilisant la loi de Poiseuille. Cette loi va nous permettre de déterminer la vitesse moyenne (U_m) au sein du canal. On étudie ainsi les propriétés du mouvement d'un fluide globalement non pesant, c'est-à-dire que les forces de pesanteur sont négligées devant les forces d'inertie et de pression (en réalité le terme caractéristique d'énergie potentielle volumique $\rho g r$ est négligé devant le terme caractéristique d'énergie cinétique volumique $1/2 \rho u^2$: $g \cdot r \ll u^2$). De plus, l'écoulement est supposé laminaire ($Re < 2000$), unidimensionnel et à masse volumique constant car « un gaz peut être considéré comme conservant une masse volumique constant dans un écoulement à une approximation de 1%, si la vitesse reste inférieure à 70 m/s » [77]. La loi de Poiseuille a pu être appliquée dans notre cas et est exprimée par [77, 78] :

$$U_m = \frac{(P_1 - P_2)}{8\mu L} r^2 \quad (2.6)$$

Où P_1 , P_2 , L , r , μ correspondent à la pression en entrée, à la pression en sortie, à la longueur du canal ($L = 5$ mm), au rayon du canal ($r = 100 \mu\text{m}$) et la viscosité dynamique de l'air à $T = 300$ K ($\mu = 1,85 \cdot 10^{-5}$ kg/(m/s)), respectivement.

À l'aide de la vitesse moyenne obtenue par la loi de Poiseuille au sein de la conduite horizontale, on peut confirmer que l'écoulement est bien laminaire ($Re < 2000$) en utilisant l'équation qui régit le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (2.7)$$

Avec D qui représente le diamètre du canal et ρ qui correspond à la viscosité cinématique de l'air à $T = 300$ K ($\rho = 1,177$ kg/m³). Dans notre cas, le nombre de Reynolds maximal

correspondant à l'écoulement réalisé avec une différence de pression de 20 mbar est de 344, ce qui reste très inférieur à 2000, valeur pour laquelle le flux devient turbulent.

Dans ce type d'écoulement laminaire, il y a une chute de pression linéique (variation linéaire de la pression avec la distance parcourue) due à la viscosité du gaz qui correspond à une perte de charge régulière (Δp) exprimée en Pascal [77, 78] :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho U_m^2 \lambda \frac{L}{D} \quad (2.8)$$

Où λ correspond au coefficient de la perte de charge régulière et qui vaut pour un écoulement laminaire : $\lambda = 64/Re$.

Ensuite, il faut prendre en compte l'élargissement brusque, due à la géométrie du système étudié, à la sortie de la conduite horizontale et qui engendre une perte de charge singulière, ce qui permettra de déterminer la vitesse de sortie (U_s) de la conduite horizontale. Cette vitesse est calculée en prenant en compte les pertes de charges régulières et singulières dans la relation de Bernoulli généralisée [77, 79] :

$$U_s = \sqrt{U_m^2 \left(1 - \lambda \frac{L}{D} - K\right) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (2.9)$$

Où K correspond au coefficient de la perte de charge singulière due à la géométrie : $K = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$ avec S_1, S_2 qui représente la section du canal et la section de la cavité, respectivement.

Cette étude a été menée pour une différence de pression allant de 0 à 20 mbar et la figure 2.13 représente la vitesse de sortie (U_s) en fonction de la différence de pression appliquée, pour les résultats expérimentaux, de simulation et analytique. La mesure a été prise à une distance d'environ 5 mm de l'entrée du flux de gaz dans la cavité.

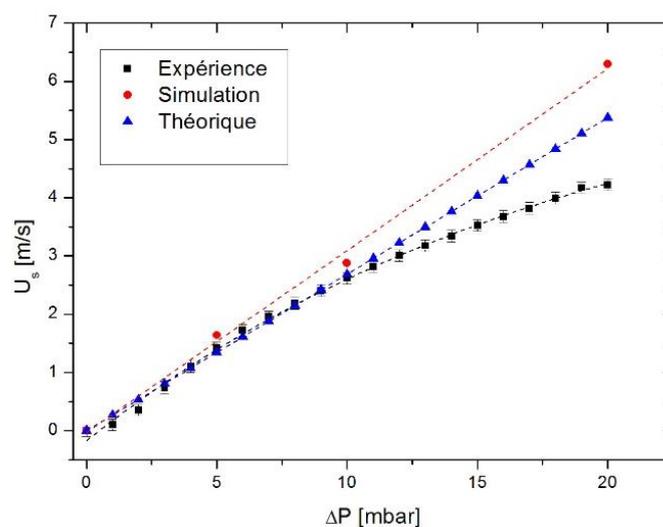


Figure 2.13 : Comparaison expérimentale, numérique et théorique de la vitesse de sortie du canal microfluidique de 200 μm de diamètre

On note qu'il y a une bonne corrélation pour les faibles différences de pression puis pour de plus importantes différences de pression (≥ 10 mbar), la vitesse mesurée est un peu plus faible que celle simulée et théorique. Cela est dû certainement à des pertes de pression au niveau du réseau microfluidique utilisé entre le contrôleur de pression et l'entrée de la cavité mais aussi à la taille de la sonde qui est du même ordre de grandeur de celle du jet d'écoulement, ce qui peut fausser à forte vitesse, la mesure de cette dernière.

Ensuite, une mesure de la vitesse a été réalisée dans la cavité de dimension $10 \times 42 \times 10$ mm sur toute la longueur entre l'entrée et la position des thermocouples pour différentes tensions d'alimentation de la micro-pompe (Fig. 2.14). Cela nous a permis par la suite de déterminer une vitesse moyenne du flux de gaz sur cette distance qui nous sera utile pour les mesures gyroscopiques.

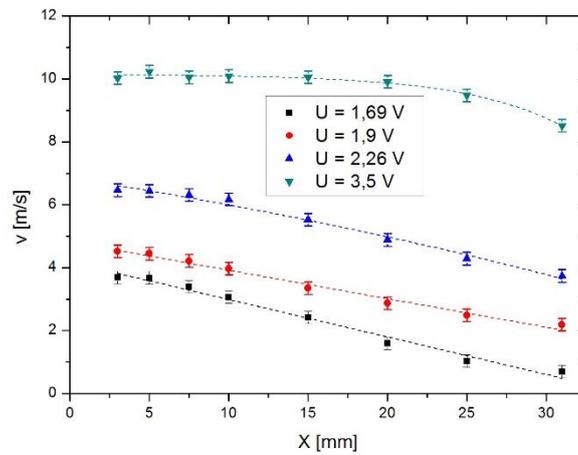


Figure 2.14 : Vitesse mesurée en fonction de la distance dans la cavité pour différentes tensions appliquées à la micro-pompe

Une étude comparative entre la simulation et l'expérience a aussi été faite. La comparaison a été effectuée pour la vitesse correspondant à la tension appliquée de 1,69 V à la micro-pompe et le modèle numérique utilisé est celui en trois dimensions. La figure 2.15 représente la vitesse en fonction de la distance au sein de la cavité. Ce résultat est identique pour les différentes tensions appliquées.

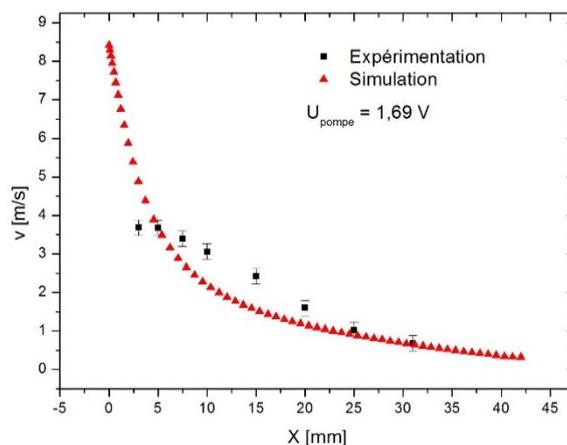


Figure 2.15 : Comparaison entre expérience et simulation de la vitesse en fonction de la distance au sein de la cavité

Le profil de l'écoulement en vitesse selon la distance X au sein de la cavité entre la simulation et l'expérience présente une certaine correspondance. En effet, on a une corrélation qui est assez bonne à partir d'une distance de 10 à 15 mm, ceci est certainement dû au fait que plus on s'éloigne de l'entrée du flux dans la cavité, plus le flux s'élargit. La sonde "intègre" alors plus facilement les échanges de chaleurs, ce qui n'est pas le cas lorsque cette dernière est proche de l'entrée de la cavité. Cela permet d'obtenir une meilleure précision de la vitesse moyenne mesurée. De plus, la vitesse extraite de la simulation correspond, ici, à une mesure ponctuelle.

En conclusion, le modèle analytique choisi permettra pour les mesures gyroscopiques, une comparaison avec les résultats expérimentaux qui seront présentés dans le chapitre 3.

2.1.4 Détection thermique et électronique associée à la mesure

Dans le gyro à jet de gaz que nous voulons étudier, notre choix s'est porté sur l'injection d'un flux de gaz chaud en entrée de cavité et la mesure de la différence de température est assurée entre deux micro-thermocouples. Pour chauffer le gaz, un fil résistif a été bobiné autour du capillaire d'alumine de 480 μm . Les micro-thermocouples utilisés font partie des plus petits sur le marché. Ils sont de type K et de 75 μm de diamètre fournis par l'entreprise Omega. Grâce à l'observation de la déviation du jet de fumée, le choix a été de placer ces derniers à une distance de 31 mm de l'entrée de la cavité et positionnés à 1,5 mm de part et d'autre de l'axe du flux de gaz, car à cette distance le déplacement du flux était important sur toute la gamme de vitesse. Un support a été réalisé pour placer le dispositif et différents plots de contact électrique qui permettent d'assurer le chauffage du fil et la mesure issue des micro-thermocouples (Fig. 2.16).

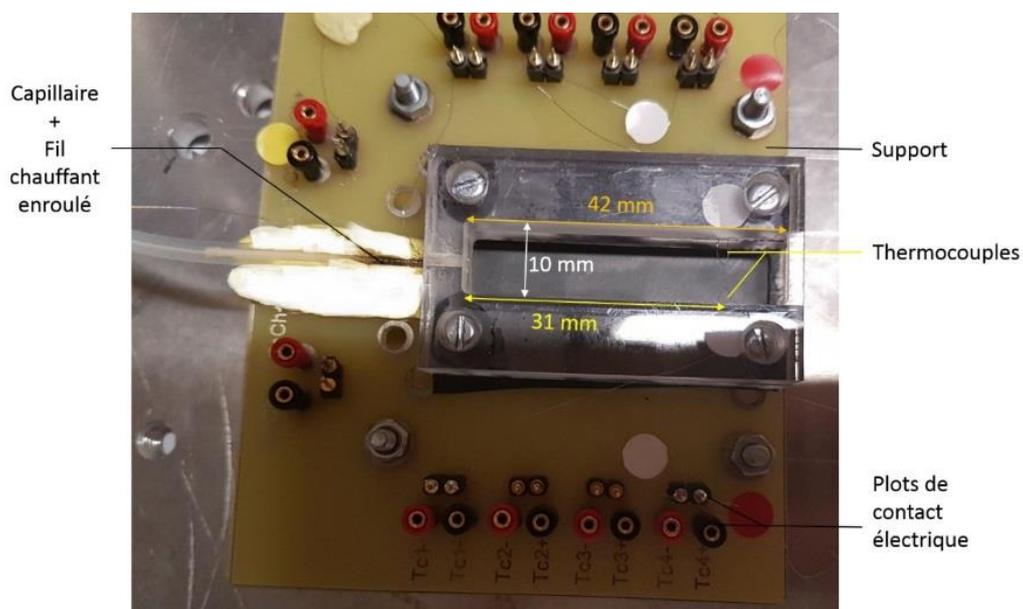


Figure 2.16 : Support expérimentale pour la réalisation de la mesure de température par thermocouples

Le principe de fonctionnement des thermocouples est basé sur l'effet thermoélectrique, appelé effet Seebeck. Lorsque deux fils de matériaux différents sont soudés et qu'un écart de température se produit entre cette soudure et l'extrémité des deux fils, il apparaît une différence de potentiel à la sortie de ceux-ci proportionnelle au pouvoir thermoélectrique des deux matériaux et à la différence de température. Elle est donnée au premier ordre par la relation [80]:

$$\Delta V = (\varepsilon_A - \varepsilon_B)\Delta T = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

Avec ε_A et ε_B : pouvoirs thermoélectriques des matériaux A et B, respectivement et α : coefficient de Seebeck donné par des tables.

Pour mesurer la température au point de jonction appelé "jonction chaude", il faut que la température soit connue à l'extrémité libre, appelé "jonction froide" et qui correspond à la référence. Lorsque la température de l'extrémité du couple est inconnue, l'extrémité doit être prolongée par un câble de compensation jusqu'à une zone de température connue [81].

Ainsi, un thermocouple est un transducteur de température robuste et peu coûteux dont la sortie est proportionnelle à la différence de température entre une jonction de mesure et une jonction de référence. La sortie en tension est assez faible (typiquement quelques dizaines de microvolts par °C) et il est donc nécessaire d'amplifier le signal. De plus, la variation de la température de jonction de référence peut entraîner une erreur de mesure, sauf si le signal du thermocouple est correctement compensé. Pour cela, on a réalisé une électronique associée (schéma de l'électronique en annexe A) qui compense toute modification de la température à la jonction de référence afin que la tension de sortie soit une représentation précise de la mesure de jonction à chaud. Cette électronique associée aux thermocouples comprend un amplificateur d'instrumentation à gain fixe qui va augmenter la faible tension pour fournir une sortie de 5 mV/°C sur chaque thermocouple associé à un capteur de température intégré qui effectue la compensation de la jonction froide. De plus, les deux thermocouples sont également reliés pour fonctionner en push-pull, ce qui permet de mesurer non plus la valeur absolue de la température du gaz mais la différence de température entre les deux points de mesures dans la cavité. Cette électronique sera donc utilisée pour l'étude du gyro à jet de gaz dont les résultats seront présentés dans le chapitre 3.

2.2 Technologies associées au gyro à expansion thermique

Par rapport à la technologie de gyro à jet de gaz, le gyro à expansion thermique est un dispositif intégré qui fonctionne sans système de circulation de gaz et qui est fabriqué par les techniques de la microélectronique. En effet, comme cela a été expliqué dans le chapitre 1, le gyro à expansion thermique a une structure simple. Le dispositif se compose d'une cavité micro-usinée sur laquelle sont suspendus 3 ponts (Fig. 2.17). Le pont central est séparé électriquement en deux segments permettant d'obtenir les deux résistances de chauffe qui pourront être alimentées indépendamment l'une de l'autre. Les deux autres ponts placés symétriquement de part et d'autre du central sont des détecteurs de température qui mesurent

les variations de température du gaz. Le design du gyro a été choisi en se basant sur les travaux présentés par A. Leung & al. [48].

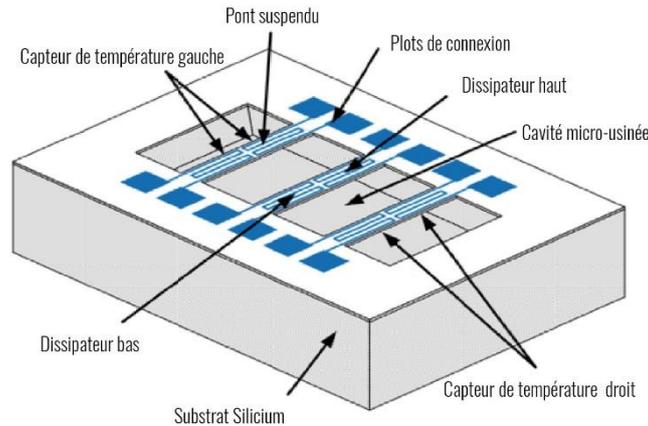


Figure 2.17 : Design du gyro à expansion thermique

2.2.1 Fabrication du gyro à expansion thermique

La réalisation complète du capteur de vitesse angulaire basé sur le phénomène d'expansion thermique passe par une succession d'étapes technologiques qui vont être détaillées dans ce qui suit. La fabrication du gyro est résumée sur la figure 2.18. La première étape consiste à déposer la couche de nitrure de silicium puis la couche de platine. Les étapes suivantes permettent de graver la couche de platine pour réaliser les résistances, puis le nitrure de silicium, avant de finalement graver le silicium permettant d'obtenir une cavité micro-usinée au-dessus de laquelle les résistances sont suspendues.

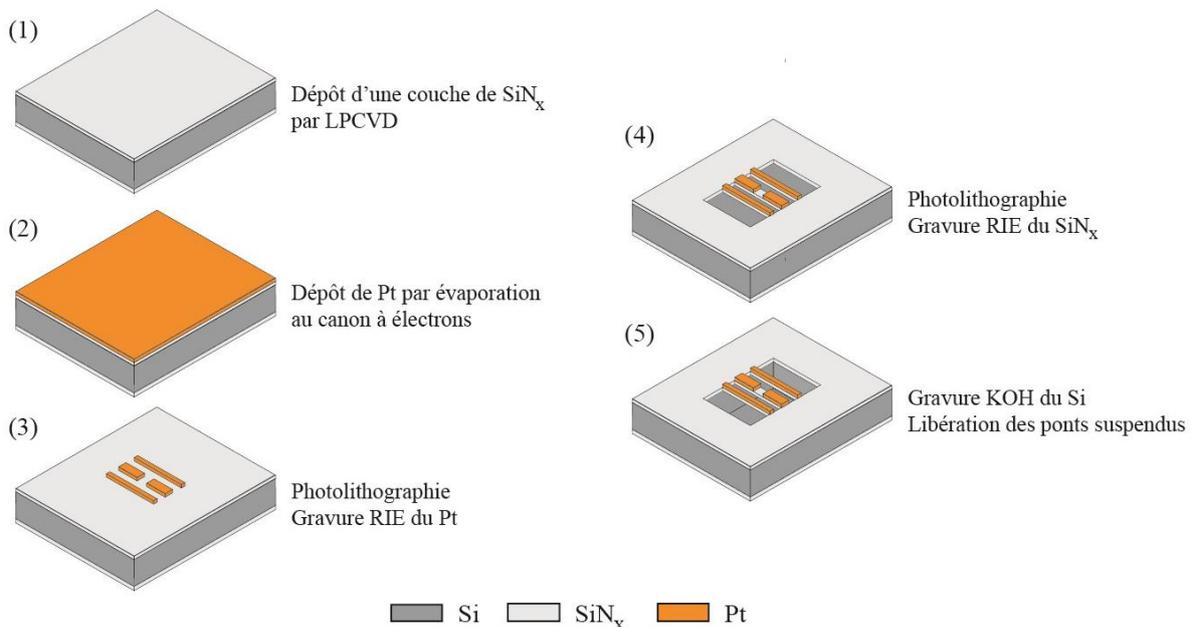


Figure 2.18 : Étapes de fabrication du gyromètre à expansion thermique

La première étape consiste à déposer une couche isolante de nitrure de silicium SiN_x , d'épaisseur de 500 nm dans un bâti LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) sur les deux faces du wafer de silicium, le dépôt est réalisé au LAAS [82]. Cette étape est nécessaire afin de pouvoir séparer électriquement le substrat de silicium, qui est un matériau semi-conducteur et le platine qui lui est un métal. De plus cette couche va servir d'isolant thermique, en effet, le fait de déposer du platine, bon conducteur thermique ($\lambda = 72 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) sur du SiN_x ayant une conductivité plus faible ($\lambda \approx 15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) va permettre d'éviter que la chaleur soit conduite par la piste métallique, et chauffe excessivement le substrat. De plus, le mélange de deux gaz actifs, ici le silane SiH_4 et l'ammoniac NH_3 , injectés dans une enceinte à basse pression et à haute température, permet de contrôler le dépôt du SiN_x en termes de niveau de contraintes mécaniques présentes dans la couche pleine plaque. Par conséquent, on obtient un faible niveau de contrainte résiduelle. Donc, lors de la libération finale des résistances suspendues, cela assure une planéité aussi bien pour les fils de chauffe que pour les détecteurs de température.

La seconde étape de fabrication consiste à déposer une couche mince de platine de l'ordre de 300 nm sur le nitrure de silicium. En effet, pour les résistances de chauffe comme pour les détecteurs, le platine est utilisé comme couche active grâce au principe de la thermo-résistance c'est-à-dire, qu'une variation de température de la couche induit une variation de sa résistivité électrique. Le dépôt de la couche de platine s'effectue dans un bâti d'évaporation par canon à électrons sous vide. Néanmoins, ce dépôt ne peut se réaliser directement sur le SiN_x car le platine n'adhère pas sur cette couche. Il faut donc intercaler une couche d'accroche de quelques dizaines de nanomètres pour assurer l'adhérence du platine sur le substrat. Cette couche est réalisée soit en oxyde de chrome (Cr_2O_3) ou soit en oxyde de zirconium (ZrO_2), ce qui va permettre d'empêcher la diffusion du métal dans la couche de platine au cours du vieillissement [83].

L'étape de fabrication suivante est la réalisation du design de nos pistes de platine qui doit être de dimensions très précises, de l'ordre de quelques micromètres, afin de ne pas nuire aux performances du capteur. Il s'agit donc d'une étape de photolithographie qui permet de transférer des motifs d'un masque comportant le design souhaité à fabriquer sur l'échantillon avec l'utilisation d'une résine sensible aux rayons UV, dite photosensible. Il existe ainsi deux types de résines :

- la résine positive pour laquelle toute zone insolée est retirée au développement
- la résine négative pour laquelle ce sont les parties non insolées au rayonnement UV qui sont retirées

Le dépôt de la résine est réalisé en deux étapes sur une tournette atteignant des vitesses de rotation élevées, afin de favoriser un dépôt uniforme. L'échantillon est ensuite recuit pour évaporer le solvant contenu dans la résine. Ensuite, l'échantillon est positionné sous un masque, comportant les motifs à reproduire en positif ou en négatif suivant le choix de la résine. Les rayons UV interagissent avec les zones de résines exposées, et enfin, l'échantillon est plongé dans un bain de développement pour retirer les parties modifiées de la résine et poursuivre la fabrication.

Le masquage étant réalisé, ceci nous a permis de créer des zones d'ouvertures dans la résine qui vont permettre de pouvoir graver le platine non protégé par la résine. Cette étape de gravure dite sèche est réalisée dans un bâti RIE (Reactive Ion Etching). L'échantillon à graver est

positionné à la cathode d'un couple d'électrodes et une polarisation radiofréquence, RF, (= 13,56 MHz) est superposée à une polarisation basse fréquence, LF, (2 MHz) et avec la présence d'un mélange de gaz à faible pression, qui va permettre la création d'un plasma fortement réactif. Par conséquent, une gravure chimique dite isotrope se produit par interaction chimique entre les gaz et le substrat, mais aussi une gravure physique dite anisotrope de la couche est dû aux impacts d'ions présents dans le plasma. À la suite de cette gravure, deux nouvelles étapes de photolithographie et de gravure RIE sont réalisées, dans le but de créer les ouvertures dans le SiN_x et d'accéder au substrat de silicium.

Tableau 2.1 : Caractéristiques de la gravure RIE suivant la nature de la couche à graver [83]

Couche à graver	Pt	SiN _x
Nature des gaz en présence	Ar	CHF ₃ / O ₂
Pression	10 mTorr	10 mTorr
Débit des gaz en présence	50 ccm	100 ccm / 35 ccm
Puissance du plasma RF	200 W	20 W
Puissance du plasma LF	400 W	800 W

La dernière étape de fabrication est la réalisation de la cavité micro-usinée effectuée par une gravure chimique, dite humide, à base de KOH (hydroxyde de potassium). Cette gravure est dite anisotropique, en effet, elle attaque préférentiellement les plans (100) et (110) du substrat, alors que les plans (111) sont gravés plus lentement, créant donc un profil en tétraèdre pour la cavité. Cette étape permet ainsi d'obtenir la libération des ponts suspendus, comme on peut le voir sur la figure 2.19.

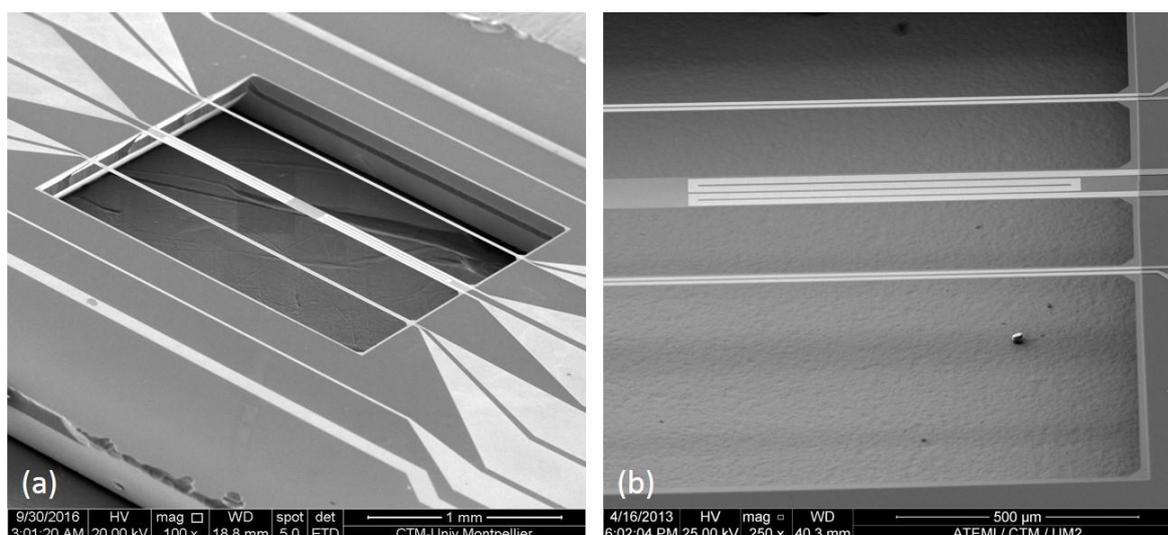


Figure 2.19 : Images MEB de la cavité micro-usinée avec les 3 ponts suspendus (a) ; zoom au niveau d'une cavité chauffée avec les deux détecteurs de températures de part et d'autre de celle-ci (b)

Et pour finir, une fois le capteur fabriqué, il est monté sur un support PCB adapté où chaque résistance est reliée à des pistes de cuivre par microsoudure (Fig. 2.20). L'ensemble (gyro + boîtier) est ensuite recouvert par un capot.

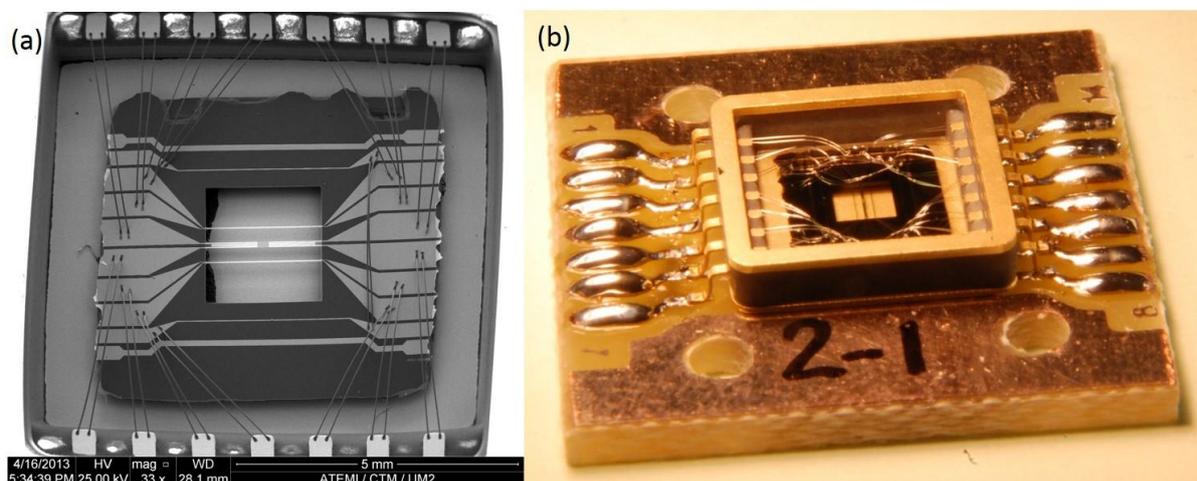


Figure 2.20 : Image MEB (a) et photo (b) d'un gyro monté sur un support PCB

2.2.2 Mesure des paramètres thermo-résistifs

Les résistances dites thermo-résistives voient leurs valeurs évoluer avec la température. Cette variation dépend du matériau utilisé, pour le platine par exemple, le coefficient de température en résistance (CTR) est égal à $0,0039 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour le matériau massif. Le comportement de la résistance avec la température est régi au premier ordre par la loi de Mathiessen :

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (2.11)$$

Avec :

- $R(T)$: la valeur de la résistance à la température T
- R_0 : la valeur de la résistance à la température de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$
- α : CTR du matériau composant la résistance

Les constantes R_0 et α des résistances en couches minces, qui sont différentes de celle du massif, sont alors déterminées de façon expérimentale. Pour cela, l'échantillon est placé dans un four réglé en température et différents échelons de température sont imposés au cours desquels la résistance est mesurée. L'extraction de ces deux constantes est obtenue par une régression linéaire entre la valeur de la résistance et la température.

Les valeurs de α sont légèrement inférieures au massif et sont de l'ordre de $0,0036 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Les valeurs de R_0 dépendent quant à elle de la géométrie des résistances et varient de quelques dizaines d'ohm à quelques centaines d'ohm.

Ainsi, lorsqu'une rotation sera effectuée, la déviation du flux par la force de Coriolis va modifier la température au niveau des détecteurs, par conséquent, cette différence de température induira une différence de résistance qui sera étalonnée.

2.2.3 Électronique associé au gyro à expansion thermique

Par rapport au gyro à jet de gaz, on a déjà vu que ce système présente la particularité d'être plus intégré. Cependant, il nécessite une électronique associée plus complexe. En effet, comme on l'a vu au chapitre 1, paragraphe 1.3.2.1, le déplacement du gaz se fait par expansion thermique, ce qui nécessite une variation brusque du courant et donc une électronique adaptée. Il faudra de plus alimenter cycliquement les deux résistances de chauffe. Les résistances de détection doivent aussi être alimentées, et dont la valeur absolue sera mesurée. Ces dernières sont positionnées dans un pont de Wheatstone, le signal de sortie sera redressé puis, il faudra le filtrer et l'amplifier. Ceci va permettre d'obtenir un signal de sortie unique proportionnel à la vitesse de rotation. Pour cela, deux cartes ont été réalisées, inspirées des travaux de Leung [48], comme illustré sur la figure 2.21. La première, qui est située en-dessous de l'autre, est une carte dite logique qui va permettre de générer des signaux créneaux pour réaliser et contrôler l'alternance de chauffe entre les résistances. Le rapport cyclique de ces signaux est contrôlé par un commutateur (switch 2) qui permet de modifier ce rapport de 25 à 50 % par pas de 6,25 %. Un autre signal de rapport cyclique de 50 % et de la même fréquence est utilisé pour le bloc de détection synchrone et contrôlé par un commutateur (switch 1). Le schéma de la carte électronique est présenté sur l'annexe B.

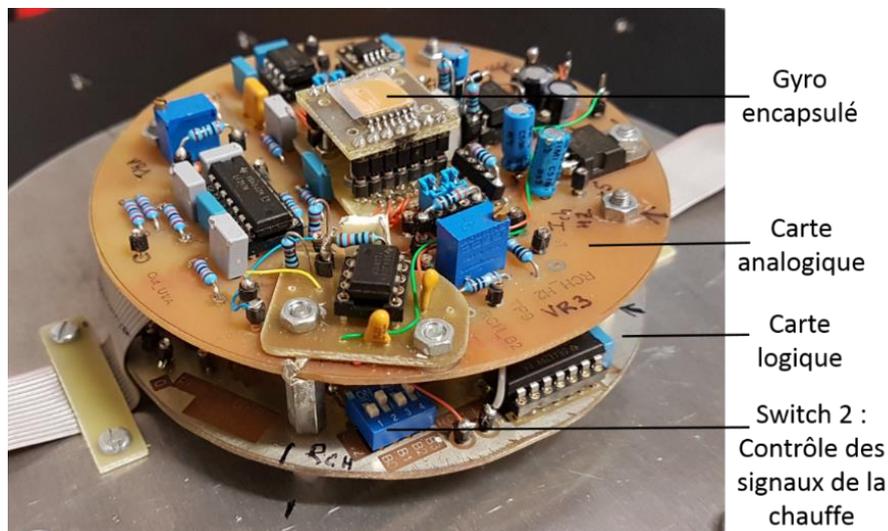


Figure 2.21 : Gyro à expansion thermique et son électronique associée

Les circuits de contrôle et de traitement du signal utilisés pour extraire la mesure sont représentés sur la figure 2.24, ils sont divisés en 4 blocs fonctionnels (correspondant à la carte analogique sur laquelle est placé le gyro) :

A. Contrôle du courant de chauffe (voir fig. 2.24 – A)

Les signaux en créneau d'une tension de 5V contrôlant l'alternance de chauffe sont envoyés de la carte numérique vers la carte analogique aux points TP15 et TP16. Le courant de chauffe est contrôlé et déterminé par les résistances R17 et R19, connaissant les valeurs des résistances de chauffe du gyro. Le potentiomètre VR3 permet d'ajuster le courant pour obtenir un courant identique dans les deux branches de la chauffe. La puissance de chauffe maximale est limitée par la tension de 5V et par les résistances de chauffe du gyro. La figure 2.22 montre une photo du montage et un zoom sur les signaux utilisés pour les résistances de chauffe.



Figure 2.22 : Photo du montage avec un zoom sur les signaux de la chauffe

B. Gyro et première amplification (voir fig. 2.23 – B)

Les deux résistances de chauffe sont reliées au bloc A par les broches 8 et 14. Les deux détecteurs de température (broches 2 et 13 ou broches 3 et 12) et les deux résistances R6 et R7 forment un pont de Wheatstone. Le potentiomètre VR2 ajuste le décalage du pont et le signal différentiel détecté est amplifié par un amplificateur d'instrumentation (U3).

C. Circuit de détection synchrone (voir fig. 2.23 – C)

Le signal amplifié est démodulé à l'aide d'un circuit d'inversion de phase (U2). Le signal est converti en un signal de sortie unique par un autre amplificateur d'instrumentation (U4).

On a pu voir dans le modèle analytique, que pour ce type de capteur, les effets de la rotation et de l'accélération sont présents simultanément à la sortie du capteur. Cependant, l'accélération est un signal qui vient interférer avec le signal gyroscopique et qui peut masquer ou déformer le signal de sortie. Afin d'annuler l'accélération qui est considérée comme un signal parasite et d'extraire uniquement le signal due à la rotation, le signal différentiel alternatif issu des capteurs est traité en utilisant la méthode de détection synchrone. La détection synchrone est une méthode commune dans le traitement du signal qui est utilisée pour traiter des signaux très faibles dans le bruit de fond. Par cette technique, un signal de référence, à la même fréquence et phase que le signal d'entrée, est multiplié par le signal reçu des capteurs. Ensuite, le signal généré sera intégré sur un temps spécifique et converti en une composante continue qui passera également par un filtre passe-bas afin de bloquer les composantes de hautes fréquences et d'atténuer le bruit de la composante alternative. La détection synchrone va se comporter comme un filtre passe-bande sélectif [84]. Ainsi, en appliquant cette technique, l'élimination de tout

biais constant incluant une accélération linéaire dans la sortie du gyroscope est possible. Néanmoins, il existe d'autres sources d'interférences dont l'origine n'est pas connue et qui vont créer un biais variable plus ou moins important au niveau du signal de sortie du gyro.

D. Amplificateur et filtre passe-bas (voir fig. 2.23 – D)

Le signal démodulé est amplifié et filtré par des filtres passe-bas pour éliminer le signal de la porteuse et pour obtenir le signal de sortie du gyro. La figure 2.23 montre le signal obtenu pour différentes vitesses de rotations du système.

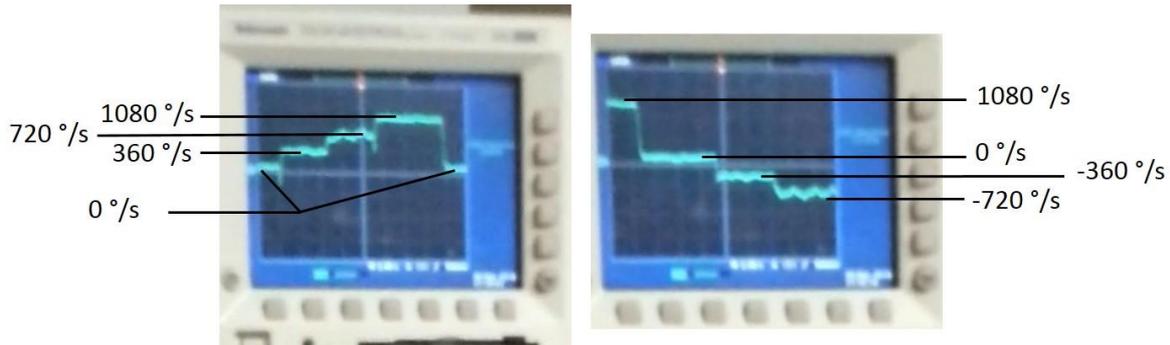


Figure 2.23 : Signal de sortie pour différentes vitesses de rotation appliquées

Le fonctionnement de l'électronique associée a été vérifié et testé avec un simulateur composé de résistances discrètes (bloc AB) permettant d'obtenir un signal créneau modulable entre 2,5 et -2,5 V. Ainsi la vérification s'est portée sur le circuit qui permet de redresser le signal et les différents gains appliqués, avant d'effectuer les premiers tests avec le gyro.

2.3 Simulateur mono-axe de précision

Les dispositifs sont montés sur un plateau tournant mono-axe de précision de la marque ACUTRONIC modèle AC1120S. Cet équipement sert exclusivement de banc de tests pour les essais et le calibrage des systèmes de navigation inertielle, des capteurs et autres composants inertiels. La machine est composée de deux unités : le simulateur et le module de puissance et de commande (Fig. 2.25).

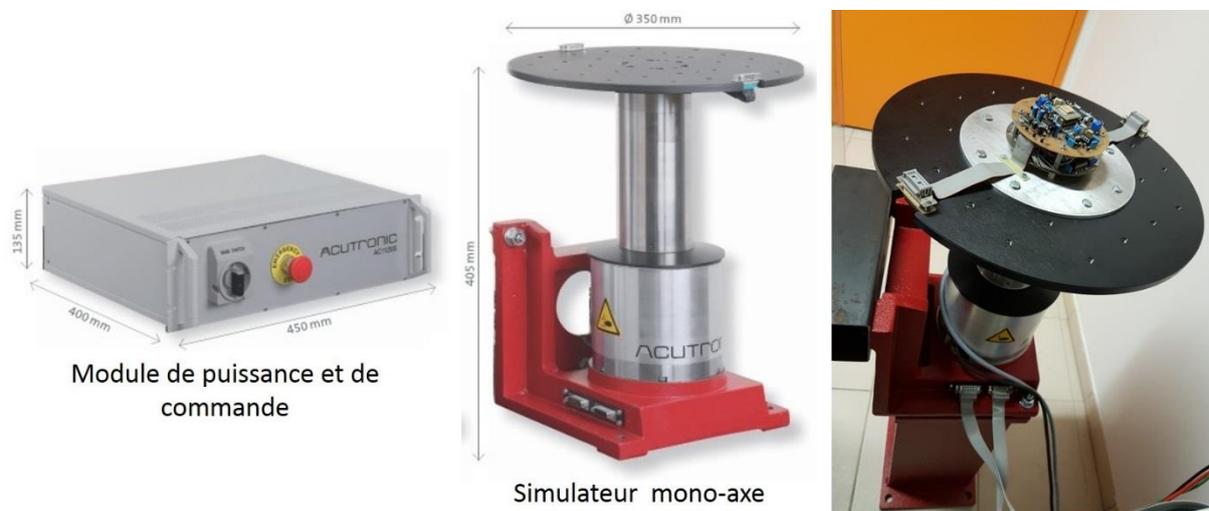


Figure 2.25 : Simulateur mono-axe de précision AC1120S

Le simulateur est monté sur un support en fonte qui permet une utilisation horizontale ou verticale. Il est équipé d'un moteur sans balais à entraînement direct offrant un couple de rotation élevé et une vitesse régulière sur une large plage de fonctionnement. En effet, cette machine permet de travailler dans une gamme de fonctionnement de ± 3000 °/s avec une résolution de 0,001 °/s et une stabilité de 0,001 % pour une charge maximale sur la table de 20 kg. Le simulateur est équipé d'une bague collectrice à 30 voies dont les câbles se terminent respectivement dans 2 D-Sub sur le dessus de la table et les connecteurs correspondants sur la base de la table, ce qui permet d'alimenter facilement nos dispositifs et de récupérer les différents signaux. Le module de puissance et de commande contient l'amplificateur de puissance avec les câbles qui relient le système, le filtre et le bloc d'alimentation. L'interrupteur principal et le bouton d'arrêt d'urgence se trouvent sur le boîtier. Ces deux unités sont reliées entre elles électriquement par le câble d'entraînement (câble moteur) et le câble feedback (câble encodeur). Le module de puissance et de commande est relié à un ordinateur via une interface RS-232, comme illustré sur la figure 2.26, ce qui permet d'utiliser l'interface utilisateur graphique du fournisseur. Cette dernière permet de sélectionner des modes (position, rotation,

accélération), de contrôler les variables du système, de personnaliser la configuration et de lancer des procédures de réglage et d'étalonnage.

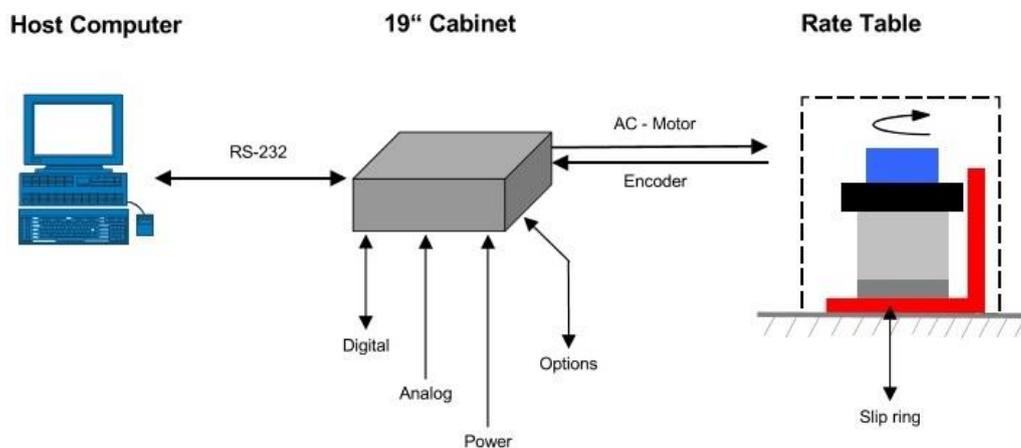


Figure 2.26 : AC1120S, Composants du système

2.4 Simulations numériques par éléments finis

Comme décrit à la partie 1.4, pour la modélisation de problèmes complexes en mécanique des fluides, l'étude analytique nécessite de nombreuses hypothèses réductrices et simplificatrices pour pouvoir résoudre les équations, ou bien alors elles ne sont tout simplement pas résolubles avec nos connaissances. Les simplifications peuvent aboutir à une solution éloignée du cas réel mais qui peut, dans ce cas, être modélisée. Pour le gyro thermique, il est assez difficile d'obtenir un modèle simplifié, donc le choix s'est porté sur une résolution de ces équations à partir d'une méthode de volumes finis. Ainsi, la réalisation et la validation d'un modèle de simulation est nécessaire dans le but d'analyser, de comparer et de prédire le comportement du gyro, et *in fine*, d'optimiser ses performances.

La modélisation géométrique du problème à résoudre est dessinée puis maillée en employant les applications du logiciel Ansys 16.1. Les deux types de gyros ont été modélisés. Dans un premier temps, le gyro à jet de gaz a été représenté avec une géométrie simplifiée (Fig. 2.27 (a)) dans un système en deux dimensions (2D), qui sera expliqué dans la partie 3.3.1. Ce modèle a permis de réduire le temps de calcul, mais, *in fine*, un modèle en trois dimensions (3D) avec une géométrie cylindrique a été développé et s'est révélé incontournable pour s'affranchir de l'effet Coanda. Cet effet peut être décrit comme un phénomène par lequel la proximité d'une surface avec un jet de fluide (liquide ou gaz) amènera le jet à s'attacher et à suivre le contour de la surface. Dans notre cas, une déviation du flux de gaz sur un bord de la cavité est effectuée alors que le système est stationnaire, ce qui est incompatible avec le principe de fonctionnement du gyro développé.

Pour le gyro à expansion thermique, un premier modèle a été réalisé en 2D avec seulement un élément de chauffe pour permettre une première approche de l'étude des vitesses et des températures obtenues avec ce principe-là (Fig. 2.27 (b)). Les résultats seront présentés dans la partie 4.2.1. Puis un modèle comparatif en 3D avec deux éléments de chauffe a été programmé et dont les détails seront expliqués dans la partie 4.2.2.

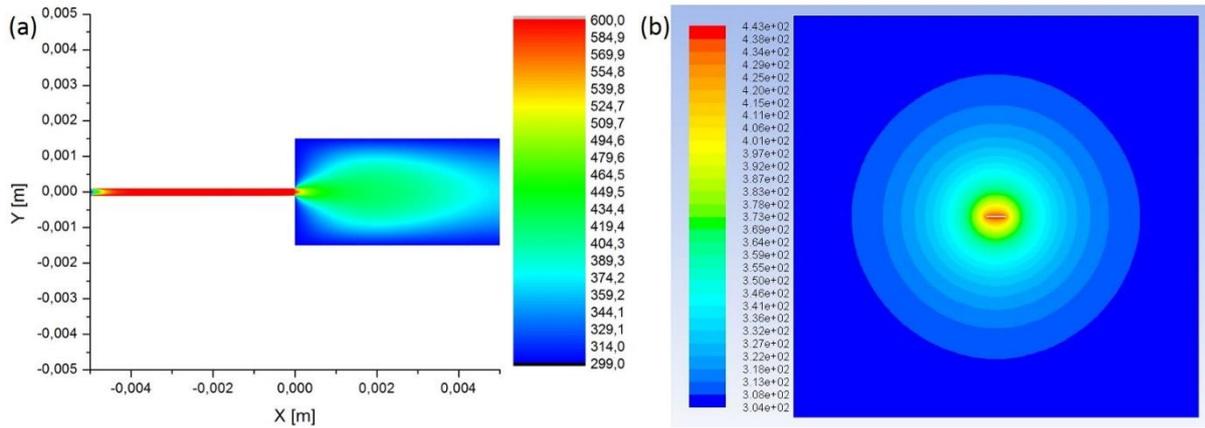


Figure 2.27 : Exemples d'écoulement 2D via une cartographie en température (K) pour ; (a) le gyro à jet de gaz ; (b) le gyro à expansion thermique avec un seul élément

La première contrainte pour ce type d'analyse est de choisir un maillage de la géométrie qui permet à la fois un calcul indépendant du maillage et un temps de calcul réduit. En effet, les caractéristiques du maillage sont essentielles pour la résolution par volumes finis, puisqu'il faut approcher la solution de manière correcte et rapide. Le code de calcul du logiciel traite plusieurs types de maillages : structurés, non-structurés et hybrides. Un maillage structuré est généralement composé de mailles quadrilatérales en 2D et hexaédriques en 3D (Fig. 2.28 (a)), tandis qu'un maillage non-structuré va être principalement composé de mailles triangulaires en 2D et tétraédriques en 3D (Fig. 2.28 (b)). Dans un maillage hybride, les mailles proches des parois sont des quadrilatères en 2D et des hexaèdres en 3D, et les mailles concernant le reste du domaine sont des triangles en 2D et des tétraèdres en 3D (Fig. 2.29).

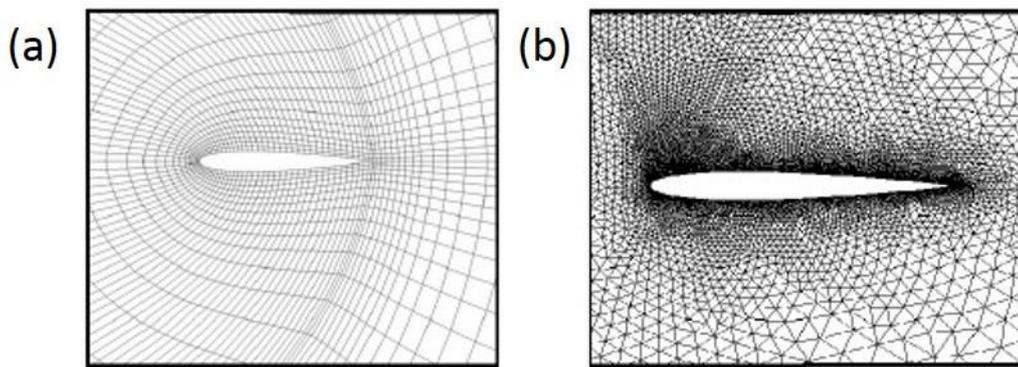


Figure 2.28 : Représentation d'un maillage structuré (a) et non structuré (b) [85]

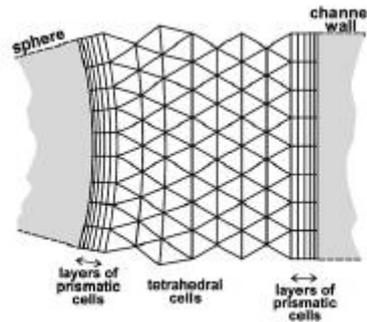


Figure 2.29 : Représentation d'un maillage hybride [85]

Les géométries réalisées (2D et 3D) sont relativement simples et le choix a été d'utiliser un maillage structuré car ce type de maillage est le plus adapté à la réalisation de calcul pour des géométries simples. En effet, il présente un nombre de maille inférieur à un maillage non-structuré, ce qui permet d'obtenir un temps de calcul plus court. De plus, si l'écoulement est aligné avec le maillage, cela va réduire les risques d'erreurs numériques. Ainsi, ce choix de maillage permet d'obtenir une bonne qualité de maillage, ce qui est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif. En effet, la qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et le temps de calcul.

Les équations de la mécanique des fluides dans le volume sont résolues par le logiciel de modélisation en mécanique des fluides, Fluent 16.1. Ce dernier permet de réaliser les calculs de simulation en parallèle en utilisant plusieurs cœurs alloués à la simulation. L'utilisation du multi-cœur va partitionner la géométrie (maillage réalisé) de façon égale selon le nombre de cœur alloué au calcul, ce qui permet ainsi de réduire aussi le temps de calcul. Ainsi, une machine virtuelle créée sur une plateforme dédiée au calcul a été utilisée pour la réalisation de nos simulations avec une utilisation maximale de 8 cœurs.

Le modèle de comportement choisi pour le fluide lors des simulations est celui du gaz idéal (paramétrage de la densité), avec une prise en compte des variations de type polynomial du point de vue de la chaleur massique isobare C_p , de la conductivité thermique λ et de la viscosité dynamique μ sur la plage de température de travail. Les conditions aux limites sont définies avant chaque calcul selon le problème à résoudre, d'un point de vue de la température au niveau des parois, de la vitesse de rotation, de la nature et pression du fluide principalement et d'autres paramètres plus spécifiques selon le type de gyro modélisé.

Ensuite, il est nécessaire de réaliser un choix parmi les méthodes de discrétisation proposées par le solveur afin de modéliser le plus fidèlement possible l'écoulement du flux de gaz au sein de la cavité des gyros. Le premier choix a été de réaliser la résolution des équations de façon séquentielle (équations de la quantité du mouvement, de la continuité et de l'énergie), plutôt que la résolution de façon couplée. Dans les deux cas, ils sont adaptés pour la réalisation de flux impliquant des forces résultant de la rotation, néanmoins la résolution couplée peut présenter des problèmes de convergence. Ensuite, il y a plusieurs choix pour la méthode d'interpolation de la pression présentée dans le tableau 2.2, ainsi que différentes méthodes de discrétisation pour la quantité du mouvement, la densité et l'énergie qui sont résumées dans le tableau 2.3 [86, 87].

Tableau 2.2 : Méthodes de discrétisation de la pression [86, 87]

Méthode	Utilisation	Pas recommandé
Standard	Schéma par défaut	Fortes variations de pression présentes dans le flux
Presto	Flux avec de fortes turbulences Flux impliquant de fortes variations de pression (flottabilité ou rotation)	
Linear	Quand les autres options présentes des difficultés de divergence ou de comportement physique	
Second Order	Flux compressibles	Modèles multiphasiques Milieu poreux
Body Force Weighted	Écoulement avec un nombre de Rayleigh élevé Convection naturelle Flux avec de fortes turbulences	

Tableau 2.3 : Méthodes de discrétisations pour la densité, la quantité de mouvement et l'énergie [86, 87]

Méthode	Description
First Order Upwind	Le plus facile à converger Précision uniquement sur le premier ordre
Second Order Upwind	Précision sur le second ordre Essentiellement pour des maillages triangulaires et tétraédriques Convergence peut être lente
Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws (MUSCL)	Précision sur le troisième ordre Adapté aux maillages non-structurés Prédiction sur les écoulements secondaires et tourbillonnaires
Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)	Précision sur le troisième ordre Adapté aux maillages structurés et hybrides Adapté aux flux turbulents ou en rotation

D'après les caractéristiques des différents choix de discrétisation de la pression, la méthode "Presto" a été utilisée. Concernant la méthode de discrétisation de la densité, de la quantité de mouvement et de l'énergie, le choix s'est porté sur la méthode "Quick".

De plus, pour le gyro à jet de gaz, une étude comparative a été réalisée entre les résultats obtenus par l'exécution d'un calcul stationnaire et celle d'un calcul transitoire dans le but d'obtenir une analyse rapide du phénomène gyroscopique. La réalisation d'un calcul transitoire est, d'une certaine façon, similaire à l'exécution d'un calcul d'état stationnaire, mais il y a des considérations supplémentaires telles que les fluctuations instables qui sont liées à des instabilités au sein du fluide tel que la convection naturelle, des ondes de chocs, etc. De plus, pour ce dernier, les conditions limites ne dépendent pas du temps, ce qui réduit le coût du calcul et donc le temps de calcul. Ces deux exécutions de calcul ont données des résultats similaires, en effet, la différence des résultats est de l'ordre de 0,1 K au maximum. Le choix a été donc de réaliser les études numériques en utilisant le calcul stationnaire. En effet, en utilisant ce dernier, le temps de simulation est réduit, ce qui permet de réaliser une analyse et un post-traitement beaucoup plus rapide, et *in fine*, pouvoir comparer facilement avec les résultats expérimentaux.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis, tout d'abord, de décrire et de présenter les moyens de caractérisation qui ont dû être mis en place pour l'évaluation des gyros avec en particulier le simulateur mono-axe de précision de la société ACUTRONIC (AC1120S).

Dans le cas du gyro à jet de gaz, un système de visualisation via un jet de fumée a permis d'observer et de mieux appréhender le comportement du gyro. Les moyens de caractérisation développés et propres à ce gyro ont été, principalement, l'étalonnage de la vitesse du flux de gaz via un micro-anémomètre, paramètre essentiel pour le fonctionnement du gyro et la mise en place d'une détection thermique assurée par des micro-thermocouples.

Ensuite, les étapes de fabrication par les techniques de la microélectronique du gyro à expansion thermique ont été présentées. De même que le moyen de caractérisation des thermorésistances qui sont pour ces dernières les principaux éléments du gyro.

Néanmoins, et bien que ce type de gyro soit relativement simple, il nécessite une électronique complexe de commande et de traitement des différents signaux, que l'on a détaillée, et expliquée le fonctionnement dans ce document.

Et enfin, en complément aux moyens expérimentaux et afin de les confronter, la simulation numérique par volumes finis a été abordée avec la présentation des logiciels associés et les choix de programmation adaptés à notre problématique. Au cours des chapitres 3 et 4, la simulation sera donc utilisée principalement pour comparer les résultats expérimentaux obtenus, mais aussi, pour prévoir le comportement du dispositif lorsque des mesures expérimentales ne peuvent pas être réalisées.

Chapitre 3

Gyromètre à jet de gaz

En début de ce chapitre, un bref rappel du principe de fonctionnement du gyro à jet de gaz est donné avant de décrire les méthodes potentielles pour la génération du flux de gaz.

Un modèle simplifié en 2D pour la réalisation de l'étude numérique a tout d'abord été abordé. À partir de ce modèle, des paramètres telles que la géométrie de la cavité, la vitesse d'écoulement du gaz ou encore la position des détecteurs qui jouent un rôle important sur les caractéristiques du capteur ont été étudiés.

Cependant, les calculs portant sur le modèle 2D, bien que présentant des temps de calcul très courts, ont montré leurs limites (effet Coanda), et on s'est alors orienté vers un modèle 3D permettant une étude fine du phénomène gyroscopique. C'est pourquoi les paramètres étudiés dans le modèle 2D ont aussi été affinés par le modèle en 3D, et en particulier, la position optimale des zones de détections, ainsi que les dimensions et les formes de la cavité.

Un banc de test des dispositifs a été mis en place, ce qui a permis dans un premier temps de faire une étude phénoménologique et comportementale du gyro à l'aide d'un jet de fumée. L'étalonnage de la vitesse a pu être effectué à l'aide d'un micro-anémomètre, ce qui a permis de réaliser une étude du phénomène gyroscopique en fonction de la vitesse d'écoulement du gaz au sein de la cavité. Et enfin, les résultats obtenus expérimentalement et numériquement (modèle 3D) ont été comparés afin de démontrer la validité du modèle qui sera d'une aide précieuse pour les futures études.

Sommaire

3.1	Rappel sur le principe de fonctionnement.....	70
3.2	Présentation des différents modes de génération du jet de gaz.....	70
3.2.1	Micro-pompe.....	70
3.2.2	Réserve de gaz sous pression.....	71
3.2.3	Vent ionique – décharge Corona.....	72
3.2.4	La transpiration thermique.....	74
3.3	Simulation numérique par éléments finis du gyro à jet de gaz.....	76
3.3.1	Modélisation 2D.....	76
3.3.1.1	Étude de l'écoulement.....	77
3.3.1.2	Étude de la réponse du dispositif et influence de la vitesse du gaz.....	79
3.3.1.3	Impact de la géométrie sur l'écoulement et la sensibilité.....	82
3.3.1.3	Conclusion.....	84
3.3.2	Modélisation 3D.....	85
3.3.2.1	Influence de la forme des détecteurs.....	85
3.3.2.2	Optimisation de la position des détecteurs.....	88
3.3.2.3	Influence de la vitesse du gaz.....	90
3.3.3	Étude de la dimension de la cavité.....	91
3.3.4	Conclusion.....	93
3.4	Résultats expérimentaux.....	93
3.4.1	Influence de la vitesse du jet de gaz et comparaison expérience – simulation ...	94
3.4.2	Conclusion.....	97
3.5	Conclusion sur le gyro à jet de gaz.....	97

3.1 Rappel sur le principe de fonctionnement

Le gyro à jet de gaz, utilisé dans cette étude, a pour principe de mesurer la déviation par la force de Coriolis d'un flux de gaz chaud au sein d'une cavité. Dans le cas expérimental, le jet de gaz est généré par une micro-pompe qui crée une différence de pression entre l'amont et l'aval du capillaire emmenant le gaz dans la cavité. Sur ce même capillaire, est enroulé un fil résistif qui permet de chauffer le gaz avant que celui-ci pénètre dans la cavité. Pour les détecteurs, deux micro-thermocouples sont positionnés dans la cavité, symétriquement de part et d'autre du jet de gaz qui est dans l'axe de la cavité. Lorsque le système est stationnaire et laminaire, le déplacement du flux de gaz chaud reste centré par rapport à cet axe, ce qui n'engendre pas de différence de température entre les deux thermocouples (Fig. 3.1 (a)). Lorsqu'une rotation est appliquée, le flux de gaz chaud est dévié par la force de Coriolis et il va réchauffer un thermocouple tandis que le second va se refroidir (Fig. 3.1 (b)). Cette différence de température entre les deux thermocouples sera l'image de la vitesse de rotation, ce qui va permettre d'obtenir la sensibilité du gyro.

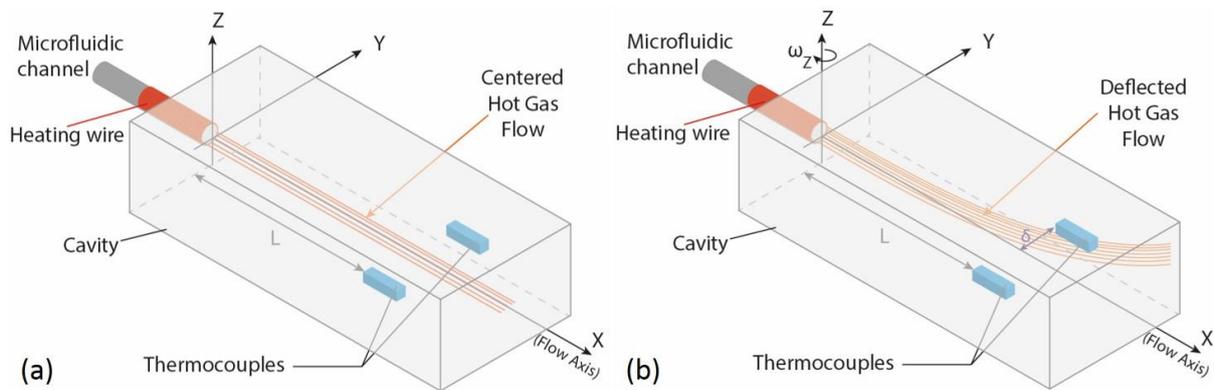


Figure 3.1 : Principe de fonctionnement utilisé pour le gyro à jet de gaz

3.2 Présentation des différents modes de génération du jet de gaz

3.2.1 Micro-pompe

Pour le gyro à jet de gaz, un point essentiel est la méthode utilisée pour la génération du flux de gaz. En effet, la vitesse d'écoulement et sa stabilité sont des paramètres importants pour les caractéristiques du gyro. Il existe différentes méthodes dont la plus courante est d'utiliser une pompe piézoélectrique intégrée, ou bien alors une ou plusieurs pompes externes pour le gyro à tourbillon par exemple, comme présenté dans le paragraphe 1.3.1.2 [66, 67]. Néanmoins, bien que ces systèmes, présentent des parties mobiles ou d'encombrements importants, ils ne pourront pas être utilisés dans les conditions extrêmes souhaitées, c'est-à-dire, avec une tenue aux chocs de quelques 10 000 g et de fortes vibrations.

Néanmoins, le choix s'est tout de même porté dans un premier temps sur l'utilisation d'une micro-pompe pour générer le flux de gaz pour le prototype fabriqué. En effet, c'était le moyen le plus simple et le plus rapide pour démontrer la faisabilité du capteur et pour appréhender les phénomènes physiques mis en jeu. De plus cette configuration nous a permis d'étudier de

manière plus flexible les paramètres impactant les performances du gyro. Ce choix a semblé judicieux car il a permis d'obtenir un flux laminaire constant et contrôlé, ce qui est essentiel au fonctionnement de ce type de capteur. La micro-pompe non intégrée utilisée, est une des plus petites du marché (Fig. 3.2). Elle a un débit maximale de 0,3 l/min [88].

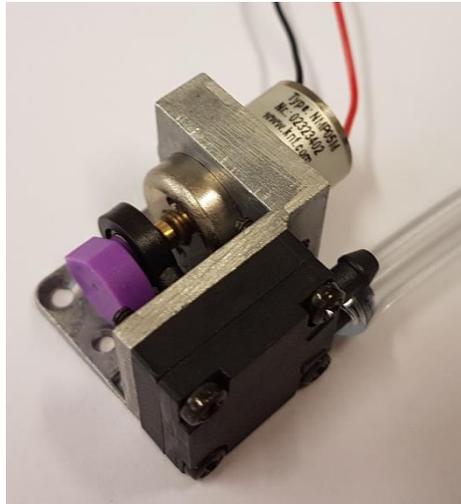


Figure 3.2 : Micro-pompe

Par la suite, en remplacement de ce système, d'autres voies sont possibles pour répondre aux critères d'utilisations souhaitées. Ces méthodes de génération de gaz possibles sont l'utilisation d'une réserve de gaz sous pression [89, 90], la décharge Corona [91, 92] ou encore la transpiration thermique [93].

3.2.2 Réserve de gaz sous pression

Il existe sur le marché de petites bonbonnes de gaz (N_2 , Ar, O_2 , CO_2) qui ont une longueur allant de 25 mm à 165 mm selon la capacité désirée, c'est-à-dire, pour une réserve variant de 1 ml à 1250 ml (Fig. 3.3). Ces réserves de gaz peuvent être utilisées avec des vannes de régulation ou encore avec des régulateurs de pressions variables ou fixes (Fig. 3.4) [89, 90]. Le système de réservoir peut résister à des chocs très élevés mais il serait à usage unique et limité dans le temps. En fonction de l'application, cela pourrait suffire. Néanmoins, l'encombrement reste important.



Figure 3.3 : Mini bonbonnes de gaz [89]



Figure 3.4 : Vannes de régulation [89]

3.2.3 Vent ionique – décharge Corona

Les décharges Corona sont des décharges électriques à faible puissance qui ont lieu à la pression atmosphérique ou proches de celle-ci. Elles sont générées par de forts champs électriques entre deux électrodes et apparaissent comme de faibles décharges filamenteuses (plasma) qui “rayonnent” de l’électrode de décharge (électrode Corona) vers l’électrode collectrice.

Les décharges Corona existent sous plusieurs formes, en fonction de la polarité du champ et des configurations géométriques des électrodes. Pour une décharge Corona positive dans la configuration aiguille-plaque (Fig. 3.5), les décharges commencent par une salve d’impulsions Corona, puis passent des “streamers” Corona, à une couronne de lueur positive, et enfin, à la décharge de l’étincelle à mesure que la tension appliquée augmente. Pour une décharge Corona négative avec la même géométrie, la forme initiale sera une impulsion Trichel. Cette dernière apparaît dès que le gradient de tension critique est atteint, c’est-à-dire, que le champ électrique dans la zone active est diminué par la charge d’espace régulière, ce qui provoque une chute momentanée du courant de décharge. C’est pourquoi ce mode prend la forme d’impulsions régulières dont la fréquence augmente avec la tension appliquée. Après une certaine fréquence, les impulsions disparaissent et sont remplacées par une décharge continue appelée couronne de lueur négative. Puis, en augmentant encore la tension, des décharges d’étincelles apparaissent et celles-ci surviennent juste avant le claquage (Fig. 3.5). La décharge Corona négative se propage généralement avec une ionisation par impact des molécules de gaz alors que la décharge Corona positive dépend davantage de la photoionisation pour sa propagation [91].

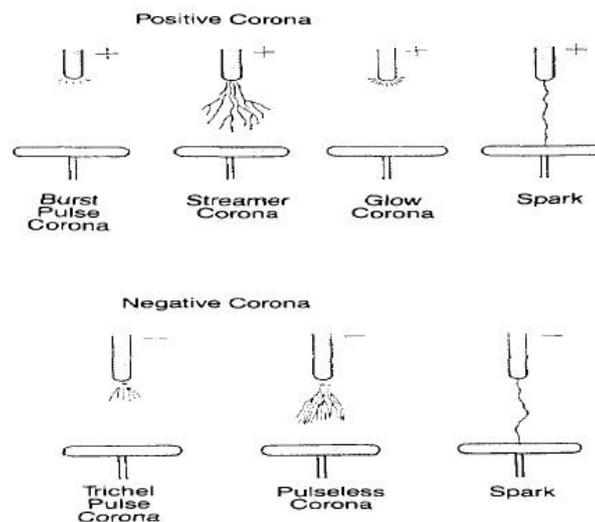


Figure 3.5 : Représentation schématique du type de décharge Corona [91]

La décharge Corona est relativement facile à établir. Elle présente une large gamme d'applications dans une variété de processus dont l'un est appelé vent ionique ou vent électrique. On peut engendrer un flux d'air par décharge Corona avec une tension positive ou négative. Il a été rapporté que la vitesse de flux la plus élevée peut être obtenue en utilisant une polarité positive [94]. En général, le choix de la polarité dépend d'un grand nombre de facteurs, notamment le matériau des électrodes, la géométrie du dispositif, les contraintes de génération d'ozone et d'autres [92, 95].

Le mécanisme de la propulsion du vent ionique induite par la décharge Corona est illustré sur la figure 3.6. La différence de potentiel électrique appliquée entre l'électrode Corona et l'électrode collectrice est suffisamment élevée pour générer la décharge Corona dans une zone proche de l'électrode Corona. Les particules d'airs ionisés sont ensuite accélérées par la force de Coulomb entre les deux électrodes, comme le montre la figure 3.6. Les ions accélérés entrent en collision avec des molécules neutres, et si la collision se produit à une énergie cinétique suffisamment élevée, cela va arracher les électrons de la molécule neutre pour former des molécules d'airs ionisées. Ces derniers sont ensuite mis en mouvement par le champ vers l'électrode collectrice, et peuvent rentrer en collision avec d'autres molécules d'airs neutres, ce qui va former ce qu'on appelle le vent ionique. Les vents ioniques peuvent générer des écoulements sans pièces mobiles et avoir une faible consommation d'énergie [96]. Les vitesses d'écoulement d'air induites par la décharge Corona peuvent atteindre des vitesses de l'ordre de 10 m/s [95].

Néanmoins, il existe quelques inconvénients à ce principe, comme par exemple, l'utilisation de haute tension (quelques 100 V), l'usure des électrodes et la génération d'ions qu'il faut neutraliser sans perturber le signal électrique des détecteurs.

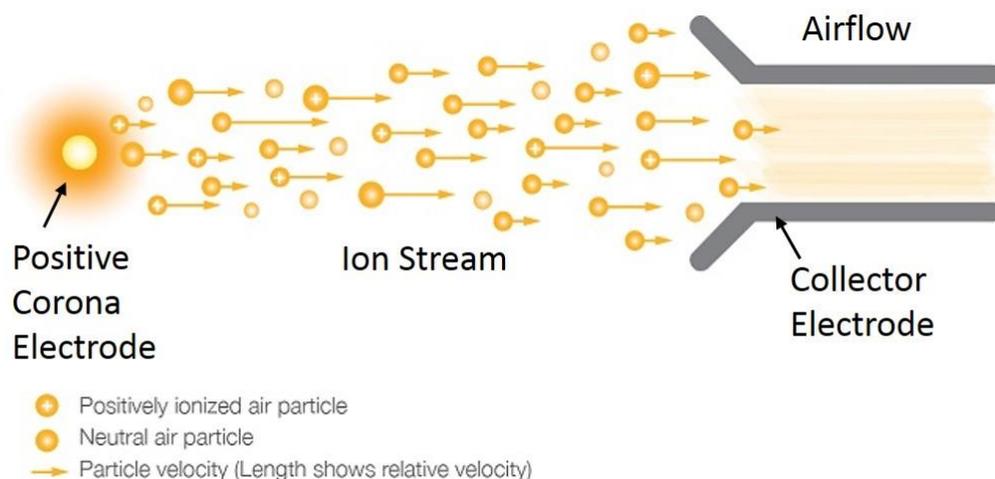


Figure 3.6 : Schéma du flux d'ions et du flux d'air généré par une pompe électrohydrodynamique à vent ionique en courant continu (CC) où une haute tension est appliquée entre les électrodes Corona et collectrice [97]

3.2.4 La transpiration thermique

La transpiration thermique se réfère au phénomène de molécules de gaz se déplaçant de l'extrémité froide à l'extrémité chaude d'un micro canal soumis à un gradient de température longitudinal (Fig. 3.7). Ce phénomène a été découvert par Reynolds en 1879 [98] et reconsidéré avec une analyse mathématique rigoureuse par Maxwell, au cours de la même période [99]. En 1910, Knudsen a proposé la faisabilité d'une pompe à gaz basée sur ce phénomène [100].

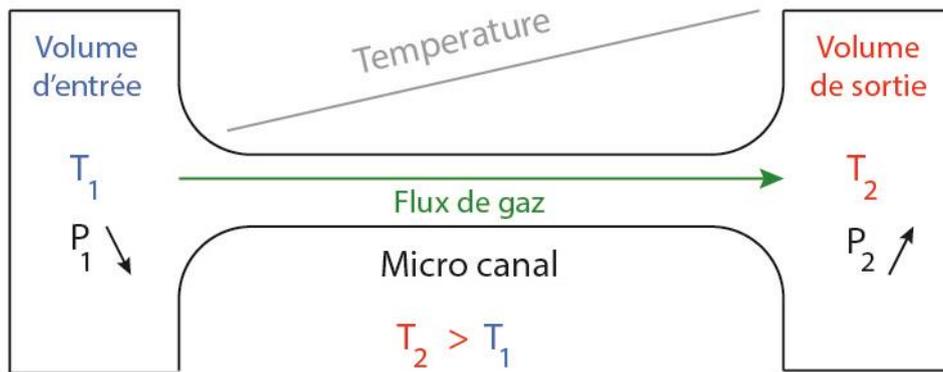


Figure 3.7 : Principe de la transpiration thermique ou diffusion Knudsen à travers un micro canal

Le régime d'écoulement d'un gaz dans un tube de diamètre d dépend de la grandeur relative de d et du libre parcours moyen du gaz λ . Il est défini à partir du paramètre caractéristique sans dimension correspondant au nombre de Knudsen ($Kn = \lambda/d$). Le flux de gaz à travers un tube peut être classé dans différents régimes d'écoulement du gaz appelés libre parcours moléculaire, transitoire, glissant et visqueux, correspondant à $Kn > 10$; $10 > Kn > 0,1$; $0,1 > Kn > 0,01$ et $Kn < 0,01$; respectivement.

Dans des conditions stables, la relation entre la pression (P) et la température (T) dans les deux enceintes (1 et 2), tant que les diamètres des tubes de liaisons restent bien inférieurs à la longueur du libre parcours moyen des molécules de gaz, peut être décrite par :

$$R = \frac{P_2}{P_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad (3.1)$$

Si le diamètre devient beaucoup plus grand, la relation de pression sous des conditions d'états stables est décrite par $P_2/P_1 = 1$.

Lorsque la vitesse des molécules est conforme à la loi de distribution des vitesses de Maxwell avec un diamètre (d) et un nombre de molécules par unité de volume (n_v) alors le libre parcours moyen est donné :

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n_v d^2} \quad (3.2)$$

Or dans des conditions de gaz parfaits, on a $P = n_v k_B T$

Où k_B est la constante de Boltzmann et T est la température thermodynamique, on obtient donc :

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi P d^2} \quad (3.3)$$

Dans les conditions d'un régime $Kn \ll 1$, tant que la différence de température avec $T_2 > T_1$ reste constante sur les deux côtés du micro canal séparant les deux côtés fermés alors le système atteint un état stationnaire avec une différence de pression ($\Delta P_{stat} = P_2 - P_1$) entre les volumes. Par conséquent, dans des conditions isobariques, le flux de gaz est dirigé vers le compartiment avec une température plus élevée (Fig. 3.7). La valeur de la différence de pression dépend des différences de température uniquement lorsque la condition $Kn \ll 1$ est respectée, mais diminue avec l'augmentation du diamètre du canal et disparaît lorsque les diamètres sont trop importants ($Kn \gg 1$), car les transports sont de plus en plus dominés par des chocs moléculaires.

Lorsque le système décrit ci-dessus n'est pas fermé, de sorte que le gaz puisse circuler à travers un canal supplémentaire de l'enceinte chauffée vers celle dite froide (Fig. 3.8), la différence de pression reste inférieure à ΔP_{stat} et ainsi le système n'atteindra pas d'état stationnaire. Un débit de gaz convectif se mettra en place et sera maintenu tant qu'une différence de température restera établie entre les deux volumes. Donc une diffusion Knudsen se produira à travers le micro canal vers l'enceinte chaude et le gaz retournera par convection à travers le second canal vers l'enceinte froide [93, 101]. Au sein d'un canal de 25 μm de long et de 2 μm de diamètre avec une différence de température de 50 K entre les deux extrémités du canal, la vitesse obtenue, en utilisant de l'hydrogène, à la sortie du canal est environ de 20 m/s [102]. Cardenas et al. [103], en 2011, ont réalisé une étude en utilisant un canal de 490 μm de diamètre avec une longueur de 3,05 cm avec du diazote comme gaz de travail et à la sortie du canal, ils ont mesuré une vitesse de l'ordre du mm/s.

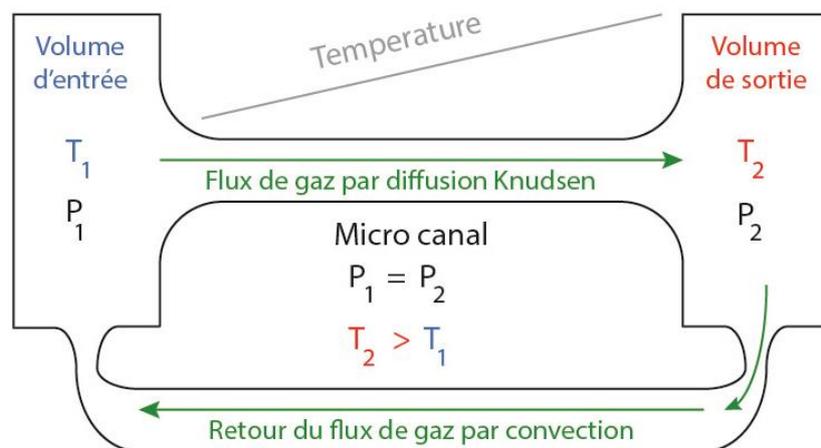


Figure 3.8 : Principe de la transpiration thermique ou diffusion Knudsen à travers un micro canal avec une condition de diffusion Knudsen et d'un retour du flux de gaz par convection

Si ce principe est utilisé, la problématique viendra du maintien des cavités à température constante et de la consommation pour maintenir une des deux enceintes à haute température.

3.3 Simulation numérique par éléments finis du gyro à jet de gaz

Le gyro a pour principe de détecter une différence de température entre deux détecteurs due à la déviation d'un flux de gaz par l'effet Coriolis. Dans le cas de la simulation numérique, on a choisi d'utiliser une différence de pression entre l'amont et l'aval du tube capillaire afin de créer un écoulement de gaz (air) au sein de la cavité. Pour cela, nous avons dans un premier temps limité notre étude à un système en deux dimensions dans le but de simplifier le problème et de minimiser ainsi les temps de calculs.

3.3.1 Modélisation 2D

Le choix a donc été de réaliser, dans un premier temps, des simulations pour un système en 2D, ce qui a permis de réduire le temps de calcul avec une géométrie simplifiée. La cavité du gyro est représentée par un rectangle avec une entrée et une sortie de gaz sur deux côtés opposés (Fig. 3.9).

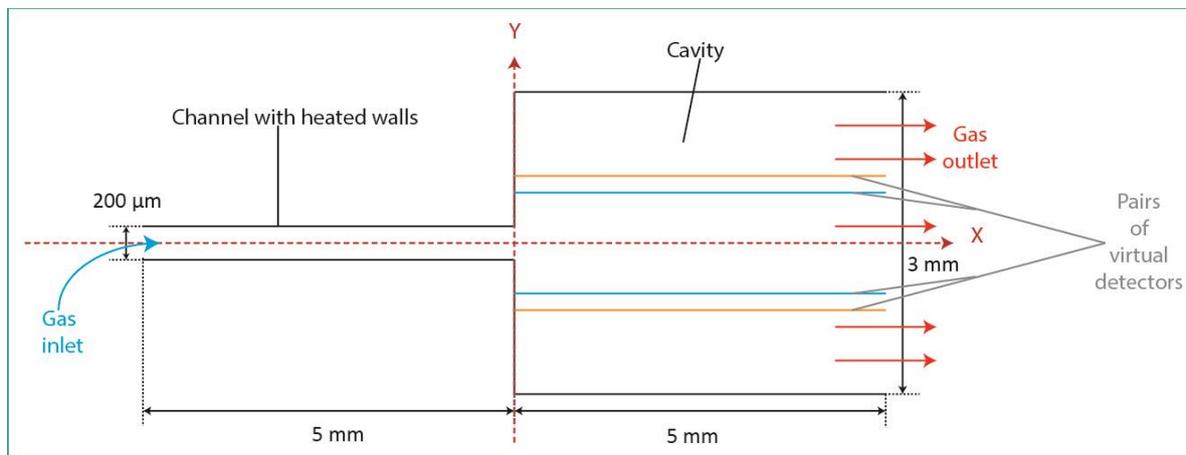


Figure 3.9 : Représentation schématique de la géométrie modélisée en 2D

Le flux de gaz est généré par une différence de pression via une conduite placée perpendiculairement à l'entrée de la cavité. Les parois de cette conduite ont été chauffées à $T = 600$ K, pour obtenir un jet de gaz chaud dans la cavité à une température moyenne de 550 K (Fig. 3.10). Différentes tailles et formes de géométries de la cavité ont été étudiées et seront présentées par la suite.

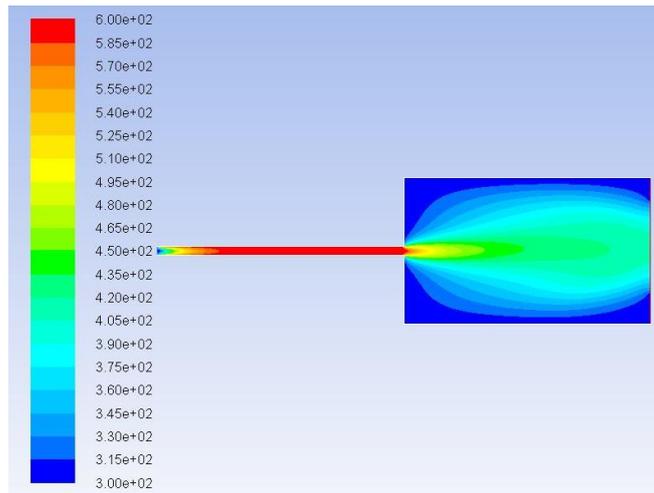


Figure 3.10 : Cartographie en température d'un exemple d'écoulement d'un jet de gaz chaud

Les mesures de températures ont été prises dans des zones virtuelles d'échanges maximales lors de la mise en rotation du système. Ces zones correspondent plus particulièrement à des paires de lignes virtuelles sur la longueur de la cavité situées à égales distances de l'axe de symétrie (Fig. 3.9). La mesure correspond à la moyenne des températures sur chaque ligne. Ensuite, la différence de température est calculée entre les paires de lignes situées à la même distance de l'axe de symétrie. Cette différence de température sera l'image de la vitesse de rotation, permettant d'obtenir la sensibilité du capteur.

3.3.1.1 Étude de l'écoulement

Pour les différentes géométries, une étude en fonction de la vitesse moyenne générée au sein du canal a été réalisée afin de déterminer le domaine de vitesse dans lequel le système est dit "linéaire". Dans ce cas, le jet de gaz est injecté de manière symétrique par rapport à l'axe de la cavité et il n'y a pas de bifurcation de son flux dû à l'effet Coanda [104]. L'effet Coanda peut être décrit comme un phénomène par lequel la proximité d'une surface avec un jet de fluide (liquide ou gaz) amènera le jet à s'attacher et à suivre le contour de la surface. Cet effet est lié à la vitesse d'écoulement du jet, l'intensité de son débit et au profil géométrique de la sortie [105, 106]. Ainsi, l'effet Coanda apparaît lorsque le système est stationnaire et vient donc dévier le flux de gaz sur un des bords de la cavité créant un biais. Par conséquent, cet effet est un inconvénient pour le bon fonctionnement de notre capteur. Des études montrent d'un point de vue expérimental [107] et numérique [108] que le flux avec une géométrie abrupte reste stable pour de basses valeurs du nombre de Reynolds ($Re \leq 40$) mais devient asymétrique pour des valeurs élevées ($Re > 40$). Il a aussi été démontré dans ces études que plus la valeur du ratio d'expansion, ER, (rapport entre la largeur de la cavité et celle du canal, comme illustré sur la figure 3.11) est élevée alors plus la valeur du nombre de Reynolds critique est petite. Le nombre de Reynolds critique est la frontière entre un écoulement stable et un écoulement asymétrique dû à l'effet Coanda, c'est-à-dire, que le nombre de Reynolds critique est la limite du domaine d'apparition de l'effet Coanda et donc avant cette limite le flux reste symétrique par rapport aux détecteurs de température.

Le nombre de Reynolds se définit par :

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3.4)$$

Où ρ , v , L et μ représentent la densité du gaz, la vitesse d'écoulement, la dimension caractéristique et la viscosité dynamique du gaz, respectivement.

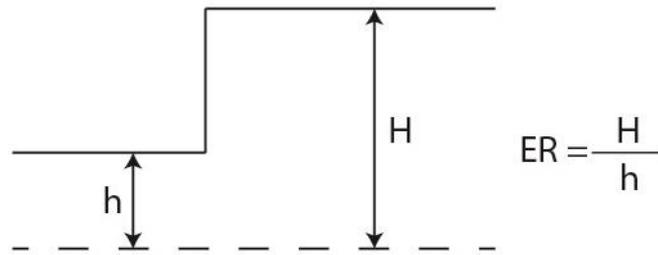


Figure 3.11 : Illustration du ratio d'expansion (ER)

Une étude de la valeur du nombre de Reynolds critique a été réalisée pour les différentes tailles de géométries utilisées. En effet, le système étudié doit avoir une valeur inférieure au nombre de Reynolds critique afin d'obtenir une différence de température nulle pour un système non soumis à une rotation. Dans le cas qui nous intéresse, il faut bien évidemment éviter l'apparition de la bifurcation du gaz pour un système sans rotation. En effet, la déviation du flux de gaz ne doit être liée qu'à la force de Coriolis lors de la mise en rotation du système.

La figure 3.12 est un exemple de simulation d'un jet de gaz à travers une conduite et débouchant dans une cavité. Cette figure représente la cartographie en température du gaz pour différentes valeurs du nombre de Reynolds et montre l'absence (Fig. 3.12 (a) $Re = 9,4$) ou la présence de l'effet Coanda (Fig. 3.12 (b) $Re = 24$). On peut remarquer, dans le dernier cas, que le profil d'écoulement n'est pas symétrique par rapport à l'axe de la cavité lorsqu'aucune rotation n'est appliquée.

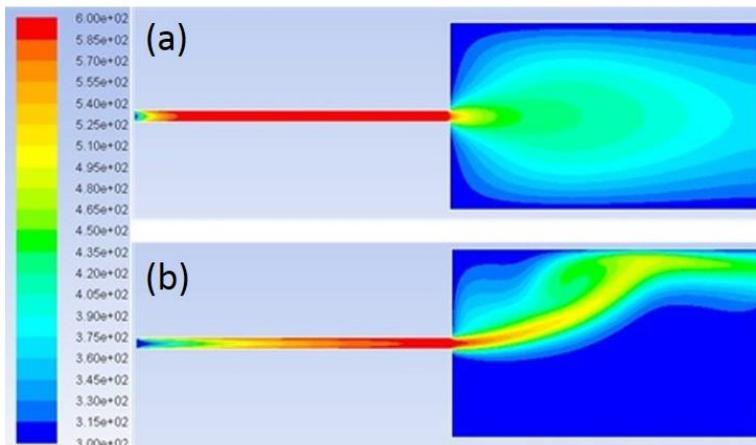


Figure 3.12 : Cartographie en température d'un jet de gaz à travers une conduite et débouchant dans une cavité sans rotation ; (a) $Re = 9,4$; (b) $Re = 24$

L'étude a été effectuée sur quatre ratios d'expansion différents : 7,5 ; 15 ; 30 et 50 (Fig. 3.13). Ces différents ratios sont dus à une augmentation ou à une diminution de la taille de la cavité ou de la taille du canal. La réalisation de ces simulations a été faite à différentes vitesses moyennes pour un système non soumis à une rotation. Afin de déterminer cette plage de Reynolds critique en fonction du ratio d'expansion, la mesure prise correspond à la différence de température pour des détecteurs virtuels situés à 200 μm de l'axe de symétrie. Pour cela, plusieurs différences de pression ont été appliquées et donc différentes vitesses d'écoulement ont été engendrées donnant plusieurs nombres de Reynolds.

La figure 3.13 illustre la différence de température entre les détecteurs en fonction du nombre de Reynolds pour les 4 ratios d'expansion. On peut noter que la valeur du nombre de Reynolds critique est plus petite lorsque le ratio augmente, ce qui est conforme à la littérature. En effet, par exemple, la valeur du nombre de Reynolds critique pour les géométries de ratios d'expansion 7,5 et 50 est, respectivement, 15 et 7,4 correspondant à des vitesses d'écoulement de 2,3 m/s et 1,1 m/s.

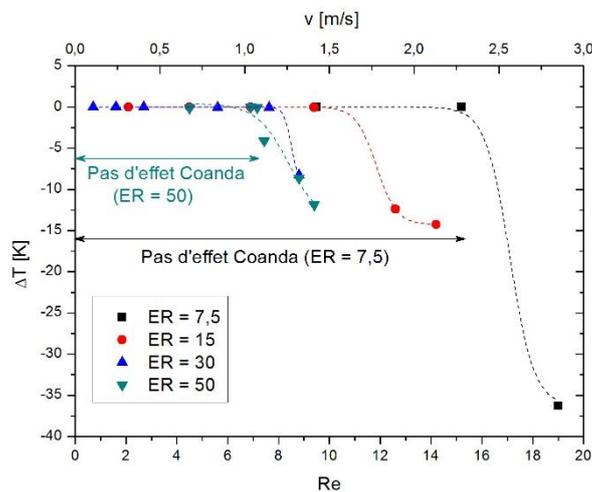


Figure 3.13 : Différence de température entre les détecteurs virtuels en fonction du nombre de Reynolds

Il faudra donc tenir compte de ce résultat pour aborder ensuite les études gyroscopiques elles-mêmes et bien évidemment lors de la réalisation des dispositifs.

3.3.1.2 Étude de la réponse du dispositif et influence de la vitesse du gaz

Pour cette étude, on a choisi d'utiliser la géométrie présentant un ER de 15, car ce rapport se rapproche le plus des dimensions souhaitées pour la réalisation d'un premier prototype. Les essais ont été effectués avec une mise en rotation du système jusqu'à 5400 $^{\circ}/\text{s}$ et la vitesse d'écoulement du gaz est d'environ 1,02 m/s ($\text{Re} = 6,9$). La figure 3.14 montre un comportement linéaire défini à 1% de la différence de température avec la vitesse de rotation jusqu'environ 600-700 $^{\circ}/\text{s}$ pour différentes positions des détecteurs virtuels (200 μm à 1000 μm). Par contre, au-delà de ces vitesses de rotations ($\Omega > 700$ $^{\circ}/\text{s}$) le comportement n'est plus linéaire.

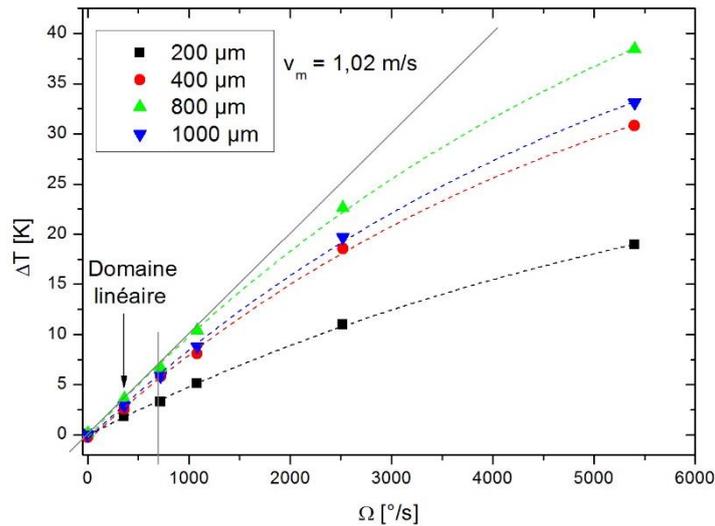


Figure 3.14 : Différence de température mesurée en fonction de la vitesse de rotation appliquée

À partir de cette étude, la sensibilité a été déterminée sur ce domaine en fonction de la position des détecteurs dans la cavité. On peut alors noter que la position a une influence importante sur la sensibilité du capteur. En effet, il existe une position optimale des détecteurs au sein de la cavité, qui se situe aux alentours de 700-800 μm de l'axe de symétrie (Fig. 3.15).

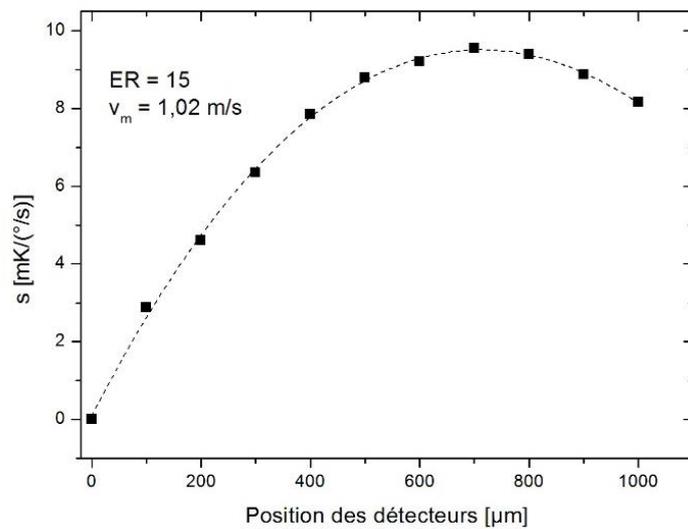


Figure 3.15 : Évolution de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs

Sur la figure 3.16, correspondant à une cartographie différentielle de température entre un système en rotation ($\Omega = 1080 \text{ }^\circ/\text{s}$) et le même système au repos, on a représenté l'axe du flux avec un trait plein gris puis on a placé 4 détecteurs virtuels dont 3 sont représentés en pointillés et 1 par un trait plein noir correspondant à 200, 400, 1000 et 800 μm , respectivement. On remarque que les détecteurs situés à 800 μm sont les mieux placés au niveau des zones d'échanges thermiques.

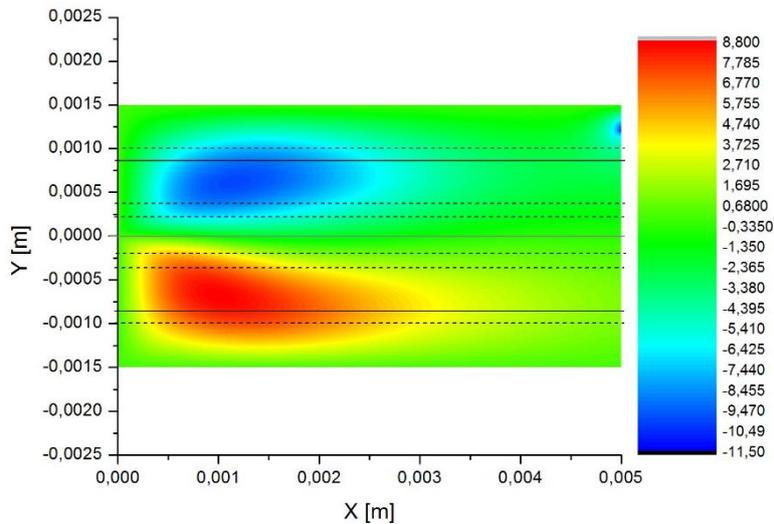


Figure 3.16 : Cartographie en température de la différence entre $\Omega = 1080$ °/s et $\Omega = 0$

Ensuite, une étude de l'influence de la vitesse du gaz sur la sensibilité a été réalisée. Les vitesses utilisées correspondent à celles ne présentant pas d'effet Coanda. La figure 3.17 illustre la sensibilité en fonction de la vitesse de gaz pour des détecteurs situés à 800 μm de l'axe de symétrie du flux. Sur cette dernière, on voit qu'il existe un comportement linéaire entre la sensibilité et la vitesse du flux de gaz.

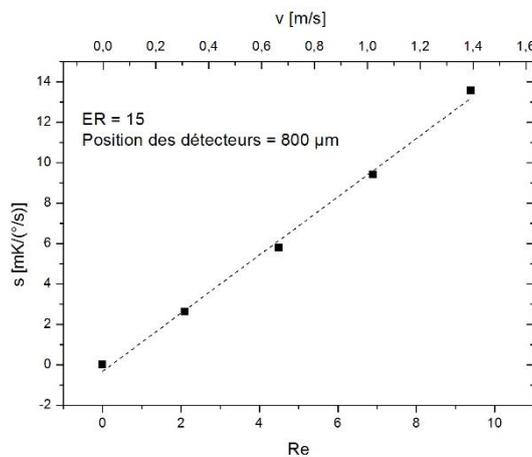


Figure 3.17 : Sensibilité en fonction du nombre de Reynolds (vitesse du gaz) pour des détecteurs situés à 800 μm

Pour cette étude, on a pu voir que la réponse du système présente un comportement linéaire avec la vitesse de rotation jusqu'à une gamme de mesure d'environ 600-700 °/s, ce qui nous a permis d'en déduire la sensibilité du capteur. Ensuite, on a montré que la position des détecteurs avait une importance non négligeable sur la réponse du capteur. On a aussi pu identifier une position optimale située à 700-800 μm de l'axe de symétrie permettant d'obtenir la sensibilité la plus importante. Et enfin, la figure 3.17 a mis en évidence la vitesse d'écoulement du gaz comme paramètre d'importance influençant la sensibilité du capteur. En effet, on a pu déterminer que plus la vitesse du gaz est importante plus la sensibilité est élevée. Néanmoins, la vitesse ne peut pas être davantage augmentée à cause de l'effet Coanda.

3.3.1.3 Impact de la géométrie sur l'écoulement et la sensibilité

La modification de la forme de la géométrie a pour but de travailler à une vitesse moyenne plus importante et, par conséquent avec un nombre de Reynolds critique plus élevée, ce qui permettrait d'obtenir une force de Coriolis plus grande appliquée au jet de gaz. Pour cela, le paramètre étudié a été le caractère abrupt ou non de l'expansion. On a ainsi comparé deux géométries présentant le même ratio d'expansion ($ER = 15$), dont la différence se situe au niveau de la forme de l'entrée de la cavité. En effet, la première géométrie présente une expansion abrupte alors que la deuxième présente une expansion progressive (angle entre l'axe X et l'expansion est de 45°). Ces deux géométries sont représentées sur la figure 3.18.

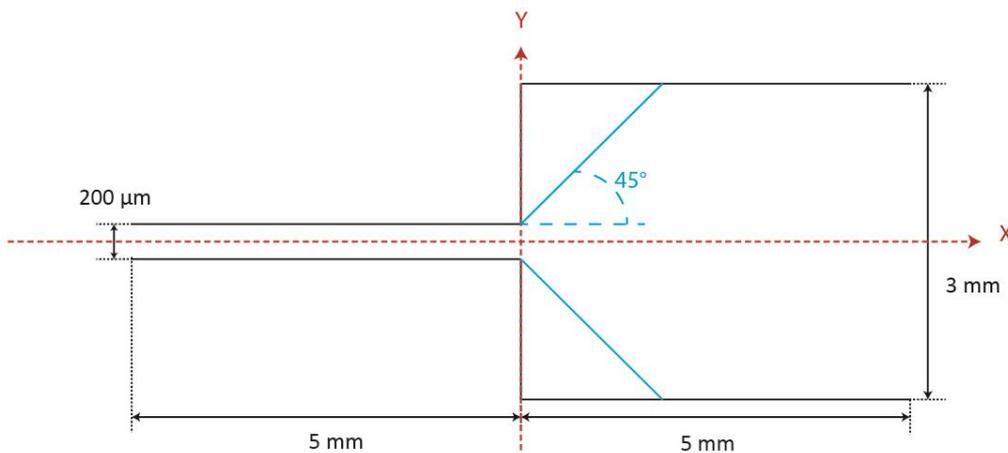


Figure 3.18 : Géométries avec une expansion abrupte (en noir) et avec une expansion progressive (en bleu)

Les résultats de la simulation montre comme attendu que la valeur du nombre de Reynolds critique est plus importante pour la géométrie avec une expansion progressive que pour celle de l'expansion abrupte, comme on peut le voir sur la figure 3.19.

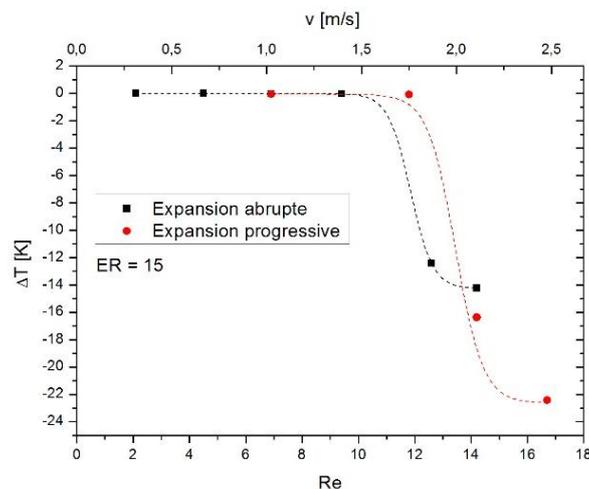


Figure 3.19 : Comparaison entre les géométries abruptes et progressives de la différence de température en fonction du nombre de Reynolds

Ensuite, une étude comparative de la sensibilité a été réalisée, dans le but de connaître l'influence de la forme de la géométrie sur la sensibilité du système. Pour réaliser cette étude, on s'est donc placé à la vitesse moyenne la plus importante possible avant le nombre de Reynolds critique pour chacune des deux géométries et une rotation jusqu'à 1080 °/s a été appliquée à notre système. La figure 3.20 montre que la géométrie avec une expansion progressive présente aussi un comportement linéaire entre la différence de température et la vitesse de rotation sur une gamme de mesure d'environ 600-700 °/s avec une non-linéarité inférieure à 1% pour les différentes positions des détecteurs virtuels (200 µm à 1000 µm).

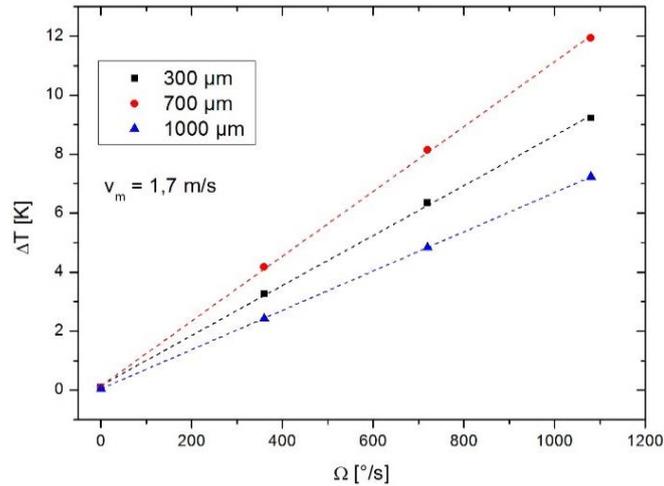


Figure 3.20 : Différence de température en fonction de la rotation pour la géométrie avec une expansion progressive

Puis, on a déterminé la sensibilité sur ce domaine en fonction de la position des détecteurs dans la cavité. On peut alors noter que la position impacte aussi la sensibilité du capteur, pour cette géométrie. En effet, il existe une position optimale des détecteurs au sein de la cavité, qui se situe, pour ces deux géométries aux alentours de 700-800 µm de l'axe de symétrie, comme on peut le voir sur la figure 3.21. Cette dernière montre que la géométrie avec une expansion abrupte présente la sensibilité la plus importante par rapport à celle avec une expansion progressive. On voit donc que la sensibilité du capteur est influencée par la forme de la géométrie. En effet, bien que le fait que l'on puisse aller plus vite avec la géométrie avec une expansion progressive, cette dernière présente une sensibilité plus faible.

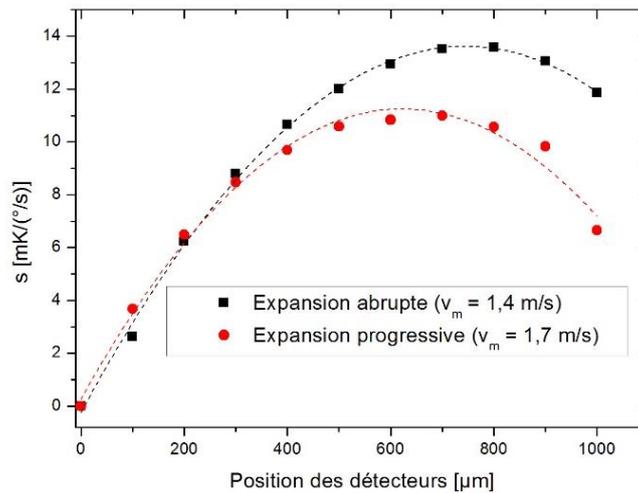


Figure 3.21 : Comparaison de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs de la géométrie présentant une expansion abrupte et celle avec une expansion progressive pour des vitesses avant le Reynolds critique

3.3.1.3 Conclusion

Tout d'abord, cette étude numérique en 2D a permis de comprendre qu'il existait différents paramètres qui influencent la sensibilité du capteur telles que la forme de la géométrie, la position des détecteurs de température ou encore la vitesse d'écoulement du gaz.

Néanmoins, on a aussi vu que dans le but de réaliser un gyro, il faut éviter l'effet Coanda qui est lié à la vitesse d'écoulement du gaz et aussi au ratio d'expansion. En effet, un écoulement symétrique constant est observé pour des valeurs relativement faibles du nombre de Reynolds. Au-dessus, d'un certain nombre de Reynolds critique, une solution asymétrique constante est observée, c'est-à-dire que des zones de recirculations (création de tourbillons) de différentes tailles se forment sur les parois inférieures et supérieures, ce qui va créer un biais.

Il existe une différence entre l'entraînement du jet et la dynamique de recirculation tourbillonnaire dans le flux 2D et 3D. En effet, pour la simulation 2D, il n'y a pas de redistribution de la recirculation tourbillonnaire, et le tourbillon n'est qu'un champ scalaire. L'énergie ne peut être distribuée dans d'autres directions que celui du plan d'écoulement, de sorte que l'effet d'entraînement du jet en combinaison avec les restrictions latérales dues aux parois du canal conduit à des régions de recirculations plus importantes, alimentées et soutenues en continu par le jet. Étant donné que l'entraînement du jet et la dynamique de recirculation tourbillonnaire diffèrent de manière assez importante des modèles 2D et 3D, toute observation de jet asymétrique dans les modèles simplifiées (2D) doit être interprétée avec prudence en ce qui concerne la présence possible d'un effet Coanda. En effet, il est probable que l'effet Coanda n'apparaisse pas avec l'utilisation d'un modèle 3D [109, 110], ce qui nous laisse plus de liberté sur le choix des valeurs des paramètres.

3.3.2 Modélisation 3D

Suite à ces premiers résultats, un modèle numérique en 3D a été développé afin d'étudier de manière plus précise le comportement du dispositif en s'approchant au plus près de la géométrie et des dimensions du système réel. Il nous permettra de mieux comprendre le comportement du flux de gaz lors de la mise en rotation, ainsi que l'évolution des zones d'échanges thermiques, pour par exemple, déterminer une position optimale des détecteurs de température. Néanmoins, la géométrie choisie est de type cylindrique, ce qui permet de faciliter le maillage du système. La cavité est un cylindre d'une longueur 42 mm et d'un diamètre de 10 mm (Fig. 3.22). Un canal qui permet d'injecter le gaz a été représenté avec une longueur de 5 mm et un diamètre de 480 μm . Toutes dimensions sont du même ordre de grandeur que celles utilisées sur le prototype expérimental.

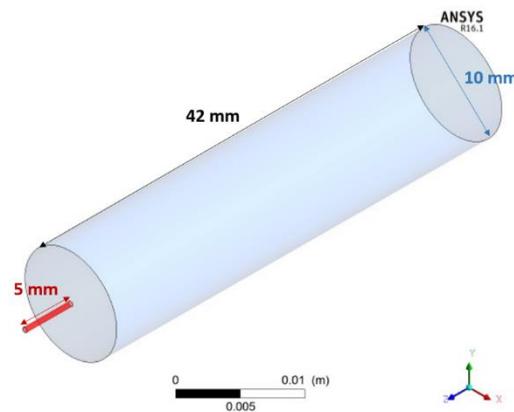


Figure 3.22 : Dimensions de la géométrie du modèle 3D

3.3.2.1 Influence de la forme des détecteurs

Comme il est souvent difficile de traiter et de représenter les données et les résultats en 3D, on a décidé de travailler sur trois types de détecteurs virtuels pour nous permettre de mieux appréhender le comportement du dispositif. Suite aux résultats précédents de simulation en 2D, les positions pour les 3 détecteurs que l'on a choisis, correspondent à celles optimales, c'est-à-dire qui présentaient la différence de température la plus grande. La première paire de détecteurs est composée de "détecteurs ponctuels" (en violet sur la figure 3.23) qui correspondent, quant à leur empattement, aux thermocouples utilisés pour les manipulations expérimentales. Ces détecteurs virtuels sont ainsi placés à une distance de 31 mm de l'entrée de la cavité, pour un empattement de 100 μm , et positionnés à 1,5 mm de part et d'autre du flux de gaz. La deuxième paire est positionnée aussi à 1,5 mm de part et d'autre du flux de gaz. Néanmoins, leur longueur correspond à celle de la cavité qui est de 42 mm. Ces détecteurs sont appelés "détecteurs longueurs" (en bleu ciel sur la figure 3.23). La dernière paire est placée, perpendiculairement au flux de gaz, à une distance de 31 mm de l'entrée de la cavité et chaque détecteur fait 5 mm de longueur. Ces détecteurs sont appelés "détecteurs largeurs" (en noir sur la figure 3.23). La figure 3.23 représente la géométrie choisie avec les différents détecteurs virtuels utilisés. Un des buts recherchés est de déterminer la configuration qui permet d'obtenir la meilleure sensibilité.

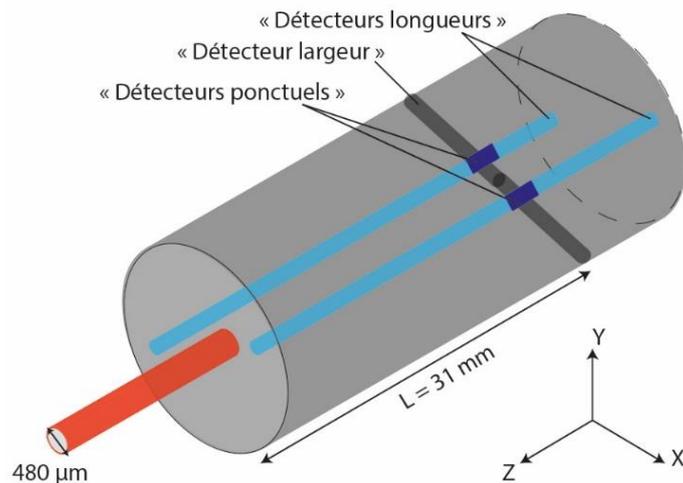


Figure 3.23 : Géométrie cylindrique avec la position des détecteurs virtuels

Cette étude comparative a été réalisée pour un flux de gaz moyen de 2,4 m/s, correspondant à une vitesse pour laquelle l'effet Coanda n'apparaît pas, et sur une dynamique de mesure de ± 300 °/s. On a ainsi représenté sur la figure 3.24, la différence de température en fonction de la vitesse de rotation appliquée. Sur ces courbes, la linéarité est observée jusqu'à une étendue de l'ordre de 70-80 °/s. Les "détecteurs ponctuels" ont permis d'obtenir la sensibilité la plus élevée ($s = 130$ mK/(°/s)), alors que pour les deux autres emplacements de détecteurs, on a obtenu une sensibilité à peu près équivalente de 57 mK/(°/s).

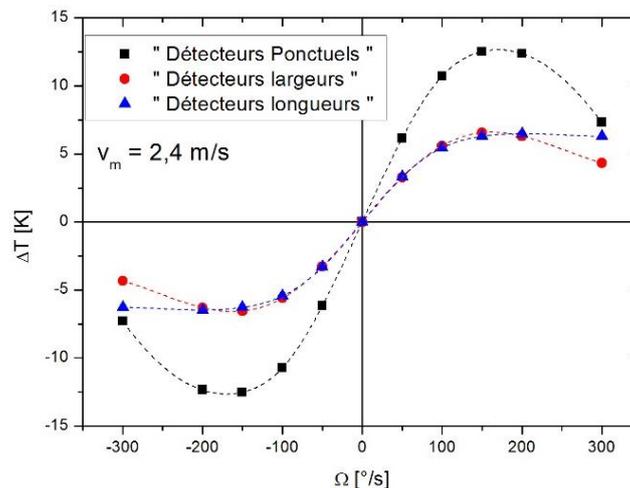


Figure 3.24 : Différence de température en fonction de la vitesse de rotation appliquée pour les différents détecteurs virtuels utilisés

On observe qu'il y a un maximum de la différence de température puis une décroissance de cette dernière qui s'opère à partir d'environ 200 °/s. Cette décroissance est due à une déviation du flux de gaz qui est plus importante que la distance axe/détecteur ($X = \pm 1,5$ mm). En effet,

on a pu observer ce phénomène à l’aide de cartographies en température prises dans le plan des détecteurs, comme illustré sur la figure 3.25. Sur cette dernière, on a représenté la forme de l’écoulement en température pour le système stationnaire (Fig. 3.25 (a)) et pour un système avec une rotation de 200 °/s (Fig. 3.25 (b)) puis de 300 °/s (Fig. 3.25 (d)). On peut noter que l’écoulement est symétrique pour $\Omega = 0$ et que pour les deux écoulements avec rotation, ces derniers sont déviés par la force de Coriolis. Ensuite, sur cette figure est représentée la différence de température entre le système en rotation et le système stationnaire, pour les deux vitesses de rotations précédentes (Fig. 3.25 (c) – (e)). Sur ces dernières, on a illustré les 3 paires de détecteurs virtuels : “longueurs” en noir, “largeurs” en gris et “ponctuels” en blanc (au niveau de l’intersection entre le noir et le gris). On peut aussi noter que ces 3 paires de détecteurs sont situées au niveau des zones d’échanges thermiques, mais pas forcément de façon optimale, puisqu’on n’est plus dans la zone de linéarité. Néanmoins, pour les “détecteurs ponctuels”, on remarque un meilleur positionnement pour la rotation de 200 °/s, comparé à la rotation de 300 °/s, où pour cette dernière, ils ne sont plus dans les fortes zones d’échanges thermiques. Cela permet de confirmer la décroissance de la différence de température à partir de $\Omega = 200$ °/s.

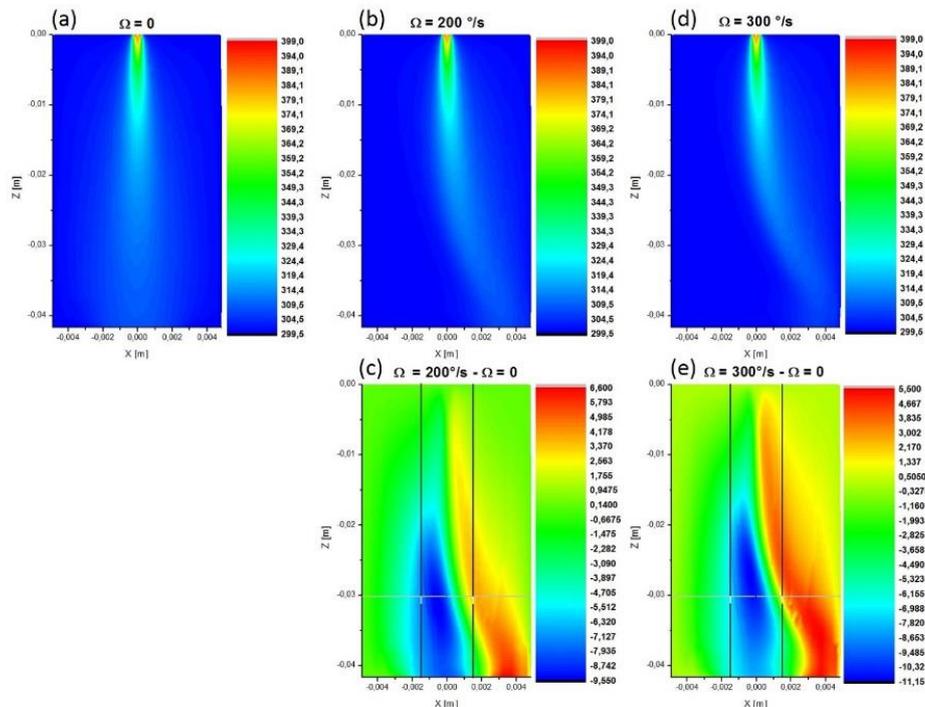


Figure 3.25 : Cartographie en température (K) dans le plan ($Y=0$) des détecteurs à $v_m = 2,4$ m/s ; (a) $\Omega = 0$; (b) $\Omega = 200$ °/s ; (c) la différence entre $\Omega = 200$ °/s et $\Omega = 0$; (d) $\Omega = 300$ °/s ; (e) la différence entre $\Omega = 300$ °/s et $\Omega = 0$

On peut aussi confirmer le fait, comme on le voit sur la figure 3.26, que la déviation du flux est plus importante que la distance axe/détecteur ($X \pm 1,5$ mm) après $\Omega = 200$ °/s. On y a représenté la déviation du flux de gaz à la position $L = 31$ mm, correspondant aux placements des thermocouples, en fonction de la rotation. Pour cela, la déviation du jet a été déterminée à partir d’un paramètre visuel et/ou d’un paramètre mesuré : la première à partir des cartographies de champs de température sur les résultats numériques (δ_c), le second par calcul analytique à

l'aide de la relation déterminée dans le paragraphe 1.4.1 ($\delta = \omega L^2 / v_m$) en utilisant la vitesse moyenne obtenue sur la longueur L de la simulation numérique (δ_s), et enfin la troisième de manière expérimentale (δ_e) à partir des données issues de la visualisation du jet de gaz avec la fumée et en utilisant les vitesses moyennes mesurées par le micro-anémomètre. On note la bonne adéquation entre les 3 déviations.

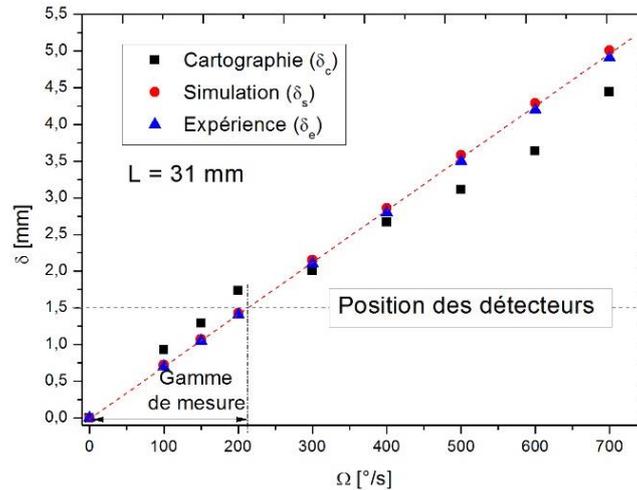


Figure 3.26 : Déviation du flux de gaz déterminée en fonction de la vitesse de rotation

Pour conclure, cette étude nous a permis d'affiner les résultats en passant du modèle 2D à 3D, de le valider en partie en recoupant les résultats issus de l'expérience et enfin de montrer que la détection avec des "détecteurs ponctuels" devrait donner les meilleurs résultats en terme de sensibilité.

3.3.2.2 Optimisation de la position des détecteurs

Malgré les résultats précédents, on a voulu encore affiner le positionnement des détecteurs dans la cavité afin de les placer dans les plus fortes zones d'échanges thermiques. On a également remarqué sur les premières simulations que les zones de "meilleures échanges" se déplacent aussi le long de l'axe X (c'est-à-dire sur la longueur) à vitesse de gaz constante, c'est pourquoi le choix a été de faire cette étude pour les "détecteurs longueurs" uniquement (voir figure 3.23). De plus, ces derniers sont plus pertinents que les "détecteurs largeurs". En effet, sur les cartographies en température représentant la différence entre les systèmes soumis ou non à une rotation, on a pu observer que l'un des "détecteurs largeurs" se situait sur les deux zones d'échanges thermiques ("froide" en bleu et "chaude" en rouge) en même temps (voir figure 3.25). Positionner un détecteur sur la largeur ne permet donc pas d'obtenir le maximum de la différence de température.

La position a été étudiée de 100 à 1500 μm , par pas de 100 μm , par rapport à l'axe de symétrie de façon à rechercher la sensibilité la plus élevée et l'étendue de mesure la plus importante. Cette dernière a été définie pour 1 % de linéarité. On a donc tracé la sensibilité et l'étendue de mesure relatives en fonction de la position des détecteurs (Fig. 3.27 – 3.28),

sachant que les valeurs des sensibilités et d'étendues de mesure absolues maximales sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Sensibilité et étendue de mesure absolues pour deux paires de détecteurs différentes

	Sensibilité [mK/(°/s)]	Étendue de mesure [°/s]
Détecteurs longueurs	69	69
Détecteurs ponctuels	133	51

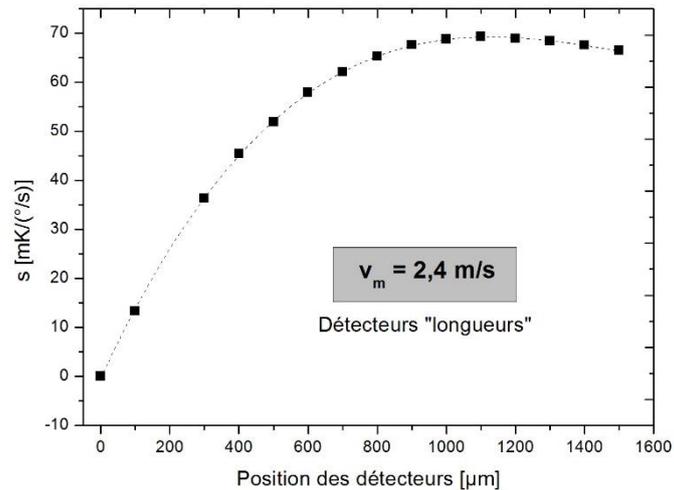


Figure 3.27 : Sensibilité déterminée en fonction de la position des détecteurs pour $v_m = 2,4 \text{ m/s}$

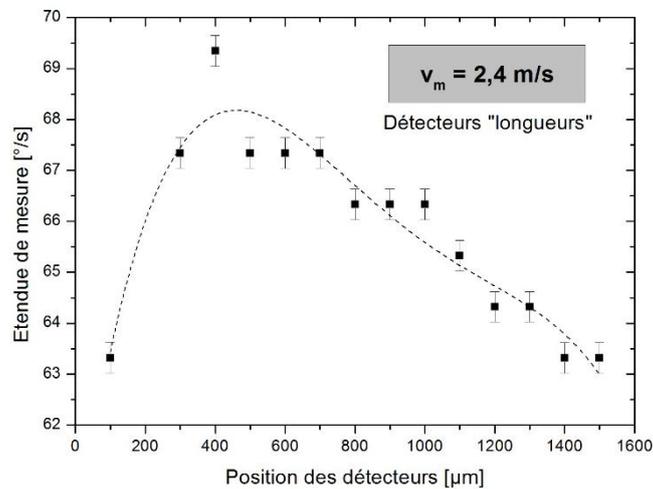


Figure 3.28 : L'étendue de mesure déterminée pour 1 % de linéarité en fonction de la position des détecteurs pour $v_m = 2,4 \text{ m/s}$

La position optimale est autour de 1100 μm par rapport à l'axe de symétrie du flux de gaz pour obtenir la sensibilité maximale. Pour l'étendue de mesure maximale, cette position est située à 400 μm .

Néanmoins, on peut voir sur ces figures que la position des détecteurs influe beaucoup plus sur la sensibilité que sur l'étendue de mesure. Ainsi, pour obtenir un bon compromis entre la sensibilité et l'étendue de mesure, la position optimale des détecteurs peut-être choisie autour de 900 – 1000 μm .

3.3.2.3 Influence de la vitesse du gaz

Pour le gyro, la vitesse d'écoulement du gaz apparaît comme un paramètre important. En effet, on la retrouve dans l'expression de la force de Coriolis et elle joue donc aussi un rôle sur la déviation du flux de gaz. Cette étude a été réalisée avec plusieurs vitesses de gaz différentes, y compris celle discutée précédemment.

De plus pour cette position-là, en reprenant les résultats du 3.3.2.1 sur la forme et taille des détecteurs, on a vu que les "détecteurs ponctuels" présenterait la meilleure sensibilité. C'est pourquoi il faudrait voir *in fine* s'il est plus facile d'un point de vue technologique de réaliser une détection ponctuelle ou sur toute la longueur.

La déviation du flux de gaz étant liée à la vitesse (voir formule paragraphe 1.4.5), par conséquent, plus la vitesse est importante, plus la déviation du flux de gaz est faible. Il en résulte que le maximum de la différence de température est obtenu pour une vitesse de rotation plus importante. Ce maximum est donc décalé vers des vitesses de rotation plus importantes (Fig. 3.29). De plus, il existe toujours une corrélation avec le calcul de la déviation du flux à ces autres vitesses moyennes d'écoulement.

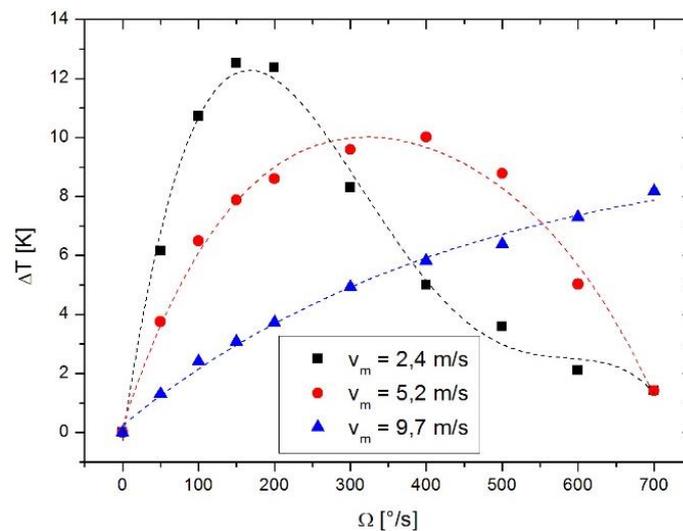


Figure 3.29 : Différence de température en fonction de la rotation pour différentes vitesses d'écoulement du gaz

Cette étude a encore permis un ajustement de la position optimale des détecteurs qui se trouve être au même endroit que pour l'étude précédente, c'est-à-dire, autour de 1000 μm de part et d'autre du flux. Cette position des détecteurs a été aussi choisie dans le but d'obtenir le meilleur compromis entre la sensibilité et l'étendue de mesure.

Sur la figure 3.30, l'évolution de la sensibilité et de l'étendue de mesure en fonction de la vitesse d'écoulement a été représentée. On note que plus la vitesse est élevée, plus l'étendue de mesure est importante mais, *a contrario* la sensibilité est diminuée.

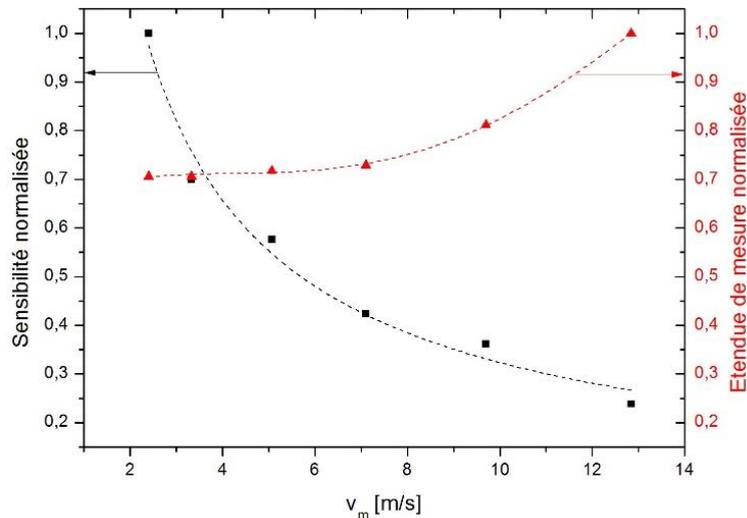


Figure 3.30 : Évolution de la sensibilité et de l'étendue de mesure en fonction de la vitesse moyenne de gaz

On peut donc dire, dans le but d'obtenir un compromis entre haute sensibilité et grande étendue de mesure, que pour ce dispositif avec une position des détecteurs de 1000 μm de part et d'autre du flux de gaz, il existe une vitesse optimale d'environ 4 m/s pour le flux. On montrera dans la partie 3.4, que les résultats obtenus par simulation sont en accord avec ceux obtenus expérimentalement.

3.3.3 Étude de la dimension de la cavité

Le premier prototype étudié présente des dimensions mésoscopiques, ainsi une réduction des dimensions sera nécessaire dans l'objectif de réaliser un capteur qui pourra être intégré. C'est pourquoi, une étude sur l'évolution de la sensibilité et de l'étendue de mesure a été réalisée en fonction de la dimension de la cavité, afin de prévoir les caractéristiques du capteur et leurs évolutions que l'on pourrait obtenir en réduisant les dimensions du système. Les dimensions caractéristiques du système (cavité et diamètre du capillaire d'entrée) ont donc été réduites par un facteur 2 et 4. L'étude a été réalisée pour une vitesse moyenne d'environ 2,4 m/s. La distance entre l'entrée du jet de gaz dans la cavité et la position des détecteurs a aussi été réduite, ce qui a permis de respecter le rapport des dimensions afin d'obtenir un comportement pertinent en fonction du dimensionnement.

La figure 3.31 illustre l'évolution de la sensibilité et de la gamme de mesure (définie à 1% de linéarité) en fonction des dimensions caractéristiques du système. On note qu'une réduction des dimensions a permis d'augmenter l'étendue de mesure, mais *a contrario*, la sensibilité est plus faible. Cette dernière diminuée d'un facteur 3-4 pour chaque réduction des dimensions est

plus impactée que l'étendue de mesure qui est, quant à elle, multipliée par 2 pour la même diminution.

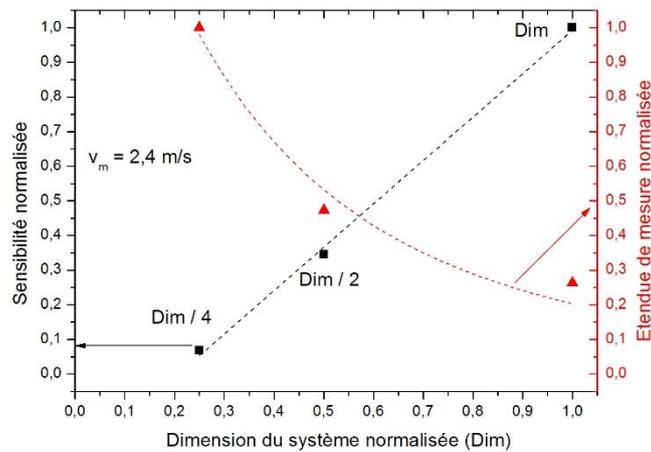


Figure 3.31 : Évolution de la sensibilité et de l'étendue de mesure en fonction de la dimension du système

À la suite de cette étude, nous avons réalisé une première ébauche de prototype, nous permettant de vérifier la faisabilité technologique de ce dispositif, notamment au niveau de détecteurs suspendus. La figure 3.32 montre ce premier dispositif de dimension 6 x 6 x 0,5 mm avec trois paires de détecteurs “ponctuels”. Cela nous permettra, par exemple, d’étudier la réponse du gyro selon la position des détecteurs. Néanmoins, ce dispositif devra être finalisé afin de le caractériser.

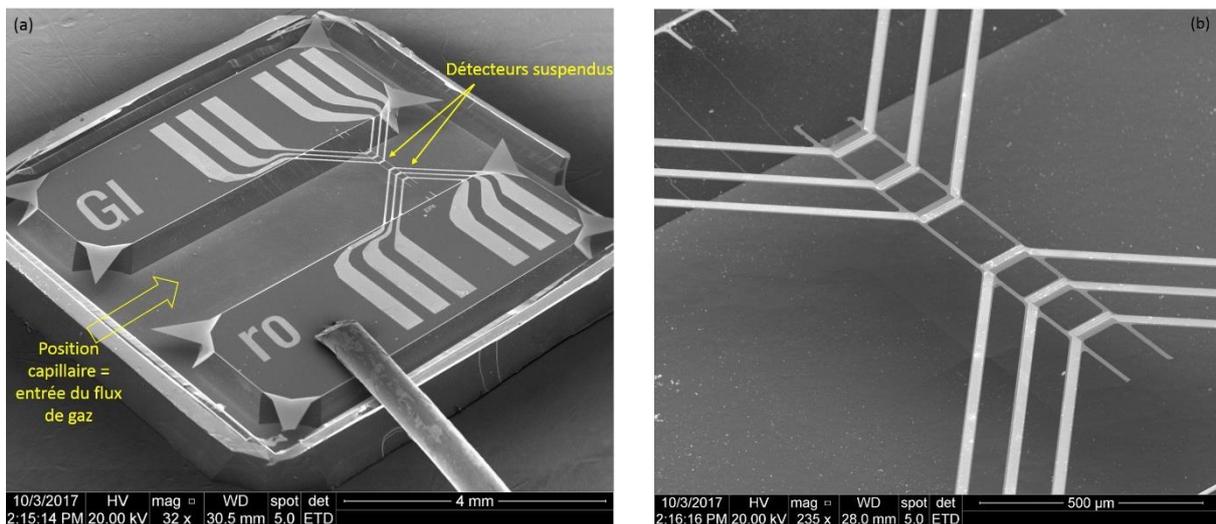


Figure 3.32 : Images MEB d'une première ébauche de prototype ; (a) vue globale ; (b) zoom sur les détecteurs suspendus

3.3.4 Conclusion

On a vu que le modèle 2D a permis d'obtenir une approche rapide du comportement du gyro à jet. Ce modèle simplifié a permis d'étudier les principaux paramètres qui ont un impact sur la sensibilité du capteur. Néanmoins, l'utilisation d'un modèle 3D plus complet a permis d'obtenir des résultats où l'effet Coanda n'a pas été observé et qui seront également plus en accord avec la réalité des phénomènes physiques mis en jeu dans le capteur. Le modèle 3D est le plus approprié pour les études comparatives des résultats entre l'expérience et la simulation.

Il a aussi permis de mieux visualiser les zones d'échanges thermiques, et de mieux appréhender l'influence des paramètres sur le comportement du gyro. Pour cela, une première optimisation numérique de ces paramètres telles que la vitesse d'écoulement, la taille et la position des détecteurs de température impactant les caractéristiques du gyro a pu être faite.

3.4 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, les résultats expérimentaux vont être présentés et une comparaison sera faite avec les résultats de la partie simulation en 3D. Comme on l'a vu au chapitre 2, le banc de test se compose d'un gyro de dimension "millimétrique" dont la cavité a les dimensions suivantes : 42 x 10 x 10 mm. Au sein de cette cavité, on a placé les thermocouples à une distance de 31 mm de l'entrée de la cavité et espacé de 1,5 mm par rapport à l'axe de symétrie du flux de gaz. Ils ne sont pas placés à la distance idéale de détection, comme on a pu le voir dans le paragraphe 3.3, car il a été difficile de les placer manuellement sans micro-déplacement à 500 μm près. On rappellera que le jet de gaz est créé à l'aide d'une micro-pompe à travers un capillaire de 480 μm débouchant dans la cavité. Un fil résistif est enroulé autour du capillaire, ce qui permet d'obtenir un jet chaud, dont la température à la sortie du capillaire est d'environ 370 K.

Au préalable, nous avons positionné le capillaire afin qu'il soit centré au milieu des thermocouples. Ceci a pu être fait grâce à la visualisation d'un flux de fumée via l'utilisation d'un générateur de fumée et d'une caméra wifi embarquée, comme explicité dans le paragraphe 2.1.2. La vitesse du flux au sein de la cavité a, quant à elle, été aussi déterminée grâce au micro-anémomètre à fil chaud.

L'ensemble comprenant le gyro, la micro-pompe et le générateur de fumée est placé sur un micromanipulateur 2 axes qui permet de positionner l'entrée du capillaire dans la cavité au niveau de l'axe de la rotation.

Ces différents éléments nécessaires à la mesure sont embarqués sur le simulateur mono-axe de précision.

Une interface entrée/sortie reliée au simulateur via les connecteurs placés à la base de la table a été fabriquée, ce qui permet d'alimenter toute l'électronique embarquée sur la table en utilisant les deux connecteurs correspondants sur le dessus de la table.

La figure 3.33 montre les différents éléments du montage sur le plateau tournant et utilisés pour les mesures.

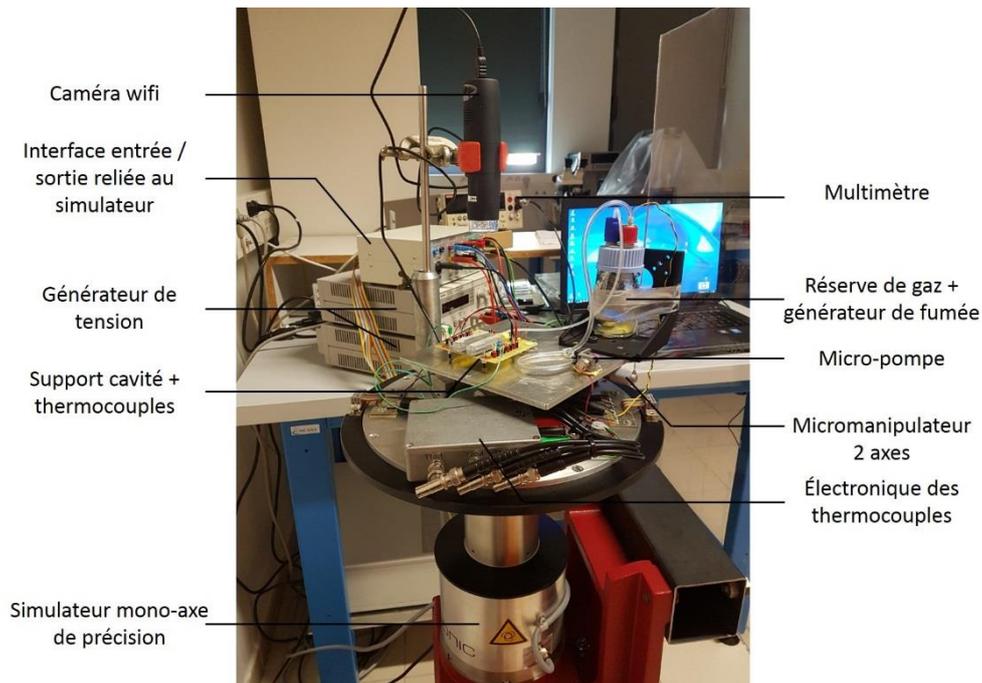


Figure 3.33 : Photographie du montage du gyro à jet de gaz

Compte tenu de la fabrication millimétrique et du fait que ce soit le premier prototype, il nous a été difficile d'étudier d'autres paramètres que la vitesse du jet de gaz. Des paramètres telles que la position des détecteurs, la taille de la cavité, la température du gaz ou bien encore la nature du gaz ne pourront être étudiés qu'à la suite de ce travail de thèse.

3.4.1 Influence de la vitesse du jet de gaz et comparaison expérience – simulation

Cette étude a été menée pour 3 vitesses moyennes d'écoulement du gaz, que l'on a choisi le plus possible identique à celles étudiées au paragraphe 3.1.2.3. Le premier résultat porte sur la mesure de la différence de température en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses que l'on montre sur la figure 3.34. Sur cette dernière ont aussi été reportés les résultats de simulation numérique et on peut voir la bonne adéquation entre le modèle numérique et les mesures quel que soit la vitesse de gaz. On note qu'un maximum est atteint pour la différence de température pour ensuite décroître montrant alors que le régime linéaire a été dépassé. Plus la vitesse est importante et plus le maximum de la différence de température est obtenu pour des vitesses de rotations plus élevées.

Pour la vitesse la plus élevée de 9,7 m/s (Fig. 3.34 (c)), on note que le maximum de la différence de température n'est pas atteint sur la plage de mesure ± 700 °/s. Expérimentalement, il n'a pas été possible d'aller plus haut en vitesse de rotation à cause de la tenue mécanique des différents composants sur le plateau tournant (récipient en verre, caméra, etc).

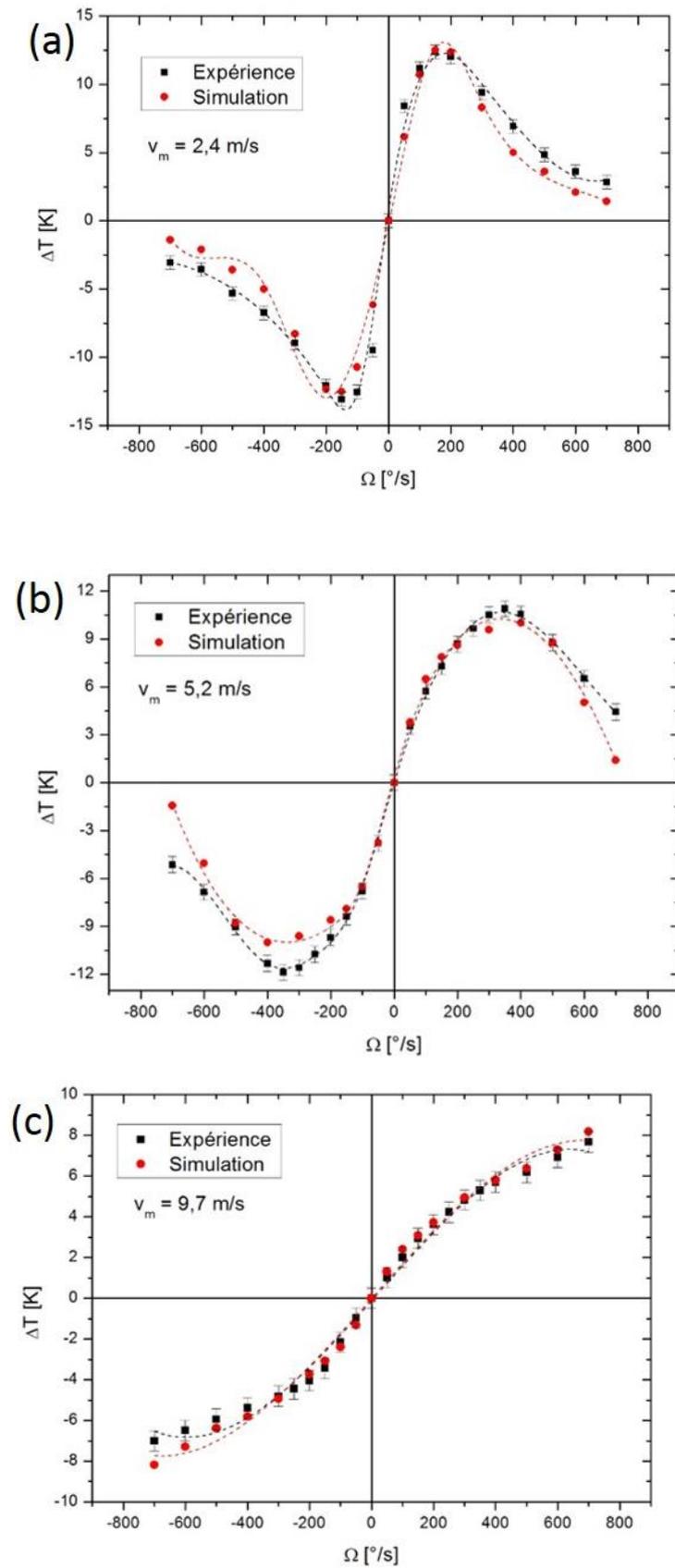


Figure 3.34 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la différence de température en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses d'écoulement moyen du gaz ; (a) $v_m = 2,4$ m/s ; (b) $v_m = 5,2$ m/s ; (c) $v_m = 9,7$ m/s

Pour les différentes vitesses, les régimes linéaires (à 1 %) sont estimés se trouver à 50 ; 70 ; 100 °/s pour 2,4 ; 5,2 ; 9,7 m/s, respectivement. On peut alors tracer l'étendue de mesure absolue en fonction de la vitesse du gaz que l'on compare aux résultats de simulation où l'on voit un comportement similaire pour les deux courbes (Fig. 3.35).

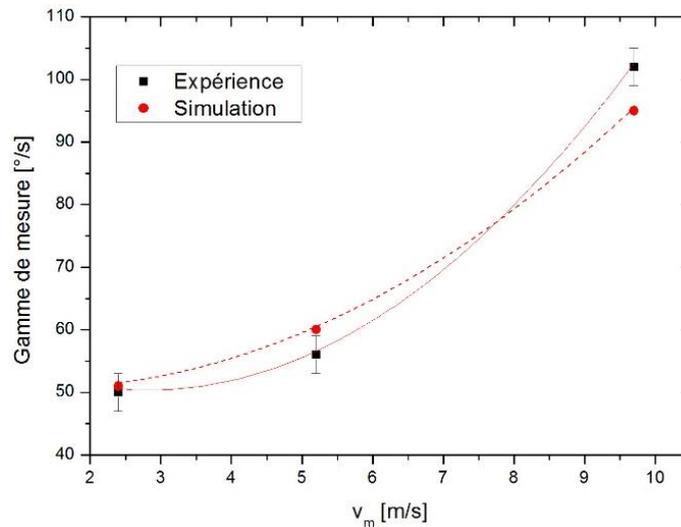


Figure 3.35 : Comparaison entre la simulation et l'expérience de l'étendue de mesure en fonction de la vitesse d'écoulement du gaz

Dans le domaine de linéarité, on a pu tracer la sensibilité absolue en fonction de la vitesse du gaz (Fig. 3.36) afin de la comparer aux résultats de simulation. On voit dans ce cas la bonne adéquation entre le modèle et l'expérience.

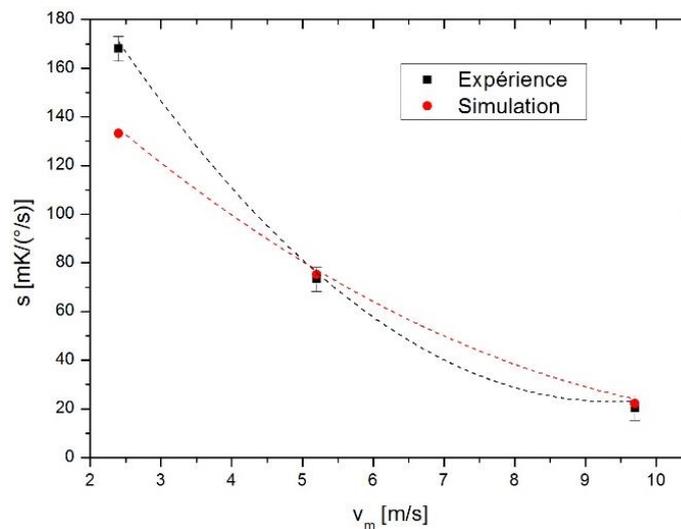


Figure 3.36 : Comparaison entre l'expérience et la simulation de l'évolution de la sensibilité en fonction de la vitesse d'écoulement du gaz

La dernière étude porte sur la déviation du jet de gaz au sein de la cavité. On peut voir sur la figure 3.37, la bonne adéquation entre les mesures expérimentales, la simulation et le modèle analytique pour une vitesse de gaz de 9,7 m/s, comme on avait déjà pu le remarquer dans le paragraphe 3.3.2.1 avec la figure 3.26. Le tracé de la déviation δ en fonction de la vitesse de rotation pour les différentes vitesses de gaz, nous permet également de confirmer que plus la vitesse est élevée, plus l'étendue de mesure sera grande. En effet, on voit clairement que la déviation du jet atteint la position des détecteurs pour les vitesses plus élevées.

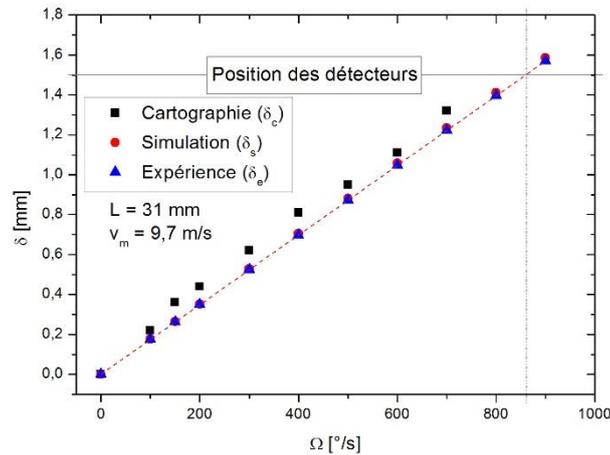


Figure 3.37 : Déviation du flux de gaz déterminée en fonction de la vitesse de rotation

3.4.2 Conclusion

Pour conclure, on peut dire qu'il y a une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques qui permettent de valider l'utilisation du modèle 3D développé. Ce dernier permet d'interpréter les résultats expérimentaux obtenus et donc de visualiser et de comprendre le comportement du jet de gaz lors de la mise en rotation. On peut aussi observer l'évolution des zones d'échanges thermiques et ainsi déterminer une position ponctuelle ou une zone optimale pour les détecteurs selon la vitesse d'écoulement appliquée.

3.5 Conclusion sur le gyro à jet de gaz

Dans ce chapitre, on a pu étudier de manière numérique et expérimentale un gyro à jet de gaz. Un prototype a été réalisé en utilisant une micro-pompe pour générer le flux de gaz laminaire, ce qui ne permet pas de respecter les conditions d'utilisations souhaitées (résistance à des chocs extrêmes : $> 10\ 000\text{g}$). Néanmoins, sur de futurs prototypes, d'autres solutions sont possibles en remplacement de ce système. Ces méthodes telles que la décharge Corona, la transpiration thermique ou encore une réserve de gaz sous pression présentent l'avantage de générer un flux de gaz sans utiliser de pièces mobiles, ce qui devrait en faire des dispositifs robustes.

Dans un premier temps, un modèle 2D simplifié a été mis en place. Il a permis d'étudier et de déterminer assez rapidement les paramètres (vitesse d'écoulement, position des détecteurs, géométrie de la cavité, ...) qui ont une influence sur les caractéristiques du gyro. Malgré la validation de ce modèle 2D, au cours de ces études, on a été confronté à l'effet Coanda, ce qui a limité le domaine de variation de certains paramètres. Cet effet lié aux dimensions du dispositif et à la vitesse d'écoulement a provoqué une déviation du flux de gaz lorsque le système n'était pas soumis à une rotation, ce n'est pas admissible pour un bon fonctionnement du capteur. Néanmoins, il a été démontré que l'entraînement du jet et la dynamique de recirculation tourbillonnaire peut différer assez nettement entre un modèle 2D et 3D [110].

C'est pourquoi, un modèle 3D a donc été développé et validé avec les résultats des mesures expérimentales. En effet, une bonne corrélation entre ces résultats ont permis de valider le modèle 3D cylindrique utilisé. De plus, au cours de ces simulations et pour les conditions choisies, l'effet Coanda n'a pas été observé. Cela a également été confirmé lors de l'observation expérimentale avec un jet de fumée, ce qui permet d'affirmer que le modèle 2D est somme toute trop simplifié pour une étude fine du comportement du gyro à jet de gaz.

A partir des différentes études numériques réalisées, il a été déterminé que la position optimale des détecteurs est localisée autour de 1000 μm de part et d'autre du flux de gaz et que la vitesse optimale serait de 4 m/s dans le but d'obtenir un compromis entre une sensibilité élevée et une étendue de mesure importante. De plus, on peut noter que plus la vitesse moyenne d'écoulement du gaz est élevée, plus l'étendue de mesure est importante, mais plus la sensibilité est faible. Cela a été démontré comme le prouve la bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques. La sensibilité maximale obtenue est de 168 mK/(°/s) pour une vitesse de gaz de 2,4 m/s et l'étendue de mesure maximale obtenue est de l'ordre de 102 °/s pour une vitesse de gaz de 9,7 m/s pour les détecteurs virtuels dits "ponctuels" et les thermocouples utilisés pour la partie expérimentale.

Enfin, pour la réalisation de futurs prototypes intégrés, on a pu prévoir numériquement l'évolution de la sensibilité et de l'étendue de mesure en réduisant les dimensions caractéristiques du système. Ceci nous a permis de déterminer que la réduction des dimensions aura une influence sur les caractéristiques du capteur. En effet, plus les dimensions sont petites, plus la sensibilité est faible, mais *a contrario*, l'étendue de mesure est améliorée. Par exemple, les dimensions réduites par 4 ont permis d'obtenir une gamme de mesure de 262 °/s pour une sensibilité de 4,7 mK/(°/s).

Chapitre 4

Gyromètre thermique à gaz basé sur l'expansion thermique

Nous commençons ce chapitre par un bref rappel sur le principe de fonctionnement de ce gyro.

Puis le modèle en deux dimensions avec un élément de chauffe, dans un premier temps, sera abordé afin d'observer et d'appréhender le comportement du gaz, en terme d'élévation de température et de vitesse d'écoulement, lors de son expansion. À partir de ce modèle, l'influence de certains paramètres sera déterminée tels que la puissance injectée dans l'élément chauffant et son rapport cyclique de fonctionnement sur la vitesse d'écoulement du gaz notamment, et plus particulièrement, sur la température de ce gaz.

Par la suite, le phénomène gyroscopique est abordé par une modélisation numérique en 3D avec deux éléments chauffants. Dans un premier temps, en se basant sur les travaux d'A. Leung et al. [48, 111, 112], une étude comparative des différents signaux numériques (alimentation de la chauffe, traitement du signal de détection, ...) a été réalisée afin de valider le modèle numérique. Ceci nous permettra d'effectuer une comparaison qualitative et quantitative avec les résultats expérimentaux. Dans un second temps, des paramètres tels que le rapport cyclique ou encore la position des détecteurs ont été identifiés et étudiés pour voir leur influence sur les caractéristiques du capteur.

Ensuite, un banc de test des dispositifs a été mis en place avec toute l'instrumentation associée. Le choix et le contrôle des courants de détection, de chauffe, et le rapport cyclique de cette dernière seront expliqués pour toute mise en rotation du dispositif. Le phénomène gyroscopique sera abordé en étudiant la relation entre la réponse du système et la vitesse de rotation permettant de déterminer la sensibilité du capteur. Ensuite, des paramètres tels que la puissance de la chauffe, la nature du gaz et le rapport cyclique de fonctionnement de la chauffe ont été étudiés expérimentalement pour voir leur influence sur la sensibilité.

Et enfin, une analyse comparative des caractéristiques des deux gyros sera faite.

Sommaire

4.1	Rappel sur le principe de fonctionnement.....	102
4.2	Simulation numérique par éléments finis.....	102
4.2.1	Modélisation à deux dimensions avec un élément de chauffe	103
4.2.1.1	Évolution de la température et de la vitesse du gaz en fonction du rapport cyclique	103
4.2.1.2	Influence de la puissance injectée dans un élément chauffant	105
4.2.2	Modélisation à trois dimensions avec deux éléments de chauffe	106
4.2.2.1	Choix de géométrie	106
4.2.2.2	Étude des signaux issus de la simulation numérique.....	107
4.2.2.3	Influence du rapport cyclique sur la sensibilité	110
4.2.2.4	Optimisation de la position des détecteurs.....	111
4.2.3	Conclusion	113
4.3	Résultats expérimentaux	114
4.3.1	Choix du courant de détection	115
4.3.2	Linéarité et sensibilité du système	115
4.3.3	Influence de la puissance de chauffe sur la sensibilité.....	117
4.3.4	Influence de la nature du gaz sur la sensibilité	118
4.3.5	Influence du rapport cyclique sur la sensibilité	120
4.3.6	Essais chocs pour le gyro à expansion thermique.....	122
4.3.6.1	Moyens d'essais.....	122
4.3.6.2	Essais et résultats	124
4.4	Comparaison des deux gyros développés	125
4.5	Conclusion	128

4.1 Rappel sur le principe de fonctionnement

L'expansion thermique est un phénomène naturel lié à la variation de température d'un gaz. En effet, c'est la propension de la matière à changer de volume en réponse à une variation de température. Cependant, ce phénomène est rarement utilisé comme une source de mise en mouvement de systèmes macroscopiques, en partie dû à ses faibles déplacements. Néanmoins, nous proposons d'utiliser l'expansion thermique de gaz dans un système microscopique pour générer un flux de gaz permettant de mesurer une vitesse angulaire. Le capteur inertielle basé sur l'expansion thermique possède les avantages d'une structure simple, d'un faible coût de fabrication, d'une forte résistance aux chocs (aucune présence de masse mobile solide) et d'un faible couplage entre la rotation et l'accélération [48, 49, 112].

Le gyro thermique MEMS à gaz étudié et fabriqué, est constitué de deux résistances de chauffe (résistances gauche H_L et droite H_R) et deux détecteurs de température T_1 et T_2 suspendus au-dessus d'une cavité, comme indiqué sur la figure 4.1. Le flux dû à l'expansion thermique est produit en chauffant et refroidissant alternativement les deux sources de chaleur, ce qui va créer un flux de gaz bidirectionnel entre les deux zones de la cavité. S'il n'y a pas de composante liée à l'accélération linéaire dans le plan X-Y alors le gyro fonctionne comme suit. Toute accélération de Coriolis liée à une mise en rotation du système va dévier le flux de gaz et produire un profil de température asymétrique, ce qui va induire une différence de température entre les deux détecteurs $\Delta T = T_1 - T_2$. Par exemple, s'il existe une rotation de l'axe dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, lorsque H_L est activée alors le flux de gaz est dévié vers T_2 et donc $\Delta T < 0$, alors que lorsque H_R est activée, le flux de gaz est dévié vers T_1 et donc $\Delta T > 0$. Sans rotation selon l'axe Z, il n'y a pas de déviation du flux de gaz, et, ce dernier est symétrique par rapport aux détecteurs et donc $\Delta T = 0$ [48, 49, 112].

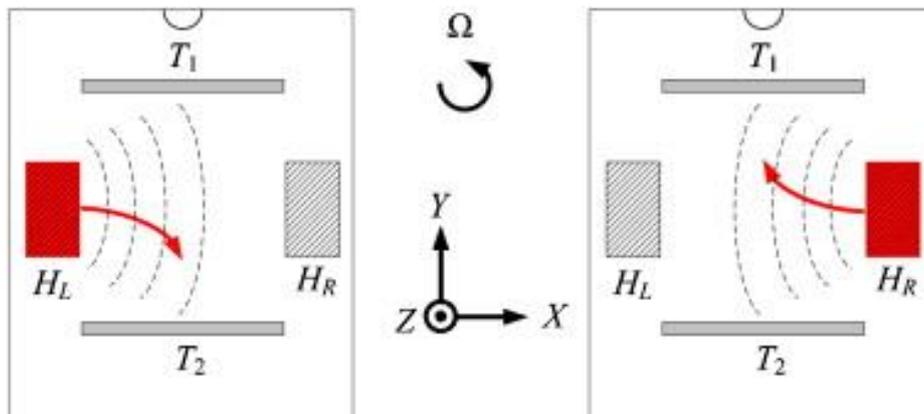


Figure 4.1 : Principe de fonctionnement utilisé pour le gyro basé sur l'expansion thermique [4]

4.2 Simulation numérique par éléments finis

Dans un premier temps, la simulation numérique a été réalisée en 2D, de façon à pouvoir observer et comprendre l'évolution de la température et de la vitesse du gaz, lors de son expansion.

4.2.1 Modélisation à deux dimensions avec un élément de chauffe

Pour cette étude, la géométrie choisie est simple et elle est composée d'une enceinte de section de 2 x 2 mm avec un élément central solide en platine de 100 x 1 μm . Pour les paramètres de simulation, on a choisi de fixer la température des parois de l'enceinte à 300 K et de remplir l'intérieur de l'enceinte avec un gaz, par exemple de l'air à pression atmosphérique, spécifié comme gaz idéal au niveau de la densité. L'élément central est utilisé comme un terme source, auquel on injecte une puissance ramenée au volume en W/m^3 . La simulation a été réalisée en régime transitoire avec un pas de temps de 2 μs pour un temps "infini".

À une puissance donnée, la forme de l'écoulement a été observée à l'aide d'une cartographie en température (Fig. 4.2 (a)) et d'un champ vectoriel de vitesse (Fig. 4.2 (b)), pour un temps correspondant au rapport cyclique de 25% des résistances de chauffe, comme expliqué au paragraphe 4.1.

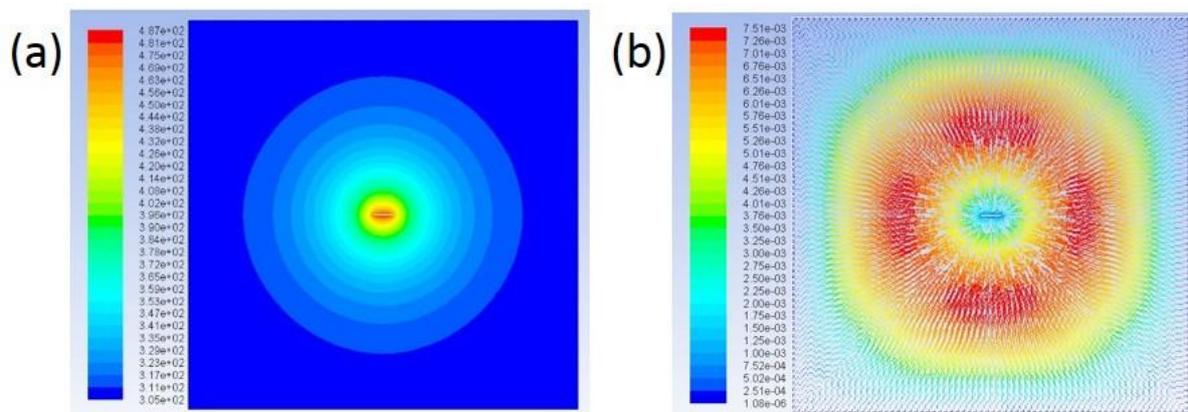


Figure 4.2 : Forme de l'écoulement du gaz à parti d'un élément central chauffant via une cartographie ; (a) en température ; (b) en champ vectoriel de vitesse

Il en résulte que la forme de l'écoulement du gaz est symétrique et que ce constat est valable pour tous les rapports cycliques utilisés expérimentalement. De plus, on peut noter que les vitesses générées sont de l'ordre du mm/s, ce qui est très inférieur aux vitesses utilisées pour le gyro présenté dans le chapitre 3 qui étaient de l'ordre de quelques m/s.

4.2.1.1 Évolution de la température et de la vitesse du gaz en fonction du rapport cyclique (RC)

Pour réaliser cette étude, on a utilisé tout d'abord quatre détecteurs virtuels placés à 300 μm de l'élément central, positionnés selon l'axe X et l'axe Y et en diagonale de ces axes, ce qui permet d'entourer l'élément chauffant et d'avoir une bonne représentation de l'image de la température tout autour de la résistance de chauffe. Une comparaison a été réalisée en terme de température et de vitesse, ce qui a permis d'en déduire une bonne corrélation entre ces quatre détecteurs. Cela a aussi permis de confirmer la symétrie de l'écoulement. On a ainsi pu tracer sur la figure 4.3 (a), l'évolution de la température et de la vitesse du gaz, l'air dans notre cas, pour un des détecteurs et à une puissance de chauffe donnée en fonction d'un temps. Sur la figure 4.3 (b), un zoom est réalisé sur une période de temps qui permet de visualiser de manière plus fine ce qui se passe pour des durées correspondant à celles des rapports cycliques utilisés.

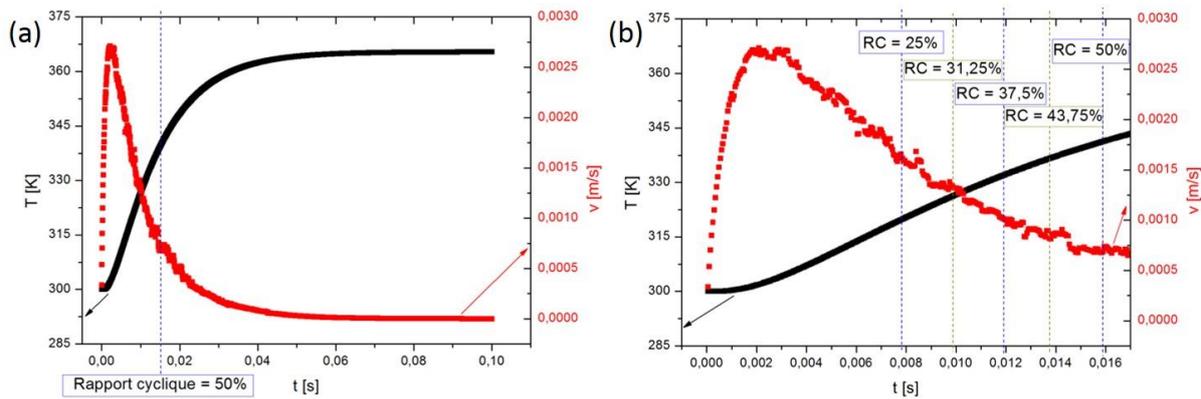


Figure 4.3 : Évolution de la température et de la vitesse au niveau d'un détecteur en fonction du temps ; (a) temps "infini" ; (b) zoom plus particulier pour définir les rapports cycliques utilisés

Sur la figure 4.3 (a), il est intéressant d'observer que la température atteint son équilibre thermique à partir d'un temps proche de 50 ms, ce qui correspond, à partir de ce moment-là, à un écoulement dominé par la convection. Or, pour la durée maximale du rapport cyclique utilisé, en l'occurrence un cycle de 50 % correspond à une durée de 15,76 ms, on montre que l'équilibre thermique n'est pas atteint (Fig. 4.3 (b)). Il en résulte qu'avec ce paramétrage au niveau du rapport cyclique, le système étudié présentera un écoulement dominé par l'expansion thermique.

On rappelle que le rapport cyclique correspond au temps d'activation d'une chauffe. La figure 4.4 est une représentation schématique du rapport cyclique de 31,25 % appliqué à chaque source de chaleur (sources droite (D) et gauche (G)). Donc plus le rapport cyclique est important, plus le temps d'activation d'une chauffe est long. On peut donc noter, à l'aide de la figure 4.3 (b), que plus le rapport cyclique est important, plus la température est élevée (courbe en noir), mais que d'un autre côté la vitesse d'écoulement sera plus faible (courbe en rouge) au niveau du détecteur. Le rapport cyclique a été modulé entre 25 et 50 %, par pas de 6,25 %, car les options technologiques utilisées pour la réalisation de la carte électronique nous ont contraint à ce choix-là.

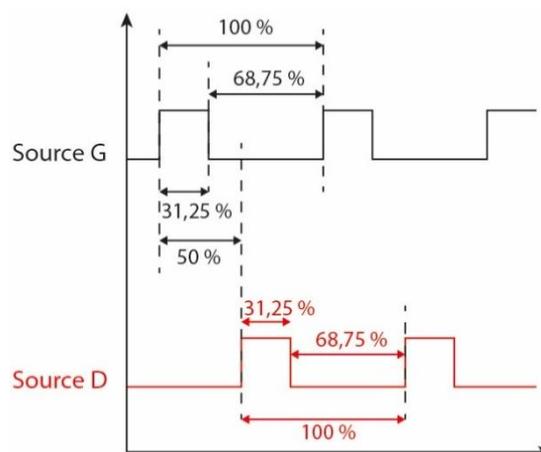


Figure 4.4 : Représentation schématique du rapport cyclique de 31,25 %

4.2.1.2 Influence de la puissance injectée dans un élément chauffant

Le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz) est l'échange convectif. La convection est un mode de transport d'énergie par la superposition des phénomènes de conduction, de l'accumulation d'énergie et du mouvement du milieu. La transmission de chaleur par convection dans un fluide peut se faire selon deux manières. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des mouvements dû à un gradient de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une action extérieure, comme une pompe, alors on dit que la convection est forcée [113, 114].

Lorsqu'une paroi échange de la chaleur par convection avec un fluide, la densité de flux de chaleur Q qu'elle échange est proportionnelle à la différence de température entre la paroi T_p et le milieu fluide extérieur T_f , multipliée par un coefficient d'échange de chaleur par convection h en $W.m^{-2}.K^{-1}$ qui tient compte des différentes propriétés physiques et cinématiques du fluide proche de la paroi [113, 114, 115] :

$$Q = h(T_p - T_f) \quad (4.1)$$

Ainsi, en augmentant la puissance injectée, la valeur moyenne de la température de l'élément chauffant va augmenter linéairement (Fig. 4.5 (a)), ce qui va aussi augmenter linéairement la température au niveau du détecteur (Fig. 4.5 (b)). Ce comportement est également valable pour les différents types de gaz (argon, Ar et hexafluorure de soufre, SF₆) qui seront utilisés pour d'autres expériences. Les résultats exposés, sur la figure 4.5, ont été obtenus pour un rapport cyclique de 50 % et restent valables au niveau de leur comportement pour les autres rapports cycliques. En conclusion, la puissance de chauffe injectée et le rapport cyclique auront très certainement un impact sur la sensibilité du capteur, puisque, souvent, dans l'étude de capteurs basés sur les échanges thermiques, on sait que plus les échanges sont importants, plus la sensibilité des capteurs augmentent.

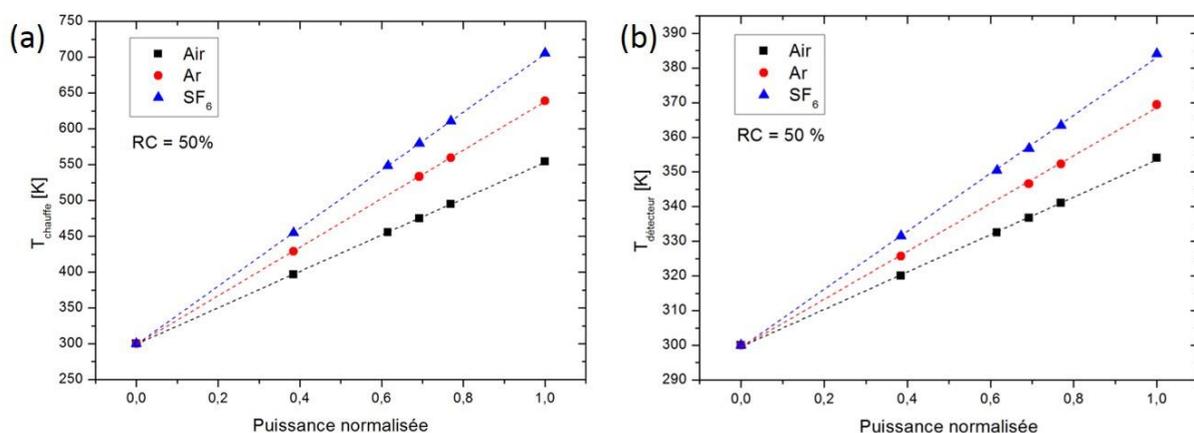


Figure 4.5 : Influence de la puissance injectée en fonction de la température au niveau ; (a) de l'élément chauffant ; (b) d'un détecteur virtuel

4.2.2 Modélisation à trois dimensions avec deux éléments de chauffe

4.2.2.1 Choix de géométrie

La cavité choisie est représentée par un cylindre de longueur de 3 mm et de diamètre de 3 mm (Fig 4.6), dimensions qui sont issues d'une moyenne volumique de celles du prototype expérimental. En effet, le maillage utilisé par rapport à une enceinte parallélépipédique est beaucoup plus simple. Cela permet d'utiliser un maillage structuré et d'éviter les angles, ce qui va donc réduire le nombre de nœuds du maillage, et par conséquent le temps de calcul est plus court et la convergence des simulations est plus rapide. Un pont central cylindrique de 10 μm de diamètre et de la longueur égale à celle de la cavité a été représenté. Ce pont est divisé en 3 parties comprenant les deux éléments de chauffe (sources D et G) séparés par un élément central de 300 μm non chauffé (Fig. 4.6). Ces choix ont été guidés entre autres par les réalisations technologiques des ponts à venir.

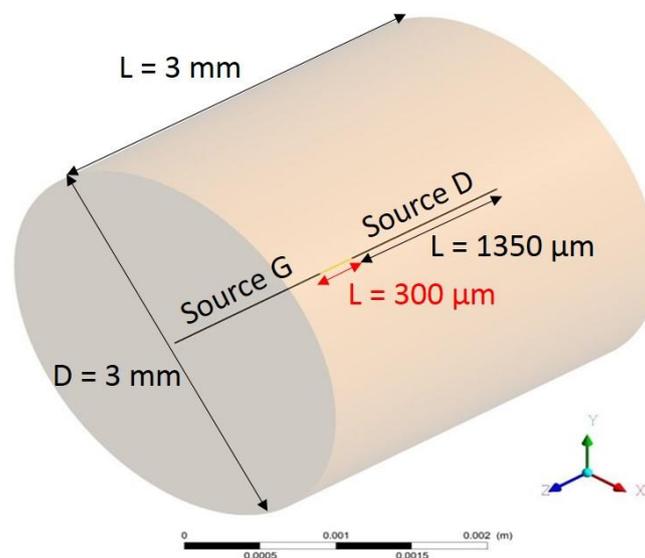


Figure 4.6 : Géométrie choisie pour le gyro à expansion thermique

La mise en mouvement du gaz, l'air dans notre cas, est due à l'injection de puissance électrique de façon alternative entre les deux sources situées sur le pont central. La détection est effectuée par des détecteurs virtuels placés à une distance de 300 μm de part et d'autre du pont central selon l'axe X et qui ont une longueur correspondant à celle de la cavité (3mm), un choix également guidé par les réalisations expérimentales. La mise en rotation du système est effectuée selon l'axe Y.

La figure 4.7 est un exemple de simulation pour une injection de puissance électrique réalisée pour un temps de 7,9 ms correspondant au rapport cyclique de 25 %. Cette figure représente la cartographie en température du gaz pour la source G (Fig. 4.7 (a)) et pour la source D (Fig. 4.7 (b)) pour un système non soumis à une rotation. La figure 4.7 (c) représente cette même cartographie en température mais de la différence entre le système soumis à une rotation ($\Omega = 300 \text{ }^\circ/\text{s}$) et le système stationnaire lorsque la source G est activée, et sur la figure 4.7 (d) dans le cas de l'activation de la source D.

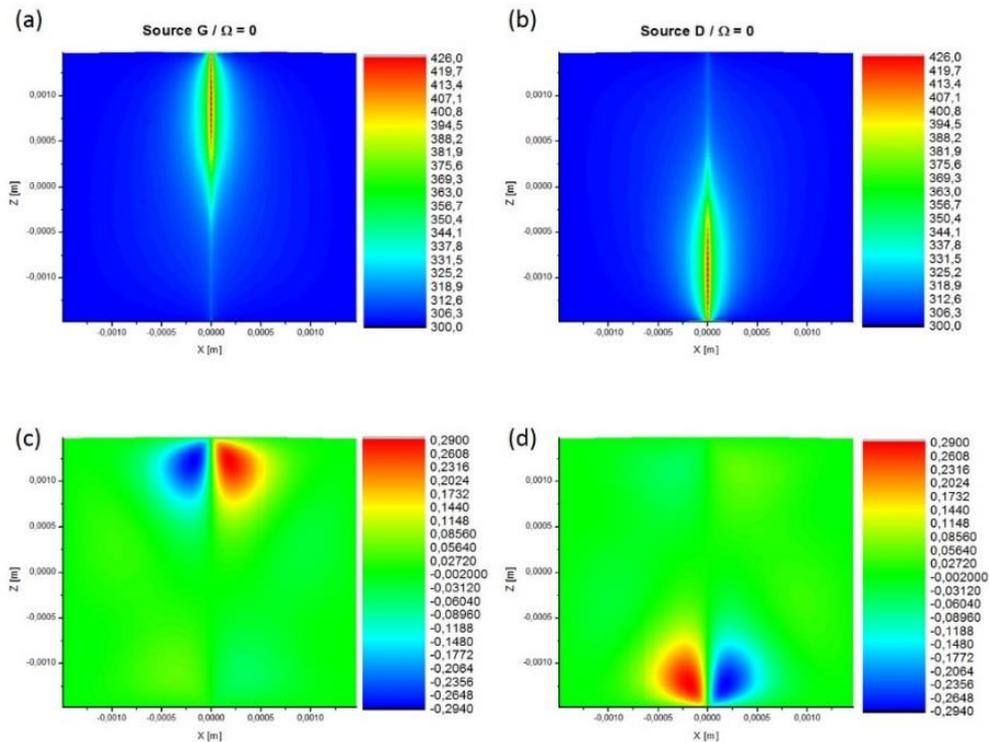


Figure 4.7 : Cartographie en température ; (a) source G activée pour $\Omega = 0$; (b) source D activée pour $\Omega = 0$; (c) source G activée pour différence entre $\Omega = 300$ °/s et $\Omega = 0$; (d) source D activée pour différence entre $\Omega = 300$ °/s et $\Omega = 0$

Sur ces deux dernières cartographies, on peut noter que les zones chaudes et froides ne se situent pas du même côté selon la source activée. En effet, ceci est dû à la direction de l'écoulement qui est inversée à chaque alternance de l'activation d'une source permettant la mise en mouvement du flux de gaz, ce qui est cohérent avec le principe de fonctionnement présenté au paragraphe 4.1.

4.2.2.2 Étude des signaux issus de la simulation numérique

Pour vérifier la validité du comportement du dispositif au phénomène gyroscopique, dans un premier temps, les signaux issus de la simulation numérique et en particulier ceux donnant la sensibilité du capteur ont été analysés. Puis, on les a comparés à ceux présentés dans les travaux de A. Leung et al. [111, 112].

L'alternance de chauffe est donc réalisée en injectant une puissance de façon alternative dans les résistances de chauffe, avec dans le cas de la figure 4.8 (a)-(b), un rapport cyclique de 50 %. La figure 4.8 (c) montre, quant à elle, l'évolution de la température pour les deux sources. Sur cette dernière, on observe l'élévation, puis la baisse de température de chaque source en lien avec l'injection par alternance de la puissance. La figure 4.8 (d) illustre, enfin, la différence de température entre deux détecteurs virtuels, correspondant à l'image de la sensibilité du capteur, ici, situés à 300 μm de part et d'autre du pont central et obtenue pour une rotation de 100 °/s. On remarque que la valeur de cette grandeur change de signe avec l'alternance, ce qui permet de valider le fait qu'il y a bien une mise en mouvement du flux par expansion thermique.

Ce point est également vérifié à partir des résultats de l'étude en vitesse de gaz dans la cavité qui montre bien, elle aussi un changement de direction de cette dernière en fonction de l'alternance. À titre de comparaison, la figure 4.9 présente les signaux théoriques des travaux d'A. Leung [111]. Ces résultats sont confirmés par l'étude numérique menée dans la thèse "Spurious signals in thermal MEMS gyroscope" de P. Shooshtari en 2013 [112] (Fig. 4.10). On peut noter une assez bonne corrélation entre les signaux issus des différentes études. En se basant sur ces résultats, la mise en œuvre de l'alternance de chauffe du modèle numérique utilisé est validée.

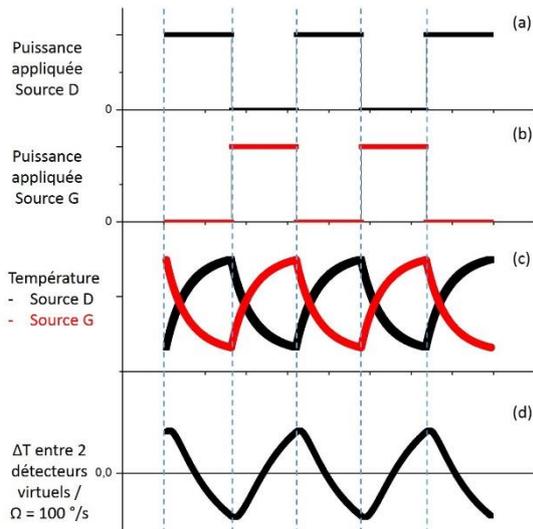


Figure 4.8 : Formes des signaux numériques

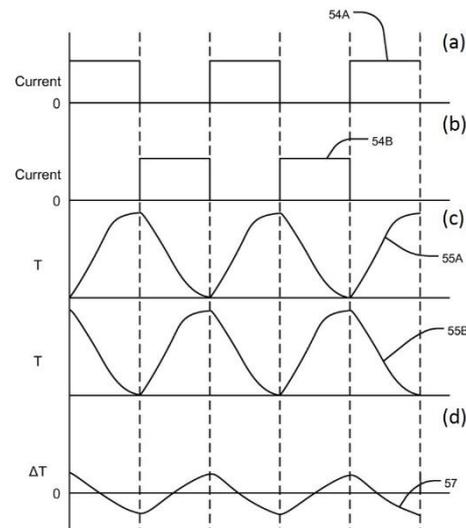


Figure 4.9 : Signaux présentés par A. Leung [111]

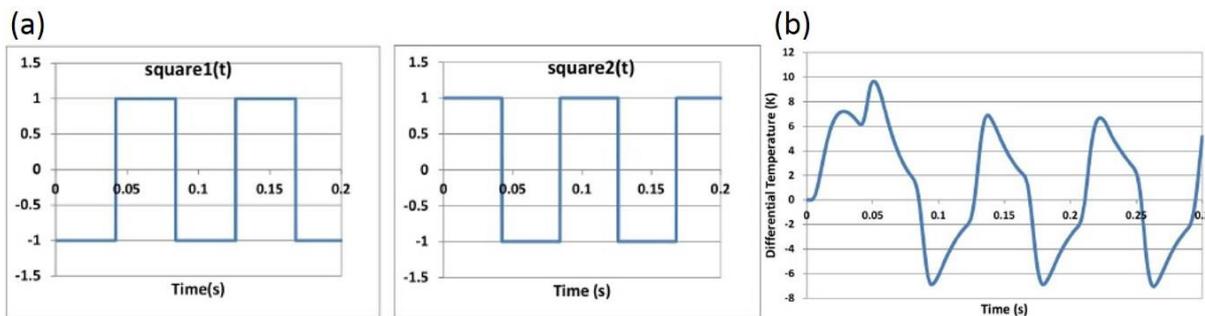


Figure 4.10 : Signaux numériques ; (a) réalisation de l'alternance de chauffe ; (b) forme du signal de la différence de température [112]

Ensuite, comme expliqué dans le paragraphe 2.2.3, on utilisera dans la pratique une méthode par détection synchrone pour extraire la sortie gyroscopique. Dans cette technique, un signal de référence de même fréquence et phase identique au signal d'entrée et correspondant au signal de l'alternance de chauffe, est multiplié avec le signal reçu issu du pont de Wheatstone. Puis, le signal généré est intégré sur un temps spécifique et converti en une composante continue qui passera ensuite par un filtre passe-bas pour atténuer le bruit alternatif. La figure 4.11 montre une représentation schématique et simple de la méthode par détection synchrone utilisé pour extraire la sortie du gyroscope. Par conséquent, le signal de sortie est redressé tous les demi-cycles de manière synchrone avec l'alternance de chauffe. La valeur continue du signal traité est, dans notre cas, proportionnelle à la vitesse de rotation appliquée [112].

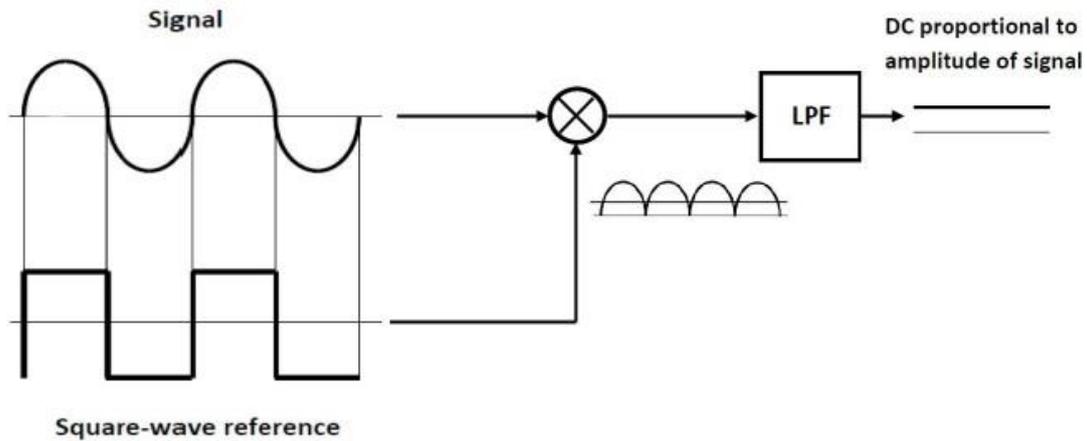


Figure 4.11 : Représentation schématique de la méthode par détection synchrone [2]

Dans le cas de la simulation numérique, le procédé est le même mais il s'agit d'un traitement mathématique du signal tout simplement, où on multiplie la différence de température par un signal créneau de référence permettant de redresser le signal. Ensuite, le signal obtenu est intégré pour obtenir la sortie du capteur (Fig. 4.12) [112].

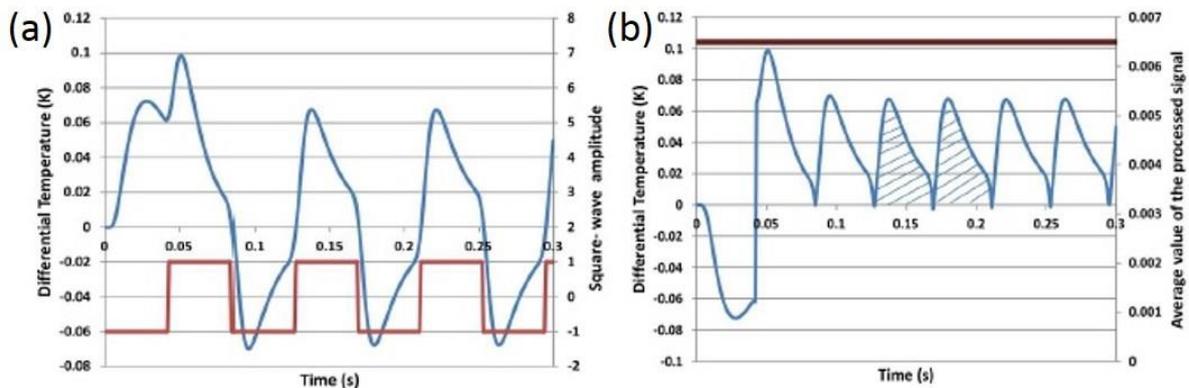


Figure 4.12 : Traitement des signaux pour extraire la sortie du gyroscope ; (a) différence de température pour 360 °/s et le signal créneau de référence ; (b) le signal redressé et la valeur continue [112]

Les résultats de nos simulations sont présentés sur la figure 4.13. La figure 4.13 (a) représente la différence de température obtenue en fonction de plusieurs vitesses de rotation. Le signal est ensuite redressé comme on peut le voir sur la figure 4.13 (b). Et enfin sur la figure 4.13 (c), la valeur moyenne du signal précédent est représentée, ce qui permet d'obtenir la différence de température moyenne en fonction de la vitesse de rotation. Cette dernière illustre la sortie gyroscopique de notre dispositif. La sensibilité ainsi obtenue est de l'ordre de 10^{-2} mK/(°/s) et la non-linéarité est de 0,1 %.

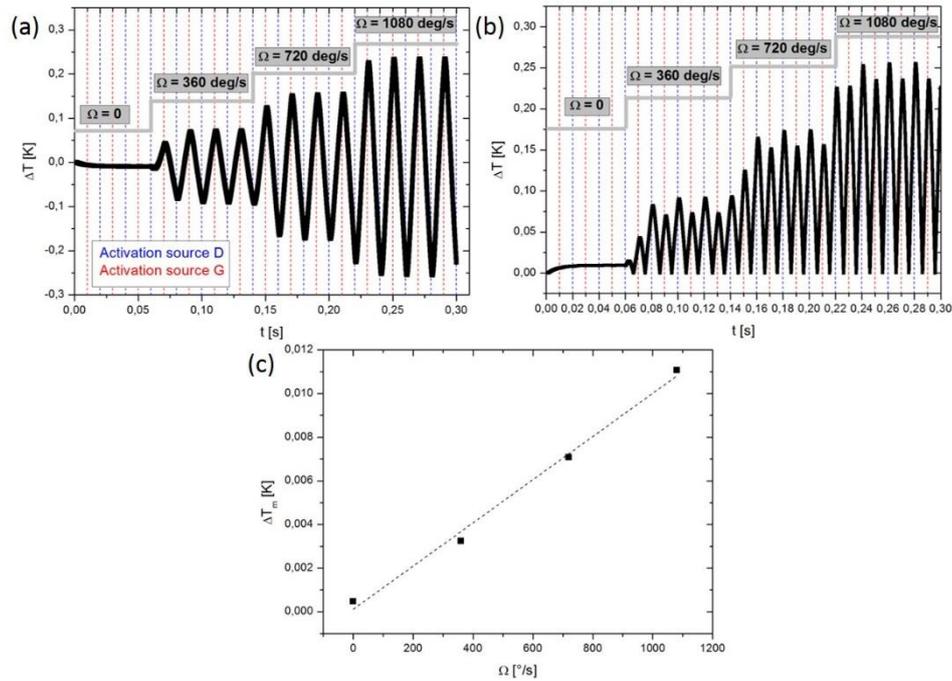


Figure 4.13 : Extraction de la sortie du gyro par le traitement des signaux de la détection ; (a) ΔT pour différentes vitesses de rotations ; (b) redressement du signal (a) ; (c) sortie du gyro en fonction de la vitesse de rotation

En conclusion, en se basant sur les travaux présentés par A. Leung et al. [48, 111, 112], on a pu valider l'utilisation du modèle numérique en 3D pour en extraire la sortie gyroscopique, ce qui permettra par la suite de comparer ces résultats avec les résultats expérimentaux.

4.2.2.3 Influence du rapport cyclique sur la sensibilité

Comme on a pu voir dans le paragraphe 4.2.1.1, le rapport cyclique de la chauffe est lié au temps d'activation qui permet d'injecter la puissance électrique dans chaque résistance de chauffe. Le rapport cyclique peut être modulé entre 25 et 50 %, par pas de 6,25 %. Au-delà de 50 %, les deux chauffes sont activées en même temps, ce qui n'est pas compatible avec le fonctionnement voulu, car les deux flux de gaz générés seraient alors dans des directions opposées. On a aussi pu montrer que plus le rapport cyclique était important, plus la température était élevée mais, *a contrario*, la vitesse d'écoulement du gaz était plus faible.

Sur la figure 4.14, la différence de température entre deux détecteurs virtuels situés à 300 μm de part et d'autre du pont central en fonction de la vitesse de rotation appliquée pour les différents rapports cycliques a été reportée. On peut remarquer, tout d'abord, que le comportement est linéaire sur la plage de mesure considérée, quel que soit le rapport cyclique.

Issu de ces résultats, on peut en déduire la sensibilité du capteur qui correspond à la pente de chaque courbe, pour les différents rapports cycliques. Ainsi, comme le montre la figure 4.15, plus le rapport cyclique est important, plus la sensibilité est élevée. En effet, l'augmentation du rapport cyclique engendre une température de chauffe maximale plus élevée, par conséquent, on obtient une augmentation plus rapide et plus élevée de la température du gaz. Cela se traduit par des échanges de chaleur plus importants au niveau du détecteur et donc cela crée également une différence de température plus élevée.

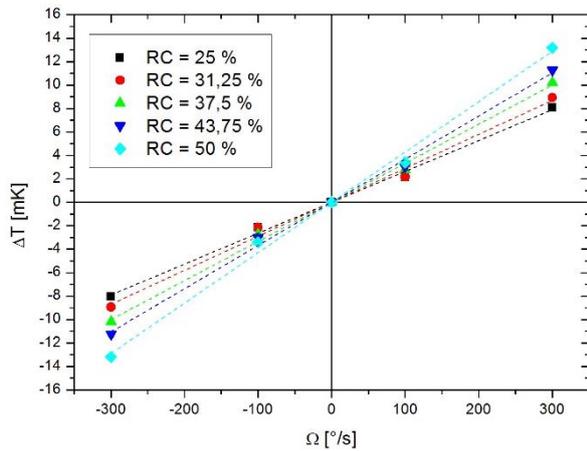


Figure 4.14 : $\Delta T = f(\Omega)$ pour les différents RC

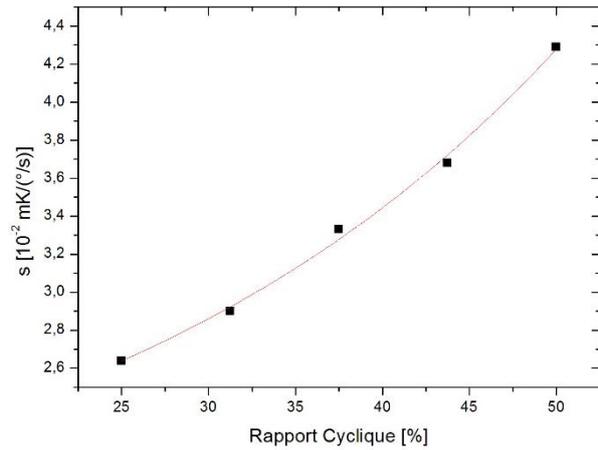


Figure 4.15 : Évolution de la sensibilité en fonction du RC

On peut donc en conclure que, dans les conditions réalisées (nature de gaz, pression), le rapport cyclique de 50 % permet d'obtenir la sensibilité la plus élevée.

4.2.2.4 Optimisation de la position des détecteurs

L'expansion thermique est un phénomène qui génère un mouvement de gaz avec une vitesse relativement faible (de l'ordre du mm/s) répartie selon un gradient dans la cavité. La figure 4.16 illustre ce gradient en fonction de la position des détecteurs étudiée qui est de 100 μm à 500 μm , par pas de 100 μm , par rapport à l'axe de symétrie (pont central) (voir Fig. 4.18). On note que la vitesse d'écoulement moyenne du gaz est maximale pour le détecteur de 100 μm , puis qu'elle diminue progressivement.

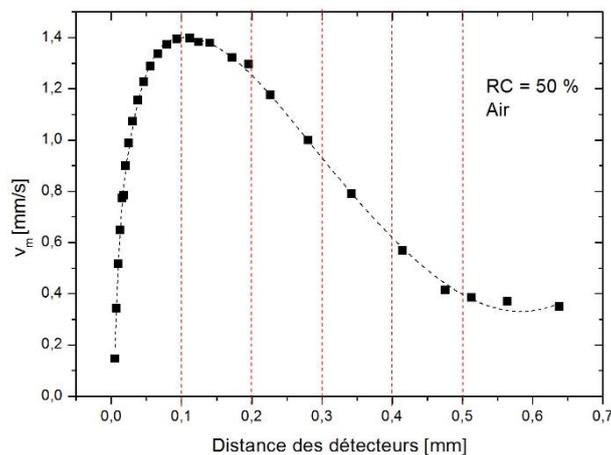


Figure 4.16 : Gradient de vitesse entre le pont central et la position des détecteurs étudiés

Il est donc intéressant d'étudier l'évolution de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs. Sur la figure 4.17, la sensibilité obtenue pour un rapport cyclique de 50 % et une gamme de mesure de ± 300 $^{\circ}/\text{s}$, en fonction de la position des détecteurs est reportée. Sur cette figure, on note que la position optimale permettant d'obtenir la sensibilité la plus élevée, se situe à une distance de 300 μm entre les chauffes et les détecteurs.

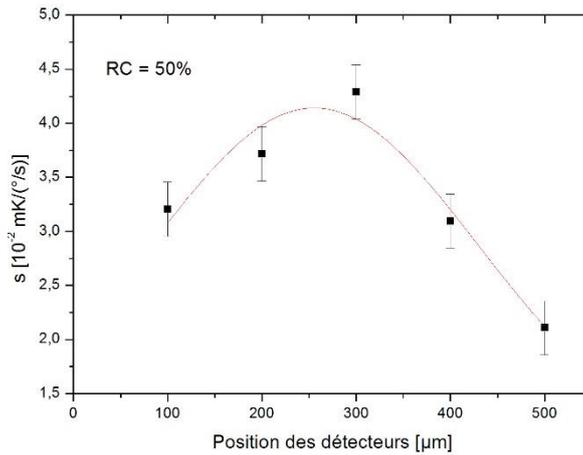


Figure 4.17 : Évolution de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs

On aurait pu s'attendre à ce que les positions proches du pont central permettent d'obtenir une meilleure sensibilité du fait que la vitesse d'écoulement soit la plus importante. Cependant ceci peut s'expliquer par le fait que la position de 300 μm permet d'être placé dans une zone d'échanges thermiques plus grande, ce qui crée une différence de température plus importante et donc une sensibilité plus élevée, comme on peut le voir sur la figure 4.18. Cette dernière représente une cartographie des champs de la différence de température entre le système en rotation ($\Omega = 300$ $^{\circ}/\text{s}$) et le système stationnaire. Les différentes positions étudiées sont représentées par un trait en pointillé et le trait plein illustre la position du pont central.

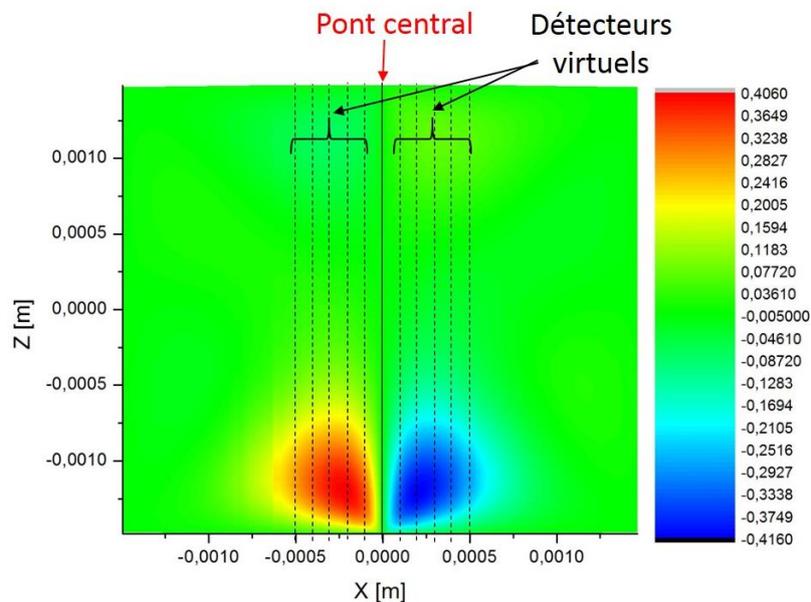


Figure 4.18 : Cartographie en champ de température, pour la source D activée, de la différence entre $\Omega = 300$ $^{\circ}/\text{s}$ et $\Omega = 0$

La position optimale de 300 μm a été vérifiée et elle reste valable pour les différents rapports cycliques de fonctionnement de la chauffe, comme on peut le voir sur la figure 4.19.

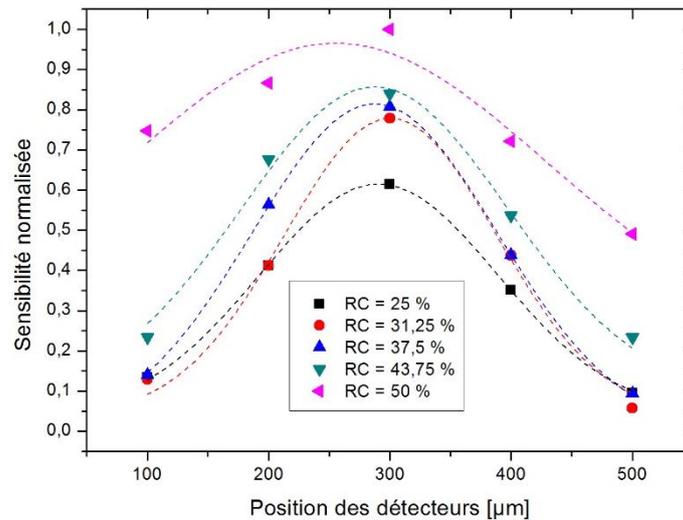


Figure 4.19 : Évolution de la sensibilité en fonction de la position des détecteurs pour les différents rapports cycliques étudiés

4.2.3 Conclusion

Pour conclure cette partie simulation, on a vu que le modèle numérique en 2D a permis d'appréhender le comportement de l'écoulement en température et en vitesse d'un gaz par expansion thermique. Les vitesses du jet de gaz dû à l'expansion thermique sont relativement faibles, de l'ordre du mm/s, comparées à celles que l'on peut obtenir avec le gyro à jet de gaz qui sont de l'ordre du m/s. Des paramètres tels que le rapport cyclique de fonctionnement de la chauffe et la puissance qu'on y injecte ont été étudiés pour percevoir au mieux leurs influences sur la température de la résistance de chauffe, sur celle du gaz, ainsi que sur la vitesse d'écoulement de ce même gaz.

Le modèle nous a donc permis de montrer que la température de chauffe de l'élément, mais aussi la température au niveau du détecteur varie linéairement avec la puissance de chauffe injectée. De plus, l'augmentation du rapport cyclique de fonctionnement de la chauffe permet logiquement d'obtenir une température de gaz plus importante, mais qui engendre, *a contrario*, une vitesse moyenne plus faible, globalement divisée par 2 entre le rapport de 25 et 50 %, et cela quel que soit la nature du gaz.

Ensuite, un modèle numérique en 3D plus proche du prototype expérimental a été développé pour réaliser les études comparatives plus significatives des résultats entre expériences et simulations. Ce modèle a été, dans un premier temps, confronté aux résultats des travaux réalisés par A. Leung et al. [48, 111, 112]. Cette étude a concerné, principalement, la validation du principe de l'alternance de chauffe ainsi que le traitement du signal permettant d'extraire la sortie du gyro. Ainsi, par analogie sur ces travaux, on a pu confirmer que le modèle développé était pertinent, ce qui permettra de le comparer avec l'expérience.

À partir de ce modèle, on a aussi pu déterminer la réponse du système afin d'obtenir sa sensibilité qui est de l'ordre de 10^{-2} mK/(°/s) avec une non-linéarité de 0,1%. L'influence du rapport cyclique d'alimentation des chauffes sur la sensibilité a aussi pu être étudiée. En utilisant l'air comme gaz de travail, on a pu voir que plus le rapport est important, plus la sensibilité est élevée. En effet, comme cela a pu être montré dans la modélisation en 2D, un

rapport cyclique plus important permet d'obtenir une température plus importante du gaz, ce qui engendre un échange de chaleur plus élevé et qui crée, *in fine*, une différence de température plus grande. Ainsi, le rapport cyclique de 50 % serait le plus pertinent dans l'objectif d'obtenir une sensibilité la plus élevée possible.

Enfin, le positionnement optimal pour les détecteurs a été étudié et son optimum se situe à une distance de 300 μm entre les chauffes et les détecteurs. Cette position sera celle que nous utiliserons pour le développement expérimental du dispositif.

4.3 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, les résultats expérimentaux vont être explicités et comparés avec ceux de la partie simulation en 3D. Comme présenté dans la partie 2.2.3, le gyro basé sur l'expansion thermique nécessite une électronique associée plus complexe. Ainsi, deux cartes ont été réalisées pour les signaux d'alimentation, de sortie et de traitement, dont une carte logique qui a été positionnée dessous la carte analogique (Fig. 4.20). La première permet de générer et contrôler les signaux numériques réalisant l'alternance de chauffe entre les deux résistances. Pour cela, un signal créneau est utilisé avec un rapport cyclique de 25 à 50 % par pas de 6,25 %, contrôlé par une série de quatre commutateurs. Le gyro est placé sur la carte supérieure (carte analogique), qui contient les circuits de contrôle et de traitement du signal afin d'extraire la mesure gyroskopique (Fig. 4.20). Les premières études ont été faites avec une cavité remplie d'air qui sera remplacé plus tard par d'autres gaz.

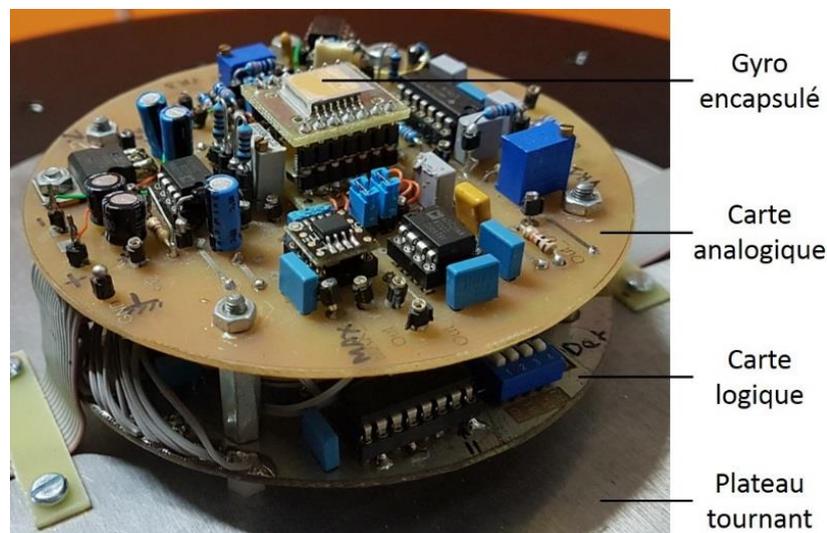


Figure 4.20 : Photo du gyro à expansion thermique et son électronique associée

Pour ce gyro, avant toute étude du phénomène gyroskopique et compte tenu du caractère "prototype" des cartes électroniques, il est nécessaire de vérifier tous les signaux des parties logique et analogique, ainsi que les transmissions d'une carte à l'autre. Il s'agit principalement des signaux permettant la réalisation de l'alternance de chauffe et de celui de la détection

synchrone. Enfin, il est nécessaire de régler et vérifier les courants injectés dans les différentes résistances de chauffe et de détection.

4.3.1 Choix du courant de détection

La détection est assurée par un montage en pont de Wheatstone (Annexe C) qui comprend quatre résistances : deux composants discrets à valeur ajustable et deux thermorésistances qui sont les détecteurs de température du capteur. Le montage est alimenté par une tension fixe de 5V et un potentiomètre est utilisé pour permettre d'équilibrer les courants dans chaque branche du pont. De plus, comme le déséquilibre du potentiel mesuré par les détecteurs est relativement faible, l'augmentation du courant dans les branches de détection, tout en maintenant une faible élévation de température des détecteurs par effet Joule, va permettre d'augmenter la sensibilité du pont. Le choix a donc été d'utiliser le courant de détection le plus important possible de l'ordre de 1,5 mA, ce qui donne une puissance injectée de l'ordre de 0,46 mW et une élévation de température de 10 K, tout en conservant la linéarité du pont de Wheatstone.

4.3.2 Linéarité et sensibilité du système

Les paramètres utilisés, pour cette étude, sont un rapport cyclique de 50 %, un courant de détection et de chauffe de 1,5 mA et 8,5 mA ($P = 18 \text{ mW}$), ce qui correspond à une température des éléments de l'ordre de 310 K et 490 K, respectivement. Ces paramètres sont appliqués au dispositif puis contrôlés avant la mise en rotation.

La réponse du système avec une mise en rotation allant jusqu'à $\pm 1080 \text{ }^\circ/\text{s}$ est tracée sur la figure 4.21. Ces résultats sont obtenus en utilisant un gain d'amplification électronique de 81820. La pente de la régression linéaire, tracée en se basant sur la modélisation par la droite des moindres carrés, montre que le gyro présente une sensibilité de $0,4 \text{ mV}/(^\circ/\text{s})$. La valeur de R^2 , carré du coefficient de corrélation, indique que la sortie du gyro à expansion thermique est une fonction linéaire de la vitesse angulaire, et que la non-linéarité de la réponse est de l'ordre de 0,1 % jusqu'à la gamme de mesure considérée qui est la valeur maximale applicable avec le système actuel. En effet, la taille de l'électronique, les différentes fixations et les différents câblages ne nous permettent pas d'appliquer de plus grande vitesse de rotation. Cependant, il ne semble faire aucun doute que l'étendue de mesure devrait être plus importante que celle appliquée actuellement. Pour cela, nous espérons, dans le futur, élaborer une électronique beaucoup plus intégrée et compacte capable de supporter de plus grandes vitesses de rotation.

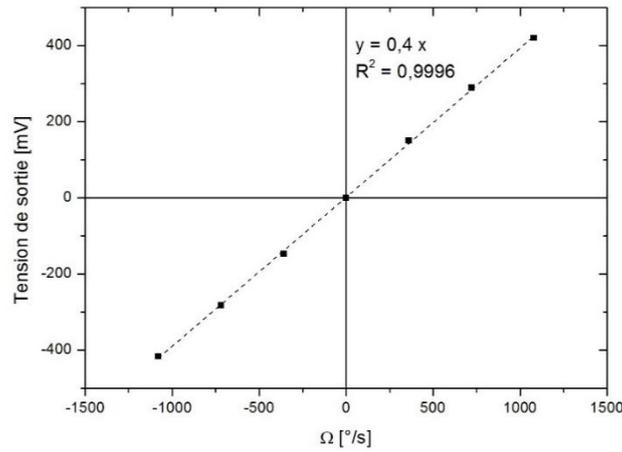


Figure 4.21 : Sortie du système en fonction de la vitesse de rotation

Ensuite, afin de comparer les réponses simulées et expérimentales, le signal de sortie en tension (V_m) a été converti en une différence de température équivalente en K. À partir du montage présenté en annexe C, on peut remonter à la tension de déséquilibre du pont qui est dans notre cas :

$$V_m = V_{in} \left(\frac{2R\Delta R}{(R+R_{0,m})^2 - \Delta R^2} \right) \approx V_{in} \left(\frac{2R\Delta R}{(R+R_{0,m})^2} \right) \quad (4.2)$$

car $\Delta R^2 \ll (R + R_{0,m})^2$

or $\Delta R = \Delta T R_{0,m} \alpha_{0,m}$

on obtient donc :

$$\Delta T = \frac{V_m (R+R_{0,m})^2}{V_{in} 2R R_{0,m} \alpha_{0,m}} \quad (4.3)$$

avec ΔT : la différence de température, ΔR : la variation des résistances de détection, R : résistances discrètes utilisées dans le pont de Wheatstone, $R_{0,m}$ et $\alpha_{0,m}$: paramètres thermorésistifs moyens des deux détecteurs.

Sur la figure 4.22, la sortie du gyro en température en fonction de la vitesse de rotation a été reportée. On peut noter une différence assez importante entre les deux résultats issus des deux expériences. Les causes de cette différence peuvent être multiples mais nous en retiendrons essentiellement deux.

Tout d'abord, les géométries des cavités simulées et expérimentales ne sont pas identiques (Fig. 4.23). En effet, nous avons choisi un modèle plus simple pour la simulation alors que la géométrie de la cavité réelle est plus complexe et un peu plus grande que celle de la simulation, ce qui peut expliquer en partie les écarts trouvés.

Ensuite, en simulation, les détecteurs sont des détecteurs virtuels constitués de gaz. Or le gaz, dans notre cas l'air, est peu conducteur thermique contrairement au fil de platine qui l'est davantage. De plus, on a vu en simulation (Fig. 4.18) que les principales zones d'échanges de chaleur se situaient sur un quart à un tiers du fil. Donc dans la réalité, le restant du fil peut jouer le rôle de dissipateur thermique et par conséquent être plus froid que le détecteur virtuel.

Cela montre aussi que nous devons améliorer notre modèle afin que les résultats issus de la simulation soient le plus proche possible de la réalité, avec notamment l'intégration dans le modèle numérique de détecteurs massifs.

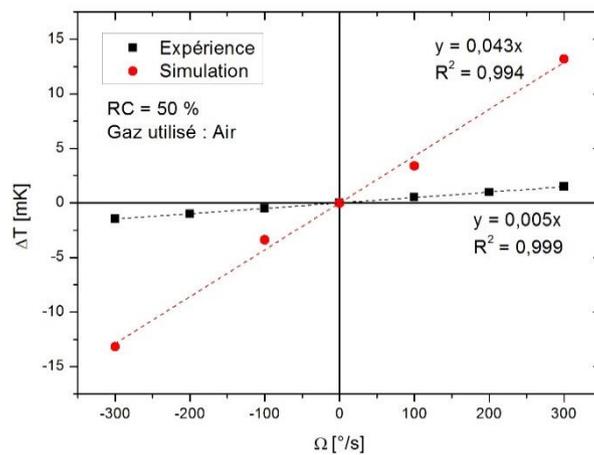


Figure 4.22 : Comparaison résultats expérimentaux et simulation pour le rapport cyclique de 50 %

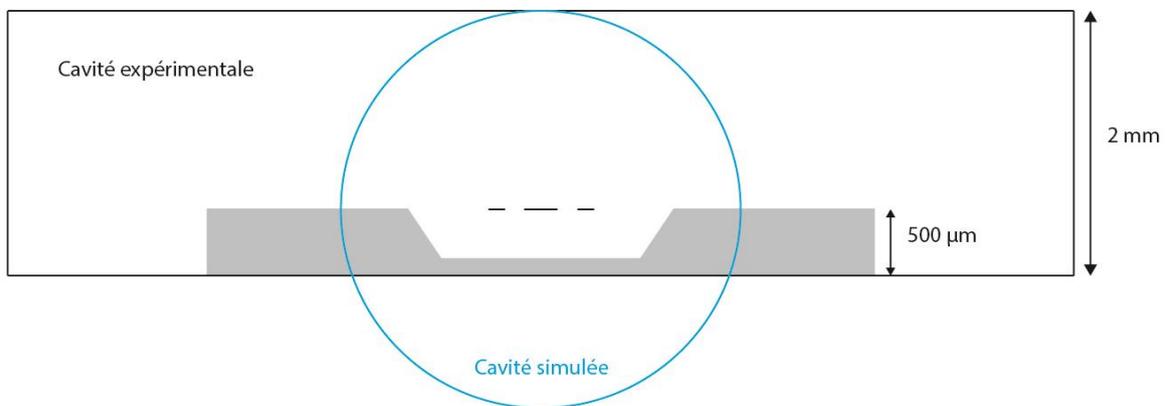


Figure 4.23 : Vue en coupe des cavités expérimentale et simulée

4.3.3 Influence de la puissance de chauffe sur la sensibilité

Dans un premier temps, afin de s'assurer que la sortie n'était pas perturbée par d'autres phénomènes physiques que l'expansion thermique, le système a été soumis à une vitesse de rotation sans alimenter les résistances de chauffe mais en alimentant les parties détections. On a pu ainsi observer qu'il n'y avait pas de variation du signal de sortie. Ceci a permis de montrer que la mise en mouvement du flux de gaz et donc le signal de sortie avait pour origine l'expansion thermique.

Ensuite, on a pu voir dans le paragraphe 4.2.1.2, que l'augmentation de la puissance dans les résistances de chauffe permettait d'obtenir une variation linéaire de la température des éléments chauffants ainsi que celle des détecteurs. On va aussi pouvoir appréhender l'influence de la puissance de chauffe sur la sensibilité du capteur.

Les résultats de cette étude sont reportés sur la figure 4.24, où l'on a tracé la sensibilité relative en fonction de la puissance injectée dans les résistances de chauffe pour un rapport cyclique de 50 %. On peut noter que l'augmentation de la puissance dans les résistances de chauffe améliore la sensibilité du dispositif. En effet, une puissance de chauffe plus élevée augmente la température du gaz qui une fois dévié, augmente à son tour la température au niveau du détecteur.

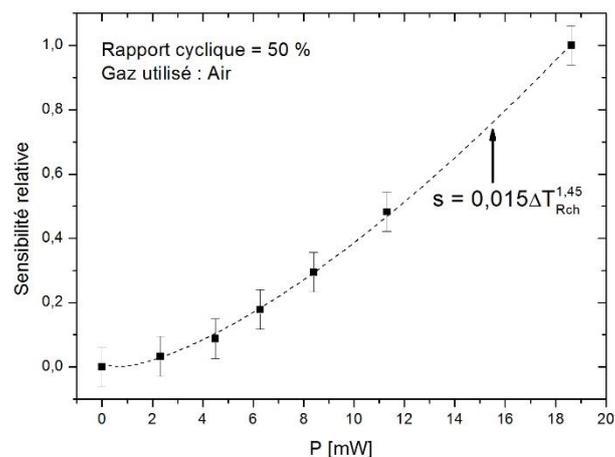


Figure 4.24 : Évolution de la sensibilité en fonction de la puissance injectée dans les résistances de chauffe

La meilleure courbe d'interpolation est donnée par une fonction puissance d'exposant proche de 3/2 entre la puissance de chauffe et la sensibilité. On aurait donc un modèle comportemental, où la sensibilité du capteur serait proportionnelle à l'élévation de température de la résistance de chauffe à la puissance proche de 3/2. Ainsi, dans le but d'obtenir la sensibilité la plus importante, on aurait intérêt d'utiliser la puissance de chauffe la plus élevée. Cependant à partir de 18 mW, on s'approche de la puissance supportable pour les résistances de chauffe suspendues ce qui limite l'augmentation de la puissance qu'on y injecte.

4.3.4 Influence de la nature du gaz sur la sensibilité

Une force étant proportionnelle à une masse, dans le cas de la force de Coriolis, on peut supposer que plus le gaz sera dense, plus la force sera importante, et par conséquent la déviation du gaz et donc la sensibilité seraient plus importantes. C'est pourquoi, on a étudié la sensibilité du capteur avec des gaz de différentes densités encapsulés dans la cavité. Les résultats sont reportés sur la figure 4.25, où on a représenté la sensibilité en fonction de la densité, toutes deux normalisées, pour quatre gaz différents : le diazote (N_2), l'argon (Ar), le krypton (Kr) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) dont les propriétés thermophysiques sont données dans le tableau ci-après, dans les conditions standards.

Tableau 4.1 : Propriétés thermophysiques dans les conditions standards des gaz étudiés

	Masse volumique ρ [kg.m ⁻³]	Conductivité thermique λ [mW.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Chaleur massique C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Diffusivité thermique $a = \lambda/\rho C_p$ [m ² .s ⁻¹]
N ₂	1,145	25,835	1041,374	$2,17.10^{-5}$
Ar	1,6335	17,746	521,553	$2,08.10^{-5}$
Kr	3,4314	9,363	249,2	$1,1.10^{-5}$
SF ₆	6,0383	13,412	668,99	$0,33.10^{-5}$

Cette étude a été réalisée avec une puissance de chauffe de 18 mW et un rapport cyclique de 37,5 %. Le choix de ce rapport cyclique sera explicité dans la suite du document. On observe alors que plus le gaz est dense, plus la sensibilité est élevée selon une loi comportementale proche d'une loi linéaire.

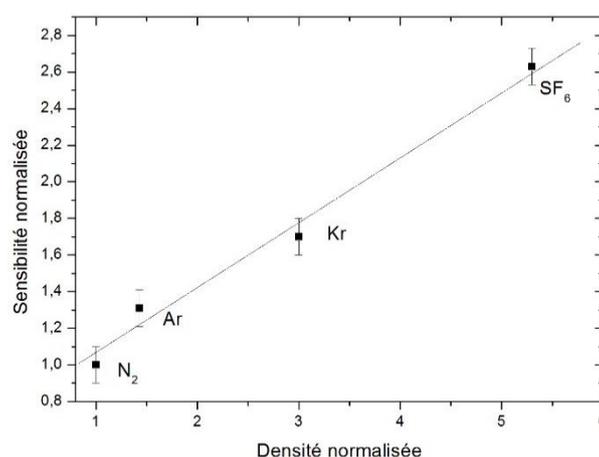


Figure 4.25 : Évolution de la sensibilité en fonction de la densité du gaz encapsulé

A contrario, on peut noter sur la figure 4.26 que plus la diffusivité thermique augmente, plus la sensibilité est faible. Dans cette étude, il y a deux facteurs à prendre en compte selon la nature du gaz. En effet, en premier, c'est la conductivité thermique qui décrit la capacité du gaz à conduire la chaleur en terme d'amplitude, c'est-à-dire, que plus elle est importante plus la transmission de chaleur est élevée [115, 116, 117]. Ensuite, il y a la diffusivité thermique qui décrit la capacité à transmettre la chaleur en terme de vitesse au sein du corps étudié [115, 116, 117]. Ainsi, pour des gaz comme l'argon et le diazote qui présentent de grandes conductivité et diffusivité thermiques, la chaleur transmise par les résistances de chauffe va se diffuser plus loin dans la cavité, moyennant la température dans la cavité. Par conséquent, la différence de température entre les deux détecteurs générés par le flux asymétrique sera plus faible pour ces deux gaz. C'est pourquoi, un gaz comme le SF₆ qui présente une conductivité et une diffusivité thermique plus faible que ces derniers, va permettre d'obtenir une différence de température plus élevée et par conséquent une sensibilité plus importante.

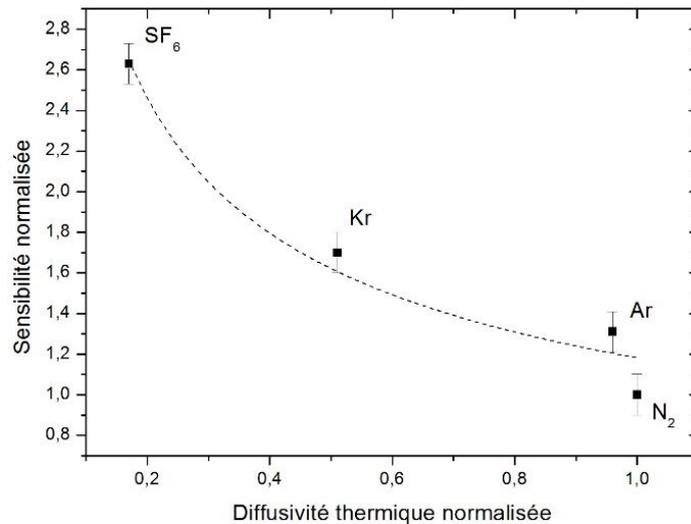


Figure 4.26 : Évolution de la sensibilité en fonction de la diffusivité thermique du gaz encapsulé

4.3.5 Influence du rapport cyclique sur la sensibilité

En comparant les mesures expérimentales et les résultats numériques de l'influence du rapport cyclique sur la sensibilité, on observe que l'évolution de la sensibilité est relativement identique dans les deux cas, comme on peut le voir sur la figure 4.27. On voit que l'augmentation du rapport cyclique permet une augmentation de la sensibilité. Par conséquent, dans ces conditions et avec de l'air, il est plus intéressant de travailler avec un rapport cyclique de 50 %, afin d'obtenir la sensibilité la plus élevée.

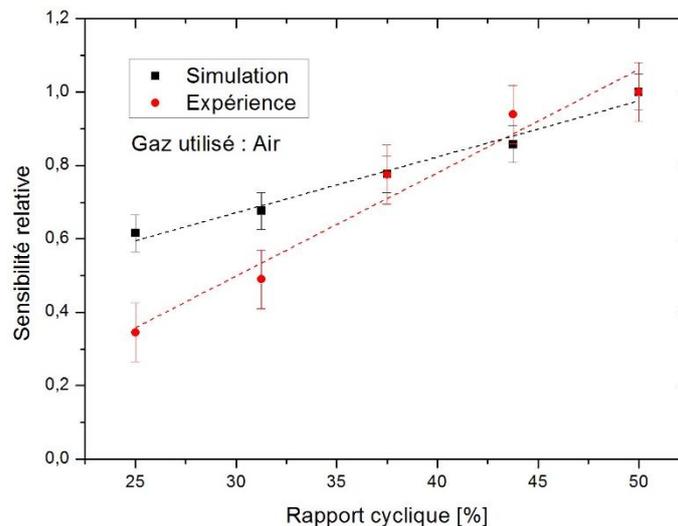


Figure 4.27 : Évolution de la sensibilité en fonction du rapport cyclique

Néanmoins, ce constat n'est pas valable pour tous les gaz. En effet, la même étude a été menée pour les différents gaz présentés dans le paragraphe 4.3.4 en fonction du rapport cyclique. Comme on le voit sur la figure 4.28, on remarque que pour des gaz plus denses que

le diazote et l'argon tels que le krypton et l'hexafluorure de soufre, le rapport cyclique optimal, c'est-à-dire, le rapport pour obtenir la sensibilité la plus élevée, se situe à 37,5 %. Ceci est confirmé par les travaux réalisés par A. Leung et al. [48], présentés sur la figure 4.29, où l'on voit l'évolution de la sensibilité normalisée obtenue expérimentalement en fonction du rapport cyclique avec comme gaz de travail, le SF₆. De plus, il convient de noter qu'au-delà du rapport cyclique de 50 %, la puissance moyenne de chauffe sera importante, en raison du chevauchement des deux signaux d'activation de la chauffe. Néanmoins, en dépit de cette augmentation, la figure 4.29, pour des cycles supérieurs à 50 %, montre une diminution de la sensibilité qui peut être expliquée par une vitesse d'écoulement plus lente du flux de gaz liée à l'activation simultanée des deux chauffes qui engendre des flux se déplaçant dans des directions opposées.

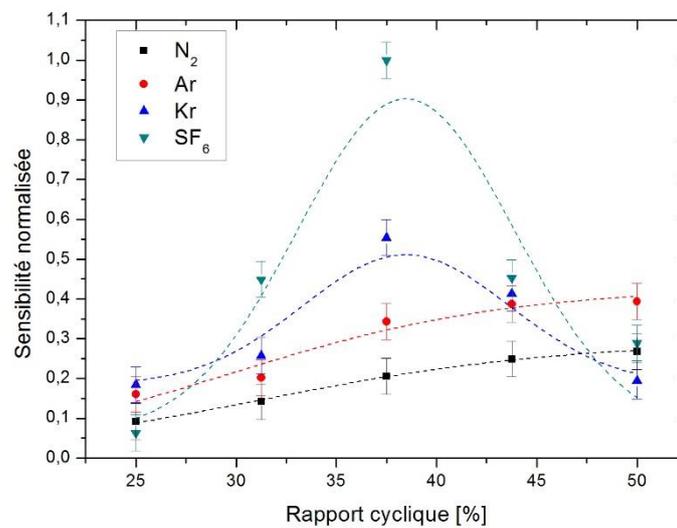


Figure 4.28 : Évolution de la sensibilité normalisée selon la nature du gaz en fonction du rapport cyclique

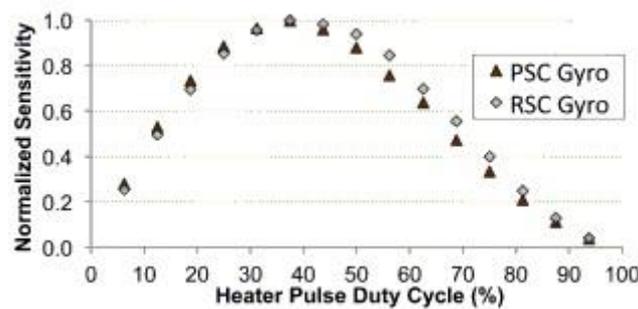


Figure 4.29 : Résultats expérimentaux de A. Leung de l'influence du rapport cyclique sur la sensibilité avec du SF₆ [48]

Ainsi, selon la nature du gaz, le rapport cyclique de fonctionnement pour les résistances de chauffe présente par exemple une gamme optimale qui se situe à 50 % et 37,5% pour le diazote et l'hexafluorure de soufre, respectivement.

4.3.6 Essais chocs pour le gyro à expansion thermique

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, le gyro à expansion thermique est plus “intégré” que le gyro à jet de gaz, de par sa méthode de génération du flux utilisée et de par sa conception. Il est donc intéressant de réaliser des essais chocs sur ce type de capteur pour déterminer, dans un premier temps, leur résistance mécanique et en particulièrement pour les ponts suspendus et ensuite, pour observer ou non les modifications possibles sur la mesure gyroscopique. L’électronique associée à ce type de capteur étant, pour l’instant, trop encombrante, l’étude s’est uniquement portée sur la tenue aux chocs du gyro avec son support PCB.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur le savoir-faire de notre partenaire, l’Institut de recherche franco-allemand de Saint-Louis (ISL) qui dispose d’une longue expérience sur le durcissement des systèmes électroniques soumis aux fortes accélérations. Cette expérience est naturellement issue de ses travaux de recherches sur diverses activités dans le domaine notamment des canons électromagnétiques.

4.3.6.1 Moyens d’essais

L’ISL a donc une très grande expérience des tests sous très fortes accélérations. En effet, il dispose de nombreux équipements comme les accélérateurs électromagnétiques (TICAT, ...) (Fig. 4.30 (a)) ou l’installation SIBREF (Soft In-Bore REcovery Facility) qui permet l’accélération d’un projectile au moyen d’un canon à poudre avec récupération jusqu’à l’arrêt à l’intérieur même du tube de lancement, présenté sur la photo de la figure 4.30 (b).

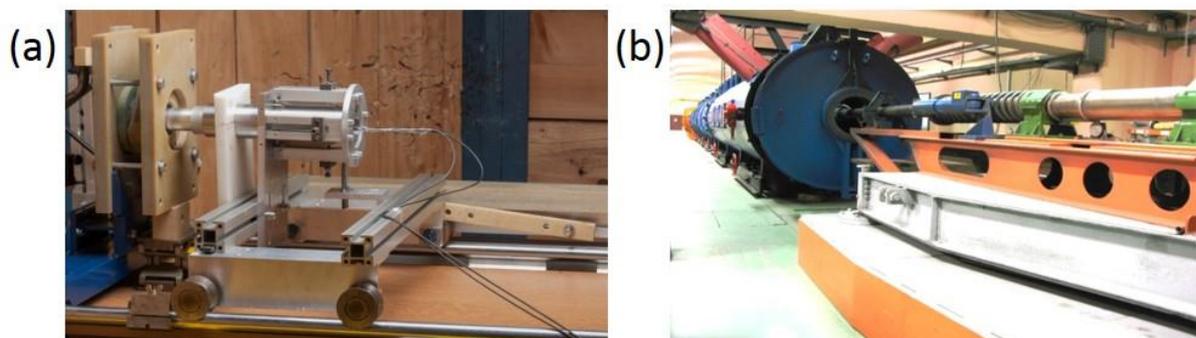


Figure 4.30 : (a) Accélérateur électromagnétique TICAT ; (b) installation SIBREF

Pour ce test, c’est le moyen TICAT qui a été utilisé où le gyro doit être embarqué au sein d’un véhicule test (Fig. 4.31). Ce dernier se compose de trois parties dont la première qui est centrale et qui supportera le gyro, et puis de deux enveloppes extérieures dites de propulsion et de protection.



Figure 4.31 : Véhicule cargo avec gyro embarqué

Dans ce véhicule, le support PCB du gyro est placé de manière normale à l'axe d'accélération afin de tester non seulement les ponts suspendus dans l'axe *a priori* le moins solide mécaniquement mais aussi pour éviter l'arrachement des pattes du boîtier du gyro (Fig. 4.32 (a)). L'ensemble est encore consolidé mécaniquement avec des plaques de serrage comme présenté sur la figure 4.32 (b).

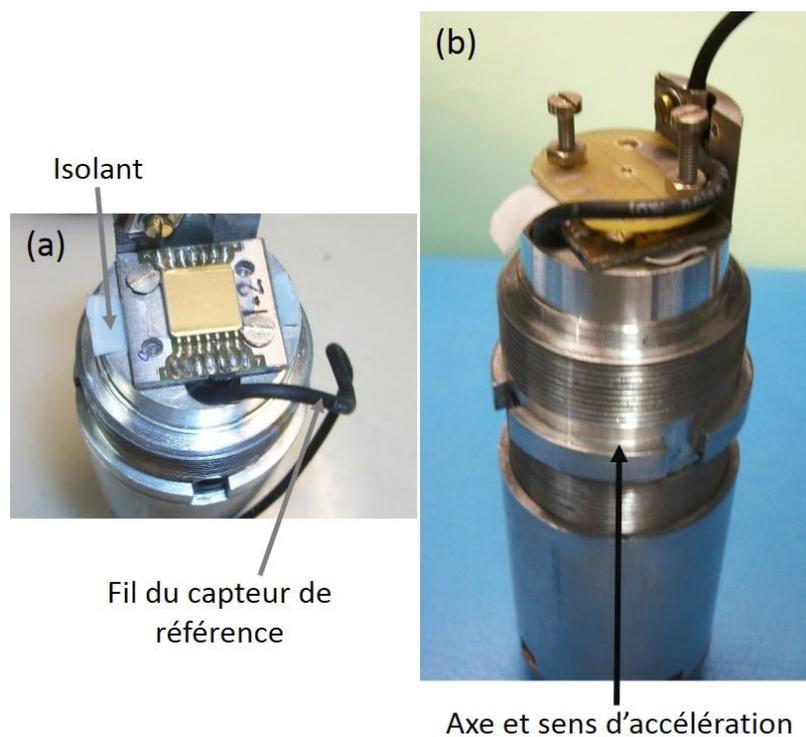


Figure 4.32 : Position et fixation de l'ensemble (gyro + support PCB) sur le cargo

4.3.6.2 Essais et résultats

Les tests chocs ont été réalisés avec l'accélérateur électromagnétique TICAT sur lequel sont générées des forces de propulsion dans un élément conducteur électrique du véhicule d'essai. Comme propulseur, un accélérateur à bobine d'induction qui utilise les forces de répulsion entre deux champs magnétiques, est utilisé. Le premier champ magnétique correspond au champ de propulsion qui est généré par une bobine de propulsion fixe parcourue par un courant. Le second champ magnétique orienté dans le sens opposé est généré par induction dans l'élément conducteur du véhicule d'essai et, les deux actions combinées conduisent à générer des forces d'accélération. Le véhicule subit ainsi une accélération sans un besoin quelconque de transmission mécanique.

Le banc d'essai TICAT se décompose en cinq sous-ensembles : la source d'énergie commandée par le biais d'un commutateur à semi-conducteurs équipé d'une diode Crowbar, la bobine de propulsion (bobine stator), le tube de vol libre, la bobine véhicule (bobine de translation) nommé véhicule d'essais ou cargo, ainsi que l'ensemble de freinage pour récupérer la partie mobile et l'équipement de métrologie. La durée et l'amplitude de l'accélération du véhicule d'essais sont déterminées par la capacité du banc de condensateurs utilisés et par l'inductance de la bobine de propulsion employée. Ces temps peuvent varier de 25 à 1600 μ s. La tension de charge du banc de condensateurs détermine, quant à elle, l'amplitude de l'impulsion d'accélération. L'utilisation d'une diode Crowbar permet d'éviter un profil de courant oscillant négatif.

Deux gyros ont été testés, appelés GTC 1-2 et GTC 2-2, selon les profils d'accélération représentés sur la figure 4.33 qui correspondent à une accélération de l'ordre de 10 000 g pour un temps de 300-400 μ s.

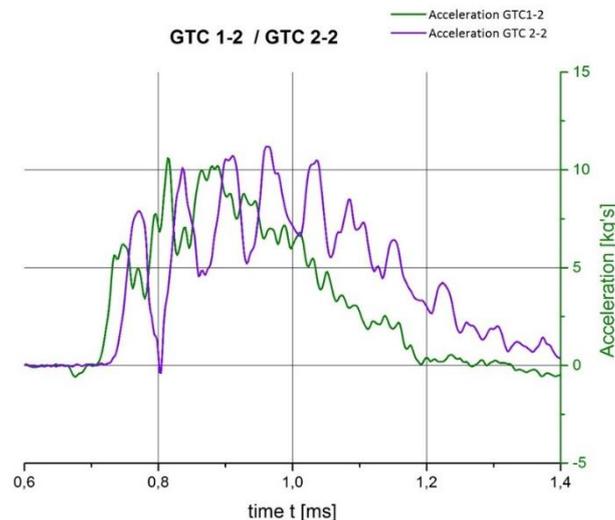


Figure 4.33 : Courbes illustrant l'accélération subie pour les deux gyros

À la suite de ces chocs, l'observation visuelle des deux gyros montre qu'ils ont tenu mécaniquement. En effet, aucune patte du boîtier, aucun pont suspendu ou encore aucune soudure ont été arrachés ou endommagés. La caractérisation du gyro après choc a pu ainsi être

réalisée afin de déterminer l'impact sur la mesure gyroscopique. Cette caractérisation a été réalisée sur le GTC 2-2 et dans les mêmes conditions expérimentales que les mesures effectuées avant choc. Ces dernières correspondent à une puissance de chauffe de 8 mW, une puissance dans les détecteurs de 0,46 mW et pour un rapport cyclique de 43,75 %. La figure 4.34 illustre la sortie du gyro en fonction de la vitesse de rotation pour des mesures avant et après le choc.

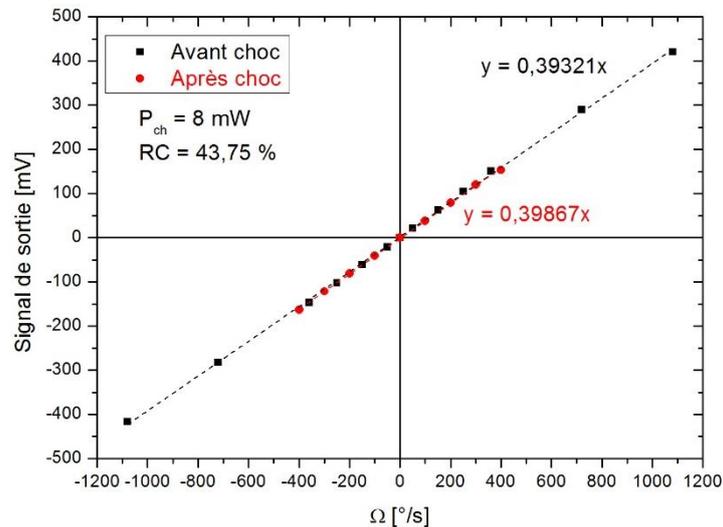


Figure 4.34 : Signal de sortie en fonction de la rotation pour le GTC 2-2 avant (en noir) et après (en rouge) le choc

En conclusion, le gyro et son support PCB ont tenu mécaniquement à un choc d'amplitude 10 000 g et de durée 300-400 μs . De plus, comme le montre la figure 4.34, les caractéristiques du gyro ont été conservées après avoir subi le choc. Ainsi, le gyro à expansion thermique semble utilisable dans des conditions de choc de l'ordre de 10 000 g, ce qui valide notre hypothèse sur la tenue aux chocs pour ce type de capteur. Pour de futurs prototypes, il serait intéressant de réaliser des tests pour des chocs plus importants et une électronique plus compacte afin de déterminer si l'ensemble (gyro et son électronique associée) peut résister à de telles sollicitations.

4.4 Comparaison des deux gyros développés

Dans ce paragraphe, on a voulu faire une courte synthèse comparative de l'étude des deux gyros au travers de leurs paramètres d'utilisation et de fonctionnement, ainsi que des caractéristiques, des avantages et inconvénients de chacun, que l'on a présenté sous la forme d'un tableau ci-après. Les points d'améliorations de ces deux dispositifs seront, quant à elles, présentées dans la conclusion générale.

	Gyro à jet de gaz	Gyro à expansion thermique
Paramètres d'utilisation et/ou technologiques : Dimension du gyro sans électronique Vitesse du gaz Pression du gaz Électronique associée	40 x 20 x 10 mm 1 à 10 m/s 1 atm Relativement "simple"	8 x 8 x 2 mm ≈ 1 mm/s 1 atm "complexe"
Paramètres de fonctionnement : <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse du gaz (v_g) - Taille de la cavité - Position des détecteurs - Puissance de chauffe (P_{ch}) - Nature du gaz - Rapport cyclique 	Influence Oui => Si v_g ↗ => S ↘ et EM ↗ Oui => Si dimension ↘ => S ↘, EM ↗ et bande passante ↗ (<i>a priori</i>) Oui Oui => Si P_{ch} ↗ => S ↗ Oui => <i>a priori</i> à étudier Pas concerné	Influence Difficile à étudier Oui => Si dimension ↗ => S ↗ et EM ↗ Oui => sur la sensibilité uniquement Oui => Si P_{ch} ↗ => S ↗ Oui => Gaz plus dense => S ↗ Oui => Optimum de fonctionnement selon la nature du gaz
Caractéristiques : Sensibilité (S) Étendue de mesure (EM) Linéarité dans l'EM Axes de détection Résistances chocs	≈ 1 mK/(°/s) ≈ 200 °/s 1 % Z	≈ 10 ⁻² mK/(°/s) > 1 000 °/s : limite non atteinte 0,1 % Z Oui jusqu'à 10 000 g / 400 μs

	Gyro à jet de gaz	Gyro à expansion thermique
<p>Avantages / Inconvénients :</p>	<p>- Génération du flux par un système externe => faible tenue aux chocs</p> <p>- Stabilité du jet de gaz à étudier</p> <p>- Vitesse d'écoulement élevée</p> <p>- Faible EM</p> <p>Amélioration possible :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des dimensions • Utilisation de détecteurs "ponctuels" • Autre gaz plus dense à étudier <p>- Assez bonne sensibilité</p> <p>- Système plus difficile à intégrer</p> <p>- Température du gaz (si option choisie) => Consommation électrique élevée</p> <p>- Utilisation des détecteurs en anémomètre à fil chaud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduire la consommation • Sensibilité améliorée • Stabilité du jet de gaz amélioré 	<p>- Système intégré simple (expansion gaz) => bonne tenue aux chocs</p> <p>- Bonne stabilité</p> <p>- Vitesse d'écoulement faible</p> <p>- Grande EM</p> <p>Nécessite une amélioration de l'électronique : Connaître les limites du capteur</p> <p>- Faible sensibilité</p> <p>Amélioration possible :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de 2 paires de détecteurs • Détecteurs "ponctuels" • Augmentation de la taille de la cavité <p>- Système "intégrable"</p> <p>- Faible consommation électrique</p> <p>- Pas d'autres possibilités de fonctionnement, actuellement</p>

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le gyro à expansion thermique a été étudié par simulation numérique et expérimentalement. Dans un premier temps, un modèle numérique en 2D a été mis en place avec un seul élément chauffant. Il a permis d'observer et d'appréhender le comportement du gaz lors de son écoulement par expansion thermique. On a pu déterminer que la température de chauffe de l'élément, ainsi que celle au niveau d'un détecteur quel que soit sa distance de la chauffe présente un comportement linéaire avec la puissance injectée dans la chauffe. De plus, il a été identifié que l'augmentation du rapport cyclique de fonctionnement de la chauffe permet une augmentation de la température du gaz, mais, *a contrario* que la vitesse moyenne d'écoulement du gaz diminue et reste faible avec des valeurs de l'ordre du mm/s.

Puis, un modèle numérique en 3D a été développé pour mieux appréhender le phénomène gyroscopique et observer les zones d'échanges thermiques. Une validation de ce modèle a été rendue possible, en se basant sur les travaux d'A. Leung et al. [48, 111, 112], et aussi en analysant les différents signaux permettant d'extraire le signal de sortie du système. Ceci, nous a permis de réaliser, par la suite, une étude comparative quantitative avec les résultats issus de l'expérience. On a pu en déduire, une position optimale qui a été évaluée autour de 300 μm de la chauffe, quel que soit le rapport cyclique utilisé, position que nous avons utilisée lors de la mise en œuvre expérimentale.

Un prototype fabriqué par les techniques de la microélectronique a été réalisé puis monté et mis en place sur le plateau tournant, pour réaliser l'étude gyroscopique. Ce système nécessite un choix et un contrôle de la puissance injectée dans les détecteurs et dans les résistances de chauffe, ainsi qu'un rapport cyclique de fonctionnement de la chauffe. Un comportement linéaire a été observé entre la réponse du système et la vitesse de rotation permettant d'obtenir la sensibilité du capteur. Ce comportement est obtenu avec une non-linéarité de 0,1 % sur une gamme de mesure minimum de ± 1080 °/s. En améliorant, notre montage expérimental, on pourra étendre cette gamme de mesure et voir les limites de notre dispositif.

Différents paramètres influençant la sensibilité du capteur tels que la puissance de chauffe, la nature du gaz et le rapport cyclique ont été étudiés. Ces études ont permis de montrer que l'augmentation de la puissance de chauffe engendre une température du gaz plus élevée donc une différence de température plus importante, et par conséquent, une augmentation de la sensibilité. Ainsi, la puissance de chauffe maximale de $P = 18$ mW, avant rupture des ponts suspendus, a permis d'obtenir la sensibilité la plus importante. Ensuite, on a aussi montré que plus le gaz est dense, plus la sensibilité est grande, malgré une diminution de la diffusivité thermique. Ainsi, le fonctionnement optimal d'un point de vue de la sensibilité correspond à l'utilisation du gaz SF_6 avec un rapport cyclique de fonctionnement de la chauffe de 37,5 % et qui permet d'obtenir la meilleure sensibilité ($s = 0,0184$ mK/(°/s)) avec une non-linéarité de 0,1 %.

En comparant les résultats de simulation et de l'expérience, le comportement de la réponse du système en fonction de la vitesse de rotation présente une bonne corrélation, avec néanmoins une différence d'amplitude assez importante au niveau de la sensibilité. Ceci peut s'expliquer par le fait que la cavité réelle présente des dimensions plus complexes que la cavité simulée. Ainsi, une nouvelle géométrie présentant une forme et des dimensions équivalentes au dispositif expérimental devra être réalisée, ainsi que l'utilisation de détecteurs non virtuels pour permettre une comparaison quantitative plus proche de la réalité.

Néanmoins, on a pu voir que la sensibilité de ce dispositif reste faible par rapport à celle du gyro à jet de gaz mais que l'étendue de mesure est bien plus importante avec une meilleure linéarité. De plus, ce gyro à expansion thermique est un dispositif beaucoup plus intégré et compatible avec les applications souhaitées, où l'encombrement est un paramètre critique. Cependant, il nécessite une électronique associée relativement complexe mais qui une fois optimisée permettrait à ce dernier d'être utilisé dans les conditions souhaitées (résistance à des chocs extrêmes).

Conclusion et perspectives

Depuis plus de vingt ans, de très nombreux gyros ont été développés. La plupart d'entre eux utilisent une ou deux masses suspendues, le plus souvent vibrantes, pour mesurer les vitesses de rotation. Cependant ce type de capteurs inertiels présente plusieurs problèmes inhérents à leur structure comme par exemple une fatigue mécanique, l'apparition de bruit vibratoire ou plus particulièrement, une faible résistance aux chocs ou aux vibrations de fortes amplitudes.

Les capteurs gyroscopiques MEMS à gaz que nous présentons dans ce manuscrit, ne présentent pas ces problèmes de résistances mécaniques et ils sont capables de supporter des chocs de plusieurs milliers de g ou dizaines de milliers de g. Le principe de fonctionnement de ces gyromètres est basé sur la modification des échanges thermiques par la force de Coriolis dans un fluide chauffé localement lorsqu'ils sont soumis à une vitesse de rotation. La détection est assurée par une paire de détecteurs thermiques comme, par exemple, des thermocouples ou des thermo-résistances.

Dans un premier temps, indépendamment des deux modes de génération du flux, l'analyse théorique des phénomènes physiques qui se déroulent dans le fluide lorsqu'il est soumis à une rotation, a permis de mieux comprendre le principe de fonctionnement d'un gyromètre thermique. Néanmoins, le modèle développé n'admet pas de solution analytique simple à extraire permettant de comprendre le comportement du gyro. C'est pourquoi, l'utilisation de la simulation numérique basée sur la méthode des volumes finis, à l'aide du logiciel Ansys Fluent, a été nécessaire pour l'étude de notre système.

Ce travail de thèse a eu, ainsi, pour but d'étudier numériquement et expérimentalement deux types de gyro thermique MEMS à gaz, afin de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu et les paramètres qui impactent leurs caractéristiques en terme de sensibilité et d'étendue de mesure, en particulier. Ces deux gyros développés présentent deux principes différents pour la mise en mouvement du flux de gaz. Le premier est appelé gyro à jet de gaz et il est basé sur un flux de gaz laminaire généré par une micro-pompe externe, alors que le second, appelé gyro thermique à gaz, fonctionne avec un déplacement de gaz généré par expansion thermique.

Le gyro à jet de gaz que nous avons étudié et développé présente des dimensions mésoscopiques, ce qui a permis, tout d'abord, de faire une étude phénoménologique et comportementale à l'aide d'un jet de fumée. Cette expérience associée à la modélisation numérique en trois dimensions a donné lieu à l'étude d'un premier paramètre qui est la vitesse d'écoulement. En effet, cette dernière a une influence importante sur les caractéristiques du capteur car elle est en lien direct avec la force de Coriolis. On a aussi pu compléter ces résultats par une étude expérimentale de l'influence de ce paramètre, qui a été ensuite comparée avec les résultats de la modélisation numérique. Il en ressort que plus la vitesse est élevée, plus la sensibilité est faible, mais *a contrario*, plus l'étendue de mesure est importante.

En complément, d'autres paramètres ont été étudiés et une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques, nous ont permis de valider le modèle 3D cylindrique utilisé. De ce fait, ce dernier a permis de mieux visualiser les zones d'échanges thermiques, et de mieux appréhender l'influence de paramètres telles que la position et la taille des détecteurs sur les caractéristiques du gyro.

Cependant, ce gyro à jet de gaz dans sa forme actuelle utilisant une pompe pour générer le jet de gaz, ne permet pas de respecter les conditions d'utilisations souhaitées (résistance à des chocs extrêmes : $> 10\,000\text{ g}$). Néanmoins, on a présenté dans la partie bibliographique des solutions potentielles en remplacement de ce système, et qui pourront être mis en place sur de futurs prototypes. Ces méthodes tels que la décharge Corona, la transpiration thermique ou encore une réserve de gaz sous pression présentent l'avantage de générer un flux de gaz sans utiliser de pièces mobiles, ce qui devrait en faire des dispositifs robustes capable de résister à des environnements hostiles.

De plus, en vue de la réalisation de futurs prototypes plus intégrés, on a montré que la miniaturisation globale du capteur aura pour conséquence d'atteindre les performances espérées en termes d'étendue de mesure (300 à 3 000 °/s) malgré une réduction de la sensibilité. Néanmoins, le rapprochement relatif des détecteurs et l'utilisation de détecteurs "ponctuels" devrait atténuer cette réduction de la sensibilité. D'autres paramètres telles que la nature du gaz ou encore l'utilisation d'anémomètres à fil chaud associé à un flux de gaz qui, dans ce cas, resterait à température ambiante, pourraient encore améliorer les caractéristiques du capteur.

Quant au gyro MEMS à expansion thermique élaboré par les techniques de la microélectronique, il présente l'avantage d'être plus intégré que le gyro à jet de gaz. Néanmoins, la mise en mouvement du gaz par expansion thermique ne permet pas d'obtenir d'importantes vitesses d'écoulement de ce même gaz. Par conséquent, la sensibilité obtenue par ce capteur est faible, mais *a contrario*, il atteint de grande étendue de mesure supérieure à 1080 °/s avec une très bonne linéarité de l'ordre de 0,1 %. Quand les conditions de manipulation nous permettront d'aller plus haut en terme de vitesse de rotation, on pourra déterminer avec précision l'étendue de mesure maximale.

Des paramètres tels que la puissance de chauffe, le rapport cyclique et la nature du gaz ont aussi été étudiés dans le but d'appréhender leurs influences sur les caractéristiques du capteur, et plus particulièrement, pour améliorer la sensibilité et l'étendue de mesure. Après l'étude des signaux issus de la simulation, le modèle en 3D développé a permis de comparer ces derniers avec les résultats expérimentaux. Il en ressort que ces résultats présentent une assez bonne corrélation entre eux. Néanmoins, une différence d'amplitude assez importante au niveau de la sensibilité a été observée. Pour cela, ce modèle devra être optimisé, en réalisant, tout d'abord, une géométrie équivalente au dispositif expérimental, ainsi qu'en utilisant des détecteurs non virtuels qui pourraient permettre une modélisation plus proche de la réalité.

Enfin, la simulation nous a permis de visualiser les zones d'échanges thermiques dans la cavité du capteur, où on remarque qu'elles sont très localisées. Ainsi l'utilisation de deux paires de détecteurs ponctuels permettrait l'amélioration de ses caractéristiques comme par exemple, la sensibilité.

En perspective, les recherches concernant les gyros à gaz devront porter sur les points suivants.

D'une part, il faudra tout d'abord optimiser les deux gyros d'un point de vue de la sensibilité et de l'étendue de mesure, notamment en jouant sur les dimensions. En effet, on a vu par simulation que pour le gyro à jet de gaz, il faudra miniaturiser la taille de la cavité, alors que pour le gyro à expansion thermique, il faudra *a priori* l'augmenter, des simulations devront être réalisées dans ce sens. Bien évidemment, il faudra poursuivre la caractérisation de ces dispositifs pour la mesure de leur bande passante et débiter des études de stabilité.

Il ne fait aucun doute que pour ces gyros, la recherche d'un modèle analytique, même simple, devra être poursuivie car le fait de s'appuyer sur la simulation comportera des limites. En effet, ce modèle nous permettra à terme de mieux comprendre et interpréter les résultats aussi bien numériques qu'expérimentaux.

En ce qui concerne le gyro à jet de gaz, le premier objectif sera de réaliser son intégration sur silicium, et donc de poursuivre les études de fabrication du premier prototype réalisé par les techniques de la microélectronique. Ensuite, un point également très important porte sur l'intégration de la génération du jet de gaz. Pour cela, comme on a pu le voir dans la partie bibliographique, plusieurs techniques sont envisageables comme celle basée, par exemple, sur la génération du flux de gaz par vent ionique.

Pour ce type de gyro, il a été vu que la miniaturisation de la taille de la cavité engendre une diminution de la sensibilité, on envisage donc pour limiter cette baisse de cette dernière, de travailler non plus comme un gaz chaud, mais plutôt froid en utilisant le mode de fonctionnement en anémomètre à fil chaud des détecteurs. On pourra également pour ce dispositif, tester sa réponse en utilisant des gaz de natures différentes.

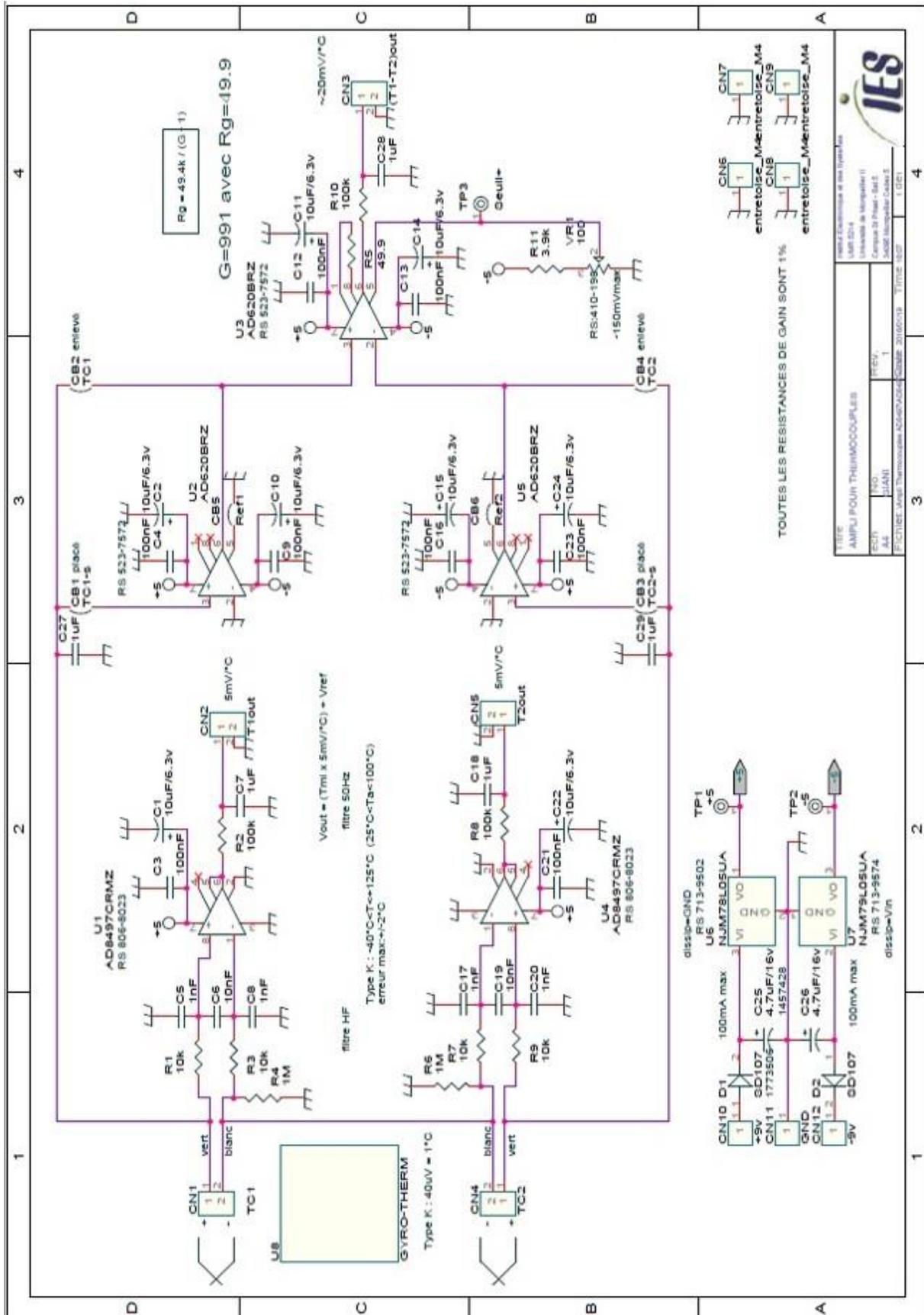
Pour le gyro à expansion dont le principe est un peu plus complexe, le premier des objectifs sera d'augmenter sa sensibilité, car actuellement, elle se révèle trop faible pour bien appréhender les phénomènes mis en jeu dans le dispositif. Pour cela, on pourra, d'une part, comme démontré précédemment, envisager l'utilisation de gaz les plus denses et d'autre part, augmenter la taille de la cavité. Il serait tout aussi possible de travailler sur le design des résistances de chauffe afin d'en augmenter leurs puissances, dans le but d'obtenir des températures plus élevées.

Néanmoins, dans un premier temps, nos efforts devront aussi porter sur l'amélioration du modèle numérique pour qu'ils s'approchent au plus près des résultats expérimentaux actuels. On devra, par exemple, travailler sur un design de cavité plus proche de celui que l'on a en réalité et intégrer dans ce modèle des détecteurs "physiques".

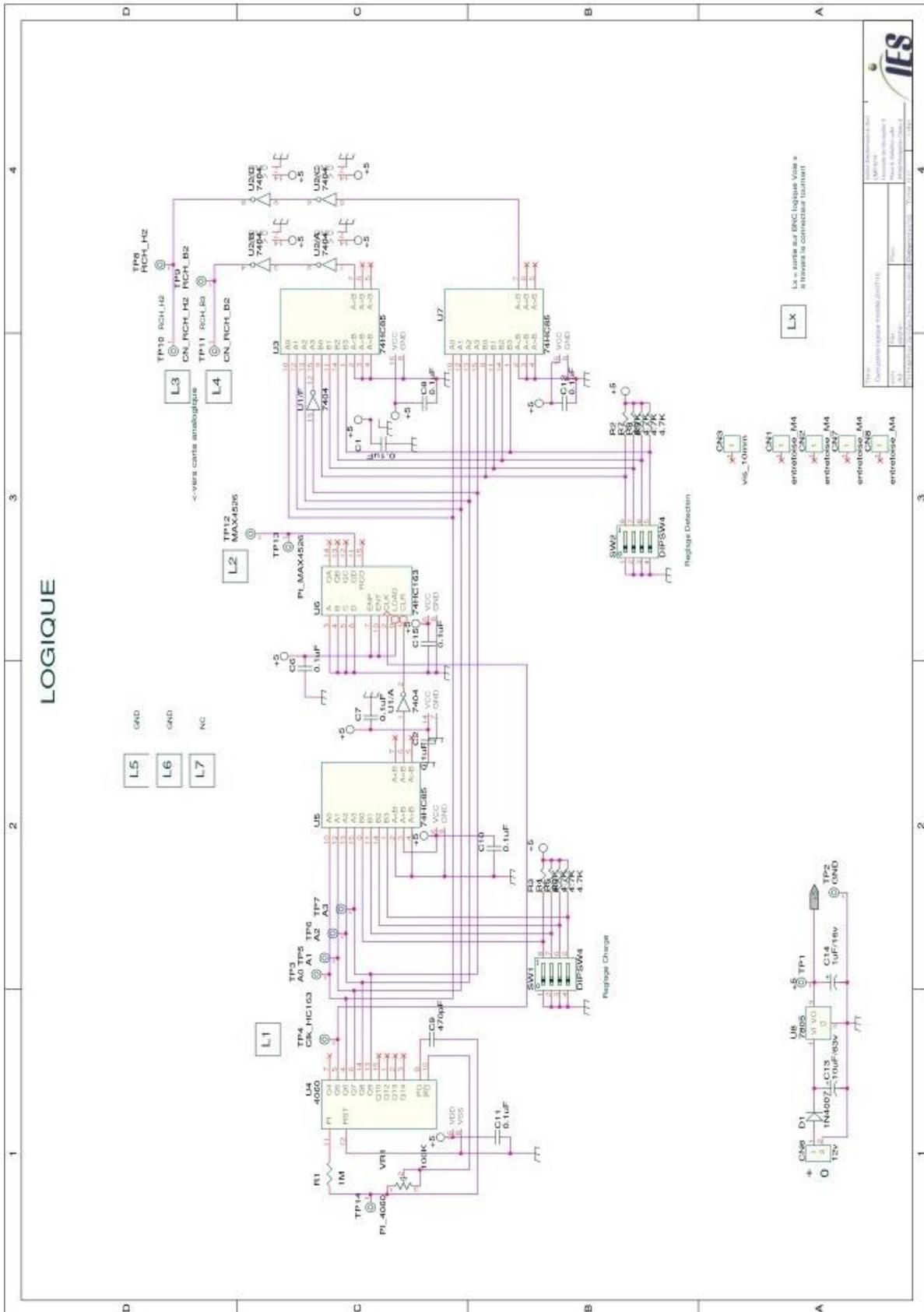
Et enfin, des améliorations technologiques devront être apportées sur tout ce qui concerne les manipulations de caractérisations et de traitement du signal. On pense en particulier à deux points : le premier porte sur une intégration beaucoup plus avancée de l'électronique associée et le second sur les diverses fixations mécaniques sur notre plateau tournant, ce qui nous permettra d'atteindre les limites de linéarité de nos dispositifs.

ANNEXES

Annexe A : Schéma électronique associée à la mesure des deux micro-thermocouples



Annexe B : Schéma électronique de la partie logique du gyro à expansion thermique



Annexe C : Montage en pont de Wheatstone

Le montage en pont de Wheatstone utilisé est décrit à la figure C.1. Il comprend quatre résistances : deux composants discrets à valeur ajustable et deux thermorésistances qui sont les détecteurs de température du capteur.

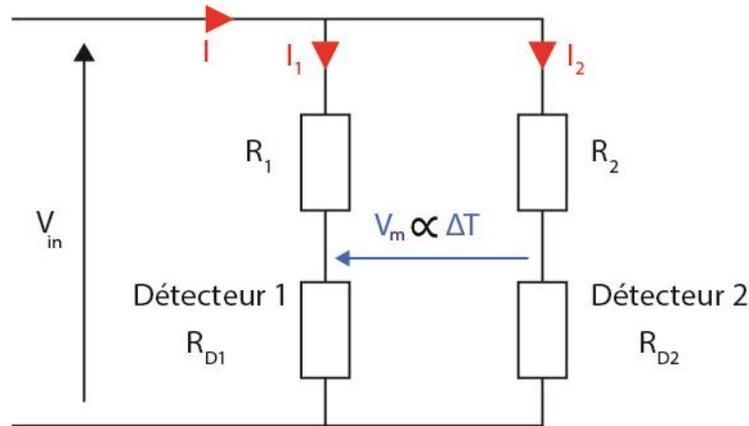


Figure C.1 : Schéma du pont de Wheatstone et notations employées

L'expression de la tension de déséquilibre se détermine en appliquant la relation du pont diviseur de tension :

$$V_m = V_{in} \left(\frac{R_{D1}}{R_1 + R_{D1}} - \frac{R_{D2}}{R_2 + R_{D2}} \right) \quad (C.1)$$

soit :

$$V_m = V_{in} \left(\frac{R_{D1}R_2 - R_{D2}R_1}{(R_1 + R_{D1})(R_2 + R_{D2})} \right) \quad (C.2)$$

Dès qu'une rotation est détectée par le capteur, la différence de température ΔT induite est physiquement traduite en différence de résistance ΔR puis au travers du pont de Wheatstone en différence de potentiel V_m . Nous avons donc les résistances de détections qui varient comme suit : $R_{D1} = R_{0,1} + \Delta R$ et $R_{D2} = R_{0,2} - \Delta R$.

En considérant la moyenne des paramètres thermorésistifs des deux détecteurs $R_{0,m}$, on définit donc $R_{0,1} = R_{0,2} = R_{0,m}$ et les résistances discrètes sont égales à 1% près, on a donc $R_1 = R_2 = R$.

La relation (C.2) devient donc :

$$V_m = V_{in} \left(\frac{2R\Delta R}{(R + R_{0,m})^2 - \Delta R^2} \right) \quad (C.3)$$

Bibliographie

- [1] D. Xia, C. Yu et L. Kong, *The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology*, Sensors 2014, 14, pp. 1394-1473, 2014.
- [2] C. Acar et A. Shkel, *MEMS Vibratory Gyroscopes : Structural Approaches to Improve Robustness*, Springer Science + Business Media, LLC, 2009.
- [3] H. Hyvönen, *Thermomechanical and Mechanical Characterization of a 3-Axial MEMS Gyroscope*, Thèse, 2011.
- [4] V. Kempe, *Inertial MEMS : Principles and Practice*, Cambridge University Press, 2011.
- [5] D. MacKenzie, *Inventing Accuracy : A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance*, The MIT Press, First Edition, 1990.
- [6] G. Turner, *History of Gyroscopes*. <http://www.gyroscopes.org/history.asp>.
- [7] W. Macek et D. Davis, *Rotating Rate Sensing with Traveling-Wave Ring lasers*, Applied Physics Letters, vol. 2, n° 3, pp. 67-68, 1963.
- [8] A. Trusov, *Overview of MEMS Gyroscopes : History, Principles of Operations, Types of Measurements*, Whitepaper, UC Irvine, 2011.
- [9] The motion of a spinning top. https://www.4physics.com/phy_demo/top/top.html.
- [10] R. Nave, *Precession of spinning top*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/top.html>.
- [11] P. Steinmann, *How Gyros Create Stabilizing Torque*. http://veemgyro.com/wp-content/uploads/2015/11/White_Paper_1403-How_Gyros_Create_Stabilizing-Torque.pdf.
- [12] Gyroscope. http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Gyroscope#cite_note-1.
- [13] G. Coriolis, *Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps*, Journal de l'école Polytechnique, pp. 142-154, 1835.
- [14] A. Brown et Y. Lu, *Performance Test results of an Integrated GPS/MEMS Inertial Navigation Package*, Proceedings of ION GNSS, pp. 1-8, 2004.
- [15] H. Chang, Q. Shen, Z. Zhou, J. Xie, Q. Jiang et W. Yuan, *Design, Fabrication, and Testing of a Bulk Micromachined*, Sensors 2010,10, pp. 3835-3856, 2010.
- [16] B. Flacelière, *Le positionnement inertiel et ses applications terrestres, souterraines et sous-marines*, Revue XYZ, n° 125, pp. 48-54, 2010.
- [17] N. Yazdi, F. Ayazi et K. Najafi, *Micromachined Inertial Sensors*, Proceedings of the IEEE, vol. 86, n° 8, pp. 1640-1659, 1998.
- [18] S. Nasiri, *A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status*, 2012.
- [19] J. Hanse, *Honeywell MEMS Inertial Technology & Product Status*, IEEE , pp. 43-48, 2004.
- [20] G. Barbour et G. Schmidt, *Initial Sensor Technology Trends*, IEEE Sensors Journal, vol. 1, n° 4, pp. 332-339, 2001.
- [21] K. Craig, *Modeling the MEMS gyroscope*, 2012. <http://www.edn.com/electronics-blogs/mechatronics-in-design/4400475/Modeling-the-MEMS-gyroscope>.
- [22] Tronics, *An Overview of MEMS and non-MEMS High Performance Gyros*, 2013. <https://fornitori.fortronic.it/user/file/Tronics-MEMS-and-non-MEMS-gyro-wp.pdf>.
- [23] Y. Chen, J. Jiao, B. Xiong, L. Che, X. Li et Y. Wang, *A Novel Tuning Fork Gyroscope with High Q-Factors working at atmospheric pressure*, Microsystem technologies 11, pp. 111-116, 2005.

- [24] X. Wu, L. Xie, J. Xing, P. Dong, H. Wang et J. Su, *A Z-axis Quartz Tuning Fork Micromachined Gyroscope Based on Shear Stress Detection*, IEEE Sensors Journal, vol. 12, pp. 1246-1252, 2012.
- [25] F. Ayazi et K. Najafi, *A HARPSS Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope*, Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 10, n° 12, pp. 169-179, 2001.
- [26] G. He et K. Najafi, *A Single-Crystal Silicon Vibrating Ring Gyroscope*, The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 718-721, 2002.
- [27] J. Awrejcewicz et Z. Koruba, *Theory of Gyroscopes*, Classical Mechanics, pp. 125-147, 2012.
- [28] Y. Dong, Z. Gao, R. Zhang et Z. Chen, *A Vibrating Wheel Micromachined Gyroscope for Commercial and Automotive Applications*, Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1750-1754, 1999.
- [29] Q. Zhao, X. Liu, L. Lin, Z. Guo, J. Cui, X. Chi, Z. Yang et G. Yan, *A Doubly Decoupled Micromachined Vibrating Wheel Gyroscope*, International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, TRANSDUCERS 2009, pp. 296-299, 2009.
- [30] P. Greiff, B. Antkowiak, J. Campbell et A. Petrovich, *Vibrating Wheel Micromechanical Gyroscope*, IEEE 1996 Position Location and Navigation Symposium, pp. 31-37, 1996.
- [31] T. Juneau, A. Pisano et J. Smith, *Dual Axis Operation of a Micromachined Rate Gyroscope*, Proceedings of the IEEE 1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Transducers, pp. 883-886, 1997.
- [32] Gyroscope. <http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>
- [33] Y. Jianqiang, J. Xueqing et Y. Baolun, *Digital Detection and Control System for Ring Laser Gyro*, 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC), pp. 216-220, 2010.
- [34] K. Banerjee, B. Dam, K. Majumdar, R. Banerjee et D. Patranabis, *An Improved Dither-Stripping Scheme for Strapdown Ring Laser Gyroscopes*, TENCON 2004. IEEE Region 10 Conference, pp. 689-692, 2004.
- [35] E. Britannica, *Gyroscope*. <https://www.britannica.com/technology/gyroscope>.
- [36] W. Zhang, Z. Song, M. Yang et Y. Chen, *Smart Sensor Based on Fiber Optic Gyroscope*, International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), pp. 702-705, 2011.
- [37] *Gyromètre laser à fibre ou "gyrofibre"*. http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M02_C08/co/Contenu_09.html.
- [38] N. Zarei, A. Leung et J. Jones, *Heater Power and Thermal Gyroscope Sensitivity*, 2012 IEEE Sensors, pp. 1428-1431, 2012.
- [39] G. Piazza et P. Stephanou, *Micromechanical Thermo-Fluidic Single-Axis Yaw Rate Sensor*, 2002.
- [40] Y. Zhao, R. Zhu, X. Ye et Y. Yang, *Analysis on Shock Resistance of a Micromachined Angular Rate Sensor Based on Convection Heat Transfer*, Chinese Journal of Sensors and Actuators 2008, pp. 628-631, 2008.
- [41] S. Liu et R. Zhu, *Micromachined Fluid Inertial Sensors*, Sensors 2017, pp. 367-391, 2017.
- [42] K. Takemura, S. Yokota, M. Suzuki, K. Edamura, H. Kumagai et T. Imamura, *A Liquid Rate Gyroscope Using Electro-Conjugate Fluid*, Sensors and Actuators A : Physical, pp. 173-179, 2008.

- [43] K. Takemura, S. Yokota, T. Imamura, K. Edamura et H. Kumagai, *Practical Design of a Liquid Rate Gyroscope Using an Electro-Conjugate Fluid*, Proceedings of the Institution Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, pp. 727-736, 2009.
- [44] D. Dao, V. Dau, T. Shiozawa et S. Sugiyama, *Development of a Dual-Axis Convective Gyroscope With Low Thermal-Induced Stress Sensing Element*, Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 16, n° 4, pp. 950-958, 2007.
- [45] V. Dau, T. Otake, T. Dinh et S. Sugiyama, *Design and Fabrication of Convective Inertial Sensor Consisting of 3DOF Gyroscope and 2DOF Accelerometer*, Transducers 2009, IEEE, pp. 1170-1173, 2009.
- [46] S. Liu, R. Zhu et H. Ding, *A Temperature Compensation Method for Micromachined Thermal Gas Gyroscope*, Sensors, 2015 IEEE, 2015.
- [47] R. Zhu, H. Ding, Y. Yang et Y. Su, *Sensor Fusion Methodology to Overcome Cross-Axis Problem for Micromachined Thermal Gas Inertial Sensor*, IEEE Sensors Journal, vol. 9, n° 6, pp. 707-712, 2009.
- [48] J. Bahari, R. Feng et A. Leung, *Robust MEMS Gyroscope Based on Thermal Principles*, Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 23, n° 1, pp. 100-116, 2014.
- [49] R. Feng, J. Bahari, J. Jones et A. Leung, *MEMS Thermal Gyroscope with Self-Compensation of the Linear Acceleration Effect*, Sensors and Actuators A: Physical, pp. 413-420, 2013.
- [50] T. Takahashi, T. Nishio, M. Ikegami et T. Gunji, *Gas Rate Sensor System*. Brevet, Patent US5012676, 1991.
- [51] H. Ding, R. Zhu et Y. Yang, *Micro Thermal Gas Gyro*. Brevet, Patent CN01129700X, 2001.
- [52] S. Wang, X. Gong, B. Nie, W. Yuan et H. Chang, *A Micromachined Fluidic Reduced Inertial Measurement Unit Using Thermal Expansion Flow Principle*, Transducers 2015, IEEE, pp. 1223-1226, 2015.
- [53] X. Wang, L. Piao et Q. Yu, *Piezoelectric Fluidic Angular Rate Sensor*, Software Engineering and Knowledge Engineering, vol. 2, pp. 575-579, 2012.
- [54] N. Zarei, A. Leung et J. Jones, *Design Principles of the Thermal MEMS Gyroscope*, Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2012, 2012.
- [55] H. Chang, P. Zhou, Z. Xie, X. Gong, Y. Yang et W. Yuan, *Theoretical Modeling for a Six-DOF Vortex Inertial Sensor and Experimental Verification*, Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 22, n° 5, pp. 1100-1108, 2013.
- [56] S. Liu et R. Zhu, *System Error Compensation Methodology Based on a Neural Network for a Micromachined Inertial Measurement Unit*, Sensors 2016, pp. 175-189, 2016.
- [57] STMicroelectronics, *Technical document of 3-axis digital output gyroscope*. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e4/b1/d1/62/1a/e6/44/2f/DM00168691.pdf/files/DM00168691.pdf/jcr:content/translations/en.DM00168691.pdf>.
- [58] G. Schmidt, *Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments*, Chinese Journal of Aeronautics 28, pp. 1-10, 2015.
- [59] Gyro sensors. http://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/gyro/.

- [60] T. Shiozawa, V. Dau, D. Dao, H. Kumagai et S. Sugiyama, *A Dual Axis Thermal Convective Silicon Gyroscope*, Proceedings of the 2004 International Symposium on Micro-Nanomechatronics and Human Science, 2004 and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society, 2004.
- [61] L. Sun, W. Wang, T. Yu, L. Zhang et G. Yan, *Numerical Simulation of the Fluidic Performance in a Jet-based Gyroscope*, Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, pp. 348-350, 2008.
- [62] V. Dau, D. Dao, T. Shiozawa, H. Kumagai et S. Sugiyama, *Development of a Dual-Axis Thermal Convective Gas Gyroscope*, Journal of Micromechanics and Micrengineering, pp. 1301-1306, 2006.
- [63] V. Dau, D. Dao, T. Shiozawa et S. Sugiyama, *Simulation and Fabrication of a Convective Gyroscope*, IEEE Sensors Journal, vol. 8, n° 9, pp. 1530-1538, 2008.
- [64] V. Dau, T. Dinh, D. Dao, R. Amarashinge, B. Tung et S. Sugiyama, *Design and Simulation of Convective Inertial Sensor*, International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 33-36, 2008.
- [65] P. Hoa, T. Dinh et V. Dau, *Design Study of Multidirectional Jet Flow for a Triple-Axis Fluidic Gyroscope*, IEEE Sensors Journal, vol. 15, n° 7, pp. 4103-4113, 2015.
- [66] T. Bui, T. Dinh, P. Hoa et V. Dau, *Study on the PZT Diaphragm Actuated Multiple Jet Flow in a Circulatory Miniaturized System*, IEEE 2015 Sensors, 2015.
- [67] H. Chang, X. Gong, S. Wang, P. Zhou et W. Yuan, *On Improving the Performance of a Triaxis Vortex Convective Gyroscope Through Suspended Silicon Thermistors*, IEEE Sensors Journal, vol. 15, n° 2, pp. 946-955, 2015.
- [68] R. Zhu, Y. Su et H. Ding, *A MEMS Hybrid Inertial Sensor Based on Convection Heat Transfer*, The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05, pp. 113-116, 2005.
- [69] R. Zhu, H. Ding, Y. Su et Z. Zhou, *Micromachined Gas Inertial Sensor Based on Convection Heat Transfer*, Sensor and Actuators A: Physical, pp. 68-74, 2006.
- [70] R. Zhu, H. Ding, Y. Su et Y. Yang, *Modeling and Experimental Study on Characterization of Micromachined Thermal Gas Inertial Sensors*, Sensors, pp. 8304-8315, 2010.
- [71] S. Cai, R. Zhu, H. Ding, Y. Yang et Y. Su, *A Micromachined Integrated Gyroscope and Accelerometer Based on Gas Thermal Expansion*, Transducers & Eurosensors XXVII : The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, pp. 50-53, 2013.
- [72] R. Zhu, S. Cai, H. Ding, Y. Yang et Y. Su, *A Micromachined Gas Inertial Sensor Based on Thermal Expansion*, Sensors and Actuators A: Physical, pp. 173-180, 2014.
- [73] J. Brun, *Mécanique des fluides*.
<http://jean-marc.brun.pagesperso-orange.fr/Fr/Math/MecaFluAout08.pdf>.
- [74] *Techniques de visualisation*, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustiques de Lyon. <http://lmfa.ec-lyon.fr/spip.php?article166>.
- [75] J. Schon, G. Comte-Bellot et G. Charnay, *Anémomètres à fil chaud ou à film chaud*, 1994.
<http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/tiarb-r2272-version2.pdf>.
- [76] F. Moisy, *Méthodes expérimentales en Mécanique des Fluides*, 2014. <http://www.fast.u-psud.fr/~moisy/teaching/memf.pdf>.
- [77] E. Brun, A. Martinot-Lagarde et J. Mathieu, *Mécanique des fluides - Tome 1 - Fascicule 2 : Écoulements à une dimension - conduites*, Dunod, 1960.

- [78] P. Chassaing, *Mécanique des Fluides - Éléments d'un premier parcours - 2ème édition*, Collection Polytech, 2000.
- [79] S. Amiroudine et J. Battaglia, *Mécanique des fluides*, Dunod, 2014.
- [80] P. Giura et F. Moulin, *Étude d'un module thermique à effet Peltier-Seebeck*, Document en ligne de l'ENS-Paris-Saclay
- [81] D. Ottello, *Les thermocouples*, <http://aviatechno.net/files/thermocouples.pdf>.
- [82] P. Temple-Boyer, C. Rossi, E. Saint-Etienne et E. Scheid, *Residual Stress in Low Pressure Chemical Vapor Deposition SiNx Films Deposited from Silane and Ammonia*, J Vac Sci Technol A, pp. 2003-2007, 1998.
- [83] A. Garraud, *Amélioration des performances et nouveau concept de détecteurs de capteurs inertiels à détection thermique*, Thèse de l'Université de Montpellier, 2011.
- [84] O. Français, *Détection Synchrone*, <https://www.abcelectronique.com/annuaire/cours/.../bruit-et-detection-synchrone.pdf>.
- [85] I. Thiagalingam, *Modélisation des transferts thermiques convectifs en régime turbulent à l'interface milieu poreux / paroi dans les lits catalytiques*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris, 2015.
- [86] Fluent, *Chapitre 22 - Using the solver*, 2001.
- [87] Fluent, *Support formation sur le logiciel Fluent*, 2014.
- [88] KNF, Fiche technique - Micro pompes à membrane pour gaz.
- [89] L.G. Technologies. <http://www.lelandgas.com/Leland%20Gas%20Filled%20Cylinders.pdf>.
- [90] N. T. Gas. <http://www.ntg.co.jp/english/products/specs.php>.
- [91] J. Chang, P. Lawless et T. Yamamoto, *Corona Discharge Processes*, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 19, n° 6, pp. 1152-1166, 1991.
- [92] N. Jewell-Larsen, E. Tran, I. Krichtafovitch et A. Mamishev, *Design and Optimization of Electrostatic Fluid Accelerators*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, n° 1, pp. 191-203, 2006.
- [93] W. Grobe, *The Mechanism of Thermal transpiration (= Thermal Osmosis)*, Aquatic Botany 54, pp. 101-110, 1996.
- [94] E. Sher, G. Pinhasi, A. Pokryvailo et R. Bar-On, *Extinction of Pool Flames by Means of a DC Electric Field*, Combustion and Flame 94, pp. 244-252, 1993.
- [95] C. Hsu, N. Jewell-Larsen, I. Krichtafovitch, S. Montgomery, J. Dibene et A. Mamishev, *Miniaturization of Electrostatic Fluid Accelerators*, Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 16, n° 4, pp. 809-814, 2007.
- [96] D. Go, R. Maturana, T. Fisher et S. Garimella, *Enhancement of External Forced Convection by Ionic Wind*, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 6047-6053, 2008.
- [97] A. Foley, *New Approach to Electronics Cooling Using a Corona Discharge*, 2013. <https://www.comsol.com/blogs/new-approach-electronics-cooling-corona-discharge/>.
- [98] O. Reynolds, *Philos. Trans. R. Soc. London 170*, pp. 727-772, 1879.
- [99] J. Maxwell, *Philos. Trans. R. Soc. London 170*, pp. 231-256, 1879.
- [100] M. Knudsen, *Ann. Phys. 31*, 1910.
- [101] D. York, A. Chambers, A. Chew et A. Troup, *Measurement of Thermal Transpiration Across an Array of Parallel Capillaries Using a Differential Capacitance Manometer*, Vacuum 55, pp. 133-139, 1999.

- [102] J. Ye, J. Yang, J. Zheng, X. Ding, I. Wong, W. Li et C. Chen, *Thermal Transpiration Effect on the Mass Transfer and Flow Behaviors of the Pressure-Driven Hydrogen Gas Flow*, International Journal of Hydrogen Energy 37, pp. 12474-12480, 2012.
- [103] M. Cardenas, I. Graur, P. Perrier et J. Meolans, *Thermal Transpiration Flow*, 3rd Micro and Nano Flows Conference, 2011.
- [104] L. Shigang, X. Dailiang et T. Shan, *Design and Simulation of Fluidic Flowmeter for the Measurement of Liquid Flow in Microchannel*, Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation, IEEE, pp. 310-313, 2012.
- [105] T. Panitz et D. Wasan, *Flow Attachment to Solid Surfaces : the Coanda Effect*, American Institute of Chemical Engineers Journal , vol. 18, n° 1, pp. 51-57, 1972.
- [106] C. Allery, S. Guerin, A. Hamdouni et A. Sakout, *Experimental and Numerical POD Study of the Coanda Effect Used to Reduce Self-sustained Tones*, Mechanics Research Communications 31, pp. 105-120, 2004.
- [107] F. Durst, A. Melling et J. Whitelaw, *Low Reynolds Number Flow Over a Plane Symmetric Sudden Expansion Flow*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 64, n° 1, pp. 111-128, 1974.
- [108] F. Battaglia, S. Tavener, A. Kulkarni et C. Merkle, *Bifurcation of Low Reynolds Number Flows in Symmetric Channels*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [109] A. Quaini, R. Glowinski et S. Canic, *A Computational Study On the Generation of the Coanda Effect in a Mock Heart Chamber*, 2009.
- [110] W. Mattheus et C. Brucker, *Asymmetric Glottal Jet Deflection : Differences of Two- and Three-Dimensional Models*, The Journal of the Acoustical Society of America, 2011.
- [111] A. Leung, *Rotatin Sensing Apparatus and Methods*. Canada Brevet US20110011181 A1, 2011.
- [112] P. Shooshtari, *Spurious Signals in Thermal MEMS Gyroscope*, Thèse de l'Université Simon Fraser au Canada, 2013.
- [113] C. St Blanquet, *Chapitre 4 : Transferts d'énergie et bilans énergétiques*, http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/thermo2000/41trener/41trener.htm.
- [114] Phénomène de transfert : Convection, <http://ltp.epfl.ch/files/content/sites/ltp/files/shared/Teaching/Bachelor/03-TransferPhenomena/01-HeatTransfer/PhenomenesTransfert.Chapter-8.pdf>.
- [115] P. Marty, *Cours de transfert thermiques : Conduction et Rayonnement*, <http://www.legi.grenoble-inp.fr/people/Philippe.Marty/cours-thermique-L3.pdf>.
- [116] B. Le Neindre, *Conductivité thermique des liquides et des gaz*, 1998. <https://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42340210-k427.pdf>.
- [117] Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, *Les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologiques*. <http://www.metrologie-francaise.fr/fr/dossiers/proprietes-thermiques-materiaux.pdf>.

ÉTUDE ET RÉALISATION DE GYROMÈTRES À DÉTECTION THERMIQUE

Mots-clés : gyromètre thermique à gaz, expansion thermique, convection forcée, force de Coriolis, MEMS

Ce travail de thèse porte sur l'étude et la réalisation de micro-capteurs dédiés à la mesure de vitesse angulaire par des principes basés sur des échanges thermiques. Deux types de gyromètres ont été développés dont la principale différence est liée au principe qui permet la mise en mouvement du gaz : convection forcée pour l'un et expansion thermique pour l'autre. Le principe est basé sur la modification par la force de Coriolis des échanges thermiques dans un fluide chauffé localement lorsque le dispositif est soumis à une vitesse de rotation. L'utilisation d'un fluide comme masse sismique est en rupture avec les concepts de gyromètres dits traditionnels. Cet avantage a pour conséquence la possibilité d'une utilisation dans des conditions environnementales sévères telles que de fortes accélérations ($\geq 10\,000\text{ g}$) et de fortes vibrations.

Les objectifs de ce travail consistent à étudier, à développer et à caractériser ces deux types de gyromètres. Pour cela, des études numériques ont été menées afin de mieux appréhender les phénomènes physiques et thermiques mis en jeu dans la cavité. On a pu aussi étudier l'effet des paramètres thermo-physiques du fluide, des différentes dimensions géométriques et de la vitesse d'écoulement du gaz sur la sensibilité et l'étendue de mesure.

Par ailleurs, des prototypes des deux types de gyromètres ont été réalisés puis caractérisés. Les résultats sont très encourageants et les principes validés, mais leur confrontation avec ceux de la simulation montre que des améliorations sont à apporter sur le modèle numérique.

STUDY AND REALIZATION OF THERMAL SENSING GYROSCOPES

Keywords : thermal gyroscope, thermal expansion, forced convection, Coriolis force, MEMS

This PhD thesis deals with both study and fabrication of micro-sensors dedicated to the measurement of angular velocity, these devices are based on heat exchanges. Two types of gyroscopes have been developed, one using a jet of gas being deflected by the rotation, the other one using thermal expansion of a gas. Under rotation, heat transfers in a locally heated fluid is modified by the Coriolis force and induces a change in temperature distribution. Using a fluid as seismic mass enhances performances in terms shock ($\geq 10\,000\text{g}$) and vibration resistances compared with standard mechanical gyroscopes.

The aim of this work has been to study, develop and characterize these two gyroscopes. For this purpose, numerical studies have been carried out in order to improve our understanding of physical and thermal phenomena involved in the device. Effects of thermo-physical parameters, sensor size and gas flow velocity on both sensitivity and measuring range were analyzed.

On the other hand, prototypes of both gyroscopes were manufactured and characterized. The proof of concept has been validated and encouraging results have been found. Comparison of measure and simulation have shown that improvements have to be made on the numerical model.