



HAL
open science

Micro-anémométrie pour l'aérodynamique : développement et application à la mesure de la turbulence aérothermique

Baptiste Baradel

► **To cite this version:**

Baptiste Baradel. Micro-anémométrie pour l'aérodynamique : développement et application à la mesure de la turbulence aérothermique. Physique [physics]. Université de Montpellier, 2023. Français. NNT : 2023UMONS020 . tel-04268747

HAL Id: tel-04268747

<https://hal.science/tel-04268747v1>

Submitted on 2 Nov 2023

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 Electronique

École doctorale : Information, Systèmes et Structures (I2S)

Unité de recherche : Institut d'électronique et des Systèmes – UMR 5214 et ONERA – Centre de Toulouse

**Micro-anémométrie pour l'aérodynamique : développement
et application à la mesure de la turbulence aérothermique**

**Présentée par Baptiste Baradel
Le 30 janvier 2023**

**Sous la direction de M. Alain Giani
Et M. Olivier Léon**

Devant le jury composé de

Philippe Pernod, Professeur des universités, IEMN, Centrale Lille

Thomas Castelain, Maître de conférences, LMFA, Université Lyon 1

Jacques Borée, Professeur des universités, Institut Pprime, ENSMA Poitiers

Alain Giani, Professeur des universités, IES, Université de Montpellier

Olivier Léon, Ingénieur de recherche, ONERA Toulouse

Philippe Combette, Professeur des universités, IES, Université de Montpellier

Fabien Méry, Ingénieur de recherche, ONERA Toulouse

Rapporteur

Rapporteur

Président du Jury

Directeur

Co-Directeur

Co-Encadrant

Invité



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**

ONERA, site de Toulouse
2 Av. Édouard Belin
31055 Toulouse Cedex 4

Manuscrit de thèse

Micro-anémométrie pour l'aérodynamique : développement et application à la mesure de la turbulence aérothermique

Directeur de thèse: Alain Giani (IES Montpellier - M²N)

Co-directeur de thèse: Olivier Léon (DMPE-STAT)

**Encadrants : Fabien Méry (DMPE-STAT) et Philippe Combette (IES Montpellier -
M²N)**

Baptiste BARADEL

29 mars 2023

ONERA

La version numérique de ce document permet une navigation aussi aisée que possible dans les différentes parties: les tables des matières, références aux équations figures et tables ainsi que les références bibliographiques sont des liens hypertextes renvoyant à l'élément adéquat (cliquer sur un symbole dans le texte renvoie à son entrée dans la nomenclature). La plupart des logiciels de lecture proposent des raccourcis clavier pour revenir à la page courante (par exemple **Alt+←** pour Adobe Reader).

Résumé

La turbulence est un phénomène important présent dans de nombreux écoulements, qu'ils soient naturels ou à application industrielle, et qui se caractérise notamment par une grande variété d'échelles spatiales et temporelles. Il est donc d'un intérêt particulier de développer des moyens métrologiques adaptés à la mesure des différentes grandeurs physiques permettant de mieux appréhender et caractériser celle-ci.

Dans le cadre de mesures aérodynamiques, les capteurs les plus communément employés encore aujourd'hui sont ainsi l'anémomètre à fil chaud pour des mesures de vitesses et le thermomètre à fil froid pour les mesures de température. Cependant ces deux moyens de mesures présentent des limitations. En effet, il a été montré que si la longueur de leur élément sensible est trop grande en comparaison des échelles caractéristiques de l'écoulement alors ces sondes opèrent un filtrage spatial des plus petites échelles de turbulence, pourtant nécessaires à la résolution complète de ce type d'écoulement. Devant ce constat, ces travaux de thèse se posent pour question la possibilité d'une amélioration de ces deux moyens métrologiques. De par les limitations qu'ils rencontrent, l'axe d'amélioration principal considéré réside dans la réduction de la taille de leur élément sensible en s'appuyant sur les techniques de la micro-fabrication, permettant ainsi d'augmenter la gamme d'échelles spatiales mesurables dans un écoulement turbulent. De plus, dans le cadre de la caractérisation d'écoulements aérothermiques, il apparaît comme d'intérêt de pouvoir effectuer des mesures simultanées de vitesse et de température. Il est donc envisagé d'utiliser les technologies de mesure par fil chaud et fil froid pour réaliser ceci.

Cette étude consiste donc au développement de micro-capteurs thermorésistifs permettant de repousser la limite de détection des petites échelles contenues dans un écoulement turbulent. Le premier objectif est de réaliser des sondes fonctionnelles permettant de réaliser des mesures anémométriques ou thermométriques pour ensuite se tourner vers un second objectif visant à développer un capteur du même type mais effectuant ces deux mesures de façon simultanée.

Pour atteindre ces objectifs, il a été premièrement question d'effectuer un choix pertinent sur les matériaux utilisés ainsi que d'étudier différents procédés de micro-fabrication, notamment de gravure du silicium. Ceci a alors permis de réaliser différentes géométries de micro-capteurs dans le but de mener une étude sur leur intrusivité. Afin de quantifier leur capacité à mesurer des fluctuations de vitesses, ces nouveaux capteurs ont été utilisés pour des mesures en couche limite turbulente, une attention particulière ayant été portée sur la maîtrise du protocole expérimental. Les résultats obtenus ont été comparés à différents modèles semi-empiriques ainsi qu'à des mesures effectuées avec des sondes à fil chaud classiques. Dans l'objectif d'observer la performance des micro-capteurs pour des mesures de température, un banc expérimental spécifique permettant d'évaluer leurs réponses fréquentielles a de plus été conçu. Enfin, des premiers prototypes de micro-sondes permettant de réaliser des mesures simultanées de vitesse et de température ont été testés.

Abstract

Turbulence is an important phenomenon present in many flows, whether natural or industrial, and is characterized by a wide variety of spatial and temporal scales. It is therefore of particular interest to develop metrological means adapted to the measurement of physical quantities such as velocity and temperature fluctuations to better understand and characterize it.

In the context of aerodynamic measurements, the sensors most commonly used today are the hot wire anemometer for velocity measurements and the cold wire thermometer for temperature measurements. However, these two means of measurement have some limitations. Indeed, it has been shown that if the length of their sensitive element is too long compared to the characteristic scales of the flow, then these probes operate a spatial filtering of the smallest scales of turbulence, yet necessary to the complete resolution of this type of flow. Faced with this observation, this thesis work asks the question of the possibility of an improvement of these two metrological means. Because of their limitations, the main improvement considered is the reduction of the size of their sensitive element by relying on micro-fabrication techniques, thus allowing to increase the range of measurable spatial scales in a turbulent flow. Moreover, in the context of the characterization of aerothermal flows, it appears to be of interest to be able to carry out simultaneous measurements of velocity and temperature fluctuations. It is thus envisaged to use the technologies of measurement by hot wire and cold wire to carry out this.

This study consists in the development of thermo-resistive micro-sensors allowing to postpone the limit of detection of the small scales contained in a turbulent flow. The first objective is to develop functional probes allowing to realize anemometric or thermometric measurements to then turn to a second objective aiming at developing a sensor of the same type but carrying out these two measurements in a simultaneous way.

To reach these objectives, it was first a question of making a relevant choice on the materials used as well as studying different processes of micro-fabrication, in particular of silicon etching. This allowed to realize different geometries of micro-sensor in order to identify the most appropriate for measurements in turbulent flow. In order to quantify their capacity to measure velocity fluctuations, these new sensors were used for turbulent boundary layer measurements, with particular attention paid to the control of the experimental protocol. The results obtained have been compared to different semi-empirical models as well as to measurements performed with classical hot-wire probes. In order to observe the performance of the micro-sensors for temperature measurements, a specific experimental bench has been designed to evaluate their frequency responses. Finally, the first prototypes of micro-probes allowing to realize simultaneous measurements of speed and temperature were tested.



À mon grand-père...

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes laboratoires d'accueil l'IES Montpellier et l'ONERA Toulouse qui ont rendu possible ces travaux de thèse ainsi que le financement de la région Occitanie.

Je souhaite aussi remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux de thèse ; Thomas Castelain, maître de conférence à l'Université Lyon 1, et Philippe Pernod, professeur des universités à Centrale Lille, pour leurs rapports détaillés et constructifs ainsi que Jacques Borée, professeur des universités à l'ENSMA Poitiers, pour son évaluation.

Les personnes à qui je présente mes plus grands remerciements sont bien entendu mes deux directeurs de thèse Alain GIANI et Olivier LEON. Ils m'ont tout d'abord fait confiance pour travailler avec eux sur ce sujet passionnant mais m'ont aussi et surtout accompagné et guidé durant ces trois années. J'ai grâce à vous appris beaucoup sur moi-même et le monde de la recherche et je vous en remercie.

Merci aussi à mes deux autres encadrants, Fabien MERY qui m'a appris l'échec constructif à travers toutes ses idées d'expérimentation et Philippe COMBETTE qui de par sa passion entraîne toujours de la motivation.

Je tiens à remercier tout particulièrement toutes les personnes que j'ai pu rencontrer lors de cette thèse et qui ont pu me partager leur savoir faire et leurs connaissances. Je pense notamment au personnel de la CTM (Fred, Renaud et Jean-Marie) mais aussi aux différentes équipes de recherches et techniques de l'IES et de l'ONERA, laboratoires dans lesquels j'ai toujours été bien accueilli et intégré.

La thèse est aussi une aventure humaine. C'est pourquoi je remercie aussi toute l'équipe des doctorants du DMPE de Toulouse pour ces repas et pauses partagés ensemble. Je n'oublie pas non plus tous mes collègues de Montpellier de l'équipe M2N : Léo, Flo, Claire, Rudy, Benoit, Oramany, Audrey, (et tous ceux que j'ai oublié) ceux de Bonetag : Manon, Sylvain et KU, avec qui nous avons partagé bon nombre de repas et de pause café. Merci pour votre bonne humeur et nos échanges sur de nombreux sujets. J'ai pu rencontrer de super personnes et pour certains nous avons pu créer des liens en dehors du simple travail. Une pensée aussi à Boris, mon voisin de bureau pour ses blagues tout au long de la journée mais aussi pour sa disponibilité.

Pour finir, je tiens à remercier mes parents et ma famille qui ont toujours été là pour moi et sans qui je n'aurais pu accomplir tout cela. Ce travail n'aurait pas été non plus possible sans ma chérie Laurie qui m'a accompagné pour cette thèse mais aussi soutenue durant ces trois années qui ont parfois été éprouvantes pour nous deux. Merci de ta présence au quotidien et de l'amour que tu me portes.

Table (réduite) des matières

Introduction	xi
I. État de l'art et éléments de base théoriques	1
1. État de l'art des moyens métrologiques adaptés à la mesure de vitesse et de température en écoulements turbulents	3
1.1. Mesure de la vitesse d'un écoulement	4
1.2. Mesure de la température	16
1.3. Mesure simultanée vitesse/température	19
1.4. Bilan	21
2. Physique des écoulements turbulents	23
2.1. Description statistique d'un écoulement turbulent	24
2.2. La couche limite turbulente	27
2.3. Turbulence aérothermique	32
2.4. Bilan	33
3. Théorie des capteurs thermorésistifs pour les mesures de fluctuations de vitesse et de température	35
3.1. Bilan des échanges thermiques	36
3.2. Théorie du fil chaud	37
3.3. Théorie du fil froid	44
3.4. Bilan	47
II. Étude des moyens technologiques de micro-fabrication pour le développement de micro-capteurs thermorésistifs et de leur instrumentation	49
4. Développement de capteurs thermorésistifs à l'aide des techniques de micro-fabrication	51
4.1. Choix du design des micro-capteurs	52
4.2. Substrat de base et dépôts des différentes couches de matériaux	53
4.3. Élaboration des motifs et mise en forme 3D des micro-capteurs	55
4.4. Procédé de fabrication complet des micro-capteurs	60
4.5. Bilan	67
5. Étude et développement de procédés de gravure du Silicium pour la réalisation de micro-capteurs profilés	69
5.1. Principe du RIE lag	70
5.2. Études des différents procédés de gravure du Silicium	71
5.3. Procédé de fabrication adapté à la réalisation d'un capteur profilé	83
5.4. Bilan	88
6. Assemblage et moyens technologiques de caractérisation des micro-capteurs	89
6.1. Montage des micro-capteurs	90
6.2. Caractérisation des paramètres thermorésistifs	91
6.3. Électronique de mesure	93
6.4. Bilan	97

III. Étude expérimentale de la capacité des micro-capteurs à détecter les petites échelles de turbulence	99
7. Détermination de la capacité des micro-capteurs à détecter les fluctuations de vitesse dans un écoulement turbulent	101
7.1. Protocole expérimental	103
7.2. Sondage de couche limite avec différentes sondes pour l'évaluation des capacités des micro-capteurs	111
7.3. Influence de l'angle de mesure sur la détection des fluctuations de vitesses	116
7.4. Étude du rapport ℓ/d^* et des effets de conductions	118
7.5. Observation de l'influence de la forme des micro-capteurs sur la mesure	120
7.6. Expérimentations complémentaires	122
7.7. Bilan	123
8. Détermination de la capacité des micro-capteurs à détecter les fluctuations de température et application à la mesure simultanée vitesse/température	125
8.1. Mesure de la température	126
8.2. Mesure simultanée vitesse/température	129
8.3. Bilan	136
Conclusion	137
Table (exhaustive) des matières	143
Table des figures	147
Nomenclature	151
Bibliographie	155

Introduction

Contexte et Objectifs

La turbulence est un phénomène important présent dans de nombreux écoulements, qu'ils soient naturels ou à application industrielle, et qui se caractérise notamment par une grande variété d'échelles spatiales et temporelles. Il est donc d'un intérêt particulier de développer des moyens métrologiques adaptés à la mesure des différentes grandeurs physiques permettant de mieux appréhender et caractériser celle-ci. En effet, d'un point de vue aéronautique, la turbulence est responsable de nombreuses pertes énergétiques par dissipation et peut notamment être la cause de surconsommations énergétiques. De manière similaire, l'état turbulent d'écoulements de conduites (gazoducs, pipelines, circuit de refroidissement, ...) peut également avoir pour conséquences de fortes pertes de charge. Outre ces pertes, la turbulence peut aussi être à l'origine de fortes contraintes en termes d'échanges thermiques, pouvant amener à une détérioration des parois sur lesquelles elle se développe, comme cela est souvent le cas pour les turbomachines par exemple. L'augmentation de l'efficacité des échanges de chaleur par la turbulence peut également avoir des conséquences désirables et sa compréhension est nécessaire pour le dimensionnement de systèmes de refroidissement, notamment au moyen de jets impactants. Enfin, les écoulements turbulents sont également naturellement présents (et même vitaux) dans les différents cycles atmosphériques ou océaniques. Devant cette omniprésence, il est donc primordial de pouvoir correctement représenter et caractériser la turbulence et son impact, afin entre autres choses de concevoir des avions moins consommateurs en énergie, des réacteurs plus efficaces ou bien encore de mieux comprendre et prédire les conditions météorologiques et climatiques.

Pour étudier un écoulement turbulent donné, une approche par simulation numérique et/ou par des mesures expérimentales est possible. Des progrès considérables ont été réalisés dans ces deux domaines respectifs au cours des dernières décennies. Notamment en numérique, la capacité et la puissance des calculateurs permettent désormais, dans certaines configurations, de résoudre directement les équations régissant la mécanique des fluides et la thermique. Il est ainsi possible d'avoir accès à une description extrêmement riche de l'interaction spatio-temporelle des différentes structures turbulentes. Toutefois, cette approche n'est pas envisageable pour toutes les applications du fait de son coût de calcul généralement prohibitif, particulièrement lorsqu'il s'agit d'étudier des écoulements à grands nombres de Reynolds. Il est aussi possible de s'appuyer sur des outils numériques en faisant appel à des hypothèses et des modélisations sur certaines conditions ou grandeurs de l'écoulement pour réduire ces coûts. Cependant, une telle approche nécessite de valider les modèles utilisés afin de garantir leur véracité et leur domaine d'application. Ainsi il est commun d'allier approches expérimentales et numériques afin d'étudier et de modéliser au mieux un écoulement turbulent, particulièrement lorsque celui-ci s'établit sur une nouvelle géométrie peu connue et potentiellement complexe.

De nombreuses techniques de mesures sont utilisables afin de caractériser un écoulement turbulent aérothermique et d'accéder aux grandeurs physiques d'intérêt (vitesse, température, pression, ...). Pour autant, comme évoqué précédemment, une quantification précise et pertinente de la turbulence nécessite d'utiliser des moyens de mesures donnant accès à une gamme d'échelles spatiale et temporelle la plus large possible. Les sondes permettant d'accéder uniquement aux grandeurs moyennes sont notamment d'une utilité souvent limitée. En ce sens, les techniques optiques développées au cours des dernières décennies disposent d'atouts importants et présentent l'avantage d'être non intrusives et ainsi de ne pas perturber les écoulements à sonder. Pour autant, outre les limitations auxquelles elles peuvent être assujetties, elles ont aussi pour inconvénient majeur une complexité de mise en œuvre non négligeable. En complément de telles techniques, il est donc souvent intéressant de disposer de moyens métrologiques plus simples et intrusifs mais suffisamment

sensibles et précis pour caractériser de manière satisfaisante des fluctuations physiques induites par une dynamique turbulente. Dans le cadre de mesures aérodynamiques, les capteurs les plus communément employés encore aujourd'hui sont ainsi l'anémomètre à fil chaud pour des mesures de vitesses et le thermomètre à fil froid pour les mesures de température. Ces sondes, composées d'un élément sensible métallique (le fil), une fois placées dans un écoulement, permettent d'avoir accès à ces grandeurs par une mesure électrique. Malgré leur intrusivité, elles présentent une très haute réponse fréquentielle et sont donc des techniques de mesures très utilisées pour la caractérisation de la turbulence.

Cependant ces deux moyens de mesures présentent eux aussi des limitations. En effet, il a été montré que si la longueur de l'élément sensible était trop grande en comparaison des échelles caractéristiques de l'écoulement alors ces sondes opèrent un filtrage spatial des plus petites échelles de turbulence, pourtant nécessaires à la résolution complète de ce type d'écoulement [53] [37] [92]. Cet effet de filtrage est présent pour les deux types de mesures.

Devant ce constat, ces travaux de thèse se posent pour question la possibilité d'une amélioration de ces deux moyens métrologiques. De par les limitations qu'ils rencontrent, l'axe d'amélioration principal considéré réside dans la réduction de la taille de leur élément sensible permettant ainsi d'augmenter la gamme d'échelles spatiales mesurables dans un écoulement turbulent. Dans cette optique, plusieurs équipes de recherches, l'université de Princeton [82] ou bien l'université de Twente [49] pour ne citer qu'eux, ont auparavant réalisé des fils chauds et fils froids avec des longueurs d'élément sensible de l'ordre de la dizaine de micromètre. Le développement de ces nouveaux dispositifs s'est appuyé sur les techniques de fabrication de MEMS (MicroElectroMechanical Systems) démontrant ainsi la faisabilité d'une telle approche. Ces micro-capteurs ont montré une amélioration du temps de réponse d'un ordre de grandeur par rapport aux sondes classiquement utilisées pour l'étude d'écoulements turbulents. Surtout, une meilleure détection des petites fluctuations des grandeurs physiques d'intérêts a été observée. Cependant, ces capteurs restent perfectibles. Leur procédé de fabrication se base notamment sur des techniques complexes à mettre en œuvre. De plus, les caractéristiques thermo-électriques de ces sondes, essentielles aux mesures par fil chaud ou fil froid, ont montré des variations dans le temps les rendant alors difficilement utilisables sur une longue durée. Des améliorations peuvent donc être envisagées pour de tels micro-capteurs en vue de faciliter leur fabrication mais aussi leur durabilité. Enfin, il peut être remarqué qu'aucune sonde de ce type n'a été réalisée jusqu'à présent dans le but d'effectuer des mesures simultanées de vitesse et de température. Ces travaux visent ainsi également à explorer cette possibilité qui apporterait un moyen métrologique important dans le cadre de caractérisation d'écoulements aérothermiques.

De manière synthétique, cette étude consiste au développement de micro-capteurs thermo-résistifs permettant de repousser la limite de détection des petites échelles contenues dans un écoulement turbulent. Le premier objectif est de réaliser des sondes fonctionnelles permettant de réaliser des mesures anémométriques ou thermométriques pour ensuite se tourner vers un second objectif visant à développer un capteur du même type mais effectuant ces deux mesures de façon simultanée.

Organisation du manuscrit

Afin de présenter la démarche scientifique et les recherches effectuées durant ces travaux de thèse, le manuscrit qui suit est séquencé en trois parties.

La première partie est tout d'abord consacrée à l'état de l'art des techniques de mesures déployables en écoulement turbulent, faisant l'objet du chapitre 1. Le second chapitre permet quant à lui de présenter les équations et grandeurs d'intérêts présentes dans ce type d'écoulement. Pour terminer cette première partie, il est question de s'intéresser plus en détails à la théorie des sondes

à fil chaud et fil froid étant donné que ces capteurs sont l'objet principal de ces travaux.

La seconde partie du manuscrit est dédiée à la présentation des différents moyens de fabrications et à l'étude des procédés associés pour réaliser plusieurs géométries de capteur. Ainsi, le chapitre 4 se concentre sur la fabrication de micro-sondes au design non profilé tandis que le chapitre 5 vise lui à étudier différents procédés de fabrication afin de réaliser des dispositifs profilés. Une fois toutes ces sondes fabriquées, il est nécessaire de les connecter à différents appareils de mesures en vue de les caractériser et de connaître leurs performances. Le chapitre 6 a alors pour but de présenter les moyens mis en œuvre pour atteindre cet objectif.

Pour finir, la troisième et dernière partie de ce manuscrit revient sur l'utilisation des sondes réalisées dans des écoulements turbulents dans l'objectif de quantifier les performances de ces dernières pour la mesure des valeurs moyennes et des fluctuations de vitesse et de température. Le chapitre 7 est consacré à l'étude de couches limites turbulentes, et par conséquent aux seules mesures de vitesses. Le chapitre 8 vise lui à présenter l'étude des micro-sondes pour la mesure de température. Dans ce chapitre, les premiers résultats obtenus avec des dispositifs permettant de réaliser une mesure simultanée vitesse/température sont aussi décrits.

Première partie

**État de l'art et éléments de base
théoriques**

État de l’art des moyens métrologiques adaptés à la mesure de vitesse et de température en écoulements turbulents

Ce chapitre vise à présenter les moyens technologiques à disposition pour la mesure de grandeurs physiques permettant de caractériser un écoulement turbulent aérothermique. Il sera ici question de lister les méthodes expérimentales donnant accès aux grandeurs moyennes de l’écoulement mais également de manière tout aussi importante à leurs fluctuations. C’est pourquoi les techniques de mesures de vitesse par capteur de pression et de température par thermocouple ne seront pas développées ici, leur temps de réponse ne permettant pas un accès précis à ces grandeurs. Ce chapitre permettra aussi de mettre en avant et de justifier l’intérêt porté à la miniaturisation des sondes anémométriques durant cette thèse.

Dans un premier temps, un intérêt sera porté aux moyens métrologiques permettant de mesurer une ou plusieurs composantes de vitesse dans un écoulement. Ensuite les techniques de mesure de température seront étudiées. Pour finir, les approches expérimentales permettant de mesurer simultanément vitesse et température d’un écoulement seront présentées.

Sommaire

1.1. Mesure de la vitesse d’un écoulement	4
1.1.1. Vélocimétrie laser Doppler (LDV)	4
1.1.2. Vélocimétrie par Images de Particules (PIV)	6
1.1.3. Anémométrie à fil chaud (AFC)	8
1.2. Mesure de la température	16
1.2.1. Mesure optique de la température d’un écoulement	16
1.2.2. Thermométrie à fil froid (TFF)	17
1.3. Mesure simultanée vitesse/température	19
1.4. Bilan	21

1.1. Mesure de la vitesse d'un écoulement

Trois moyens métrologiques différents sont communément utilisés pour la mesure de vitesse dans un écoulement turbulent. La vélocimétrie laser, plus fréquemment nommée Laser Doppler Velocimetry (LDV), et la vélocimétrie par images de particules, ou Particule Image Velocimetry (PIV), sont des techniques optiques utilisant des traceurs micrométriques ajoutés à l'écoulement et perturbant faiblement celui-ci. L'anémométrie à fil chaud (AFC) est quant à elle une technique plus intrusive requérant l'insertion d'une sonde dans l'écoulement d'intérêt. Il sera ici question de s'intéresser brièvement à leur principe de fonctionnement et d'observer les avantages et limites de chacune d'entre elles pour une mesure de vitesse dans un écoulement turbulent.

1.1.1. Vélocimétrie laser Doppler (LDV)

Principe de mesure

La LDV est une technique optique de mesure de la vitesse d'un écoulement. Elle peut donc généralement être considérée comme non intrusive mais ce n'est pas une mesure directe. En effet, elle nécessite la présence de traceurs (particules) qui suivent les mouvements de l'écoulement et c'est en analysant la lumière ré-émise par ces particules illuminées par des faisceaux lasers qu'une estimation de la vitesse locale d'un écoulement est obtenue. Plus précisément, cette technique se base sur la détection du décalage Doppler en fréquence de la particule en mouvement par rapport au laser. Ce principe de fonctionnement est présenté ci-dessous et est résumé dans la Figure 1.1.

Considérons une source laser, de longueur d'onde λ , émettant à une fréquence f_0 dans une direction \vec{r}_0 sur une particule se déplaçant dans un fluide à une vitesse \vec{U} . Par effet Doppler, la particule représentant un observateur mobile par rapport à une source fixe (le laser) va recevoir un faisceau à une fréquence f_p différente de f_0 :

$$f_0 - f_p = -\frac{\vec{U} \cdot \vec{r}_0}{\lambda}. \quad (1.1)$$

Si la particule est désormais observée par un détecteur dans une direction \vec{r}_d , l'effet Doppler

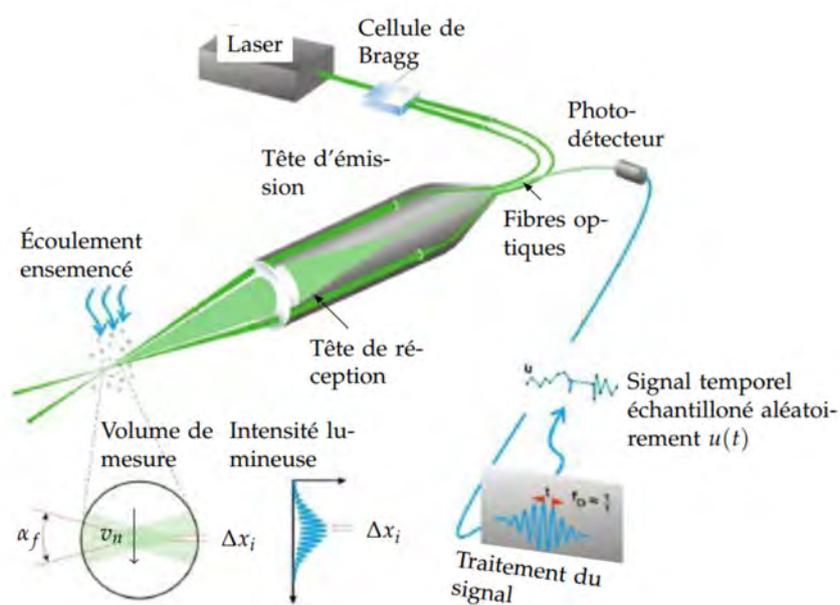


FIGURE 1.1. – Principe d'une mesure par LDV double faisceau [34].

implique une nouvelle fois que la fréquence du signal arrivant au détecteur, notée f_d , est une fréquence différente de celle émise par la particule car celle-ci est en mouvement (source mobile et observateur fixe). Il est ainsi possible de montrer que le décalage Doppler, considéré comme la différence entre la fréquence d'émission et celle de réception, est fonction de la vitesse de la particule \vec{U} [6] et s'exprime :

$$\Delta f = f_d - f_0 = -\frac{\vec{U} \cdot (\vec{r}_0 - \vec{r}_d)}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Dans les années 60, en utilisant ce principe, Yeh et Cummings [93] ont démontré pour la première fois qu'il était possible de mesurer la vitesse d'un fluide à l'aide d'un laser, réalisant ainsi la première mesure LDV. Cependant, comme le montre l'équation 1.2, le décalage mesuré est fonction de la direction de l'observation r_0 rendant la mesure uniquement réalisable avec des systèmes optiques de petite ouverture. Le signal reçu est alors relativement faible avec un rapport signal à bruit très faible. Des améliorations ont donc rapidement été proposées [73], en s'appuyant sur l'utilisation de deux faisceaux laser de directions différentes provenant de la même source et se croisant pour illuminer la particule dans le volume de mesure ainsi créé. Avec une telle configuration, la particule renvoie deux signaux de fréquences (f_{d1} et f_{d2}) et directions différentes (\vec{r}_{d1} et \vec{r}_{d2}) mais dont la différence est toujours fonction de la vitesse, soit :

$$\Delta f = f_{d1} - f_{d2} = -\frac{\vec{U} \cdot (\vec{r}_{d1} - \vec{r}_{d2})}{\lambda}. \quad (1.3)$$

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir collecter la lumière diffusée par la particule dans n'importe quelle direction et en utilisant des optiques grand angle permettant ainsi d'augmenter la quantité de lumière reçue. Elle est couramment nommée LDV à double faisceau.

D'un point de vue plus expérimental, le fait de croiser deux faisceaux identiques permet de créer un réseau de franges d'interférence de la forme d'une ellipsoïde, considéré comme le volume de mesure. Une particule qui traverse ce volume de mesure alterne entre des franges sombres et lumineuse, ré-émettant un signal lors de son passage dans ces dernières. Le signal détecté est alors proportionnel à la fréquence de passage de la particule dans ce réseau de franges et par conséquent à sa vitesse. Afin de l'analyser, ce signal lumineux est converti en signal électrique au moyen d'un photo-détecteur, comme par exemple une photo-diode à avalanche. Il est ensuite post-traité numériquement pour obtenir une estimation de la vitesse de la particule connaissant les directions r_d et la longueur d'onde utilisée.

Il peut être noté qu'avec cette technique, la détermination de la direction de l'écoulement nécessite de modifier la fréquence d'un des faisceaux pour mettre en mouvement le réseau de frange à une vitesse constante et de direction opposée à l'écoulement. Ce décalage fréquentiel est généralement effectué à l'aide de cellules de Bragg et permet donc d'étudier des zones d'inversement de flux. Enfin, si l'utilisation d'un seul montage LDV à double faisceau permet d'estimer la composante de vitesse dans la direction $r_{d1} - r_{d2}$, il est aussi possible d'utiliser plusieurs lasers associés à différents montages optiques pour réaliser plusieurs plans d'interférences. Chaque plan permet ainsi d'avoir accès à une composante de vitesse et il est donc envisageable d'estimer localement les 3 composantes de vitesse par LDV.

Ce principe de mesure LDV n'a que très peu évolué au cours des dernières décennies. En effet, les travaux de recherches sur le sujet se sont principalement concentrés sur l'amélioration des montages optiques ainsi que sur le traitement du signal et des données pour obtenir de meilleures résolutions spatiales, atteindre de hautes fréquences d'acquisition mais aussi une meilleure détection des particules [78].

La résolution spatiale d'un système LDV est associée aux dimensions de son volume de mesure. Cette taille est fonction du montage optique et est de l'ordre d'une centaine de micromètres concernant la hauteur de l'ellipsoïde et de quelques millimètres pour sa longueur. De manière générale, c'est la hauteur qui est considérée comme grandeur définissant la résolution spatiale. Afin de réaliser des mesures précises, il est nécessaire d'observer le temps de réponse des particules

quant à leur capacité à suivre les mouvements du fluide. Celui-ci dépend des propriétés des particules mais aussi du fluide dans lequel elles sont placées et est caractérisé par le nombre de Stokes. Les particules sont ainsi choisies de manière à suivre le plus fidèlement possible l'écoulement tout en renvoyant une intensité lumineuse assez importante pour être détectée par le système de mesure. Classiquement, les particules utilisées ont un diamètre proche de $1\ \mu\text{m}$ et une réponse fréquentielle entre $100 - 200\ \text{kHz}$. Cependant la principale limite sur la résolution temporelle d'un système LDV reste la fréquence d'acquisition des processeurs. Les récents progrès permettent d'atteindre des vitesses de transmission pouvant atteindre $200\ 000$ points par seconde mais il est plus fréquent de se trouver entre $50\ 000$ et $100\ 000$, voire bien moins pour un montage à plusieurs faisceaux et une détection coïncidente.

Limites de la technique de mesure

La LDV est une technique parfaitement adaptée à la mesure de la turbulence, indépendamment de son intensité, applicable à une gamme de vitesse très étendue. De plus, la très faible intrusivité de la technique la rend applicable aux études des écoulements présentant des inversions de flux comme dans des zones de décollement ou de recirculation. Elle est aussi très pertinente pour l'étude d'écoulements dans des environnements hostiles (corrosif, combustion, ...).

Cependant, elle présente aussi des limitations. Outre la nécessité d'un accès optique à l'écoulement, un montage LDV demande beaucoup de savoir-faire, de connaissance sur les optiques et de précision notamment pour assurer la convergence des faisceaux, par exemple. Il en est de même pour le traitement des données qui peut nécessiter d'employer des outils spécifiques et une calibration optique soignée pour extraire les grandeurs d'intérêt. De plus, les signaux obtenus ne sont pas continus car ils dépendent du passage des particules dans la zone de mesure. Cet échantillonnage aléatoire peut s'avérer préjudiciable pour l'estimation des spectres de fluctuation turbulente d'un écoulement. Cette discontinuité entraîne une résolution uniquement sur quelques décades. Ensuite, les dimensions du volume de mesure LDV peuvent induire un filtrage spatial des grandeurs mesurées notamment à grand Re . Enfin, dans le cadre de mesures d'écoulements pariétaux, la LDV permet difficilement de réaliser des mesures en proche paroi. En effet, la lumière du faisceau laser est diffusée par la paroi, induisant une diminution du rapport signal à bruit et limitant ainsi fortement la capacité de mesure dans cette région. Il est en général conseillé de ne pas approcher à une distance de plus de 2.5 fois le volume de mesure, environ $250\ \mu\text{m}$. Ceci peut s'avérer problématique pour l'estimation fluctuations de vitesse en très proche paroi, grandeurs souvent recherchées dans ce type d'application.

Il peut finalement être noté que l'intérêt principal des mesures LDV est de permettre d'estimer précisément les composantes de vitesse dans un écoulement de manière locale. Cette technique n'est donc pas nécessairement adaptée à toutes campagnes de caractérisation d'écoulement turbulent. Les temps d'acquisition d'un point de mesure sont souvent très élevés ce qui rend les mesures en plusieurs points chronophages. L'utilisation de bancs de déplacement facilite la mise en œuvre mais rend aussi le montage encore un peu plus complexe, ces derniers devant être d'une grande stabilité pour ne pas perturber la mesure et éviter d'éventuelles vibrations ou le découplage des faisceaux.

1.1.2. Vélocimétrie par Images de Particules (PIV)

Principe de mesure

Apparue dans les années 80, la PIV permet une mesure instantanée du champ de vitesse d'un écoulement. Elle est actuellement la technique de mesure ayant connu les plus importants développements techniques au cours des dernières décennies [86]. De la même façon que la LDV, la PIV nécessite l'ensemencement en particules de l'écoulement. Cependant, contrairement à cette précédente technique, tout un plan de l'écoulement est illuminé afin d'obtenir une image des

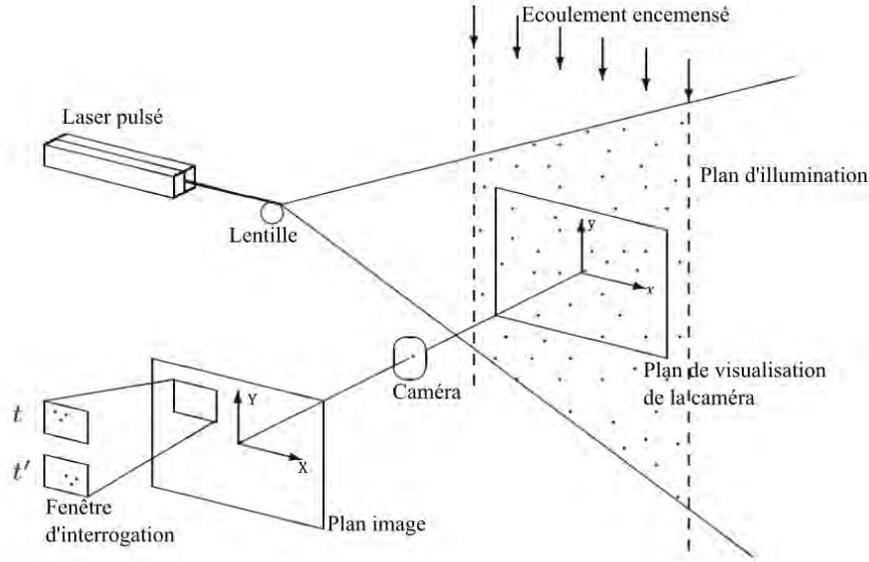


FIGURE 1.2. – Schéma présentant les principaux éléments d'une mesure 2 composantes dans un plan par PIV, adapté de Bailly et Comte Bellot [6].

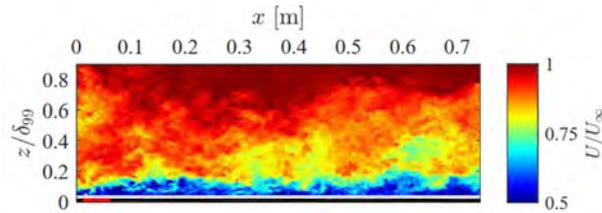


FIGURE 1.3. – Contour de vitesse moyenne U dans une couche limite turbulente, en fonction de la distance à la paroi z et de la position sur la plaque plane x [64].

particules présentent dans celui-ci. Ceci est réalisé à l'aide d'un laser pulsé dont le faisceau est modifié au moyen de lentilles pour former une nappe d'illumination. Le mouvement des particules est ensuite capturé à l'aide d'une ou plusieurs caméras à haute résolution. Les images ainsi enregistrées sont analysées pour déterminer le déplacement des particules entre paires d'images, donnant ainsi accès au champ de vitesse de l'écoulement. Pour illustrer le fonctionnement de cette technique de mesure, un schéma de principe est donné par la Figure 1.2 et un exemple de résultat de mesure est visible dans la Figure 1.3.

Pour obtenir une mesure précise de l'écoulement, il est nécessaire de choisir les particules de manière à ce que celles-ci suivent fidèlement l'écoulement et qu'elles renvoient aussi assez d'intensité lumineuse dans la direction de la caméra. Typiquement, le diamètre d'une particule est du même ordre de grandeur que celui des particules utilisées en LDV. La concentration de ces traceurs dans l'écoulement est une donnée importante pour obtenir des résultats fidèles. Il est nécessaire d'acquérir assez de particules dans les fenêtres d'interrogation pour déterminer précisément le mouvement du fluide. L'ensemencement de la zone de mesure est donc primordial d'autant plus qu'un nombre trop élevé de particules peut entraîner une perturbation du flux.

Le principe de la PIV se base sur l'observation du mouvement des particules entre deux instants. Pour ce faire, l'écoulement est illuminé durant une courte durée et ce de manière répétée à l'aide de lasers pulsés. Ils doivent émettre une intensité lumineuse assez puissante pour rendre

les particules visibles dans un intervalle de temps faible avec la plus haute fréquence possible. Actuellement, deux types de laser se distinguent principalement : les lasers Nd-YAG permettant d'atteindre des impulsions à haute puissance (400 mJ/pulsation) mais pour des fréquences de répétition autour de 10 Hz et les lasers Nd-YLF pouvant fonctionner à une cadence plus élevée, jusqu'à 10 kHz, mais de faible intensité (20 mJ/pulsation au maximum). Il faut cependant noter qu'afin de parvenir à des résolutions temporelles encore plus élevées de nouvelles technologies de lasers pulsés sont à l'étude, pouvant alors atteindre dans certains cas des fréquences de répétition de plusieurs centaines de kHz [32]. De manière générale, l'utilisation de la PIV entraîne un choix entre résolution spatiale, temporelle et volume de mesure. En effet, cette technique de mesure nécessite l'utilisation de caméras adaptées à la fréquence laser, généralement capables de réaliser l'acquisition de deux images séparées par un faible délai temporel, et présentant un capteur de bonne résolution (typiquement > 1 Mpx). Cependant, selon le type de caméras utilisées il n'est pas possible de respecter tous ces critères.

Les images de particules ainsi acquises sont ensuite traitées informatiquement à l'aide d'algorithmes de corrélation spatiale afin de déterminer les champs instantanés de déplacement et donc de vitesse associés à l'écoulement observé. Pour cela, les images sont divisées en fenêtres d'interrogation où le déplacement local moyen des particules est estimé. La taille de ces fenêtres joue ainsi un rôle important dans la précision d'une mesure PIV. Dans le cadre de mesures en CLT, Lavoie *et al.* [48] ont mis en évidence que la taille W d'une fenêtre d'interrogation induit un filtrage spatial sur la mesure de vitesse comparable à celui observé avec un fil chaud de longueur $\ell = 2W$, plus la taille de la fenêtre est large plus le filtrage spatial est donc important.

Il peut enfin être souligné qu'un intérêt important de la PIV est son extension possible à la mesure de 3 composantes de vitesse dans le plan de la nappe laser par un montage à 2 caméras (PIV stéréoscopique), ou encore à la mesure du champ de vitesse dans un volume 3D (PIV tomographique à 4 caméras par exemple). [86].

Limites de la technique de mesure

Le principal intérêt de la PIV est sa capacité à donner accès facilement à plusieurs composantes de vitesses sur un large champ en une seule mesure. Cette technique permet ainsi de représenter les champs de vitesse moyens et instantanés d'écoulements complexes en résolvant une gamme d'échelles de turbulence intéressante, mettant notamment en évidence les structures de grande échelle. Cet atout est cependant également son défaut. Contrairement à la LDV, elle ne permet pas d'atteindre des résolutions spatiales et temporelles aussi précises. En effet, la PIV nécessite un compromis entre visualisation globale de l'écoulement ou zoom sur une zone d'intérêt pour résoudre les petites échelles. De plus, les quantités dérivées, telle la vorticité ou l'énergie cinétique turbulente par exemple, sont généralement sous-estimées, la PIV agissant comme un filtre passe-bas sur les grandeurs turbulentes mesurées. Afin de résoudre cette problématique de filtrage, certains travaux se sont portés sur la proposition de modèles de correction des corrections, à l'image de Lavoie *et al.* [48]. Cependant, ces corrections nécessitent la connaissance des caractéristiques turbulentes de l'écoulement et donc l'utilisation d'autres moyens de mesures.

1.1.3. Anémométrie à fil chaud (AFC)

Principe de mesure

L'apparition du fil chaud se fait au début du siècle dernier et se démocratise suite aux travaux de King [42] menés sur les échanges convectifs autour de cylindres. Cette méthode de mesure a reçu un intérêt particulier de la part de la communauté scientifique durant la deuxième partie du XX^{ème} siècle (Comte-Bellot [16] ou Freymuth [27]). Cet intérêt a été motivé par le fait que l'anémométrie

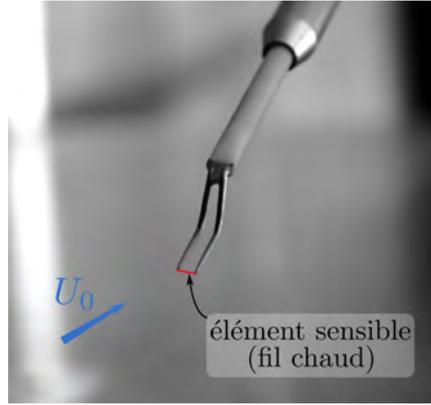


FIGURE 1.4. – Illustration d'un fil chaud sur son support (sonde Dantec 55P15).

à fil chaud est une technique se basant sur un principe physique simple et permettant de réaliser une mesure dans un écoulement de façon continue.

Cet instrument de mesure se base sur l'utilisation d'un fil métallique chauffé par effet Joule. Ce fil, l'élément sensible du capteur, est en général composé de platine et/ou de tungstène. Sa longueur est de l'ordre du millimètre, tandis que son diamètre varie généralement de 1 à 5 μm . Une fois placé dans un écoulement, ce fil chaud voit ensuite sa température modifiée par l'écoulement en convection forcée. La température instantanée du fil (T_w) peut ainsi être directement reliée aux fluctuations de vitesse et de température du fluide. Cette température peut être déterminée par une mesure de la résistance électrique du fil. En effet, la résistance d'un matériau thermorésistif, tel un fil métallique, est liée à sa température au premier ordre par la relation linéaire suivante :

$$R_w(T_w) = R_0(1 + \chi T_w). \quad (1.4)$$

où R_0 est la résistance du fil en Ohms à 0 °C et χ le coefficient de résistivité thermique du matériau. Ces paramètres sont déterminés par calibration et dépendent de la taille du fil ainsi que du type de matériau utilisé.

Dans un cas idéal, le bilan énergétique s'appliquant sur un fil dans écoulement stationnaire peut simplement se décomposer de la façon suivante :

$$R_w I^2 = (T_w - T_f) \Phi_{conv}(U). \quad (1.5)$$

avec I le courant injecter dans le fil et T_f la température de l'écoulement. La fonction $\Phi_{conv}(U)$ représente la dissipation par convection forcée et est dépendante de la vitesse de l'écoulement. Ce bilan (1.5) associé à la relation (1.4) montre qu'une relation vitesse/résistance de fil peut être obtenue, à condition d'estimer $\Phi_{conv}(U)$. De plus amples détails sur la détermination expérimentale de cette fonction et sur la physique des échanges de chaleur par convection forcée sur un fil seront donnés dans le Chap. 3.

Ce que l'on nomme anémomètre à fil chaud est la combinaison d'une sonde à fil chaud associée à son électronique de mesure. Différents modes de fonctionnement ont été développés depuis les années 1960 [16]. Il est ainsi possible de nommer l'anémomètre à courant constant (CCA, pour Constant Current Anemometry), à température constante (CTA, pour Constant Temperature Anemometry) et aussi à tension constante (CVA, pour Constant Voltage Anemometry). Ces différents modes de fonctionnement ont leurs avantages propres et seront présentés dans le paragraphe 3.2.2 du Chap. 3. Indépendamment du mode de fonctionnement considéré, la mesure réalisée au moyen d'un AFC s'appuie sur une physique continue d'échanges de chaleur par convection : le signal acquis est donc continu et permet ainsi d'accéder aisément à la distribution spectrale de fluctuations de vitesse mesurées. Un anémomètre correctement calibré peut typiquement atteindre une fréquence de coupure comprise entre 20 et 50 kHz [10]. Il est cependant important

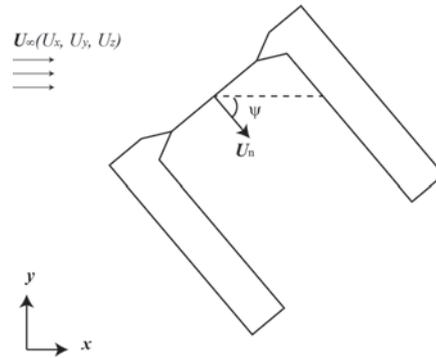


FIGURE 1.5. – Schéma de décomposition des vitesses dans un repère cartésien.

de souligner que cette fréquence est généralement déterminée à l'aide d'un incrément de tension envoyé dans le pont de conditionnement du fil, méthode communément appelée le "*Square Wave Test*". Ce n'est donc pas la réelle réponse fréquentielle du fil soumis à une impulsion de vitesse. Hutchins *et al.* [36] ont ainsi démontré que pour un AFC classique le contenu spectral d'un écoulement turbulent était correctement mesuré jusqu'à une fréquence de coupure d'environ 5 à 7 kHz.

Le placement de l'anémomètre par rapport à la direction de l'écoulement est primordial pour mesurer la composante de vitesse d'intérêt. La Figure 1.5 permet d'illustrer cette problématique dans le cadre d'un écoulement plan. En effet, l'échange de chaleur par convection forcée s'effectuant principalement dans une direction normale au fil chaud, la vitesse mesurée par un tel dispositif est représentative de U_n . Selon l'orientation du fil dans le plan, déterminée par l'angle ψ , U_n peut être décomposée en fonction de U_x et U_y par $U_n = U_x \cos(\psi) - U_y \sin(\psi)$. Ainsi, pour avoir accès uniquement à U_x , il est nécessaire de placer le fil de façon orthogonale à x . La détermination de plus d'une composante de vitesse nécessite quant à elle l'emploi de plusieurs fils présentant des orientations différentes. On trouve ainsi des sondes à deux fils, dites sondes en X, pour mesurer deux composantes de vitesse, ou des sondes à 3 voire 4 fils pour l'étude d'écoulements fortement tridimensionnels.

La technologie de fabrication d'un fil chaud classique est relativement simple. Deux broches métalliques sont d'abord placées dans un support en céramique permettant d'assurer le branchement du capteur et d'éviter tout court-circuit. Ensuite, le fil métallique (ou élément sensible) est soudé ou brasé au bout de ces broches (Figure 1.4). Le matériau du fil peut varier selon les applications du capteur. Les plus utilisés sont le cuivre, le platine, le tungstène, l'argent, le nickel ou un alliage de ces matériaux. Pour des utilisations dans des environnements sévères tel que des écoulements supersoniques ou des liquides, il est possible d'utiliser des films chauds. Se basant sur le même principe de fonctionnement, il fonctionne ici avec un fin film d'un matériau thermorésistif sur un substrat par exemple un cylindre de Quartz ou une fine feuille de Kapton. Les films sont ainsi plus robustes et permettent une isolation électrique dans des milieux conducteurs.

Limites de la technique de mesure

Contrairement aux techniques optiques précédemment décrites, l'anémométrie à fil chaud est une technique de mesure plus intrusive, l'introduction de la sonde dans l'écoulement pouvant fortement modifier celui-ci. Cette intrusivité est généralement acceptable pour l'étude d'écoulements incompressibles (couches limites laminaires ou turbulentes par exemple), mais peut être préjudiciable pour l'étude d'écoulements supersoniques ou d'écoulements décollés. Une autre limite de l'AFC est son incapacité à déterminer la direction de l'écoulement en cas de recirculation. Cette limite peut être évitée grâce à l'utilisation de la technique de l'anémomètre "volant" (*Flying Hot-Wire*), mis en avant par Thompson et Whitelaw en 1984 [77]. Cette technique consiste à mettre en

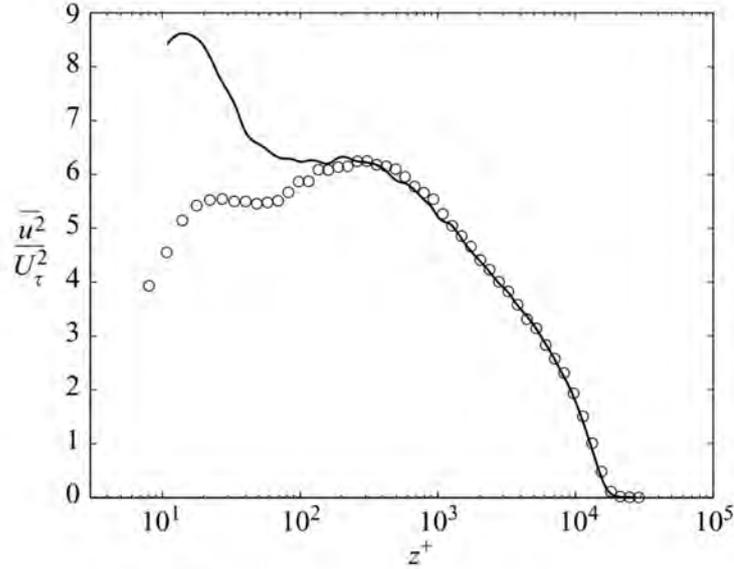


FIGURE 1.6. – Profil de l'intensité turbulente $\overline{u^2}$ dans une CLT en fonction de la distance à la paroi z^+ . La ligne représente une mesure pleinement résolue avec un fil chaud de longueur $\ell^+ = 22$ tandis que les cercles sont obtenus avec une sonde de longueur $\ell^+ = 115$ entraînant un filtrage [37].

mouvement le fil chaud dans l'écoulement à étudier grâce à un banc de déplacement. Connaissant la vitesse de déplacement de la sonde, la mesure obtenue par fil chaud peut ainsi être corrigée et présenter des valeurs signées. Malgré de bons résultats montrant la possibilité d'accéder à la direction de l'écoulement, sa mise en place est complexe et désormais les techniques optiques lui sont préférées en laboratoire [79].

Cet aspect intrusif de la mesure mis à part, une autre limite importante de l'anémométrie fil chaud est liée aux dimensions de son élément sensible. En effet, la taille des structures turbulentes présentes dans une couche limite turbulente (CLT) peut atteindre des dimensions bien inférieures au millimètre. L'effet de telles structures turbulentes sur un fil chaud de cette dimension est ainsi nécessairement filtré. Un tel filtrage spatial a notamment été mis en évidence par les travaux de Ligrani et Bradshaw [53] qui se sont intéressés à la mesure de fluctuations de vitesse axiale dans une CLT. Ces auteurs ont particulièrement montré cet effet de filtrage sur la mesure du pic de fluctuation de vitesse en proche paroi au moyen de sondes de différentes longueurs. Ces travaux ont permis de préconiser que la longueur du fil en variables de paroi devait satisfaire le critère $\ell^+ = \ell u_\tau / \nu < 20$ pour une mesure précise dans une CLT. Hutchins *et al.* [37] ont étendu cette étude montrant que ce filtrage spatial s'opère non seulement sur le pic de fluctuation en proche paroi mais également dans toute la région interne de la CLT, comme illustré dans la Figure 1.6. Enfin, cette étude a montré que ce filtrage peut être de l'ordre de 10% même pour $\ell^+ = 20$.

Cette limitation due à la longueur du fil pourrait inciter à vouloir la réduire, dans le but d'améliorer la résolution spatiale. Cependant, si le diamètre est trop grand par rapport à la longueur de l'élément sensible des effets indésirables de conduction dans les broches peuvent apparaître. Ce phénomène, nommé *end-conduction effects*, est le processus par lequel la chaleur du fil est conduite dans les broches qui le supportent. Ceci entraîne une distribution de température inhomogène dans le fil induisant un filtrage fréquentiel des données mesurées par atténuation des ondes de chaleur dans le fil. Pour éviter ces effets, Ligrani et Bradshaw [53] ou encore Hutchins *et al.* [37] préconisent d'utiliser des sondes avec un ratio longueur sur diamètre $\ell/d > 200$. Une diminution de la longueur d'un fil chaud doit donc s'accompagner d'une diminution de son dia-

mètre. Il peut être noté que ceci a aussi pour effet d'améliorer la résolution temporelle d'un tel capteur. En effet, une diminution de dimension entraîne une réduction de masse qui permet une réponse plus rapide aux variations de vitesse grâce à une inertie thermique plus faible.

Ces effets de filtrages spatiaux et temporels étant au cœur de ce travail de thèse et une analyse plus détaillée de ces derniers est développée dans le Chap. 3.

Progrès pour l'anémométrie

Ces limitations sur la mesure des fluctuations de vitesse ont entraîné de nombreuses recherches sur le sujet. Il a longtemps été question de corriger les mesures erronées obtenues avec un fil ne respectant le critère sur la longueur du fil. Chin *et al.* [14] ou Smits *et al.* [70] ont développé des modèles permettant de corriger respectivement les spectres d'énergie et l'intensité turbulente obtenus avec des mesures biaisées. Ces méthodes ont montré un réel intérêt mais ne sont applicables que pour des écoulements connus et ne sont pas déployables pour étudier de nouveaux phénomènes. C'est pourquoi la communauté scientifique s'est aussi tournée vers la fabrication de sondes à fil chaud comportant un élément sensible aux dimensions plus fines, où le plus grand enjeu a été de minimiser son diamètre.

Les premiers travaux ayant tenté de développer une sonde à fil chaud de dimensions réduites sont possiblement ceux de Willmarth et Sharma [89] en 1984. Ces auteurs ont réussi à fabriquer un fil atteignant une longueur $\ell = 25 \mu\text{m}$ avec un diamètre $d = 0.5 \mu\text{m}$. Pour atteindre de telles dimensions, ils se sont basés sur l'utilisation du procédé de Wollaston, du nom de son créateur William Hyde Wollaston. Cette méthode consiste à recouvrir un fil de platine (ou d'un alliage) par de l'argent avec une épaisseur presque 100 fois supérieure au diamètre initial du fil. L'alliage ainsi obtenu est ensuite étiré pour réduire son diamètre, diminuant par conséquent le diamètre du fil de platine. L'argent est ensuite retiré par gravure chimique dans un bain d'acide ou par électrolyse laissant apparaître uniquement le platine. Malheureusement, Willmarth et Sharma ont conclu que cette méthode rendait complexe l'obtention de dimensions très fines pour le fil, ce dernier étant très fragile. Ce manque de robustesse s'est également révélé préjudiciable pour l'utilisation de ces sondes à fil de Wollaston pour la mesure de vitesse en écoulement turbulent. D'un point de vue métrologique, les performances de ces capteurs se sont avérées peu satisfaisantes, des dérives de la tension de sortie de leur anémomètre au cours du temps ayant été reportées. Ces dérives furent attribuées à une lente réaction chimique due au revêtement d'argent et à sa gravure entraînant des migrations électrochimiques dans le fil. Ceci remet une nouvelle fois en cause l'utilisation de ce type de procédé. Enfin, le rapport longueur sur diamètre atteint était de $\ell/d = 50$, induisant une sensibilité à la vitesse de l'écoulement trop faible à cause des pertes de chaleurs dans les broches.

Se basant sur le même procédé, Ligrani et Bradshaw [54] se sont également intéressés à la fabrication d'anémomètres avec des fils de faibles dimensions. Ils se sont cependant affranchis des problèmes pouvant être liés à la conduction dans les broches en réalisant une sonde avec $\ell = 160 \mu\text{m}$ et $d = 0.625 \mu\text{m}$, soit un ratio $\ell/d = 256$. Ce capteur a montré une amélioration quant à la détection de l'énergie turbulente mais des biais significatifs de mesure furent observés. Ce résultat est la conséquence du filtrage spatial induit par une longueur du fil trop importante par rapport aux échelles spatiales de turbulences contenues dans l'écoulement. Ces observations mettent en évidence l'importance de réduire d'une part les effets de conduction dans les broches, mais également d'autre part d'assurer une dimension de l'élément sensible compatible avec les échelles à mesurer.

Une réduction plus significative des dimensions de fil semble être difficile avec ce type de procédé de fabrication, basé sur des technologies relativement classiques. L'apparition des techniques de micro-fabrication, particulièrement mises en œuvre pour la réalisation de MEMS, ont ouvert

plus de possibilités pour la miniaturisation de ces sondes. Dans les années 1990, Lofdahl *et al.* [51] ont ainsi pu développer des anémomètres donnant accès à une ou deux composantes de vitesse en utilisant de telles techniques. Ces capteurs ont donné des résultats comparables à ceux obtenus avec une sonde conventionnelle. Ils n'ont cependant pas permis d'atteindre une meilleure résolution spatiale mais ont démontré la pertinence de cette approche. Par la suite, Fukang Jiang *et al.* [29] ont ainsi conçu des micro-anémomètres en Polysilicium avec des dimensions minimales atteignant une longueur $\ell = 10 \mu\text{m}$ avec une largeur $w = 1 \mu\text{m}$ et une épaisseur $e = 0.5 \mu\text{m}$. Dans ce cas, ils ont montré que ce type de capteur pouvait atteindre des fréquences de coupure de l'ordre du MHz. Ces dimensions, bien que très encourageantes pour l'amélioration de la détection des petites échelles de turbulences, entraînent l'apparition des problèmes de conduction avec un ratio ℓ/d trop faible. De plus, leur design les oblige à être dans une position fixe en soufflerie ce qui limite fortement leur utilisation pour des mesures complètes d'écoulements.

Il faut attendre les travaux effectués par l'université de Princeton pour voir apparaître un micro-anémomètre pleinement fonctionnel améliorant la résolution spatiale et temporelle des capteurs existants. Le premier prototype de cette nouvelle sonde, nommée NSTAP (Nano-Scale Thermal Anemometry Probe), a été développé par Kunkel *et al.* en 2006 [45]. Se basant sur une géométrie proche d'un AFC conventionnel et sur des techniques de micro-fabrication classiques, ils ont obtenu un capteur comportant un micro-fil de platine de dimensions $\ell \times w \times e = 60 \times 2 \times 0.1 \mu\text{m}$ agissant comme élément sensible. Cette sonde est illustrée sur la Figure 1.7(a). Les premiers essais ont montré un bon comportement de ce capteur en terme de réponse électrique, rendant possible son utilisation pour une mesure de vitesse en écoulement turbulent. Cependant, sa forme s'est avérée trop intrusive, des perturbations aérodynamiques induites par les imposantes broches de Silicium ayant été observées. Par conséquent, de nouvelles étapes de développement ont été mises en œuvre pour donner au capteur une forme plus aérodynamique.

Pour arriver à cet objectif, un procédé de micro-découpage par laser a été utilisé pour obtenir le capteur visible Figure 1.7(b). Ce capteur a pu démontrer des capacités de mesure satisfaisantes, notamment avec un temps de réponse diminué d'un ordre de magnitude par rapport aux AFC disponibles dans le commerce [5]. Ce type de sonde est aussi compatible avec l'électronique de conditionnement déjà existante pour les fils chauds classiques, rendant leur utilisation en soufflerie aisée. Ces résultats ont permis de démontrer la pertinence d'une telle sonde avec un très bon accord sur les mesures de vitesses moyennes et de fluctuations entre les sondes classiques et ce nouveau miro-capteur. Pour autant, il a été rapporté que le rendement de fabrication du NSTAP à ce stade était très faible (5%) [81] et la forme du capteur pouvait présenter quelques défauts géométriques à cause de résidus présent autour des broches. Il s'en est suivi une nouvelle phase d'optimisation.

Vallikivi *et al.* [80] ont utilisé des techniques de fabrication plus complexes pour développer un procédé permettant d'obtenir des sondes avec des dimensions d'élément sensible du même ordre de grandeur mais avec une forme plus profilée comme visible sur la Figure 1.7(c). Pour arriver à ce résultat, ils ont utilisé différentes techniques de gravure du Silicium. Pour débiter, ils ont eu recours à la DRIE (Deep Reactive Ion Etching) qui est une technique de micro-fabrication permettant de graver très profondément le substrat de Silicium. Cette technique a été couplée au phénomène de "RIE lag" qui permet d'obtenir diverses profondeurs de gravure à différentes positions de la surface. Une dernière étape de fabrication est nécessaire pour finaliser le capteur. Il s'agit d'une gravure RIE (Reactive Ion Etching) isotrope qui permet de lisser la surface du micro-anémomètre. Une étude plus détaillée de ces procédés de fabrication est réalisée dans la Partie II de ce manuscrit. Il est cependant important de noter qu'il aura fallu de nombreuses années de développement pour arriver au dispositif NSTAP désormais utilisé par l'université de Princeton. En effet, pour obtenir ce micro-anémomètre, plusieurs étapes de fabrications complexes avec des équipements très spécifiques sont nécessaires.

Le capteur développé a désormais montré ses capacités métrologiques pour l'étude d'écoulements turbulents. Outre les résultats encourageants mis en avant par Bailey *et al.* [5], le NSTAP a été testé dans des écoulements pour lesquels un filtrage spatial s'opère sur des anémomètres

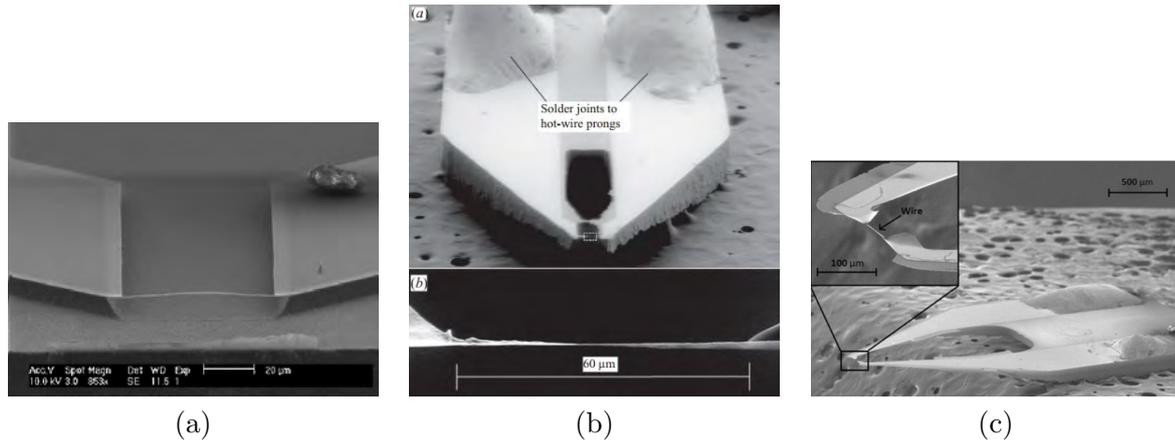


FIGURE 1.7. – Les différents prototypes de NSTAP : (a) Kunkel *et al.* [45], (b) Bailey *et al.* [5] et (c) Vallikivi *et al.* [80].

à fil chaud classiques. Les premières mesures à haut Re effectuées par Vallikivi *et al.* [80], ont ainsi montré une amélioration de la détection du pic de fluctuations de vitesse en proche paroi dans une CLT qui a été vérifiée par les mesures réalisées par Samie *et al.* [66] dont un résultat est montré Figure 1.8. Ces résultats ont ensuite motivé plusieurs campagnes de mesures et de recherche, comme le résume Smits et Hultmark [72], démontrant les améliorations apportées par le NSTAP du point de vue de la résolution spatiale et temporelle. Les équipes de recherche Princeton poursuivent toujours son développement avec notamment la création d'une micro-sonde en X (nommée X-NSTAP) pour la mesure de deux composantes de vitesse [28]. Le NSTAP a aussi montré une grande résistance aux écoulements à haute vitesse. En effet, Kokmanian *et al.* [43] ont utilisé ce micro-capteur à un nombre de Mach $M = 2$ sans observer de rupture, avec un signal de réponse en cohérence avec celui attendu et une haute fréquence de coupure.

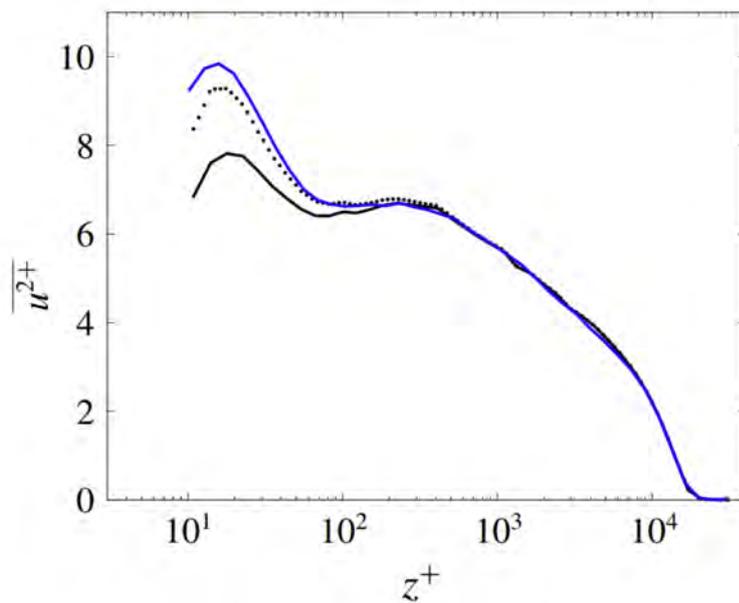


FIGURE 1.8. – Profil de l'intensité turbulente $\overline{u^2+}$ dans une CLT en fonction de la distance à la paroi z^+ . La ligne bleue représente les mesures réalisées avec un NSTAP, la ligne noire celles avec un fil chaud de longueur $\ell^+ = 29$ et la ligne en pointillée les mesures fil chaud corrigées [66].

En s'inspirant des travaux de Princeton, Le-The *et al.* [49] ont fabriqué un micro-anémomètre avec des dimensions encore plus fines : $70 \times 0.3 \times 0.1 \mu\text{m}$. Des images de cette sonde sont présentées dans la Figure 1.9. Pour obtenir ce capteur, ils se sont basés sur les mêmes techniques de fabrications pour développer un procédé tout aussi complexe. Ce prototype n'a pour le moment pas été entièrement validé pour la mesure de fluctuations de vitesse, mais il a tout de même montré une bonne réponse de calibration ainsi qu'une certaine robustesse. Les dimensions réduites de cette nouvelle sonde laissent présager une dynamique de réponse encore améliorée, pouvant apporter de nouvelles améliorations en termes de mesure de fluctuations de vitesse dans des écoulements à grands nombres de Reynolds.

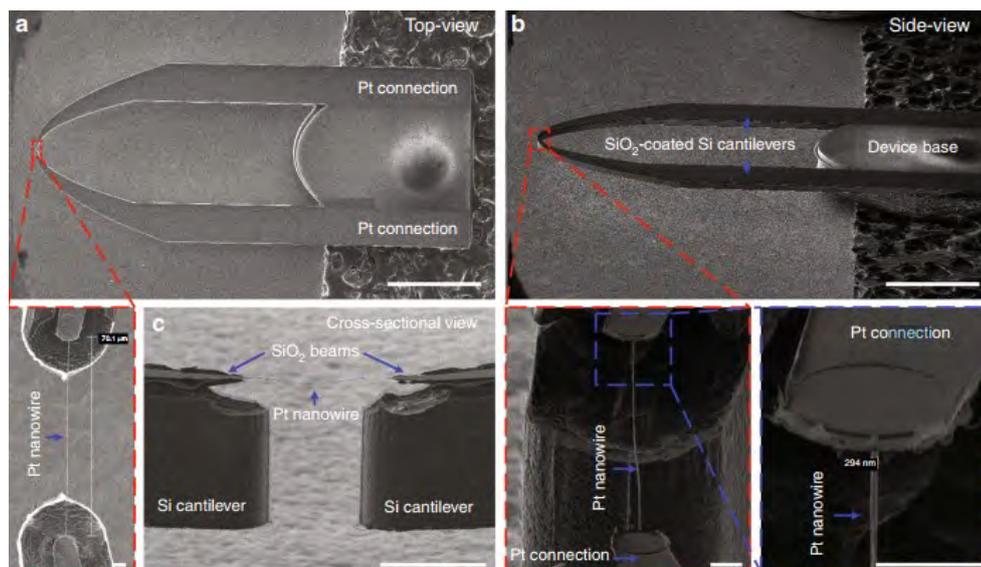


FIGURE 1.9. – Micro-anémomètre réalisé par Le-The *et al.* [49].

Le développement de micro-sondes anémométriques apparaît comme une solution très prometteuse pour pallier les limites spatiales et temporelles des AFC actuellement disponibles. La réduction des dimensions de l'élément sensible permet d'avoir accès à une grande partie du spectre turbulent et ce même à haute vitesse. Les moyens de fabrications pour obtenir ces sondes sont toutefois encore complexes, justifiant que si peu de prototypes aient aujourd'hui vu le jour.

Les progrès dans la fabrication des MEMS ont amené de nombreuses améliorations dans le domaine des capteurs, dans le cadre de la miniaturisation des AFC il apparaît intéressant d'observer aussi les apports de ces techniques de fabrication concernant les capteurs de contraintes pariétales étant donné que ceux-ci se basent sur un principe de mesure similaire, à savoir que ce sont des capteurs thermiques à convection. Ainsi il est possible de citer les travaux de Ghouila-Houri *et al.* [33] ou bien ceux de Weiss *et al.* [85]. Les équipes de recherche associées à ces travaux ont toutes deux réussies à obtenir des capteurs avec des éléments sensibles de faibles largeurs et épaisseurs, $3 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ pour les premiers et $5 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ concernant les seconds. Ces recherches permettent ainsi d'apporter une vue sur d'autres moyens de fabrications permettant d'obtenir des éléments sensibles de fines dimensions. Ils mettent aussi en avant l'importance d'utiliser des matériaux sensibles aux propriétés thermo-résistives stables pour effectuer des mesures efficaces. Ces micro-capteurs de contraintes pariétales ayant prouvé leur justesse de mesures, ils appuient ainsi une nouvelle fois l'intérêt des techniques de fabrication des MEMS pour l'amélioration des mesures AFC.

1.2. Mesure de la température

1.2.1. Mesure optique de la température d'un écoulement

Il existe plusieurs techniques non intrusives de mesure de température en écoulement. Bon nombre d'entre elles se basent sur les propriétés de propagation de la lumière et nécessitent un accès optique à l'écoulement. Parmi celles-ci, il est possible de distinguer les mesures directes des mesures indirectes. Les premières, comme leur nom l'indique, se basent sur une mesure directe d'une grandeur physique liée à la température de l'écoulement. Les techniques de mesures indirectes s'appuient sur la mesure de la densité de l'écoulement. Ces nombreuses techniques présentent toutes un intérêt propre selon leur application. Dans ce paragraphe, il sera question de s'intéresser brièvement à leur principe de fonctionnement pour discuter de leurs avantages et leurs limites. Une revue plus complète de ces techniques peut être trouvée dans l'ouvrage de Tropea *et al.* [79].

Vue d'ensemble

De nombreuses méthodes de mesure de la température d'un écoulement se basent sur l'utilisation de la spectroscopie laser. Les techniques mises en œuvre reposent sur des notions de physique de la lumière et de son interaction avec des particules ou des molécules qui sortent du cadre de cet état de l'art : il ne sera ici question que de donner une description qualitative de quelques techniques relativement courantes.

Une première technique est la LIF (Laser Induced Fluorescence) qui consiste à mesurer l'absorption de molécules fluorescentes soumises à une excitation laser. En effet, il est possible de montrer que cette absorption par une molécule est entre autre fonction de sa température. Des molécules fluorescentes peuvent être présentes naturellement dans l'écoulement et il est alors possible d'effectuer une mesure directe. Dans d'autres cas, à l'image de la PIV ou de la LDV, l'écoulement estensemencé en particules possédant les propriétés souhaitées. Les particules ou molécules sont ensuite excitées à une longueur d'onde donnée à l'aide d'un ou plusieurs lasers et la diffusion lumineuse de ces particules est acquise à l'aide d'une caméra. Un traitement permet alors de déterminer le niveau d'absorption des particules et ainsi de remonter à leur température. Ce moyen de mesure permet donc d'avoir aisément des mesures locales dans un champ et la reconstitution de champ de température dépendra de la concentration des molécules. Cette technique est souvent utilisée dans des configurations de combustion et peut être couplée à des mesures de vitesse, notamment de la LDV [21].

Une deuxième approche permettant de mesurer la température de façon ponctuelle est la CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering). Se basant sur la diffusion de Raman, cette méthode utilise un spectromètre pour mesurer les niveaux de vibrations des molécules, directement liés à leur température, dans un volume de mesure illuminé par des lasers de fréquences différentes. La calibration, pour obtenir des résultats précis, doit tenir compte de l'environnement de mesure mais permet d'atteindre une grande gamme de mesure (plus de 1000 K).

Une autre technique de mesure ponctuelle assez répandue est la thermométrie Rayleigh qui se base sur la diffusion élastique de la lumière. En effet, dans un tel régime le flux de photons renvoyé par un volume illuminé par une source laser est fonction de la masse volumique $\rho(T)$ de celui-ci [57]. Ainsi, en envoyant un faisceau lumineux à l'aide d'un laser focalisé sur un volume de mesure et en détectant l'intensité lumineuse renvoyé par celui-ci à l'aide d'un photo-détecteur il est théoriquement possible de déterminer $\rho(T)$. La masse volumique peut ensuite être linéairement reliée à la température pour certaines classes d'écoulement incompressibles présentant des variations modérées de masse volumique. Ce moyen présente l'intérêt de n'avoir aucune limite fréquentielle, si ce n'est celle de l'acquisition du signal du photo-détecteur, mais aussi une résolution spatiale

adaptable au phénomène en focalisant sur un plus ou moins grand volume de mesure. Cependant, à l'image de la CARS, c'est une mesure ponctuelle rendant son utilisation difficile pour un sondage d'écoulement. Elle nécessite de plus une calibration très précise afin d'obtenir une relation linéaire entre le flux de photon et $\rho(T)$. De plus, elle peut être très sensible à la présence de particules dans l'écoulement ré-émettant de la lumière par diffusion de Mie et pouvant entraîné une perte de précision.

Parmi les approches indirectes permettant de mesurer $\rho(T)$, la technique BOS (Background-Oriented Schlieren) possède la particularité de pouvoir réaliser des mesures globales en 2D axisymétrique ou en 3D. Une description et une présentation complète de cette technique est disponible dans l'article de Raffel [62]. Celle-ci se base sur la dépendance de l'indice optique d'un milieu à sa densité, cette dernière étant proportionnelle à la température comme cela a été énoncé précédemment. En observant un fond (le "*background*") à travers un milieu dont la densité varie, l'observateur verra celui-ci se déformer. Le fond est en général un mouchetis de points et les images de celui-ci acquises par une caméra s'approchent d'images de particules obtenues par exemple par PIV. La comparaison de ces images déformées par la présence de l'écoulement à une image du fond de référence (obtenue sans écoulement), permet d'estimer des champs de déplacement en s'appuyant sur des algorithmes de corrélation d'images initialement développés pour la PIV. Ces champs de déplacement peuvent être convertis en champs de déviations optiques et ainsi, par reconstruction tomographique, au champ 3D d'indice de réfraction ou de masse volumique. Les techniques actuelles permettent d'atteindre une précision de l'ordre du pourcentage d'erreur sur les valeurs mesurées. Les limites de cette technique de mesure sont comparables à celles mentionnées pour la PIV. Un choix doit donc être effectué entre résolution spatiale et champ observé et la fréquence d'acquisition des caméras peut être un frein à la mesure.

Bilan sur les mesures optiques

Les techniques de mesures de température présentées ci-dessus présentent l'avantage d'être non-intrusives et parfois déployable en environnements difficiles, par exemple pour l'étude de flammes. Outre leurs potentielles limitations de résolution spatiale et temporelle, ces techniques se basent sur des physiques de mesure assez complexes. Ceci peut rendre leur calibration délicate. Par exemple, pour les méthodes indirectes donnant accès à la masse volumique d'un écoulement, il est nécessaire de relier celle-ci à la température. Si dans certains cas relativement simples la loi des gaz parfaits peut s'appliquer, dans des cas plus complexes il n'est pas possible de connaître la pression de l'écoulement. Les techniques de CARS ou de LIF dépendent elles aussi de nombreux paramètres de l'écoulement et ne sont pas nécessairement les plus adaptées pour l'étude de certaines classes d'écoulements aérothermiques, comme un jet chaud par exemple. Il est alors souvent intéressant de se tourner vers des instruments de mesure plus facilement déployable en laboratoire. La thermométrie à fil froid permet de répondre à ce critère de relative simplicité.

1.2.2. Thermométrie à fil froid (TFF)

Principe de mesure

Un thermomètre à fil froid est en réalité le même capteur qu'un anémomètre à fil chaud mais avec un mode de fonctionnement différent. C'est en 1957 que Corrsin [18] introduisit la possibilité d'utiliser un fil chaud pour effectuer une mesure de température. En effet, en détaillant la sensibilité de mesure d'un tel capteur, il démontra que dans le cas où le courant injecté dans le fil est faible, celui-ci devient uniquement sensible à la température de l'écoulement. Ainsi si un très faible courant est injecté dans le fil, il n'est pas chauffé par effet Joule, d'où la dénomination de fonctionnement en fil froid. Dans le cas d'un fil idéal, on considère ainsi la température de l'écoulement égale à celle du fil. Il est ainsi possible de déterminer cette température en effectuant une

mesure de la résistance du fil grâce à la relation (1.4). D'un point de vue dynamique, il possède une certaine inertie thermique qui induit un temps de réponse à la température l'écoulement. Le cas d'un fil froid réel sera étudié en détails dans le Chap 3.

A l'image d'un fil chaud, le TFF permet de mesurer les variations de température d'un écoulement de manière continue. Cette mesure donne ainsi un accès aisé à différentes statistiques de température (moyenne, fluctuations, ...) et à sa distribution spectrale sur la gamme fréquentielle de mesure. Dans ce mode de fonctionnement à courant constant (CCA), le fil froid à une réponse fréquentielle limitée par son inertie thermique, qui est fonction de ses dimensions et de la vitesse de l'écoulement. Contrairement au mode CTA utilisé en AFC, en CCA l'inertie n'est pas compensée par une boucle de rétroaction, entraînant une fréquence de coupure plus faible. Ainsi, les fréquences de coupures d'un fil froid vont de l'ordre de quelques kHz à une dizaine de kHz selon la vitesse de l'écoulement [47].

Limites de la technique de mesure

La TFF est sujette à des limites d'utilisation comparables à celles évoquées pour l'AFC mais peut être affectée de manière différente. En ce qui concerne les effets de conduction dans les broches du fil, il a rapidement été observé que ceux-ci pouvaient entraîner un filtrage et ce même à basse fréquence [61]. Ainsi, Smits *et al.* [71] ont préconisé d'utiliser des fils froids avec un ratio $\ell/d > 1000$ pour éviter l'apparition de ce filtrage. Ce ratio élevé suggère qu'il est a priori nécessaire d'utiliser des éléments sensibles intrinsèquement plus long que ceux développés pour l'AFC entraînant une augmentation du risque de filtrage de spatial. En effet, Wyngaard [91] puis plus récemment Xia *et al.* [92] ont démontré qu'un TFF opère un filtrage spatial si sa longueur d'élément sensible est trop élevée par rapport aux longueurs caractéristiques de l'écoulement turbulent étudié. Tout comme en AFC, il est préférable de garantir $\ell^+ \leq 20$ pour avoir une erreur de mesure de moins de 10% dans une CLT thermique [92]. Une réduction de toutes les dimensions de la partie sensible du fil froid serait donc bénéfique pour ces deux problématiques. De plus, cela permettrait de diminuer l'inertie thermique du fil, augmentant sa fréquence de coupure et donnant ainsi accès à une meilleure résolution temporelle des variations de température dans un écoulement.

Progrès pour la thermométrie

Afin d'utiliser des fils de petites dimensions et de s'affranchir des limites apportées par les effets de conduction dans le fil, il a souvent été question de corriger dynamiquement les signaux obtenus par un TFF. Dans cette optique, Arwatz *et al.* [2] ont développé une approche modélisant les échanges thermiques au sein d'une sonde à fil froid. Celle-ci permet ainsi de corriger le signal mesuré par un TFF qui a été atténué par les pertes de chaleur dans les broches. Ce type de correction a prouvé son efficacité expérimentalement mais reste limité du fait qu'il soit nécessaire d'évaluer préalablement les échanges convectifs auxquels est soumise la sonde, rendant son utilisation pour l'étude d'écoulements inconnus plus complexe. De la même façon, Mercier *et al.* [57] ont pu développer des corrections permettant de compenser l'inertie thermique du fil, augmentant sa fréquence de coupure et aussi les pertes par conduction permettant l'utilisation de sonde avec un ratio $\ell/d = 400$. Une nouvelle fois, ces modèles sont basés sur l'estimation de la vitesse de l'écoulement limitant donc partiellement leur utilisation.

Un deuxième axe de recherche, a priori complémentaire à ces méthodes de correction, concerne naturellement la miniaturisation des sondes thermométriques. Suite aux travaux ayant abouti au développement du NSTAP, Arwatz *et al.* [3] ont fabriqué un micro fil froid se basant sur les mêmes techniques de fabrication mais avec des dimensions différentes. Afin d'obtenir un capteur plus adapté à la mesure de température et de limiter les effets de conduction plus impactant pour ce type de mesures, ils ont conçu un capteur avec un élément sensible de dimension :

$\ell \times w \times e = 60 \times 2 \times 0.1 \text{ }\mu\text{m}$. Ce capteur, grâce à ces faibles dimensions, a pu démontrer une réelle amélioration de la réponse fréquentielle grâce à une plus faible inertie thermique et qu'il ne semble pas être assujéti aux effets de conduction. Aucune conclusion n'a pu être portée sur la résolution spatiale de ce capteur mais il apparaît comme une solution viable pour l'avenir de la mesure d'écoulements turbulents thermiques contenant des fluctuations de températures portées par de petites échelles de turbulence.

1.3. Mesure simultanée vitesse/température

Il est souvent d'intérêt de vouloir mesurer simultanément la vitesse et la température d'un écoulement. En effet, les équations des écoulements turbulents aérothermiques (détaillées dans le chapitre suivant) mettent en avant la présence de termes croisés liant fluctuations de vitesse et température. De plus, comme précédemment mentionné pour la mesure TFF, il peut être utile de connaître la vitesse de l'écoulement pour mieux quantifier la réponse de la sonde mais aussi corriger son signal. Dans cette optique de déterminer vitesse et température, les études se sont souvent tournées vers des approches alliant plusieurs techniques de mesures. Ainsi, pour la caractérisation précise d'un jet chaud impactant, Grenson [34] a réalisé une série de mesures par PIV, LDV et TFF rendant ce montage expérimental complexe. Cette combinaison peut avoir un impact sur la qualité des mesures lorsque celles-ci sont réalisées simultanément : le fil froid pouvant être détérioré par la présence de particule dans l'écoulement par exemple. En pratique, les mesures de vitesses et de température ne sont donc pas simultanées mais réalisées l'une après l'autre, rendant l'obtention de ces grandeurs laborieuse. Utilisant une telle approche, Williams *et al.* [88] ont étudié une CLT thermique avec l'utilisation de PIV et d'un fil froid.

Il apparaît donc utile pour la communauté d'utiliser des moyens de mesures permettant directement d'accéder à deux grandeurs physiques de façon simultanée. Se basant sur les principes de la PIV et de la LIF, la thermographie par luminophore (*phosphor thermometry*) apparaît comme une technique intéressante pour ce type de mesure. Une revue des récents progrès de cet outil est présentée par Beyrau et Fond [8]. Dans cette approche, un écoulement est illuminé avec un laser et estensemencé par des particules, les luminophores, dont les propriétés d'émission varient avec la température. Par acquisition de cette intensité, il est alors possible de remonter à la température de l'écoulement, tout comme en LIF, et par acquisition du mouvement de ces particules il est possible de déterminer le champ de vitesse, à l'image de la PIV. Le choix des luminophores se fait selon les plages de température attendues et la résolution souhaitée, tout en respectant un bon suivi de l'écoulement pour des mesures de vitesse précises. Cette méthode va se confronter aux mêmes limitations que la PIV classique, à savoir la résolution spatiale de mesure associée à la caméra, sa fréquence d'acquisition mais aussi la capacité des particules à bien restituer la température (l'incertitude de mesure est rarement inférieure à 5 °C, ce qui doit être mis en regard de la plage de température étudiée) et nécessite bien entendu un accès optique à l'écoulement. Cependant, elle apparaît comme très prometteuse pour la représentation 2D des champs de vitesse et de température simultanément.

Pour avoir accès à ces grandeurs de façon ponctuelle, il est aussi possible de se tourner vers l'utilisation combinée d'un fil chaud et d'un fil froid placés perpendiculairement à l'écoulement. Comme l'énonce Bruun [10], différentes configurations sont possibles pour éviter qu'un fil influence la mesure de l'autre, mais également pour réduire le volume de mesure. Ainsi, les fils peuvent être placés l'un au-dessus de l'autre, l'un après l'autre ou bien côte à côte et chacun de ses placements présentent des avantages et inconvénients. En plus de ce problème de perturbation de la mesure entre chaque élément sensible, cette méthode va être confrontée aux mêmes problématiques que la TFF et l'AFC. En effet, le type de fil utilisé est le même que pour les méthodes individuelles et les effets de filtrage doivent toujours être considérés. Malgré les progrès démontrés par l'utilisation de micro-sondes pour ce type de mesure, aucune recherche sur

le développement de micro-capteur comportant deux éléments sensibles n'a été reportée à ce jour.

1.4. Bilan

Différentes techniques de mesures des fluctuations de vitesse ou de température dans un écoulement turbulent ont été présentées, chacune d'entre elles ayant leurs avantages et inconvénients. Les techniques optiques permettent notamment une mesure non-intrusive de ces grandeurs. Celles donnant accès à des champs de vitesse ou température (PIV, BOS, ...) se trouvent généralement limitées par leur résolution spatiale et temporelle. Les mesures ponctuelles donnent quant à elles accès à une grande précision de mesure mais leur complexité de mise en œuvre et de mesure rend leur utilisation parfois difficile pour des sondages d'écoulement.

Malgré leur intrusivité, l'anémométrie à fil chaud et la thermométrie à fil froid restent des outils métrologiques permettant d'avoir accès très simplement à ces grandeurs turbulentes. Longtemps limitées par leurs dimensions qui entraînaient un filtrage spatial ou temporel, le développement des techniques de micro-fabrication a offert de nouvelles perspectives pour la miniaturisation de ces sondes. Ceci a permis d'améliorer considérablement les performances de ce type de capteur quant à la détection des fluctuations de vitesse pour le fil chaud ou de température pour le fil froid.

Devant ces nouvelles avancées, le travail qui suit va explorer une autre approche pour la réalisation de micro-sondes anémométriques et thermométriques dans l'optique d'améliorer et de simplifier la mesure de fluctuations de vitesse et température dans un écoulement turbulent. Devant le peu de littérature sur le sujet de la mesure simultanée de ces deux grandeurs, un intérêt particulier sera porté au développement d'une micro-sonde à deux fils permettant ceci.

Physique des écoulements turbulents

Ce deuxième chapitre vise à présenter les équations et principes de base de la dynamique des écoulements turbulents et/ou aérothermiques.

Il sera question dans un premier temps de faire quelques rappels sur les principes des écoulements turbulents et de présenter les équations d'intérêt pour les décrire. Ceci permettra de montrer la complexité et la grande variété d'échelles spatiales et temporelles contenues dans un écoulement turbulent.

Les expérimentations effectuées lors de ces travaux de thèse afin de caractériser les sondes développées ont été principalement effectuées dans des couches limites turbulentes (CLT). Il est de ce fait primordial de s'intéresser et de présenter la physique de ces écoulements particuliers. Ceci sera l'objet de la deuxième partie de ce chapitre.

Pour finir, une troisième partie sera consacrée aux écoulements aérothermiques et aux équations de transport de chaleur afin de justifier l'importance d'une mesure simultanée de fluctuations de vitesse et de température.

Sommaire

2.1. Description statistique d'un écoulement turbulent	24
2.1.1. Rappel sur les écoulements turbulents	24
2.1.2. Dynamique du fluide : Équations RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) du mouvement	24
2.1.3. Échelles de la turbulence	26
2.1.4. Moyens de simulation pour la modélisation de la turbulence	26
2.2. La couche limite turbulente	27
2.2.1. Hypothèses et équations	28
2.2.2. Échelles caractéristiques de la couche limite turbulente	29
2.2.3. Structure spatiale de la couche limite turbulente	30
2.2.4. Représentation des profils de vitesses	31
2.3. Turbulence aérothermique	32
2.4. Bilan	33

2.1. Description statistique d'un écoulement turbulent

Cette partie vise à effectuer quelques rappels sur le comportement des écoulements turbulents ainsi que de présenter les équations les gouvernant. Elle se base principalement sur les ouvrages de Bailly et Comte-Bellot [6], de Tennekes et Lumley [76] et de Cousteix [20].

2.1.1. Rappel sur les écoulements turbulents

Il est possible de distinguer a minima deux grandes familles d'écoulements en régime incompressible : les écoulements laminaires et turbulents. La transition du premier état au second se fait généralement par l'apparition d'instabilités à mesure qu'un paramètre de contrôle augmente, le nombre de Reynolds. On parle alors de régime transitionnel. C'est à la fin du XIX^{ème} siècle que Osborne Reynolds observa et caractérisa pour la première fois ces différents états. En observant le mouvement d'un colorant dans un écoulement à l'intérieur d'une conduite cylindrique, il mit en évidence que le colorant suivait une ligne stable et parallèle à l'écoulement à faible vitesse, c'est à dire quand celui-ci est en régime laminaire. En augmentant la vitesse, le colorant commence à se disperser avec l'apparition de "burst" turbulents assimilés à un état de transition. A haute vitesse, le colorant est totalement dispersé car le mouvement du fluide est désorganisé, il est alors considéré comme turbulent. La turbulence est en réalité due à la prédominance des forces inertielles sur les forces visqueuses au sein du fluide en mouvement : c'est pourquoi elle apparaît à partir d'un certain seuil de vitesse. Il est alors possible de définir un nombre adimensionnel représentant le rapport entre ces forces qui permet de caractériser le régime dans lequel se trouve l'écoulement. Ce nombre est le nombre de Reynolds précédemment énoncé :

$$Re \equiv \frac{U L}{\nu}. \quad (2.1)$$

où L et U représentent respectivement une longueur et vitesse caractéristique de l'écoulement et ν la viscosité cinématique du fluide.

De nombreux écoulements présents dans la nature ou dans des applications industrielles et d'ingénierie sont turbulents. Cependant, il est très difficile de prédire et de caractériser efficacement la turbulence. En effet, la non-linéarité des équations gouvernant le mouvement d'un fluide, les équations de Navier-Stokes, induit la création de nombreuses structures de toutes tailles interagissant chacune entre elles. Il est donc peu aisé de définir précisément un état turbulent mais il est tout de même possible de présenter les caractéristiques globales de ce phénomène. Ainsi un écoulement turbulent est caractérisé par :

- son irrégularité, rendant les prédictions difficiles voire impossibles ;
- sa diffusivité, entraînant des forts taux d'échange énergétiques et une forte capacité de mélange ;
- un haut nombre de Reynolds, comme énoncé précédemment, la turbulence est la conséquence de la prédominance des forces inertielles sur les forces visqueuses ;
- des fluctuations rotationnelles et tridimensionnelles ;
- une forte dissipation ;
- sa continuité.

Afin de décrire un tel écoulement, il est commun de se baser sur l'utilisation d'outils mathématiques statistiques présentés ci-dessous.

2.1.2. Dynamique du fluide : Équations RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) du mouvement

Moyenne et décomposition de Reynolds

Considérons une grandeur $f(\vec{x}, t)$ d'un écoulement turbulent qui peut être typiquement assimilée à la vitesse, la température ou bien la pression et où \vec{x} désigne la position dans l'espace et

t la variable temporelle. La grandeur physique f peut être considérée comme une variable aléatoire et il est possible de définir sa moyenne d'ensemble, plus communément nommée moyenne de Reynolds $\overline{F}(\vec{x}, t)$:

$$\overline{F}(\vec{x}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f^{(i)}(\vec{x}, t). \quad (2.2)$$

Cet opérateur de moyenne a les propriétés de linéarité, de projectivité ainsi que de commutativité vis à vis des opérateurs de dérivation et d'intégration. A l'aide de cet outil, il est alors possible de décomposer toute grandeur turbulente f comme la somme de sa partie moyenne \overline{F} et sa partie fluctuante f' , c'est la décomposition de Reynolds :

$$f = \overline{F} + f', \quad (2.3)$$

avec $\overline{f'} = 0$. De cette façon le produit de deux variables aléatoires peut se décomposer de la manière suivante :

$$\overline{fg} = \overline{F} \overline{G} + \overline{f'g'}. \quad (2.4)$$

Équations

Afin d'avoir une évaluation statistique simple des équations de Navier-Stokes, le plus commun est d'utiliser la méthode de Reynolds qui consiste à appliquer la décomposition et la moyenne de Reynolds à ces équations instantanées. Ainsi sont obtenues les équations RANS du mouvement.

Dans le cadre de cette thèse, les écoulements étudiés sont tous considérés comme incompressible. Dans ce cas et selon la convention de sommation d'Einstein, l'équation de continuité se formule de la façon suivante :

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (2.5)$$

De la même façon l'équation RANS de quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U}_i \overline{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau}_{ij} + R_{ij}). \quad (2.6)$$

Ici $\overline{\tau}_{ij} = \mu \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j}$ représente le tenseur des contraintes visqueuses et $R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ le tenseur des contraintes de Reynolds. Ce terme non linéaire apparaît dans les équations RANS du fait de l'application de la moyenne de Reynolds. Il représente le transfert de quantité de mouvement induit par les fluctuations turbulentes.

Le tenseur de Reynolds fait apparaître une nouvelle inconnue (en pratique, ce tenseur est composé de six termes inconnus) dans les équations RANS rendant la fermeture du système impossible pour une résolution directe. Une approche possible consiste alors à estimer cette grandeur à l'aide de modèles de turbulence pour une résolution numérique. Les plus fréquemment utilisés sont par exemple le modèle $k - \varepsilon$ ou bien encore le modèle $k - \omega$, tous deux se basant sur l'approximation de Boussinesq. Il n'est pas question ici de détailler ces modèles mais il est primordial de noter qu'ils se basent sur des hypothèses approximant la physique de l'écoulement. De ce fait, il est souvent nécessaire de valider les paramètres ou constantes utilisés dans ces derniers. Cette validation passe par des mesures expérimentales précises et non biaisées des fluctuations de vitesse. Cependant, à cause de la grande variété d'échelles contenues dans un écoulement turbulent, cette mesure peut s'avérer complexe comme l'a montré le chapitre précédent.

2.1.3. Échelles de la turbulence

Comme énoncé précédemment, un écoulement turbulent contient une grande diversité d'échelles spatiales et temporelles. En effet, l'énergie turbulente est tirée premièrement des gradients de vitesse à grande échelle. En moyenne, cette énergie est ensuite transportée et transmise à des échelles de plus en plus fines pour finir par se dissiper en chaleur à une échelle où la viscosité devient prédominante. C'est à cette échelle que se trouvent les structures les plus fines contenues dans un écoulement turbulent et elle est appelée échelle de dissipation visqueuse ou encore échelle de Kolmogorov l_η . La différence de taille entre la plus grande L et la plus petite échelle l_η est dépendante du nombre de Reynolds de l'écoulement. Il est possible de montrer que le rapport de ces deux grandeurs suit la loi de proportionnalité suivante pour un écoulement turbulent homogène isotrope $l_\eta/L \propto Re^{-3/4}$. Ainsi, plus Re sera élevé plus la différence entre la taille de ces structures sera importante et surtout plus l'écoulement contiendra des petites échelles. En effet, la taille maximale d'échelle est souvent limitée par l'environnement ou s'établit l'écoulement. La Figure 2.1 illustre cette différence de taille des structures contenues dans un même écoulement à différentes valeurs de Re . Sur cette Figure, l'écoulement avec le plus grand Re (image du haut) présente une gamme de structures turbulentes plus riche. Ces échelles spatiales ont également des temps caractéristiques propres. De la même façon, plus le nombre de Reynolds de l'écoulement est élevé et plus les échelles temporelles contenues dans l'écoulement sont réduites. Ceci peut être observé à l'aide d'une analyse spectrale qui permettrait d'illustrer que l'énergie d'un écoulement turbulent est répartie sur une gamme fréquentielle continue et étendue.

Même si la résolution complète de toutes les échelles contenues dans un écoulement n'est pas toujours nécessaire il est primordial de noter qu'une large gamme d'échelles est contenue dans un écoulement et que pour une caractérisation précise de celui-ci, il est nécessaire de détecter au mieux toutes ces échelles.

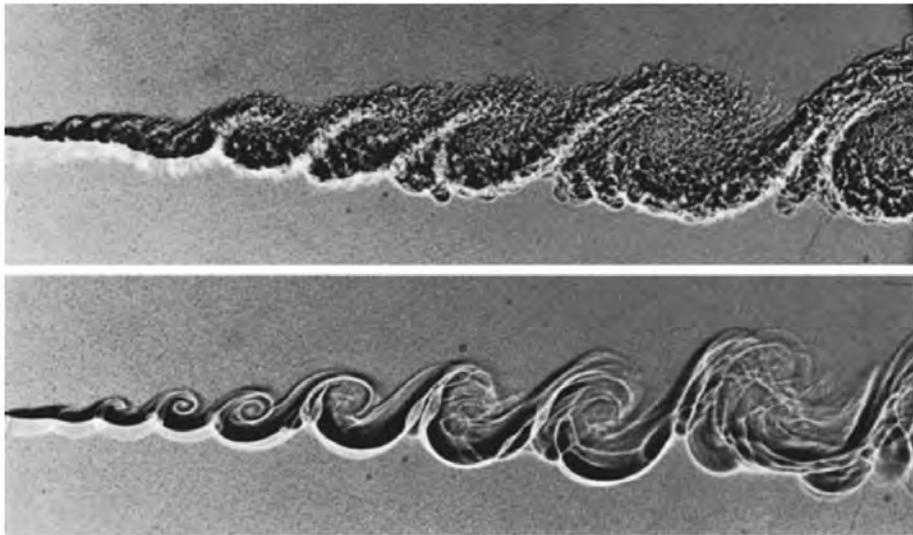


FIGURE 2.1. – Ombroscopie d'une couche de mélange entre un écoulement d'hélium et de nitrogène. Le nombre de Reynolds de l'écoulement de l'image du dessus est dix fois supérieur à l'autre écoulement. Image extraite de l'ouvrage de Bailly et Comte-Bellot [6]

2.1.4. Moyens de simulation pour la modélisation de la turbulence

Afin de représenter la physique d'un écoulement turbulent, il est possible de s'appuyer sur des outils de simulation numérique. Ce paragraphe vise à présenter brièvement ces moyens de calcul

et de montrer l'intérêt toujours présent de la mesure expérimentale pour compléter la simulation.

La DNS (*Direct Numerical Simulation* ou simulation numérique directe) vise à résoudre toutes les échelles contenues dans un écoulement turbulent par une résolution directe des équations de Navier-Stokes. Ainsi la plus petite maille d'une telle simulation est imposée par l'échelle de Kolmogorov. Cette approche est donc très précise mais aussi très coûteuse en terme d'équipements de simulation mais aussi en temps de calcul. En effet, le nombre de mailles nécessaires à une DNS est proportionnel à $Re^{9/4}$ pour un nombre d'itération en temps de l'ordre de $Re^{1/2}$. Ceci rend donc l'utilisation de cette technique difficile pour des écoulements particulièrement à grands nombres de Reynolds, elle est donc uniquement utilisée pour des études relativement fondamentales.

Une méthode plus utilisée pour la simulation d'écoulements complexes est la LES (*Large Eddy Simulation*) qui vise à résoudre directement les grandes échelles et à modéliser les plus petits tourbillons en appliquant un filtre de convolution aux variables de l'écoulement. L'idée principale de cette approche est de tirer parti de la relative universalité des petites échelles turbulentes qui peuvent alors être plus aisément modélisées. Ce filtre introduit alors de nouveaux termes dans les équations du mouvement nécessitant l'utilisation de modèles de fermeture. Cette méthode de simulation, ne résolvant pas toutes les échelles, voit son coût de calcul réduit par rapport à la DNS mais reste toujours important pour des calculs à haut Re . En effet, dans ce cadre il est nécessaire de raffiner les maillages pour ne pas trop filtrer les petites structures notamment pour des écoulements de proche paroi.

Afin de réduire au maximum le coût de calcul, il est possible de se tourner vers l'approche RANS qui consiste à modéliser l'ensemble du spectre de la turbulence et à ne résoudre que l'écoulement moyen par la résolution des équations RANS développées ci-dessus. Ceci fait ainsi apparaître de nouvelles inconnues, au nombre de 6, contenues dans le tenseur de Reynolds R_{ij} nécessitant l'utilisation de modèle de turbulence pour résoudre ces termes comme expliqué précédemment. Ces modèles se basant sur des hypothèses portées sur l'écoulement ne permettent pas à l'heure actuelle de prévoir correctement tous les types d'écoulement turbulent.

Devant des coûts et temps de calculs importants, spécifiquement pour la DNS, et la nécessité d'utiliser des modèles, la mesure expérimentale apparaît comme un outil primordial et complémentaire aux simulations numériques. Comme énoncé précédemment, elle permet d'apporter un domaine de validité aux hypothèses des modèles et aussi de développer de nouvelles méthodes de modélisation s'appliquant à des types d'écoulements turbulents encore peu explorés.

2.2. La couche limite turbulente

Les écoulements turbulents peuvent être séparés en deux catégories : les écoulements délimités par une paroi et les écoulements libres de cisaillement. Les premiers voient leur turbulence principalement générée par une condition de non glissement à la paroi. Les seconds puisent leur énergie turbulente dans les gradients de vitesse engendrés par une différence de quantité de mouvement entre deux écoulements (forcés ou au repos). Lors de cette thèse, les travaux se sont concentrés sur l'étude d'écoulements délimités par une paroi et plus précisément d'une couche limite turbulente canonique. Ce choix d'écoulement permet d'observer de fines échelles de turbulence au sein d'un laboratoire et donc de déterminer la capacité des micro-capteurs développés à détecter de telles échelles. Cette partie vise donc à présenter les différentes caractéristiques de la CLT se développant sur plaque plane et sans gradient de pression.

2.2.1. Hypothèses et équations

Le système d'axe choisi pour la suite est le suivant : la direction longitudinale est l'axe x , la direction transverse l'axe y et la direction normale l'axe z . L'écoulement se développant sur plaque plane est ici considéré comme bidimensionnel en moyenne dans le plan (x, z) , incompressible et stationnaire. De ce fait, la vitesse moyenne \bar{V} ainsi que les dérivées selon l'axe y sont nulles. Cet écoulement à une vitesse infini amont évoluant dans la direction longitudinale $U_\infty(x)$. Due à la condition de non glissement, la vitesse à la paroi est nulle et la vitesse moyenne longitudinale évolue de façon monotone en z de $\bar{U} = 0$ à $\bar{U} = U_\infty$. Cette croissance se fait dans la direction normale sur une distance $\delta(x)$ qui est l'épaisseur de la couche limite. Elle est définie comme l'altitude z à laquelle $\bar{U}/U_\infty = 0.99$, épaisseur alors notée $\delta_{0,99}$, et peut être estimée expérimentalement. La couche limite est ici considérée comme mince, c'est à dire telle que $\delta/L \ll 1$ où L est la longueur de la plaque plane sur laquelle se développe la couche limite, et pleinement turbulente. Une illustration de ces différentes grandeurs ainsi que des régimes dans lesquelles peut se trouver une couche limite est visible Figure 2.2.

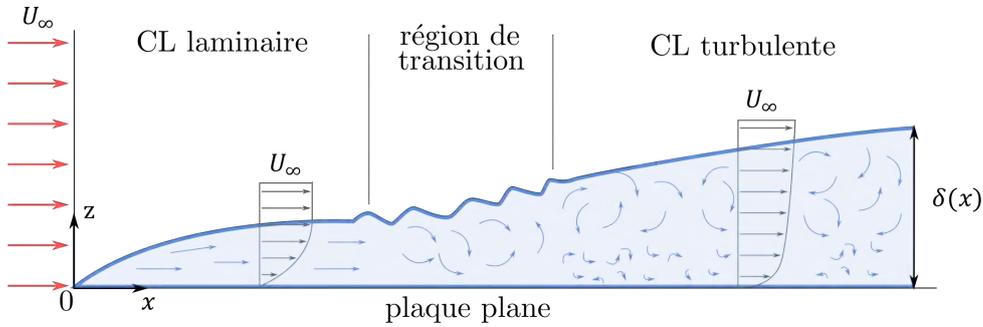


FIGURE 2.2. – Représentation 2D d'une couche limite (CL) se développant sur plaque plane.

Suivant ces hypothèses, les équations RANS dans le plan (x, z) se décomposent de la façon suivante :

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0, \quad (2.7)$$

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - \overline{u'^2} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \overline{u'w'} \right), \quad (2.8)$$

$$\left\{ \bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} \right\} + \left\{ \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} - \overline{u'w'} \right) \right\} + \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} - \overline{w'^2} \right) \right\}. \quad (2.9)$$

Par une analyse des ordres de grandeur des quantités contenues dans les accolades il est possible de montrer que certains termes peuvent être négligés dans le cas d'une CLT. Cette approximation, démontrée par Prandtl, permet de mettre en évidence que la pression dans la couche limite ne dépend que de la pression extérieure P_∞ . Ainsi par intégration de l'équation 2.9, il est visible que $\bar{P} = P_\infty(x)$. Ceci permet aussi de simplifier l'équation 2.8, où il est désormais possible d'appliquer l'équation de Bernoulli pour exprimer la pression en fonction de la vitesse extérieure.

Finalement, le système d'équations régissant le champ de vitesse moyenne d'une CLT est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \\ \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = U_\infty \frac{d\bar{U}_\infty}{dx} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \overline{u'w'} \right) \\ \bar{P} = P_\infty(x) \end{cases} \quad (2.10)$$

Ce système met en évidence l'importance du terme de corrélation croisée $\overline{u'w'}$ dans la formation du champ moyen d'une CLT. Les autres composantes du tenseur des contraintes de Reynolds interviennent quant à elles dans la définition de l'énergie cinétique turbulente ($k_t = (\overline{u'_i u'_j} \delta_{ij})/2$) pour laquelle une équation RANS décrivant son transport, sa production, sa destruction et sa diffusion dans une CLT peut également être obtenue. Par soucis de concision, il ne sera pas ici question de détailler cette équation. Il faut cependant noter que la mesure de ces différents termes permet ainsi de mieux comprendre et décrire la distribution spatio-temporelle de l'énergie turbulente dans de tels écoulement. De manière pragmatique, il sera ici question de s'intéresser principalement à la composante dominante du tenseur de Reynolds, pouvant être assimilée à la production d'énergie turbulente et qui est donnée par la variance de vitesse axiale u'^2 . En effet, celle-ci est facilement mesurable par anémométrie à fil chaud puisque ce moyen de mesure est principalement sensible à la vitesse axiale instantanée dans sa configuration la plus simple à un fil.

2.2.2. Échelles caractéristiques de la couche limite turbulente

La CLT peut se décomposer en deux zones distinctes : la partie interne où les effets de viscosité prédominent et la partie externe où la turbulence est pleinement développée en interface avec l'écoulement uniforme extérieur. Chacune de ces zones présentent leurs échelles propres.

Dans la région interne, et plus particulièrement en proche paroi, la condition de non glissement implique une contrainte à la paroi $\tau_w = \nu \rho \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)_{z=0}$ mettant en évidence l'importance de la contrainte visqueuse dans cette zone. Une analyse dimensionnelle permet alors de montrer que l'échelle caractéristique locale de vitesse dans cette région est donnée par la vitesse de frottement $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ tandis que l'échelle de longueur est définie par la longueur visqueuse $\ell_\nu = \nu / u_\tau$. Ces échelles permettent de représenter les propriétés de l'écoulement de façon adimensionnées dans la zone interne. Elles donnent aussi une représentation indépendante du nombre de Reynolds permettant de comparer différents écoulements. Ainsi dans la suite de ce manuscrit, les grandeurs présentées avec un exposant $+$ sont adimensionnées au moyen de ces échelles caractéristiques internes. La distance à la paroi est donnée par $z^+ = z / \ell_\nu$, la vitesse moyenne $\bar{U}^+ = \bar{U} / u_\tau$ et la variance de vitesse $\overline{u'^{2+}} = \overline{u'^2} / u_\tau^2$.

Dans la région externe, les contraintes turbulentes priment sur les contraintes visqueuses. Ces contraintes prédominantes sont cependant de l'ordre de u_τ^2 . Ainsi, il est commun de garder comme échelle de vitesse la vitesse de frottement plutôt que la vitesse extérieure. L'échelle de longueur est quant à elle assimilée à la taille des plus grandes structures turbulentes, c'est à dire l'épaisseur de la CLT δ . La distance à la paroi adimensionnée en variable externe est alors notée $\eta = z / \delta$.

Ces différentes tailles caractéristiques présentes dans un écoulement de CLT permettent de définir le nombre de Reynolds de frottement $Re_\tau = \delta u_\tau / \nu$. Il représente le rapport entre les grandes échelles énergétiques de la région externe et les petites échelles visqueuses de la région interne à l'image du nombre de Reynolds pour les écoulements libres. Ce nombre est un outil permettant de comparer les écoulements pariétaux. Il démontre aussi l'étendue des différentes échelles présentes dans une CLT. Par exemple, pour une CLT avec une épaisseur δ de quelques centimètres et un Re_τ de l'ordre de 10^3 , la longueur visqueuse sera de l'ordre d'une dizaine de micromètres. C'est typiquement une configuration pouvant être obtenue en laboratoire de recherche.

2.2.3. Structure spatiale de la couche limite turbulente

Outre les deux régions présentées précédemment, la couche limite peut se diviser en 4 zones distinctes : la sous-couche visqueuse, la couche tampon, la zone de recouvrement (ou zone logarithmique) et pour finir la zone de sillage. La disposition de ces différentes zones est présentée sur la Figure 2.3. Il est important de noter qu'à cause du terme inconnu de corrélation croisée $\overline{u'w'}$ présent dans l'équation de quantité de mouvement (2.10), il n'existe pas de description purement analytique du profil moyen d'une CLT sans gradient de pression. Certaines hypothèses peuvent être faites dans certaines régions afin d'aboutir à des relations locales, mais une description globale du profil moyen est nécessairement semi-empirique.

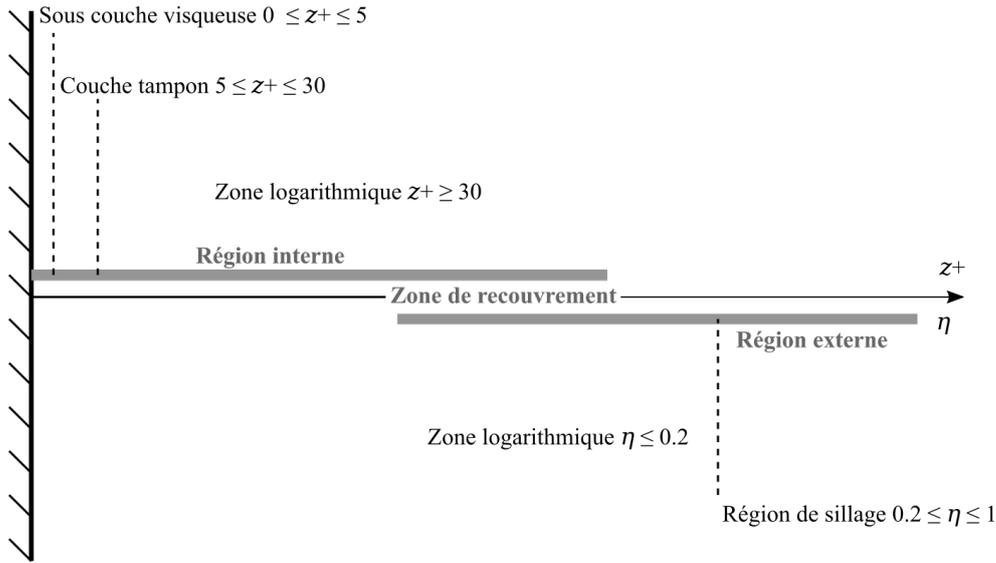


FIGURE 2.3. – Les différentes régions de l'écoulement dans une CLT.

Au plus près de la paroi ($z^+ \leq 5$), se trouve la sous-couche visqueuse. Dans cette zone, comme la viscosité est prédominante, il peut être montré que la vitesse moyenne évolue linéairement avec la distance à la paroi : $\overline{U}^+ = z^+$. S'en suit la région tampon (*buffer layer*) comprise entre $5 \leq z^+ \leq 30$ où la contrainte turbulente devient de plus en plus importante en comparaison des effets de viscosité. C'est dans cette zone où la production de la turbulence est la plus importante en comparaison de la dissipation. En conséquence, la contrainte de Reynolds $\overline{u'^2}^+$ y atteint un maximum. Plus précisément, un pic de fluctuation de vitesse est attendu aux alentours de $z^+ = 15$ et résulte du développement de stries longitudinales en très proche paroi alimentant le cycle de production de turbulence. Cependant, il n'est pas possible d'établir une relation décrivant la vitesse moyenne de l'écoulement du fait qu'aucune hypothèse ne peuvent être faites dans cette zone.

Au-delà de $z^+ \geq 30$, les contraintes turbulentes prennent le dessus sur les effets de viscosité (même si ceux-ci jouent toujours un rôle dans l'écoulement). Ainsi, par intégration dans cette zone intermédiaire entre les régions interne et externe où deux échelles de longueurs différentes doivent être en accord, il est possible de montrer que la vitesse moyenne doit évoluer de manière logarithmique par rapport à la distance à la paroi. Cette zone logarithmique définit la zone de recouvrement entre la fin de la région interne de la couche limite, existante jusqu'à $\eta = 0.1$, et le début de la région externe. Après $\eta \geq 0.2$, c'est la zone de sillage où la turbulence est pleinement développée et où la vitesse moyenne suit la loi de la vitesse déficitaire : $\overline{U}^+ = U_\infty^+ - \Phi(\eta)$.

2.2.4. Représentation des profils de vitesses

Profil de vitesse moyenne

En composant les différentes vitesses moyennes théoriques ou semi-empiriques de toutes les sous-couches de la CLT, il est possible de reconstruire un profil de vitesse composite sur toute l'étendue de la couche limite. Ce profil de vitesse est alors fonction des grandeurs caractéristiques de cet écoulement tel que $\overline{U}^+ = \overline{U}^+(\ell_\nu, u_\tau, \eta)$. Suivant cette approche, Chauhan *et al.* [12] ont développé un modèle très abouti permettant de représenter le profil de vitesse moyenne en fonction de la distance à la paroi. Il n'est pas ici question de détailler ce modèle dont certaines expressions peuvent être complexes et il est préférable de se référer à l'article en référence pour plus de détails. Il est tout de même intéressant de noter que ce modèle semi-empirique introduit une fonction de sillage permettant de représenter au mieux l'évolution de la vitesse dans la zone extérieure de la couche limite.

De part le bon accord entre ce modèle et différentes mesures expérimentales et simulations [13], il apparaît comme un outil intéressant et relativement fiable pour représenter la vitesse axiale moyenne d'un écoulement de CLT sur plaque plane et sans gradient de pression lorsque les différentes grandeurs caractérisant celle-ci sont connues. Il peut néanmoins être complexe d'accéder directement à ces valeurs (épaisseur de CLT, vitesse de frottement, paramètre de sillage, origine de la CLT, ...). Il est par exemple délicat d'estimer expérimentalement la vitesse de frottement locale dans une CLT. Ainsi, dans le cadre de mesures expérimentales, il est possible d'utiliser ce modèle par une approche inverse pour en déterminer les paramètres décrivant les profils de vitesses mesurées. Dans le cadre de ce travail de thèse, cette approche a été utilisée par méthode des moindres carrés avec prise en compte d'incertitude de mesure afin de déterminer les grandeurs caractéristiques des couches limites étudiées mais aussi de pouvoir représenter analytiquement le profil de vitesse moyenne dans ces écoulements. Cette approche s'appuie sur l'hypothèse que la CLT étudiée est canonique. Il sera donc nécessaire de valider celle-ci avant d'utiliser le modèle. Pour illustrer ces propos, un profil de vitesse moyenne reconstitué à partir de données expérimentales avec ce modèle est présenté Figure 2.4 (a).

Profil des fluctuations de vitesse - Contrainte de Reynolds

L'objectif de ces travaux étant de déterminer la capacité de micro-capteurs à détecter les petites échelles de turbulence, il est intéressant de disposer d'un modèle de comparaison permettant d'estimer le profil des fluctuations de vitesses à partir des grandeurs caractéristiques de l'écoulement. Se basant sur des observations empiriques et numériques, Marusic et Kunkel [55] ont développé un tel modèle permettant d'estimer l'intensité turbulente $\overline{u'^2}^+$ dans une CLT se développant sur plaque plane à l'aide des paramètres (ℓ_ν, u_τ, η) . Un exemple de profil de variance de vitesse axiale obtenu à l'aide de ce modèle est donné dans la Figure 2.4 (b). Cet outil de comparaison est relativement qualitatif car il présente une incertitude sur les niveaux de variance de vitesse axiale obtenus non négligeable. Une alternative plus quantitative serait de réaliser une DNS de la CLT étudiée dans ces travaux de thèse, mais une telle simulation n'a pas pu être envisagée par manque de temps. Dans la suite, il sera en partie possible de s'appuyer sur ce modèle afin d'évaluer la capacité des sondes développées à mesurer un profil de $\overline{u'^2}^+$ et à détecter le pic de fluctuation de vitesse à $z^+ = 15$, ce dernier étant souvent filtré en anémométrie à fil chaud comme cela a été présenté dans le Chap.1.

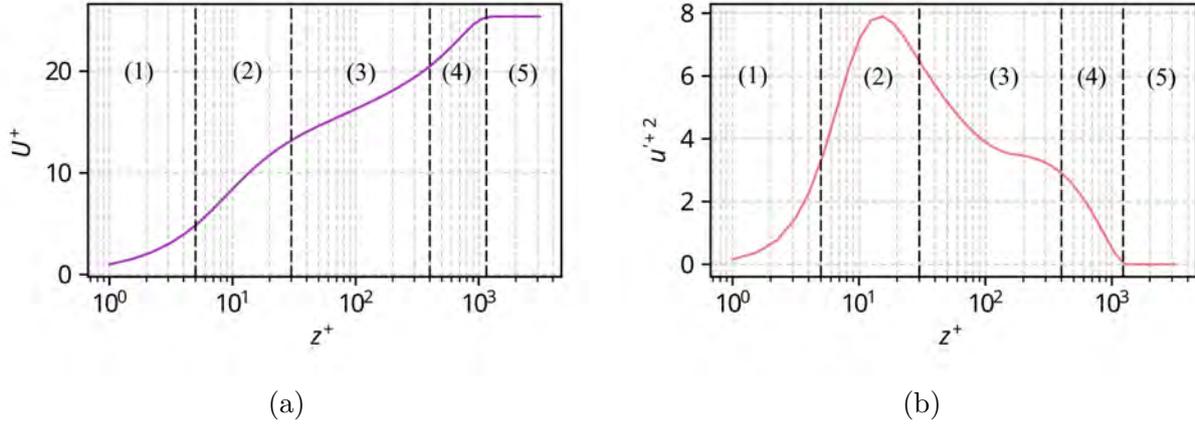


FIGURE 2.4. – (a) Représentation d’un profil de vitesse moyenne à l’aide du modèle de Chauhan *et al.* [12] reconstitué à partir de mesure fil chaud effectués à $Re_\tau \approx 1335$. (b) Reconstitution d’un profil de fluctuations de vitesse à l’aide du modèle de Marusic et Kunkel [55]. Les profils sont tracés en variable de paroi. La numérotation définit les zones de la CLT tel que : (1) sous-couche visqueuse, (2) couche tampon, (3) zone logarithmique, (4) région de sillage et (5) écoulement libre hors de la CLT.

2.3. Turbulence aérothermique

Les équations présentées jusqu’à présent ne prennent pas en compte les effets aérothermiques, c’est à dire le couplage entre la dynamique de l’écoulement et le transport de chaleur. Pourtant de nombreux écoulements naturels ou à application industrielle sont confrontés à ces problématiques d’échange thermique. Pour connaître la physique de tels écoulements il faut s’intéresser à la troisième des équations de Navier-Stokes, l’équation de la conservation de l’énergie. En prenant par exemple le cas d’un écoulement incompressible en régime stationnaire et en appliquant la décomposition et la moyenne de Reynolds, l’équation devient :

$$\overline{U}_j \frac{\partial \overline{\Theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \overline{\Theta}}{\partial x_j} - \overline{u'_j \theta'} \right), \quad (2.11)$$

où Θ représente le scalaire de température de l’écoulement et α le coefficient de diffusivité thermique.

Cette représentation RANS fait apparaître une nouvelle fois des termes inconnus au système d’équation nécessitant une modélisation pour sa résolution. Ces termes sont les trois composantes de flux de chaleur turbulent $\overline{u'_j \theta'}$ qui représentent le transport de chaleur par la turbulence. La modélisation de ceux-ci est un enjeu majeur pour les applications de turbulence aérothermique à l’image de la contrainte de Reynolds en aérodynamique. De nombreux travaux de recherche s’appliquent donc à définir des modèles permettant de décrire au mieux les écoulements aérothermiques, à l’image des travaux de thèse de Vanpouille [83] ou de Dehoux [22]. Ces thèses mettent en évidence la complexité de développer de tels modèles mais surtout de valider leurs domaines d’utilisation. Comme mentionné dans le paragraphe 2.1.4, les validations de ces modèles s’appuient principalement sur des comparaisons à des résultats de simulations directes très coûteuses en temps et en puissance de calcul ou par comparaisons à des données expérimentales. Ces dernières sont cependant souvent incomplètes car une mesure des composantes du flux de chaleur turbulent est rarement mise en œuvre ou très imprécise. Il apparaît donc très pertinent de développer un capteur permettant une mesure simultanée des fluctuations de vitesse u'_j et de température θ' .

2.4. Bilan

Ce chapitre a permis de présenter les différentes équations gouvernant la dynamique des fluides, notamment pour les couches limites, qui sont d'un intérêt particulier pour les mesures effectuées lors de ces travaux de thèse. Diverses échelles caractéristiques présentes dans ces écoulements turbulents ont également été définies et serviront à présenter les résultats de mesure de manière adimensionnée afin de pouvoir les comparer aux résultats de la littérature. Il a été mis en évidence la grande variété d'échelles spatiales et temporelles contenues dans ces écoulements turbulents, la séparation d'échelles dans le domaine spectral augmentant avec le nombre de Reynolds de l'écoulement étudié. Dans le cas d'une couche limite turbulente, il a pu être observé l'existence d'un pic de variance de vitesse en très proche paroi, à une distance à la paroi de l'ordre de $z^+ = 15$ et qui est induit par des structures présentant une étendue spatiale du même ordre de grandeur. Dans une configuration de laboratoire, cet ordre de grandeur peut être autour de la centaine de micromètres, tandis qu'à plus grand nombre de Reynolds des échelles encore plus fines peuvent être atteintes. Or, une mesure précise de ces termes de fluctuation de vitesse (et de température pour des configurations aérothermiques) intervenants dans les équations RANS est primordiale pour valider de nouveaux modèles. Le développement de nouveaux capteurs permettant de réaliser des mesures de vitesse et de température à des échelles micrométriques s'avère donc important pour une meilleure compréhension et modélisation des écoulements turbulents.

Théorie des capteurs thermorésistifs pour les mesures de fluctuations de vitesse et de température

Ces travaux de thèse portant sur le développement de micro-capteurs thermorésistifs, il est primordial de préciser leur fonctionnement.

Ce chapitre vise tout d'abord à présenter les échanges thermiques mis en jeu dans l'utilisation de tels capteurs pour identifier les quantités mesurées avec ces sondes. Dans un second temps, il sera question de s'intéresser plus particulièrement à l'utilisation de sondes thermorésistives en fonctionnement fil chaud pour une mesure de vitesse dans un écoulement d'air. Cette partie permettra aussi de mettre en avant les équations de fonctionnement du capteur ainsi que les problématiques rencontrées avec ce type de mesure puis d'exposer les différentes électroniques utilisables. Pour finir, la même analyse sera effectuée sur la mesure de température en mode fil froid.

Sommaire

3.1. Bilan des échanges thermiques	36
3.2. Théorie du fil chaud	37
3.2.1. Équation de fonctionnement	37
3.2.2. Modes de fonctionnement - Électroniques de mesure	38
3.2.3. Distribution de température dans le fil - <i>End-conduction effects</i>	41
3.2.4. Filtrage spatial d'un fil chaud	43
3.3. Théorie du fil froid	44
3.3.1. Principe de fonctionnement	44
3.3.2. Réponse fréquentielle	45
3.3.3. Filtrage spatial	46
3.4. Bilan	47

3.1. Bilan des échanges thermiques

Dans le cadre d'une mesure anémométrique à fil chaud (AFC) ou thermométrique à fil froid (TFF), différents échanges thermiques ont lieu entre le fluide et le capteur ainsi qu'au sein même de ce dernier. Ces phénomènes vont ainsi influencer la distribution de température dans le capteur et modifier sa résistance électrique. L'enjeu de la mesure est alors de relier ces variations de résistance aux variations des grandeurs physiques d'intérêt dans l'écoulement (vitesse et température). Il apparaît donc comme nécessaire de comprendre les phénomènes physiques qui ont lieu autour de ces sondes.

Il est possible de différencier trois modes d'échanges thermiques :

- Le rayonnement thermique est constitué de l'ensemble des échanges d'énergie à distance entre corps par ondes électromagnétiques. De ce fait, c'est un échange sans contact qui a lieu dans le vide ou à travers n'importe quel milieu matériel transparent à ces ondes. Cet échange thermique suit la loi de Stefan-Boltzmann. Dans le cas des mesures AFC ou TFF, ce type de transfert est négligeable [10].
- La conduction thermique est un phénomène de transfert de chaleur de proche en proche par diffusion d'énergie cinétique des constituants de la matière et nécessite donc un support matériel. Elle a lieu principalement dans les solides et les liquides et suit la loi de Fourier. Dans le cas présent, ce type d'échange thermique induit des pertes de chaleur dans le fil et dans le support de ce dernier.
- La convection thermique est quant à elle un déplacement de matière induisant un transfert de chaleur. Elle a lieu dans des fluides ou à l'interface fluide/solide. Il sera ici considéré uniquement de la convection forcée à l'interface fluide/solide étant donné que les mesures sont toujours effectuées dans un fluide en mouvement. Ce phénomène est décrit par la loi de Newton qui est fonction du coefficient d'échange thermique h dépendant notamment de la vitesse du fluide. Le principe des mesures AFC et TFF se base sur ce type d'échange thermique.

Comme présenté dans le Chap.1, une mesure AFC s'effectue en injectant un courant dans le fil, entraînant un chauffage de celui-ci par effet Joule. Ainsi, considérant un élément de fil pour réaliser un bilan d'énergie, l'énergie calorifique stockée est égale à l'énergie apportée par effet Joule à laquelle vient se soustraire les pertes par échange de chaleur dues à la convection forcée par l'écoulement et la conduction au sein du fil. Le bilan local le long du fil s'écrit alors [10] :

$$d\dot{Q}_s = d\dot{Q}_J - (d\dot{Q}_{cf} + d\dot{Q}_c), \quad (3.1)$$

où $d\dot{Q}_s$ est l'énergie stockée dans le fil, soit :

$$d\dot{Q}_s = m_{wx}c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx, \quad (3.2)$$

m_{wx} , c_w et T_w représentent respectivement la masse linéique ($m_{wx} = m_w/\ell$ avec ℓ la longueur du fil), la capacité calorifique et la température du fil.

$d\dot{Q}_J$ est l'énergie apportée par effet Joule :

$$d\dot{Q}_J = R_{wx}I^2 dx, \quad (3.3)$$

avec R_{wx} la résistance linéique du fil ($R_{wx} = R_w/\ell$) et I le courant qui lui est injecté.

$d\dot{Q}_{cf}$ est le transfert de chaleur par convection forcée :

$$d\dot{Q}_{cf} = hP_w(T_w - T_f)dx. \quad (3.4)$$

P_w est le périmètre du fil, T_f la température du fluide et h le coefficient d'échange convectif.

$d\dot{Q}_c$ représente le transfert par conduction au sein du fil, en considérant x comme la direction du fil dans le sens de sa longueur, k_w sa conductivité thermique et A_w sa surface de section :

$$d\dot{Q}_c = -k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx. \quad (3.5)$$

De cette façon, l'équation (3.1) peut se détailler ainsi :

$$m_{wx} c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = R_{wx} I^2 - h P_w (T_w - T_f) + k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2}. \quad (3.6)$$

Cette équation est une équation aux dérivées partielles régissant la distribution de température dans un fil de section constante qui nécessite des conditions aux limites et initiales pour sa résolution. Pour le cas du fil froid, le courant injecté étant faible il ne chauffe pas le fil par effet Joule. Le premier terme dans le membre de droite n'apparaît donc pas dans le bilan (3.6) pour ce type d'application.

3.2. Théorie du fil chaud

Cette équation différentielle donnant la distribution de température dans un fil est analysée dans cette partie afin de décrire plus en détails le fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud. Ceci permettra ensuite de présenter les électroniques nécessaires pour l'utilisation du fil comme anémomètre ainsi que les différentes problématiques induites par les dimensions de ces capteurs, telles la diffusion de la chaleur dans le fil ou le filtrage spatial, sur la justesse de la mesure.

3.2.1. Équation de fonctionnement

L'équation (3.6) prend en compte tous les phénomènes physiques mis en jeu pour un fil chauffé par effet joule placé dans un écoulement, excepté le rayonnement qui est négligeable. Cependant dans le cadre d'une mesure AFC, des hypothèses simplificatrices peuvent être considérées afin d'étudier le lien entre les signaux électriques délivrés par le capteur et la vitesse de l'écoulement. Tout d'abord, le fil chaud idéal voit son inertie thermique exactement compensée par l'électronique qui lui est associée en maintenant sa température constante. Ceci induit alors qu'en condition stationnaire : $\frac{\partial T_w}{\partial t} = 0$. De plus, il est possible de négliger les pertes par conduction dans le fil en considérant celui-ci suffisamment long pour que la distribution de température dans le fil soit uniforme sur toute sa longueur ℓ . Cette hypothèse n'est pas toujours valide et fait l'objet d'une analyse plus approfondie dans le paragraphe 3.2.3. Suivant ces hypothèses, l'équation (3.6) peut être réécrite de la façon suivante pour un fil de longueur ℓ et est alors fonction uniquement des échanges par convection forcée :

$$R_w I^2 = h P_w \ell (T_w - T_f). \quad (3.7)$$

Comme énoncé précédemment le coefficient d'échange convectif h est fonction de la vitesse de l'écoulement. Plus précisément, il peut être relié au nombre adimensionnel de Nusselt Nu qui caractérise les transferts thermiques par convection. Ainsi, la relation liant ces deux grandeurs est : $h = d k_f Nu$ où d est le diamètre du fil et k_f la conductivité thermique du fluide. L'équation (3.7) peut alors s'écrire :

$$R_w I^2 = \pi \ell k_f (T_w - T_f) Nu \iff Nu (\pi \ell k_f) = \frac{R_w I^2}{(T_w - T_f)}. \quad (3.8)$$

Le nombre de Nusselt peut être relié au nombre de Reynolds de l'écoulement considéré, mais cette relation dépend fortement de la configuration géométrique. Dans le cadre d'un écoulement autour d'un cylindre en régime subsonique, correspondant donc aux configurations généralement rencontrées en anémométrie à fil chaud pour le sondage de couche limite incompressible, la relation semi-empirique suivante peut être utilisée [6] :

$$Nu = A_1 Pr^{0.2} + A_2 Pr^{0.3} Re_w^n, \quad (3.9)$$

avec A_1 , A_2 et n représentant des constantes, Re_w le nombre de Reynolds associé au fil ($Re_w = Ud/\nu$) et Pr le nombre de Prandlt ($Pr = \mu/k_f$). Pour un écoulement d'air incompressible, ce dernier est considéré comme constant $Pr \approx 0.72$. De ce fait, cette expression s'écrit :

$$Nu \simeq 0.24 + 0.56 Re_w^n. \quad (3.10)$$

Enfin, il est important de rappeler que le matériau du fil est thermorésistif : il suit donc la loi (1.4) considérée comme linéaire au premier ordre, soit pour rappel : $R_w(T_w) = R_0(1 + \chi T_w)$. La combinaison de ces différentes équations permet d'aboutir à une relation reliant les paramètres électriques du fil à la vitesse de l'écoulement. Cette relation est connue sous le nom de loi de King [42] et est la relation de base de l'anémométrie à fil chaud, soit :

$$\frac{R_w I^2}{R_w - R_f} = A + B U^n. \quad (3.11)$$

Ici R_f est la résistance totale du fil à la température du fluide dans le cas où celui-ci n'est pas chauffé. A et B sont des constantes qui se décomposent de la façon suivante :

$$A \simeq 0.24 \frac{\pi \ell k_f}{\chi R_0} \text{ et } B \simeq 0.56 \frac{\pi \ell k_f}{\chi R_0} \left(\frac{d}{\nu}\right)^n.$$

Dans la réalité et comme exposé dans la section suivante, ces constantes ainsi que n sont déterminées par calibration et non au moyen des relations présentées ci-dessus afin de réduire au maximum les incertitudes introduites par les hypothèses effectuées pour les déterminer.

3.2.2. Modes de fonctionnement - Électroniques de mesure

Il existe trois modes d'opération pour les mesures fil chaud qui sont liés à l'électronique associée au capteur. Il est ainsi possible de distinguer :

- L'anémomètre à courant constant (CCA) qui, comme son nom l'indique, injecte un courant constant dans le fil durant la mesure indiquant que la température de celui-ci varie selon la vitesse de l'écoulement. Ce mode de fonctionnement a été le premier développé pour les mesures AFC.
- L'anémomètre à tension constante (CVA) qui, à l'image du CCA, voit sa température varier lors de la mesure. Cette électronique est la plus récente dans les développements pour l'anémométrie [68].
- L'anémomètre à température constante (CTA) vise à maintenir le fil à une résistance constante et par conséquent à une température constante. Apparue au milieu du siècle dernier [10], c'est actuellement le mode de fonctionnement le plus utilisé pour les mesures AFC.

Chaque mode de fonctionnement présente ses avantages et ses limites. Tout d'abord, le CCA présente une fréquence de coupure assez faible en comparaison des autres électroniques (autour de quelques dizaines de kHz) étant donné que l'inertie thermique du fil n'est pas compensée [16]. Ce mode de fonctionnement n'est donc pas le plus approprié pour la mesure d'écoulements présentant un large contenu spectral. Le CVA présente lui une haute fréquence de coupure pouvant atteindre plusieurs centaines de kHz. Qui plus est, il a été montré que celle-ci est relativement indépendante de la vitesse ou la température de l'écoulement [69]. Ceci rend l'utilisation de ce mode particulièrement intéressant par exemple pour des mesures en écoulement supersonique [17], mais est la fois complexe à mettre en place pour obtenir des mesures précises. Afin de s'affranchir au maximum des effets d'inertie thermique du fil et d'avoir une électronique robuste, ces travaux de thèse se sont concentrés sur l'utilisation d'un mode de conditionnement de type CTA. Les paragraphes qui suivent présentent son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques

propres.

Principe du CTA

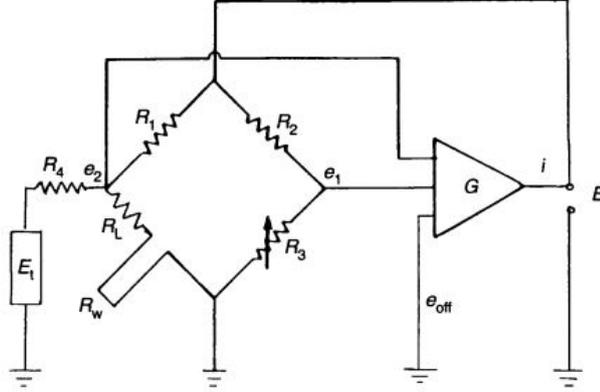


FIGURE 3.1. – Schéma électrique d'un CTA comprenant un pont de Wheastone et une boucle de rétroaction [10].

Le schéma de principe d'une électronique CTA est présenté dans la Figure 3.1. Ici, le capteur de résistance R_w est placé dans un pont de Wheastone et est maintenu à température constante grâce à une boucle de rétroaction. Le ratio du pont, correspondant au rapport des résistances R_2/R_1 , permet d'ajuster le courant reçu de l'amplificateur. Une résistance de conditionnement R_3 a pour but de définir la température de fonctionnement du capteur. Ainsi, une variation de température du capteur engendrera un changement de tension d'alimentation pour contrer cette variation. Le signal mesuré représentatif de la vitesse de l'écoulement est alors cette tension E . En effet, la loi de King permet de montrer que :

$$\frac{R_w I^2}{R_w - R_f} = A + BU^n \iff (R_w I)^2 = R_w (R_w - R_f) (A + BU^n) \iff E^2 = A' + B' U^n. \quad (3.12)$$

Une analyse du circuit électrique du CTA permet de l'identifier comme un système du deuxième ordre [26] dont la réponse fréquentielle est fonction de la vitesse de l'écoulement et de la température du capteur. Un tel système dynamique peut être caractérisé par une fréquence de coupure f_c et un coefficient d'amortissement ξ . Ce dernier représente la stabilité de l'électronique vis à vis des fluctuations de courant (*i.e.* de vitesse) et peut jouer un rôle primordial dans la mesure AFC (voir le paragraphe 3.2.3).

Pour optimiser la fréquence de coupure du système de mesure, il est nécessaire d'ajuster les paramètres de l'amplificateur de la boucle de rétroaction. Cette optimisation peut être réalisée de façon analytique en utilisant les équations de Freymuth [26], mais en pratique cet ajustement est réalisé expérimentalement. Pour ce faire, le fil chaud est placé dans un écoulement et un créneau de tension est injecté dans le pont afin de le déséquilibrer. La réponse temporelle du système est ensuite observée, ce test est usuellement nommé le *Square wave test*. La fréquence de coupure est alors déterminée à l'aide du temps de réponse τ , défini graphiquement dans la Figure 3.2, tel que :

$$f_c = \frac{1}{1.3\tau}. \quad (3.13)$$

Cette définition correspond également à une fréquence de coupure à -3 dB. Une visualisation

d'une réponse à un tel *Square wave test* est visible Figure 3.2. Classiquement, un CTA utilisé avec une sonde de dimension standard, c'est à dire $\ell = 1 - 2$ mm et $d = 1 - 5$ μm , présente une fréquence de coupure comprise entre 50 kHz et 100 kHz selon les conditions de l'écoulement. La fréquence de coupure présentée ici est bien entendue celle du système CTA couplé à un fil chaud et ne correspond a priori pas exactement à la vraie réponse du système de mesure soumis à un incrément de vitesse sur le fil. En effet, la vraie réponse du capteur est vraisemblablement réduite et est plutôt de l'ordre de quelques kHz d'après la littérature sur le sujet [36]. La vitesse de l'écoulement joue un rôle très important dans la réponse fréquentielle du système. Perry [60] a mis en avant qu'une augmentation de la vitesse entraîne une diminution du coefficient d'amortissement pouvant alors rendre l'électronique instable. C'est pourquoi il est recommandé de toujours effectuer le *Square wave test* à la plus haute vitesse rencontrée lors de l'expérimentation.

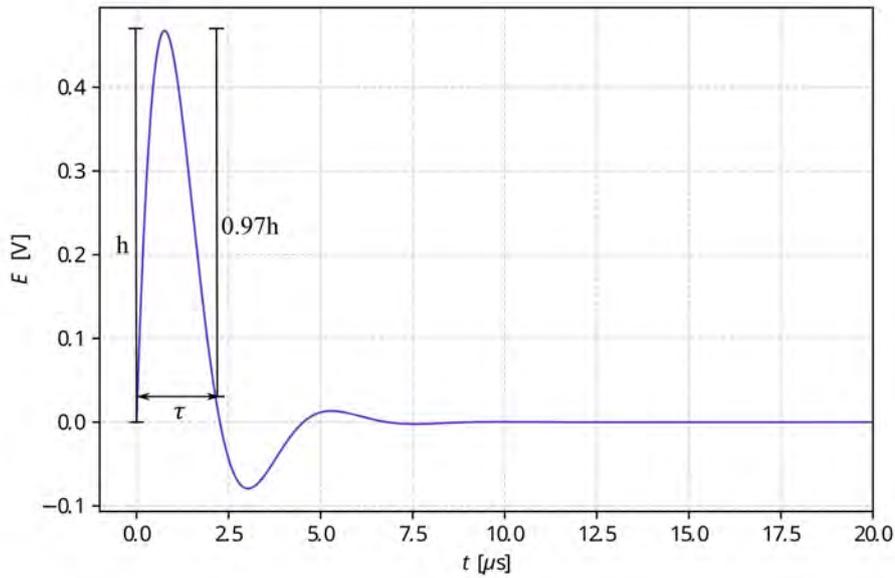


FIGURE 3.2. – Réponse typique à un créneau de tension d'un fil chaud opéré en mode CTA.

Enfin concernant la réponse d'un CTA, il est intéressant de noter que le fil chaud est relié à l'électronique par des câbles comportant une certaine inductance et capacité électrique. Celles-ci doivent être compensées dans le pont de Wheatstone afin de correctement équilibrer celui-ci pour la mesure et d'assurer une bande passante optimale.

Sensibilité à la vitesse et à la température du CTA

La loi de King montre que la réponse d'un fil chaud dépend de la vitesse de l'écoulement par une loi en U^n mais aussi de la température de celui-ci avec la présence du terme R_f qui représente la résistance du capteur à la température du fluide. Il apparaît donc intéressant de quantifier la sensibilité du capteur à ces paramètres. En reprenant les équations (3.11) et (3.12) et en la réécrivant de façon à faire apparaître la température de l'écoulement :

$$E^2 = (A'' + B''U^n)(T_w - T_f). \quad (3.14)$$

Il est alors possible de définir respectivement les sensibilités à la vitesse et à la température du fil chaud :

$$S_U = \frac{\partial E}{\partial U} = \frac{nB''U^{n-1}}{2} \left(\frac{R_w(T_w - T_f)}{A'' + B''U^n} \right)^{1/2}, \quad (3.15)$$

$$S_\theta = \frac{\partial E}{\partial \theta} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R_w(A'' + B''U^n)}{T_w - T_f} \right)^{1/2}, \quad (3.16)$$

où θ représente une petite fluctuation de la température du fluide.

Ces équations mettent en évidence que plus la différence de température entre le fil et l'air est élevée plus la sensibilité à la vitesse sera élevée et inversement pour celle à la température. Autrement dit, pour que l'AFC soit quasiment uniquement sensible à la vitesse de l'écoulement il faut que la température du fil soit élevée par rapport à celle du fluide.

Pour définir la température de fonctionnement du fil, il est commun d'avoir recours au coefficient de surchauffe (*overheat ratio*) $a = R_w/R_f$. Pour jouer sur la résistance du fil, il faut modifier la résistance R_3 présente dans le pont de Wheastone du CTA (voir Figure 3.1). Afin d'obtenir une sensibilité satisfaisante, il est recommandé d'utiliser un ratio d'au minimum 1.6 et en général c'est une valeur de 1.8 qui est utilisée pour des mesures dans l'air [10]. La température de fonctionnement du fil est également choisie de façon à ce qu'elle ne soit pas trop élevée pour ne pas détériorer les propriétés thermo-électriques de celui-ci ou au pire le détruire. Par exemple, un coefficient de surchauffe $a = 1.8$ est une valeur commune pour des mesures AFC donnant des températures d'opération autour de 220 °C pour un fil chaud Dantec 55P15 en platine de dimension $\ell = 1.5$ mm et $d = 5$ μ m.

3.2.3. Distribution de température dans le fil - *End-conduction effects*

Dans la section précédente, afin de mettre en évidence l'origine de la loi de King, l'hypothèse simplificatrice d'un fil assez long a été considérée pour avoir une distribution de température uniforme sur sa longueur en ne prenant pas en compte les pertes par conduction. En réalité, ces effets de conduction aux extrémités du fil ne sont pas négligeables et peuvent être à l'origine de problèmes lors de la mesure.

Il est possible de résoudre l'équation différentielle issue du bilan énergétique (3.6) pour observer la distribution de température dans un fil à une vitesse donnée. Ceci permet d'obtenir les distributions visibles Figure 3.3. Ici, il a été considéré que les broches aux extrémités du fil étaient à température ambiante imposant donc une condition aux limites en $x/\ell = \pm 0.5$ de $T_w = 20$ °C. Le fil choisi est quant à lui en platine et a un diamètre constant $d = 5$ μ m. Ces courbes démontrent que plus la longueur du fil est faible, ou le rapport d'aspect longueur/diamètre (ℓ/d) est petit, plus la température est importante au centre du fil et sa distribution moins uniforme. Ceci est la conséquence des pertes thermiques par conduction du fil vers les broches qui le supportent. Ce phénomène est nommé *end-conduction effects* dans la littérature et peut avoir des conséquences sur la qualité d'une mesure AFC.

Les premières études mettant clairement en avant ces problèmes de *end-conduction* en anémométrie à fil chaud pour le sondage de couches limites turbulentes, sont les travaux de Ligrani et Bradshaw [53]. Ils ont montré que pour des rapports ℓ/d insuffisants le capteur à fil chaud filtrait le pic de fluctuations de vitesse présent en très proche paroi. Hutchins *et al.* [37] ont étendu cette étude à une mesure sur toute la hauteur de la CLT mettant en avant que ce filtrage était présent pour toutes les distances à la paroi. Ces études ont notamment abouti à un critère pour s'affranchir des problèmes de filtrage, préconisant de toujours garantir un rapport $\ell/d > 200$. Li [52] a pour sa part étudié ce phénomène de filtrage lié aux effets de conduction par une approche théorique afin d'en avoir une meilleure compréhension. Il démontra que le rapport d'aspect peut influencer la réponse dynamique du capteur car l'augmenter augmente la fréquence de coupure de l'AFC. Ce résultat montre que le filtrage dû aux effets de conduction est un filtrage temporel. Ces effets peuvent de plus être impactés par l'électronique du CTA. En effet, Samie *et al.* [65] ont effectué le même type d'expérimentation que Hutchins *et al.* mais en utilisant un CTA offrant

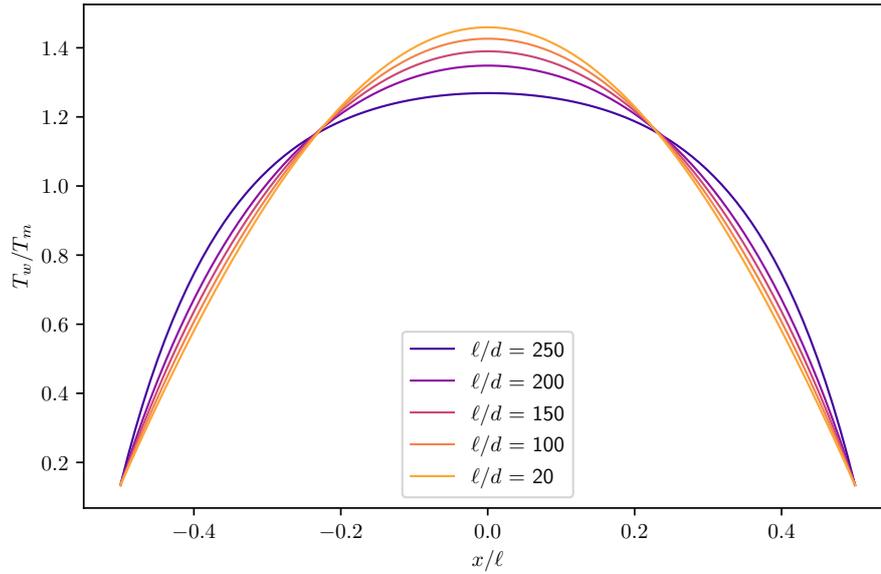


FIGURE 3.3. – Distribution de température le long d’un fil chaud à différents rapports ℓ/d pour une température moyenne de fil $T_m = 200$ °C à une vitesse $U = 30$ m s $^{-1}$.

plus de souplesse de réglage car développé en interne. Ils ont ainsi mis en avant que pour un ℓ/d insuffisant, l’amortissement du système peut jouer un rôle important : les fluctuations de vitesse mesurées peuvent être artificiellement augmentées ou diminuées si le système est respectivement sous-amorti ($\xi < 1$) ou sur-amorti ($\xi > 1$).

Le critère et les études présentées jusqu’ici ne prennent pas en compte la convection qui est pourtant le phénomène prédominant dans une mesure AFC. Ainsi, dans son étude théorique, Li [52] mis en avant que le critère $\ell/d > 200$ peut être relaxé pour de plus grand nombres de Reynolds associés au fil Re_w . Pour prendre en compte la conduction et la convection, Hultmark *et al.* [35] ont proposé un critère se basant sur les propriétés et la géométrie du fil chaud ainsi que sur la vitesse de l’écoulement. Ce nouveau critère a ensuite été corrigé par Vallikivi [81] pour obtenir l’expression suivante :

$$\Lambda = \frac{\ell}{d} \sqrt{\frac{k_w}{k_f} aNu}. \quad (3.17)$$

Ce critère n’est a priori pas restreint à des géométries de fils circulaires et peut être appliqué à une géométrie de fil rectangulaire, apportant un critère intéressant pour la conception de micro-anémomètres. Il peut alors s’exprimer sous la forme suivante :

$$\Lambda = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\ell^2}{we} \frac{k_w}{k_f} aNu}, \quad (3.18)$$

où w et e sont respectivement la largeur et l’épaisseur du filament.

Les études précédentes recommandent de maintenir $\Lambda > 2.5$ pour éviter les effets de conduction. Cependant, durant ses travaux de thèse, Vallikivi a montré que des mesures réalisées à des Λ inférieurs à cette valeur donnaient des résultats cohérents, aucun filtrage n’a été observé lors de ces expérimentations effectuées avec des micro-sondes avec un élément sensible de forme rectangulaire.

Les effets de conduction dans les broches apparaissent comme préjudiciables lors de mesures

AFC. Malgré les nombreux de travaux de recherches sur le sujet, ils ne sont toujours pas totalement compris et surtout aucun critère clair n'apparaît pour le dimensionnement et les applications de micro-sondes. Lors de la conception des micro-anémomètres et des mesures effectuées avec ceux-ci, une attention particulière sera donc portée à ce phénomène. Les résultats de cette étude seront présentés dans le Chap. 7.

3.2.4. Filtrage spatial d'un fil chaud

Comme énoncé dans le Chap.1, l'un des inconvénients majeur de l'anémométrie à fil chaud est qu'elle utilise un capteur avec une longueur définie ℓ . Par conséquent, la vitesse mesurée par une telle sonde est moyennée dans l'espace, telle que [5] :

$$U(x^*, y^*, z^*) = \frac{1}{\ell} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} U_e(x^*, y, z^*) dy \quad (3.19)$$

Une représentation du système de coordonnées est présentée Figure 3.4, l'origine de \mathbf{x}^* est située au centre du fil. Ici, U est la vitesse mesurée par le capteur et U_e la vitesse réelle de l'écoulement.

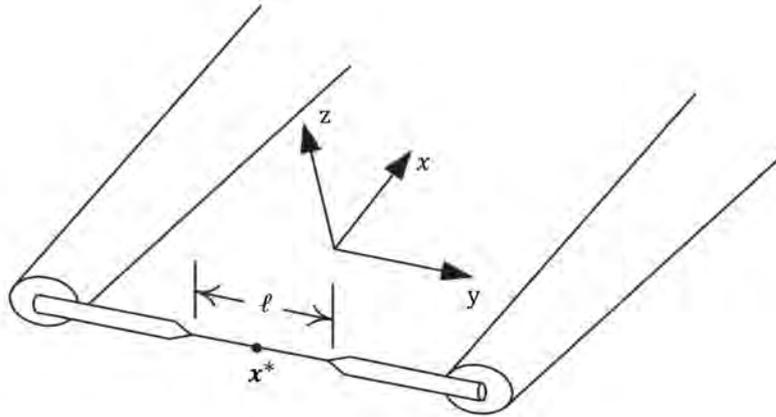


FIGURE 3.4. – Vue schématique du système de coordonnées d'un fil chaud, adaptée de [5].

Cette équation illustre comment la sonde fil chaud moyenne les grandeurs de l'écoulement selon la direction y . En transformant cette équation dans l'espace de Fourier et en la développant pour exprimer le spectre d'énergie mono-dimensionnel de fluctuation de vitesse axiale $E_{11}(k_1)$ (avec k_1 le nombre d'onde dans la direction x) mesuré par une sonde de dimension finie, Wyngaard [91] a démontré que le filtrage dans la direction y induisait un filtrage de E_{11} pour toute valeur de k_1 . Ceci indique donc que l'énergie mesurée par un tel capteur peut différer de celle effectivement contenue dans l'écoulement sur l'ensemble du spectre, et non juste pour de petites longueurs d'ondes. Une longueur d'élément sensible la plus petite possible apparaît donc comme la solution pour réduire au maximum cette erreur.

Afin d'exprimer un critère sur la longueur du fil pour s'affranchir des effets de filtrage spatial, plusieurs expérimentations ont été effectuées dont les plus pertinentes sont celles réalisées par Ligrani et Bradshaw [53] et par Hutchins *et al.* [37]. Ces auteurs ont réalisé des mesures dans des CLT à différents nombres de Reynolds et avec des sondes de différentes longueurs. Ils ont démontré que pour obtenir une mesure correcte du pic de fluctuation de vitesse en proche paroi, la longueur du fil adimensionnée par les grandeurs visqueuses devait être tel que : $\ell^+ \leq 20$, avec $\ell^+ = \ell u_\tau / \nu$. Au-delà de cette limite, les plus petites échelles de turbulence sont de plus en plus filtrées comme cela est illustré dans la Figure 3.5. Le respect de ce critère peut néanmoins s'avérer

complexe pour des études d'écoulement à haut Re où la longueur visqueuse $\ell_\nu = \nu/u_\tau$ devient particulièrement faible par rapport à la longueur de l'élément sensible, entraînant des valeurs de ℓ^+ élevées, justifiant d'autant plus le recours à des sondes présentant des dimensions les plus réduites possible.

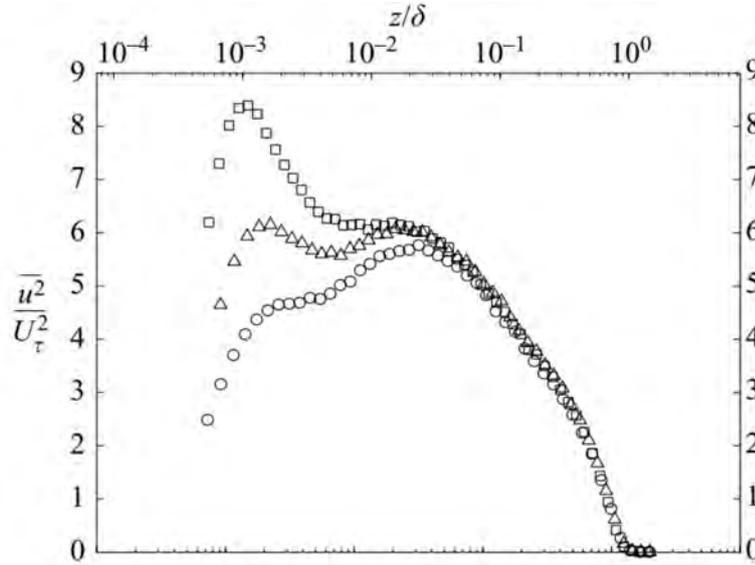


FIGURE 3.5. – Profil de l'intensité turbulente $\overline{u^2}$ dans une CLT de $Re_\tau \approx 14000$ en fonction de la distance à la paroi z/δ . Les symboles carrés représentent une mesure pleinement résolue avec un fil chaud de longueur $\ell^+ = 22$ tandis que les symboles triangles et cercles sont respectivement obtenus avec une sonde de longueur $\ell^+ = 79$ et $\ell^+ = 153$ entraînant un filtrage [37].

Comme cela a été évoqué dans le Chap.1, pour pallier le filtrage spatial des fils chauds, des modèles de correction des grandeurs mesurées ont été développés [14] [70]. Cependant, ils ne sont utilisables que pour des configurations d'écoulement connues, en l'occurrence une couche limite turbulente, rendant leur utilisation pour de nouvelles applications de recherche difficile. En conséquence, pour ces travaux de thèse, il a été choisi de se concentrer uniquement sur l'étude de solutions techniques visant à réduire la taille de l'élément sensible d'un anémomètre à fil chaud afin de s'affranchir au maximum de telles corrections a posteriori.

3.3. Théorie du fil froid

3.3.1. Principe de fonctionnement

La mesure thermométrique par fil froid se base sur le même principe et les mêmes équations de fonctionnement qu'un AFC. La température de l'écoulement est déterminée à l'aide d'une mesure de la résistance du fil. En supposant que la température du fil est égale à celle de l'écoulement :

$$R_w = R_0(1 + \chi T_f). \quad (3.20)$$

Pour effectuer ces mesures, le fil froid est ici alimenté par un courant constant (CC) de faible valeur afin que le fil ne soit pas chauffé par effet Joule et soit sensible uniquement à la température de l'écoulement, en opposition à un fil chaud conditionné en mode CTA. En effet, à partir de l'équation (3.11) Fulachier [30] a montré que la sensibilité d'un fil en mode CC pouvait se décomposer de la façon suivante :

$$S_{U,cc} = \frac{nB\bar{U}^{n-1}\bar{R}_w^2 I^3}{\bar{R}_f(A + B\bar{U}^n)^2}, \quad (3.21)$$

$$S_{\theta,cc} = \frac{\chi\bar{R}_w R_0 I}{\bar{R}_f}, \quad (3.22)$$

où les termes désignés par $\bar{}$ représentent des moyennes temporelles. Pour éviter que le signal de la température mesurée soit contaminé par la vitesse de l'écoulement, il faut s'assurer que le rapport des sensibilités soit minimal :

$$\frac{S_{U,cc}}{S_{\theta,cc}} = \frac{nB\bar{U}^{n-1}\bar{R}_w}{(A + B\bar{U}^n)^2 \chi R_0} I^2 \quad (3.23)$$

Ainsi, il faut que le courant injecté soit le plus faible possible pour effectuer des mesures précises dans un écoulement aérothermique.

3.3.2. Réponse fréquentielle

En pratique, le thermomètre à fil froid a une certaine inertie thermique induisant un certain temps de réponse aux variations de température du fluide. Dans des conditions instationnaires, en considérant les pertes par conduction et l'échauffement dû à l'effet Joule négligeables, l'équation du bilan énergétique du fil (3.6) peut s'exprimer :

$$T_w + \mathcal{M}_w \frac{dT_w}{dt} = T_f \quad (3.24)$$

où \mathcal{M}_w est le temps de réponse du fil. Il est fonction des paramètres de la sonde mais aussi du transfert convectif, tel que :

$$\mathcal{M}_w = \frac{m_w c_w}{\pi \ell k_f} \frac{1}{Nu} \quad (3.25)$$

Le temps de réponse du fil froid est donc impacté par la vitesse de l'écoulement à travers le terme $1/Nu$. Il va donc diminuer avec une augmentation de la vitesse grâce à une convection forcée plus efficace.

La fréquence de coupure associée à \mathcal{M}_w représente seulement celle du fil et non de toute la sonde. En effet, lors d'une mesure les broches du capteur sont aussi sensibles à la température de l'écoulement. De par leurs dimensions plus importantes, elles ont un temps de réponse \mathcal{M}_0 bien plus élevé que \mathcal{M}_w et donc leurs effets ne peuvent pas être ignorés pour déterminer la réponse réelle. Les travaux de Paranthoën et Lecordier [59] permettent de comprendre l'apport de ces effets sur la dynamique d'un fil froid. En étudiant de façon théorique la fonction de transfert associée, ils ont montré que le capteur suivait parfaitement la température du fluide jusqu'à la fréquence de coupure des broches. En augmentant en fréquence, le fil suit bien les fluctuations de température alors que la température des broches reste à la valeur moyenne. Ceci entraîne une atténuation de la réponse de la sonde par conduction du fait la différence de température entre fil et broches. Finalement à plus hautes fréquences, les fluctuations détectées par le capteur sont atténuées par l'inertie thermique du fil, soit une fréquence de coupure approximativement donnée par l'inverse de \mathcal{M}_w . Une illustration de ces différents filtrage est visible sur la Figure 3.6.

L'atténuation par conduction dans les broches est donnée par l'expression [59] :

$$H_p = 1 - \frac{\ell}{d} \sqrt{\frac{k_w}{k_f Nu}} \quad (3.26)$$

Ce facteur indique que pour limiter les effets de conduction il faut une nouvelle fois maximiser

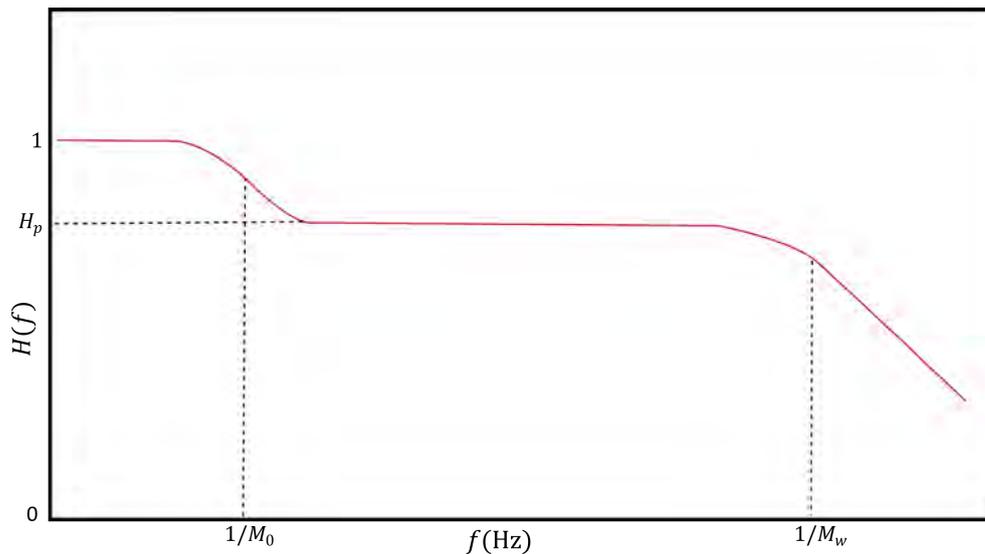


FIGURE 3.6. – Exemple d’une fonction de transfert $H(f)$ d’un fil froid.

le ratio ℓ/d . Comparativement à une mesure par AFC, ces effets peuvent s’avérer bien plus préjudiciables pour une mesure TFF. Ainsi, les expériences menées par Smits *et al.* [71] ont permis de préconiser un rapport : $\ell/d > 1000$. Plus récemment, Xia *et al.* [92] ont confirmé qu’un tel critère permettait d’obtenir des mesures satisfaisantes. Ces travaux ont également montré, qu’en dessous de cette valeur, l’intensité des fluctuations de température étaient filtrées par la sonde fil froid sur toute la hauteur d’une couche limite turbulente aérothermique. Les mesures de grandeurs moyennes ne sont néanmoins pas affectées.

Pour s’affranchir du critère $\ell/d > 1000$, Mercier *et al.* [57] ont montré qu’il était possible de corriger les erreurs de mesure dues à la conduction mais aussi celles liées à l’inertie thermique du fils. Cette correction s’effectue a posteriori mais nécessite la connaissance du temps de réponse \mathcal{M}_w et du facteur d’atténuation H_p . Ceci implique que les conditions d’écoulement doivent être déterminées au préalable, rendant l’utilisation de cette méthode parfois complexe selon les applications.

3.3.3. Filtrage spatial

De la même manière à une mesure par fil chaud, la mesure TFF est soumise à un filtrage spatial à cause de la longueur du fil. Outre leur investigation sur les effets de conduction, Xia *et al.* [92] ont aussi étudié le filtrage spatial sur des sondages de CLT aérothermique. Ils ont ainsi pu démontrer que les mesures étaient en accord avec des résultats de simulations DNS uniquement pour des longueurs de fil $\ell^+ \leq 20$ faisant ainsi écho aux résultats obtenus en AFC. Cependant, ces travaux ont mis en avant que le filtrage temporel était plus préjudiciable que le filtrage spatial. Il a en effet été démontré que si une mesure est effectuée avec une sonde caractérisée par $\ell^+ = 40$ et $\ell/d = 1000$, diviser par deux la longueur entraîne une diminution de l’atténuation due au filtrage spatial de 28% à 9%. Pour autant, ceci amène aussi à une réduction du ratio ℓ/d de moitié faisant finalement passé cette atténuation de 9% à 40% à cause du filtrage temporel cassé par les effets de conduction. Le choix des dimensions idéales pour une mesure satisfaisante peut donc s’avérer difficile et a souvent pour conséquence de faire des compromis.

En conclusion, la réduction de l’élément sensible d’un TFF est indispensable pour améliorer la mesure des fluctuations de température en écoulement turbulent aérothermique. Toutefois, devant les contraintes imposées par les critères $\ell/d > 1000$ et $\ell^+ \leq 20$, une miniaturisation apparaît comme encore plus complexe que pour les fils chauds. Les techniques de la micro-fabrication ont

donc là encore un potentiel important pour améliorer les sondes en ce sens mais il reste pleinement à évaluer.

3.4. Bilan

Ce chapitre a permis d'expliciter les équations gouvernant le fonctionnement d'un anémomètre fil chaud et d'un thermomètre fil froid et dont la physique de mesure repose principalement sur la convection forcée. D'autre part, les différents modes de fonctionnement de ces deux types de mesures ont été explicités, mettant notamment en lumière les limites spatiales et fréquentielles propres aux deux techniques.

Concernant l'AFC, le critère permettant de réduire l'atténuation due au filtrage spatial $\ell^+ \leq 20$ apparaît comme le plus important à respecter pour effectuer des mesures précises notamment dans une CLT. Pour la TFF, c'est le filtrage temporel qu'il est primordial d'éviter. Ainsi, il est préférable de s'assurer de réaliser des mesures avec une sonde présentant un rapport d'aspect $\ell/d > 1000$.

Dans ces deux cas, la diminution de la taille de l'élément sensible de ces deux types de sondes est la clé pour atteindre des résolutions de mesures très fines. Ceci motive et justifie le développement de micro-sondes conduit au cours de ces travaux de thèses. Les parties suivantes de ce manuscrit vont ainsi maintenant s'attacher à détailler les différentes étapes de conception et de réalisation de tels capteurs ainsi qu'à évaluer leurs performances quant à l'amélioration de la résolution des mesures anémométriques et thermométriques.

Deuxième partie

Étude des moyens technologiques de micro-fabrication pour le développement de micro-capteurs thermorésistifs et de leur instrumentation

Développement de capteurs thermorésistifs à l'aide des techniques de micro-fabrication

Les chapitres précédents ont mis en avant l'intérêt de diminuer la taille des éléments sensibles des anémomètres à fil chaud et des thermomètres à fil froid afin d'améliorer leur capacité de mesure des petites échelles contenues dans les écoulements turbulents. Devant la difficulté de réaliser cette miniaturisation par des méthodes de fabrication classique, il a été choisi de se tourner vers les techniques de fabrication des MEMS (Micro-Système ÉlectroMécanique) pour atteindre les dimensions attendues. Ce chapitre vise à étudier les différents procédés et matériaux utilisés en micro-fabrication pour réaliser les micro-capteurs thermorésistifs de façon la plus simple possible.

Il sera question dans un premier temps d'explicitier les choix faits concernant le design des micro-capteurs conçus au cours de ces travaux de thèse. La seconde partie de ce chapitre se concentrera sur les différents matériaux utilisés pour réaliser les sondes ainsi que les techniques de dépôt associés à ceux-ci. Il sera ensuite question d'exposer les différentes techniques de gravure et mise en forme des matériaux pour atteindre la géométrie de capteur souhaitée. Pour finir, le procédé de fabrication sera développé plus en détails et les différentes sondes réalisées seront présentées.

Sommaire

4.1. Choix du design des micro-capteurs	52
4.2. Substrat de base et dépôts des différentes couches de matériaux . .	53
4.2.1. Le substrat de Silicium	53
4.2.2. La couche de Nitrure de Silicium	54
4.2.3. La couche de Platine	54
4.2.4. Le substrat final	55
4.3. Élaboration des motifs et mise en forme 3D des micro-capteurs . . .	55
4.3.1. Lithographie UV	55
4.3.2. Gravure des couches de Platine et de Nitrure par RIE	57
4.3.3. Mise en forme 3D par gravure humide du silicium	58
4.4. Procédé de fabrication complet des micro-capteurs	60
4.4.1. Conception des masques de lithographie	60
4.4.2. Résumé du procédé de fabrication	63
4.4.3. Les capteurs	64
4.5. Bilan	67

4.1. Choix du design des micro-capteurs

La première étape pour le développement des micro-dispositifs est de déterminer le design à leur donner. Ceci définira ensuite les procédés nécessaires pour leur fabrication. Il est notamment possible de s'inspirer de la géométrie du NSTAP développé par l'université de Princeton [82]. Les sondes qu'ils ont réalisées sont profilées permettant ainsi de réduire au maximum leur intrusivité lors de mesures en écoulement. Cependant, le procédé de fabrication pour réaliser ces capteurs comprend des étapes complexes, spécifiquement pour arriver à les profiler. Ces étapes seront évoquées plus en détails dans le chapitre suivant mais il faut souligner que pour obtenir un capteur profilé de nombreuses étapes sont nécessaires ainsi que des équipements spécifiques. Dans l'objectif de simplifier ce process, un design différent a été choisi pour les sondes développées au cours de ces travaux. Un schéma est présenté Figure 4.1.

Les dispositifs réalisés comportent un fil de Platine sur du Nitrure de Silicium suspendu dans le vide entre deux broches de Silicium. Le fil est rétréci en son centre pour qu'il agisse comme élément sensible. Cette géométrie n'étant pas profilée il est possible de craindre que les broches de Silicium perturbent la mesure. C'est pourquoi l'élément sensible a été placé au milieu d'un long pont de $900\ \mu\text{m}$ afin de réduire au maximum l'influence des broches. Dans cette optique, le pont est aussi placé autant que faire se peut à l'avant du capteur. Toutefois, aucune étude préliminaire ou simulations numériques n'ont été réalisées pour valider ce premier design, il n'y a donc aucune certitude sur celui-ci. Il sera alors nécessaire de développer aussi des sondes dont le design apparait comme moins intrusif, c'est à dire des sondes profilées. Ceci permettra de valider ou invalider les simplifications apportées à la géométrie du capteur. L'étude de différents procédés pour la réalisation de ces capteurs profilés fera l'objet du chapitre suivant. Il est possible de noter que la géométrie du capteur proposée ici est comparable à celle d'une sonde fil chaud obtenue par gravure d'un fil de Wollaston évoqué dans le Chap.1.

Le but principal du développement de ces capteurs est de réduire la taille du fil comparé aux sondes anémométriques et thermométriques. Ainsi les dimensions qui ont le plus d'intérêt ici sont celles de l'élément sensible de Platine. Celui-ci n'est en réalité plus un fil de longueur ℓ et de diamètre d mais un parallélépipède avec aussi une certaine longueur ℓ , une épaisseur e et une lar-

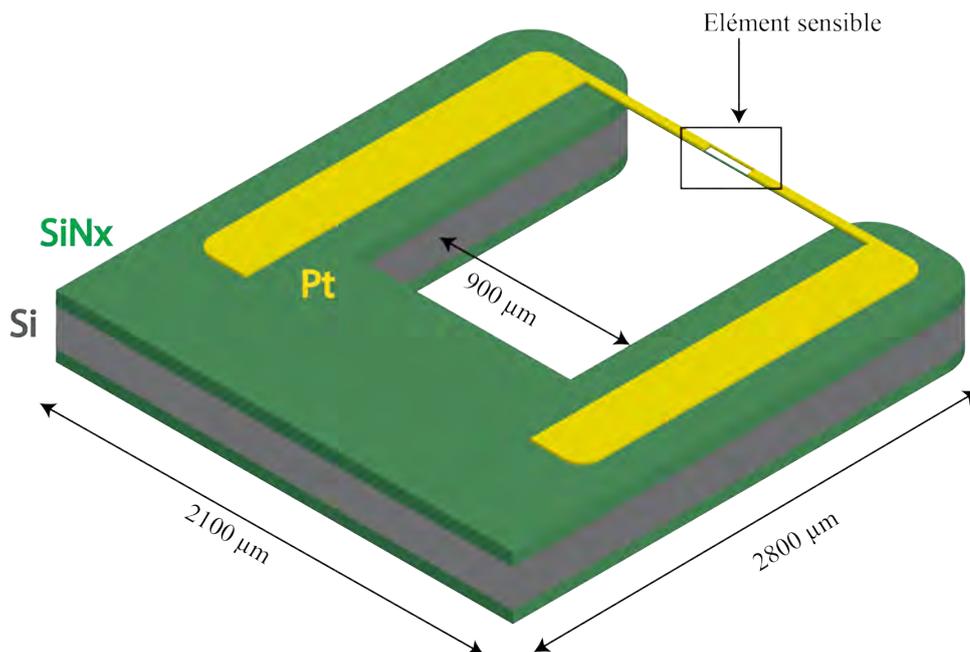


FIGURE 4.1. – Schéma en 3D du micro-capteur thermorésistif avec ses dimensions.

geur w , il sera tout de même nommé fil par abus de langage. Afin de se comparer aux critères de dimensionnement appliqués aux HWA et CWT présentés précédemment, un diamètre équivalent d^* peut être déterminé tel que $d^* = 2\sqrt{ew/\pi}$. Ici, l'épaisseur du fil est assimilée à l'épaisseur de la couche de Platine de 200 nm mais aussi à la couche de Nitrure qui se trouve en dessous. En effet, ce matériau étant un bon conducteur thermique il ne peut être négligé dans les échanges énergétiques qui ont lieu lors d'une mesure fil chaud. Une analyse sur le choix des épaisseurs de couche de matériaux est donnée dans la section suivante. Finalement, le fil a une épaisseur $e = 0.4 \mu\text{m}$. La largeur de l'élément sensible a été déterminée par les limites technologiques des équipements à disposition mais aussi dans l'objectif d'une bonne répétabilité entre différents lots de fabrication tout en voulant atteindre des dimensions fines. Ainsi les capteurs ont une largeur $w = 1.5 \mu\text{m}$. Les critères de fabrication des sondes à fils chauds ou à fils froids classiques indiquent qu'il faut atteindre $\ell^+ \leq 20$ lors de mesures tout en garantissant un ratio $\ell/d > 200$ pour éviter les pertes par conduction. Cependant, ce dernier critère n'apparaît pas comme évident pour un élément sensible de forme parallélépipédique comme dans le cas présent. Afin d'étudier ce critère et de le quantifier dans le cadre de micro-capteurs de ce type, des dispositifs avec différentes longueurs d'élément sensible, allant de $40 \mu\text{m}$ à $200 \mu\text{m}$, ont été fabriqués. Ces longueurs garantissent aussi une bonne résolution spatiale de mesure pour les écoulements qui seront étudiés par la suite, à savoir des couches limites turbulentes présentant des longueurs visqueuses ℓ_ν comprises entre 10 et $20 \mu\text{m}$. Un récapitulatif des capteurs avec leurs différentes longueurs de fil est présenté dans le Tableau 4.1.

Longueur du fil ℓ (μm)	40	60	80	100	150	200
Rapport d'aspect ℓ/d^*	46	69	92	114	172	228

TABLE 4.1. – Récapitulatif des différentes longueurs de fil fabriquées et leur rapport d'aspect associé.

4.2. Substrat de base et dépôts des différentes couches de matériaux

4.2.1. Le substrat de Silicium

Le choix du substrat de base pour la réalisation des micro-capteurs s'est porté sur le Silicium (Si). C'est en effet le matériau le plus utilisé dans les micro-technologies notamment pour la fabrication de circuits intégrés ou de transistors de par ses propriétés de semi-conducteur et sa bonne résistance mécanique. Les méthodes de mise forme du Silicium ont donc fait l'objet de nombreuses recherches afin de déterminer toutes ses propriétés. Il est possible de citer par exemple : Elwenspoek et Jansen [25], Jansen *et al.* [40] ou bien encore Pal et Sato [58]. A travers ces travaux, il est possible d'avoir une très bonne compréhension de l'usinage de ce matériau. Ceci permet donc de se baser sur des procédés maîtrisés et connus pour le développement des dispositifs.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, il a été choisi d'utiliser du Silicium mono-cristallin avec une orientation $\langle 100 \rangle$ et d'épaisseur $200 \mu\text{m}$. Les wafers utilisés ici sont de 4 pouces. Le choix de l'orientation cristalline est primordial car celle-ci influence les gravures. Ces propriétés seront évoquées plus en détails dans le paragraphe 4.3.3. Comme le montre le design présenté précédemment, l'épaisseur du Silicium donne son épaisseur finale au capteur. C'est pourquoi il a été décidé d'utiliser un substrat assez fin afin de créer des micro-sondes les moins intrusives possible, en l'occurrence $200 \mu\text{m}$. Des essais de fabrication ont aussi été réalisés avec du Silicium de $100 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Cependant, de nombreuses difficultés ont été rencontrées notamment de manipulation due à cette épaisseur trop fine. Ceci rendait alors le rendement de capteurs réussis par rapport à ceux cassés en cours de process trop faible. Son utilisation a donc été stoppée.

4.2.2. La couche de Nitrure de Silicium

Le Silicium étant un semi-conducteur, il est nécessaire de l'isoler électriquement du matériau thermorésistif qui servira d'élément sensible à la sonde. Cette isolation se fait à l'aide d'un matériau diélectrique. Dans ce type d'application, les plus communément utilisés sont l'Oxyde de Silicium (SiO_2) et le Nitrure de Silicium (SiN_x). Les différents travaux de thèse de Garraud [31] et Courteau [19] réalisés précédemment au sein du laboratoire de l'IES, ont mis en avant qu'il était préférable de se tourner vers le Nitrure. Ceci est justifié par sa bonne conductivité thermique ($k_{\text{SiN}_x} = 3.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [56]) et surtout par ses très bonnes propriétés mécaniques. Il possède un fort module de Young ($E > 180 \text{ GPa}$) ainsi que des faibles contraintes résiduelles en tension permettant d'assurer la rigidité et la planéité du pont suspendu que ce soit lors des différentes étapes de fabrication ou bien lors de futures mesures. Cette robustesse présumée est d'autant plus confirmée par les études de tenue mécanique réalisées par Baudry [7] pour la conception de ponts suspendus comportant des renforts en Nitrure de Silicium à l'image de ceux réalisés lors des travaux présentés ici. De plus, ce matériau est résistant aux gravures par KOH qui seront utilisées pour mettre en forme le Silicium.

Afin d'atteindre les propriétés énoncées qui sont primordiales pour le bon fonctionnement des micro-capteurs, le SiN_x doit être déposé sur le Silicium de façon spécifique. C'est à l'aide du dépôt par LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) que ceci est possible comme le montre les travaux de Temple-Boyer *et al.* [75]. Cette technique consiste à exposer le wafer de Silicium à des gaz réactifs, ici du Silane SiH_4 et de l'Ammoniac NH_3 , dans une enceinte maintenue à basse pression et haute température formant ainsi une couche croissante de Nitrure de Silicium sur la surface du wafer. Les bâtis pour ce type de dépôt sont des équipements spécifiques et ne sont pas disponibles dans la salle blanche de l'Université de Montpellier, où les travaux de micro-fabrication ont été réalisés. Ainsi, et aussi afin de réduire les coûts, des wafers de Silicium, avec du Nitrure de Silicium déposé sur les deux faces, achetés à la société BT Electronics ont été utilisés. L'épaisseur de SiN_x déposé est ici de 200 nm. Par expérience, cette épaisseur est suffisante pour la tenue mécanique de l'élément sensible.

4.2.3. La couche de Platine

La dernière étape pour obtenir l'empilement qui permettra la structuration des micro-capteurs est le dépôt d'une couche de Platine (Pt) sur le Nitrure. Cette couche conductrice jouera ainsi le rôle de l'élément sensible thermorésistif. Cependant le Platine, en tant que métal noble, adhère mal à la surface de la couche de SiN_x . Il est donc nécessaire de déposer préalablement sur le Nitrure une couche d'accroche. Cette dernière doit respecter plusieurs critères. Tout d'abord, elle ne doit pas détériorer les propriétés du platine mais aussi conserver une excellente adhésion durant toutes les étapes de fabrication. Ces conditions doivent aussi être respectées lors de l'utilisation des sondes à leur température de fonctionnement. D'après les recherches effectuées sur ce sujet [31] [63], une couche en Oxyde de Tantale (Ta_2O_5) remplit tous ces critères et a donc été choisie pour le développement des capteurs.

La couche d'accroche et la couche de platine sont déposées par EBPVD (Electron Beam Physical Vapor Deposition) *in situ*. Ce procédé consiste à placer le substrat dans un bâti sous vide où un fil de tungstène est porté à incandescence par effet joule. Ce fil libère ensuite des électrons qui sont focalisés sur une cible constituée du matériau à déposer, ici du Platine ou de l'Oxyde de Tantale. Celui-ci est ainsi monté à sa température de fusion et s'évapore pour se déposer sur le substrat. L'épaisseur du matériau déposé est contrôlée à l'aide d'une balance à quartz. Les conditions du dépôt effectué ici sont récapitulées dans le Tableau 4.2. Afin d'obtenir une épaisseur de

Platine répétable entre chaque dépôt, il a été décidé de déposer des épaisseurs de l'ordre de 200 nm.

	Ta ₂ O ₅	Pt
Vide résiduel (mTorr)	8.10 ⁻⁵	1.10 ⁻⁶
Température substrat (°C)	550	550
Vitesse de dépôt (nm s⁻¹)	0.2 à 0.3	1 à 1.5
Épaisseur (nm)	~20	~180

TABLE 4.2. – Paramètres de dépôt des couches d'Oxyde de Tantale (Ta₂O₅) et de Platine (Pt).

4.2.4. Le substrat final

Pour résumé, l'empilement de matériaux utilisé pour la fabrication des micro-capteurs a la structure suivante : SiN_x/Si/SiN_x/Ta₂O₅/Pt. Cette structure ainsi que les différentes épaisseurs des couches de matériau sont résumés sur la Figure 4.2.

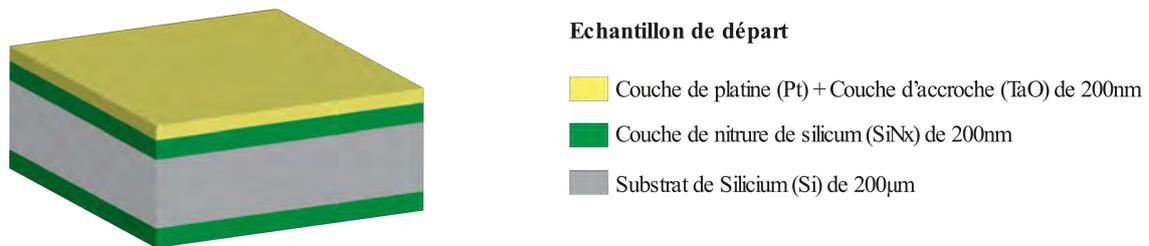


FIGURE 4.2. – Substrat pour la réalisation des micro-capteurs.

4.3. **Élaboration des motifs et mise en forme 3D des micro-capteurs**

4.3.1. Lithographie UV

Afin d'atteindre la forme et les dimensions souhaitées, les étapes de structuration par lithographie UV sont réalisées après le dépôt des différentes couches de matériaux. Ce procédé est primordial mais aussi délicat. En effet, la finesse de la largeur de l'élément sensible visée constitue presque la limite physique de ce procédé. Une maîtrise expérimentale est donc nécessaire pour réussir cette étape. Avant de réaliser celle-ci, les wafers de substrat présentés précédemment sont découpés en échantillons de plus petite taille afin de réaliser les dispositifs. Dans le cadre d'applications de recherche et de développement de procédés de fabrication, il est préférable d'opérer ainsi pour limiter les pertes de matière. De plus, les équipements à disposition dans la salle blanche ne sont pas tous adaptés à des wafers de 4 pouces. Après découpe, les échantillons sont systématiquement nettoyés à l'aide de différents solvants puis déshydratés dans le but qu'aucune impureté ne soit présente sur leur surface.

Le principe de la lithographie est le transfert du motif d'un masque sur une résine photosensible grâce au rayonnement UV.

Les résines sont des composés organiques dont les propriétés sont modifiées par l'énergie de rayonnement apporté par les UV. Il existe deux familles de résines photosensibles : les résines positives et les résines négatives. Les premières contiennent un additif appelé photo-initiateur qui, après exposition aux UV, devient soluble dans une solution de développement ; la partie insolée va

donc disparaître dans le développeur et il restera uniquement la résine sous le masque. Les résines négatives utilisent le principe inverse, c'est à dire que la partie exposée aux UV devient insensible au développeur. Dans ce cas c'est la résine qui est présente sous le masque qui va disparaître.

Dans ces deux familles, il existe aussi différents types de résines dont les propriétés varient selon plusieurs paramètres. Une attention particulière est portée au choix de celle-ci ainsi qu'aux paramètres de dépôt car ils influencent l'épaisseur de résine sur l'échantillon et par conséquent la résolution atteignable. En effet, l'épaisseur de la résine déposée sur le substrat doit être inférieure à la taille du plus petit motif souhaité, dans le cas présent $1.5 \mu\text{m}$. Cette épaisseur est fortement liée à la viscosité de la résine, une résine très peu visqueuse est donc indispensable pour la réalisation de motifs fins. Pour la fabrication des dispositifs, il a été choisi d'utiliser la résine positive S1805. Elle est étalée sur l'échantillon par centrifugation à l'aide d'un appareil appelé *spin coater*. Les paramètres de centrifugation optimaux sont une vitesse de rotation de 2000 tr.min^{-1} avec une accélération de 500 ms^{-2} , garantissant ainsi une épaisseur de résine $0.7 \mu\text{m}$. Une fois la résine déposée un recuit de l'échantillon est nécessaire pour garantir l'adhésion de la résine sur celui-ci. Dans le cas présent, il est déposé sur une plaque chauffante à $115 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 1 min.

Malheureusement, cette technique de dépôt de résine laisse apparaître des effets de bord assimilables à une sur-épaisseur de résine sur les flancs de l'échantillon. Une mesure au profilomètre, visible Figure 4.3, montre que l'épaisseur de résine est désormais supérieure à celle définie par les paramètres de dépôt. Ceci est problématique pour la réalisation des motifs les plus fins. Pour s'affranchir de ces effets indésirables, une étape de "double développement" est réalisée. Le principe est de protéger le centre de l'échantillon avec un masque opaque puis de l'insoler. Seuls les bords de l'échantillon seront soumis aux UV et après développement la sur-épaisseur est ainsi supprimée afin de réaliser la lithographie des motifs souhaités. Ce procédé est résumé sur la Figure 4.4.

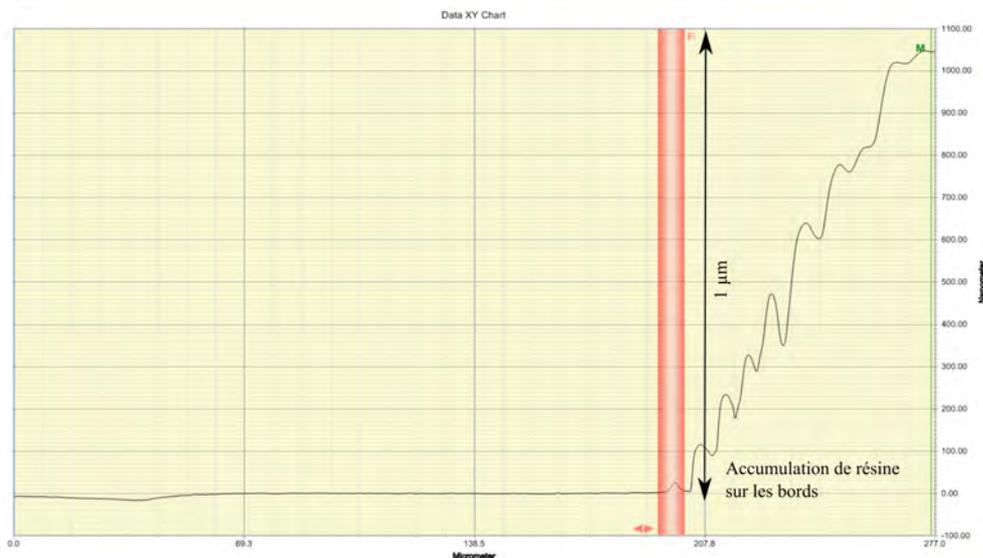


FIGURE 4.3. – Mesure de la sur-épaisseur de résine en bord d'échantillon.

Les étapes de lithographie sont réalisées à l'aide d'aligneurs de masques qui permettent d'aligner plusieurs niveaux de masquage. Ici, deux niveaux de masquage sont nécessaires pour la face avant : un pour le platine, un pour le nitrure. Un dernier est aussi nécessaire pour la face arrière de l'échantillon afin de permettre une gravure du Silicium et de libérer le pont Pt/SiN_x . Deux types d'équipements sont mis à disposition pour cette étape : une MJB4 du fabricant Allemand SUSS et l'EVG 620 du fabricant EVG. La différence principale sur la résolution des motifs entre ces deux équipements réside dans le type de contact qu'ils opèrent entre le masque et l'échantillon. La MJB4 permet de réaliser un contact par aspiration sur des échantillons de petites surfaces,

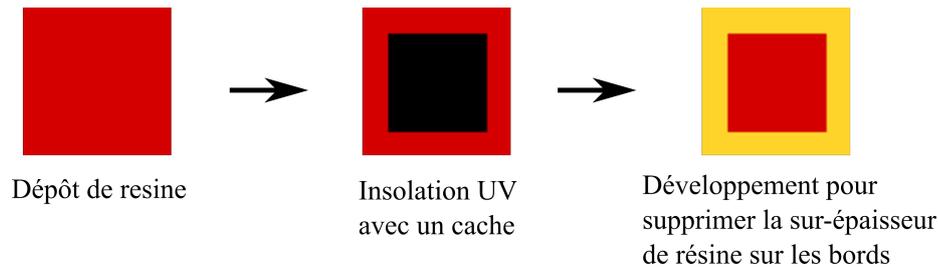


FIGURE 4.4. – Suppression des effets de bords par double développement.

comme cela est le cas ici. Ceci permet d’obtenir un espace infime entre l’échantillon et le masque et ainsi de limiter les phénomènes de diffraction de la lumière UV qui engendrerait une baisse de résolution. Cependant cet équipement ne donne pas la possibilité de réaliser un alignement double face (face avant/face arrière). C’est pourquoi ce dernier sera réalisé sur l’EVG 620. La perte de résolution due à l’utilisation de cet équipement pour l’alignement de la face arrière ne pose pas de problème étant donné que la précision souhaitée sur ce niveau de masquage n’est pas aussi importante. Les différents masques développés pour cette étape de fabrication sont présentés dans le paragraphe 4.4.1.

Après plusieurs essais de développement, il a été déterminé que pour atteindre les dimensions voulues une insolation de 9 secondes est nécessaire sur l’équipement MJB4 tandis que 3 secondes sont nécessaires sur l’EVG 620. Une fois la résine insolée l’échantillon est plongé dans un développeur (MF319) pendant 1 min pour révéler les motifs du masque sur la résine et il est ensuite rincé à l’eau dé-ionisée pour stopper toute réaction chimique puis recuit 1 min à 115 °C pour figer la résine restante. Les dimensions des motifs sont vérifiées au microscope afin de valider la lithographie. Entre chaque étape de masquage, la couche qui a été lithographiée est gravée. Ce procédé est présenté dans le paragraphe suivant.

4.3.2. Gravure des couches de Platine et de Nitrure par RIE

Après l’étape de lithographie, la résine restante sur l’échantillon sert de protection à la couche de matériau à graver. Dans le cas présent, le plus simple et le plus efficace est de réaliser une gravure plasma par RIE (Reactive Ion Etching ou Gravure ionique réactive). Cette gravure est réalisée avec un bâti ICP-RIE 210IL de la marque Corial. Dans l’enceinte du bâti, mise sous vide, l’échantillon est placé sur une cathode et un mélange de gaz réactifs est injecté, variant selon la nature du matériau à graver. La cathode est reliée à un générateur RF (Radio Fréquence) alimenté par une tension alternative de 13,56 MHz. La machine utilisée ici a la particularité d’être à couplage inductif (ICP), indiquant que l’enceinte est entourée d’une bobine servant de générateur basse fréquence LF (Low Frequency) qui génère un champ magnétique faisant entrer en rotation les électrons dans l’enceinte et les accélérant. Ainsi les atomes du ou des gaz réactifs s’ionisent par collision et la différence de potentiel entre les électrodes attire les ions des gaz vers l’échantillon. La surface du substrat est alors bombardée de ces ions. En jouant sur différents paramètres tels que la nature des gaz ou la différence de potentiel, par exemple, il est possible de contrôler la vitesse de gravure, l’homogénéité et la qualité de la surface entre autres. Le schéma du principe de cette gravure est récapitulé dans la Figure 4.5. Cette technique est utilisée pour graver les couches de Platine et de Nitrure. Concernant la mise en forme du Silicium, d’autres moyens sont mis en place et sont présentés dans le paragraphe suivant 4.3.3.

Pour la gravure du Platine, un plasma d’argon est utilisé. Le procédé de gravure est ici purement physique, c’est l’énergie cinétique des ions bombardant la surface qui active la gravure. La gravure du Nitrure se fait quant à elle dans un mélange gazeux de CHF_3 et O_2 . Dans ce cas, les

radicaux fluors du CHF_3 vont interagir avec les atomes de Si. C'est donc une gravure chimique qui suit la formule : $\text{Si} + 4\text{F}^* \rightarrow \text{SiF}_4$. Les paramètres utilisés pour les gravures sont reportés dans le Tableau 4.3. Ces paramètres ont été optimisés au travers des différents travaux au sein du laboratoire.

Pour chaque gravure, il est important de suivre sa cinétique, le plasma gravant aussi la couche de résine servant de protection. De plus, la gravure à l'argon étant purement physique, les ions continuent de bombarder la surface de l'échantillon même après la gravure du platine et peuvent graver aussi la couche de nitrure qui se situe en-dessous. Ce suivi est réalisé à l'aide d'un laser pointant le substrat. Son faisceau est réfléchi en fonction de l'indice de réflexion de la couche pointée permettant ainsi d'avoir accès en temps réel à la profondeur de gravure.

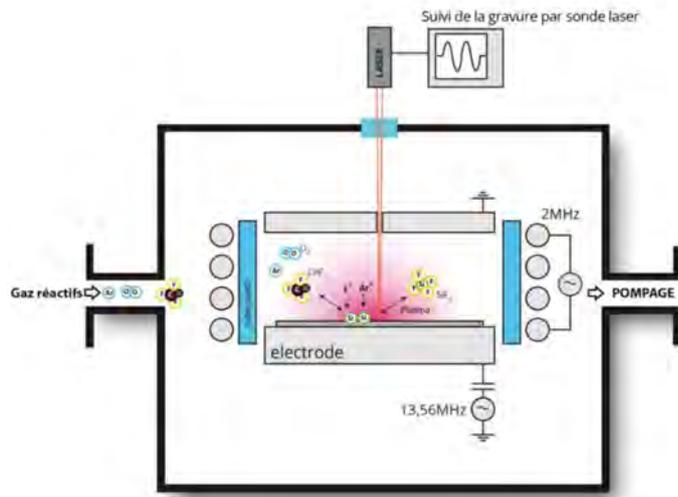


FIGURE 4.5. – Schéma du principe de fonctionnement d'un bâti ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching).

	Gravure Pt	Gravure SiN_x
Gaz	Ar	$\text{CHF}_3 + \text{O}_2$
Pression (mTorr)	10	10
Puissance Rf (W)	150	40
Puissance Lf (W)	400	200
Vitesse de gravure (nm min^{-1})	25	120

TABLE 4.3. – Paramètres de gravure RIE.

4.3.3. Mise en forme 3D par gravure humide du silicium

Formes et types de gravure du silicium

Une fois les couches de Platine et de Nitrure gravées, il faut donner sa forme finale au capteur en gravant le silicium. Pour ce faire, il existe deux méthodes : la gravure sèche par plasma (comme présenté pour les autres couches de matériaux) ou humide, c'est à dire à l'aide d'une solution de gravure. Chacune présente ces caractéristiques spécifiques. Cependant dans le cadre

du développement d'un procédé le plus simple possible, il est préférable de se tourner vers la gravure humide. En effet, elle présente l'avantage de ne pas dépendre d'équipements spécifiques et coûteux, à l'inverse des gravures sèches. La mise en place et les propriétés de ce type de gravure sont explicitées par la suite. Toutefois, dans l'objectif de réaliser des capteurs profilés il est préférable d'utiliser une gravure sèche pour mettre en forme le Silicium de façon plus contrôlée. Une étude approfondie de ce procédé sera présentée dans le chapitre suivant.

Peu importe le type de gravure utilisé, le Silicium est gravé par une interaction de phénomènes physiques et/ou chimiques dépendant des espèces utilisées. La forme de la gravure est donc impactée par le procédé utilisé. Il est ainsi possible de distinguer les gravures qui dépendent d'une direction dite anisotrope, représentée Figure 4.6(b) et (c), aux gravures isotropes (Figure 4.6(a)) où le silicium est gravé dans toutes les directions entraînant notamment une gravure sous le masque [40].

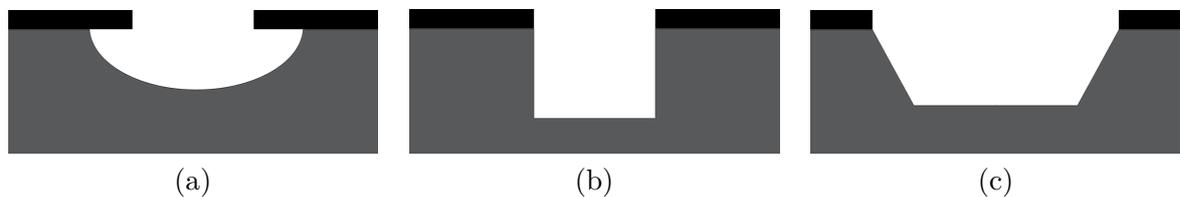


FIGURE 4.6. – Gravure du silicium (a) isotrope, (b) anisotrope droite et (c) anisotrope.

Gravure par solution de KOH

Les gravures humides peuvent être anisotropes ou isotropes. Dans le cas présent, les gravures isotropes ne présentent aucun intérêt car elles entraîneraient des gravures sous les couches de Platine et de Nitrure rendant la conception du capteur plus complexe. De plus, il a été montré qu'elles avaient une cinétique de gravure peu répétable [25], il est donc difficile d'anticiper cela en amont. Il est donc préférable de se tourner vers les gravures anisotropes. Au sein de celles-ci, se distingue la solution KOH, composée de cristaux d'Oxyde de Potassium dilués dans une solution aqueuse, celle de TMAH, à base d'Hydroxyde de Tetramethylammonium et d'Hydroxyde de Potassium, ou encore l'EDP, qui est un mélange d'Éthylènediamine et de Pyrocatechol. Dans le cas présent, la solution la mieux adaptée est la solution alcaline de KOH. Elle possède une forte cinétique de gravure comparée aux autres et surtout elle n'attaque pas les matériaux du substrat utilisés ici [25]. Ces derniers pourront ainsi jouer le rôle de masque si une telle solution est utilisée.

La gravure par KOH est considérée comme anisotrope car elle dépend des angles cristallins du Silicium. En effet, sa cinétique n'est pas la même selon les plans cristallins. Ainsi, la vitesse de gravure est nulle pour les plans $\langle 110 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$ mais ne l'est pas pour le plan $\langle 100 \rangle$. C'est pourquoi si l'on observe l'orientation de certains plans sur un wafer de Silicium $\langle 100 \rangle$ (Figure 4.7(a)) il peut être distingué des angles de gravures. Le plan $\langle 111 \rangle$ forme un angle de $54,74^\circ$ et crée donc un plan d'arrêt de la gravure tel que visible sur la Figure 4.7(c). Cette dépendance aux angles cristallins implique aussi que le Silicium peut être gravé latéralement dans certaines directions lorsqu'il est plongé dans du KOH. Le plan $\langle 110 \rangle$ étant perpendiculaire au plan $\langle 100 \rangle$ du wafer, il n'y a par exemple pas de gravure sur ces côtés du wafer. Par contre, il y a une gravure selon le plan $\langle 100 \rangle$ comme le montre la Figure 4.7(b). Ces effets de gravure latérale doivent être pris en compte lors de la conception des masques de lithographie du Nitrure, cette couche servant de masque au Silicium pour la gravure KOH afin d'obtenir la géométrie de capteur souhaitée.

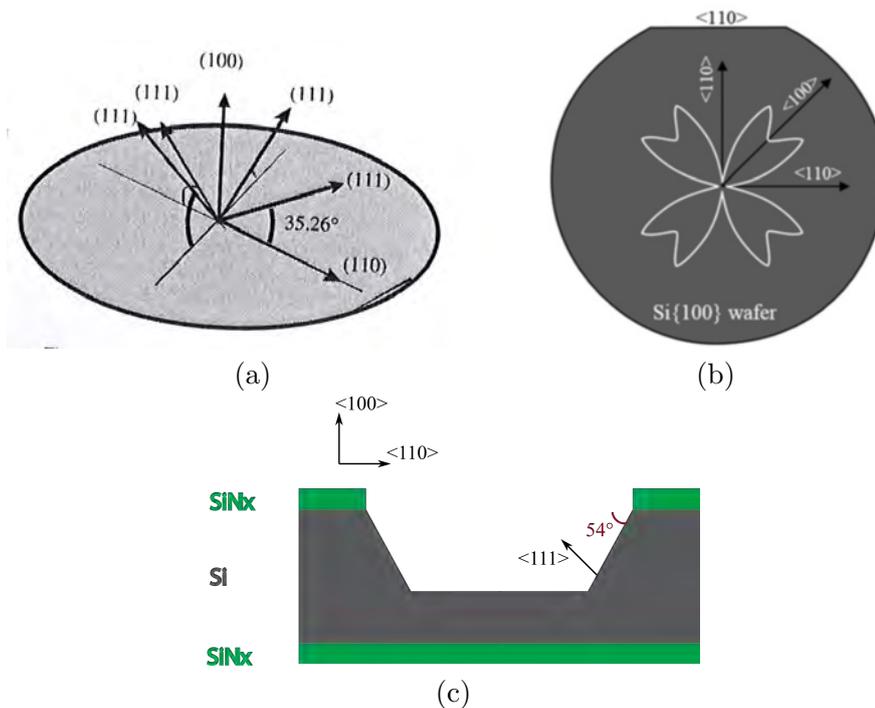


FIGURE 4.7. – (a) Représentation de l'orientation des plans cristallins $\langle 111 \rangle$ dans un wafer de Silicium $\langle 100 \rangle$ [25]. (b) Diagramme du taux de gravure latérale sur du Si $\langle 100 \rangle$ en valeur relative [58]. (c) Vue en coupe d'une cavité de Si $\langle 100 \rangle$ gravée au KOH.

4.4. Procédé de fabrication complet des micro-capteurs

4.4.1. Conception des masques de lithographie

Afin de fabriquer le design du capteur présenté Figure 4.1, il est nécessaire de concevoir des masques de lithographie pour chaque couche de matériau adaptés aux procédés utilisés. Les masques pour la réalisation du micro-capteur thermorésistif qui permettra d'effectuer des mesures de vitesse et de température sont présentés Figure 4.8. Aucun choix particulier n'a été effectué pour la conception du masque de la couche de Platine. Il est constitué de deux pads qui permettront d'effectuer un contact électrique et de relier la sonde à l'autre partie de la chaîne de mesure ainsi d'un pont de 900 μm de long et de 10 μm de large. Il comporte aussi un rétrécissement en son centre pour atteindre les dimensions de l'élément sensible souhaité, à savoir 1.5 μm de large pour une longueur variant entre 40 μm et 200 μm . Concernant le masque de Nitrure face avant, c'est le Platine qui sert de masque pour la réalisation du pont, il est alors question d'auto-masquage. De plus, il a été choisi d'ajouter un renfort de Nitrure au niveau du rétrécissement pour assurer la robustesse de l'élément sensible. Ceci est visible sur la Figure 4.8 (e). Ce renfort a exactement les mêmes dimensions que l'élément sensible de Platine. Sur les masques de Nitrure face avant et face arrière, des formes triangulaires dans les coins sont visibles. Ces formes, usuellement nommées "oreilles", servent à contrebalancer les effets de gravures latérales qui ont lieu lors d'une gravure KOH. Elles ont été dimensionnées par les recommandations de Pal et Sato [58] et afin d'avoir un design le plus optimal possible des ajustements ont été effectués par expérimentation.

Le Chap. 2 a mis en avant l'intérêt d'avoir accès à une mesure simultanée et locale de la vitesse et de la température dans des écoulements aérothermiques. Dans cet objectif, des micro-capteurs permettant d'accéder à ces grandeurs ont aussi été réalisées. Suivant le même design que précédemment, un deuxième fil de Platine a été rajouté. Ainsi, ce deuxième prototype de sonde comportera deux fils : un pour la mesure de température et un pour la mesure de vitesse. L'élé-

ment sensible qui sera utilisé en mode fil froid est placé en amont du fil chaud afin de limiter l'influence de ce dernier sur la mesure de température. Différents espacements s entre ces deux fils ont été réalisés afin de déterminer la distance optimale pour effectuer une mesure précise et ce dans un volume le plus faible possible. N'ayant aucune indication sur la longueur de l'élément sensible nécessaire pour effectuer des mesures pertinentes au moment de la conception de ces sondes, il a été choisi de donner une longueur au fil froid de 100 μm et au fil chaud de 60 μm . Les différents espacements testés sont : $s = \{30; 60; 90; 120; 150\}$ μm . La superposition des masques de Platine et de Nitrure pour ces sondes est présentée Figure 4.9. Le dimensionnement de ces espacements a été réalisé afin de garantir une mesure qui puisse être considérée comme approximativement locale. En effet, le critère choisi est que la mesure d'une perturbation de fréquence f transportée à une vitesse de convection U_c peut être considérée comme telle lorsque l'espacement entre les fils satisfait $s \ll \lambda = U_c/f$. L'hypothèse sous-jacente est donc qu'au premier ordre les perturbations ne sont que très peu modifiées sur des distances faibles par rapport à leur longueur d'onde dans l'écoulement convectif (hypothèse de Taylor). Dans le cadre des couches limites turbulentes étudiées lors de ces travaux, leur contenu fréquentiel maximal est de 10 kHz pour des vitesses de convection de l'ordre de 10 m s^{-1} , induisant ainsi un critère $s \ll 1$ mm.

Tous les masques sont réalisés en matrice de 3x3 motifs afin de réaliser plusieurs capteurs à chaque fois. Ils sont réalisés par la société Toppan Photomasks pour garantir une très bonne précision des motifs les plus fins.

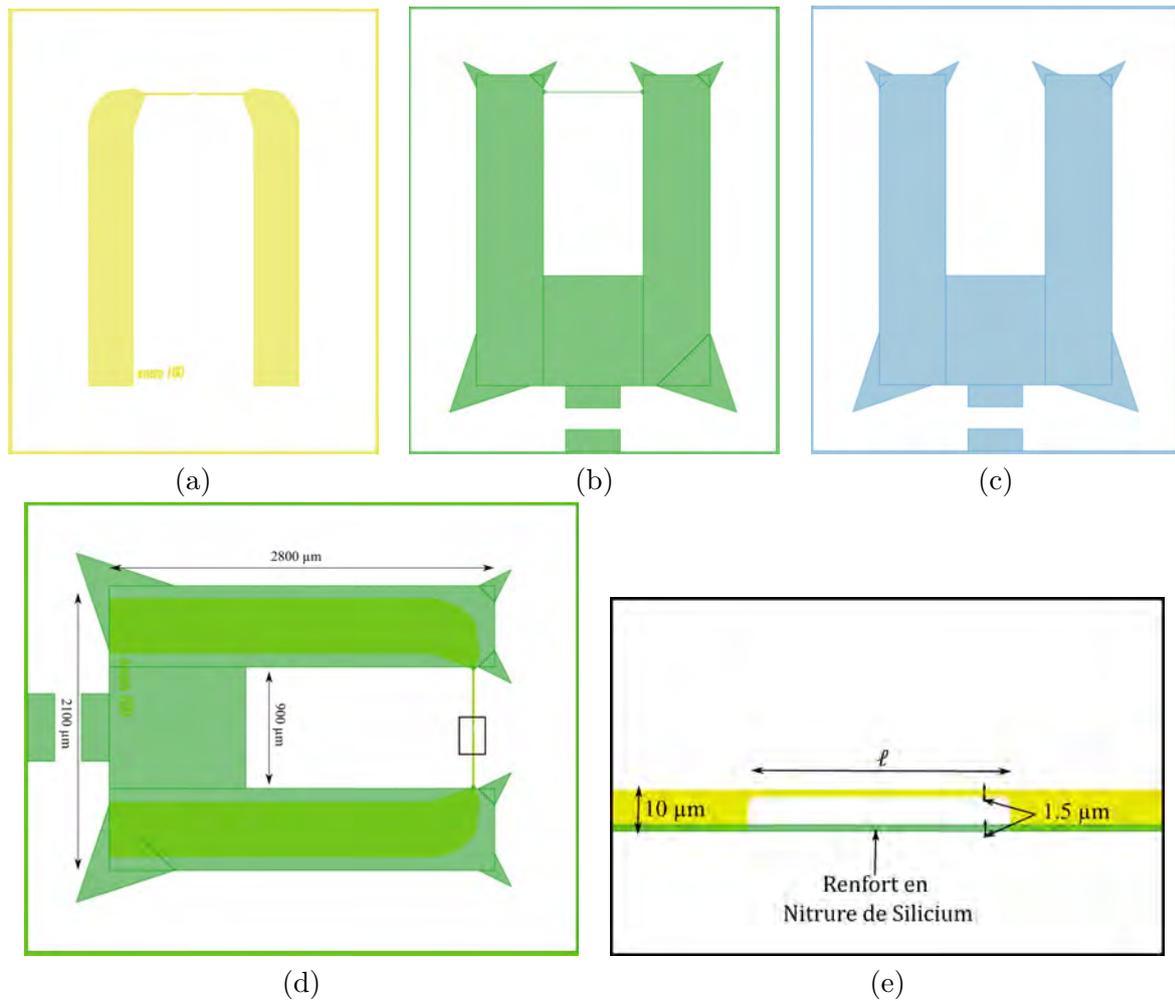


FIGURE 4.8. – (a) Masque du motif de Platine, (b) de SiN_x face avant et (c) de SiN_x face arrière. (d) Superposition des masques de Platine et de Nitrure, (e) zoom sur l'élément sensible.

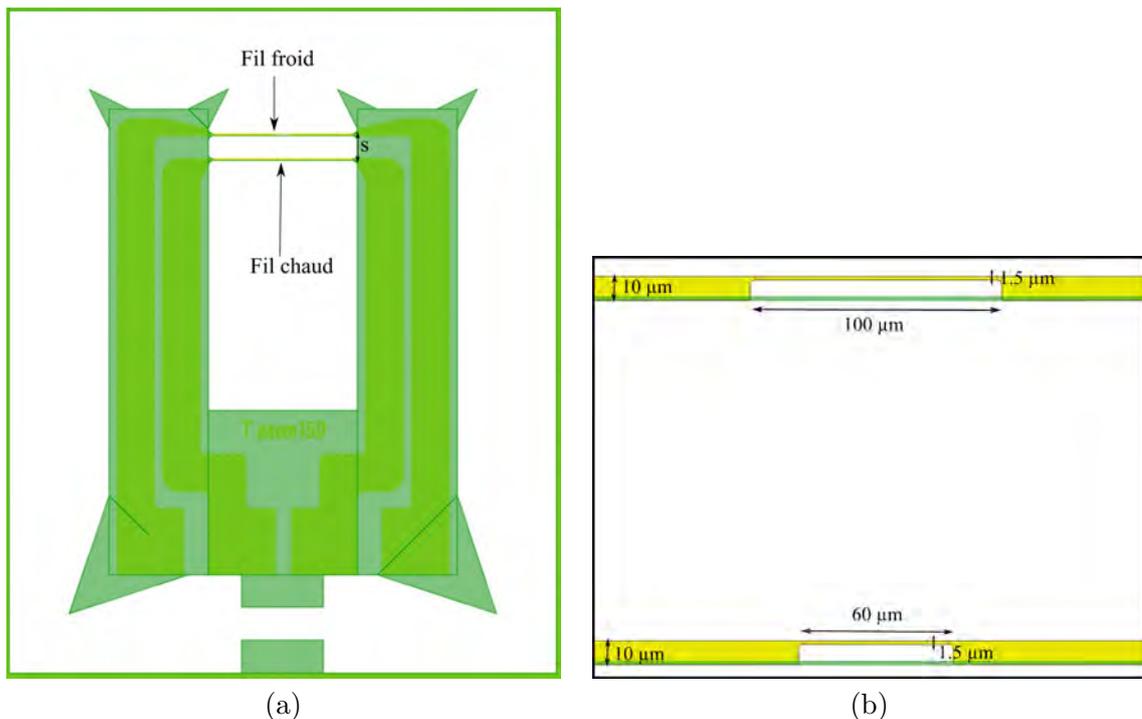


FIGURE 4.9. – (a) Superposition des masques de Platine et de Nitrure pour le capteur 2 fils, (b) zoom sur les éléments sensibles.

4.4.2. Résumé du procédé de fabrication

En suivant les différents procédés présentés au cours de ce chapitre, les étapes de fabrication suivies pour réaliser les micro-capteurs sont résumées dans la Figure 4.10. Entre chaque étape de gravure RIE, les échantillons sont consciencieusement nettoyés dans des bains à ultrason remplis d'acétone puis d'éthanol avant d'être rincés à l'eau déionisée et déshydratés. Ceci permet de supprimer les résidus de résine et d'effectuer les lithographies sur un substrat propre et d'assurer la réussite de cette étape. Une fois toutes les couches de matériaux gravées, les échantillons sont placés dans une solution de KOH maintenue à 80 °C par bain-marie. La gravure se fait tant que le pont suspendu n'est pas libéré. Le contrôle du temps de gravure se fait donc visuellement et nécessite une attention particulière pour éviter toute sur-gravure du Silicium qui pourrait fragiliser la structure des capteurs. Une fois cette gravure terminée, les échantillons sont rincés dans une solution d'eau déionisée puis plongés quelques secondes dans de l'Acétone et de l'Isopropanol afin d'enlever tous résidus potentiels suite à la gravure par KOH.

Il faut noter qu'à cause de la conception des masques, le pont suspendu est aligné avec le plan $\langle 110 \rangle$ du Silicium. Ceci a pour conséquence que la matière sous le pont va se graver lentement en comparaison des autres zones du capteur. Afin de faciliter sa libération, les masques de lithographies sont inclinés de 4 ° par rapport à l'axe cristallin du substrat. Ainsi la gravure sous le pont s'effectue plus rapidement et ceci n'impacte pas les autres zones de gravure des capteurs. Cette manipulation entraîne quelques difficultés pour aligner les différents niveaux de masquage.

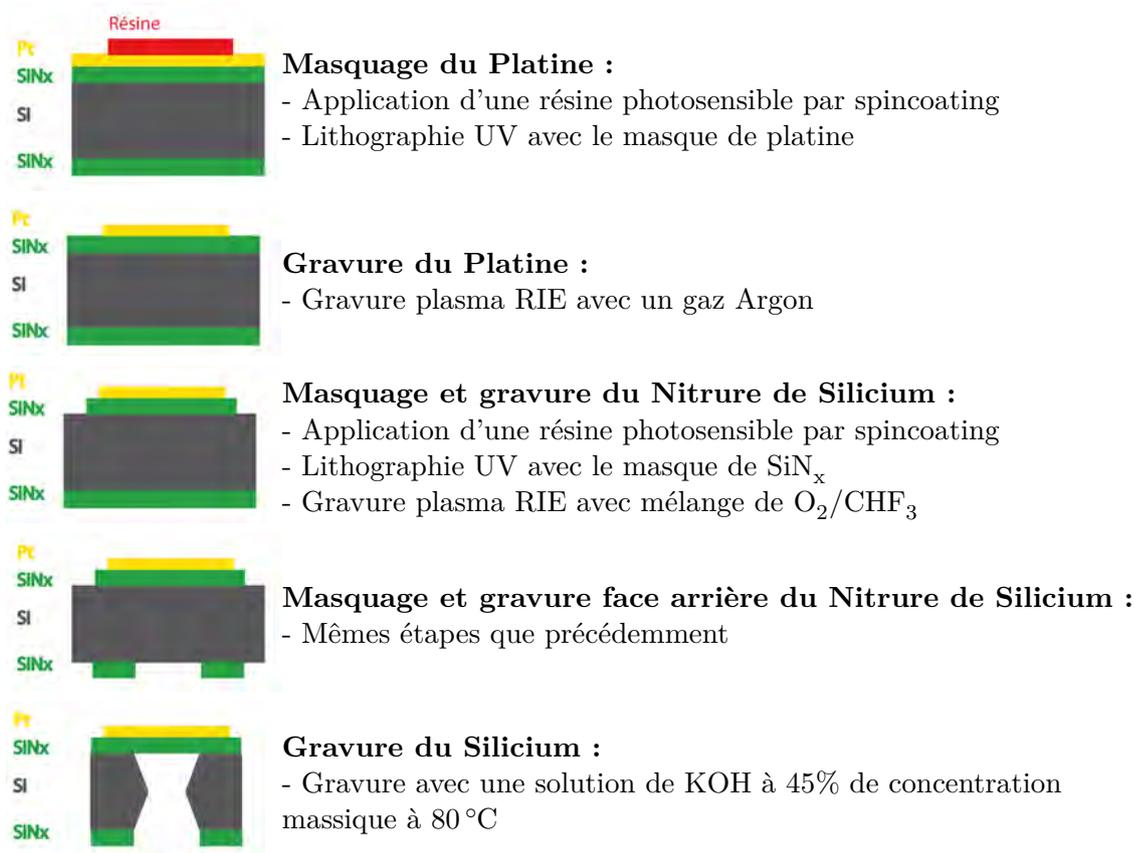


FIGURE 4.10. – Résumé des étapes de fabrication des micro-capteurs (vue en coupe au niveau du pont suspendu).

4.4.3. Les capteurs

De nombreux capteurs ont été réalisés suivant ce procédé. Afin d'avoir une idée claire du design final des sondes réalisées, quelques images de réalisation prises au microscope à balayage électronique (MEB) sont présentées ici. Une sonde comportant un seul élément sensible est exposée Figure 4.11 et une sonde à deux éléments sensibles est montrée Figure 4.13. La Figure 4.12 permet d'illustrer la différence de taille entre les éléments sensibles des micro-capteurs développés ici à un fil chaud classiquement utilisé pour des mesures de vitesse dans des couches limites turbulentes. Il est important de noter que les dimensions de chaque capteur sont contrôlées après les étapes de fabrication et avant leur utilisation pour des mesures. Il est notamment primordial de s'assurer de celles de l'élément sensible particulièrement afin de garantir la largeur de celui-ci, en l'occurrence 1.5 μm .

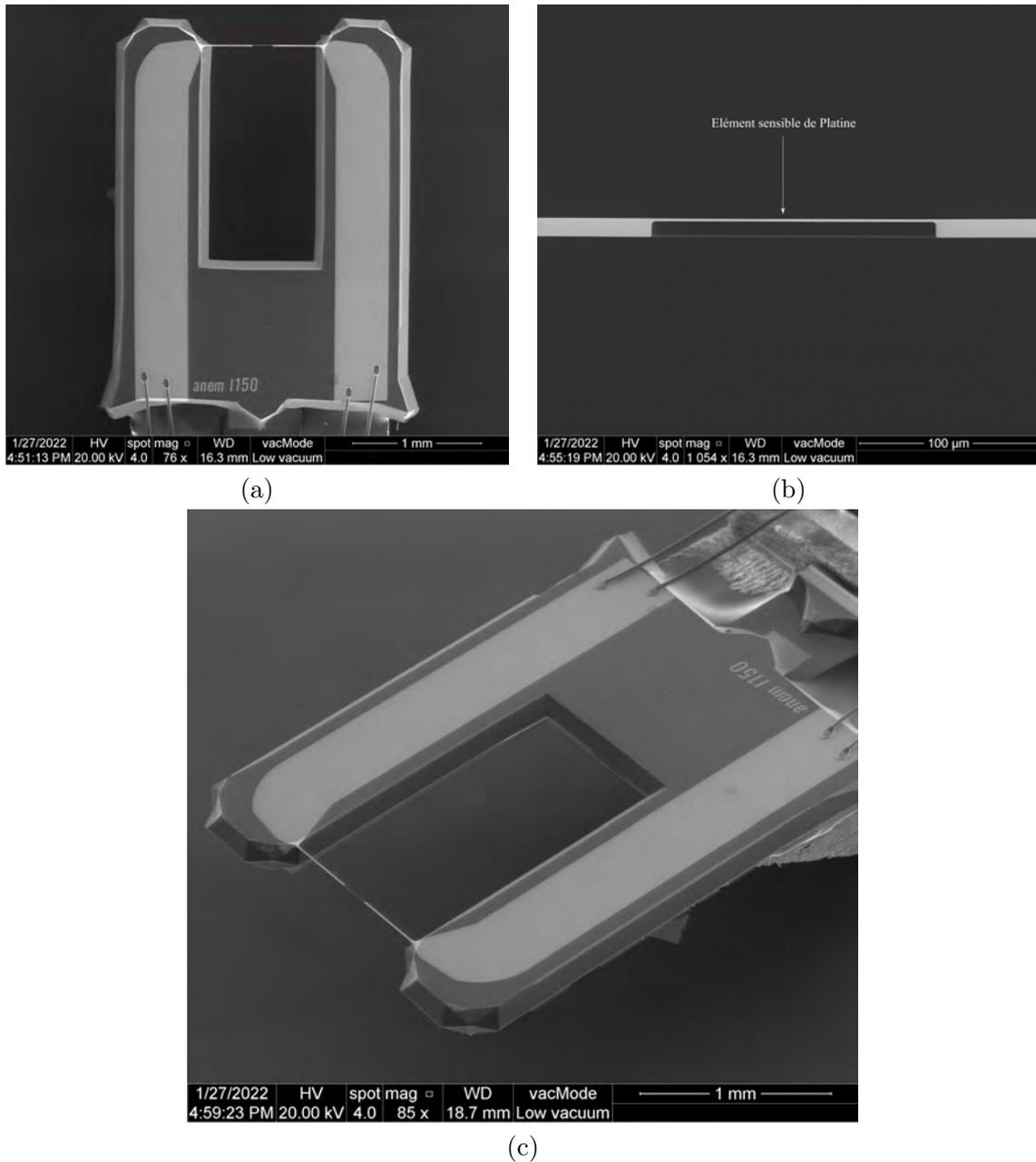


FIGURE 4.11. – Images au microscope à balayage électronique (MEB) d'un micro-capteur à un élément sensible de longueur $\ell = 150 \mu\text{m}$: (a) Vue de dessus, (b) Zoom sur l'élément sensible, (c) Vue inclinée.

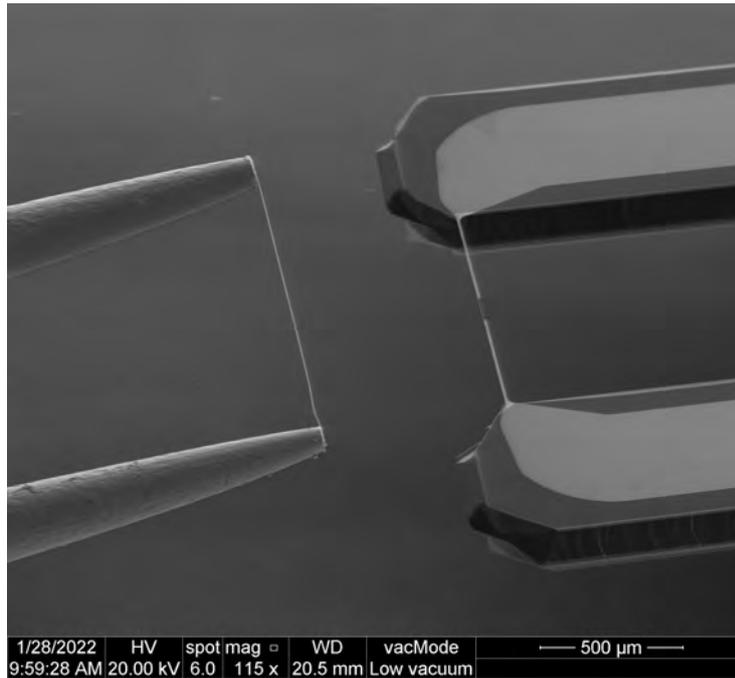


FIGURE 4.12. – Image MEB d'un micro-capteur à un élément sensible de longueur $\ell = 100 \mu\text{m}$ et de largeur $w = 1.5 \mu\text{m}$ face à une sonde fil chaud Dantec 55P15 de dimensions $\ell = 1.5 \text{ mm}$ et $d = 5 \mu\text{m}$.

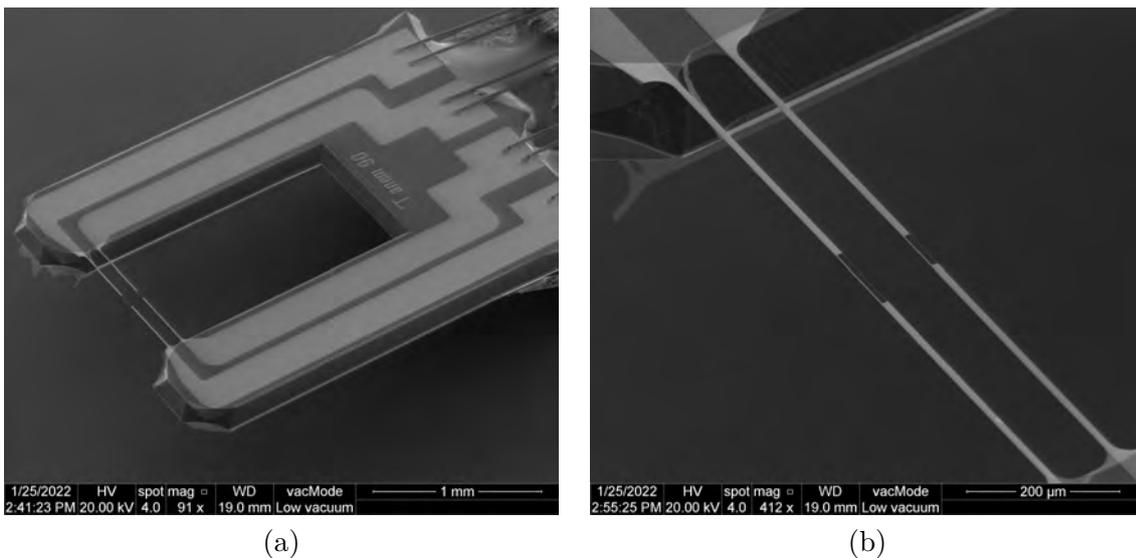


FIGURE 4.13. – Images MEB d'un micro-capteur à deux éléments sensibles espacés de $s = 90 \mu\text{m}$: (a) Vue inclinée, (b) Zoom sur les éléments sensibles.

4.5. Bilan

Ce chapitre a permis de présenter les différents choix effectués sur les matériaux et les procédés de fabrication utilisés pour réaliser des micro-capteurs. Ces derniers comportent des dimensions d'élément sensible bien inférieures aux AFC et TFF classiquement utilisés dans des applications de recherche, laissant envisager une amélioration des mesures de fluctuations de vitesse et de température dans des écoulements turbulents. Deux types de sondes ont été fabriquées lors de ces travaux : les sondes comportant un seul élément sensible permettant une mesure de vitesse ou de température et les sondes à deux fils pour effectuer une mesure de ces deux grandeurs de manière simultanée. Dans la suite de ce manuscrit, ces capteurs seront nommés respectivement : μ -anem et T -anem.

Les dispositifs ont ici été réalisés avec des procédés de fabrication assez simple grâce à un choix sur le design du capteur. Malgré une attention particulière portée à la géométrie du capteur, celui-ci peut apparaître comme intuitivement intrusif de par son épaisseur et peut donc perturber la mesure. Dans l'objectif de valider ce design mais aussi de s'assurer de développer un micro-capteur fournissant des mesures précises, il a été décidé de réaliser aussi des dispositifs avec une forme plus aérodynamique. Ceci passe par l'étude de nouvelles techniques de fabrication, notamment pour la gravure du Silicium. Cette étude ainsi que la création d'un nouveau process font l'objet du chapitre suivant.

Étude et développement de procédés de gravure du Silicium pour la réalisation de micro-capteurs profilés

Les micro-capteurs présentés au chapitre précédent sont constitués de broches relativement imposantes. Il existe donc un risque d'engendrer localement des décollements ou un blocage de l'écoulement trop important en bout de sonde, pouvant alors fortement biaiser la distribution de vitesse dans la zone de mesure. Il est donc important d'évaluer les éventuelles améliorations de mesure qui pourraient être obtenues avec des micro-capteurs plus fins à proximité de cette zone de mesure. Cependant, le procédé de fabrication précédemment développé ne permet pas de fabriquer des sondes profilées. Cette limitation est due à l'utilisation d'une solution de gravure anisotrope, conditionnée par les plans cristallins du Silicium. Selon l'orientation des plans, il serait possible d'obtenir un profil avec une pente de 35.26° . Cet angle reste cependant relativement conséquent d'un point de vue aérodynamique et il est d'intérêt d'essayer de le réduire davantage pour diminuer au maximum la déviation des lignes de courant autour des broches et en périphérie de la zone de mesure. L'objectif choisi ici est d'essayer d'atteindre des pentes de gravure de la surface inférieure du capteur de l'ordre de 15° maximum. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres moyens de mise en forme du Silicium. Ce chapitre vise à étudier ces différentes techniques de gravures afin de réaliser les pentes souhaitées. Il s'inspire majoritairement des travaux effectués à l'Université de Princeton pour la fabrication de leurs micro-sondes [82].

La première partie de ce chapitre présentera le principe sur lequel est basé la réalisation du nouveau type de sonde : le RIE lag. Ce phénomène physique permet d'obtenir différentes profondeurs de gravure sur un même substrat en jouant sur l'ouverture des masques. Il sera ensuite question de quantifier ce phénomène pour différentes méthodes de gravure ainsi que pour différents paramètres. La dernière partie de ce chapitre aura pour but de synthétiser les différentes études réalisées pour sélectionner le nouveau procédé de fabrication adapté à la réalisation de capteurs profilés et de présenter les réalisations.

Sommaire

5.1. Principe du RIE lag	70
5.2. Études des différents procédés de gravure du Silicium	71
5.2.1. Gravure du Silicium par RIE	71
5.2.2. Gravure du Silicium par XeF_2	76
5.2.3. Gravure du Silicium par DRIE	78
5.3. Procédé de fabrication adapté à la réalisation d'un capteur profilé	83
5.3.1. Choix du procédé	83
5.3.2. Procédé de fabrication des capteurs profilés	83
5.3.3. Les capteurs profilés	85
5.4. Bilan	88

5.1. Principe du RIE lag

Afin de structurer le Silicium pour obtenir une pente, différentes techniques de mise en forme sont possibles. Il est notamment possible de se tourner vers le micro-usinage par laser qui consiste à donner la forme souhaitée au silicium par gravure laser. Cette technique a déjà été utilisée pour la fabrication des premiers prototypes de micro-capteur de l'université de Princeton [5]. Cependant, elle est assez limitée dans sa précision rendant les surfaces gravées assez grossières ce qui n'est pas jugé comme étant le plus pertinent pour rendre un capteur plus aérodynamique. Il est donc préférable de se tourner vers la gravure plasma du Silicium qui permet une mise en forme plus précise. C'est de cette façon que les NSTAP de Princeton [82] ont été fabriqués, ces derniers ayant démontré de très bonnes performances de mesure. Ce procédé a aussi été utilisé pour la fabrication d'autres MEMS. Bourouina *et al.* [9] ont notamment réussi à développer des micro-lentilles en usinant le Silicium en 3D.

Dans les deux cas et même si la technique de gravure plasma utilisée est différente, les procédés se sont basés sur le phénomène du RIE lag ou ARDE (Aspect Ratio Dependand Etching), mis en avant dans plusieurs travaux [39][25][40]. Ce phénomène est la conséquence d'une réaction physique lors de la gravure qui rend la profondeur de gravure du Silicium dépendante de la surface d'ouverture du masque. En considérant le facteur de forme $F = \frac{\text{profondeur}}{\text{diametre}}$, il est observé que plus ce dernier est élevé pour un motif plus la vitesse de gravure de ce motif diminue. Autrement dit, les tranchées avec de petites ouvertures vont se graver plus lentement que celles présentant des ouvertures plus larges. Une illustration de ce phénomène est donnée dans la Figure 5.1. Se basant sur ce principe, Vallikivi *et al.* [82] ou Bourouina *et al.* [9] ont réalisé des surfaces inclinées dans le Silicium en gravant des tranchées de plus en plus profondes puis en retirant le reste de matière entre ces tranchées. Ces process sont présentés Figures 5.2.

Pour comprendre ce phénomène de RIE lag, il faut s'intéresser aux particules actives pendant la gravure, notamment à leur distribution angulaire. En effet, lors d'une gravure plasma RIE le matériau servant de masque peut se charger électriquement avec le bombardement des ions et des radicaux à sa surface. Ceci créé alors un champ électrostatique, la force image, déviant les particules dès leur entrée dans une tranchée. Le matériau gravé ici est du Silicium qui est un

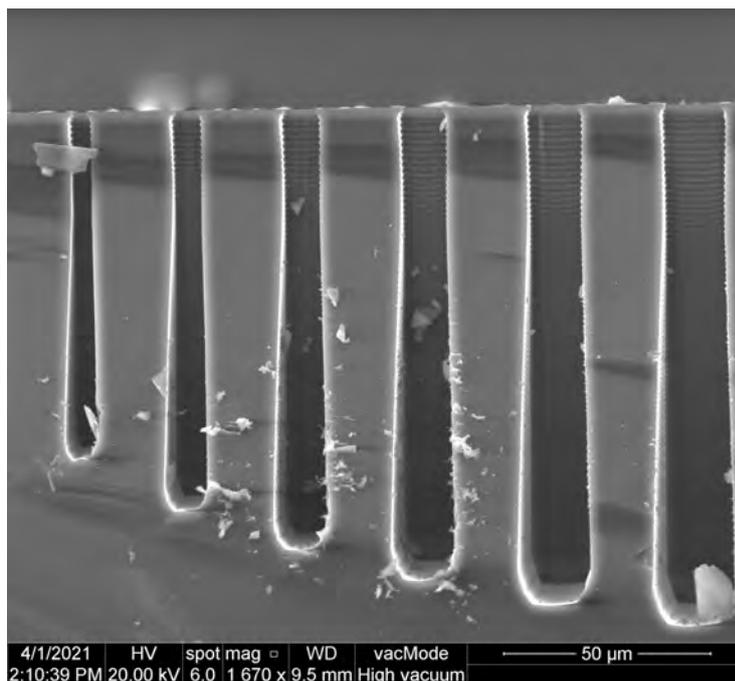


FIGURE 5.1. – Principe du RIE lag.

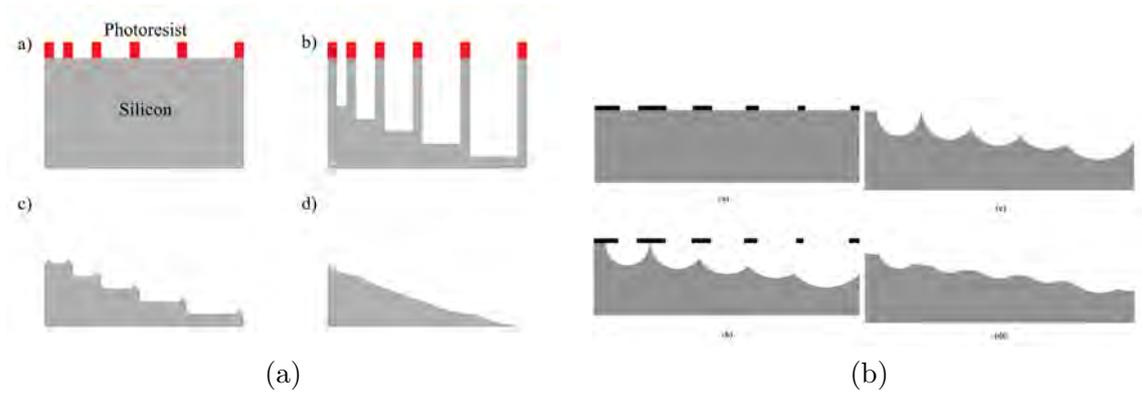


FIGURE 5.2. – Étapes de gravure pour obtenir un profil 3D sur un substrat de Silicium (a) Vallikivi *et al.* [82] (b) Bourouina *et al.* [9].

semi-conducteur. Il possède donc un potentiel non nul qui attire lui aussi les ions vers les flancs des ouvertures à graver. Toutes ces forces attractives entraînent des déviations et amènent donc les particules à rentrer en collision avec les parois des tranchées se déchargeant lors de ces chocs et s'appauvrissant énergétiquement. Par conséquent, peu de particules encore actives arrivent à atteindre le fond de la tranchée [1]. Ce phénomène est d'autant plus visible pour les petites ouvertures car les flancs de la tranchée gravée étant proches ils attirent quasiment toutes les particules vers eux. Cependant malgré la connaissance des phénomènes entraînant ce RIE lag, il est difficile de le prédire efficacement. Ces derniers peuvent être sensibles aux paramètres de gravure comme la pression, le mélange gazeux ou encore la puissance injectée au plasma tout comme le masque utilisé pour protéger le Silicium. Il a notamment été démontré que l'effet du lag est moins visible à faible pression [39].

C'est pourquoi dans l'objectif de concevoir un capteur profilé, une campagne d'essais a été réalisée sur plusieurs géométries et tailles d'ouvertures et ce en utilisant différents paramètres et types de gravures. Tout ceci a permis de quantifier expérimentalement le RIE lag et ainsi de l'intégrer à la fabrication d'un dispositif de forme plus aérodynamique.

5.2. Études des différents procédés de gravure du Silicium

Trois différents procédés ont ici été étudiés afin d'optimiser la fabrication de capteurs profilés. Les deux premiers, la gravure plasma par RIE et la gravure au Xénon Difluoré (XeF_2), ont été réalisés dans la salle blanche de l'Université de Montpellier. Concernant la première gravure, l'étude s'est portée sur la recherche des paramètres optimaux pour obtenir une forte profondeur de gravure et qu'elle soit le plus anisotrope possible ainsi que sur la quantification du RIE lag. Pour le XeF_2 , il a été question de seulement s'intéresser au dernier de ces paramètres. L'investigation du phénomène de RIE lag pour ce type de gravure n'étant pas présente dans la littérature. Le troisième procédé étudié est la gravure par Deep RIE (ou DRIE) qui est réalisée dans un autre laboratoire, la centrale technologique du LAAS à Toulouse. De ce fait, il n'a été une nouvelle fois question d'observer uniquement l'effet du RIE lag.

5.2.1. Gravure du Silicium par RIE

Physique de gravure

Pour graver le Silicium par RIE, le plus commun est d'utiliser des gaz fluorés [40]. Ici, l'intérêt s'est porté sur les gravures à base d'Héxafluorure de Soufre (SF_6). Comme pour la gravure du Nitrure de Silicium, le plasma d'un tel gaz crée des radicaux F^* permettant de graver le Silicium

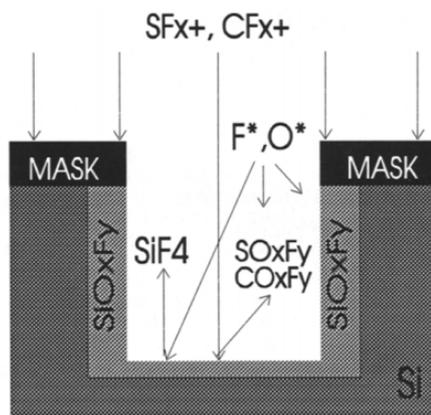


FIGURE 5.3. – Schéma de la chimie d'une gravure SF₆/O₂/CHF₃ [38].

selon la stœchiométrie suivante $\text{Si} + 4\text{F}^* \rightarrow \text{SiF}_4$. Avec la seule présence de SF₆, la gravure du silicium est isotrope [9]. Il est cependant possible d'ajouter différents gaz pour rendre la gravure anisotrope. L'ajout de Dioxygène (O₂) peut jouer ce rôle. Dans un tel mélange, l'O₂ crée des radicaux O* qui permettent de passiver et donc de protéger les flancs du silicium avec une couche d'Oxyde de Silicium SiO_xF_y rendant ainsi la gravure plus anisotrope. Cette réaction est présentée sur la Figure 5.3. Il a été montré qu'un tel procédé permettait d'atteindre des profondeurs de gravures d'une centaine de micromètres [95], un ordre de grandeur compatible avec les gravures ici recherchées.

Il est aussi possible de rajouter d'autres gaz comme le Trifluorométhane (CHF₃) [50] ou le Tétrafluorure de Carbone (CF₄) [4] qui permettraient d'obtenir des gravures très anisotropes. En effet, la présence de ces gaz dans le plasma produit un polymère C_xF_y qui forme lui aussi une fine couche de passivation. Cependant, ceci a aussi pour conséquence de ralentir la gravure. L'ajout de gaz carbo-fluorés est donc préférable pour atteindre l'objectif d'une gravure anisotrope mais pas celui d'une gravure profonde. De plus, l'expérience acquise au sein du laboratoire indique que ce type de mélange gazeux rend le plasma fortement instable. C'est pourquoi, dans un premier temps, les travaux présentés se sont concentrés uniquement sur le mélange SF₆/O₂.

De nombreux paramètres influent sur la nature de la gravure et la vitesse à laquelle elle se réalise. Ainsi la température, la pression, la puissance ainsi que le rapport des gaz utilisés ont tous leurs rôles à jouer. Il est donc nécessaire de s'intéresser à leurs apports. Tout d'abord, la température est l'un des paramètres les plus importants [40]. Une montée en température du substrat ou du réacteur entraîne une diminution du taux de gravure. De ce fait, une attention particulière doit être portée au refroidissement du réacteur durant les expériences menées. Classiquement, cela est effectué à l'aide d'un apport en hélium. Concernant les autres paramètres, les travaux menés par Legtenberg [50] ont cherché à montrer leur influence sur la gravure pour un mélange gazeux SF₆/O₂. Comme montré sur la Figure 5.4, aucune loi linéaire ne peut être établie. Des choix devront donc être fait selon le résultat escompté. Par exemple, si une gravure rapide mais isotrope est souhaitée, un fort débit de SF₆ avec une pression moyenne et une forte puissance seront préconisés. D'un autre côté, il faudra diminuer l'apport en SF₆ et la puissance tout en ajoutant un débit de O₂ pour atteindre une gravure anisotrope au dépend de la vitesse de gravure [95] [74]. Cependant, les paramètres présentés dans ces études ne peuvent pas être appliqués directement sur la machine RIE qui est utilisée dans ces travaux. En effet, comme expliqué par Jansen *et al.* [38], chaque réacteur est différent : il est donc préférable de prendre ces valeurs comme base de travail et de les ajuster au fil des essais.

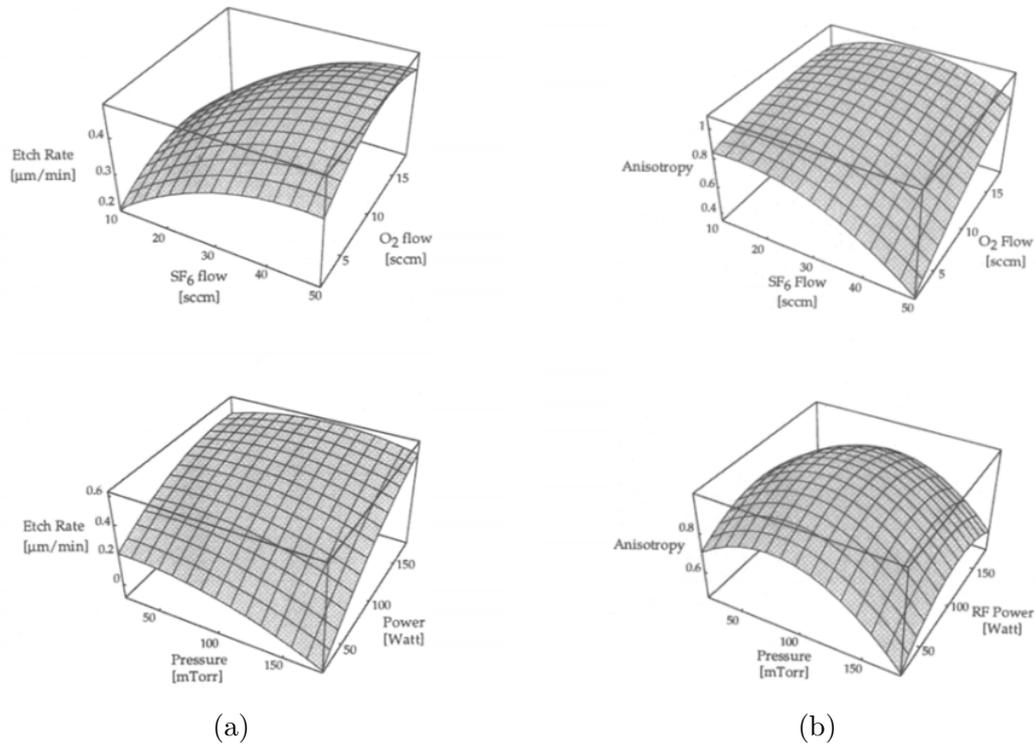


FIGURE 5.4. – Influence de l’apport de SF₆ et de O₂, de la pression et de la puissance sur la nature de la gravure (a) vitesse de gravure (b) anisotropie [50].

Protocole d’étude

Afin d’optimiser la gravure par RIE, les paramètres suivants sont étudiés :

- La pression dans le réacteur : $p = \{30; 50; 70\}$ mTorr ;
- La puissance du réacteur : $P = \{130; 150; 180; 200; 250\}$ W ;
- La rapport de mélange SF₆/O₂ : $R = \{60; 70; 80; 90\}\%$. Un rapport $R = 60\%$ correspond à 60 % de SF₆ pour 40 % de O₂ dans le réacteur.

Pour observer l’influence de ces paramètres sur la gravure, un masque spécifique pour cette étude est réalisé. Ce masque comporte des ouvertures de différentes tailles et de différentes formes afin de quantifier le RIE lag. En l’occurrence, il a été décidé de réaliser des ouvertures rectangulaires de largeur allant de 2 à 60 μm espacées chacune de 20 μm ainsi que des ouvertures circulaires allant de 1.5 μm à 50 μm de diamètre. Dans le procédé présenté dans le chapitre précédent, le Nitrure de Silicium joue le rôle de masque pour la gravure du Silicium. Cependant dans le cas d’une gravure du Si par RIE, le SiN_x est gravé lui aussi par les gaz utilisés. Dans le but d’avoir un matériau masquant pendant toute la durée d’une gravure, il a été déposé une couche de Chrome (Cr) sur le Nitrure. Ce matériau présente une très bonne résistance aux gravures par gaz fluorés [23]. Le dépôt est effectué par évaporation afin d’obtenir une épaisseur de 100 nm. La lithographie des ouvertures est donc effectuée sur ce matériau de la même façon que pour tout autre lithographie réalisée dans ces procédés. Afin d’obtenir une bonne résolution des motifs, le Cr est gravé à l’aide d’une solution chimique spécifique pour ce matériau, du *Chromium etchant*. Une petite étude paramétrique a permis de déterminer le temps de gravure idéal pour l’épaisseur déposée, en l’occurrence 70 s. Une fois cette couche faisant office de masque gravée, la couche de SiN_x est elle aussi gravée par le procédé présenté au chapitre précédent laissant l’échantillon prêt pour l’étude de la gravure du Silicium.

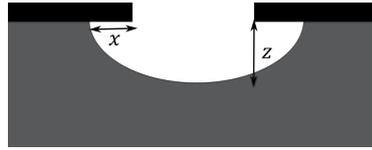


FIGURE 5.5. – Représentation de la sur-gravure et de la profondeur de gravure.

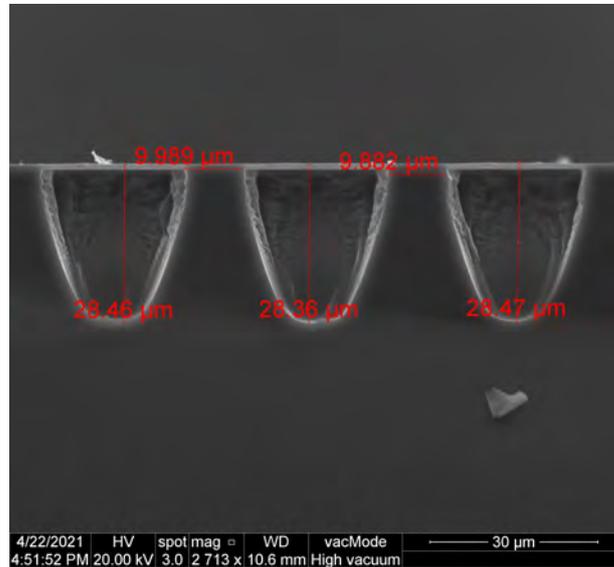


FIGURE 5.6. – Exemple d'une mesure de la profondeur de gravure et de la sur-gravure pour des ouvertures circulaires de 10 µm de diamètre et espacées de 25 µm.

Les grandeurs d'intérêt pour cette étude sont la profondeur de gravure permettant de remonter à la vitesse de gravure et le taux d'anisotropie. Ici, le taux d'anisotropie A est défini comme la différence entre la profondeur de gravure z et la sur-gravure sous le masque x divisée par cette même profondeur, soit $A = (z - x)/z$. Ces grandeurs sont représentées Figure 5.5. Ainsi une gravure anisotrope (unidirectionnelle selon z) a un coefficient $A = 1$.

Pour mesurer ces grandeurs d'intérêts, les échantillons gravés sont clivés de façon à pouvoir observer les ouvertures dans un plan. Cette observation se fait ensuite au MEB. Une image de ce qui est typiquement observé après clivage est visible Figure 5.6. Ce moyen de mesurer les dimensions de la gravure n'est pas idéal car il faut que le clivage soit parfaitement au centre de l'ouverture pour obtenir une mesure précise. De plus, celle-ci s'effectue manuellement sur le MEB ce qui n'est pas le plus précis surtout pour des dimensions aussi fines. Il faut donc garder à l'esprit que les mesures effectuées ici donneront une tendance plutôt qu'une mesure exacte.

Résultat de l'étude paramétrique

De nombreuses gravures ont été effectuées afin d'étudier les paramètres exposés ci-dessus, notamment pour s'assurer de la répétabilité des gravures. En effet, parfois de fortes disparités ont été observées. Celles-ci étaient en réalité dues à un mauvais refroidissement du réacteur à cause d'un manque d'Hélium. Les causes de ce manque ont été diverses : épuisement de la réserve, fuite dans le circuit de refroidissement ou bien mauvaise régulation de la machine. Ceci a eu pour conséquence de rallonger grandement le temps passé sur cette étude. Néanmoins des conclusions intéressantes ont pu être tirées de ces essais. Ici, toutes les gravures réalisées sont d'une durée de 45 min.

5.2. Études des différents procédés de gravure du Silicium

Les principaux résultats de l'étude sont présentés sur la Figure 5.7. Ils montrent tout d'abord que la vitesse de gravure est assez faible et qu'il est difficile d'atteindre des vitesses supérieures à 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ avec le réacteur utilisé. De plus, la gravure n'est jamais totalement anisotrope. En s'intéressant plus en détails aux paramètres de gravure, il est clairement visible qu'une augmentation de la pression, de la puissance ainsi que du rapport de SF_6 augmente fortement la vitesse de gravure. Ceci est adéquat avec les résultats des travaux réalisés par Legtenberg *et al.* [50] et qui ont été présentés Figure 5.4. Cependant, il n'était pas attendu une si forte influence de la pression sur ce résultat. L'impact du ratio SF_6/O_2 est lui plus logique. En effet, le SF_6 étant le gaz qui entraîne la gravure du Silicium, un apport plus important de celui-ci engendre une plus forte concentration d'espèce réactive et donc une plus forte vitesse de gravure. Ceci se fait alors au détriment de l'anisotropie car une plus faible concentration de O_2 induit une passivation moins forte des flancs des tranchées gravées et donc une plus forte sur-gravure latérale. L'influence de la pression et de la puissance sur ce dernier paramètre est moins prévisible, comme l'avait démontré une nouvelle fois Legtenberg *et al.* [50]. Cette étude est donc en accord avec la littérature et n'a donc pas permis de découverte majeure. Elle a néanmoins permis de quantifier l'influence des paramètres pour le bâti RIE de la salle blanche de l'Université de Montpellier et d'observer les limites de vitesses et de forme de gravure atteignables. Les recettes de gravures développées ici ont ainsi pu être utilisées par d'autres utilisateurs.

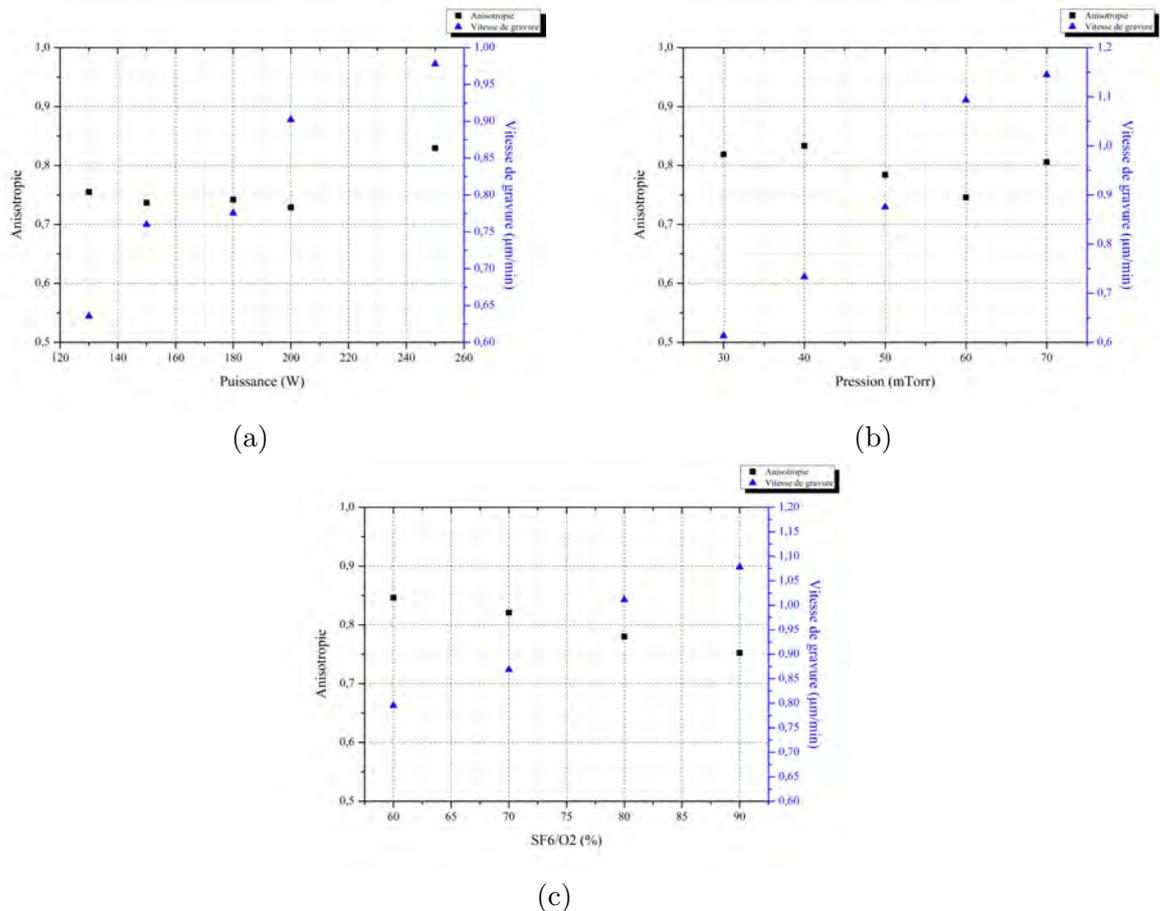


FIGURE 5.7. – Influence des paramètres RIE sur la vitesse de gravure et l'anisotropie :

- (a) Gravures à $p = 70$ mTorr et rapport SF_6/O_2 $R = 80\%$;
- (b) Gravures à $P = 250$ W et rapport SF_6/O_2 $R = 80\%$;
- (c) Gravures à $p = 70$ mTorr et à $P = 250$ W.

L'étude de ce procédé de gravure a aussi pour but de quantifier le RIE lag. L'influence de

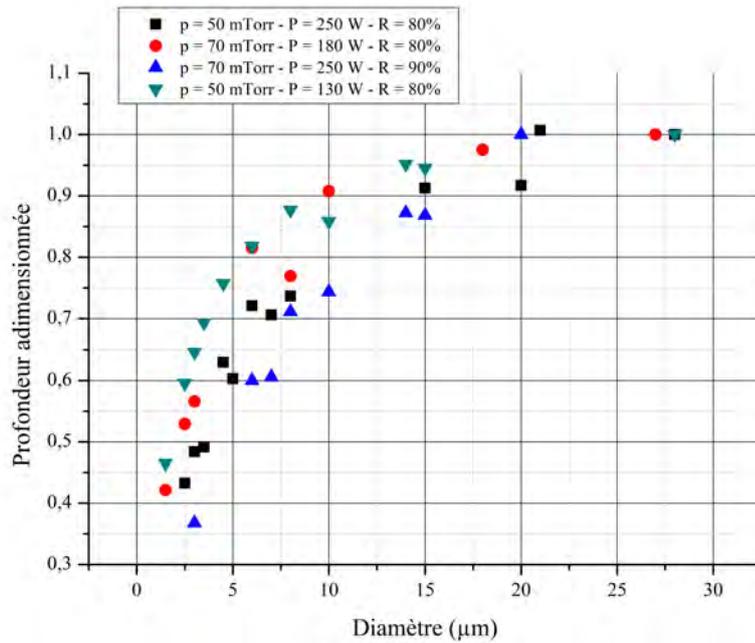


FIGURE 5.8. – Profondeur de gravure adimensionnée par la profondeur maximale en fonction du diamètre d’ouverture dans le masque pour différents paramètres.

l’ouverture dans le masque sur la profondeur de gravure est présentée Figure 5.8 pour quelques gravures avec différents paramètres. Ici, les profondeurs sont présentées de façon adimensionnées par la profondeur maximale de la gravure. Il est ainsi visible que les paramètres de gravure n’influencent pas énormément le lag, dans le cas d’une gravure par RIE. Celui-ci a toujours une répartition logarithmique même si les résultats présentés comportent quelques disparités principalement dues au manque de précision de la mesure. Ce résultat indique que ce phénomène est presque totalement physique et qu’il est grandement fonction des tailles des ouvertures et peu des paramètres de gravures en contradiction de ce qui a pu être identifié dans la littérature. Il sera donc intéressant d’observer si ce résultat est aussi observable avec d’autres types de gravures.

Comme mentionné dans le paragraphe 5.2.1, l’ajout de CHF_3 doit théoriquement augmenter fortement l’anisotropie de la gravure en diminuant sa vitesse. Quelques essais ont alors été réalisés en ce sens. Cependant, les résultats obtenus ne sont pas en accord avec la littérature. En effet, l’ajout de ce gaz a bien rendu la gravure plus lente mais avec une plus forte gravure latérale. Ce résultat n’est pour l’instant pas expliqué et des expériences complémentaires n’ont pas pu être menées par manque de temps.

5.2.2. Gravure du Silicium par XeF_2

Principe de gravure

Un autre gaz permettant la gravure du Silicium est le Xénon Difluoré (XeF_2). Sur le même principe que la gravure avec du SF_6 , ce sont les atomes de fluor sans aucune espèce ionisée qui réagissent avec le Silicium selon l’équation suivante : $\text{Si} + 2\text{XeF}_2 \rightarrow \text{SiF}_4 + 2\text{Xe}$. L’utilisation de ce type de gaz présente l’avantage de réagir naturellement à température ambiante dans une enceinte à basse pression avec le Si [90] et d’avoir une forte cinétique, pouvant atteindre une vitesse de gravure de l’ordre de $15 \mu\text{m}/\text{min}$ selon Chu [15]. Cependant, utiliser du XeF_2 engendre une gravure fortement isotrope. En effet, Chan *et al.* [11] ont montré dans leurs expériences que la sur-gravure latérale pouvait être deux fois supérieure à la gravure verticale. Ce phénomène de

sur-gravure pourra ainsi compliquer l'obtention de paliers souhaités pour profiler le capteur. Tout de même, étant donné le manque de littérature sur ce type de procédé couplé au RIE lag, il a été choisi de tester ce procédé.

Une gravure au Xénon Difluoré a la particularité de ne pas nécessiter la formation d'un plasma et par conséquent aucun apport de puissance pour activer la réaction de gravure. Le principe de fonctionnement est donc différent de celui d'une gravure par RIE. Ici, des cristaux de XeF_2 sont montés en pression dans une chambre d'expansion pour atteindre leur état gazeux puis la vapeur est injectée dans une chambre de gravure à basse pression. Dans le but d'optimiser le procédé de gravure, celle-ci est réalisée par pulsation [15] : le gaz réactif ne reste dans la chambre de gravure qu'une à deux minutes puis est expulsé et les deux enceintes sont purgées à l'aide de Diazote (N_2). Après cela, une nouvelle étape de gravure peut être lancée. Le schéma-bloc présenté Figure 5.9 récapitule les différents composants d'une machine de gravure au XeF_2 . Durant ces travaux de thèse, les gravures ont été réalisées avec une machine de la société Xactix.

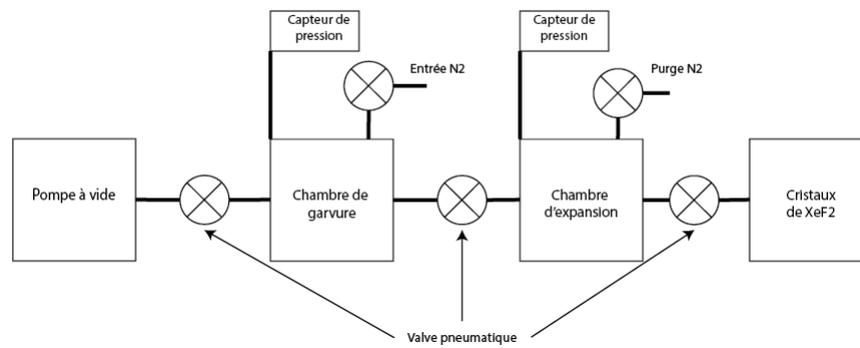


FIGURE 5.9. – Schéma bloc d'un système de gravure XeF_2

Protocole d'étude

Avec un tel système de gravure, il n'est pas possible de modifier autant de paramètres qu'avec un bâti RIE. Ici, seulement la pression du gaz, par conséquent sa quantité, et le temps d'une pulsation peuvent être modifiés. L'intérêt de réaliser une étude paramétrique est donc limité et il sera ici seulement question de réaliser des gravures avec une quantité de gaz adéquate pendant la durée d'une pulsation pour qu'il y ait une gravure toujours active. Dans le cas présent, la pression de XeF_2 est de 3 Torr et la durée d'un cycle de 30 s. Seule l'influence de la taille des ouvertures sur la profondeur ainsi que la quantification de la sur-gravure latérale ont été étudiées pour ce type de procédé. Selon les travaux de thèse de Koo [44], la température de la chambre de gravure peut jouer un rôle important lors de la gravure et il aurait donc été intéressant de pouvoir modifier ce paramètre. Malheureusement, la machine utilisée ne dispose pas de système de chauffage rendant les modifications de la température impossibles.

Les ouvertures du masque sont de même dimensions et de même type que pour l'étude de la gravure par RIE. Cependant, le fait que la gravure soit ici totalement isotrope a obligé à augmenter l'espace entre les différentes ouvertures. Cela est fait pour éviter que les gravures latérales ne se propagent aux autres ouvertures, c'est à dire qu'une ouverture n'influence pas la gravure de sa voisine. Le matériau du masque ici utilisé est du SiO_2 étant donné que celui-ci n'est pas gravé par le XeF_2 , le SiN_x étant quant à lui attaqué par ce gaz [87]. Une couche d'environ 200 nm est déposée au-dessus de la couche de Nitrure par PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* ou dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma). A l'image de la gravure par

RIE, cette technique de dépôt repose sur la formation d'un plasma gazeux dans une enceinte sous vide à l'exception qu'ici les espèces gazeuses introduites dans le plasma se déposent sur la surface de l'échantillon plutôt que de la graver. Pour obtenir du SiO_2 , les gaz utilisés sont du Silane (SiH_4) et du Protoxyde d'Azote (N_2O). Une légère proportion d'Argon est aussi introduite dans le réacteur afin de stabiliser le plasma. Les conditions de dépôt sont présentées dans le Tableau 5.1. Le réacteur utilisé ici est une PECVD Corial D250.

Température (°C)	280
Pression (Torr)	1.2
Débit de SiH_4 (sccm)	14
Débit de N_2O (sccm)	1000
Débit de Ar (sccm)	100
Vitesse de dépôt (nm min^{-1})	140

TABLE 5.1. – Conditions de dépôt de SiO_2 par PECVD.

Résultat de l'étude

Peu de gravures ont été réalisées avec le XeF_2 à cause des difficultés à observer correctement les résultats. En effet, le fort espacement entre les ouvertures et leurs faibles dimensions ont rendu complexe le clivage des échantillons et donc leur analyse. De plus, la forte isotropie de cette gravure entraîne une fragilisation de l'échantillon augmentant les difficultés du clivage. Quelques résultats ont tout de même été observés.

Tout d'abord, sur une dizaine de gravures faisant varier le nombre de cycles tout en conservant une durée de cycle constante, une bonne répétabilité a été observée. Le taux d'anisotropie varie entre $A = 0.15$ et $A = 0.25$ avec une vitesse de gravure aux alentours de $2 \pm 0.1 \mu\text{m}/\text{min}$. Cette vitesse est loin de celle présentée par Chu [15]. Cette forte diminution est sûrement la conséquence d'échantillons présentant beaucoup de matière à graver. Typiquement une gravure au XeF_2 a la forme présentée dans la Figure 5.10.

Concernant le RIE lag, celui-ci a tout de même pu être quantifié. En comparant ces nouveaux résultats aux gravures par RIE, il est clairement visible que l'effet de la taille des ouvertures sur la profondeur de gravure a le même comportement dans les deux cas. Ceci appuie la conclusion faite précédemment sur ce sujet à savoir que le RIE lag dépend peu des paramètres ou du type de gravure. Ces résultats sont visibles Figure 5.11.

5.2.3. Gravure du Silicium par DRIE

Les gravures testées jusqu'à présent n'ont pas permis d'atteindre des vitesses de gravure très élevées avec un maximum de $2 \mu\text{m}/\text{min}$. Ceci est problématique pour la réalisation de capteurs profilés sur du Silicium de $200 \mu\text{m}$ d'épaisseur car l'utilisation de ces procédés engendrerait des gravures d'au minimum une centaine de minutes. Ceci pourrait compliquer le process car avec des temps de gravures aussi long, de nombreux problèmes peuvent apparaître comme le dépôt de polymère sur l'échantillon ou bien l'échauffement du réacteur de gravure pouvant endommager la machine. Ainsi dans le but d'obtenir des gravures plus rapides et plus profondes, il a été décidé d'étudier la gravure par Deep RIE qui, comme son nom l'indique, permet d'effectuer des gravures profondes du Silicium. Ne disposant pas de l'équipement pour réaliser ce procédé, l'étape de gravure a été effectuée au LAAS à Toulouse. De plus, l'expertise de ce laboratoire a permis d'obtenir des gravures répétables sans une nouvelle étude paramétrique.

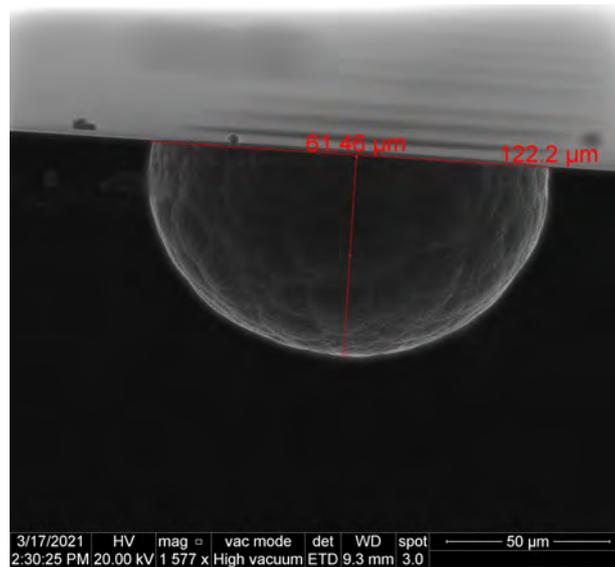


FIGURE 5.10. – Image MEB d’une gravure XeF_2 du Silicium pour une ouverture de 20 μm de diamètre.

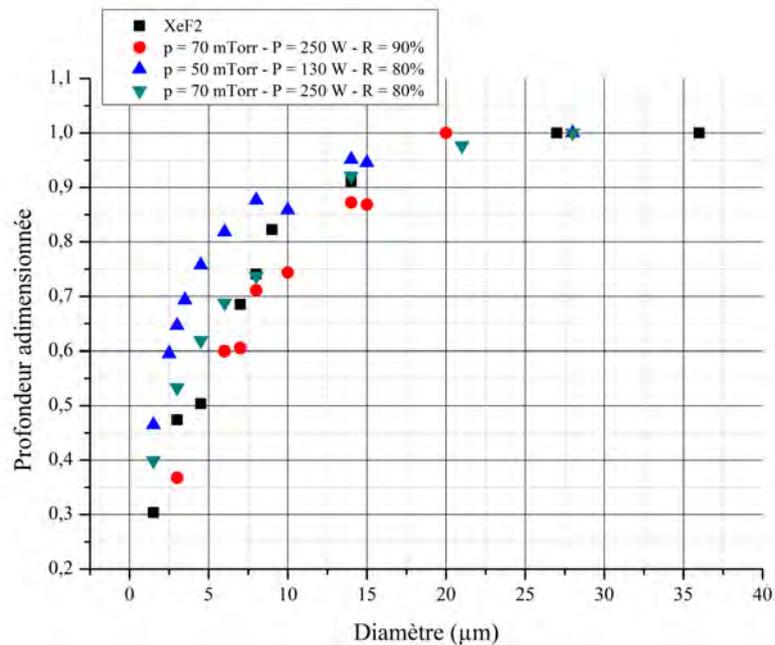


FIGURE 5.11. – Profondeur de gravure adimensionnée par la profondeur maximale en fonction du diamètre d’ouverture dans le masque pour une gravure XeF_2 et des gravures RIE avec différents paramètres.

Physique de gravure

La gravure par DRIE repose sur le même principe que la RIE classique : le Silicium est gravé avec du SF_6 . Cependant, elle utilise le procédé Bosch afin d'obtenir une gravure anisotrope et d'atteindre de fortes profondeurs. Ce procédé consiste à alterner entre un plasma de gravure puis un plasma de passivation protégeant les flancs de la tranchée de Silicium gravée. Ce procédé est résumé sur la Figure 5.12. Cette alternance de type de plasma fait apparaître une oscillation des flancs (ou *scalloping*), comme visible sur la Figure 5.13. Il peut être noté que cet artefact est négligeable pour le cas d'étude ici présent, mais peut être problématique pour certaines applications.

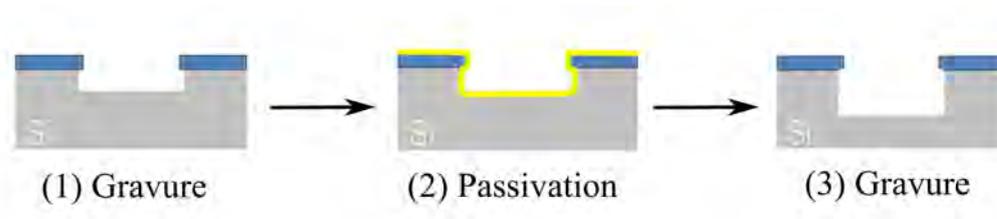


FIGURE 5.12. – Schéma d'une gravure du Silicium par procédé Bosch.

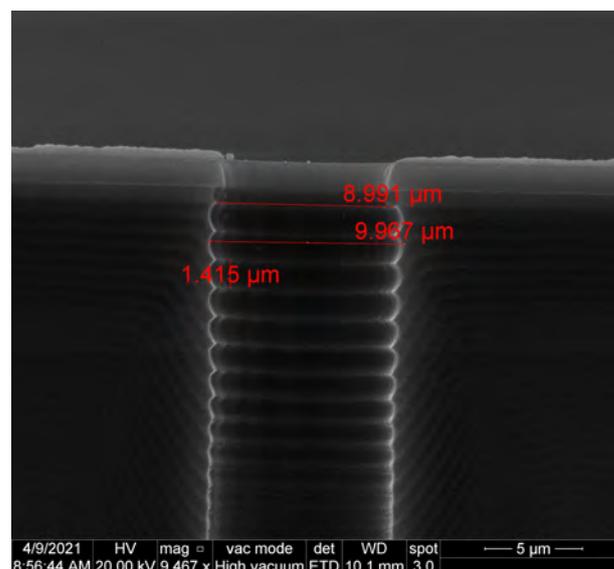


FIGURE 5.13. – Image MEB d'une gravure DRIE par procédé Bosch illustrant le *scalloping*.

Protocole d'étude

Les mêmes formes et dimensions d'ouvertures que pour les gravures RIE sont ici étudiées. Il a été demandé que la gravure DRIE soit le plus anisotrope possible avec une profondeur de 190 μm . Le choix de cette profondeur est justifié plus loin dans ce chapitre. La problématique majeure pour effectuer cette gravure est le fait qu'il n'est pas possible d'utiliser un masque métallique, ce dernier risquant de contaminer le réacteur. Un autre matériau que le Chrome masquant le Silicium a donc dû être utilisé. Le choix le plus simple est de se tourner une nouvelle fois vers le SiO_2 déposé par PECVD, celui-ci ayant une sélectivité d'environ 65 pour 1 par rapport au Silicium sur ce type de procédé. Toutefois, pour atteindre les profondeurs de gravures souhaitées, il est nécessaire de déposer une forte épaisseur de SiO_2 , en l'occurrence au moins 3 μm .

Cette épaisseur entraîne alors de nouvelles complications pour la réalisation des différentes ouvertures. En effet, la faible dimension des motifs oblige l'utilisation d'une résine de faible épaisseur

pour la lithographie. Cependant, cette résine ne permet pas de masquer le SiO_2 pendant toute sa gravure étant donné que celui-ci fait $3\ \mu\text{m}$ d'épaisseur. Pour pallier ce problème, il a été décidé d'utiliser du Chrome comme matériau de masque pour la gravure de l'Oxyde de Silicium, puis de l'enlever de l'échantillon une fois celle-ci réalisée. Ainsi le même procédé de lithographie que pour les échantillons de gravure RIE est utilisé. Une fois cette étape effectuée, il faut graver le SiO_2 par RIE et ce de façon anisotrope. Pour ce faire une recette spécifique de gravure a dû être développée dont les paramètres sont résumés dans le Tableau 5.2.

Pression (mTorr)	10
Puissance (W)	150
Débit de O_2 (sccm)	10
Débit de CHF_3 (sccm)	100
Débit de Ar (sccm)	5
Vitesse de gravure (nm min^{-1})	280

TABLE 5.2. – Paramètres de gravure RIE du SiO_2 pour obtenir une forme anisotrope.

Pour résumer, la préparation des échantillons avant une gravure par DRIE suit le protocole suivant :

- Dépôt de $3\ \mu\text{m}$ de SiO_2 puis de $100\ \text{nm}$ de Cr sur le Silicium qui sera gravé ;
- Lithographie et gravure du Cr pour obtenir les différentes ouvertures à étudier ;
- Gravure du SiO_2 et retrait de la couche de Cr restante par solution de *Chromium etchant*.

Entre chaque étape les échantillons sont soigneusement nettoyés à l'aide de solvant ou de solution de nettoyage comme celle de Piranha.

Résultat de l'étude

La gravure par DRIE a eu comme résultat l'obtention d'une gravure très anisotrope comme l'illustre la Figure 5.14 (a) et avec une forte cinétique, de $9\ \mu\text{m}/\text{min}$, comme cela était attendu. Elle a aussi permis de quantifier le RIE lag, comme cela peut être observé Figure 5.14 (b), ce qui était l'objectif premier de cette étude. Une nouvelle fois, la distribution des profondeurs de gravure en fonction des ouvertures dans le masque suit une tendance logarithmique avec globalement la même répartition que pour les autres procédés appuyant les premières conclusions effectuées. Ces résultats sont présentés Figure 5.15.

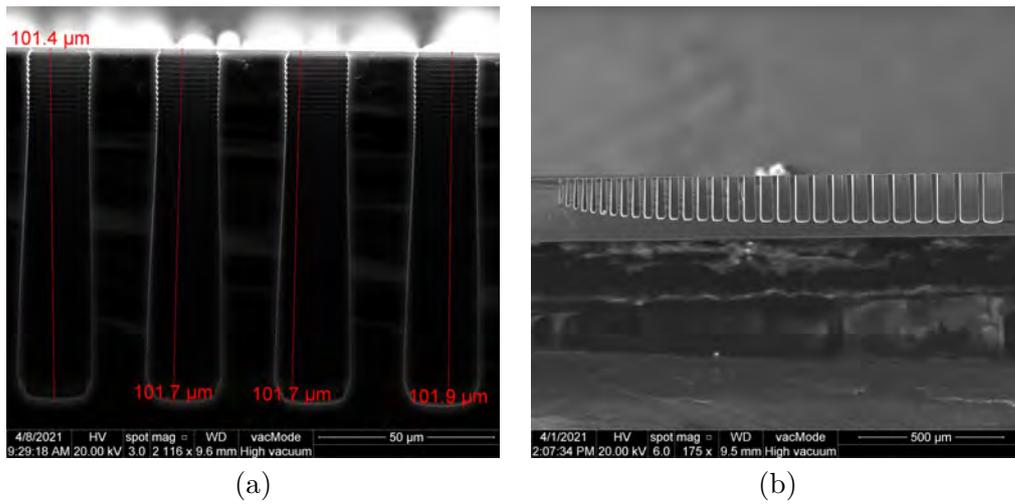


FIGURE 5.14. – Images MEB d’une gravure DRIE du Silicium : (a) pour une ouverture de 16 μm de diamètre, (b) illustrant le RIE lag pour des ouvertures rectangulaires allant de 2 μm à 60 μm de largeur d’ouverture.

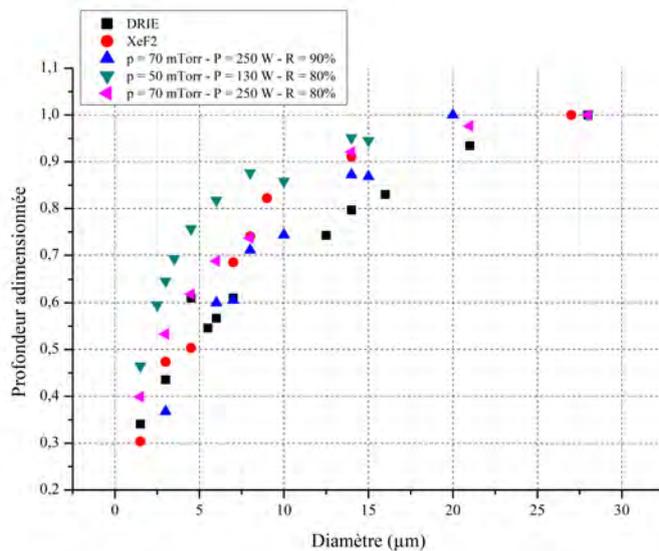


FIGURE 5.15. – Profondeur de gravure adimensionnée par la profondeur maximale en fonction du diamètre d’ouverture dans le masque pour une gravure DRIE, une gravure XeF_2 et des gravures RIE avec différents paramètres.

5.3. Procédé de fabrication adapté à la réalisation d'un capteur profilé

5.3.1. Choix du procédé

Les études menées sur les différents procédés de gravure ont permis d'avoir une vue d'ensemble des propriétés de chacune d'entre elle. Avec ces expérimentations, il est désormais possible de définir un procédé de fabrication pour réaliser les capteurs profilés. Les différentes étapes seront similaires à celles qui avaient été présentées sur la Figure 5.2, c'est à dire la réalisation de paliers de différentes profondeurs en se basant sur le phénomène de RIE lag puis la suppression du surplus de matière et le lissage de la surface arrière du capteur.

L'observation des caractéristiques de la gravure par RIE et par XeF_2 avait pour but de réaliser des capteurs profilés avec les moyens à disposition dans la salle blanche de l'Université de Montpellier. Cependant, les résultats ne sont pas suffisants pour atteindre les objectifs fixés. Concernant la RIE, malgré une recherche de paramètres de gravure optimaux, une vitesse maximale de seulement $1 \mu\text{m}/\text{min}$ a été obtenue et il n'a pas été possible d'obtenir des gravures totalement anisotropes. Le XeF_2 présente lui aussi des inconvénients à cause de la forme de la gravure même si celle-ci était connue avant les expérimentations. C'est surtout sa cinétique qui a été plus faible qu'attendue. Devant ces faibles vitesses et à cause de formes de gravure qui rendent la conception de masques complexe, il est préférable de se tourner vers la DRIE pour réaliser les cavités de différentes profondeurs. L'étude du RIE lag avec ce type de gravure a permis d'établir un lien entre la profondeur de gravure et le diamètre d'ouverture pour ensuite affiner le procédé afin d'obtenir les profondeurs de gravures souhaitées et d'ajuster le profil du capteur.

Pour supprimer le surplus de matière (les "piliers" formés après DRIE), la gravure par XeF_2 apparaît ici intéressante de par le fait qu'elle soit isotrope. Ainsi, un couplage de la DRIE et du XeF_2 est utilisé pour finaliser la fabrication des capteurs profilés. Le détail de ce nouveau procédé est donné dans le paragraphe suivant.

5.3.2. Procédé de fabrication des capteurs profilés

Les capteurs profilés suivent le même design que ceux réalisés et présentés dans le chapitre précédent. Ici, uniquement des sondes comportant un élément sensible de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$ ont été fabriquées. La réalisation de ces nouveaux capteurs a pour but de pouvoir comparer la qualité de mesure d'une sonde plus intrusive par rapport à une sonde dont le design apparaît comme plus aérodynamique. Deux types de capteurs profilés ont été fabriqués : un avec une pente d'environ 7° et un autre avec une pente de 15° .

Devant les résultats encourageants et la bonne robustesse du capteur développé par l'université de Princeton, il a aussi été décidé de réaliser un dispositif avec une géométrie similaire. Cela permettra d'avoir un autre capteur de comparaison ayant une autre géométrie déjà mise en œuvre dans la littérature, le NSTAP ayant déjà prouvé ses performances de mesure. Sur ce nouveau design les mêmes pentes de 7° et 15° sont réalisées. Les dimensions du masque du capteur sont présentées Figure 5.16.

Pour fabriquer ces sondes profilées, le substrat se doit d'être différent de celui habituellement utilisé notamment pour la réalisation du profil par DRIE sur la face arrière. Ainsi, le Nitrure de cette face est enlevé par gravure RIE puis une couche de SiO_2 de $3 \mu\text{m}$ d'épaisseur et 100 nm de Chrome sont déposés en suivant le process présenté dans la paragraphe 5.2.3. Le Silicium utilisé ici est toujours d'une épaisseur de $200 \mu\text{m}$ et il est gravé de $190 \mu\text{m}$ par DRIE. A cette étape du procédé, les capteurs ont typiquement la forme de l'échantillon visible Figure 5.17. Le reste de Silicium est ensuite gravé lors de l'exposition au XeF_2 . Afin que les "piliers" soit gravés à la même vitesse que le reste d'épaisseur de Silicium, les espacements entre les ouvertures dans le masque face arrière sont de $20 \mu\text{m}$ soit deux fois l'épaisseur de Silicium restante. Les tailles de

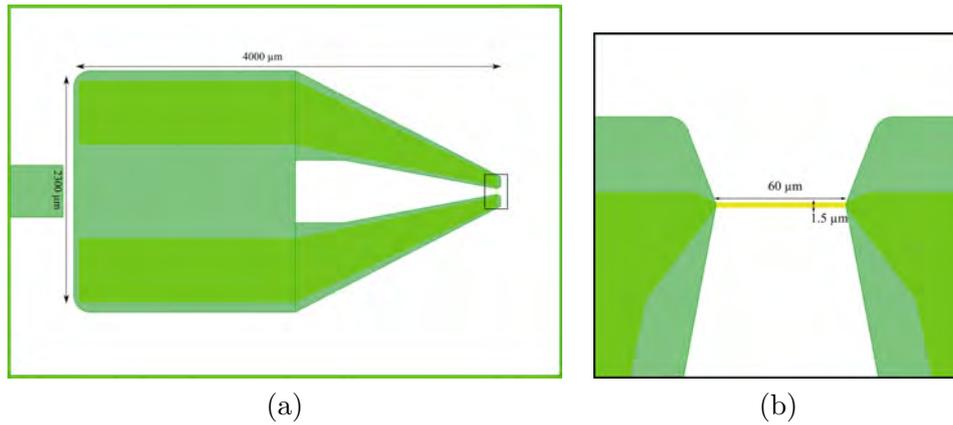


FIGURE 5.16. – (a) Superposition des masques de Platine et Nitrure pour le capteur profilé avec la géométrie du NSTAP, (b) zoom sur l'élément sensible.

ces ouvertures ont quant à elles été déterminées à l'aide des résultats de l'étude du RIE lag. Le procédé de fabrication complet des capteurs profilés est présenté et détaillé sur la Figure 5.18. Une fois ces étapes terminées, les échantillons sont plongés quelques secondes dans une solution d'acide Fluorhydrique (HF) à 10 % et rincés à l'eau déionisée afin de supprimer les polymères d'oxyde qui ont pu se former lors de la gravure au XeF₂.

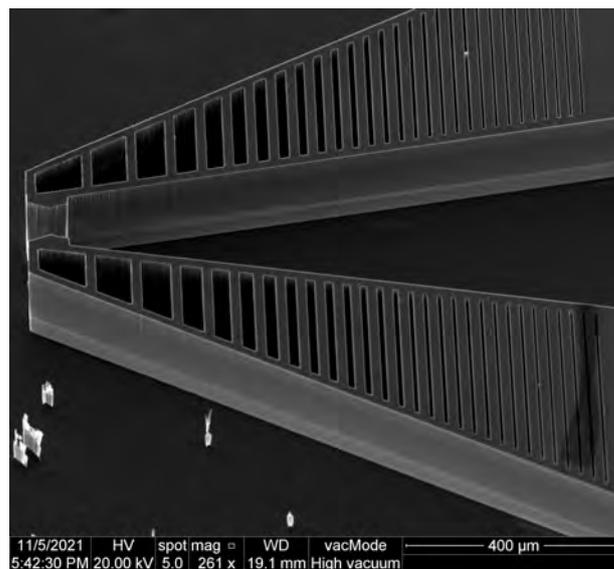


FIGURE 5.17. – Image MEB de la face arrière d'un échantillon de la géométrie du NSTAP pour une pente de 7 ° après la gravure DRIE.

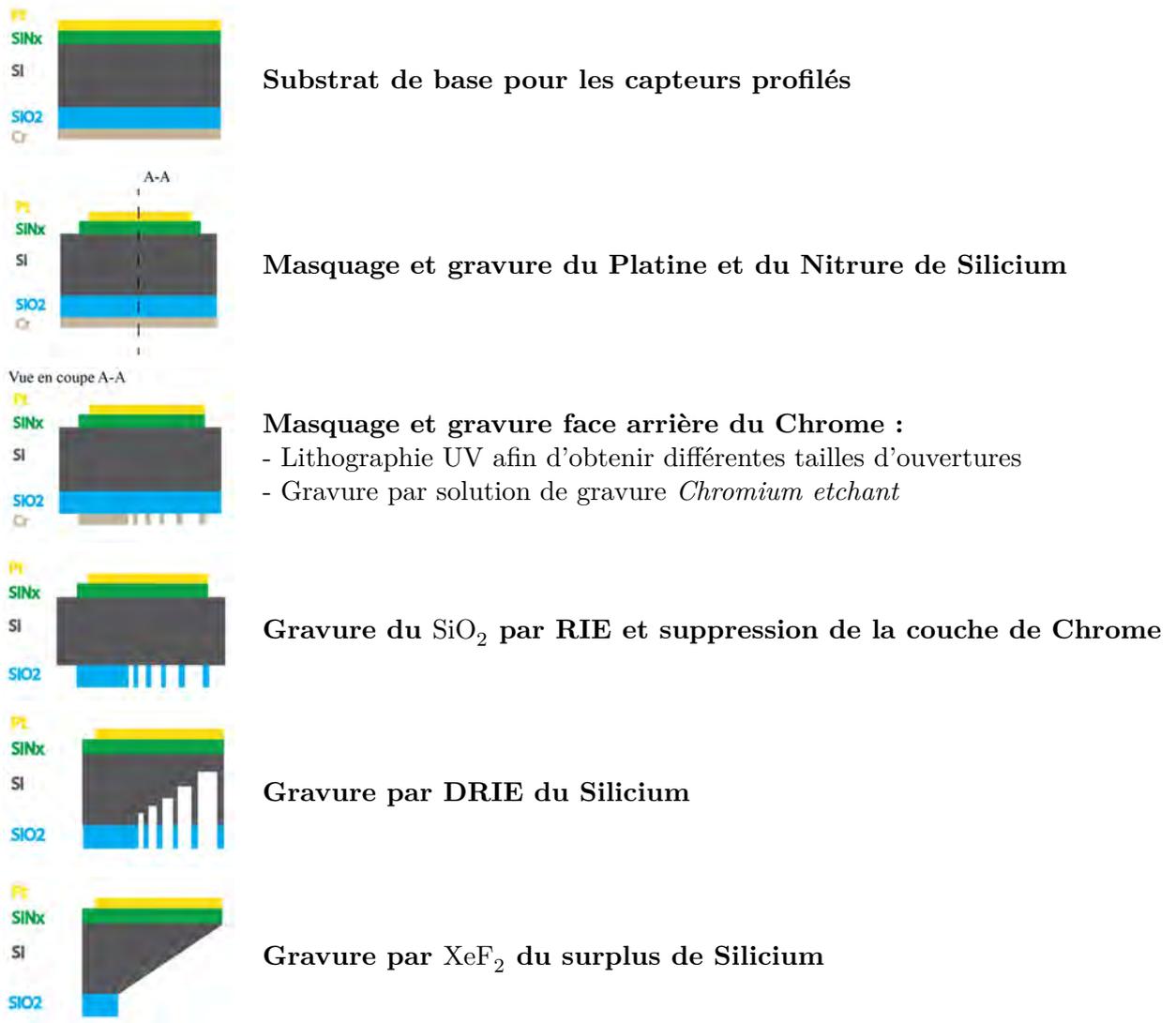


FIGURE 5.18. – Résumé des étapes de fabrication des micro-capteurs profilés.

5.3.3. Les capteurs profilés

Les dispositifs profilés réalisés sont présentés sur la Figure 5.19 pour la géométrie proche du capteur de l'université de Princeton, et sur la Figure 5.20 pour la géométrie des μ -anems. Les micro-sondes avec une pente de 7° présentent un aspect plus élancé et donc a priori moins intrusif d'un point de vue aérodynamique car le profil s'étend sur une plus longue distance. De plus, une "marche" plus importante est visible en fin de pente sur les capteurs de 15° , ce qui pourrait éventuellement être la source de perturbations dans la mesure à cause de possibles décollements instationnaires sur cette surface. Des mesures avec les sondes profilées à 7° seront donc privilégiées.

Il faut noter qu'à cause de la dernière gravure isotrope les éléments sensibles sont parfois trop "libérés". C'est à dire que ceux-ci ne sont pas suffisamment soutenus par du Silicium comme cela devrait être le cas. Ceci peut s'avérer préjudiciable pour la robustesse des capteurs. Une attention particulière sera donc portée à cela lors des expérimentations en écoulement. Ces observations montrent que le procédé de fabrication des capteurs profilés reste encore à optimiser.

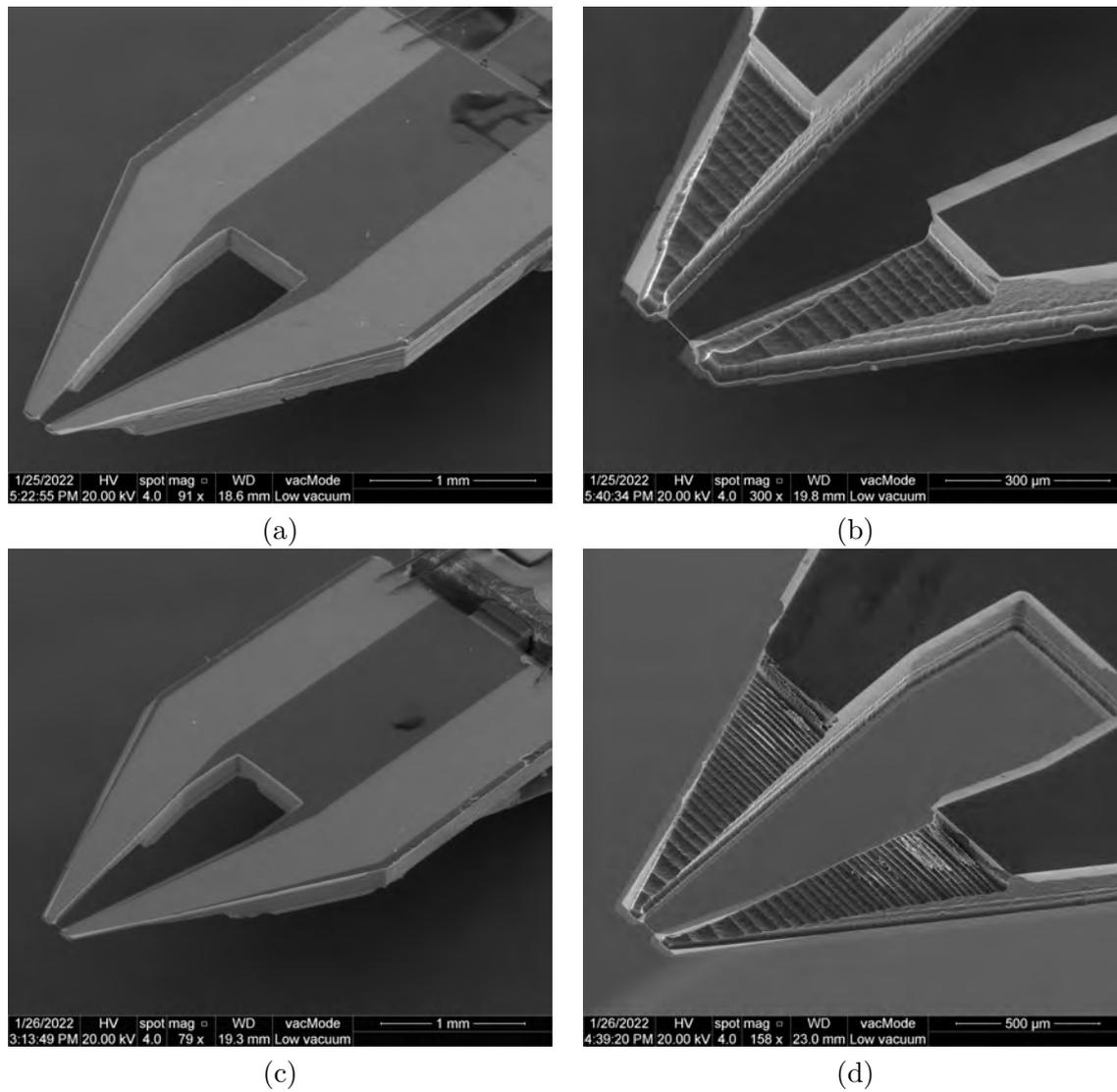


FIGURE 5.19. – Images MEB des micro-capteurs profilés de la géométrie du NSTAP. (a) Sonde avec une pente de 15° vue du dessus, (b) vue d'en dessous. (c) Sonde avec une pente de 7° vue du dessus, (d) vue d'en dessous.

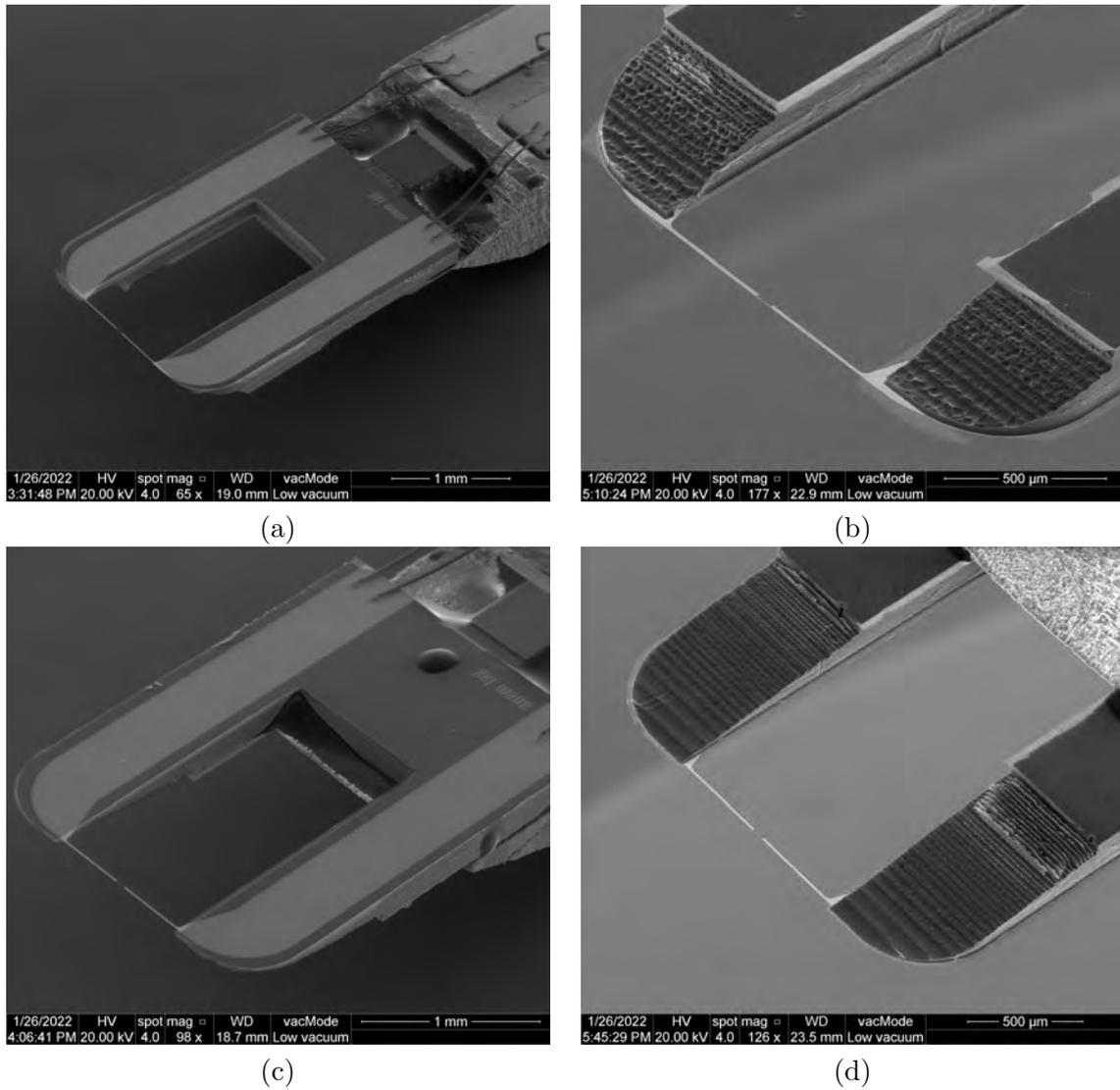


FIGURE 5.20. – Images MEB des micro-capteurs profilés de la géométrie des dispositifs présentés dans le Chap.4. (a) Sonde avec une pente de 15° vue du dessus, (b) vue d'en dessous. (c) Sonde avec une pente de 7° vue du dessus, (d) vue d'en dessous.

5.4. Bilan

Les travaux présentés dans ce chapitre ont permis d'expliquer le cheminement effectué pour obtenir le procédé de fabrication pour la conception de micro-capteurs profilés. En se basant sur une particularité de la gravure du Silicium, le RIE lag, il a été question d'étudier différents types de gravures pour atteindre cet objectif. Avec pour ambition de réaliser tout le procédé avec les équipements de la salle blanche de l'Université de Montpellier, une étude poussée de la gravure du Silicium par RIE a été effectuée. Malheureusement, les résultats obtenus n'ont pas été concluants et il a été préférable de se tourner vers la DRIE pour réaliser une gravure profonde et contrôlée de la face arrière des échantillons. Cette étude aura tout de même permis d'aboutir à une meilleure compréhension de la physique de gravure du Silicium et de développer des recettes de gravures applicables à de plus faibles épaisseurs de substrat. Les différentes expérimentations effectuées ont aussi montré que le RIE lag dépendait peu du type ou des paramètres de gravures utilisés mais presque uniquement de la taille des ouvertures dans le masque. Ce résultat est en relative contradiction avec la littérature mais doit être pris avec du recul étant donné que les mesures de profondeur réalisées ne sont pas effectuées de manière précise.

Le procédé de fabrication des sondes profilées comporte de nombreuses étapes supplémentaires en comparaison du process présenté dans le chapitre précédent, notamment à cause des nouvelles couches à déposer sur la face arrière des échantillons. Ceci le rend donc plus critique et plus chronophage. De plus, par manque de temps il n'a pas été possible d'optimiser le process au maximum. Il sera nécessaire d'effectuer des améliorations sur ce procédé si les performances des capteurs profilés se trouvent être supérieures à celle des autres dispositifs plus simples.

De nombreux micro-capteurs ont été fabriqués avec différentes caractéristiques. Il est désormais nécessaire de pouvoir quantifier leurs performances sur des mesures de vitesse et de température en écoulement turbulent. Avant de réaliser ces mesures, il faut déterminer les caractéristiques thermo-électriques de ces dispositifs puis les connecter à des électroniques de mesure afin de pouvoir les utiliser dans des conditions maîtrisées et optimales. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

Assemblage et moyens technologiques de caractérisation des micro-capteurs

Afin de déterminer les performances des micro-sondes réalisées, il est nécessaire de les connecter à des dispositifs de mesure. Pour ce faire, le premier objectif est de réaliser ou d'adapter un support maintenant les capteurs lors de mesures en écoulement et permettant une connexion aux systèmes de conditionnement. Une fois cette étape réalisée, il est alors possible de déterminer les caractéristiques thermo-électriques des sondes. Une électronique de mesure pourra ainsi être paramétrée grâce à ces premiers résultats.

Ce chapitre vise à présenter dans un premier temps le développement de supports adaptés aux sondes à un fil et aux sondes à deux fils pour que celles-ci soient utilisées aisément en soufflerie. Dans un second temps, le dispositif de caractérisation des paramètres thermorésistifs des capteurs sera présenté. Les données obtenues à partir de ces premières expérimentations seront ensuite discutées. Pour finir, il sera question de s'intéresser aux électroniques qui seront utilisées respectivement pour les mesures de vitesse et de température d'écoulement. Ceci permettra aussi d'observer les réponses fréquentielles des différents dispositifs développés.

Sommaire

6.1. Montage des micro-capteurs	90
6.1.1. Collage des capteurs sur un support fil-chaud	90
6.1.2. Développement d'un support PCB adapté aux équipements de soufflerie	90
6.2. Caractérisation des paramètres thermorésistifs	91
6.3. Électronique de mesure	93
6.3.1. Conditionnement électronique pour les mesures de température	93
6.3.2. Conditionnement électronique par CTA pour les mesures de vitesse d'écoulement	94
6.4. Bilan	97

6.1. Montage des micro-capteurs

L'objectif premier est la réalisation d'un support pour les micro-capteurs afin de les rendre facilement manipulables et utilisables en soufflerie. Il faut donc que ces supports se branchent aux porte-sondes classiquement utilisées. Dans le cas présent, les souffleries dans lesquelles sont effectuées les mesures sont toutes équipées par des dispositifs de la société Dantec, que ce soit les porte-sondes ou bien l'électronique associée. Ainsi pour éviter le développement d'équipements spécifiques pour les micro-capteurs, il a été choisi d'adapter les supports à ce matériel déjà présent. Plusieurs solutions sont alors possibles.

6.1.1. Collage des capteurs sur un support fil-chaud

La première option qui a été étudiée est d'utiliser les supports des fils chauds habituellement employés pour des mesures de vitesse et de coller les micro-sondes sur ceux-ci au moyen d'une colle conductrice. Ceci supprime ainsi tout problème d'adaptation du branchement aux porte-sondes Dantec. Cette technique est celle qui a été mise en œuvre par l'université de Princeton sur leur NSTAP afin de réaliser des mesures [82] et qui est visible Figure 6.1. Ici les supports utilisés sont d'anciens supports fil chaud Dantec pour lesquels le fil était cassé ou détérioré.

Dans l'objectif de suivre cette approche, quelques essais de mise en œuvre avec des colles conductrices époxy ont été effectués. Malheureusement, ils n'ont pas été concluants. En effet, le collage s'avère assez complexe d'un point de vue du positionnement des broches du support vis à vis du micro-capteur, celui-ci s'effectuant manuellement. Pour faciliter cette mise en place il serait par exemple plus judicieux d'utiliser une machine de positionnement de précision. Ne disposant pas de tels équipements, il a été décidé de se tourner vers une autre approche pour le support des sondes.

6.1.2. Développement d'un support PCB adapté aux équipements de soufflerie

Afin de contourner le problème du collage, il a été décidé de réaliser des supports en PCB comportant un circuit imprimé et de dimensions similaires à celles d'un support fil chaud afin de pouvoir les enficher dans les portes-sondes classiquement utilisés. Un support PCB spécifique pour les sondes à un élément sensible et un autre pour celles à deux fils ont été fabriqués. Ces supports

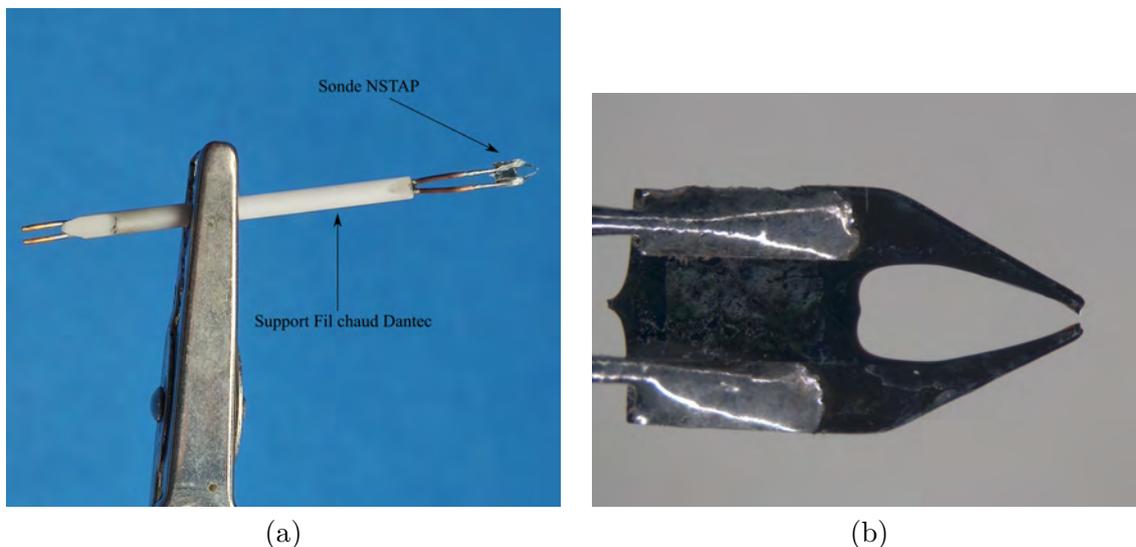


FIGURE 6.1. – (a) Photo du NSTAP et du support sur lequel il est collé, (b) zoom sur la sonde.

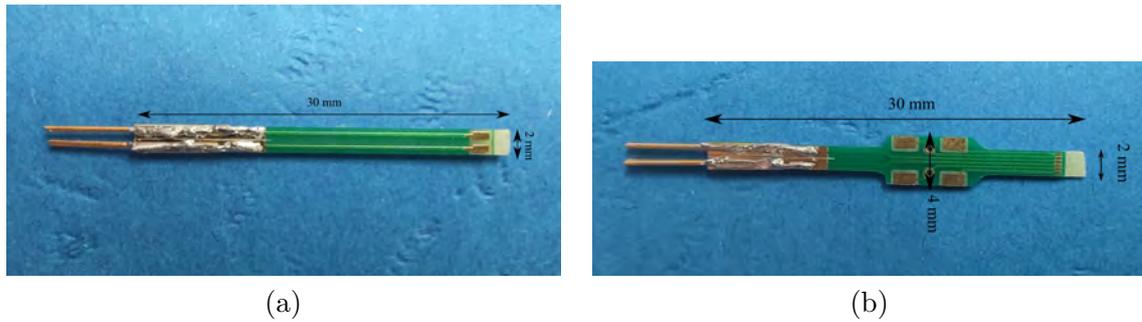


FIGURE 6.2. – Photos des supports PCB pour des sondes (a) à un élément sensible et (b) à deux éléments sensibles. Les supports ont une épaisseur de 0.9 mm.

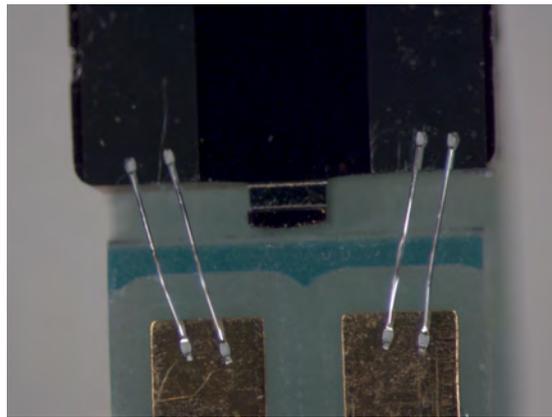


FIGURE 6.3. – Image de micro-soudures pour une sonde à un élément sensible.

et leurs dimensions sont présentés dans la Figure 6.2. Les capteurs sont posés et collés au bout de ces supports qui comportent un méplat dans cette zone. Le collage est effectué à l'aide d'une colle UV pour garantir la bonne tenue de celle-ci lors de mesures en écoulement aérodynamique. En l'occurrence, la limite de température de l'ensemble support/sonde est plutôt définie par les caractéristiques du PCB. Dans le cas présent, il a une température maximum d'utilisation de 130 °C. Une fois les capteurs collés sur le support, ils sont connectés au circuit imprimé du PCB par des micro-soudures Aluminium (*Wire bonding*), comme cela est visible Figure 6.3. Les micro-soudures sont ici doublées afin de garantir un contact électrique permanent lors des mesures. A l'autre extrémité des supports sont soudées deux broches (ou quatre pour les supports des sondes à deux fils) qui permettent le branchement dans les porte-sondes. En pratique, ce branchement peut s'avérer délicat car les supports ne sont pas totalement identiques aux supports Dantec et que les broches sont aussi parfois fragiles. Toutefois, devant la relative facilité du montage des capteurs sur ces supports, c'est la solution la plus efficace et rapide qui a été trouvée et qui sera utilisée lors de ces travaux.

Désormais les micro-capteurs peuvent être connectés aisément à des instruments de mesures afin de déterminer leurs caractéristiques et leurs performances.

6.2. Caractérisation des paramètres thermorésistifs

Pour rappel, les mesures fil chaud ou fil froid se basent sur la connaissance de la relation du premier ordre liant la résistance du capteur à sa température : $R_w(T_w) = R_0(1 + \chi T_w)$, où R_0 est la résistance du fil à 0 °C et χ le coefficient de température de la résistance. Afin de déterminer la résistance de surchauffe à utiliser en mode fil chaud ou bien de relier celle-ci à la température de

l'écoulement en mode fil froid, il est nécessaire de déterminer les paramètres thermo-électriques R_0 et χ .

Dans l'objectif de connaître ces paramètres, les équipements de caractérisation de la Figure 6.4 sont utilisés. Ils sont constitués d'une étuve et de plusieurs instruments de mesure : des sources de courant, des voltmètres et des multiplexeurs. Ces appareils sont pilotés par un programme Labview qui synchronise l'ensemble. Une fois le ou les capteurs branchés aux câbles, ils sont introduits dans l'étuve puis plusieurs échelons de température programmés par l'utilisateur sont effectués. Dans le cas présent, ils correspondent à quatre paliers de température compris entre 25 °C et 65 °C. A chaque palier de température, un courant de 100 μ A est injecté dans les résistances de la cellule. Ce courant et la mesure de tension aux bornes des capteurs permettent de mesurer la valeur de la résistance $R_w(T)$ et de la relier à la température T . Une régression linéaire à partir des valeurs de $R_w(T)$ permet de déterminer les valeurs de χ et R_0 . Les moyens techniques mis en œuvre ici pour déterminer ces paramètres impliquent que l'entièreté du micro-capteur soit placée dans l'étuve. Ainsi, la mesure de $R_w(T)$ ne donne pas uniquement la valeur de la résistance de l'élément sensible mais celle du pont suspendu et de cet élément sensible combinés. Il pourrait donc être pertinent de mettre en place une autre technique de caractérisation des sondes afin de connaître uniquement les paramètres intrinsèques à l'élément sensible. Cette approche n'a pas pu être effectuée mais sera envisagée dans de futurs travaux.



FIGURE 6.4. – Outils de caractérisation des paramètres thermo-électriques R_0 et χ .

Les valeurs de R_0 sont dépendantes des dimensions des sondes. Ainsi, les capteurs ayant des longueurs d'élément sensible différentes verront leur R_0 varier. Typiquement, les sondes de longueur $\ell = 40 \mu\text{m}$ ont des valeurs de R_0 autour des 100 Ω , valeurs qui augmentent jusqu'à environ 150 Ω pour celles de longueur $\ell = 200 \mu\text{m}$. La quantité χ dépend quant à elle du matériau du fil et est donc la même pour chaque sonde. En réalité, cette valeur peut légèrement différer (quelques

pour cents) d'un dispositif à l'autre étant donné que le dépôt de Platine n'est jamais exactement identique entre chaque substrat. Ici, il est intéressant de noter que les valeurs du coefficient de température mesurées sur les micro-capteurs fabriqués sont de l'ordre de $3.6 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Ces valeurs sont proches de celles du platine massif ($3.8 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) et constituent une forte amélioration vis-à-vis des micro-sondes présentes dans la littérature. En effet, les dispositifs de l'Université de Princeton ou ceux de Twente ont atteint des valeurs de χ d'au maximum $2 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [82] [49]. Les sondes réalisées au cours de ces travaux de thèse ont donc une meilleure sensibilité en température.

Les paramètres thermo-électriques présentés ci-dessus sont aussi très stables dans le temps. Aucune variation de ceux-ci n'a été observée et ce même après plusieurs heures d'utilisation. Ceci démontre la qualité du Platine utilisé ainsi que celle de son dépôt. De même, il n'est pas nécessaire de faire vieillir les sondes avant utilisation à l'inverse des NSTAP qui nécessitent de nombreuses heures de fonctionnement avant que leurs propriétés thermo-électriques soient stables.

Afin de déterminer le point de fonctionnement des micro-capteurs, il est nécessaire d'observer l'évolution de leur température en fonction du courant qui leur est injecté. Cette opération est réalisée à l'aide de sourcemeter Keithley injectant un courant fixe et mesurant la tension aux bornes des sondes pour avoir accès à leur résistance. Il est ensuite possible de relier cette résistance à la température à l'aide des paramètres R_0 et χ préalablement déterminés. Les résultats de cette caractérisation de résistance, présentés Figure 6.5, mettent en avant que, pour atteindre une température de fonctionnement de l'ordre de $200 \text{ }^\circ\text{C}$ et pour ne pas détériorer les sondes, il est nécessaire d'injecter un courant de faible intensité (de l'ordre de 5 à 6 mA) lors des mesures en écoulement.

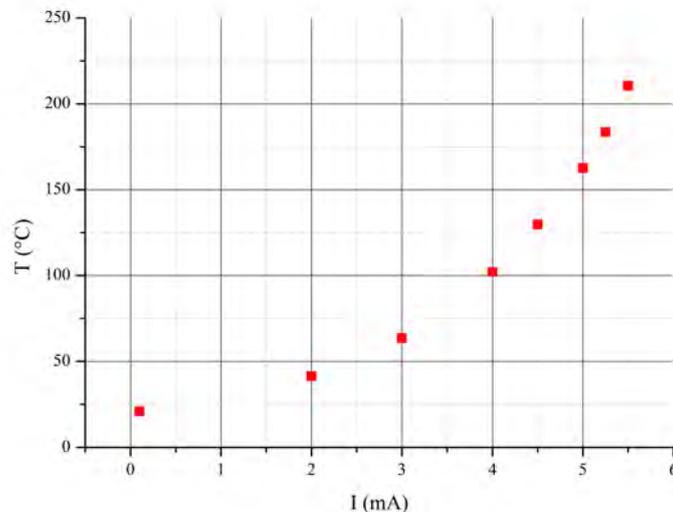


FIGURE 6.5. – Température d'un μ -anem de longueur $\ell = 60 \text{ }\mu\text{m}$ en fonction du courant injecté.

6.3. Électronique de mesure

6.3.1. Conditionnement électronique pour les mesures de température

La mesure de température par fil froid repose sur le principe d'injecter un courant de faible intensité dans le fil afin que celui-ci ne s'échauffe pas et soit uniquement sensible à la température de l'écoulement qui est alors obtenue en réalisant une mesure de tension. Pour ce faire, différents

instruments de mesure peuvent être mis en œuvre. Tout d’abord, il a été choisi d’utiliser un module de mesure Dantec StreamLine-Temperature 90C20 dont le principe de fonctionnement électrique est présenté Figure 6.6 et qui est visible sur la photographie donnée par la Figure 6.8. Ce module présente l’intérêt d’injecter un faible courant (0.1 mA) et d’amplifier et/ou filtrer directement le signal afin d’avoir accès aux variations de température grâce à une mesure de tension. Cependant, l’utilisation de ce module induit l’ajout de résistances de contact supplémentaires nécessitant une recalibration de la chaîne de mesure pour avoir accès à la relation entre tension mesurée et température de la sonde, *i.e.* de l’écoulement. Il est tout de même possible d’utiliser le module 90C20 sans recalibration pour effectuer des mesures de réponses fréquentielle des micro-capteurs vis à vis d’une variation de température.

Cependant pour s’affranchir de la problématique de recalibration et avoir un accès direct à la température, il est aussi possible d’utiliser un sourcemeter Keithley comme pour la caractérisation des paramètres thermo-électrique présentée paragraphe 6.2. Ainsi avec les mesures et la relation déterminée précédemment, la température de l’écoulement peut être directement mesurée.

Les deux approches pourront être utilisées en fonction des mesures qui seront réalisées. Ces expérimentations et leurs résultats sont présentés au Chap.8.

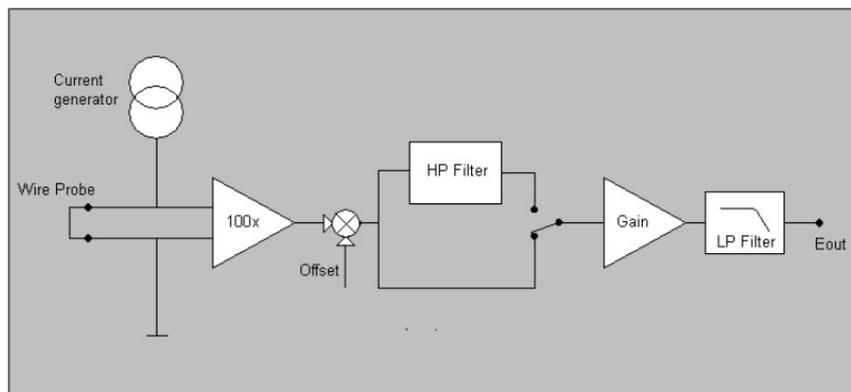


FIGURE 6.6. – Schéma électrique du module Dantec StreamLine-Temperature 90C20.

6.3.2. Conditionnement électronique par CTA pour les mesures de vitesse d’écoulement

L’électronique CTA

Comme énoncé dans le Chap. 3, pour réaliser des mesures de vitesse par fil chaud, il a été décidé d’utiliser un conditionnement qui conserve le capteur à température constante (CTA) permettant ainsi d’avoir une haute réponse fréquentielle. Ici le module CTA utilisé est un Dantec StreamLine 90C10 qui est classiquement employé pour des mesures fil chaud avec des sondes commerciales au sein de l’ONERA. Une photo de ce module est visible Figure 6.8. Pour rappel, le schéma de principe du CTA est a nouveau présenté Figure 6.7. Du fait que cette électronique soit dimensionnée pour l’utilisation de fils chauds classiques, dont la résistance est de l’ordre de 3 à 5 Ω , il est nécessaire de modifier ses paramètres de fonctionnement pour que celle-ci s’adapte à la résistance plus élevée des micro-capteurs. Classiquement, le pont de Wheastone du CTA est utilisé avec un rapport 1 :20 pour les fils chauds Dantec, c’est à dire tel que $R_2/R_1 = 20$. Afin que le courant injecté dans les micro-sondes ne soit pas trop élevé et n’entraîne pas de détérioration ou de casse de l’élément sensible, il est nécessaire de changer de mode d’opération et d’utiliser le CTA en mode 1 :1.

Le choix de la température du fonctionnement du fil se fait à l’aide de la résistance variable R_3 . Une nouvelle fois, le CTA tel qu’il est ne permet pas d’atteindre des valeurs de résistances assez

élevées pour les dispositifs. Il faut alors utiliser une résistance externe qui est connecté au CTA par câble BNC pour ajuster la température de l'élément sensible. Cette résistance est choisie de telle manière que $R_3 = R_w(T_{fonctionnement})$, avec $T_{fonctionnement} \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est aussi primordial de noter que les capteurs ainsi que la résistance de conditionnement sont reliés au CTA par câbles BNC possédant une résistance et inductance propres. Afin d'assurer la stabilité de l'électronique, il est donc obligatoire que ces deux câbles soient identiques.

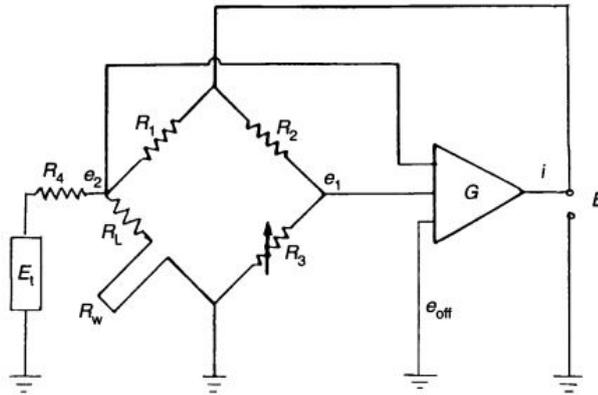


FIGURE 6.7. – Schéma de principe d'un CTA comprenant un pont de Wheatstone et une boucle de rétroaction [10].



FIGURE 6.8. – Modules électroniques utilisés pour les mesures de vitesse et de température.

Réponse fréquentielle

Pour effectuer une mesure de vitesse précise, il est nécessaire de régler le CTA à l'aide du *Square wave test* qui a été présenté dans le Chap.3. Ceci permet aussi d'avoir accès à une première évaluation de la réponse fréquentielle globale de la sonde et de son électronique. Dantec fournit un logiciel associé au module StreamLine qui permet d'effectuer ce *Square wave test* en réglant les paramètres de filtre et de gain de l'amplificateur du CTA. Afin de réaliser cette expérimentation, les capteurs sont placés dans un écoulement de vitesse $U = 25 \text{ m s}^{-1}$. Plus de détails sur le choix de cette vitesse seront fournis dans le chapitre suivant. Les résultats de cette mesure sont présentés Figure 6.9. Ici la réponse temporelle est acquise à l'aide d'un oscilloscope et ensuite approximée à l'aide d'un modèle du second ordre afin de déterminer sa fréquence de coupure f_c , son coefficient d'amortissement ξ ainsi que son diagramme de Bode. Les paramètres obtenus à l'aide du *Square wave test* pour les μ -anems de différentes longueurs d'élément sensible sont donnés dans le Tableau

6.1. Les résultats de la sonde de longueur $\ell = 40 \mu\text{m}$ ne sont ici pas présentés. En effet, ce capteur a montré un mauvais comportement lors des mesures. Il est probable que cela résulte d'une trop forte élévation locale de température entraînant la casse de l'élément sensible ou d'une forte instabilité de l'électronique. Une étude plus détaillée sur cette sonde de $\ell = 40 \mu\text{m}$ sera présentée dans le chapitre suivant. L'Université de Princeton a mis à disposition une de leurs sondes NSTAP afin d'effectuer des mesures de comparaison avec les capteurs développés lors de ces travaux de thèse et la réponse de cette sonde, évaluée dans les mêmes conditions, est incluse dans les résultats.

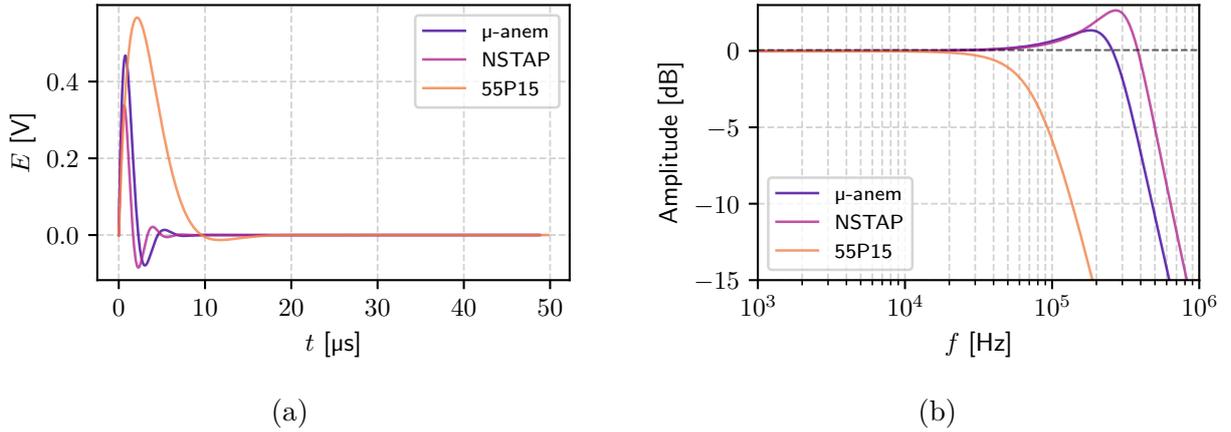


FIGURE 6.9. – (a) Réponse temporelle et (b) fréquentielle à un *Square wave test* d'un μ -anem de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$, d'un fil chaud Dantec 55P15 et du NSTAP.

Sonde	ℓ (μm)	f_c (kHz)	ξ
μ -anem	60	320	0.513
μ -anem	80	238	0.4989
μ -anem	100	271	0.470
μ -anem	150	269	0.528
μ -anem	200	292	0.482
NSTAP	60	399	0.476
55P15	1250	74	0.768

TABLE 6.1. – Caractéristiques de réponse fréquentielle de différentes sondes.

Les différents résultats mettent en avant une nette augmentation de la fréquence de coupure des μ -anems par rapport à une sonde fil chaud classique. Ceci est la conséquence des faibles dimensions des capteurs. De manière identique, le NSTAP a aussi une meilleure fréquence de coupure étant donné que celui-ci a une plus faible épaisseur et largeur d'élément sensible (soit $e = 0.1 \mu\text{m}$ et $w = 1 \mu\text{m}$). Il est aussi visible qu'aucune tendance sur les variations de la fréquence de coupure des micro-capteurs en fonction de leur longueur ne se dessine clairement. Ceci peut se justifier par le fait que l'électronique et le logiciel Dantec ne permettent pas de régler précisément la réponse du capteur. Dans tous les cas, les réponses fréquentielles des micro-sondes sont suffisamment élevées pour détecter tout le contenu spectral des écoulements turbulents subsoniques étudiés dans ces travaux de thèse et classiquement rencontrés en laboratoire. La dernière information fournie par le *Square wave test* est le régime d'amortissement dans lequel seront effectuées les mesures de vitesse. En l'occurrence, les μ -anems, tout comme le NSTAP, se trouvent en régime sous-amorti.

Il est important de garder ceci à l'esprit car, comme cela a été énoncé dans le paragraphe 3.2.3 du Chap. 3, l'amortissement peut avoir un rôle à jouer sur la qualité de la mesure. En effet, en cas de filtrage dû aux effets de conduction dans les broches, la valeur de l'intensité turbulente détectée par les sondes fil chaud peut se trouver artificiellement augmentée si le système est sous-amorti [65].

6.4. Bilan

Les supports PCB conçus ont permis de connecter facilement les micro-capteurs fabriqués à différents appareils de mesure et de déterminer leurs paramètres de fonctionnement. Ainsi, la caractérisation des paramètres thermo-électriques a mis en avant l'amélioration de la sensibilité des μ -anems par rapport aux sondes de la littérature. Surtout, ces paramètres sont stables dans le temps, permettant l'utilisation des micro-capteurs de nombreuses fois sans nécessité de recalibration.

La création des supports PCB a aussi eu l'intérêt de permettre l'utilisation de l'électronique de mesure commerciale classiquement utilisée pour des mesures fil chaud, permettant ainsi des premières comparaisons à des sondes classiques et évitant le développement d'une électronique spécifique aux micro-capteurs. Une très nette amélioration en termes de réponse fréquentielle des μ -anems vis-à-vis d'un fil chaud Dantec a ainsi pu être mise en évidence. Les différents *Square wave test* réalisés ont aussi mis en avant que les mesures de vitesse seront effectuées en régime sous-amorti.

Désormais il est possible de déterminer les performances des micro-capteurs développés pour la mesure des fluctuations de vitesse et de température dans des écoulements présentant des petites échelles de turbulence. Ceci fait l'objet de la partie suivante.

Troisième partie

Étude expérimentale de la capacité des micro-capteurs à détecter les petites échelles de turbulence

Détermination de la capacité des micro-capteurs à détecter les fluctuations de vitesse dans un écoulement turbulent

Afin d'évaluer les performances des micro-capteurs développés pour la mesure de fluctuations turbulentes à petites échelles, de nombreuses mesures de vitesse en écoulement ont été réalisées. Ces expérimentations ont été effectuées dans une couche limite turbulente (CLT) se développant sur plaque plane. L'objectif de ces mesures a été de déterminer si les nouvelles sondes permettent d'améliorer l'estimation des profils de variance de vitesse dans une CLT en comparaison de mesures obtenues avec un fil chaud commercial. Cette campagne expérimentale doit également permettre de définir lequel des différents designs est le mieux adapté aux mesures de vitesses ainsi que d'étudier l'impact de différent rapport ℓ/d^* sur la qualité de la mesure. Tout ceci a aussi permis d'identifier les conditions d'utilisation des sondes (angle de mesure, vitesse maximale, ...).

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation du protocole expérimental mis en place lors de ces travaux et présentera la soufflerie utilisée ainsi que les différents moyens d'acquisition. Un intérêt particulier est porté au protocole de calibration des différents dispositifs mais également à l'évaluation de la qualité de la mesure effectuée, aux caractéristiques de la CLT étudiée et à l'estimation des incertitudes de mesure. Dans un second temps, une analyse des statistiques de vitesse et du contenu spectral mesurés lors de sondages de CLT sera menée. Ces résultats seront comparés à ceux obtenus au moyen d'une sonde fil chaud classique Dantec 55P15 et d'un NSTAP fourni par l'université de Princeton. La troisième partie portera quant à elle sur une étude approfondie de la sensibilité de la mesure à l'inclinaison des micro-capteurs par rapport à l'écoulement en soufflerie. L'effet d'une augmentation du rapport ℓ/d^* sera ensuite étudié dans une quatrième partie en réalisant de nouveaux sondages au moyen des sondes de différentes longueurs d'élément sensible fabriquées. Cette partie s'intéressera ainsi aux effets de filtrage dus aux pertes par conduction dans les micro-capteurs. Une cinquième partie se focalisera ensuite sur la comparaison des micro-sondes de géométries différentes (profilées ou non) afin de valider ou d'invalider les différents designs proposés. Pour finir, une dernière partie relativement succincte présentera les quelques expérimentations supplémentaires qui ont pu être réalisées au cours de ces travaux de thèse.

Pour rappel, les différents micro-capteurs utilisés dans ce chapitre ont été présentés dans les Chap.4 et Chap.5 de ce manuscrit.

Sommaire

7.1. Protocole expérimental	103
7.1.1. Soufflerie d'essai et moyens métrologiques	103
7.1.2. Protocole de mesure	105
7.1.3. Évaluation des caractéristiques de la couche limite turbulente	109

7.1.4. Corrections des signaux	109
7.1.5. Incertitudes de mesure	110
7.2. Sondage de couche limite avec différentes sondes pour l'évaluation des capacités des micro-capteurs	111
7.2.1. Sensibilité aux angles de mesure	111
7.2.2. Sondes et CLT étudiées	112
7.2.3. Étude de la mesure de vitesse moyenne	113
7.2.4. Étude de la mesure de fluctuations de vitesse	113
7.3. Influence de l'angle de mesure sur la détection des fluctuations de vitesses	116
7.4. Étude du rapport ℓ/d^* et des effets de conductions	118
7.5. Observation de l'influence de la forme des micro-capteurs sur la mesure	120
7.5.1. Sensibilité aux angles de mesure	120
7.5.2. Profils des vitesses dans une CLT	120
7.6. Expérimentations complémentaires	122
7.7. Bilan	123

7.1. Protocole expérimental

7.1.1. Soufflerie d'essai et moyens métrologiques

Présentation de la soufflerie

La soufflerie utilisée lors de ces travaux de thèse est la soufflerie S118-2 du département DMPE de l'ONERA qui est présentée Figure 7.1. C'est une soufflerie de recherche de type Eiffel fonctionnant par aspiration, en circuit ouvert et à veine fermée. Ceci induit que les conditions de fonctionnement sont les conditions atmosphériques ambiantes, *i.e.* la température et la pression ambiante.

En suivant le sens de l'écoulement, cette installation est premièrement composée d'une chambre de tranquillisation avec une section d'entrée de $1.4 \times 1.4 \text{ m}^2$ et de 1.06 m de long. Celle-ci comporte un filtre à particules afin de limiter au maximum l'aspiration d'impuretés pouvant perturber l'écoulement mais surtout endommager les micro-capteurs. Au sein de la chambre se trouve aussi des panneaux en "nids d'abeille" permettant d'homogénéiser progressivement la taille des structures turbulentes en amont de la veine. L'écoulement traverse ensuite un convergent, de rapport de contraction 16, et est donc accéléré avant de rentrer dans la veine d'essai. Cette dernière est d'une longueur de 1.8 m pour une largeur de 0.4 m et une hauteur de 0.3 m dans laquelle est placée une plaque plane faisant toute la longueur de la veine sur laquelle se développe une couche limite. Afin d'assurer un déclenchement maîtrisé de cette couche limite vers un état turbulent, un scotch zigzag d'un millimètre d'épaisseur est placé sur le bord d'attaque de la plaque plane. Les mesures sont effectuées sur la partie supérieure de la plaque. Afin d'assurer un gradient de pression quasi-nul dans la direction de l'écoulement, la paroi supérieure de la veine est inclinée d'un angle d'environ 1° , permettant de compenser le développement de la couche limite turbulente sur la plaque plane et maintenir une vitesse extérieure à celle-ci constante. La veine d'essai comporte aussi un accès optique qui sera utile pour connaître la position des sondes. Pour finir, l'écoulement rentre dans un divergent de rapport 1.5 connecté à un ventilateur. C'est grâce à ce ventilateur que l'écoulement est généré dans la soufflerie qui, par dépression, aspire l'air. Il



FIGURE 7.1. – Soufflerie S118-2.

possède deux modes de fonctionnement : le mode dit "lent" permettant d'atteindre des vitesses en veine jusqu'à environ 20 m s^{-1} et le mode "rapide" avec des vitesses d'au maximum 60 m s^{-1} . La vitesse de l'écoulement est ajustée à l'aide de pâles orientables placées en amont du ventilateur et dont l'ouverture peut être contrôlée. Selon cette ouverture, elles créeront plus ou moins de pertes de charge augmentant ou diminuant ainsi la vitesse de l'écoulement.

Instruments de mesure et chaîne d'acquisition

Dans l'objectif d'effectuer des sondages de CLT et de déterminer les performances des micro-capteurs pour des mesures de vitesse, plusieurs moyens métrologiques et équipements sont utilisés. Ce paragraphe vise à les présenter ainsi qu'à exposer leur mise en place dans la soufflerie. Pour illustrer ces propos, une photographie des moyens de mesure présents en veine est visible Figure 7.2.

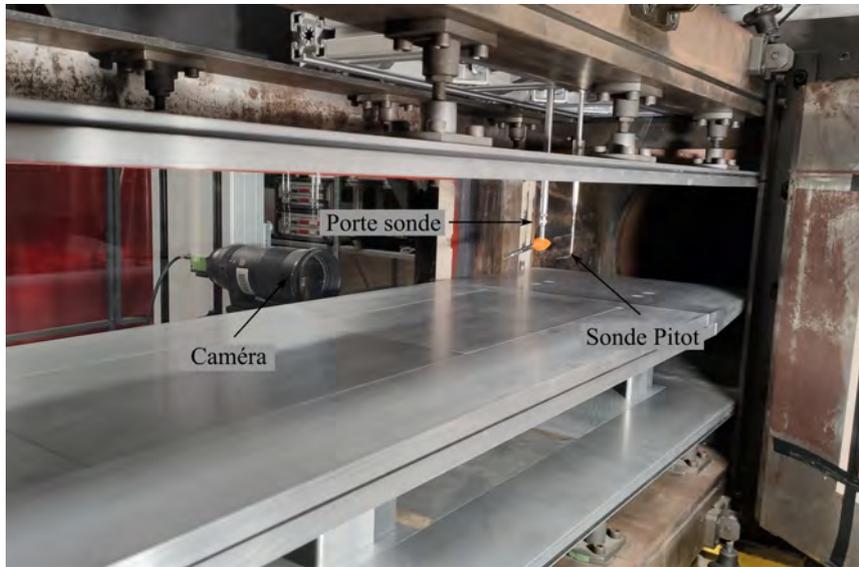


FIGURE 7.2. – Vue de la veine d'essai.

Tout d'abord, un porte-sonde Dantec, classiquement utilisé pour des mesures fil chaud, est placé dans la veine grâce à une ouverture dans le plafond de la soufflerie à une distance $x = 130 \text{ cm}$ du bord d'attaque de la plaque plane. Il est mis en place au centre de la veine pour éviter que les parois de celle-ci n'influencent la mesure des sondes à fil chaud. Ce porte-sonde est maintenue à l'aide d'un support tubulaire lui-même fixé à une avance linéaire pas à pas Newport UTS 150-PP. Cette avance linéaire est caractérisée par une grande précision de déplacement ($\pm 1.7 \mu\text{m}$) et permet de déplacer les dispositifs verticalement dans la couche limite pour effectuer des mesures à différentes hauteurs. Les capteurs branchés dans le porte-sonde sont ensuite reliés à l'électronique CTA présentée au chapitre précédent à l'aide d'un câble BNC de 4 m de long.

Afin de connaître et de contrôler la vitesse en veine, une sonde Pitot est placée à côté du porte-sonde à une hauteur suffisante pour qu'elle soit en dehors de la CLT. Cette sonde comporte deux prises de pressions, une prise de pression statique et une prise de pression totale, qui sont reliées à un capteur différentiel de pression MKS 220CD. Ce capteur, après étalonnage, présente une erreur de mesure inférieure à 0.5 %. Il renvoie une tension proportionnelle à la différence entre les deux pressions ΔP permettant ainsi de remonter à la vitesse de l'écoulement à l'aide de la relation de Bernouilli :

$$U_e = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (7.1)$$

Ici, ρ , la masse volumique de l'air, est déterminée avec la relation des gaz parfaits tel que :

$$\rho = \frac{P_{atm}}{rT_{atm}}, \quad (7.2)$$

où r représente la constante des gaz parfait avec $r = 287.058 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. P_{atm} et T_{atm} sont respectivement la pression de l'air et sa température aux conditions atmosphériques. Cette pression est mesurée à l'aide d'un capteur de pression absolue présent au sein du laboratoire du DMPE dans lequel sont effectuées les mesures. La température est quant à elle relevée à l'aide d'un thermocouple présent en veine.

L'utilisation de la soufflerie S118-2 implique qu'il n'est pas possible de contrôler la température de l'écoulement. Cependant, il est primordial de connaître celle-ci afin d'effectuer des mesures précises. Une variation ou une dérive de température importante de l'écoulement au cours d'un essai peut en effet entraîner une invalidité de la loi de calibration d'une sonde. C'est pourquoi un thermocouple de type K est placé en veine en-dessous de la plaque plane afin de pouvoir acquérir et surveiller l'évolution de la température de l'écoulement.

La veine d'essai disposant d'un accès optique, une caméra a été placée à la perpendiculaire du plan du porte-sonde afin de pouvoir déterminer le plus précisément possible la position de la sonde par rapport à la plaque plane. Cette caméra est aussi utilisée afin d'évaluer l'angle de mesure entre la sonde et la paroi. Pour s'assurer que la caméra soit bien perpendiculaire à la veine et que les mesures d'angles soient précises, sa position a été réglée à l'aide d'une mire de calibration. Ce réglage a permis d'estimer une incertitude de $\pm 0.5^\circ$ quant à la mesure de l'angle d'inclinaison entre le capteur et la paroi.

Pour acquérir les tensions de sortie du CTA et du capteur différentiel de pression, ceux-ci sont connectés à une carte d'acquisition NI-9239 24 bits ayant une fréquence d'acquisition maximale de 50 kHz. Cette carte présente l'avantage de pouvoir acquérir directement la tension de l'anémomètre sans avoir à filtrer et amplifier celui-ci car elle comporte une résolution suffisamment importante pour pouvoir mesurer précisément les fluctuations de tensions et donc de vitesse. La température du thermocouple est elle acquise avec une carte NI-9211. Tous ces instruments de mesures et de déplacement sont pilotés à l'aide de programmes LabView développés en interne. Le détail du protocole de mesure est présenté dans la partie suivante.

7.1.2. Protocole de mesure

Étalonnage des sondes

Avant n'importe quelle mesure en écoulement turbulent, il est nécessaire de calibrer les micro-capteurs ou les sondes fils chauds classiques afin de relier la tension mesurée à la vitesse de l'écoulement. En effet, comme cela a été montré dans le Chap.3, la tension de sortie du CTA (E) peut être théoriquement reliée à la vitesse (U) par la loi de King : $E^2 = A' + B'U^n$.

La procédure de calibration classiquement utilisée en anémométrie consiste à réaliser des acquisitions de la tension du fil pour différentes vitesses moyennes connues dans un écoulement stationnaire et uniforme [41]. Par ajustement optimal, il est ainsi possible de déterminer les coefficients A' , B' et n permettant alors d'avoir une relation analytique entre tension de l'anémomètre et vitesse de l'écoulement. Cependant, cette méthode se base sur une relation mettant en jeu la physique d'un écoulement autour d'un cylindre, il n'est donc pas certain qu'elle soit applicable aux micro-capteurs développés présentant un élément sensible en forme de parallélépipède. Des

essais préliminaires ont été effectués en soufflerie et le résultat d'une calibration obtenue pour un μ -anem est présenté Figure 7.3. L'excellent accord entre le modèle analytique et les points de calibration indique qu'une telle approche reste pertinente pour la calibration des micro-capteurs.

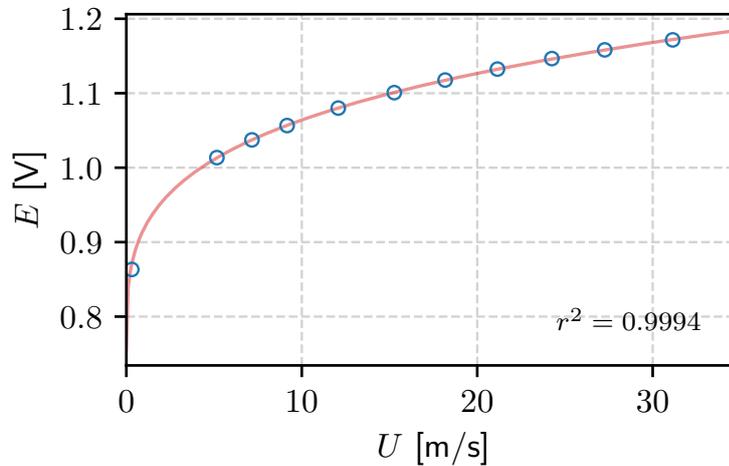


FIGURE 7.3. – Courbe de calibration d'un μ -anem de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$ suivant la loi de King. Les cercles représentent les points de calibration et la courbe la loi de King déterminée par méthode inverse.

Ainsi, le protocole de calibration suivant est effectué avant chaque sondage de couche limite et ce pour n'importe quel type de capteur. Les sondes sont tout d'abord branchées dans le porte-sonde en soufflerie et le conditionnement CTA est au préalable réglé en suivant la procédure présentée au chapitre précédent. Elles sont après placées hors de la couche limite puis un premier point de calibration est alors effectué veine fermée à vitesse nulle, ensuite une dizaine de mesures de tension sont effectuées pour des vitesses d'écoulement allant de 5 m s^{-1} à 30 m s^{-1} . Cette vitesse est déterminée avec la sonde Pitot. La loi de calibration est ensuite déterminée à l'aide d'une fonction d'optimisation, permettant ainsi de relier tension et vitesse pour les futures mesures. En pratique, le point de calibration à vitesse nulle n'est pas totalement pertinent pour une calibration à l'aide la loi de King, ce point étant principalement représentatif d'effets de convection naturelle. De ce fait, ce point n'est pas pris en compte dans la détermination des coefficients mais est tout de même réalisé car il permet d'avoir accès au décalage en tension des différents appareils de mesure.

Il faut noter qu'aucun point de calibration n'est réalisé en dessous de 5 m s^{-1} . C'est en effet une limitation de la soufflerie utilisée, le système de ventilation ne permettant pas d'avoir une vitesse stable en dessous de cette valeur. C'est pourtant dans cette zone de faible vitesse que la sensibilité est la plus importante, la tension évoluant rapidement avec une augmentation de vitesse. Afin de s'assurer que cette méthode de calibration permet d'effectuer des mesures précises, des calibrations avec un moyen d'étalonnage différent ont également été effectuées.

Afin d'atteindre de plus basses vitesses, des calibrations ont été réalisées à l'aide d'un jet d'air réglé. L'équipement permettant d'effectuer ceci est le StreamLine 90H02 Flow Unit de Dantec qui est visible Figure 7.4. Ce module est alimenté par air comprimé et possède une large gamme de vitesse de fonctionnement pouvant atteindre Mach 0.8. Il possède aussi une platine de positionnement qui permet d'incliner les capteurs à différents angles. Cette fonctionnalité a été utilisée pour étudier l'influence de l'angle de mesure sur la qualité de celle-ci, cette étude sera présentée plus tard dans ce chapitre. A l'aide de cet équipement, de nombreux points de calibration ont pu être effectués à basse vitesse et les courbes de calibration des deux approches

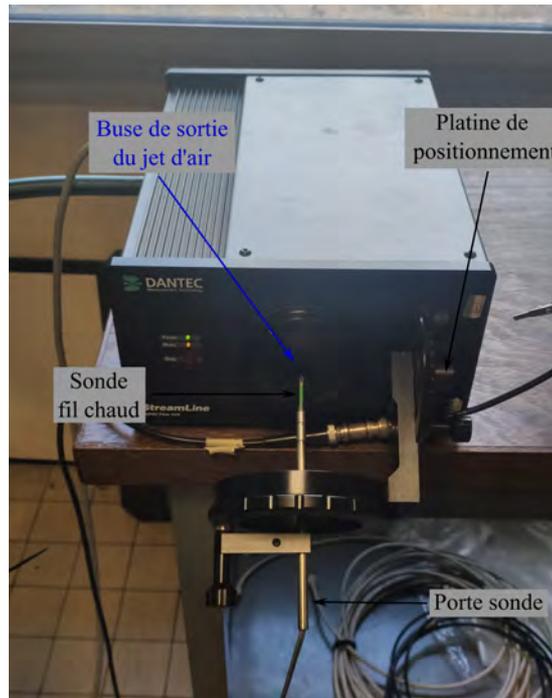


FIGURE 7.4. – Module Flow Unit Dantec.

ont alors été comparées. Ce résultat est visible Figure 7.5 et des différences d'au maximum 1.16% en termes de vitesses mesurées peuvent être observées. Il est cependant important de noter que ces deux calibrations ont été réalisées dans des conditions de pression et de température sensiblement différentes, pouvant être à l'origine de ces légères différences observées. Globalement, cette comparaison satisfaisante entre ces deux courbes indique que le procédé de calibration mis en œuvre en soufflerie est valide et ce même pour de basses vitesses. Le protocole présenté ci-dessus est donc appliqué pour chaque mesure, l'approche de calibration à l'aide du Flow Unit étant trop chronophage pour être réalisée à chaque expérimentation.

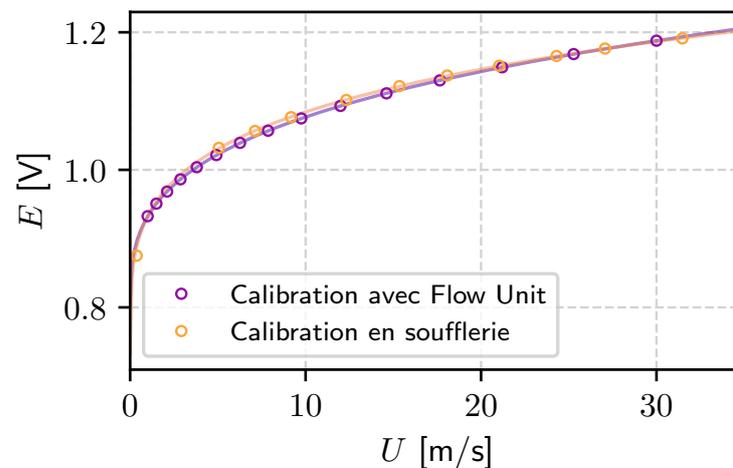


FIGURE 7.5. – Comparaison de deux courbes de calibration effectuées en soufflerie et à l'aide du module Flow Unit.

Sondage de couche limite turbulente

La première étape avant d'effectuer un sondage de CLT est tout d'abord de positionner correctement la sonde dans la soufflerie. La sonde est placée parallèlement à l'écoulement afin que son élément sensible soit perpendiculaire à celui-ci et soit principalement sensible à la vitesse selon la direction longitudinale x . Pour assurer ceci, elle est alignée à l'aide d'un niveau laser qui a pour référence la plaque plane. Cette technique n'est pas la plus précise possible, donnant une incertitude sur le fait que la sonde soit alignée avec l'écoulement d'environ $\pm 5^\circ$. L'incertitude associée à ce positionnement sera donc prise en compte dans l'incertitude totale de mesure.

Une fois le capteur fil chaud aligné, il est nécessaire de connaître sa position par rapport à la paroi afin de pouvoir effectuer des mesures à une hauteur relativement maîtrisée. Pour ce faire, la sonde est approchée progressivement de la paroi et le "zéro paroi" est déterminé visuellement à l'aide de la caméra, comme cela est visible Figure 7.6. Cette manière de procéder permet de placer la sonde avec une précision de quelques micromètres. Cette incertitude reste cependant trop importante pour l'analyse des mesures réalisée par la suite, et une correction de la position est effectuée a posteriori grâce à l'ajustement du profil semi-empirique décrit dans la section 7.1.5.

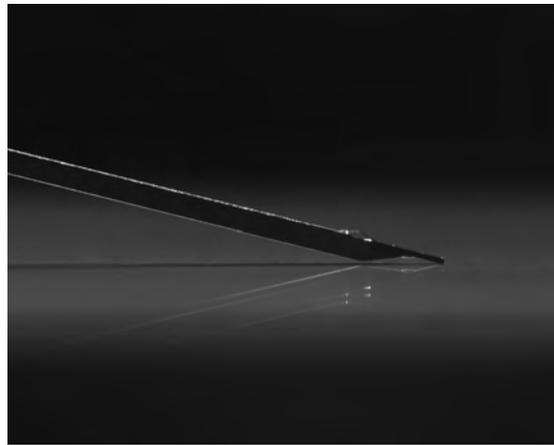


FIGURE 7.6. – Photo d'un μ -anem touchant la paroi de la plaque plane lors de la détermination du "zéro paroi".

Après ces étapes préliminaires et la calibration, le sondage peut être réalisé. Ici, 40 points de mesures sont effectués. Le premier point est mesuré à une distance de $z = 0.05$ mm de la paroi et le dernier à $z = 40$ mm. Ces points sont répartis de façon logarithmique. Quelques mesures supplémentaires sont aussi effectuées en dehors de la couche limite afin de s'assurer de la constance de la vitesse extérieure. Pour chaque point, l'acquisition de la tension de sortie du CTA est réalisée sur une durée de $T = 30$ secondes à une fréquence de 50 kHz. Ce temps d'acquisition correspond à un nombre caractéristique de retournement, $\tau_r = TU/\delta$, associé aux CLT observées d'au minimum 17500 assurant une convergence statistique des données mesurées. De plus, une telle fréquence d'acquisition permet ainsi d'avoir un échantillonnage assez important pour une estimation précise des fluctuations de vitesse u' , cette grandeur étant égale à la valeur efficace (valeur RMS) du signal de la vitesse mesurée. Il est aussi important de noter que le contenu spectral des CLT étudiées ne dépasse pas des fréquences de plus de 20 kHz. Ainsi, une fréquence d'acquisition de 50 kHz, donnant une fréquence de Nyquist de 25 kHz, garantit que tout le contenu de l'écoulement soit acquis. Simultanément, sont aussi acquis les signaux du capteur différentiel de pression et du thermocouple afin de pouvoir vérifier les conditions de l'écoulement durant le sondage.

Les données sont finalement traitées à l'aide de différents scripts de post-traitement permettant de remonter aux grandeurs souhaitées.

7.1.3. Évaluation des caractéristiques de la couche limite turbulente

Dans l'objectif de pouvoir utiliser les modèles analytiques de Chauhan *et al.* [12] et de Marusic et Kunkel [55] qui ont été présentés dans le Chap.2, il est nécessaire de s'assurer que la couche limite étudiée ait un comportement canonique. En effet, ces modèles ne sont applicables que dans le cas de CLT se développant sur plaque plane sans gradient de pression. De nombreux critères peuvent être utilisés pour déterminer l'état d'une CLT, les plus fréquents reposant sur le facteur de forme H , le coefficient de frottement C_f ou bien encore le paramètre de sillage Π . Cependant, l'estimation de ces grandeurs n'est pas nécessairement immédiate, et se fait ici précisément en ayant recours au modèle de Chauhan *et al.*. Ceci est problématique car dans le cas où la CLT étudiée n'aurait pas un comportement canonique, le modèle ne serait pas utilisable. Pour s'affranchir de l'utilisation de tels critères et pour lever cette incohérence méthodologique, il est possible de s'appuyer sur les travaux de San Miguel *et al.* [67] qui ont développé une méthode d'identification de l'état d'une CLT en se basant uniquement sur des mesures de vitesse moyenne et ses fluctuations. Ils ont étudié différentes couches limites respectant tous les critères d'identification habituels, que ce soit par simulations numériques ou mesures expérimentales, et ont ainsi proposé une courbe de diagnostic (*diagnostic-plot*). Cette courbe est le tracé du rapport entre valeur RMS de fluctuations de vitesse et vitesse moyenne, u'/U , en fonction du rapport de vitesse moyenne sur vitesse extérieure à la CLT, U/U_∞ . Ceci a permis de montrer qu'une CLT a un comportement jugé canonique si u'/U évolue linéairement pour $0.7 < U/U_\infty < 0.9$ selon l'asymptote :

$$\frac{u'}{U} = 0.285 - 0.254 \frac{U}{U_\infty}. \quad (7.3)$$

Afin d'identifier si la CLT étudiée lors de ces travaux suit ce comportement conforme, un premier sondage a été effectué avec une sonde commerciale de type Dantec 55P15 dont les performances sont relativement bien connues en termes de mesure de vitesse. Un résultat obtenu pour $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$ est visible Figure 7.7, les mesures réalisées à d'autres vitesses ayant toutes le même comportement. Un accord satisfaisant entre les points de mesures et la loi empirique linéaire précédente est obtenu entre $0.7 < U/U_\infty < 0.9$ indiquant donc que la CLT a un comportement relativement canonique et présentant des caractéristiques très proches de celles étudiées dans la littérature. Le modèle semi-empirique de Chauhan *et al.* peut donc être utilisé afin de déterminer les grandeurs caractéristiques de l'écoulement. Celui de Marusic et Kunkel est lui utilisé afin d'avoir une représentation semi-empirique du profil de l'intensité turbulente et permet d'obtenir une indication sur la capacité des micro-capteurs à bien détecter les fluctuations de vitesses.

7.1.4. Corrections des signaux

Correction en température

Les mesures de vitesse par fil chaud voient leurs incertitudes augmenter si des changements de température ont lieu en cours d'essai. Afin de s'affranchir de cette éventuelle problématique, il est possible de corriger la tension de l'anémomètre acquise en sortie du CTA. En suivant les prérogatives de Jorgsen [41], la correction s'exprime de la façon suivante :

$$E_{corr} = \sqrt{\frac{T_w - T_{fc}}{T_w - T_f}} E, \quad (7.4)$$

où T_w , T_f et T_{fc} sont respectivement la température du fil en fonctionnement, la température de l'air lors de la mesure et celle lors de la calibration. E est la tension mesurée. Cette correction implique donc une mesure de la température de l'écoulement lors de la mesure fil chaud, ce qui est réalisée à l'aide du thermocouple placé en veine. Elle est aussi valide pour de faibles variations de température inférieures à 5°C . Après vérification, tous les sondages effectués respectent

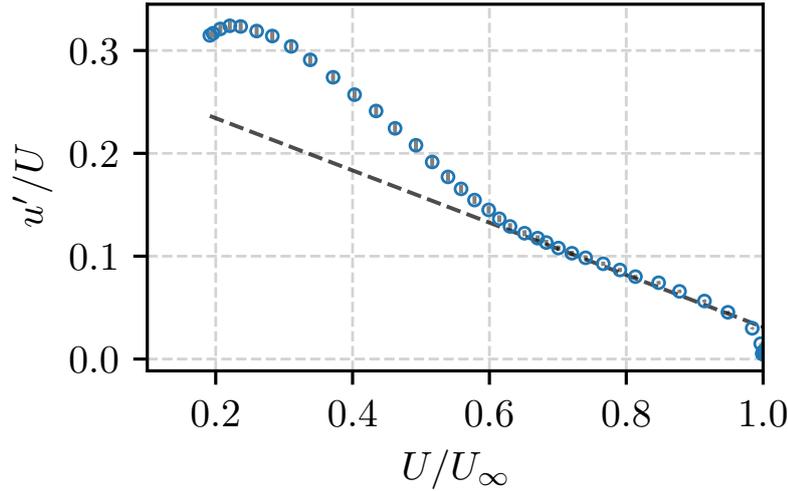


FIGURE 7.7. – Courbe de diagnostic de la CLT. Les mesures ont été effectuées avec une sonde fil chaud 55P15 à $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$. La ligne en pointillée représente le comportement asymptotique présenté par San Miguel *et al.* [67].

largement ce critère.

Correction du signal en proche paroi

Les mesures effectuées proches de la paroi, pour des hauteurs $z^+ < 5$, peuvent aussi s'avérer problématiques en anémométrie à fil chaud. En effet, la proximité avec cette paroi entraîne un échange thermique entre le fil chauffé et celle-ci à travers le fluide. Ceci induit alors une perte de chaleur supplémentaire pour le capteur et la vitesse mesurée est alors surestimée. Il est cependant difficile d'évaluer précisément cette surestimation puisqu'elle est fonction de nombreux paramètres comme la vitesse de l'écoulement, le matériau de la paroi ou bien encore de l'échauffement du fil. De nombreux auteurs ont ainsi cherché à comprendre ce phénomène afin de proposer une correction sur les grandeurs mesurées : [46] [24] [94]. Dans le cas présent, il a été choisi d'utiliser la correction proposée par Lange *et al.* [46] pour les mesures en proche paroi. Celle-ci ayant fourni des résultats satisfaisants et cohérents pour l'ensemble des mesures réalisées. Elle s'exprime ainsi :

$$U_{corr} = U[1 - \exp(-0.4(z^+)^2)]. \quad (7.5)$$

7.1.5. Incertitudes de mesure

Pour connaître la précision des mesures réalisées, il est important de connaître les incertitudes associées au protocole mis en place. Pour une approche globale, il est possible de suivre les recommandations de Jorgsen [41] pour estimer une incertitude totale. En prenant en compte toute la chaîne de mesure, la décomposition des différentes sources d'erreur et leurs incertitudes associées peut se faire selon le Tableau 7.1. De cette façon l'incertitude totale est $err(U) \approx 2.4\%$. Cependant, lors de cette approche certaines grandeurs ont été surestimées car elles ont été déterminées dans le cas le plus défavorable. C'est pourquoi il a été choisi de se tourner vers une estimation plus locale où les incertitudes sont évaluées à chaque point de mesure.

Dans cette nouvelle approche, il est notamment nécessaire de prendre en compte les erreurs dues à l'utilisation de modèles pour déterminer les grandeurs de la CLT. Ce modèle et le calcul qui lui est associé permettent aussi de corriger la position z du capteur par rapport à la paroi,

Sources d'erreur	Incertitudes associées (%)
Calibration (mesure et linéarisation)	1
Résolution de la carte d'acquisition	10^{-6}
Alignement de la sonde avec l'écoulement	0.2
Pression atmosphérique	0.6

TABLE 7.1. – Sources d'erreurs et incertitudes associées pour les mesures fil chaud en CLT.

ajoutant alors une nouvelle source d'incertitude. Ainsi, lors du traitement des données mesurées, l'incertitude de l'ajustement de la loi de calibration, du calcul de la vitesse de frottement u_τ par ajustement du modèle de Chauhan *et al.* et de la correction de la position de la paroi par ce même modèle sont calculées pour tous les points de mesures à chaque position dans la couche limite. L'utilisation de la loi de Lange *et al.* pour corriger le signal en proche paroi implique cette fois un calcul d'incertitude associé à cette loi pour les points de mesures uniquement obtenus à des positions de $z^+ < 5$. Toutes ces incertitudes sont ensuite propagées lors des différents calculs de post-traitement sur tous les points de mesures de la couche limite afin d'afficher des barres d'incertitudes locales sur les représentations graphiques.

7.2. Sondage de couche limite avec différentes sondes pour l'évaluation des capacités des micro-capteurs

7.2.1. Sensibilité aux angles de mesure

Avant de réaliser les sondages de CLT, la sensibilité des micro-capteurs à leur inclinaison a été étudiée. En effet, comme l'ont montré Vallikivi *et al.* [82] sur leur sonde NSTAP, les capteurs ayant un élément sensible de forme rectangulaire peuvent présenter une plus forte sensibilité aux angles d'inclinaison qu'un fil chaud classique de forme cylindrique. Pour cette étude, le Stream-Line Flow Unit présenté précédemment a été utilisé. Ici, le μ -anem est placé devant le jet d'air et à l'aide de la platine d'inclinaison plusieurs mesures de vitesses moyennes sont réalisées à différents angles. Ces mesures sont effectuées avec une sonde de longueur $\ell = 200 \mu\text{m}$ à une vitesse de jet de 20 m s^{-1} . Les résultats sont présentés Figure 7.8 où la vitesse de référence U_e est la vitesse mesurée par le micro-capteur à un angle de 0° , angle auquel a été effectuée la calibration préalable. Ce graphique montre que ces sondes peuvent être utilisées à des angles allant de -10° à $+10^\circ$ pour satisfaire une erreur de mesure de la vitesse moyenne inférieure à 1 %.

Devant ces résultats, il a été choisi d'utiliser les μ -anems avec un angle de -6° pour les sondages de CLT. C'est à dire que la sonde est en fait positionnée à l'envers (élément sensible vers le bas) avec un angle de 6° par rapport à la paroi. Ceci a pour intérêt de pouvoir approcher l'élément sensible du capteur le plus proche possible de la paroi.

Cette étude n'a donné des informations que sur l'influence de l'angle sur la vitesse moyenne. Les micro-capteurs développés lors de ces travaux ayant été fabriqués pour améliorer la détection de fluctuations de vitesse, il apparaît nécessaire de réaliser cette étude aussi pour cette grandeur. C'est pourquoi plusieurs sondages à différents angles ont été réalisés afin de quantifier ceci. Les résultats de cette étude sont présentés dans le paragraphe 7.3 de ce chapitre. Il faut tout de même noter que ces résultats valident l'utilisation d'un angle de mesure de -6° .

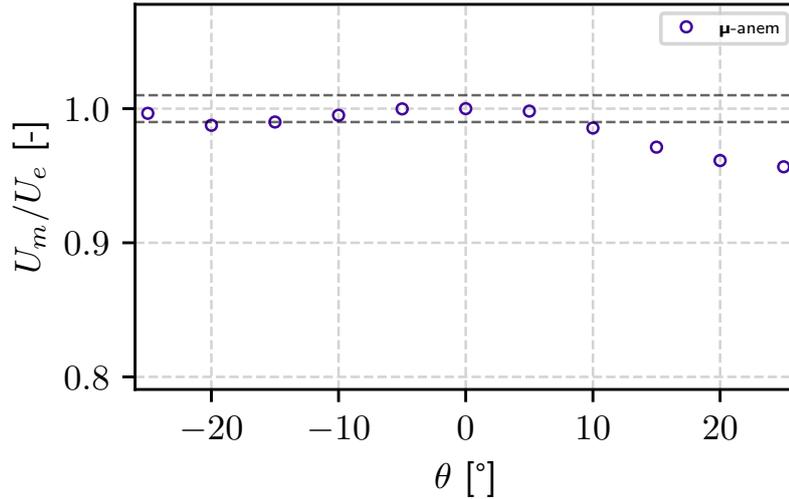


FIGURE 7.8. – Sensibilité de la mesure de la vitesse moyenne à l’angle d’inclinaison de la sonde. Les lignes en pointillées représentent un intervalle de confiance à 1 %.

7.2.2. Sondes et CLT étudiées

Afin de déterminer les capacités des micro-capteurs à mesurer fidèlement les fluctuations de vitesse dans un écoulement turbulent, plusieurs sondages de CLT ont été effectués à des vitesses $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$ et $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$. Les grandeurs caractéristiques de ces deux couches limites sont données dans le Tableau 7.2. Les mesures à une vitesse $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$ justifient le fait d’avoir réglé les paramètres du CTA à une telle vitesse. Il est en effet recommandé d’effectuer ce réglage et l’éventuel *Square wave test* à la plus grande vitesse observée dans un écoulement.

Dans un premier temps, il a été décidé de réaliser des mesures avec un μ -anem de longueur $\ell = 200 \text{ }\mu\text{m}$ afin de s’affranchir d’un éventuel filtrage dû aux effets de pertes par conduction à cause d’un rapport ℓ/d^* insuffisant. Pour cette configuration, ce rapport est estimé à $\ell/d^* = 229$. Pour comparaison, les mêmes mesures sont aussi réalisées avec une sonde fil chaud Dantec 55P15 ainsi qu’avec le NSTAP de l’Université de Princeton.

U_∞ (m s^{-1})	δ (mm)	u_τ (m s^{-1})	ν (m s^{-2})	Re_τ
15	25.3	0.63	$1.599 \cdot 10^{-5}$	1002
25	20.7	0.98	$1.52 \cdot 10^{-5}$	1335

TABLE 7.2. – Grandeurs caractéristiques des CLT étudiées.

Par la suite, d’autres mesures seront réalisées avec des sondes de dimensions différentes. Il apparaît donc important de rappeler les dimensions caractéristiques de chaque sonde ainsi que les paramètres de conditionnement électronique utilisés. Tous ces paramètres pour un écoulement de $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$ sont présentés dans le Tableau 7.3. Ici, ℓ^+ est la longueur des sondes adimensionnée par l’échelle de paroi associée à la CLT, Λ représente le critère de *end-conduction* défini par Vallikivi [81] (présenté dans le Chap.3), f_c la fréquence de coupure déterminée par *Square wave test* et ξ le facteur d’amortissement. Sur ce tableau, il peut être observé que toutes les micro-sondes considérées présentent une longueur adimensionnée $\ell^+ < 20$, garantissant donc théoriquement une absence de filtrage spatial. Il est aussi visible que seule la sonde de $200 \text{ }\mu\text{m}$ est caractérisée par un rapport $\ell/d^* > 200$ et que seul ce capteur et celui de longueur $\ell = 150 \text{ }\mu\text{m}$ respecte le critère $\Lambda > 2.5$. Enfin, des facteurs d’amortissement similaires (autour de 0.5) sont

toujours utilisés pour le conditionnement du système de mesure pour des micro-sondes.

Sonde	ℓ (μm)	ℓ^+	ℓ/d^*	Λ	f_c (kHz)	ξ
μ -anem	60	3.90	69	1.32	320	0.513
μ -anem	80	5.21	92	1.75	238	0.4989
μ -anem	100	6.51	114	2.19	271	0.470
μ -anem	150	9.76	172	3.28	269	0.528
μ -anem	200	13.01	229	4.37	292	0.482
NSTAP	60	3.90	134	2.71	399	0.476
55P15	1250	81.34	250	7.52	74	0.768

TABLE 7.3. – Récapitulatif des différentes sondes fabriquées et utilisées lors des sondages de CLT.

7.2.3. Étude de la mesure de vitesse moyenne

La comparaison des profils de vitesse moyenne obtenus avec les différentes sondes est visible Figure 7.9. Toutes les grandeurs sont ici exprimées en variables de paroi, *i.e.* : $U^+ = U/u_\tau$ et $z^+ = zu_\tau/\nu$.

Premièrement, il est visible que le μ -anem mesure correctement le profil de vitesse moyenne, un bon accord entre les différents profils dans les zones internes et logarithmiques de la CLT ($z^+ < 400$) étant observé. Les petites différences de niveaux en dehors de la couche limite reflètent de légères différences sur la vitesse extérieure U_∞ entre les expérimentations. De plus, ces résultats montrent que le micro-capteur permet d'atteindre des positions de mesure plus proches de la paroi qu'avec une sonde classique. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus avec le NSTAP, qui permet toutefois de s'approcher encore un peu plus de la paroi. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'élément sensible du NSTAP est parfaitement au bout du capteur tandis que pour le μ -anem ce dernier est légèrement en retrait. Sachant que la nouvelle sonde permet de mesurer correctement la vitesse moyenne, il faut désormais s'intéresser à la détection des fluctuations de vitesses.

7.2.4. Étude de la mesure de fluctuations de vitesse

Les profils d'intensité turbulente des différentes sondes sont tracés sur la Figure 7.10. Tout d'abord en s'appuyant sur les niveaux approximatifs donnés par le modèle semi-empirique de Marusic et Kunkel [55], il apparait clairement que le μ -anem de longueur $\ell = 200 \mu\text{m}$ détecte mieux les fluctuations de vitesses que la sonde fil chaud 55P15. Cette amélioration est d'autant plus visible à $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$ où les fluctuations de vitesses sont plus importantes et induites par des structures de plus petite taille en proche paroi. Ainsi, la réduction de la taille de l'élément sensible apparait donc comme utile pour une meilleure détection des petites échelles de turbulence, comme cela était attendu. Le filtrage de la 55P15 était aussi prévisible étant donné qu'il a une longueur en échelle de paroi $\ell^+ \approx 66$ tandis que le μ -anem à une longueur $\ell^+ \approx 13$ pour l'écoulement de CLT à $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$.

Toujours en comparaison au modèle de Marusic et Kunkel [55], il semble que le micro-capteur filtre légèrement l'intensité turbulente mesurée, ce qui est particulièrement visible au niveau du

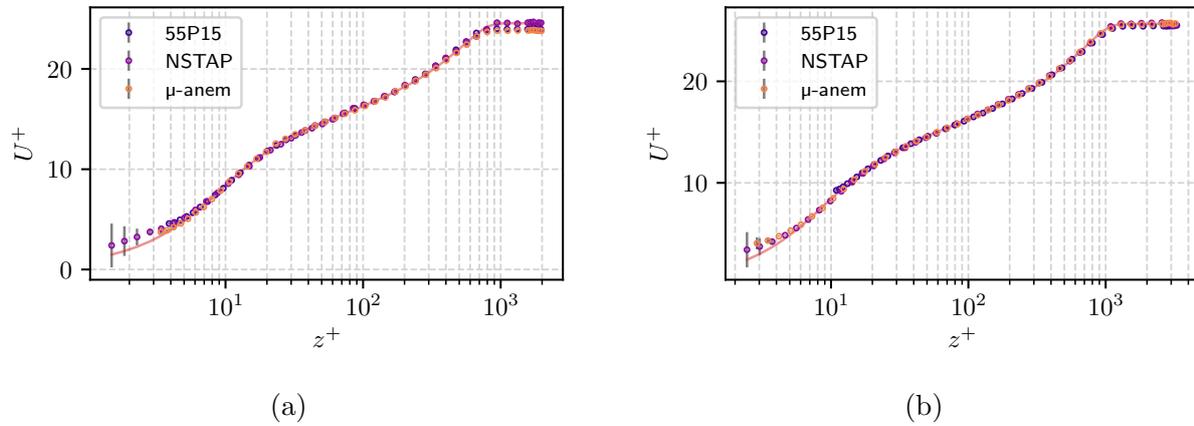


FIGURE 7.9. – Profils de vitesses moyennes en fonction de la distance à la paroi pour (a) $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$ et (b) $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$. Les courbes pleines représentent les profils de vitesses moyennes obtenus à l’aide du modèle de Chauhan *et al.* [12].

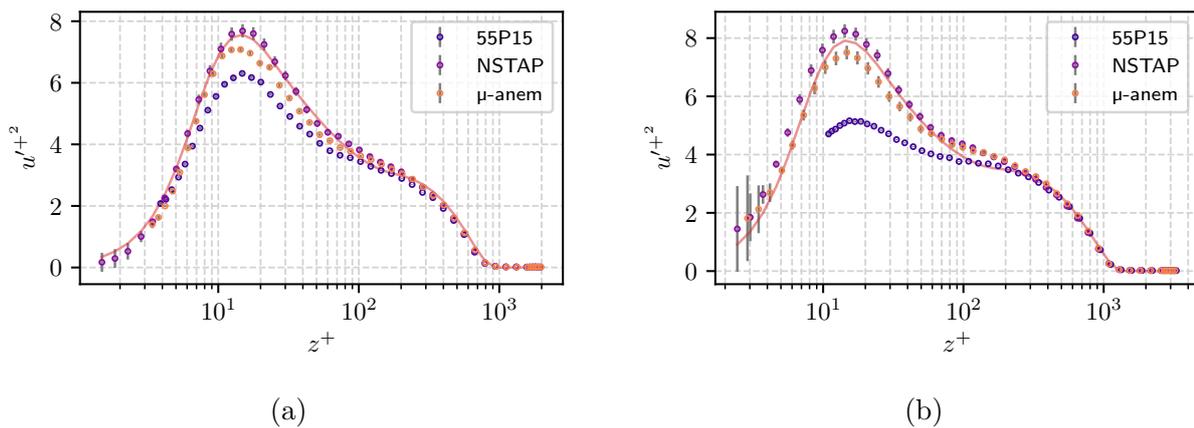


FIGURE 7.10. – Profils de l’intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour (a) $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$, $Re_\tau = 1002$ et (b) $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$, $Re_\tau = 1335$. Les courbes pleines représentent les profils de l’intensité turbulente obtenus à l’aide du modèle de Marusic et Kunkel [55].

pic de fluctuations en proche paroi ($z^+ \approx 15$). Toutefois, il peut être observé que les valeurs mesurées suivent la tendance de ce modèle indiquant tout de même un bon comportement de la mesure. Cependant, il n'est pas possible de savoir si ce modèle semi-empirique décrit précisément la réalité de l'écoulement même s'il en donne une bonne indication. Une alternative initialement imaginée était de s'appuyer sur les mesures obtenues au moyen du NSTAP. Cependant, les résultats obtenus laissent suggérer que, dans cette configuration d'écoulement et avec les paramètres de conditionnement appliqués, cette mesure présente également un biais. En effet, il est visible pour $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$ que le pic de fluctuations de vitesse adimensionné et mesuré par cette sonde est clairement supérieur à 8. Ceci n'est a priori pas cohérent avec les valeurs de Re_τ ici considérées et les valeurs généralement rapportées dans la littérature [55] [37]. Pour mieux quantifier cette surestimation, il est possible d'observer le spectre pré-multiplié présenté Figure 7.11, où Φ_{uu} représente la densité spectrale de puissance du signal et obtenu pour le cas à $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$ et à $z^+ \approx 20$. Ce tracé suggère l'existence d'une suramplification du signal pour le NSTAP sur une large gamme fréquentielle, mais surtout pour de basses fréquences ($f < 300$) en comparaison des deux autres sondes. Or, pour ces basses fréquences, aucun filtrage n'est attendu de la part de la 55P15, ce qui semble être corroboré par les mesures obtenues avec le μ -anem. Ceci n'est pour le moment pas totalement expliqué mais peut-être trouver son origine dans le conditionnement électronique qui pourrait potentiellement amplifier l'intensité turbulente détectée par le NSTAP, étant donné que cette électronique n'est pas conçue pour ce type de sonde. Devant ces résultats, la sonde de l'université de Princeton ne sera donc pas prise en tant que référence métrologique par la suite. Enfin, ce dernier graphique met aussi en avant la plus haute fréquence de coupure du μ -anem par rapport au fil chaud classique.

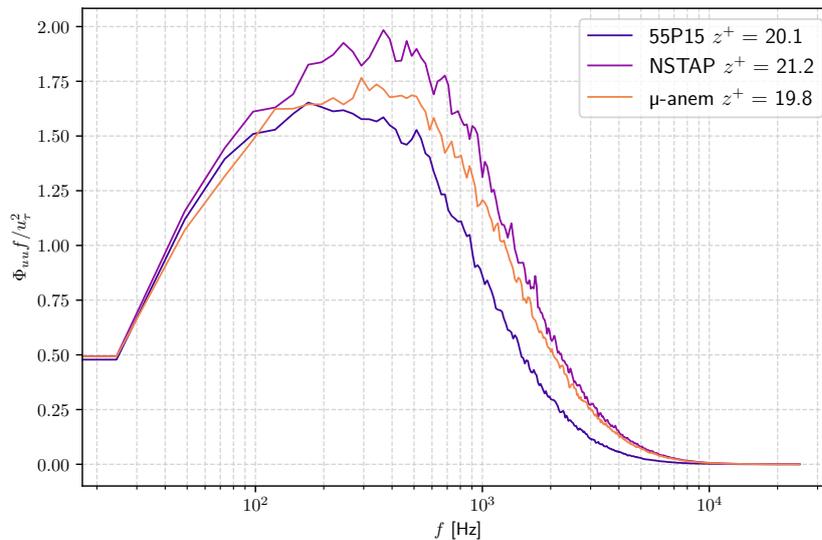


FIGURE 7.11. – Spectres pré-multipliés en fonction de la fréquence. Tracés obtenu pour une vitesse $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$.

Les mesures d'intensité turbulente ont permis de mettre en avant l'amélioration de la détection des fluctuations de vitesse du μ -anem en comparaison d'une sonde fil chaud commerciale. Cependant sans données de référence complémentaires, il ne peut pas être exclu qu'il existe encore un léger filtrage fréquentiel, notamment présent en proche paroi lors de la mesure du pic de fluctuations de vitesses et qui pour l'heure reste inexpliqué. Les pistes de réflexions sur ce sujet peuvent amener à penser que le design du capteur pourrait être à l'origine d'un tel filtrage. En effet, avec un élément sensible placé au milieu d'un pont il est possible que ce dernier soit aussi sensible aux variations de vitesse de l'écoulement ou participe à la réponse fréquentielle de la sonde avec un effet d'atténuation en lien avec ses dimensions et son inertie plus importantes.

Cependant, les mesures obtenues dans la région logarithmique et la région de sillage de la CLT semblent cohérentes entre μ -anem et NSTAP, ce qui n'irait pas dans le sens de cette hypothèse. Il est aussi envisageable que l'électronique joue un rôle dans ce filtrage étant donné que le système de conditionnement utilisé n'est pas fait pour réaliser des mesures avec de telles micro-sondes. Cependant, devant le manque de mesure de référence il est difficile de conclure définitivement sur ce propos.

7.3. Influence de l'angle de mesure sur la détection des fluctuations de vitesses

Afin de déterminer les limites d'utilisation des μ -anems, il a été décidé d'étudier plus en détails la sensibilité aux angles d'inclinaison. Outre les premières expérimentations effectuées avec le Flow Unit Dantec, des sondages de CLT ont été effectués à différentes inclinaisons dans le but cette fois d'observer l'effet de celles-ci sur la mesure des fluctuations de vitesse. Ici, les mesures sont réalisées avec un μ -anem de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$, il sera montré dans le paragraphe suivant que la longueur de l'élément sensible n'a que peu d'impact sur les quantités mesurées. Les porte-sondes fil chaud ont été modifiés à l'aide de noix de maintien fabriquées en impression 3D qui permettent d'atteindre différents angles d'inclinaison. Ainsi, les mesures ont été réalisées à des angles allant de -6° à -22° par pas de 2° pour les expérimentations avec les sondes inversées et de 12° à 26° pour les sondes placées avec l'élément sensible vers le haut. Cette dernière gamme d'angles positifs choisis semble ne pas tenir compte des résultats précédemment obtenus lors de l'étude de la sensibilité des capteurs, pour laquelle il avait été identifié que seuls des angles inférieurs à 10° pouvaient donner des mesures avec une erreur inférieure à 1 %. Cependant, à cause du design des dispositifs et du support PCB empêchant d'approcher physiquement de la paroi, il n'est pas possible de les utiliser en soufflerie à des angles inférieurs pour des mesures en proche paroi. Tous ces sondages sont réalisés à $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$.

Les résultats les plus importants sont présentés sur la Figure 7.12 pour les sondes inversées et sur la Figure 7.13 pour les sondes droites. La première conclusion qui peut être tirée de ces courbes est qu'il est clair que les μ -anem placés avec l'élément sensible vers le bas permettent d'atteindre des positions bien plus proches de la paroi. Cette configuration est donc à privilégier dans le cas d'une étude de couche limite. Ensuite en observant les différentes mesures de vitesses moyennes, il est possible d'observer un accord globalement satisfaisant entre les différents profils. Des variations de vitesse dans la région externe de la couche limite peuvent cependant être notées. Notamment, dans la Figure 7.12(a), une déformation du profil dans cette région semble être corrélée à l'angle d'inclinaison de la sonde, suggérant que ces variations pourraient ne pas être entièrement le fait de différences de nombre de Reynolds entre les mesures. L'ordre de grandeur des variations maximales observées est d'environ 5%, montrant donc l'importance de l'angle d'inclinaison de la sonde pour la mesure du profil de vitesse moyenne dans une CLT. Une telle déformation n'est cependant pas aussi visible sur les profils de la Figure 7.13(a) malgré les différences observées en dehors de la couche limite, suggérant que cet effet dépend de l'orientation de la sonde. Étonnamment, une asymétrie de comportement est également présente dans les résultats obtenus au moyen du jet de calibration (Figure 7.8), mais avec des tendances opposées. Si cette observation est difficilement explicable, elle permet de mettre en lumière l'importance de travailler avec un angle d'inclinaison le plus faible possible. Enfin, il peut être important de rappeler qu'une étape de calibration est réalisée avant chaque sondage. Ainsi, il aurait pu être imaginé que cette étape de calibration préalable aurait pu permettre de compenser ces effets d'inclinaison, mais il apparaît ici qu'un biais de mesure apparaît tout de même.

Un comportement relativement similaire et bien plus marqué peut être observé sur les mesures de fluctuations de vitesse. En s'intéressant désormais aux profils d'intensité turbulente pour les μ -anems inversés (Figure 7.12 (b)), il est visible qu'un filtrage commence à apparaître à partir

d'un angle de -12° et il devient de plus en plus important en augmentant cet angle. Ainsi, pour effectuer des mesures précises dans cette position il semble nécessaire de positionner la sonde avec un angle au moins supérieur à -10° , confirmant aussi les mesures présentées dans le paragraphe précédent. En effet, toutes les données n'ont pas été montrées sur les graphiques et aucun effet de filtrage n'a été discerné pour les mesures réalisées à -6° et -10° . Des résultats relativement similaires sont obtenus pour les sondes placées à l'endroit (Figure 7.13 (b)). Ici, les angles mis en jeu ne sont pas les mêmes mais un filtrage est opéré à partir de 16° augmentant progressivement. Pour cette position, des angles de 12° ou 14° semblent donc être plus appropriées. Il est cependant important de remarquer des différences notables entre les mesures obtenues pour des angles positifs et négatifs : dans la première configuration (Figure 7.13 (b)) les niveaux adimensionnés de variance du pic interne sont plus importants, atteignant 8 pour la configuration à 12° , mais les amplitudes obtenues dans la région logarithmique ($z^+ > 100$) sont plus faibles que ceux rapportés dans la seconde configuration (Figure 7.12 (b)). La raison de ces différences reste à ce jour inconnue, mais suggère qu'il existe un effet de géométrie encore non maîtrisé qu'il conviendra d'élucider dans de futurs travaux.

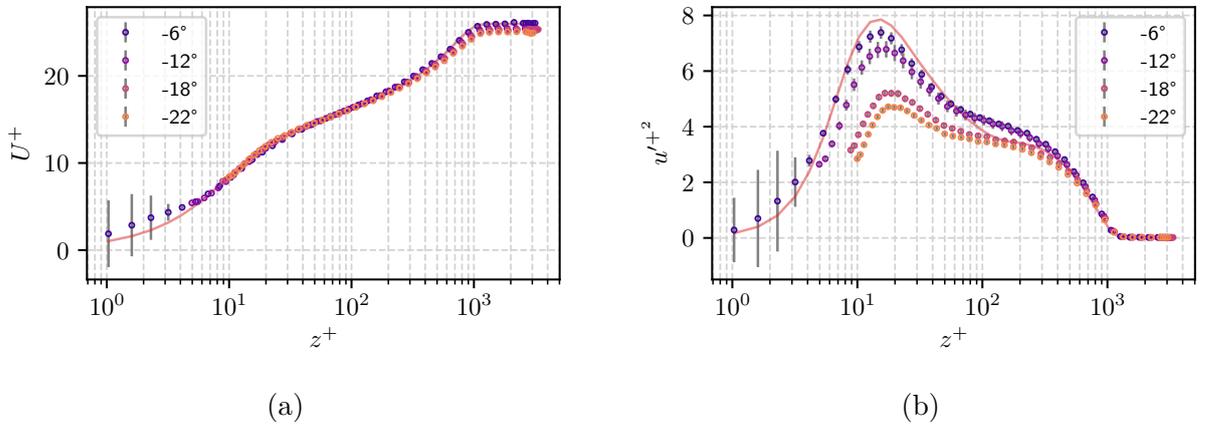


FIGURE 7.12. – (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour un μ -anem en position inversée.

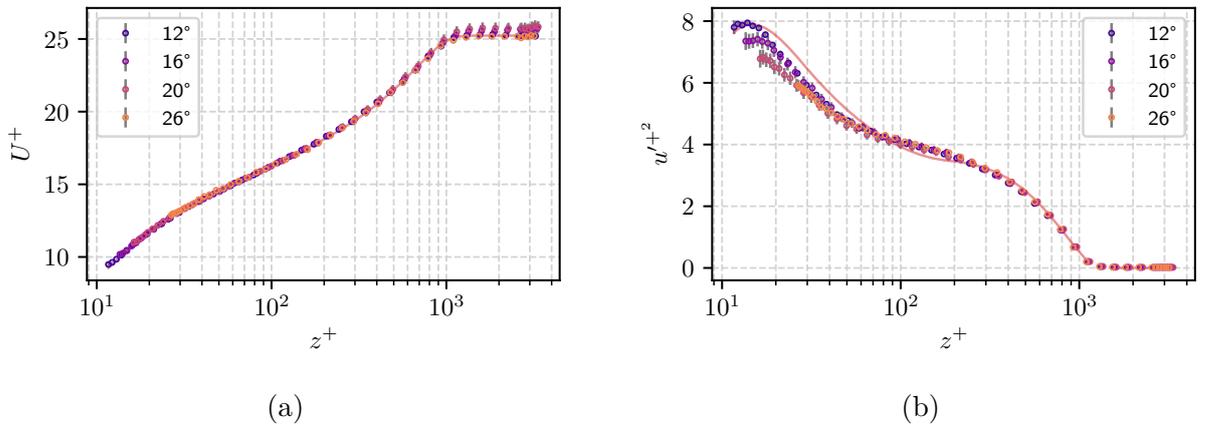


FIGURE 7.13. – (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour un μ -anem en position droite.

La conclusion globale sur cette étude de la sensibilité aux angles de mesures est que plus les micro-sondes sont inclinées moins elles sont sensibles aux fluctuations de vitesse. De plus, une

déformation possible du profil de vitesse axiale moyenne peut également être observée, particulièrement pour des angles négatifs. Ceci pourrait s'expliquer par la forme rectangulaire de l'élément sensible et est peut-être amplifiée par la présence de Nitrure de Silicium sous le Platine, notamment lorsque les sondes sont placées en position inversée. Une dernière hypothèse qui pourrait permettre d'expliquer certaines des observations rapportées serait un effet d'intrusivité aérodynamique des broches. En effet, l'asymétrie des résultats observés entre angles positifs et négatifs pourrait être la conséquence de la position du pont suspendu par rapport à la surface faisant face à l'écoulement : pour des angles positifs, il est situé au-dessus, tandis que pour des angles négatifs il est situé en-dessous. Dans ce dernier cas, une déformation plus importante des lignes de courant pourrait être imaginée, d'autant plus importante que l'angle d'incidence augmente. Une simulation stationnaire de l'écoulement autour d'une sonde pourrait par exemple permettre d'éclaircir ce point.

7.4. Étude du rapport ℓ/d^* et des effets de conductions

Les pertes par conduction dans les broches à cause d'un rapport ℓ/d^* insuffisant sont souvent préjudiciables lors d'une mesure fil chaud. Cependant, les critères habituellement applicables pour les sondes cylindriques apparaissent comme non utilisables pour les capteurs de couche mince comme l'ont montré les travaux de Vallikivi [81]. Dans l'objectif d'observer l'influence du ratio ℓ/d^* et l'apparition d'éventuels effets de conduction, des μ -anems de différentes longueurs ont été fabriqués. Plusieurs sondages de CLT ont alors été réalisés avec ces différentes sondes à une vitesse de $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$.

Tout d'abord, il peut être mentionné qu'un μ -anem de longueur $\ell = 40 \text{ }\mu\text{m}$ avait été fabriqué. Comme déjà énoncé dans le chapitre précédent, ce capteur n'a pas été utilisable pour des mesures d'écoulement. En effet, à une température de fonctionnement de $200 \text{ }^\circ\text{C}$, l'élément sensible a été à plusieurs reprises endommagé. De plus, même avec une température de fonctionnement inférieure ($150 \text{ }^\circ\text{C}$) les mesures de vitesses moyennes étaient aberrantes. Une explication possible pourrait être que du fait de sa faible longueur la répartition de température dans le fil est trop fortement inhomogène, entraînant un fort échauffement de celui-ci et donc sa casse. Par la suite cette sonde ne sera donc plus utilisée et seules les mesures obtenues pour $\ell \geq 60 \text{ }\mu\text{m}$ seront considérées.

Les résultats des mesures de vitesses moyennes et de l'intensité turbulente sont présentés Figure 7.14. Ils démontrent qu'aucune différence notable n'apparaît entre la majorité des sondes, indépendamment de leurs longueurs que ce soit pour une mesure de vitesse moyenne ou de fluctuations. Les disparités observées pour le capteur de longueur $\ell = 150 \text{ }\mu\text{m}$ sont un cas isolé et ne sont pas expliquées. En effet, dans le but de s'assurer de la répétabilité des mesures, chaque sondage a été réalisé plusieurs fois, parfois même avec plusieurs lots de sondes de même longueur d'élément sensible et les résultats ne varient pas entre les différentes mesures. Ces résultats laissent ainsi penser que les effets de conductions ne sont que peu présents dans ces résultats de mesure. Cependant, en observant les spectres pré-multipliés des mesures, une analyse un peu plus fine peut être proposée. En effet, comme le montre la Figure 7.15, il apparaît qu'à hautes fréquences la sonde de longueur $\ell = 60 \text{ }\mu\text{m}$ atténue plus le signal que les autres sondes. Une interprétation peut être que cette longueur d'élément sensible entraîne des pertes par conduction plus notables et diminue donc la fréquence de coupure de la sonde. En effet, comme cela avait été montré dans le Chap.3, les pertes par conduction induisent un filtrage temporel qui se traduit alors par une fréquence de coupure plus faible. Ce résultat n'a que peu de conséquences sur la mesure des profils d'intensité turbulente car l'atténuation a lieu sur une gamme fréquentielle portant peu d'énergie, mais pourrait être plus préjudiciable pour des écoulements à plus grand nombre de Reynolds, présentant un contenu spectral plus riche.

Ces expérimentations ont permis d'avoir un premier regard sur les éventuelles pertes par

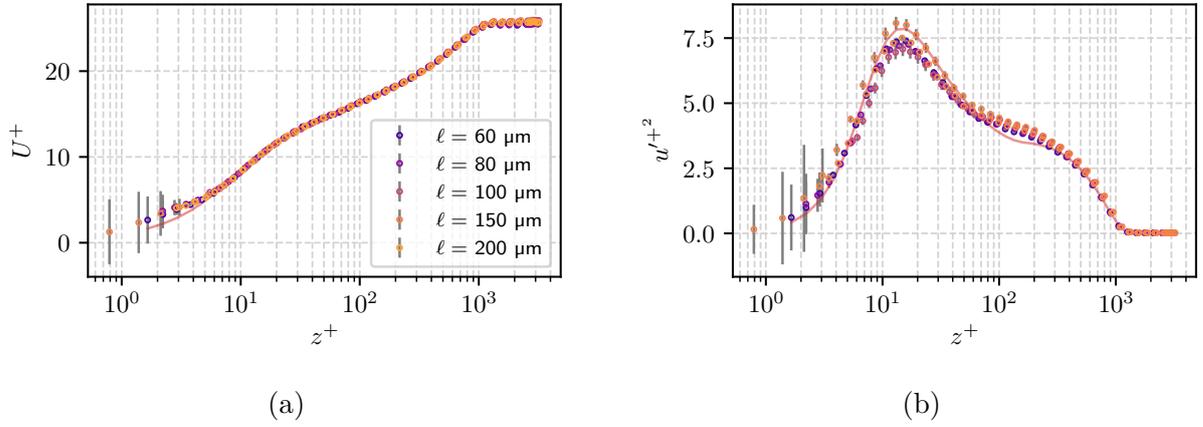


FIGURE 7.14. – (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour des μ -anems de différentes longueurs.

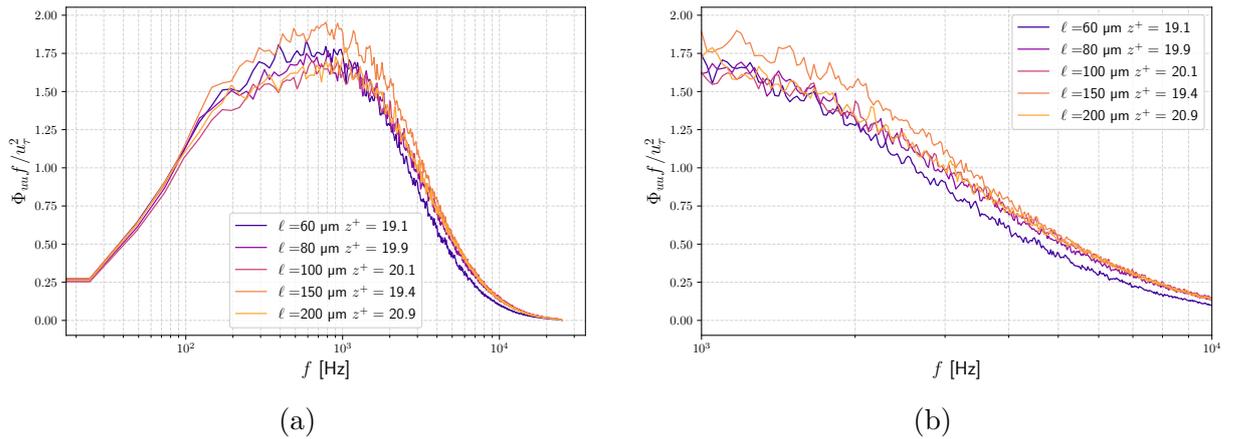


FIGURE 7.15. – (a) Spectres pré-multipliés en fonction de la fréquence pour des μ -anems de différentes longueurs à $z^+ \approx 20$. (b) Zoom sur les hautes fréquences.

conduction présentes dans ce nouveau type de micro-capteur. Il apparait clairement que le critère $\ell/d > 200$ classiquement utilisé en anémométrie à fil chaud ne s'applique pas aux configurations étudiées. En effet, pour un μ -anem de longueur $\ell = 80 \mu\text{m}$, correspondant un ratio $\ell/d^* \approx 92$, aucun effet de filtrage ne semble apparaitre. De même, le critère $\Lambda > 2.5$ énoncé par Vallikivi [81] n'est pas respecté pour cette sonde et ce type d'écoulement. Dans le cas présent, $\Lambda \approx 1.75$. Il apparait donc une nouvelle fois difficile de trouver un critère adapté pour les micro-capteurs de ce type. Cependant, ces mesures ne constituent pas une étude complète des effets de conduction dans les micro-capteurs : il serait notamment intéressant d'effectuer une étude théorique de ceux-ci pour mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et éclaircir des interrogations soulevées par certaines mesures réalisées. Il conviendrait également de réaliser une étude expérimentale complémentaire faisant varier le facteur d'amortissement du système de conditionnement par exemple, ou faisant varier les caractéristiques du pont soutenant l'élément sensible afin d'identifier plus précisément le rôle de ces paramètres a priori importants pour la mesure.

7.5. Observation de l'influence de la forme des micro-capteurs sur la mesure

Les μ -anems ont montré une réponse très satisfaisante aux fluctuations de vitesse de petites échelles en proche paroi malgré un léger filtrage potentiel de ces grandeurs. Les choix faits sur la forme du capteur peuvent cependant être débattus et, afin de tenter de valider cette géométrie, des sondages de CLT ont aussi été effectués avec les micro-capteurs profilés présentés dans le Chap.5. L'objectif est donc d'observer l'éventuel apport de telles sondes présentant un design a priori plus aérodynamique pour la mesure en proche paroi.

7.5.1. Sensibilité aux angles de mesure

Les capteurs profilés ont été testés afin d'observer leur sensibilité à l'inclinaison en suivant le même protocole que présenté dans le paragraphe 7.2.1, à savoir à l'aide du StreamLine Flow Unit de Dantec. Les résultats sont présentés Figure 7.16. La similitude de sensibilité entre le μ -anem et son homologue profilé suggère que cette modification de la forme des broches du capteur n'a que peu d'influence sur les mesures de vitesses moyennes pour cette géométrie. La sonde réalisée avec un design similaire au NSTAP de l'Université de Princeton est quant à elle plus sensible aux angles de mesures. Plus globalement, ces résultats suggèrent que ces deux sondes peuvent être utilisées dans des conditions similaires aux précédentes expérimentations, à savoir avec un angle de -6° , sans induire de biais supérieur à 1% pour la mesure de vitesse moyenne.

7.5.2. Profils des vitesses dans une CLT

Les sondages de CLT ont une nouvelle fois été réalisés à une vitesse extérieure de $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$ et les différentes sondes sont placées dans l'écoulement avec un angle de -6° . Les données récoltées lors de ces mesures sont visibles Figure 7.17. Les profils de vitesses moyennes montrent que les différentes géométries de capteur n'influencent pas significativement sur la mesure de cette grandeur dans une CLT. Cependant, en observant les profils de l'intensité turbulente, des différences notables apparaissent. Ainsi, en comparaison des mesures réalisées avec le premier capteur μ -anem, les deux sondes profilées mesurent une intensité turbulente globalement plus importante, et ce même dans la zone logarithmique de la CLT. Cette dernière observation est relativement suspecte car l'ensemble des mesures réalisées jusqu'à présent dans cette zone de la CLT (μ -anem, 55P15 et NSTAP, voir Figure 7.10) s'accordaient autour d'un même niveau. Cela suggère donc que les mesures ici obtenues avec les sondes profilées sur-estiment globalement ces fluctuations et ceux à toutes positions dans la CLT comme le montre les spectres sur la Figure 7.18 où il

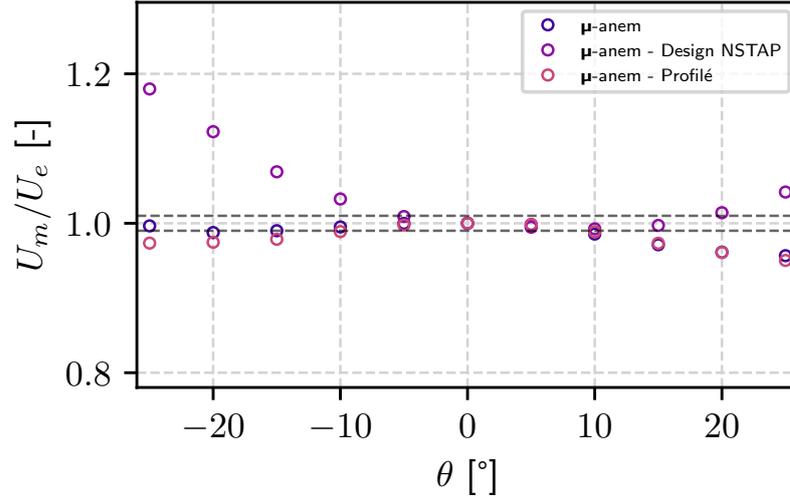


FIGURE 7.16. – Sensibilité de l'angle d'inclinaison sur la mesure de la vitesse moyenne des différents μ -anems.

est visible une amplification large-bande du signal mesuré par les sondes profilées. Ces résultats préliminaires laissent penser que le design original du μ -anem apporte une mesure moins biaisée que celles obtenues avec les autres sondes développées, suggérant ainsi qu'il est peut-être plus intéressant d'utiliser des capteurs à la géométrie simple qui permettent de réduire grandement le temps et le coût de fabrication.

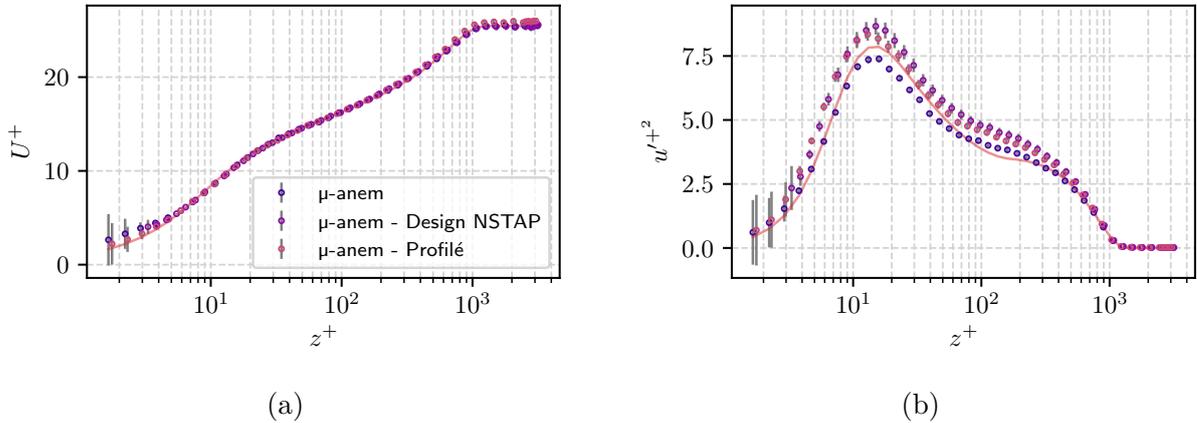


FIGURE 7.17. – (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour des μ -anems de différents designs.

Plusieurs hypothèses peuvent être émises concernant l'origine des surestimations précédemment relevées. Premièrement, il a été vu dans le Chap.5 que le procédé de fabrication mis en place pour la fabrication de ces capteurs profilés laissent souvent le pont ou l'élément sensible de Platine plus libre qu'à l'accoutumée. Ceci peut ainsi engendrer de légères vibrations ou déformations du pont lors des sondages, modifiant alors sa résistance ce qui amplifierait alors le signal mesuré. Deuxièmement et dans le même esprit, les différentes étapes de fabrications pour atteindre le profil souhaité implique de nombreuses gravures. Il est alors possible que ces gravures aient détérioré les propriétés du Nitrure de Silicium qui assure la rigidité du pont ou bien qu'il ait été

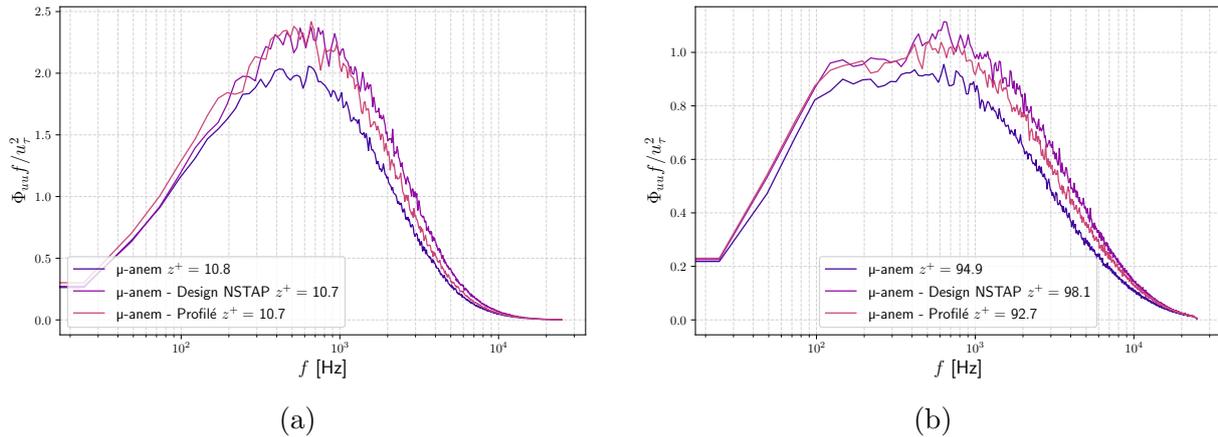


FIGURE 7.18. – Spectres pré-multipliés en fonction de la fréquence des différents designs de micro-sondes, tracés à (a) $z^+ \approx 10$ et (b) $z^+ \approx 100$.

gravé notamment lors du passage de Xénon Difluoré. En effet, ce gaz est connu pour graver le SiN_x [87]. Ceci engendrerait alors une plus grande flexibilité du pont et de l'élément sensible et à nouveau une augmentation de la résistance lors des mesures. Enfin de manière hypothétique, la présence de "marches" en fin de pente sur les capteurs profilés, et qui ne sont pas présentes dans le design NSTAP originel par exemple, pourrait ne pas être anodine et engendrer des instationarités supplémentaires entraînant alors des contraintes supplémentaires sur la structure du capteur pouvant être à l'origine de vibrations et donc amplifier le signal détecté. Si ces différentes hypothèses permettaient d'expliquer la suramplification du signal par les sondes profilées, elles sont cependant à prendre avec du recul car trop peu d'expérimentations avec ce type de sonde ont pu être menées et une étude plus approfondie est nécessaire pour bien évaluer l'importance de ces différentes sources potentielles.

7.6. Expérimentations complémentaires

Lors de ces travaux de thèse des expérimentations autres que des sondages de CLT ont pu être menées et sont ici mentionnées pour mettre en perspectives d'autres application potentielles et les limites actuellement rencontrées.

Il a par exemple été possible de tester les μ -anems dans la soufflerie transsonique S2MA du centre de l'ONERA à Modane-Avrieux. Les sondes avaient été placées aux côtés d'un film chaud afin de réaliser des mesures de taux de turbulence lors d'une campagne d'essai déjà prévue pour d'autres études. Aucune mesure n'a finalement pu être réalisée du fait que le pont suspendu des micro-capteurs se cassait aux alentours de Mach 0.2/0.25. Ceci a tout de même permis de donner une première estimation de la limite d'utilisation en vitesse des sondes développées. Afin de connaître plus précisément cette limite, un test de casse a été réalisé à l'aide du jet d'air Flow Unit qui a permis de confirmer la limite de robustesse aux alentours de 80 m s^{-1} , ce qui constitue une limite satisfaisante pour un premier prototype sur lequel aucune itération de conception n'a encore eu lieu.

Dans un tout autre contexte, les micro-capteurs ont pu être utilisés dans la soufflerie utilisée lors des travaux de thèse de Félix Ducaffy au sein du DMPE à l'ONERA. Il s'agissait ici d'une étude de transition dans une couche limite laminaire. Les sondes ont montré un comportement similaire aux mesures de vitesses moyennes effectuées avec une sonde 55P15. Cependant, de légères différences ont été observées à proximité de la paroi où il semble que les μ -anems sont plus sujets aux effets de conduction en proche paroi. Il est tout de même intéressant de noter

que l'utilisation de micro-sondes à une nouvelle fois permis d'atteindre des positions de mesure plus proches de la paroi qu'un anémomètre à fil chaud classique. Les micro-capteurs développés n'ont donc pas apporté de mesures particulièrement intéressantes pour la description de cette couche limite laminaire. Il peut cependant être espéré que pour l'étude de certains phénomènes de transition laminaire-turbulent, pendant lesquels des structures de petites échelles de type stries peuvent naître de manière transitoire, de telles sondes pourraient apporter des mesures spatialement mieux résolues.

7.7. Bilan

Les différents micro-anémomètres fabriqués ont pu être testés dans différentes conditions afin de quantifier leur performance pour la caractérisation de couches limites turbulentes sur plaque plane. En suivant un protocole expérimental maîtrisé, de nombreux résultats ont été observés. Premièrement, l'utilisation des μ -anems permet d'atteindre des positions de mesure bien plus proches de la paroi qu'avec les sondes classiques, tout en aboutissant à une mesure fidèle du profil de vitesse axiale moyenne avec de faibles angles d'inclinaisons. Ces micro-capteurs présentent de plus une meilleure résolution des petites échelles de turbulence et ont démontré une bonne répétabilité de mesure. Cette amélioration de résolution de mesure est tout de même à nuancer car elle semble être accompagnée d'un léger filtrage spectral particulièrement observé sur le pic interne de fluctuation de vitesse. A ce jour, plusieurs hypothèses restent à tester afin d'identifier clairement l'origine de ce filtrage (influence du pont, effet de conditionnement, influence de la géométrie, ...).

Les différents sondages de CLT ont aussi démontré que les micro-capteurs pouvaient être moins sensibles aux effets d'atténuation dus aux pertes par conduction. Une mesure avec une sonde de rapport $\ell/d^* \approx 92$ n'a pas semblé être affectée par ce phénomène, suggérant que le critère $\ell/d > 200$ est peu adapté pour un tel design de capteur à fil chaud.

La réalisation de sondes profilées n'a quant à elle été que partiellement concluante. Les mesures réalisées avec ces dispositifs ont mis avant qu'ils surestimaient l'intensité turbulente sur quasiment l'intégralité de la CLT. Cette surestimation pourrait être la conséquence du procédé de fabrication utilisé pour fabriquer ces sondes, qui fragiliserait le pont et l'élément sensible entraînant alors potentiellement des déformations de ceux-ci lorsqu'ils sont en écoulement.

Ces micro-capteurs ont aussi été développés dans le but d'améliorer la mesure de fluctuations de température dans un écoulement turbulent aérothermique. L'étude de la capacité des dispositifs développés à mesurer une telle quantité est détaillée dans le chapitre suivant.

Détermination de la capacité des micro-capteurs à détecter les fluctuations de température et application à la mesure simultanée vitesse/température

Le chapitre précédent a permis de caractériser les performances des micro-capteurs pour la mesure des statistiques de vitesse axiale dans une couche limite turbulente. Un second objectif d'utilisation de ces micro-sondes concerne l'amélioration de la mesure de fluctuations de température, ce qui est envisageable du fait de leurs plus faibles dimensions en comparaison des capteurs commerciaux. Ce projet a également eu pour but de créer des prototypes de capteurs comportant deux éléments sensibles afin de réaliser des mesures de vitesse et de température de façon simultanée.

Premièrement, ce chapitre vise à étudier les μ -anems conditionnés et utilisés en mode fil froid, afin de déterminer leurs réponses fréquentielles vis-à-vis d'une perturbation de température. Pour ce faire, un banc expérimental spécifique a été imaginé et mis en œuvre. Les résultats de ces expérimentations seront présentés et discutés. Dans un second temps, les prototypes de micro-capteurs à deux éléments sensibles seront brièvement étudiés dans l'objectif d'observer leur pertinence pour leur utilisation dans des écoulements aérothermiques.

Sommaire

8.1. Mesure de la température	126
8.1.1. Montage expérimental	126
8.1.2. Résultats et Discussion	127
8.2. Mesure simultanée vitesse/température	129
8.2.1. Étude des capteurs dans un jet d'air	130
8.2.2. Sondage de CLT	132
8.3. Bilan	136

8.1. Mesure de la température

Différents montages expérimentaux peuvent être imaginés pour étudier la capacité des micro-capteurs à détecter les fluctuations de température. Un cadre de travail évident serait l'étude d'un écoulement aérothermique de type jet chaud ou couche limite turbulente sur plaque chauffée par exemple. Cependant, la mise en place de telles expérimentations peut s'avérer complexe et chronophage pour obtenir un écoulement parfaitement maîtrisé et répétable. Par manque de temps et dans l'objectif de tout de même étudier les micro-capteurs en mode fil froid, une autre approche plus simple visant à perturber de manière impulsionnelle l'élément sensible de mesure a été développée.

8.1.1. Montage expérimental

Une expérimentation permettant d'avoir accès de façon relativement simple à la réponse fréquentielle d'une sonde fil froid a été proposée par Smits *et al.* [71]. Cette méthode consiste à exposer le dispositif à une source de chaleur pendant un laps de temps maîtrisé alors qu'il est placé dans un écoulement. Dans ces travaux, la source de chaleur est une lampe d'une puissance de 500 W dont le faisceau lumineux est concentré sur l'élément sensible du fil froid à l'aide d'un montage optique. Pour que l'échauffement auquel est soumis la sonde soit maîtrisé en temps et puisse s'approcher d'un forçage indiciel, le faisceau passe au travers d'un hacheur optique qu'il traverse donc à une fréquence donnée. Ainsi, le capteur est approximativement soumis à des créneaux de température. Le signal électrique de ce fil froid, conditionné en mode CCA, varie alors avec ces incréments de température et son signal est enregistré afin de déterminer sa réponse fréquentielle. Cette réponse évoluant aussi en fonction de la vitesse de l'écoulement, les capteurs sont placés face à un jet d'air dont la vitesse est contrôlée afin de déterminer cette évolution. Cette méthode de caractérisation a été utilisée par plusieurs équipes de recherche [2] [84] [57]. Dans les plus récents travaux, la lampe servant de source de chaleur a été remplacée par un laser, argon majoritairement, permettant ainsi de contrôler plus facilement le faisceau et la puissance calorifique apportée aux sondes.

Toutefois, cette méthode se trouve limitée par le temps de montée du créneau de température (typiquement de l'ordre de 0.1 ms à 1 ms), ce dernier étant piloté par le hacheur optique rotatif. De plus, l'instant exact de début d'exposition au rayonnement lumineux n'est pas précisément défini, rendant les analyses spectrales imprécises. En effet, les capteurs sont exposés à des créneaux approximatifs et non à des impulsions. Afin de mieux évaluer la physique de réponse du capteur, il a été décidé de modifier le montage présenté ci-dessus en supprimant le hacheur optique et en remplaçant le laser classiquement utilisé par un laser impulsionnel permettant d'exposer la sonde à un rayonnement uniquement pendant quelques nanosecondes. De cette manière, les fils froids peuvent être réellement soumis à une impulsion de température. Une réponse spectrale reflétant la vraie dynamique du fil couplé au conditionneur peut donc être obtenue par analyse de la réponse électrique.

Ici, le montage utilisé pour réaliser ce type d'expérimentation est visible sur la Figure 8.1. Les sondes testées sont placées face à un jet dont la vitesse est contrôlée, le StreamLine 90H02 Flow Unit présenté dans le chapitre précédent, et exposées au faisceau d'un laser PIV pulsé Quantel Twins BSL. Le laser est pointé sur les capteurs à l'aide d'un montage optique et afin de ne pas les exposer à des intensités lumineuses trop puissantes un filtre optique à densité neutre divisant l'intensité par 10 est rajouté au montage. Grâce au type de laser utilisé, les sondes sont donc ici exposées à un rayonnement (532 nm) sur une durée d'environ 10 ns. Les capteurs sont eux reliés au module fil froid Dantec StreamLine-Temperature 90C20, présenté dans le Chap.6, et alimentés par un courant de 0.1 mA. Le signal de tension issu du conditionnement CCA est ensuite acquis à l'aide d'un Oscilloscope Lecroy Wavesurfer 3024 à une fréquence de 2 MHz. Le déclenchement de l'acquisition se fait en synchronisation avec les pulsations lasers. Pour minimiser l'incertitude

des mesures effectuées, 30 acquisitions successives sont effectuées puis moyennées. Le signal ainsi obtenu est ensuite analysé par FFT (Fast Fourier Transform) afin de déterminer la réponse fréquentielle d'une sonde à une variation impulsionnelle de température.



FIGURE 8.1. – Montage expérimental utilisé pour déterminer la réponse fréquentielle des micro-capteurs en mode fil froid.

Les mesures de réponses fréquentielles ont été effectuées sur toutes les micro-sondes développées, à savoir les μ -anems de différentes longueurs et le μ -anem avec un design similaire au NSTAP. Les μ -anems profilés n'ont cependant pas été testés car ils comportent les mêmes dimensions d'élément sensible que leurs homologues non profilés. Les résultats obtenus avec ces dispositifs sont comparés avec une sonde fil froid commerciale Dantec 55P31 de dimensions $\ell = 0.4$ mm et $d = 1$ μ m ainsi qu'avec le NSTAP de l'université de Princeton et une sonde fil chaud 55P15. Ceci permettra d'observer si les micro-capteurs développés permettent d'améliorer le temps de réponse d'un capteur classiquement utilisé pour des mesures thermométriques.

Les mesures sont ici réalisées à 4 vitesses de jet différentes : 5, 10, 15 et 20 m s^{-1} . Le laser est quant à lui réglé pour délivrer une énergie de 10 mJ par pulsation. La fréquence des pulsations est de 2 Hz.

8.1.2. Résultats et Discussion

Typiquement, les réponses temporelles et fréquentielles des capteurs à une impulsion laser ont les tendances montrées Figure 8.2. Les différences de niveaux sur la réponse temporelle sont la conséquence d'une amplification du signal différente selon les sondes et aussi des résistivités distinctes. Il est visible que les réponses suivent le comportement d'un système du premier ordre comme cela pouvait être attendu, les réponses fréquentielles données montrant un plateau à basses fréquences suivi d'une atténuation progressive à partir d'une certaine fréquence. Cependant, l'étude théorique des fils froids présentée Chap.3 avait mis en avant que le diagramme de Bode de ce type de sonde pouvait laisser apparaître deux fréquences de coupure : celle de la réponse du fil ou de l'élément sensible et une autre associée à la réponse des broches. Il peut également être noté qu'une troisième fréquence de coupure associée à la réponse dynamique du pont soutenant le fil pourrait également apparaître avec le design choisi pour les micro-sondes (pont qui s'apparente ainsi à des "*stubs*" en anglais). Ces différentes fréquences de coupure ne sont cependant pas visibles sur la majorité des résultats de mesures effectuées ici. L'apparition d'une deuxième fréquence de coupure dans ces spectres n'a été observée qu'une seule fois sur toutes les mesures, pour un des μ -anems de longueur $\ell = 100$ μ m. Cette singularité rend l'interpré-

tation de cet unique résultat relativement délicate. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer le fait que ces différentes fréquences de coupures ne soient pas observées. Tout d'abord, le positionnement du faisceau laser sur la sonde pourrait éventuellement avoir un rôle. En effet, avec ce montage le faisceau lumineux ne pointe pas sur l'intégralité des broches des capteurs. Ainsi, les broches ne sont peut-être pas affectées par la perturbation thermique associée aux impulsions. De plus, les broches présentent un temps caractéristique bien plus important que le fil, et il est fortement possible que le protocole expérimental mis en œuvre ne soit pas à même de correctement caractériser la réponse basse fréquence associée qui est sûrement inférieure à 10 Hz ou 100 Hz. Enfin, il est également envisageable que l'atténuation en amplitude associée à la réponse du pont (ou "stubs") soit suffisamment faible pour ne pas être précisément détectable dans la réponse fréquentielle ici estimée, ou bien que l'ensemble fil/pont forme un système couplé dans lequel les dynamiques propres sont difficilement séparables. Une étude théorique du système d'équations régissant le comportement dynamique d'un tel capteur permettrait d'éclairer cet aspect, à la manière de l'approche proposée par Li *et al.* [52] par exemple.

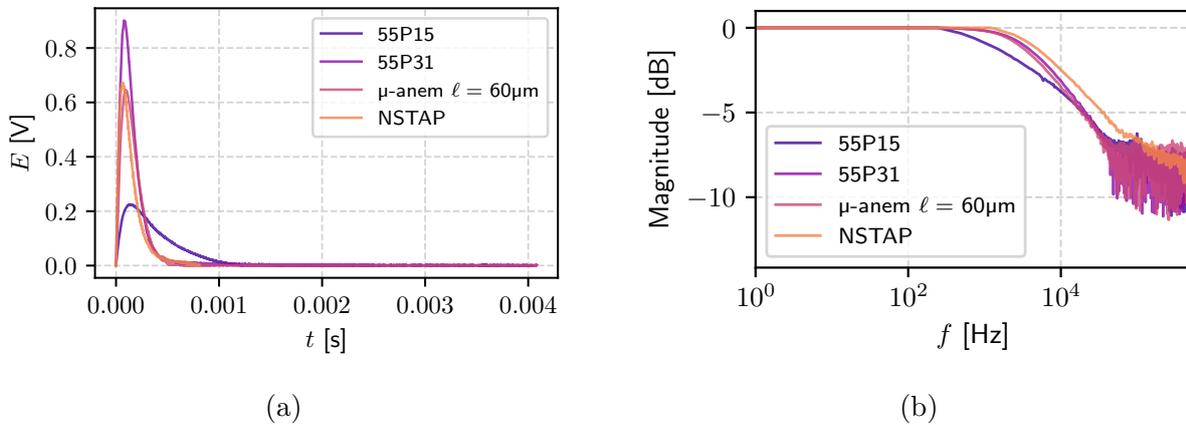


FIGURE 8.2. – Réponse (a) temporelle et (b) fréquentielle de différentes sondes à une impulsion laser pour une vitesse de $U = 20$ (m s^{-1}).

En se basant sur ces résultats, les fréquences de coupures à -3 dB des différentes sondes pour les quatre vitesses testées sont présentées dans le Tableau 8.1. Les mesures ont été réalisées plusieurs fois pour certaines sondes démontrant une bonne répétabilité. Toutefois, l'incertitude de mesure associée à cette expérimentation n'ayant pas été quantifiée, il est préférable de lire les valeurs présentées à ± 1 kHz.

Le premier résultat visible sur ce tableau est que la fréquence de coupure de toutes les sondes augmente avec la vitesse de l'écoulement, comme cela était attendu suite à l'étude théorique. En s'intéressant plus particulièrement aux différents capteurs, il apparaît tout d'abord que la 55P15 possède le plus grand temps de réponse. Ceci est la conséquence de ses dimensions plus importantes, cette sonde n'étant pas conçue pour une mesure de température. Le capteur possédant logiquement la plus haute fréquence de coupure est le NSTAP car il possède les plus faibles dimensions d'élément sensible. Étonnamment, les μ -anems ont eux une réponse fréquentielle équivalente, voire moins bonne dans certains cas, à la sonde 55P31 alors qu'ils présentent des dimensions d'élément sensible plus réduites. Ceci pourrait être la conséquence du design de ces micro-capteurs car il paraît fortement plausible que pour une mesure de température le pont suspendu ainsi que le fil soient tous deux sensibles aux variations de cette grandeur. En effet, en observant l'évolution de la fréquence de coupure en fonction de la longueur de l'élément sensible, il est visible que cette fréquence augmente avec cette dernière. Une augmentation de la taille du fil entraînant une diminution de celle du pont, cela indique donc que les deux éléments sont

Sonde	$U = 5 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	$U = 10 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	$U = 15 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	$U = 20 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$
55P15	4.2	4.6	4.6	7.3
55P31	8.3	8.5	9.3	9.5
NSTAP	11	11.1	12.2	12.2
μ -anem $\ell = 60 \text{ }\mu\text{m}$	6.6	7.3	7.8	8.3
μ -anem $\ell = 80 \text{ }\mu\text{m}$	7	7.8	8.1	8.6
μ -anem $\ell = 100 \text{ }\mu\text{m}$	7.1	7.8	8.6	8.8
μ -anem $\ell = 150 \text{ }\mu\text{m}$	7.8	9	9.1	9.5
μ -anem $\ell = 200 \text{ }\mu\text{m}$	8.5	9	9.3	9.3
μ -anem - Design NSTAP	10	10.2	10.5	11.7

TABLE 8.1. – Tableau récapitulatifs des fréquences de coupures des différentes sondes. Les fréquences sont ici exprimées en kHz.

sensibles à la température. C'est aussi la raison pour laquelle le μ -anem au design NSTAP permet d'atteindre de plus hautes fréquences de coupure que la géométrie "classique".

Ces mesures permettent donc d'avoir une première indication quant aux performances des micro-capteurs pour une mesure de température. Ainsi, de par leur géométrie, les μ -anems ne semblent pas significativement améliorer la réponse temporelle pour cette mesure en comparaison d'une sonde fil froid classique 55P31. Toutefois, les quelques essais de mesure en écoulements aérothermiques réalisés (non présentés car des difficultés avec l'installation utilisée ont rapidement été rencontrées, rendant les mesures obtenues très peu exploitables) ont mis en avant que les micro-capteurs sont bien plus robustes qu'une sonde 55P31 qui se trouve être très fragile. Afin de compléter ces premières expérimentations, il aurait été intéressant de pouvoir réaliser des mesures en écoulements aérothermiques afin d'observer une éventuelle amélioration de la résolution spatiale, notamment pour le μ -anem au design NSTAP. Malheureusement, par manque de temps cela n'a pas été possible.

8.2. Mesure simultanée vitesse/température

Comme cela avait été énoncé dans le Chap.2 pour des raisons de modélisation aérothermique et de compréhension du transport turbulent de la chaleur dans un écoulement, il peut être particulièrement intéressant de pouvoir effectuer des mesures simultanées de vitesse et de température. C'est pourquoi des premiers prototypes de micro-capteurs comportant deux éléments sensibles ont été fabriqués. Cette dernière étude expérimentale ayant également été réalisée en toute fin de projet, peu de mesures ont pu être réalisées. Cette partie vise tout de même à présenter les quelques résultats préliminaires qui ont pu être obtenus.

Lors des différentes mesures réalisées, les μ -anems à deux éléments sensibles, ici nommés T -anems, sont conditionnés de la même façon que pour les autres expérimentations présentées précédemment. Le fil chaud est donc connecté au CTA qui est réglé à l'aide du *Square wave test* tandis que le fil froid est lui branché sur le module CCA et est alimenté par un courant de 0.1 mA. Pour rappel, le fil froid a une longueur de $\ell = 100 \text{ }\mu\text{m}$ et est placé en amont du fil chaud qui a lui une longueur de $\ell = 60 \text{ }\mu\text{m}$.

8.2.1. Étude des capteurs dans un jet d'air

Dans un premier temps, ces nouveaux micro-capteurs ont été testés dans un écoulement de type jet avec le Streamline Flow Unit. Ceci a pour objectif d'observer la sensibilité du fil chaud aux angles de mesures ainsi que de pouvoir quantifier l'impact de ce dernier sur la mesure de température. Ces premiers essais sont réalisés avec un T -anem comportant un espacement entre les deux éléments sensibles $s = 120 \mu\text{m}$.

Mesure de vitesse

Comme pour les sondages de CLT, il est nécessaire d'étalonner le fil chaud pour effectuer des mesures de vitesses. Cet étalonnage a ici été réalisé avec un angle d'inclinaison de la sonde de $+10^\circ$ et dont le résultat est visible Figure 8.3. Ce graphique met avant que les points de mesures à très basse vitesse ne suivent pas parfaitement la loi de calibration de King. Ceci peut donc laisser penser que le fil froid perturbe légèrement l'écoulement.

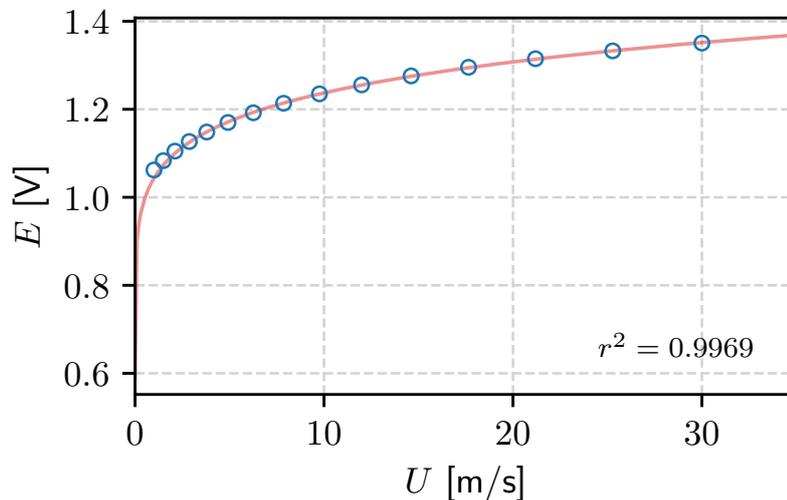


FIGURE 8.3. – Courbe de calibration d'un T -anem d'espacement $s = 120 \mu\text{m}$ à un angle de $+10^\circ$.

Afin de mieux évaluer l'influence du fil froid présent en amont du fil chaud réalisant la mesure de vitesse, une étude de la sensibilité à l'inclinaison a été effectuée. Ici ces mesures ont été réalisées à une vitesse $U_e = 20 \text{ m s}^{-1}$ et les résultats sont présentés sur la Figure 8.4. Il est visible que le T -anem est bien plus sensible aux angles de mesures que les μ -anems, des erreurs de l'ordre de 10% pouvant rapidement être atteintes. Ceci traduit très vraisemblablement la perturbation aérodynamique induite par le fil froid positionné devant le fil chaud. Ainsi, l'écart maximal avec la mesure de référence, ici à $+10^\circ$, se trouve proche de 0° , soit lorsque les deux fils sont alignés dans la direction de l'écoulement et donc lorsque le fil chaud se trouve dans le sillage du premier fil. Devant ces résultats, il sera donc préférable d'utiliser ce type de micro-sonde avec un angle d'inclinaison compris entre $+10^\circ$ et $+15^\circ$ afin de minimiser ces effets d'interaction tout en travaillant à faible angle d'inclinaison de la sonde.

Mesure de température

Aucune mesure réelle de température n'a été effectuée avec les sondes deux fils. Ceci aurait en effet nécessité une calibration de la chaîne de mesure comprenant la sonde et le module CCA.

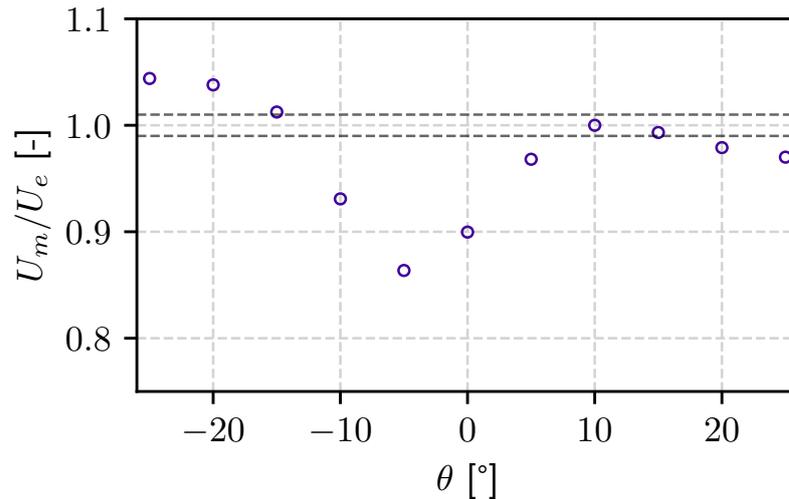


FIGURE 8.4. – Sensibilité de la mesure de la vitesse moyenne à l’angle d’inclinaison de la sonde pour un T -anem d’espacement $s = 120 \mu\text{m}$. Les lignes en pointillées représentent un intervalle de confiance à 1 %.

Cependant, l’influence de la chaleur dégagée par le fil chaud sur le signal du fil froid a été étudiée afin d’évaluer cette fois les interactions thermiques entre fils. Pour ce faire, le T -anem a été placé dans le jet d’air du FlowUnit à un angle de $+10^\circ$ puis la tension de sortie du thermomètre à fil froid a été acquise pour différentes vitesses d’écoulement avec le fil chaud alimenté en courant ainsi qu’éteint. La différence de tension entre la mesure fil chaud allumé et fil chaud éteint a alors pu être observée et est visible Figure 8.5. Cette expérimentation met en avant que, à l’exception des très basses vitesses, le biais de mesure induit par la présence de l’élément chaud est quasiment constant. Ainsi, il pourrait être envisageable de compenser cet écart de tension lors du traitement des mesures réalisées si cette influence a été calibrée en amont. Toutefois, ce résultat a été obtenu dans un écoulement laminaire. Il apparaît donc intéressant d’étudier ce phénomène dans un écoulement turbulent comportant notamment des structures tourbillonnaires.

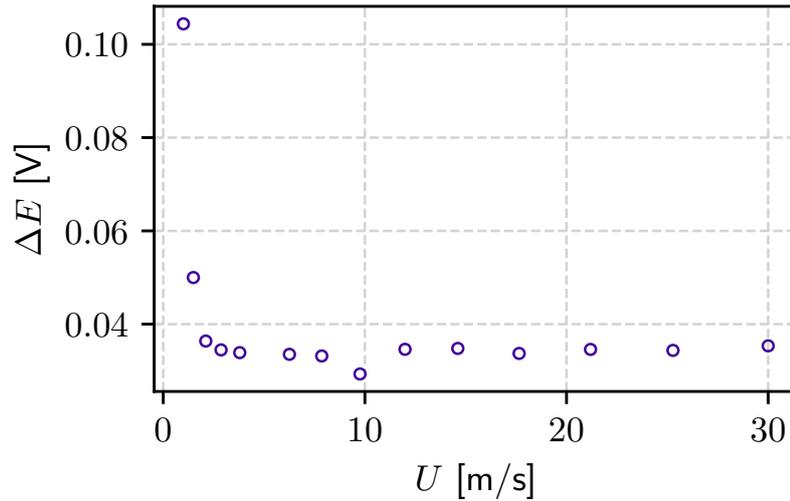


FIGURE 8.5. – Différence de tension entre une mesure fil froid obtenue avec la sonde fil chaud aval allumée et éteinte en fonction de la vitesse de l'écoulement, pour un T -anem $s = 120 \mu\text{m}$.

8.2.2. Sondage de CLT

Les T -anems ont aussi été testés pour des sondages de CLT afin de mieux déterminer l'influence de la présence des deux fils sur une mesure de vitesse et de température dans un écoulement turbulent. Ici, une sonde avec un espacement $s = 150 \mu\text{m}$ a été utilisée avec une inclinaison de $+14^\circ$ dans une couche limite de vitesse extérieure $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$.

Mesure de vitesse

Afin de savoir si la mesure de vitesse avec un micro-capteur à deux éléments sensibles est perturbée par la présence d'un fil en amont, les résultats de mesures sont comparés à ceux obtenus pour un μ -anem de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$. Ces données sont présentées Figure 8.6. Premièrement, un accord très satisfaisant entre les différents profils de vitesse axiale moyenne suggère que cette mesure n'est pas significativement perturbée par la présence du fil froid. Logiquement, le T -anem ne permet pas d'atteindre des positions aussi proches de la paroi que le μ -anem du fait que son fil chaud soit plus en retrait et que la mesure soit effectuée avec le capteur à l'endroit.

En observant maintenant les profils de fluctuations de vitesse axiale, il est visible que les mesures obtenues au moyen du capteur à deux fils sont largement surestimées dans la zone logarithmique de la CLT. Pour autant, l'amplitude du pic de fluctuations en proche paroi semble être correctement estimée. Afin de mieux comprendre le phénomène de surestimation, il est possible de s'intéresser aux densités spectrales détectées par les différentes sondes dans cette zone logarithmique, visible Figure 8.7(b). Ce graphique met en avant que le contenu spectral du T -anem présente une amplification large-bande. Le fait que cette sur-amplification apparaisse essentiellement dans la région logarithmique et externe de la couche limite, comme le confirme les observations de densité spectrale en proche paroi (Figure 8.7(a)), pourrait suggérer une importance accrue des grandes structures turbulentes dans ces effets d'interaction entre fils, mais l'analyse de cette hypothèse nécessite une étude expérimentale plus poussée.

Ce sondage de CLT met donc en avant que les sondes deux fils avec un tel espacement, $s = 150 \mu\text{m}$, permettent de réaliser des mesures de vitesses moyennes satisfaisantes, malgré

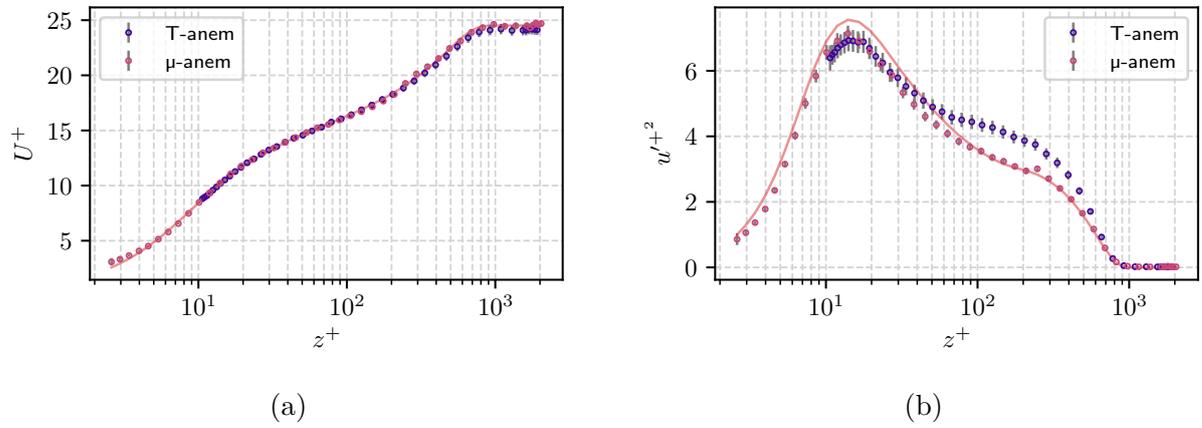


FIGURE 8.6. – (a) Profils de vitesse axiale moyenne et (b) de variance de fluctuation de vitesse axiale mesurés au moyen du T -anem $s = 150 \mu\text{m}$ et du μ -anem $\ell = 60 \mu\text{m}$, en fonction de la distance à la paroi.

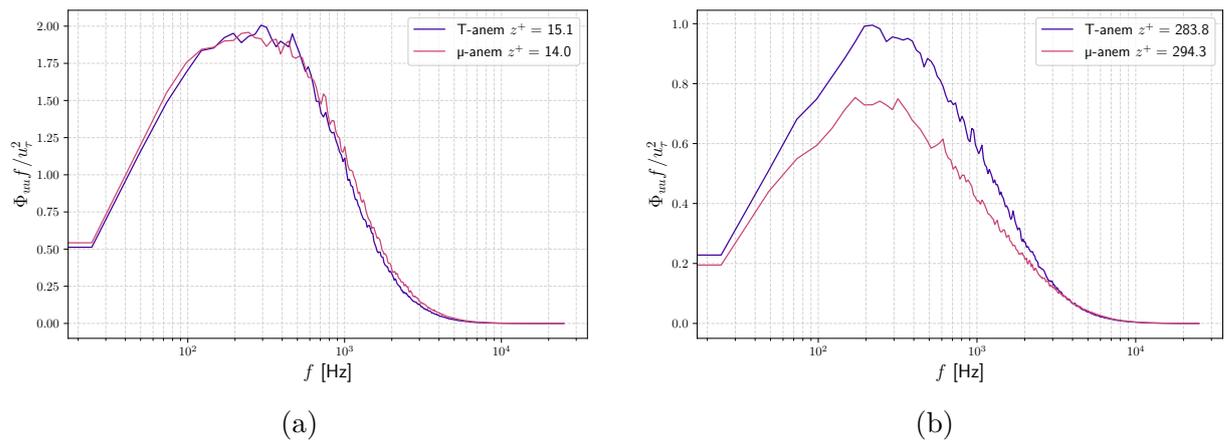


FIGURE 8.7. – Spectres pré-multipliés du T -anem et du μ -anem à une hauteur de (a) $z^+ \approx 15$ et (b) $z^+ \approx 300$.

la présence d'un fil froid en amont du fil chaud. Toutefois, elles ne semblent pas en capacités de mesurer l'intensité turbulente correctement. Une réduction de l'interaction entre les deux fils doit donc être recherchée afin de rendre une telle sonde fonctionnelle. Notamment, des écartements plus importants entre les deux fils devraient être envisagés dans une étude faisant varier ce paramètre.

Mesure de température

A l'image de ce qui a été effectué avec le FlowUnit, le signal du fil froid a été acquis lors de sondages de CLT lorsque le fil chaud est éteint et lorsque celui-ci est alimenté. Les tensions mesurées ainsi que la différence entre les deux sont présentées Figure 8.8. Il est important de noter qu'il n'est pas possible de comparer ces niveaux de tensions à ceux présentés dans la Figure 8.5 étant donné que des différences de conditionnement sont présentes entre les deux mesures, il est donc préférable d'observer ces résultats sous forme de tendance. Dans la Figure 8.8(a), la faible augmentation de la tension mesurée en s'éloignant de la paroi lorsque le fil chaud est éteint indique qu'il y a une légère augmentation de la température dans la CLT. Ceci est probablement dû à la présence de la plaque plane sur laquelle se développe la couche limite. Cependant, en observant la différence de tension entre les deux mesures, rapportée dans la Figure 8.8(b), il apparaît que la température détectée par le fil froid lorsque le fil chaud est alimenté augmente bien plus significativement, cette différence étant non constante en s'éloignant de la paroi. Ce résultat est relativement surprenant, puisque la vitesse moyenne de l'écoulement augmente aussi en s'éloignant de la paroi et, comme cela avait été montré dans la partie précédente, l'influence du chauffage du fil chaud sur la mesure de température est censée diminuer avec une augmentation de la vitesse. En réalité, il a été constaté a posteriori que ces mesures de tensions ne sont pas justes à cause d'un défaut de branchement de la sonde qui n'a pas permis d'assurer une indépendance des systèmes de conditionnement électronique. En effet, il a été observé que parfois lors du branchement des T -anems dans les porte-sondes, les supports PCB réalisés pouvaient entraîner des contacts entre les broches de branchement des deux fils et donc des interactions électroniques particulièrement visibles sur la mesure de tension du fil froid. En conséquence, pour les mesures ici rapportées, la tension délivrée par le fil froid augmente avec une augmentation de la vitesse de l'écoulement car celle du fil chaud augmente, l'intensité passant dans ce dernier devant augmenter pour maintenir une température de fil constante à plus grande vitesse d'écoulement. Ainsi, ces premiers résultats ne permettent pas de conclure sur les interactions thermiques fil chaud/fil froid dans ces conditions pour une mesure d'écoulement turbulent. Il paraît cependant raisonnable de faire l'hypothèse que la tendance précédemment observée pour des mesures en écoulement laminaire devrait être retrouvée, même si la présence de structures tourbillonnaires pourrait toutefois induire un effet supplémentaire.

Même si tous les phénomènes d'interactions sont encore à explorer pour être mieux compris, il peut être conclu que la présence des deux éléments sensibles perturbe d'une façon non négligeable la mesure des grandeurs de vitesse et de température pour l'espacement maximum choisi pour ce prototype. De plus, cette dernière étude a clairement mis en évidence que le support PCB conçu pour la connexion des sondes aux différentes électroniques présente des défauts et doit être amélioré afin d'effectuer des mesures justes et répétables. Certains résultats sont cependant encourageants et de nettes améliorations devraient être obtenues en prenant en considération ces premiers résultats.

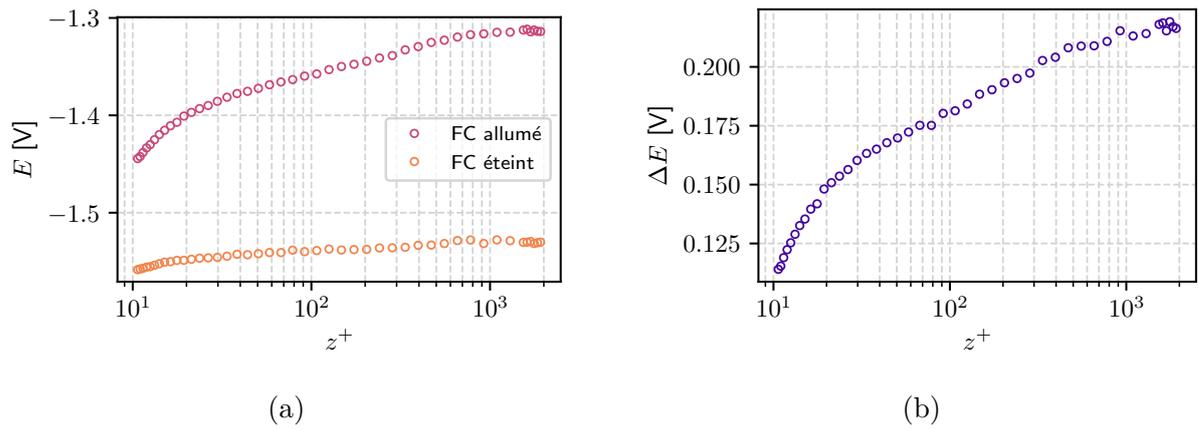


FIGURE 8.8. – (a) Profils de la tension du fil froid lorsque le fil chaud est allumé ou éteint et (b) différence de tension entre ces deux mesures en fonction de la distance à la paroi.

8.3. Bilan

Le montage expérimental qui a été développé a permis de déterminer la réponse fréquentielle des différents micro-capteurs fabriqués. Ces mesures ont mis en avant que le temps de réponse des μ -anems n'est que légèrement supérieur à celui d'une sonde commerciale classiquement utilisée pour une mesure par fil froid. Cette amélioration modeste est très probablement la conséquence de la géométrie des micro-capteurs pour lesquels à la fois le pont et le fil sont sensibles aux variations de température. En effet, le pont étant plus massif, il induit une réponse globale de la sonde plus lente que si seul le fil était présent et entraîne donc des fréquences de coupure plus faibles qu'espérées. Il apparaît donc généralement plus intéressant de considérer une sonde avec une géométrie de type NSTAP pour des mesures de fluctuations de température. Cependant, si les contraintes peuvent être un peu relâchées sur la gamme spectrale d'intérêt, les micro-sondes développées peuvent également être employées avantageusement. En effet, en comparaison d'une sonde classique de type 55P31, ces sondes se sont révélées être plus robustes, pour une réponse fréquentielle équivalente.

Les quelques études effectuées sur les micro-capteurs comportant deux éléments sensibles espacés d'une distance de 150 μm ont quant à elles permis d'aboutir à plusieurs conclusions sur ces premiers prototypes. Premièrement, la présence d'un fil en amont du fil chaud ne semble pas perturber aérodynamiquement la mesure si la sonde est placée dans une configuration optimale en écoulement laminaire, à savoir avec une inclinaison entre $+10^\circ$ et $+15^\circ$. Cependant, cette conclusion n'est pas valable pour un écoulement turbulent de type couche limite, des effets d'interactions ayant été particulièrement observés sur les mesure de fluctuations de vitesse. En effet, pour un sondage de CLT, l'intensité turbulent se trouve fortement amplifiée dans la région externe de la CLT. Concernant la mesure de température, le signal détecté par l'élément sensible utilisé en mode fil froid est systématiquement perturbé par la présence du fil chaud. Ces premiers résultats indiquent donc que les espacements choisis entre les deux éléments sensibles ne sont pas suffisants pour effectuer des mesures précises et simultanées de vitesse et de température.

Ces résultats mais aussi ceux présentés dans le chapitre précédent ont apportés une meilleure compréhension des micro-capteurs thermorésistifs appliqués aux mesures de vitesse et de température dans un écoulement turbulent. Ils ont mis en avant certains gains notables en termes de résolution de mesure, de réduction d'effet de pertes par conduction et d'augmentation de la gamme spectrale mesurée, mais ils ont également mis en évidence certaines limitations liées aux choix de conception. Ces résultats sont globalement encourageants, et permettent d'identifier de nombreuses pistes d'amélioration à apporter à ces premiers prototypes de micro-sondes.

Conclusion

Bilan

Ces travaux de thèse ont permis de développer des micro-capteurs thermorésistifs permettant de mesurer les petites échelles de fluctuations de vitesse et de température contenues dans un écoulement turbulent. Différents prototypes de sondes ont ainsi été réalisés et testés : d'une part des sondes fonctionnelles à un fil permettant d'effectuer des mesures anémométriques ou thermométriques, et d'autre part des capteurs similaires mais présentant deux fils pouvant mesurer simultanément les fluctuations de vitesse et de température.

Afin d'aboutir à cela, il a premièrement été question d'étudier différents procédés de fabrication afin de réaliser différents types de micro-sondes et d'en étudier les performances. Tout d'abord, il a été décidé de réaliser un micro-anémomètre à la géométrie non profilée ayant un pont suspendu et en son centre un élément sensible de dimensions micrométriques, le μ -anem. Cette géométrie se différencie ainsi nettement de celle choisie pour le NSTAP développé par l'université de Princeton, l'idée ici suivie étant de limiter les effets intrusifs des broches par l'utilisation du pont suspendu, à l'image des sondes utilisant un fil de Wollaston. La fabrication de ce micro-capteur s'est faite à l'aide d'un procédé de micro-fabrication relativement simple mais surtout parfaitement maîtrisé. Une série de micro-capteurs présentant plusieurs longueurs d'élément sensible ont été fabriquées afin d'observer d'éventuels effets de filtrage pouvant apparaître lorsque la distribution de température dans le fil est trop inhomogène. Il a aussi été choisi de fabriquer des micro-sondes se basant sur le même design mais comportant deux éléments sensibles avec différents espacements entre eux. Ces derniers dispositifs ont ainsi été pensés dans le but de réaliser des mesures simultanées vitesse/température et d'étudier les interactions et influences mutuelles que peuvent avoir ces deux fils.

Afin d'évaluer la pertinence métrologique de ce premier design présentant des broches assez massives, il a aussi été décidé de réaliser des sondes avec une géométrie profilée. Un tel développement a nécessité une étude approfondie de différents procédés de gravure du Silicium. Après le choix d'un process adéquat, des μ -anems profilés ont été réalisés et, étant donné les performances intéressantes du micro-capteur NSTAP de l'Université de Princeton présentées dans la littérature, un design similaire à cette sonde a aussi été fabriqué. Il peut être noté que, du fait du temps passé sur les études des différentes gravures, il n'a pas été possible d'optimiser le procédé de fabrication de ces sondes. Si à l'avenir d'autres capteurs de ce type sont fabriqués, il serait approprié d'améliorer certaines étapes.

Une fois toutes ces micro-sondes fabriquées, un support PCB spécialement conçu pour brancher les dispositifs sur les équipements usuels a été développé. Ce support a permis une utilisation simple et rapide des micro-capteurs en soufflerie. Il a ainsi été possible de mesurer les paramètres thermo-électriques de ces capteurs, paramètres essentiels pour leur utilisation lors d'une mesure. Ces premières caractérisations ont mis en avant l'amélioration de la sensibilité en température par rapport aux micro-anémomètres de la littérature. Il peut toutefois être noté que les broches de ces supports PCB sont relativement fragiles et qu'une amélioration doit être envisagée pour de futures utilisations.

Il a aussi été possible de connecter les μ -anems à une électronique CTA dans l'objectif de réaliser des mesures de vitesses. Après réglage du conditionnement, il a été observé que les capteurs développés ont une fréquence de coupure, déterminée par un test créneau, au minimum quatre fois supérieure à celle d'un anémomètre à fil chaud commercial. Ce résultat est la conséquence directe de la réduction de taille de l'élément sensible.

La dernière étape de ces travaux de thèse a été d'observer la pertinence des capteurs pour

effectuer des mesures de vitesses et de température en écoulement turbulent.

Pour réaliser des mesures de vitesses, des sondages de couches limites turbulentes ont été réalisés, en s'appuyant sur un protocole de mesure visant à réduire au maximum et à quantifier les incertitudes. Il a ainsi été possible d'identifier certaines plages d'utilisation de ces micro-sondes en termes d'angles de mesures ou de vitesse maximale d'usage. Ces expérimentations ont aussi mis en avant la réponse satisfaisante des μ -anems pour la mesure de profils de vitesses moyennes, ainsi que la possibilité de réaliser des mesures en plus proche paroi que les fils chauds classiques. Concernant la mesure des fluctuations de vitesses, les micro-capteurs ont démontré une réelle amélioration de détection en comparaison de mesures obtenues au moyen d'une sonde commerciale pour la caractérisation d'une couche limite turbulente à $Re_\tau \approx 1000$, particulièrement en proche paroi où le filtrage opéré par ce type de sonde est important du fait de la taille réduite des structures turbulentes actives dans cette région. Cependant, par comparaison à un modèle semi-empirique, il semblerait que les dispositifs réalisés filtrent légèrement le pic de fluctuations mesuré. Pour autant, cette observation est qualitative et il n'a pas été possible de certifier la réalité de ce filtrage étant donné qu'aucune mesure de référence ou simulation exacte et validée de l'écoulement étudié n'ont pu être effectuées. Il peut notamment être souligné que les mesures obtenues au moyen de la sonde NSTAP qui auraient pu servir de référence, semblent quant à elles donner des fluctuations de vitesses légèrement surestimées, potentiellement à cause d'un défaut de conditionnement. Des pistes de réflexions sur l'origine d'un possible filtrage par les μ -anems doivent donc être envisagées et sont discutées dans la partie suivante. Les capteurs ont aussi été testés dans le but d'évaluer l'importance du filtrage temporel causé par des pertes par conduction. En effectuant des mesures pour plusieurs longueurs d'élément sensible, il apparaît que ceux-ci ne sont soumis à ces effets que pour des longueurs inférieures à $\ell = 60 \mu\text{m}$.

Enfin il a été question d'observer l'impact de la géométrie de la sonde sur la mesure. Ces nouvelles mesures ont mis en avant que les différentes géométries n'influencent que marginalement la mesure de vitesse axiale moyenne. Cependant, des résultats significativement différents ont été obtenus sur les mesures de fluctuations de vitesse, les sondes profilées semblant présenter de fortes surestimations de ces quantités, dans des proportions apparaissant comme non réalistes. Une hypothèse émise qui permettrait d'expliquer ce phénomène est que le procédé de fabrication utilisé pour la réalisation de dispositifs profilés fragilise l'élément sensible, pouvant alors entraîner une suramplification des fluctuations mesurées. Là également, une étude technologique et métrologique plus importante est nécessaire. En conséquence, parmi les différents designs de sonde étudiés, le premier prototype non profilé apparaît actuellement comme le plus fiable et celui à préférentiellement mettre en œuvre malgré les quelques réserves émises sur la justesse des mesures de fluctuation de vitesse qu'il conviendra d'approfondir.

Concernant la mesure de température, la mise en œuvre d'un nouveau moyen de caractérisation optique a permis d'estimer la véritable réponse fréquentielle de différents capteurs vis-à-vis d'une perturbation de température. Cette nouvelle campagne de mesure a illustré le fait que les μ -anems ont une réponse fréquentielle du même ordre de grandeur que les sondes thermométriques à fil froid classiquement utilisées, celles-ci ayant des dimensions de fil plus réduites que pour une sonde fil-chaud. Ceci indique donc que le pont suspendu et l'élément sensible de ce type de micro-capteur contribuent tous deux à la réponse de la sonde en mode fil froid. Ainsi, de par ses dimensions plus importantes, le pont présente une inertie thermique plus grande et entraîne un temps de réponse plus long que dans le cas où seul l'élément sensible serait présent. Il est cependant intéressant de noter que si le temps de réponse obtenu avec ces micro-sondes pour une mesure thermométrique à fil froid est du même ordre de grandeur à une sonde commerciale, une réelle amélioration en terme de robustesse d'utilisation a été observée et peut justifier l'emploi plus systématique des sondes développées. Si par contre une fréquence de coupure plus importante (typiquement $> 8 \text{ kHz}$) s'avère nécessaire, ces résultats indiquent qu'il est préférable de considérer des géométries de capteur de type NSTAP. Il est noté que, par manque de temps, ces résultats n'ont pas pu être confirmés par des mesures dans un écoulement turbulent aérothermique, qui aurait également pu permettre de quantifier l'apport de telles micro-sondes en termes

de résolution spatiale de mesure, à l'image des résultats obtenus pour les mesures de vitesse.

Le dernier objectif de ces travaux de thèse était d'explorer la possibilité de mesurer simultanément la vitesse et la température. Des tests ont alors été menés sur les premiers prototypes de *T*-anems à deux fils. Les premiers résultats mettent en avant que la séparation maximale choisie entre les deux fils pour ces premiers prototypes, soit de $s = 150 \mu\text{m}$, n'est pas suffisante. En effet, il apparaît que la présence du fil froid en amont ne biaise pas la mesure de vitesse axiale moyenne au moyen du second fil, mais perturbe significativement la mesure de fluctuations de vitesse, de manière particulièrement visible dans la zone logarithmique de l'écoulement, et ce malgré l'angle d'inclinaison donné à la sonde. De même, la mesure de température réalisée au moyen du premier fil est perturbée par le chauffage du fil chaud indiquant l'existence d'un couplage aérothermique. Qui plus est, des problèmes de connexion électrique dans le support PCB à 4 broches sont parfois apparus et peuvent ainsi biaiser la mesure par fil froid. Ce premier prototype n'apparaît donc pas comme étant satisfaisant en l'état. Malgré cela, il est à noter que le concept reste prometteur et techniquement réalisable, comme le montre ces travaux. L'idée initiale était de restreindre l'espacement entre les fils afin de garantir une mesure la plus locale possible, avec un ordre de grandeur similaire à la longueur des fils. Ces résultats permettent d'écarter ce choix technique et de futurs travaux devront considérer des espacements plus importants. Ceci engendrerait alors une mesure moins locale de la vitesse et de la température et il serait alors nécessaire d'utiliser des hypothèses de transport de chaleur, comme celle de Taylor par exemple, pour correctement évaluer le flux de chaleur turbulent.

Perspectives

Les micro-capteurs thermorésistifs développés au cours de ces travaux ont démontré une amélioration de la détection des petites échelles de fluctuations en comparaison des capteurs disponibles dans le commerce et ouvrent donc la voie à leur utilisation pour des mesures dans de nombreux types d'écoulements turbulents. Devant ces résultats encourageants, il apparaît nécessaire d'aller plus loin dans la compréhension de certains phénomènes physiques mis en jeu afin de garantir la justesse de la mesure, mais également d'améliorer certains points technologiques afin de faciliter l'utilisation des sondes.

Tout d'abord d'un point de vue structurel, les supports PCB développés devraient être modifiés afin de faciliter l'utilisation et le branchement des sondes dans les différents appareils de mesure. En effet, ces supports ont montré une certaine fragilité au niveau des broches de branchement rendant parfois ce dernier peu aisé, notamment pour les *T*-anems à 4 broches. Il pourrait être envisageable de modifier ces supports pour que ceux-ci aient exactement la même forme qu'un support Dantec. Ainsi, il serait intéressant de se baser cette fois sur un support en céramique comportant toujours un méplat pour faciliter le collage des micro-capteurs mais avec des broches de connexion passant à l'intérieur de ce support. Ceci rendrait alors les supports plus robustes, plus facilement enfichables et permettrait d'éviter les problématiques de contact entre les broches observées pour les mesures avec les *T*-anems.

Concernant les appareils de mesure, il serait particulièrement intéressant de développer une électronique CTA adaptée à l'utilisation de micro-sondes afin de faciliter leur conditionnement. Ceci permettrait notamment d'observer plus précisément l'impact que l'électronique peut avoir sur les mesures de vitesses, le système de conditionnement Dantec étant clairement utilisé en limite de capacité avec les micro-sondes développées.

Ces travaux se sont principalement appuyés sur des essais et résultats expérimentaux. Pour aller plus loin dans la conception de micro-capteurs, il serait donc profitable d'allier les premiers résultats obtenus à une approche par simulation numérique. Dans un premier temps, il serait particulièrement pertinent de pouvoir observer l'intrusivité des différents designs de capteurs

dans un écoulement à l'aide de simulations instationnaires par exemple. Ceci aurait pour but de d'apporter un nouvel éclairage quantitatif sur la validité et les limites de la géométrie donnée aux μ -anems. Dans le cadre des mesures simultanées de vitesse et de température, il serait intéressant de pouvoir observer les effets de sillages dus à la présence des deux éléments sensibles que ce soit d'un point de vue aérodynamique ou thermique. Ceci permettrait d'explorer de manière plus approfondie la question de l'espacement à donner entre les deux fils pour réaliser une mesure précise et juste des fluctuations de vitesse et de température. Cependant, une telle approche peut s'avérer complexe du fait de la diversité d'échelles mises en jeu. En effet, la différence de taille entre les broches du capteur et son élément sensible entraînent une difficulté de maillage. De plus, toujours de par la finesse des échelles, les temps et coûts de calcul d'une telle simulation numérique peuvent être un frein à ces études. Certains effets d'intrusivité pourraient cependant être déjà évalués au moyen de calculs stationnaires plus accessibles.

L'approche numérique peut aussi être utilisée afin de mieux comprendre et déterminer l'éventuel filtrage que les μ -anems opèrent sur les fluctuations de vitesse en proche paroi. Il devrait en effet être possible de modéliser la réponse dynamique du fil soumis à des fluctuations de vitesse. Ceci permettrait de quantifier l'influence de la taille de l'élément sensible, du pont suspendu ou bien encore du Nitrure de Silicium. Ensuite, afin d'avoir des données de comparaisons plus représentatives que les modèles semi-empiriques utilisés pour évaluer la pertinence des profils mesurés, il apparaît comme judicieux de réaliser une simulation DNS jumelle de l'écoulement de couche limite turbulente étudié. Étant donné le nombre de Reynolds modéré de l'expérience menée ($Re_\tau \approx 1000$), une telle simulation paraît être tout à fait réalisable.

Une alternative envisageable et complémentaire à ces approches numériques pourrait être de réaliser des mesures comparatives de fluctuation de vitesse dans un écoulement turbulent simple au moyen d'une technique jugée moins intrusive afin d'étudier l'influence des différentes géométries données aux micro-capteurs. Une technique de mesure adaptée à cela pourrait être la LDV. Une telle comparaison entre LDV et μ -anem, a été envisagée lors de ces travaux de thèse pour des mesures de turbulence de grille. Un premier montage a ainsi été initié dans une seconde soufflerie où un système LDV mesurant une composante de vitesse a été installé, mais celui-ci n'a pas pu être mis en œuvre avant la fin de ces travaux de thèse. Il peut donc être envisagé qu'à court terme, des mesures complémentaires puissent être obtenues afin d'apporter des réponses aux questions d'intrusivité et de filtrage de mesure soulevées.

Pour finir, certaines étapes de fabrication peuvent être améliorées afin de mieux les contrôler, plus spécifiquement celles mises en place dans le cadre de la réalisation des capteurs profilés. L'étape qui semble la plus préjudiciable est ici la gravure au XeF_2 . En effet, il semble que les éléments sensibles sont souvent trop libérés au niveau de leur accroche les rendant potentiellement plus souples lors de la mesure, mais aussi à cause du Nitrure de Silicium qui est partiellement gravé, ce dernier restant trop longtemps dans la chambre de gravure. Ainsi, il serait envisageable d'améliorer cette étape au travers d'une modification des masques de gravures, par exemple. Il serait aussi possible de réaliser un profil plus long pour supprimer ou reculer au maximum la marche présente sur la face inférieure des capteurs, mais cette évolution géométrique paraît secondaire face aux améliorations du procédé de gravure précédemment mentionnées.

A l'issue de ces travaux, la fabrication des μ -anems est quant à elle jugée comme étant entièrement maîtrisée. Toutefois, des modifications pourraient être apportées au design des sondes afin d'améliorer leurs performances métrologiques. En effet, une modification des masques de lithographies ou une réduction des épaisseurs de couches de matériaux utilisées pourraient permettre d'améliorer la réponse fréquentielle des sondes. Il serait notamment possible de réaliser des μ -anems présentant différentes épaisseurs de SiN_x , ce qui pourrait permettre de mieux quantifier ses effets sur la réponse dynamique des sondes et donc sur la mesure des fluctuations de vitesse et de température. Il pourrait aussi être intéressant d'augmenter la largeur du pont suspendu pour observer si celui-ci joue un rôle lors de mesures de vitesse sachant qu'il influence sensiblement les mesures de température. Enfin, il peut être possible d'utiliser la lithographie électronique si

des largeurs d'éléments sensibles encore plus petites sont souhaitées même si cette modification n'apparaît pas comme prioritaire étant donnée la taille des éléments sensibles déjà atteinte. Il peut être noté que ces variations géométriques devraient, dans la mesure du possible, être guidées par une modélisation thermique et dynamique du fil suspendu comme mentionné précédemment.

Table (exhaustive) des matières

Introduction	xi
I. État de l'art et éléments de base théoriques	1
1. État de l'art des moyens métrologiques adaptés à la mesure de vitesse et de température en écoulements turbulents	3
1.1. Mesure de la vitesse d'un écoulement	4
1.1.1. Vélocimétrie laser Doppler (LDV)	4
Principe de mesure	4
Limites de la technique de mesure	6
1.1.2. Vélocimétrie par Images de Particules (PIV)	6
Principe de mesure	6
Limites de la technique de mesure	8
1.1.3. Anémométrie à fil chaud (AFC)	8
Principe de mesure	8
Limites de la technique de mesure	10
Progrès pour l'anémométrie	12
1.2. Mesure de la température	16
1.2.1. Mesure optique de la température d'un écoulement	16
Vue d'ensemble	16
Bilan sur les mesures optiques	17
1.2.2. Thermométrie à fil froid (TFF)	17
Principe de mesure	17
Limites de la technique de mesure	18
Progrès pour la thermométrie	18
1.3. Mesure simultanée vitesse/température	19
1.4. Bilan	21
2. Physique des écoulements turbulents	23
2.1. Description statistique d'un écoulement turbulent	24
2.1.1. Rappel sur les écoulements turbulents	24
2.1.2. Dynamique du fluide : Équations RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) du mouvement	24
Moyenne et décomposition de Reynolds	24
Équations	25
2.1.3. Échelles de la turbulence	26
2.1.4. Moyens de simulation pour la modélisation de la turbulence	26
2.2. La couche limite turbulente	27
2.2.1. Hypothèses et équations	28
2.2.2. Échelles caractéristiques de la couche limite turbulente	29
2.2.3. Structure spatiale de la couche limite turbulente	30
2.2.4. Représentation des profils de vitesses	31
Profil de vitesse moyenne	31
Profil des fluctuations de vitesse - Contrainte de Reynolds	31
2.3. Turbulence aérothermique	32
2.4. Bilan	33

3. Théorie des capteurs thermorésistifs pour les mesures de fluctuations de vitesse et de température	35
3.1. Bilan des échanges thermiques	36
3.2. Théorie du fil chaud	37
3.2.1. Équation de fonctionnement	37
3.2.2. Modes de fonctionnement - Électroniques de mesure	38
Principe du CTA	39
Sensibilité à la vitesse et à la température du CTA	40
3.2.3. Distribution de température dans le fil - <i>End-conduction effects</i>	41
3.2.4. Filtrage spatial d'un fil chaud	43
3.3. Théorie du fil froid	44
3.3.1. Principe de fonctionnement	44
3.3.2. Réponse fréquentielle	45
3.3.3. Filtrage spatial	46
3.4. Bilan	47
II. Étude des moyens technologiques de micro-fabrication pour le développement de micro-capteurs thermorésistifs et de leur instrumentation	49
4. Développement de capteurs thermorésistifs à l'aide des techniques de micro-fabrication	51
4.1. Choix du design des micro-capteurs	52
4.2. Substrat de base et dépôts des différentes couches de matériaux	53
4.2.1. Le substrat de Silicium	53
4.2.2. La couche de Nitrure de Silicium	54
4.2.3. La couche de Platine	54
4.2.4. Le substrat final	55
4.3. Élaboration des motifs et mise en forme 3D des micro-capteurs	55
4.3.1. Lithographie UV	55
4.3.2. Gravure des couches de Platine et de Nitrure par RIE	57
4.3.3. Mise en forme 3D par gravure humide du silicium	58
Formes et types de gravure du silicium	58
Gravure par solution de KOH	59
4.4. Procédé de fabrication complet des micro-capteurs	60
4.4.1. Conception des masques de lithographie	60
4.4.2. Résumé du procédé de fabrication	63
4.4.3. Les capteurs	64
4.5. Bilan	67
5. Étude et développement de procédés de gravure du Silicium pour la réalisation de micro-capteurs profilés	69
5.1. Principe du RIE lag	70
5.2. Études des différents procédés de gravure du Silicium	71
5.2.1. Gravure du Silicium par RIE	71
Physique de gravure	71
Protocole d'étude	73
Résultat de l'étude paramétrique	74
5.2.2. Gravure du Silicium par XeF_2	76
Principe de gravure	76
Protocole d'étude	77
Résultat de l'étude	78
5.2.3. Gravure du Silicium par DRIE	78
Physique de gravure	80

Protocole d'étude	80
Résultat de l'étude	81
5.3. Procédé de fabrication adapté à la réalisation d'un capteur profilé	83
5.3.1. Choix du procédé	83
5.3.2. Procédé de fabrication des capteurs profilés	83
5.3.3. Les capteurs profilés	85
5.4. Bilan	88
6. Assemblage et moyens technologiques de caractérisation des micro-capteurs	89
6.1. Montage des micro-capteurs	90
6.1.1. Collage des capteurs sur un support fil-chaud	90
6.1.2. Développement d'un support PCB adapté aux équipements de soufflerie	90
6.2. Caractérisation des paramètres thermorésistifs	91
6.3. Électronique de mesure	93
6.3.1. Conditionnement électronique pour les mesures de température	93
6.3.2. Conditionnement électronique par CTA pour les mesures de vitesse d'écoulement	94
L'électronique CTA	94
Réponse fréquentielle	95
6.4. Bilan	97
III. Étude expérimentale de la capacité des micro-capteurs à détecter les petites échelles de turbulence	99
7. Détermination de la capacité des micro-capteurs à détecter les fluctuations de vitesse dans un écoulement turbulent	101
7.1. Protocole expérimental	103
7.1.1. Soufflerie d'essai et moyens métrologiques	103
Présentation de la soufflerie	103
Instruments de mesure et chaîne d'acquisition	104
7.1.2. Protocole de mesure	105
Étalonnage des sondes	105
Sondage de couche limite turbulente	108
7.1.3. Évaluation des caractéristiques de la couche limite turbulente	109
7.1.4. Corrections des signaux	109
Correction en température	109
Correction du signal en proche paroi	110
7.1.5. Incertitudes de mesure	110
7.2. Sondage de couche limite avec différentes sondes pour l'évaluation des capacités des micro-capteurs	111
7.2.1. Sensibilité aux angles de mesure	111
7.2.2. Sondes et CLT étudiées	112
7.2.3. Étude de la mesure de vitesse moyenne	113
7.2.4. Étude de la mesure de fluctuations de vitesse	113
7.3. Influence de l'angle de mesure sur la détection des fluctuations de vitesses	116
7.4. Étude du rapport ℓ/d^* et des effets de conceptions	118
7.5. Observation de l'influence de la forme des micro-capteurs sur la mesure	120
7.5.1. Sensibilité aux angles de mesure	120
7.5.2. Profils des vitesses dans une CLT	120
7.6. Expérimentations complémentaires	122
7.7. Bilan	123

8. Détermination de la capacité des micro-capteurs à détecter les fluctuations de température et application à la mesure simultanée vitesse/température	125
8.1. Mesure de la température	126
8.1.1. Montage expérimental	126
8.1.2. Résultats et Discussion	127
8.2. Mesure simultanée vitesse/température	129
8.2.1. Étude des capteurs dans un jet d'air	130
Mesure de vitesse	130
Mesure de température	130
8.2.2. Sondage de CLT	132
Mesure de vitesse	132
Mesure de température	134
8.3. Bilan	136
Conclusion	137
Table (exhaustive) des matières	143
Table des figures	147
Nomenclature	151
Bibliographie	155

Table des figures

1.1.	Principe d'une mesure par LDV double faisceau [34].	4
1.2.	Schéma présentant les principaux éléments d'une mesure 2 composantes dans un plan par PIV, adapté de Bailly et Comte Bellot [6].	7
1.3.	Contour de vitesse moyenne U dans une couche limite turbulente, en fonction de la distance à la paroi z et de la position sur la plaque plane x [64].	7
1.4.	Illustration d'un fil chaud sur son support (sonde Dantec 55P15).	9
1.5.	Schéma de décomposition des vitesses dans un repère cartésien.	10
1.6.	Profil de l'intensité turbulent $\overline{u^2}$ dans une CLT en fonction de la distance à la paroi z^+ . La ligne représente une mesure pleinement résolue avec un fil chaud de longueur $\ell^+ = 22$ tandis que les cercles sont obtenus avec une sonde de longueur $\ell^+ = 115$ entraînant un filtrage [37].	11
1.7.	Les différents prototypes de NSTAP : (a) Kunkel <i>et al.</i> [45], (b) Bailey <i>et al.</i> [5] et (c) Vallikivi <i>et al.</i> [80].	14
1.8.	Profil de l'intensité turbulent $\overline{u^{2+}}$ dans une CLT en fonction de la distance à la paroi z^+ . La ligne bleue représente les mesures réalisées avec un NSTAP, la ligne noire celles avec un fil chaud de longueur $\ell^+ = 29$ et la ligne en pointillée les mesures fil chaud corrigées [66].	14
1.9.	Micro-anémomètre réalisé par Le-The <i>et al.</i> [49].	15
2.1.	Ombroscopie d'une couche de mélange entre un écoulement d'hélium et de nitrogène. Le nombre de Reynolds de l'écoulement de l'image du dessus est dix fois supérieur à l'autre écoulement. Image extraite de l'ouvrage de Bailly et Comte-Bellot [6]	26
2.2.	Représentation 2D d'une couche limite (CL) se développant sur plaque plane.	28
2.3.	Les différentes régions de l'écoulement dans une CLT.	30
2.4.	(a) Représentation d'un profil de vitesse moyenne à l'aide du modèle de Chauhan <i>et al.</i> [12] reconstitué à partir de mesure fil chaud effectués à $Re_\tau \approx 1335$. (b) Reconstitution d'un profil de fluctuations de vitesse à l'aide du modèle de Marusic et Kunkel [55]. Les profils sont tracés en variable de paroi. La numérotation définit les zones de la CLT tel que : (1) sous-couche visqueuse, (2) couche tampon, (3) zone logarithmique, (4) région de sillage et (5) écoulement libre hors de la CLT.	32
3.1.	Schéma électrique d'un CTA comprenant un pont de Wheastone et une boucle de rétroaction [10].	39
3.2.	Réponse typique à un créneau de tension d'un fil chaud opéré en mode CTA.	40
3.3.	Distribution de température le long d'un fil chaud à différents rapports ℓ/d pour une température moyenne de fil $T_m = 200$ °C à une vitesse $U = 30$ m s ⁻¹	42
3.4.	Vue schématique du système de coordonnées d'un fil chaud, adaptée de [5].	43
3.5.	Profil de l'intensité turbulent $\overline{u^2}$ dans une CLT de $Re_\tau \approx 14000$ en fonction de la distance à la paroi z/δ . Les symboles carrés représentent une mesure pleinement résolue avec un fil chaud de longueur $\ell^+ = 22$ tandis que les symboles triangles et cercles sont respectivement obtenus avec une sonde de longueur $\ell^+ = 79$ et $\ell^+ = 153$ entraînant un filtrage [37].	44
3.6.	Exemple d'une fonction de transfert $H(f)$ d'un fil froid.	46
4.1.	Schéma en 3D du micro-capteur thermorésistif avec ses dimensions.	52
4.2.	Substrat pour la réalisation des micro-capteurs.	55
4.3.	Mesure de la sur-épaisseur de résine en bord d'échantillon.	56
4.4.	Suppression des effets de bords par double développement.	57

4.5. Schéma du principe de fonctionnement d'un bâti ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching).	58
4.6. Gravure du silicium (a) isotrope, (b) anisotrope droite et (c) anisotrope.	59
4.7. (a) Représentation de l'orientation des plans cristallins $\langle 111 \rangle$ dans un wafer de Silicium $\langle 100 \rangle$ [25]. (b) Diagramme du taux de gravure latéral sur du Si $\langle 100 \rangle$ en valeur relative [58]. (c) Vue en coupe d'une cavité de Si $\langle 100 \rangle$ gravée au KOH.	60
4.8. (a) Masque du motif de Platine, (b) de SiN_x face avant et (c) de SiN_x face arrière. (d) Superposition des masques de Platine et de Nitrure, (e) zoom sur l'élément sensible.	62
4.9. (a) Superposition des masques de Platine et de Nitrure pour le capteur 2 fils, (b) zoom sur les éléments sensibles.	63
4.10. Résumé des étapes de fabrication des micro-capteurs (vue en coupe au niveau du pont suspendu).	64
4.11. Images au microscope à balayage électronique (MEB) d'un micro-capteur à un élément sensible de longueur $\ell = 150 \mu\text{m}$: (a) Vue de dessus, (b) Zoom sur l'élément sensible, (c) Vue inclinée.	65
4.12. Image MEB d'un micro-capteur à un élément sensible de longueur $\ell = 100 \mu\text{m}$ et de largeur $w = 1.5 \mu\text{m}$ face à une sonde fil chaud Dantec 55P15 de dimensions $\ell = 1.5 \text{ mm}$ et $d = 5 \mu\text{m}$	66
4.13. Images MEB d'un micro-capteur à deux éléments sensibles espacés de $s = 90 \mu\text{m}$: (a) Vue inclinée, (b) Zoom sur les éléments sensibles.	66
5.1. Principe du RIE lag.	70
5.2. Etapes de gravure pour obtenir un profil 3D sur un substrat de Silicium (a) Vallikivi <i>et al.</i> [82] (b) Bourouina <i>et al.</i> [9].	71
5.3. Schéma de la chimie d'une gravure $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{CHF}_3$ [38].	72
5.4. Influence de l'apport de SF_6 et de O_2 , de la pression et de la puissance sur la nature de la gravure (a) vitesse de gravure (b) anisotropie [50].	73
5.5. Représentation de la sur-gravure et de la profondeur de gravure.	74
5.6. Exemple d'une mesure de la profondeur de gravure et de la sur-gravure pour des ouvertures circulaires de $10 \mu\text{m}$ de diamètre et espacées de $25 \mu\text{m}$	74
5.7. Influence des paramètres RIE sur la vitesse de gravure et l'anisotropie : (a) Gravures à $p = 70 \text{ mTorr}$ et rapport $\text{SF}_6/\text{O}_2 R = 80\%$; (b) Gravures à $P = 250 \text{ W}$ et rapport $\text{SF}_6/\text{O}_2 R = 80\%$; (c) Gravures à $p = 70 \text{ mTorr}$ et à $P = 250 \text{ W}$	75
5.8. Profondeur de gravure adimensionnée par la profondeur maximale en fonction du diamètre d'ouverture dans le masque pour différents paramètres.	76
5.9. Schéma bloc d'un système de gravure XeF_2	77
5.10. Image MEB d'une gravure XeF_2 du Silicium pour une ouverture de $20 \mu\text{m}$ de diamètre.	79
5.11. Profondeur de gravure adimensionnée par la profondeur maximale en fonction du diamètre d'ouverture dans le masque pour une gravure XeF_2 et des gravures RIE avec différents paramètres.	79
5.12. Schéma d'une gravure du Silicium par procédé Bosch.	80
5.13. Image MEB d'une gravure DRIE par procédé Bosch illustrant le <i>scalloping</i>	80
5.14. Images MEB d'une gravure DRIE du Silicium : (a) pour une ouverture de $16 \mu\text{m}$ de diamètre, (b) illustrant le RIE lag pour des ouvertures rectangulaires allant de $2 \mu\text{m}$ à $60 \mu\text{m}$ de largeur d'ouverture.	82
5.15. Profondeur de gravure adimensionnée par la profondeur maximale en fonction du diamètre d'ouverture dans le masque pour une gravure DRIE, une gravure XeF_2 et des gravures RIE avec différents paramètres.	82
5.16. (a) Superposition des masques de Platine et Nitrure pour le capteur profilé avec la géométrie du NSTAP, (b) zoom sur l'élément sensible.	84

5.17. Image MEB de la face arrière d'un échantillon de la géométrie du NSTAP pour une pente de 7° après la gravure DRIE.	84
5.18. Résumé des étapes de fabrication des micro-capteurs profilés.	85
5.19. Images MEB des micro-capteurs profilés de la géométrie du NSTAP. (a) Sonde avec une pente de 15° vue du dessus, (b) vue d'en dessous. (c) Sonde avec une pente de 7° vue du dessus, (d) vue d'en dessous.	86
5.20. Images MEB des micro-capteurs profilés de la géométrie des dispositifs présentés dans le Chap.4. (a) Sonde avec une pente de 15° vue du dessus, (b) vue d'en dessous. (c) Sonde avec une pente de 7° vue du dessus, (d) vue d'en dessous.	87
6.1. (a) Photo du NSTAP et du support sur lequel il est collé, (b) zoom sur la sonde.	90
6.2. Photos des supports PCB pour des sondes (a) à un élément sensible et (b) à deux éléments sensibles. Les supports ont une épaisseur de 0.9 mm.	91
6.3. Image de micro-soudures pour une sonde à un élément sensible.	91
6.4. Outils de caractérisation des paramètres thermo-électriques R_0 et χ	92
6.5. Température d'un μ -anem de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$ en fonction du courant injecté.	93
6.6. Schéma électrique du module Dantec StreamLine-Temperature 90C20.	94
6.7. Schéma de principe d'un CTA comprenant un pont de Wheastone et une boucle de rétroaction [10].	95
6.8. Modules électroniques utilisés pour les mesures de vitesse et de température.	95
6.9. (a) Réponse temporelle et (b) fréquentielle à un <i>Square wave test</i> d'un μ -anem de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$, d'un fil chaud Dantec 55P15 et du NSTAP.	96
7.1. Soufflerie S118-2.	103
7.2. Vue de la veine d'essai.	104
7.3. Courbe de calibration d'un μ -anem de longueur $\ell = 60 \mu\text{m}$ suivant la loi de King. Les cercles représentent les points de calibration et la courbe la loi de King déterminée par méthode inverse.	106
7.4. Module Flow Unit Dantec.	107
7.5. Comparaison de deux courbes de calibration effectuées en soufflerie et à l'aide du module Flow Unit.	107
7.6. Photo d'un μ -anem touchant la paroi de la plaque plane lors de la détermination du "zéro paroi".	108
7.7. Courbe de diagnostic de la CLT. Les mesures ont été effectuées avec une sonde fil chaud 55P15 à $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$. La ligne en pointillée représente le comportement asymptotique présenté par San Miguel <i>et al.</i> [67].	110
7.8. Sensibilité de la mesure de la vitesse moyenne à l'angle d'inclinaison de la sonde. Les lignes en pointillées représentent un intervalle de confiance à 1 %.	112
7.9. Profils de vitesses moyennes en fonction de la distance à la paroi pour (a) $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$ et (b) $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$. Les courbes pleines représentent les profils de vitesses moyennes obtenus à l'aide du modèle de Chauhan <i>et al.</i> [12].	114
7.10. Profils de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour (a) $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$, $Re_\tau = 1002$ et (b) $U_\infty = 25 \text{ m s}^{-1}$, $Re_\tau = 1335$. Les courbes pleines représentent les profils de l'intensité turbulente obtenus à l'aide du modèle de Marusic et Kunkel [55].	114
7.11. Spectres pré-multipliés en fonction de la fréquence. Tracés obtenu pour une vitesse $U_\infty = 15 \text{ m s}^{-1}$	115
7.12. (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour un μ -anem en position inversée.	117
7.13. (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour un μ -anem en position droite.	117
7.14. (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour des μ -anems de différentes longueurs.	119

7.15. (a) Spectres pré-multipliés en fonction de la fréquence pour des μ -anems de différentes longueurs à $z^+ \approx 20$. (b) Zoom sur les hautes fréquences.	119
7.16. Sensibilité de l'angle d'inclinaison sur la mesure de la vitesse moyenne des différents μ -anems.	121
7.17. (a) Profils de vitesses moyennes et (b) de l'intensité turbulente en fonction de la distance à la paroi pour des μ -anems de différents designs.	121
7.18. Spectres pré-multipliés en fonction de la fréquence des différents designs de microsondes, tracés à (a) $z^+ \approx 10$ et (b) $z^+ \approx 100$	122
8.1. Montage expérimental utilisé pour déterminer la réponse fréquentielle des micro-capteurs en mode fil froid.	127
8.2. Réponse (a) temporelle et (b) fréquentielle de différentes sondes à une impulsion laser pour une vitesse de $U = 20$ (m s^{-1}).	128
8.3. Courbe de calibration d'un T -anem d'espacement $s = 120$ μm à un angle de $+10^\circ$	130
8.4. Sensibilité de la mesure de la vitesse moyenne à l'angle d'inclinaison de la sonde pour un T -anem d'espacement $s = 120$ μm . Les lignes en pointillées représentent un intervalle de confiance à 1 %.	131
8.5. Différence de tension entre une mesure fil froid obtenue avec la sonde fil chaud aval allumée et éteinte en fonction de la vitesse de l'écoulement, pour un T -anem $s = 120$ μm	132
8.6. (a) Profils de vitesse axiale moyenne et (b) de variance de fluctuation de vitesse axiale mesurés au moyen du T -anem $s = 150$ μm et du μ -anem $\ell = 60$ μm , en fonction de la distance à la paroi.	133
8.7. Spectres pré-multipliés du T -anem et du μ -anem à une hauteur de (a) $z^+ \approx 15$ et (b) $z^+ \approx 300$	133
8.8. (a) Profils de la tension du fil froid lorsque le fil chaud est allumé ou éteint et (b) différence de tension entre ces deux mesures en fonction de la distance à la paroi.	135

Nomenclature

Lettres grecques

α	Coefficient de diffusivité thermique ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
δ	Épaisseur de couche limite (m)
η	Variable de grandeur externe de couche limite (-)
Θ	Scalaire de température (K)
χ	Coefficient de résistivité thermique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
λ	Longueur d'onde (m)
Λ	Critère de dimensionnement pour les pertes par conduction (-)
μ	Viscosité dynamique (Pa s)
ν	Viscosité cinématique ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
Π	Paramètre de sillage (-)
Φ_{uu}	Densité spectrale de puissance ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
ρ	Masse volumique (kg m^{-3})
τ	Temps de réponse (s)
τ_{ij}	Tenseur de contraintes visqueuses (N m^{-2})
τ_w	Contrainte de frottement pariétale (N m^{-2})
ξ	Facteur d'amortissement (-)

Lettres latines

a	Rapport de surchauffe (-)
A_w	Section de coupe du fil (m^2)
c	Capacité calorifique (J K^{-1})
C_f	Coefficient de frottement pariétal (-)
d	Diamètre de l'élément sensible du fil chaud/froid (m)
d^*	Diamètre équivalent d'un élément sensible en parallélépipède (m)
e	Épaisseur d'élément sensible (m)
E	Tensions (V)
f	Fréquence (Hz)
f_c	Fréquence de coupure (Hz)
h	Coefficient d'échange convectif ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
H	Facteur de forme d'une couche limite (-)
$H(f)$	Fonction de transfert
I	Intensité du courant (A)
k	Conductivité thermique ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$)
ℓ	Longueur d'élément sensible du fil chaud/froid ou du micro-capteur (m)
ℓ_η	Longueur de Kolmogorov (m)
ℓ_ν	Longueur visqueuse (m)
L	Longueur caractéristique de l'écoulement (m)
m	Masse (kg)
M	Nombre de Mach (-)
\mathcal{M}_w	Temps de réponse d'un fil froid (s)
Nu	Nombre de Nusselt (-)
P	Pression du fluide (Pa)
P_w	Périmètre du fil (m)
Pr	Nombre de Prandtl (-)
r	Constante des gaz parfaits ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

R	Résistance électrique (Ω)
R_0	Résistance électrique à 0 °C (Ω)
Re	Nombre de Reynolds (-)
Re_τ	Nombre de Reynolds de frottement (-)
R_{ij}	Tenseur des contraintes de Reynolds ($N m^{-2}$)
s	Espacement entre fils (m)
T	Température (K ou °C)
U	Vitesse axiale ($m s^{-1}$)
U_∞	Vitesse extérieure de la couche limite ($m s^{-1}$)
U_e	Vitesse d'un écoulement ($m s^{-1}$)
u_τ	Vitesse de frottement ($m s^{-1}$)
W	Vitesse transverse ($m s^{-1}$)
w	Largeur d'élément sensible (m)
W	Vitesse normale ($m s^{-1}$)
x	Coordonnée axiale à la paroi (m)
y	Coordonnée transverse à la paroi (m)
z	Coordonnée verticale à la paroi (m)

Indices

atm	Grandeur atmosphérique
$corr$	Grandeur corrigée
f	Grandeur relative au fluide
m	Grandeur mesurée
w	Grandeur relative au fil

Exposant

'	Grandeur fluctuante
-	Grandeur moyenne
+	Variable de paroi

Acronymes

AFC	Anémométrie à Fil Chaud
ARDE	Aspect Ratio Dependant Etching
BOS	Background-Oriented Schlieren
CARS	Coherent Anti-Stokes Raman Scattering
CLT	Couche Limite Turbulente
CCA	Constant Current Anemometer
CTA	Constant Temperature Anemometer
CVA	Constant Voltage Anemometer
DMPE	Département Pour l'énergétique
DNS	Direct Numerical Simulation
DRIE	Deep Reactive Ion Etching
EBPVD	Electron Beam Physical Vapor Deposition
FFT	Fast Fourier Transform
ICP	Inductively Coupled Plasma
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LES	Large Eddy Simulation
LIF	Laser Induced Fluorescence
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
MEB	Microscope Électronique à Balayage

MEMS	MicroElectroMechanical Systems
NSTAP	NanoScale Thermal Anemometry Probe
IES	Institut d'Électronique et des Systèmes
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
PIV	Particule Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RIE	Reactive Ion Etching
RMS	Root-Mean Square
TFF	Thermométrie à Fil Froid
UV	UltraViolet

Bibliographie

- [1] M Ardehali. Effect of image force on ion current density in plasma discharges. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, 24(1) :5, 1996.
- [2] Gilad Arwatz, Carla Bahri, Alexander J Smits, and Marcus Hultmark. Dynamic calibration and modeling of a cold wire for temperature measurement. *Meas. Sci. Technol.*, page 12, 2013.
- [3] Gilad Arwatz, Yuyang Fan, Carla Bahri, and Marcus Hultmark. Development and characterization of a nano-scale temperature sensor (T-NSTAP) for turbulent temperature measurements. *Measurement Science and Technology*, 26(3) :035103, March 2015.
- [4] Mohammed Ashraf, Sree V. Sundararajan, and Gianluca Greci. Low-power, low-pressure reactive-ion etching process for silicon etching with vertical and smooth walls for mechano-biology application. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 16(3) :034501, July 2017.
- [5] Sean C. C. Bailey, Gary J. Kunkel, Marcus Hultmark, Margit Vallikivi, Jeffrey P. Hill, Karl A. Meyer, Candice Tsay, Craig B. Arnold, and Alexander J. Smits. Turbulence measurements using a nanoscale thermal anemometry probe. *Journal of Fluid Mechanics*, 663 :160–179, November 2010.
- [6] Christophe Bailly and Geneviève Comte-Bellot. *Turbulence*. Experimental Fluid Mechanics. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [7] Florian Baudry. *Étude et réalisation d'accéléromètres thermiques d'étendue de mesure et bande passante supérieures à 10 000g et 5 kHz respectivement*. PhD Thesis, 2019.
- [8] Frank Beyrau, Benoît Fond, and Christopher Abram. A summary of new developments in phosphor thermometry. *Measurement Science and Technology*, 32(12) :120101, December 2021.
- [9] T. Bourouina, T. Masuzawa, and H. Fujita. The MEMSNAS Process : Microloading Effect for Micromachining 3-D Structures of Nearly All Shapes. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13(2) :190–199, April 2004.
- [10] H.H. Bruun. Hot-Wire Anemometry : Principles and Signal Analysis. *Measurement Science and Technology*, 7, 1995.
- [11] I.W.T. Chan, K.B. Brown, R.P.W. Lawson, A.M. Robinson, Yuan Ma, and D. Strembicke. Gas phase pulse etching of silicon for MEMS with xenon difluoride. In *Engineering Solutions for the Next Millennium. 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Cat. No.99TH8411)*, volume 3, pages 1637–1642, Edmonton, Alta., Canada, 1999. IEEE.
- [12] Kapil Chauhan, Hassan Nagib, and Peter Monkewitz. On the Composite Logarithmic Profile in Zero Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers. In *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, January 2007. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [13] Kapil A Chauhan, Peter A Monkewitz, and Hassan M Nagib. Criteria for assessing experiments in zero pressure gradient boundary layers. *Fluid Dynamics Research*, 41(2) :021404, April 2009.
- [14] C. Chin, N. Hutchins, A. Ooi, and I. Marusic. Spatial resolution correction for hot-wire anemometry in wall turbulence. *Experiments in Fluids*, 50(5) :1443–1453, May 2011.

-
- [15] P.B. Chu, J.T. Chen, R. Yeh, G. Lin, J.C.P. Huang, B.A. Warneke, and S.J. Pister. Controlled pulse-etching with xenon difluoride. In *Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)*, volume 1, pages 665–668, Chicago, IL, USA, 1997. IEEE.
- [16] G Comte-Bellot. Hot-Wire Anemometry. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 8(1) :209–231, January 1976.
- [17] Genevieve Comte-Bellot and Garimella R. Sarma. Constant Voltage Anemometer Practice in Supersonic Flows. *AIAA Journal*, 39(2) :261–270, February 2001.
- [18] Stanley Corrsin. Extended Applications of the Hot-Wire Anemometer. *Review of Scientific Instruments*, 18(7) :469–471, July 1947.
- [19] Johann COURTEAUD. *Etude, réalisation et optimisation d'un accéléromètre thermique à convection*. PhD Thesis, Université de Montpellier II, 2006.
- [20] Jean Cousteix. *Turbulence et couche limite*. Collection La Chevêche. CEPADUES-Ed, Toulouse, 1989.
- [21] John W. Daily. Laser induced fluorescence spectroscopy in flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23(2) :133–199, January 1997.
- [22] Frédéric Dehoux. *Modélisation statistique des écoulements turbulents en convection forcée, mixte et naturelle*. PhD Thesis, 2012.
- [23] Ripon Kumar Dey, Huseyin Ekinici, and Bo Cui. Effects of mask material conductivity on lateral undercut etching in silicon nano-pillar fabrication. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 38(1) :012207, January 2020.
- [24] Franz Durst, Jun-Mei Shi, and Michael Breuer. Numerical Prediction of Hot-Wire Corrections Near Walls. *Journal of Fluids Engineering*, 124(1) :241–250, March 2002.
- [25] Miko Elwenspoek and Henri V. Jansen. *Silicon Micromachining Cambridge University Press*. 1999.
- [26] P Freymuth. Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 10(7) :705–710, July 1977.
- [27] Peter Freymuth. Review : A Bibliography of Thermal Anemometry. *Journal of Fluids Engineering*, 102(2) :152–159, June 1980.
- [28] Matthew K. Fu, Yuyang Fan, and Marcus Hultmark. Design and validation of a nanoscale cross-wire probe (X-NSTAP). *Experiments in Fluids*, 60(6) :99, June 2019.
- [29] Fukang Jiang, Yu-Chong Tai, Chih-Ming Ho, R. Karan, and M. Garstenauer. Theoretical and experimental studies of micromachined hot-wire anemometers. In *Proceedings of 1994 IEEE International Electron Devices Meeting*, pages 139–142, San Francisco, CA, USA, 1994. IEEE.
- [30] Louis Fulachier. Hot-Wire Measurements in Low Speed Heated Flow. In Bengt Wulff Hansen, editor, *Proceedings of the Dynamic Flow Conference 1978 on Dynamic Measurements in Unsteady Flows*, pages 465–487. Springer Netherlands, Dordrecht, 1978.
- [31] Alexandra Garraud. *Amélioration des performances et nouveau concept de détecteurs de capteurs inertiels à détection thermique*. Theses, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2011.

- [32] Christopher Geschwindner, Katharina Westrup, Andreas Dreizler, and Benjamin Böhm. Ultra-high-speed time-resolved PIV of turbulent flows using a continuously pulsing fiber laser. *Experiments in Fluids*, 63(4) :75, April 2022.
- [33] Cécile Ghouila-Houri, Quentin Gallas, Eric Garnier, Alain Merlen, Romain Viard, Abdelkrim Talbi, and Philippe Pernod. High temperature gradient calorimetric wall shear stress micro-sensor for flow separation detection. *Sensors and Actuators A : Physical*, 266 :232–241, October 2017.
- [34] Pierre Grenson. *Caractérisation expérimentale et simulations numériques d'un jet chaud impactant*. PhD thesis, INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (ISAE), December 2016.
- [35] Marcus Hultmark, Anand Ashok, and Alexander J Smits. A new criterion for end-conduction effects in hot-wire anemometry. *Measurement Science and Technology*, 22(5) :055401, May 2011.
- [36] N. Hutchins, J. P. Monty, M. Hultmark, and A. J. Smits. A direct measure of the frequency response of hot-wire anemometers : temporal resolution issues in wall-bounded turbulence. *Experiments in Fluids*, 56(1) :18, January 2015.
- [37] N. Hutchins, T. B. Nickels, I. Marusic, and M. S. Chong. Hot-wire spatial resolution issues in wall-bounded turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 635 :103–136, September 2009.
- [38] Henri Jansen, Meint de Boer, Johannes Burger, Rob Legtenberg, and Miko Elwenspoek. The black silicon method II :The effect of mask material and loading on the reactive ion etching of deep silicon trenches. *Microelectronic Engineering*, 27(1-4) :475–480, February 1995.
- [39] Henri Jansen, Meint de Boer, Remco Wiegerink, Niels Tas, Edwin Smulders, Christina Neagu, and Miko Elwenspoek. BSM 7 : RIE lag in high aspect ratio trench etching of silicon. *Microelectronic Engineering*, 35(1-4) :45–50, February 1997.
- [40] Henri Jansen, Han Gardeniers, Meint de Boer, Miko Elwenspoek, and Jan Fluitman. A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6(1) :14–28, March 1996.
- [41] Finn Ekman Jørgsen. HOW TO MEASURE TURBULENCE WITH HOT-WIRE ANEMOMETERS. page 73, 2002.
- [42] Louis Vessot King. XII. On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid : Determination of the convection constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 214(509-522) :373–432, January 1914.
- [43] Katherine Kokmanian, Diogo C. Barros, Marcus Hultmark, and Pierre Dupont. Heat transfer measurements of a nanoscale hot-wire in supersonic flow. *Experiments in Fluids*, 62(8) :171, August 2021.
- [44] Min Koo. *Effets de température dans les procédés de gravure plasma : Aspects fondamentaux et applications*. Theses, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, December 2008.
- [45] Gary Kunkel, Craig Arnold, and Alexander Smits. Development of NSTAP : Nanoscale Thermal Anemometry Probe. In *36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, San Francisco, California, June 2006. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [46] C. F. Lange, F. Durst, and M. Breuer. Correction of hot-wire measurements in the near-wall region. *Experiments in Fluids*, 26(5) :475–477, April 1999.

-
- [47] John C. LaRue, Tom Deaton, and Carl H. Gibson. Measurement of high-frequency turbulent temperature. *Review of Scientific Instruments*, 46(6) :757–764, June 1975.
- [48] P. Lavoie, G. Avallone, F. De Gregorio, G. P. Romano, and R. A. Antonia. Spatial resolution of PIV for the measurement of turbulence. *Experiments in Fluids*, 43(1) :39–51, July 2007.
- [49] Hai Le-The, Christian KÜchler, Albert van den Berg, Eberhard Bodenschatz, Detlef Lohse, and Dominik Krug. Fabrication of freestanding Pt nanowires for use as thermal anemometry probes in turbulence measurements. *Microsystems & Nanoengineering*, 7(1) :28, December 2021.
- [50] Rob Legtenberg, Henri Jansen, Meint de Boer, and Miko Elwenspoek. Anisotropic Reactive Ion Etching of Silicon Using SF₆/O₂/CHF₃ Gas Mixtures. *J. Electrochem. Soc.*, 142(1) :9, 1995.
- [51] L. Löfdahl, G. Stemme, and B. Johansson. Silicon based flow sensors used for mean velocity and turbulence measurements. *Experiments in Fluids*, 12-12(4-5) :270–276, March 1992.
- [52] J D Li. Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements. *Measurement Science and Technology*, 15(9) :1835–1847, September 2004.
- [53] P. M. Ligrani and P. Bradshaw. Spatial resolution and measurement of turbulence in the viscous sublayer using subminiature hot-wire probes. *Experiments in Fluids*, 5(6) :407–417, November 1987.
- [54] P M Ligrani and P Bradshaw. Subminiature hot-wire sensors : development and use. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 20(3) :323–332, March 1987.
- [55] Ivan Marusic and Gary J. Kunkel. Streamwise turbulence intensity formulation for flat-plate boundary layers. *Physics of Fluids*, 15(8) :2461–2464, August 2003.
- [56] Carlos H. Mastrangelo, Yu-Chong Tai, and Richard S. Muller. Thermophysical properties of low-residual stress, Silicon-rich, LPCVD silicon nitride films. *Sensors and Actuators A : Physical*, 23(1-3) :856–860, April 1990.
- [57] Bertrand Mercier, Emmanuel Jondeau, Thomas Castelain, Yuta Ozawa, Christophe Bailly, and Geneviève Comte-Bellot. High frequency temperature fluctuation measurements by Rayleigh scattering and constant-voltage cold-wire techniques. *Experiments in Fluids*, 60(7) :110, July 2019.
- [58] Prem Pal and Kazuo Sato. A comprehensive review on convex and concave corners in silicon bulk micromachining based on anisotropic wet chemical etching. *Micro and Nano Systems Letters*, 3(1) :6, December 2015.
- [59] P Paranthoën and J.C. Lecordier. Mesures de température dans les écoulements turbulents. *Revue Générale de Thermique*, 35(413) :283–308, May 1996.
- [60] A. E. Perry and P. A. Libby. Hot-Wire Anemometry. *Journal of Applied Mechanics*, 50(1) :237–238, March 1983.
- [61] C. Petit, P. Paranthoen, and J.C. Lecordier. Influence of Wollaston wire and prongs on the response of cold wires at low frequencies. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 8(4) :281–291, July 1981.
- [62] Markus Raffel. Background-oriented schlieren (BOS) techniques. *Experiments in Fluids*, 56(3) :60, March 2015.
- [63] Johnson Robert, Holmes James, and Foster Ronald. Adhesion layer for platinum sensor based sensor. 1990.

- [64] Zhoushun Ruan, C. M. Silva, Nicholas Hutchins, and Ivan Marusic. PIV experiments to examine the manipulation of large-scale structures using cross-flow jets in a turbulent boundary layer. 2019.
- [65] M. Samie, N. Hutchins, and I. Marusic. Revisiting end conduction effects in constant temperature hot-wire anemometry. *Experiments in Fluids*, 59(9) :133, September 2018.
- [66] M. Samie, I. Marusic, N. Hutchins, M. K. Fu, Y. Fan, M. Hultmark, and A. J. Smits. Fully resolved measurements of turbulent boundary layer flows up to. *Journal of Fluid Mechanics*, 851 :391–415, September 2018.
- [67] C. Sanmiguel Vila, R. Vinuesa, S. Discetti, A. Ianiro, P. Schlatter, and R. Örlü. On the identification of well-behaved turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 822 :109–138, July 2017.
- [68] Garimella R. Sarma. Transfer function analysis of the constant voltage anemometer. *Review of Scientific Instruments*, 69(6) :2385–2391, June 1998.
- [69] Garimella R. Sarma, Genevieve Comte-Bellot, and Thierry M. Faure. Software corrected hot wire thermal lag for the constant voltage anemometer featuring a constant bandwidth at the selected compensation setting. *Review of Scientific Instruments*, 69(9) :3223–3231, September 1998.
- [70] A. J. Smits, J. Monty, M. Hultmark, S. C. C. Bailey, N. Hutchins, and I. Marusic. Spatial resolution correction for wall-bounded turbulence measurements. *Journal of Fluid Mechanics*, 676 :41–53, June 2011.
- [71] A J Smits, A E Perry, and P H Hoffmann. The response to temperature fluctuations of a constant-current hot-wire anemometer. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 11(9) :909–914, September 1978.
- [72] Alexander J Smits and Marcus Hultmark. Nanoscale Instrumentation for Measuring Turbulence. In *Proceedings of the 19th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 2014.
- [73] H D vom Stein and H J Pfeifer. A Doppler Difference Method for Velocity Measurements. *Metrologia*, 5(2) :59–61, April 1969.
- [74] Tsengyou Syau, B Jayant Baliga, and Raymond W Hamaker. Reactive Ion Etching of Silicon Trenches Using SF₆/O₂ Gas Mixtures. *J. Electrochem. Soc.*, 138(10) :6, 1991.
- [75] P. Temple-Boyer, C. Rossi, E. Saint-Etienne, and E. Scheid. Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN_x films deposited from silane and ammonia. *Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films*, 16(4) :2003–2007, July 1998.
- [76] Hendrik Tennekes and John L. Lumley. *A first course in turbulence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, nachdruck des originals von 1972 edition, 1972.
- [77] B. E. Thompson and J. H. Whitelaw. Flying hot-wire anemometry. *Experiments in Fluids*, 2(1) :47–55, March 1984.
- [78] C Tropea. Laser Doppler anemometry : recent developments and future challenges. *Measurement Science and Technology*, 6(6) :605–619, June 1995.
- [79] Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, and John F. Foss, editors. *Springer handbook of experimental fluid mechanics*. Springer, Berlin, 2007.
- [80] M. Vallikivi, M. Hultmark, S. C. C. Bailey, and A. J. Smits. Turbulence measurements in pipe flow using a nano-scale thermal anemometry probe. *Experiments in Fluids*, 51(6) :1521–1527, December 2011.

-
- [81] Margit Vallikivi. *Wall-bounded turbulence at high Reynolds numbers*. PhD thesis, Princeton University, 2014.
- [82] Margit Vallikivi and Alexander J. Smits. Fabrication and Characterization of a Novel Nanoscale Thermal Anemometry Probe. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23(4) :899–907, August 2014.
- [83] David Vanpouille. *Développement de modèles de turbulence adaptés à la simulation des écoulements de convection naturelle à haut nombre de Rayleigh*. PhD Thesis, 2013.
- [84] A R Weeks, J K Beck, and M L Joshi. Response and compensation of temperature sensors. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 21(10) :989–993, October 1988.
- [85] Julien Weiss, Emmanuel Jondeau, Alain Giani, Benoît Charlot, and Philippe Combette. Static and dynamic calibration of a MEMS calorimetric shear-stress sensor. *Sensors and Actuators A : Physical*, 265 :211–216, October 2017.
- [86] Jerry Westerweel, Gerrit E. Elsinga, and Ronald J. Adrian. Particle Image Velocimetry for Complex and Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 45(1) :409–436, January 2013.
- [87] K.R. Williams, K. Gupta, and M. Wasilik. Etch rates for micromachining processing-part II. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12(6) :761–778, December 2003.
- [88] Owen Williams, Tyler Van Buren, and Alexander J. Smits. A new method for measuring turbulent heat fluxes using PIV and fast-response cold-wires. *Experiments in Fluids*, 56(7) :142, July 2015.
- [89] William W. Willmarth and Lalit K. Sharma. Study of turbulent structure with hot wires smaller than the viscous length. *Journal of Fluid Mechanics*, 142 :121–149, May 1984.
- [90] H. F. Winters and J. W. Coburn. The etching of silicon with XeF_2 vapor. *Applied Physics Letters*, 34(1) :70–73, January 1979.
- [91] J. C. Wyngaard. Spatial Resolution of a Resistance Wire Temperature Sensor. *Physics of Fluids*, 14(9) :2052, 1971.
- [92] Yu Xia, Wagih Abu Rowin, Thomas Jelly, Ivan Marusic, and Nicholas Hutchins. Investigation of cold-wire spatial and temporal resolution issues in thermal turbulent boundary layers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 94 :108926, April 2022.
- [93] Y. Yeh and H. Z. Cummins. LOCALIZED FLUID FLOW MEASUREMENTS WITH AN He–Ne LASER SPECTROMETER. *Applied Physics Letters*, 4(10) :176–178, May 1964.
- [94] E.-S. Zanoun, F. Durst, and J.-M. Shi. The physics of heat transfer from hot wires in the proximity of walls of different materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(15-16) :3693–3705, July 2009.
- [95] H. Zou. Anisotropic Si deep beam etching with profile control using SF_6/O_2 Plasma. *Microsystem Technologies*, 10(8-9) :603–607, November 2004.

Micro-anémométrie pour l'aérodynamique : développement et application à la mesure de la turbulence aérothermique

La turbulence est un phénomène important présent dans de nombreux écoulements, qu'ils soient naturels ou à application industrielle, et qui se caractérise notamment par une grande variété d'échelles spatiales et temporelles. Il est donc d'un intérêt particulier de développer des moyens métrologiques adaptés à la mesure des différentes grandeurs physiques permettant de mieux appréhender et caractériser celle-ci.

Dans le cadre de mesures aérodynamiques, les capteurs les plus communément employés encore aujourd'hui sont ainsi l'anémomètre à fil chaud pour des mesures de vitesses et le thermomètre à fil froid pour les mesures de température. Cependant ces deux moyens de mesures présentent des limitations. En effet, il a été montré que si la longueur de leur élément sensible est trop grande en comparaison des échelles caractéristiques de l'écoulement alors ces sondes opèrent un filtrage spatial des plus petites échelles de turbulence, pourtant nécessaires à la résolution complète de ce type d'écoulement. Devant ce constat, ces travaux de thèse se posent pour question la possibilité d'une amélioration de ces deux moyens métrologiques. De par les limitations qu'ils rencontrent, l'axe d'amélioration principal considéré réside dans la réduction de la taille de leur élément sensible en s'appuyant sur les techniques de la micro-fabrication, permettant ainsi d'augmenter la gamme d'échelles spatiales mesurables dans un écoulement turbulent. De plus, dans le cadre de la caractérisation d'écoulements aérothermiques, il apparaît comme d'intérêt de pouvoir effectuer des mesures simultanées de vitesse et de température. Il est donc envisagé d'utiliser les technologies de mesure par fil chaud et fil froid pour réaliser ceci.

Cette étude consiste donc au développement de micro-capteurs thermorésistifs permettant de repousser la limite de détection des petites échelles contenues dans un écoulement turbulent. Le premier objectif est de réaliser des sondes fonctionnelles permettant de réaliser des mesures anémométriques ou thermométriques pour ensuite se tourner vers un second objectif visant à développer un capteur du même type mais effectuant ces deux mesures de façon simultanée.

Pour atteindre ces objectifs, il a été premièrement question d'effectuer un choix pertinent sur les matériaux utilisés ainsi que d'étudier différents procédés de micro-fabrication, notamment de gravure du silicium. Ceci a alors permis de réaliser différentes géométries de micro-capteurs dans le but de mener une étude sur leur intrusivité. Afin de quantifier leur capacité à mesurer des fluctuations de vitesses, ces nouveaux capteurs ont été utilisés pour des mesures en couche limite turbulente, une attention particulière ayant été portée sur la maîtrise du protocole expérimental. Les résultats obtenus ont été comparés à différents modèles semi-empiriques ainsi qu'à des mesures effectuées avec des sondes à fil chaud classiques. Dans l'objectif d'observer la performance des micro-capteurs pour des mesures de température, un banc expérimental spécifique permettant d'évaluer leurs réponses fréquentielles a de plus été conçu. Enfin, des premiers prototypes de micro-sondes permettant de réaliser des mesures simultanées de vitesse et de température ont été testés.

Mots-clés :

ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD ; TURBULENCE ; TRANSFERT DE CHALEUR ; THERMOMÉTRIE À FIL FROID ; MICRO-TECHNOLOGIE

Micro-anemometry for aerodynamics: development and application to the measurement of aerothermal turbulence

Turbulence is an important phenomenon present in many flows, whether natural or industrial, and is characterized by a wide variety of spatial and temporal scales. It is therefore of particular interest to develop metrological means adapted to the measurement of physical quantities such as velocity and temperature fluctuations to better understand and characterize it.

In the context of aerodynamic measurements, the sensors most commonly used today are the hot wire anemometer for velocity measurements and the cold wire thermometer for temperature measurements. However, these two means of measurement have some limitations. Indeed, it has been shown that if the length of their sensitive element is too long compared to the characteristic scales of the flow, then these probes operate a spatial filtering of the smallest scales of turbulence, yet necessary to the complete resolution of this type of flow. Faced with this observation, this thesis work asks the question of the possibility of an improvement of these two metrological means. Because of their limitations, the main improvement considered is the reduction of the size of their sensitive element by relying on micro-fabrication techniques, thus allowing to increase the range of measurable spatial scales in a turbulent flow. Moreover, in the context of the characterization of aerothermal flows, it appears to be of interest to be able to carry out simultaneous measurements of velocity and temperature fluctuations. It is thus envisaged to use the technologies of measurement by hot wire and cold wire to carry out this.

This study consists in the development of thermo-resistive micro-sensors allowing to postpone the limit of detection of the small scales contained in a turbulent flow. The first objective is to develop functional probes allowing to realize anemometric or thermometric measurements to then turn to a second objective aiming at developing a sensor of the same type but carrying out these two measurements in a simultaneous way.

To reach these objectives, it was first a question of making a relevant choice on the materials used as well as studying different processes of micro-fabrication, in particular of silicon etching. This allowed to realize different geometries of micro-sensor in order to identify the most appropriate for measurements in turbulent flow. In order to quantify their capacity to measure velocity fluctuations, these new sensors were used for turbulent boundary layer measurements, with particular attention paid to the control of the experimental protocol. The results obtained have been compared to different semi-empirical models as well as to measurements performed with classical hot-wire probes. In order to observe the performance of the micro-sensors for temperature measurements, a specific experimental bench has been designed to evaluate their frequency responses. Finally, the first prototypes of micro-probes allowing to realize simultaneous measurements of speed and temperature were tested.

Keywords :

HOT WIRE ANEMOMETRY ; TURBULENCE ; HEAT TRANSFER ; COLD WIRE THERMOMETRY ; MICRO-TECHNOLOGY

