

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Adrar
Faculté des sciences et technologie



جامعة أحمد دراية أدرار -
Université Ahmed Draïa Adrar-Algérie

Département de science de la matière
Mémoire pour l'obtention du diplôme de

Magistère en physique énergétique

Option : Modélisation et Simulation en Energétique

INTITULE :

**Etude Théorique et Simulation des Compteurs
Thermiques de Gaz**

Présenté par : BEKRAOUI Amina

Devant le Jury composé de :

Mr A.BENATIALLAH	Professeur (U. Adrar)	Président
Mr A.HADJADJ	Maitre de conférences (U. Boumerdes)	Rapporteur
Mr M.HAMOUDA	Professeur (U. Adrar)	Examineur
Mr S.MAAMIR	Maitre de conférences (U. Boumerdes)	Examineur
Mr. A.HARROUZ	Maitre-assistant (U. Adrar)	Co. Rapporteur

Année Universitaire 2014 / 2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*à ma mère,
à la mémoire de mon père,
à la mémoire de mes grands-parents,
à ma sœur et mes frères,
à tous mes amis,
à toute ma famille.*

Remerciements

Ce travail est le fruit de deux ans passés au sein de la faculté des Sciences et de la technologie. Ce travail n'aurait pas abouti sans la contribution et l'encouragement de plusieurs personnes.

Je tiens, tout d'abord à remercier :

***M. A. HADJADJ**, maître de Conférence à l'université de Boumerdes d'avoir accepté la direction de ce mémoire. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son soutien et pour avoir partagé ses connaissances.*

*Un merci particulier à **M. A. HARROUZ**, maître Assistant à l'université d'Adrar, de m'avoir guidée, son savoir-faire m'a bel et bien marqué ; je le remercie pour ses conseils et remarques.*

*Merci à tout le personnel de la faculté des Sciences et de la technologie. Je cite spécialement **M^{lle}. A. CHABANI**, ingénieur de laboratoire.*

Je remercie tous les membres de jury pour le temps qu'ils ont accepté d'accorder à l'évaluation de ce travail de mémoire, je cite :

***M. A. BENATIALLAH**, professeur à Universités d'Adrar, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance ;*

*Mes profonds respects à **M. M. HAMMOUDA** professeurs à l'Universités d'Adrar pour sa participation au jury de soutenance en qualité d'examineurs.*

*Mes sincères remerciements vont à **M. M. SEGHIR** professeurs à l'Universités de Boumerdes pour sa participation au jury de soutenance en qualité d'examineurs.*

Merci à toutes les personnes dont je ne citerai les noms. A celles qui ont su redonner espoirs sans même qu'elles le sachent.

Merci à ma mère, mes amis, ainsi qu'à toute ma famille.

Les économies modernes des pays reposent principalement sur les fluides énergétiques ce qui nécessite le contrôle et la mesure des quantités ou des volumes de fluides mis en jeu dans un processus de fabrication ou dans une transaction commerciale pour gérer intelligemment les rendements et les volumes d'entrée et de sortie des fluides.

Le transport des fluides industriels dans les conduites et les mesures de leurs débit sont nécessaires pour la plus part des opérations de production et de commercialisation. La nature des fluides peut être modifiée en causant des variations dans la composition ou dans les paramètres de ces derniers (la température, la pression ou la vitesse).

Le présent travail permet d'explorer pour la première fois en Algérie, la technologie du compteur thermique basé sur la loi de King. Le principe de mesure thermique repose sur le fait qu'un fluide s'écoulant à travers une zone chauffée soutirera une quantité de chaleur connue lors de son passage.

L'objectif de ce travail est d'étudier théoriquement et numériquement les compteurs thermiques et la réduction des effets thermiques sur le processus de mesure d'une façon générale.

Mots clés – débitmètre thermique, débit, anémomètre à fil chaud, loi de King, CTMF, ITMF.

Modern economies rely mainly on energy extracted from fluids that requires control and measurement of fluid quantities or volumes involved in the manufacturing process or in business transaction to manage intelligently yields and volumes of inlet and outlet.

The transport of industrial fluids in pipes and the measurement of their speed are required for the most of the production operations and marketing. The nature of the fluids can be modified by changing the fluid composition or in the parameters of the latter (the temperature, pressure or speed).

This work allows us to explore for the first time in Algeria the technology of thermal flow meter based on the King's law. The thermal measurement principle is based on the fact that a fluid flowing through a heated zone will extract a known amount of heat during its passage.

The objective of this work is to study theoretically and numerically the thermal metering and the reduction of thermal effects on the measurement process in general.

Keywords - thermal flow meter, flow, hot wire anemometer, King's Law, CTMF, ITMF.

Résumé.....	I
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	VII
Liste des abréviations.....	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur le comptage de débit

I.1 Introduction.....	6
I.2 Mesure du débit.....	6
I.2.1 Débit.....	6
I.2.2 Mesurage ou le comptage.....	6
I.2.2 Objectifs du comptage.....	7
I.2.2.2 Les instruments de mesure.....	7
I.2.2.3 Considérations générales pour le choix d'un instrument de mesure.....	8
I.2.2.4 Installations de la chaîne de comptage.....	8
I.3 Propriétés d'un débit de fluide dans un canal.....	10
I.3.1 Régime laminaire et turbulent.....	10
I.3.1.1 Nombre de Reynolds.....	10
I.3.1.2 Transfert de chaleur.....	11
I.3.1.3 Nombre de Nusselt.....	13
I.4 Classification des principaux débitmètres.....	15
I.4.1 Débitmètre déprimogènes.....	16
I.4.1.1 Principe et théorie.....	17
I.4.1.2 La norme ISO 5167.....	18
I.4.1.3 Les types d'organe déprimogènes.....	19
I.4.2 Débitmètre à ultra son.....	22
I.4.2.1 Principe d'utilisation de la méthode de temps de transit.....	23
I.4.2.2 Avantages de la méthode.....	24
I.4.2.2 Débitmètre à ultrasons à effet Doppler.....	25
I.4.3 Débitmètre à turbine.....	26
I.4.3.1 Principe et théorie.....	26
I.4.3.2 La norme ISO 2715.....	28

Table des matières

I.4.3.3 Métrologie	29
I.4.4 Débitmètres massiques thermiques	29
I.4.4.1 Principe et théorie	30
I.5 Conclusion	33

Chapitre II : état d'art des compteurs thermiques

II.1 Introduction	35
II.2 Capteurs massique thermique	35
II.3 Les anémomètres thermiques	36
II.3.1 Bilan thermique pour un fil chaud	38
II.3.1.1 Relation fondamentale de l'anémométrie : la Loi de King	41
II.3.1.2 Dépendance de $Rw = f(Tw)$	41
II.3.1.3 La dépendance de nombre de Nusselt	42
II.3.2 Mode de fonctionnement des anémomètres.....	43
II.3.2.1 L'Anémométrie à Courant Constant (CCA)	44
II.3.2.2 Anémométrie à Température Constante (CTA).....	45
II.3.3 Réponse en fréquence	46
II.3.4 Etalonnage.....	47
II.3.5 L'évolution de l'anémométrie à fil chaud.....	48
II.4 Principe de Thermotransfert calorimétrique.....	49
II.4.1 Model analytique de la sonde calorimétrique	51
II.4.2 Evolution des capteurs calorimétrique	53
II.5 Capteur à Temps de vol	55
II.5.1 Evolution des capteurs à temps de vol	56
II.6 Technologies MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems).....	58
II.6.1 Capteurs de flux Thermo résistifs	58
II.6.2 Capteurs thermiques de flux Multiaxes	59
II. 7 Conclusion	61

Chapitre III : les débitmètres massiques thermiques industriels

III.1 Introduction	63
III.2 Débitmètre massique thermique.....	63

Table des matières

III.3 Débitmètre massique thermique à dispersion ou immersif ITM	64
III.3.1 Configuration de Débitmètre en ligne	66
III.3.2 Configuration du débitmètre à insertion	67
III.3.3 Principe de fonctionnement	67
III.3.3.1 Mode de fonctionnement	70
III.3.3.2 Modèle mathématique de fonctionnement	72
III.4 Débitmètres massique thermique à dispersion ITMF en industrie	75
III.4.1 Débitmètre massique thermique Proline t-mass B 150 de ENDRESS + HAUSER..	75
III.4.2 GF90 et GF92 de FCI (Fluid Components International LLC)	79
III.4.3 Nouveau paradigme pour les Débitmètres massiques thermique à dispersion de la compagnie Sierra	81
III.5 Débitmètre massique thermique à tube capillaire CTMF	83
III.5.1 Principe de fonctionnement	83
III.5.2 Plages de fonctionnement	85
III.5.3 Débitmètre massique thermique à tube capillaire CTMF industriel.....	86
III.5.3.1 Applications	87
III.5.3.2 CTMF industriel de la compagnie Sierra	88
III.6 Conclusion.....	89

Chapitre IV : Modélisation et simulation de débitmètre massique thermique

IV.1 Introduction	92
IV.2 Théorie de l'opération	92
IV.2.1 Architecture de l'anémomètre à fil chaud à température constante CTA	92
IV.2.2 Capteur de débit de fluide auto chauffé par le courant.....	93
IV.2.3 Systèmes d'anémomètre à température constante	95
IV.2.4 Caractéristiques dynamiques de CTA	98
IV.3 Procédure de comptage de gaz	99
VI.3.1 Composants du gaz.....	100
Données réelles de l'industrie de GTFT/ Sonatrach	101
IV.4 Simulation sous Matlab/Simulink	102
IV.4.1 Description de Matlab	102
IV.4.2 Construction du bloc de capteur sous Simulink	103
IV.4.3 Construction du bloc d'anémomètre à fil chaud à température constante sous Simulink.....	104

Table des matières

IV.4.4 Construction du circuit électronique de l'anémomètre à fil chaud sous Simulink..	105
IV.5 Simulation de l'équation caractéristique de CTA sous Matlab.....	107
IV.5 Débit massique en fonction de la vitesse de fluide	109
IV.6 Conclusion	111
Conclusion générale	1112
Bibliographie.	

Figure I.1: Exemple d'une station de mesure a élément déprimogène [2].	10
Figure I.2: Profil de vitesse dans le régime laminaire et turbulent [5].	11
Figure I.3 : Irradiation solaire vers la terre [9].	13
Figure I.4: Répartition des débitmètres dans l'industrie [13].	16
Figure I.5: Principe d'un organe déprimogène [16].	18
Figure I.6: Principaux débitmètres à organes déprimogènes [18].	18
Figure I.7: Diaphragme débitométrique. Plaque d'orifice [17].	20
Figure I.8: Tube de venturi classique [2].	21
Figure I.9: Tube de venturi tuyère [17].	21
Figure I.10: Tuyère à long rayon [2].	22
Figure I.11: Tuyère ISA 1932 [2].	22
Figure I.12: Principe de la méthode temps de transit [22].	23
Figure I.13: Compteur à ultrasons : différents principes de montage des sondes [11].	25
Figure I.14: Compteur à turbine : théorie [24].	27
Figure I.15: Principe d'un débitmètre à turbine [13].	28
Figure I.16: Nomenclature des parties d'un compteur à turbine (D'après l'ISO 2715).	29
Figure I.17: Processus d'un débitmètre thermique avec une sortie électrique [26].	30
Figure I.18: Débitmètre à capacité thermique [27].	31
Figure I.19: Débitmètre à convection [27].	32
Figure II.1: Les 3 principes utilisés dans les débitmètres thermiques [28].	35
Figure II.2 : Sonde à fil chaud droit [32].	37
Figure II.3 : Capteur à film chaud à une seule extrémité [33].	37
Figure II.4 : Capteur à film chaud en forme de cône [33].	38
Figure II.5: Trois catégories de sondes à fil chaud [34].	38
Figure II.6 : Bilan de puissance sur le fil chaud [10].	39
Figure II.7: Bilan thermique de fil chaud [37].	40
Figure II.8 : Circuit électronique utilisé en anémométrie à courant constant [10].	44
Figure II.9: Circuit électronique utilisé en anémométrie à température constante [36].	45
Figure II.10: Réponse à un signal carré [37].	47
Figure II.11: Étalonnage d'un fil chaud selon la Loi de King [36].	48
Figure II.12: Distribution théorique de champ de température autour d'un élément de chauffage [42].	50
Figure II.13: Deux types des sondes calorimétriques [43].	50
Figure II.14: Schéma d'un capteur calorimétrique [44].	51
Figure II.15: Principe de fonctionnement de la sonde calorimétrique [43].	51
Figure II.16: Comportement de la vitesse d'écoulement en fonction de la température [52].	53
Figure II.17: Capteur de flux basé sur le principe de pyroélectrique [54].	54
Figure II.18: Élément chauffant et les thermistances placé sur une membrane isolé thermiquement un SiNxSiO2 (central, upstream, downstream, side1et side2) [52].	55
Figure II.19: Allure de vitesse en fonction de température et du temps [52].	56
Figure II.20: Capteur de temps de vol [52].	57
Figure II.21: Capteur micro flux trois dimensionnelle [52].	60
Figure II.22: Conception d'un capteur à deux dimensions [52].	61
Figure III.1: Classification des débitmètres massique thermiques [63].	64
Figure III.2 : Les deux modèles d' ITMF de la compagnie E +H [67].	65
Figure III.3: Configurations des débitmètres ITMF [64].	66
Figure III.4: Les capteurs utilisés dans les débitmètres thermiques industriels [70].	67
Figure III.5: Élément de détection de flux massique thermique [71].	68
Figure III.6: Anémomètres utilisés dans le domaine de recherche [71].	69

Liste des figures

Figure III.7 : Emplacement de deux sondes [64].....	70
Figure III.8: Mode de température constante [71].....	71
Figure III.9: Mode de courant constant [70].....	71
Figure III.10: Première loi de thermodynamique [71].....	72
Figure III.11: Proline t-mass B150 de E+H [72].	75
Figure III.12: Principe de fonctionnement de Proline t-mass 150 [72].	76
Figure III.13: Les deux modèles de FCI [73].	79
Figure III.14: Le capteur de mesure de GF90 et GF92 [73].	79
Figure III.15: Exemple de montage de débitmètre GF90 [73].	81
Figure III.16 : Nouveau débitmètre utilisé par la compagnie Sierra [74].....	81
Figure III.17 : Configuration des quatre capteurs de nouveau débitmètre [74].....	82
Figure III.18: Différentes configurations de CTMF [65].	85
Figure III.19: CTMF réel avec bypass par n éléments [65].....	86
Figure III.20: Tube chauffé de débitmètre CTMF [65].	87
Figure III.21: CTMF industriel de compagnie Sierra [63].	88
Figure III.22: Principe de fonctionnement de débitmètre CTMF [25].	89
Figure IV.1: Architecture de circuit CTA [78].	93
Figure IV.2: Bloc diagramme du capteur de débit.	95
Figure IV.3: Bloc diagramme de système CTA.	99
Figure IV.4: Bloc de capteur sous Simulink.	103
Figure IV.5: L'allure de variation de résistance de sonde en fonction de V et I.	103
Figure IV.6: Schéma de la fonction de transfert de CTA.....	104
Figure IV.7: La sortie E en fonction de l'entrée v.	105
Figure IV.8: Les subsysteme du bloc CTA.....	106
Figure IV.9: Bloc complet du CTA.....	106
Figure IV.10: Variation de E en fonction de la vitesse v.	107
Figure IV.11: Changement de tension en fonction de la vitesse.....	108
Figure IV.12: Variation de E en changeant le diamètre d.....	109
Figure IV.13: Variation de la vitesse v en fonction de tension E.....	110
Figure IV.14: Débit massique Q_m en fonction de la vitesse v.....	111

Liste des abréviations

<i>1 : Glossaire</i>	
Q_m	<i>Débit massique [Kg/s].</i>
Q_v	<i>Débit volumique [m^3/s].</i>
	<i>Masse volumique du fluide [Kg/m^3].</i>
V	<i>Vitesse moyenne en [m/s].</i>
D	<i>Diamètre de la conduite [m].</i>
$\frac{\bar{D}}{\bar{\sigma}}$	<i>Viscosité cinématique du fluide [m^2/s].</i>
T	<i>Température [K].</i>
$\frac{\bar{T}}{\bar{\lambda}}$	<i>Diffusivité thermique [$W/m \cdot K$].</i>
$\frac{\bar{\lambda}}{\bar{k}}$	<i>Conductivité thermique du matériel [$K \cdot W/m$].</i>
c_p	<i>Capacité calorifique spécifique.</i>
Q	<i>Flux de chaleur échangée par convection [W].</i>
$\frac{\bar{Q}}{\bar{\sigma}}$	<i>Constante de Stefan Boltzmann.</i>
$\frac{\bar{\sigma}}{\bar{h}}$	<i>Coefficient de transfert thermique de chaleur [$W/(m^2 \cdot K)$].</i>
D	<i>Longueur caractéristique [m].</i>
μ	<i>Viscosité dynamique [$Kg/m \cdot s$].</i>
C_p	<i>Capacité thermique massique [$J/Kg \cdot K$].</i>
L	<i>Longueur de fil [m].</i>
f	<i>Fréquence [Hz].</i>
R	<i>Résistance de matériau [].</i>
$\frac{\bar{R}}{\bar{\tau}^w}$	<i>Temps [s].</i>
PT100	<i>Platine Tempretur de [100].</i>

Liste des abréviations

2 : Abréviation	
ONML	<i>Office National de Météorologie Légal.</i>
Re	<i>Nombre de Reynold.</i>
Nu	<i>Nombre de Nusselt.</i>
Pr	<i>Nombre de Prandtl.</i>
Ma	<i>Nombre de Mach.</i>
Kn	<i>Nombre de Knudsen.</i>
ISO	<i>Organisation internationale de normalisation.</i>
TOF	<i>Time Of Flight.</i>
CCA	<i>Constant Current Anemometer.</i>
CTA	<i>Constant Temperatur Anemometer.</i>
CTMF	<i>Capillary Thermal Mass Flowmeter.</i>
ITMF	<i>Immersion Thermal Mass Flowmeter.</i>
RTD	<i>Resistor Thermal Detector.</i>
Gr	<i>nombre de Grashof.</i>
EH	<i>ENDRESS + HAUSER.</i>
FCI	<i>Fluid Components International.</i>
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition.</i>

Les autres abréviations sont explicitées dans le texte.

Introduction générale

De tous temps, l'écoulement des fluides a toujours intéressé l'humanité. Le débit est l'une des grandeurs les plus fréquemment mesurées. L'eau, la vapeur, le pétrole, le gaz naturel, les produits chimiques sont quelques-uns des produits mesurés quotidiennement. Le fait que ces fluides occupent une place importante de la matière de l'univers, ils ont pris une place prépondérante dans les activités humaine.

L'Algérie est l'un des pays proprement dite producteur des fluides énergétiques tels que le pétrole et le gaz, son économie repose principalement sur ses exportations. Pour bien gérer ses exportations, le réseau de transport des fluides énergétiques par canalisation et le champ de production nécessite une exploitation rationnelle et des équipements bien choisis pour assurer l'exactitude des quantités des produits mis en jeu. L'objectif est de faire un acheminement des produits avec le minimum des pertes car la moindre erreur sur les quantités des fluides transportées peut causer des pertes financières considérables. Pour cela, la mesure de débit des fluides joue un rôle primordial. Il n'existe pas une technologie unique permettant de répondre aux exigences de chaque application de mesure, mais il y en a toujours une plus adaptée. Par conséquent, le suivi de l'évolution des technologies de comptage en vue de l'augmentation de la précision doivent intéresser pour la compagnie nationale Algérienne (Sonatrach) et ses partenaires.

Au cours de ces dernières années, la mesure de débit dépend des commandes automatisée et à des interfaces de communication modernes qu'ils ont permis l'ouverture de nouvelles applications dans le domaine des mesures industrielles. Les principales missions d'un processus de comptage sont les suivantes :

- Le comptage de fluide énergétique ;
- L'affichage et enregistrement des données ;
- La surveillance de processus ;
- La régulation et l'établissement des bilans.

La mesure ou le comptage s'effectue à l'aide d'un appareil dit « débitmètre ». La mesure des débits repose sur plusieurs principes, tels que la vitesse de l'écoulement du fluide d'une manière directe ou indirecte afin de pouvoir déterminer le débit massique de l'écoulement.

En général, les principaux types d'équipement de mesure sont :

- Débitmètres de pression différentielle ;
- Débitmètre à turbine ;
- Débitmètre à ultrasons ;
- Débitmètres massiques thermique ou Coriolis.

La mesure par débitmètre massique thermique dont l'existence remonte aux années 1930, est une méthode quasi directe, adapté, surtout pour la mesure des débits de gaz. Les débitmètres massique thermiques déduisent les propriétés thermiques du fluide en écoulement (tels que la chaleur spécifique et la conductivité thermique) et ils sont capables de fournir des mesures qui sont proportionnels directement à la masse du milieu tel que la vitesse. Dans les plages usuellement rencontrés dans l'industrie, la chaleur spécifique du gaz est essentiellement indépendante de la pression, la température et proportionnelle à la densité et donc à la masse.

La méthode de mesure des débitmètres thermiques mette en œuvre une ou plusieurs sources de chaleur, généralement d'origine électrique, et un ou plusieurs détecteurs de température. Le débit du fluide est déduit des variations de puissance thermique ou des variations de température dues à l'écoulement.

La norme ISO 14511 décrit bien le fonctionnement des deux types des débitmètres massiques thermiques, leur installation et leur emplacement dans les conduites afin d'assurer une meilleure précision de mesure.

L'objectif de ce travail est de faire une étude sur les débitmètres massiques thermiques, leur principe de fonctionnement, la précision et les conditions d'utilisations de ces derniers en relatant par les différents débitmètres existant dans l'industrie et plus précisément ceux utilisés par la société nationale Algérienne des Hydrocarbure (Sonatrach) .

Il consiste à déterminer par simulation les effets des différents paramètres sur le calcul des débits des fluides énergétiques.

Les différents chapitres de ce mémoire décrivent les débitmètres massiques thermiques sous différents aspects.

Le premier chapitre présente des généralités sur le comptage, les différents aspects physiques, la nature de profil d'écoulement et les débitmètres existants dans l'industrie de gaz.

Une recherche bibliographique sur les différents modèles utilisés dans le comptage en utilisant les débitmètres massique thermique est présentée dans le deuxième chapitre. Le but de

ce chapitre est de fournir une vue d'ensemble des débitmètres thermiques macro et micro échelle présentées dans la littérature. Les sondes utilisées et leurs principes de fonctionnement.

Le chapitre trois est consacré à l'étude des débitmètres massique thermique industriel. Les deux modes des débitmètres massiques thermiques existants dans l'industrie. La théorie du principe de mesure de l'écoulement utilisé ainsi que le transfert de chaleur, le bilan énergétique total et les différentes sondes utilisées.

La modélisation et la simulation du capteur utilisé par le débitmètre massique thermique font l'objet de quatrième chapitre. Le mode d'anémomètre à fil chaud à température constante CTA est utilisé grâce à ses avantages, l'architecture de ce dernier est simulé en utilisant l'outil Matlab/Simulink pour bien comprendre le fonctionnement de ce débitmètre.

En conclusion, et en plus des résultats relatés par cette étude, nous souhaitons contribuer au manque d'informations concernant les débitmètres thermique massique existants dans la littérature surtout en Algérie.

Chapitre I :

*Généralités sur le comptage de
débit*

I.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, la mesure de débit des fluides a connu une très grande importance. La mesure du débit est importante dans beaucoup de domaine d'application.

Le choix de l'instrument approprié pour une application particulière est soumis à beaucoup de variables, y a compris le coût. Le choix technique et le profil économique de la mesure du débit a motivé des actions dans plusieurs laboratoires de recherche dans le monde.

En raison des variations des propriétés physiques et chimiques du débit, beaucoup de techniques de comptage ont été élaborés chacun pour une application donnée. Chacun des dispositifs de mesure du débit a ses propres avantages et inconvénients. L'objectif de ce chapitre est de décrire les propriétés physiques du fluide et de montrer quelques débitmètres utilisés dans l'industrie.

I.2 Mesure du débit

I.2.1 débit

Notre travail porte sur l'étude des débitmètres. La question évidente qui se pose est que signifié réellement un débit massique ? Pour répondre à cette question, il faut comprendre ce qui est un débit et la quantité physique mesurée par un débitmètre.

Le débit ou fluide flow est la quantité de fluide qui s'écoule dans une structure fermée (canal) fournie par unité de temps.

Il existe deux types de débits :

- Le débit masse ou le débit massique (Q_m) qui s'exprime en Kg/s ;
- Le débit volume ou le débit volumique (Q_v) qui s'exprime en m^3/s .

Le débit massique (Q_m) et le débit volumique (Q_v) sont liés par la relation :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v \quad (I.1)$$

Où ρ est la masse volumique du fluide (Kg/m^3). [1]

I.2.2 Mesurage ou le comptage

La Mesure ou « Comptage » dans le jargon professionnel d'un gaz en circulation dans une conduite est défini comme étant l'ensemble des opérations donnant accès à la connaissance

de la quantité de gaz ayant traversée une section définie de la conduite pendant un intervalle de temps bien donné.

Pour bien définir un comptage en transport, divers aspects sont à prendre en considération. Tous les comptages donnant lieu à des transactions commerciales sont soumis à la réglementation, cette dernière est élaborée par le service de la métrologie (ONML) qui fixe des règles de construction, de précision, d'installation et de contrôle.

I.2.2 Objectifs du comptage

Sur un réseau de transport, le gaz est compté pour connaître les quantités mises en jeu dans :

- *Le domaine commercial* : Il est le fondement de l'application des contrats d'achat, de vente, de transit. Il est à l'origine de l'établissement des statistiques et des prévisions.

- *Le domaine technique* : Il donne les informations primaires indispensables à l'exploitation rationnelle des réseaux de transport et de distribution, des usines productrices et consommatrices [2].

I.2.2.2 Les instruments de mesure

L'instrument de mesure est destiné à la mesure d'une grandeur et généralement constitué de différents éléments assurant la saisie de la mesure, le traitement de l'information, la mise en forme et la visualisation de la valeur, ainsi qu'éventuellement la transmission à des organes périphériques.

Instrument de mesure industriel : installé dans un processus industriel et fournissant une valeur de la masse volumique d'un fluide de façon continue.

Capteur de masse volumique : partie de l'instrument assurant la mesure de la masse d'un volume.

Transducteur de masse volumique : Partie de l'instrument qui traduit la masse volumique à mesurer en signaux destinés à un calculateur.

Calculateur : partie de l'instrument qui reçoit les signaux de sortie du transducteur de mesure et, éventuellement, des instruments de mesurage associés, les traite et, le cas échéant, mémorise les résultats jusqu'à leur utilisation.

Dispositif de correction : partie de l'instrument incorporé au transducteur ou au calculateur, assurant la correction automatique de la mesure en fonction des erreurs systématiques du capteur.

Dispositif de conversion : partie de l'instrument incorporé au calculateur, convertissant automatiquement la masse volumique, mesurée dans les conditions de mesure, en masse volumique dans les conditions de base, tenant compte des caractéristiques du fluide (masse volumique, température, pression).

I.2.2.3 Considérations générales pour le choix d'un instrument de mesure

Le choix, la mise en œuvre et la pérennité d'un instrument de mesure nécessitent la prise des précautions suivantes :

- Pour toute application, l'utilisateur doit prendre connaissance et appliquer les instructions du fabricant de l'instrument et de ses dispositifs complémentaires concernant, en particulier, les performances, la sécurité et l'adéquation avec l'application envisagée.
- Si le fluide à mesurer présente des risques d'inflammation ou d'explosion (produits pétroliers, par exemple), tout composant électrique, ainsi que les éléments de raccordement, doivent avoir une classe de sécurité correspondant à la classification du fluide.
- Le capteur mis en œuvre doit avoir une pression maximale de service correspondant aux conditions extrêmes de l'installation [3].

I.2.2.4 Installations de la chaîne de comptage

Les comptages commerciaux sont situés aux points de « transfert de garde » du gaz :

- Soit entre une installation (champ producteur, usine de traitement ou centre de stockage) et un réseau de transport.
- Soit entre deux réseaux de transports nationaux ou internationaux.
- Soit entre réseau de transport et un réseau de consommation (clients industriels ou distributions publiques).

Dans les deux premiers cas, les quantités concernées sont importantes et le comptage sera réalisé par une unité indépendante destinée uniquement à cette fonction. Elle est généralement dénommée « station de comptage ».

Dans le dernier cas, il y a généralement une détente de gaz et le comptage est alors intégré dans une unité qui réalise les fonctions détente, régulation et comptage. Cette unité est appelée « poste de détente et comptage » ou plus simplement « poste de livraison ».

➤ **Station de comptage**

Une station de comptage peut être située :

- Soit à l'entrée d'un réseau : Comptage d'émission.
- Soit à la jonction de deux parties d'un réseau : Comptage divisionnaire.

Une station de comptage comporte tous les appareils nécessaires au comptage :

- ❖ **Eléments primaires** : plusieurs rampes de comptage sont installées en parallèle.
- ❖ **Eléments secondaires** : Ils sont associés à chaque rampe de comptage et comprennent des capteurs de pression, de température, des appareils de mesure de la masse volumique et des calculateurs électroniques pour l'acquisition et le calcul des quantités.
- ❖ **Eléments annexes** : Les appareils de détermination des caractéristiques du gaz seront présents sauf pour les comptages divisionnaires car dans ces cas les caractéristiques du gaz sont mesurées en un autre point du réseau.

La figure I.1 donne un exemple d'une station de comptage équipée de systèmes de mesure par organes déprimogènes [2].

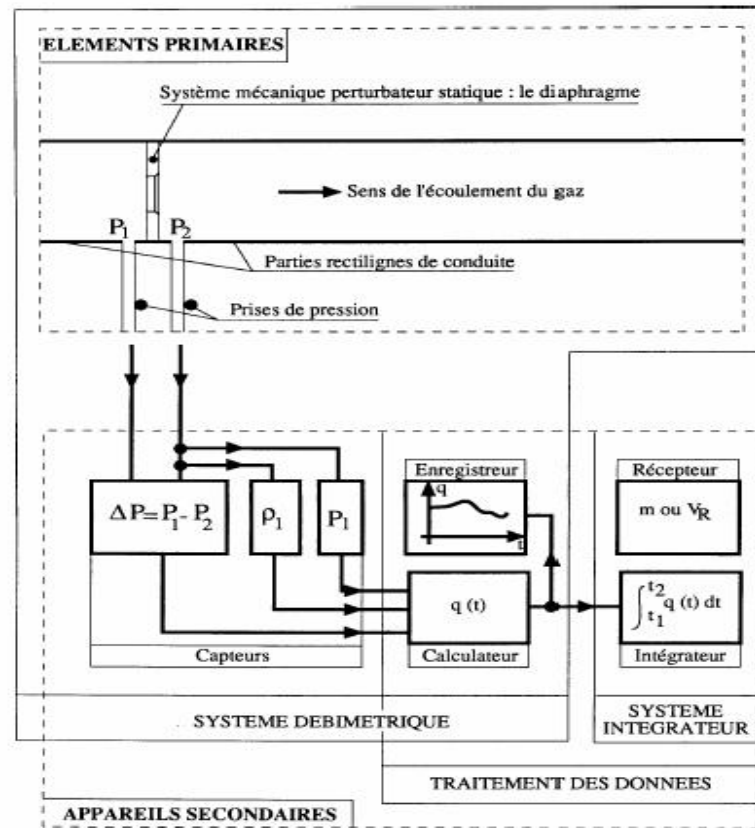


Figure I.1: Exemple d'une station de mesure à élément déprimogène [2].

I.3 Propriétés d'un débit de fluide dans un canal

Il y a un certain nombre de principes importants concernant l'écoulement du fluide dans un canal qui devrait être entrepris avant qu'un débitmètre puisse être employé. Ce sont par exemple la différence entre un fluide laminaire et turbulent, la signification du nombre de Reynolds, Nusselt, Mach et Prandtl et les transferts de chaleur [4].

I.3.1 Régime laminaire et turbulent

I.3.1.1 Nombre de Reynolds

Les expériences classiques réalisées par Osborne Reynolds en 1883 à l'université de Manchester lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont prouvé que la caractéristique de fluide peut être prévue en utilisant un nombre sans dimensions, connu maintenant sous le nom de nombre de Reynolds, donné par l'expression suivante :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

v : La vitesse moyenne d'écoulement à travers la section considérée en (m/s) ;

d : Diamètre de la conduite (m) ;

ϑ : Viscosité cinématique du fluide (m^2/s).

Ces expériences ont montré aussi l'existence de trois régimes d'écoulement : régime laminaire, transitoire et régime turbulent. La figure I.2 les montre :

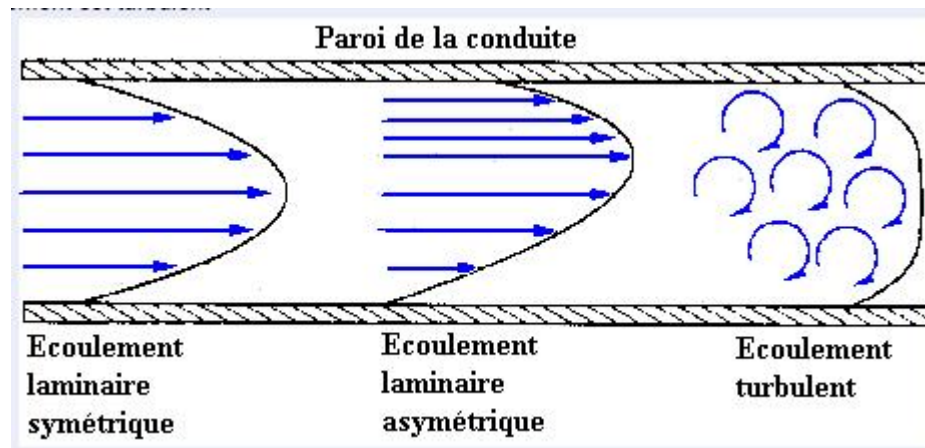


Figure I.2: Profil de vitesse dans le régime laminaire et turbulent [5].

Dans le régime laminaire Les filets de fluides sont des lignes régulières, sensiblement parallèles entre elles (connues sous le nom de lignes profilées) qui ne se mélangent pas pendant qu'elles se déplacent. Si le fluide est turbulent, Les filets de fluides ne s'écoulent pas dans des couches parallèles, mais se déplace d'une façon aléatoire [4, 6].

I.3.1.2 Transfert de chaleur

Les transferts de chaleur constituent la base de nombreux procédés industriels et ils sont aussi très présents dans la vie quotidienne. L'amélioration de ces échanges et l'augmentation du rendement sont une préoccupation majeure des industriels et des organismes de réglementation [7].

L'énergie thermique peut être transférée à partir d'un objet à l'autre de trois manières : conduction, convection, et rayonnement. Naturellement, un objet qui donne ou reçoit la chaleur peut être un détecteur thermique. Son but serait de mesurer la quantité de chaleur qui représente quelques informations sur l'objet produisant cette chaleur [8].

❖ Conduction

La conduction est définie comme le transfert thermique à partir d'une molécule à une autre molécule. Pour un milieu isotrope et homogène, le comportement de la température T due à la conduction peut être décrit comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (I.3)$$

Où λ est la diffusivité thermique, dépend de la conductivité thermique du matériel k_f , densité ρ et capacité calorifique spécifique c_p :

$$\lambda = \frac{k_f}{\rho \cdot c_p} \quad (I.4)$$

❖ Convection

Convection : "Transfert de chaleur accompagné d'un transport de matière à l'état de fluide". Le transfert thermique par convection correspond aux processus de transport de chaleur par un écoulement fluide. Le transfert de chaleur par convection se classe selon la nature de l'écoulement : si celui est généré par des moyens externes qui imposent une certaine vitesse moyenne (comme, par exemple, un ventilateur) on parle de convection forcée tandis que si le mouvement du fluide est dû aux forces d'Archimède induites par des différences de masse volumique dans une ambiance soumise à la force de la pesanteur, il s'agit de convection naturelle ou libre. Le modèle utilisé pour décrire un problème général de convection est connu comme la loi de refroidissement de Newton :

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (I.5)$$

Où Q , le flux de chaleur échangée par convection (W), est proportionnel à la surface d'échange A et à la différence de température entre la surface (T_s) et le fluide (T). La constante de proportionnalité h (W/m²K) s'appelle coefficient de transfert de chaleur par convection. Il dépend des propriétés de la couche limite, concrètement de la géométrie de la surface, de la vitesse et la nature du mouvement du fluide et de propriétés thermiques du fluide [7].

❖ Rayonnement

Tous les matériaux émettent et absorbent une énergie radiative en abaissant ou en soulevant leur niveau d'énergie moléculaire. Cette énergie radiative thermique peut être vue en tant qu'une composition des ondes électromagnétiques ou des photons. Les ondes électromagnétiques propagent dans le vide et approximativement la même vitesse dans la plupart des gaz à la vitesse de la lumière c , ($c=3.10^8$ m/s).

Ceux-ci sont caractérisés par leur longueur d'onde λ et leur fréquence f , qui sont reliés par la relation :

$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{1.6}$$

L'énergie total radiative émis d'une surface dans toutes les directions est appelé puissance émissive. La puissance émissive dépend de la longueur d'onde λ , la température T et l'émissivité ϵ . Une surface idéale est connue comme un corps noir ou surface noire, elle absorbe tout le rayonnement entrant. La distribution spectrale de la puissance émissive d'une surface noire est donnée par Planck :

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1]} \quad C_1 = 3.7419 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2, C_2 = 14.388 \text{ } \mu\text{mK}$$

C_1 et C_2 sont les fonctions de Planck. La puissance totale émissive est donnée par la relation :

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad \sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

Avec σ est la constante de Stefan Boltzmann. la figure I.3 schémétise les irradiations solaire vars la terre.

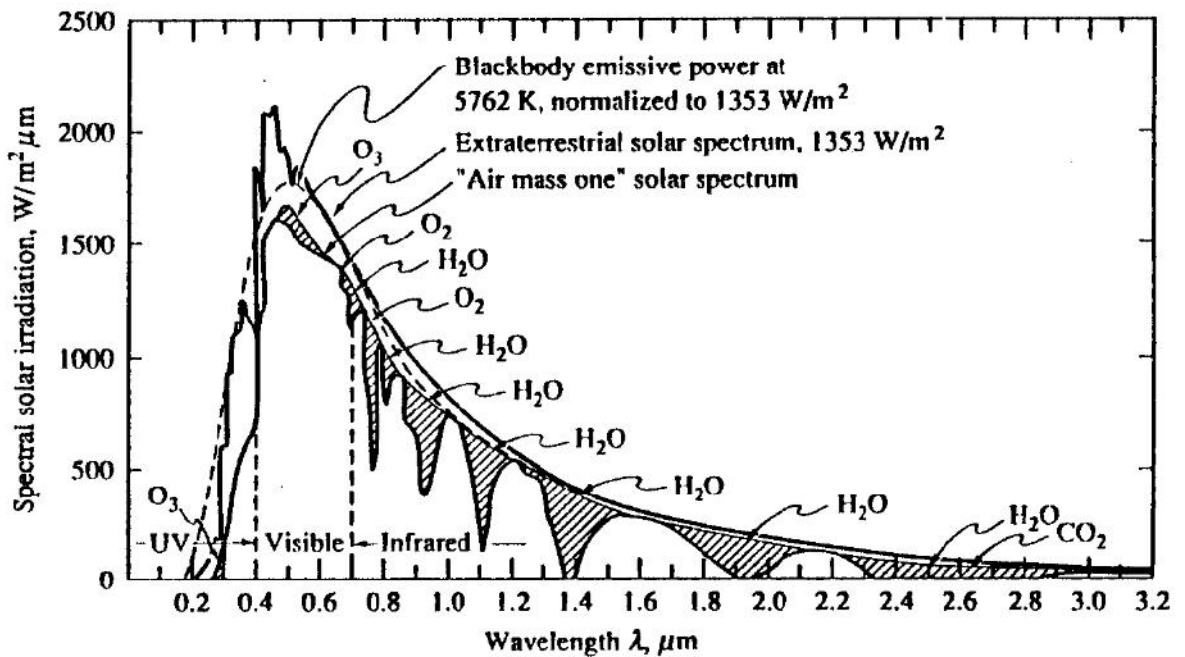


Figure I.3 : Irradiation solaire vers la terre [9].

I.3.1.3 Nombre de Nusselt

En raison de l'importance du transfert de chaleur à partir d'un cylindre chauffé en ingénierie, la dépendance de nombre de Nusselt sur les conditions d'écoulement a été le sujet de beaucoup de recherche. Le nombre de Nusselt exprime l'efficacité du transfert par convection, c'est-à-dire le rapport entre puissance transférée totale et puissance transférée par

conduction uniquement. Nu est d'autant plus élevé que la vitesse du fluide U est élevée. Il est donné par la relation suivante :

$$Nu = \frac{hd}{k_f} \quad (I.7)$$

Ou :

h : Coefficient de transfert thermique de chaleur [$W/(m^2.K)$] ;

d : Longueur caractéristique [m] ;

k_f : Conductivité thermique du matériel [$K.W/m$].

Le nombre de Nusselt est fonction des paramètres suivants Bruun, 1995 :

$$Nu = f\left(Re, Pr, Ma, Kn, \frac{l}{d}\right) \quad (I.8)$$

Pr : Le nombre de Prandtl est défini comme le rapport de la vitesse d'épaisseur de couche limite et la température d'épaisseur limite, il est exprimé par la relation suivante :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (I.9)$$

Avec :

μ : la viscosité dynamique [$Kg/m.s$] ;

C_p : la capacité thermique massique [$J/Kg.K$];

λ : la conductivité thermique [$W/m.K$].

Ma : On appelle nombre de Mach le rapport :

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (I.10)$$

v : Vitesse d'écoulement en (m/s) ;

c : Célérité du son en (m/s) ;

Le nombre de Mach varie d'un point à l'autre de l'écoulement, non seulement parce que la vitesse varie, mais aussi parce que l'état du fluide varie, donc la célérité. Ecoulement incompressible subsonique.

L'écoulement est dit subsonique si la vitesse d'écoulement est inférieure à la vitesse du son. Ou encore : si $Ma < 1$.

L'écoulement est dit compressible supersonique si la vitesse d'écoulement est supérieure à la vitesse du son. Ou encore : si $Ma > 1$ [4].

Nombre de Knudsen = λ/d , qui compare le libre parcours moyen des atomes ou molécules constituant le fluide au diamètre du fil. L'hypothèse du milieu continu est valable pour

$Kn \ll 1$. Dans le cas contraire ($Kn \approx 1$, gaz raréfiés), les transferts de chaleurs sont diminués.

Rapport d'aspect $l/d \gg 1$. Lorsque ce rapport n'est pas suffisamment grand, divers effets interviennent : perturbation des supports du fil, contribution de la composante axiale de la vitesse, et non uniformité de la température du fil. Où l est la longueur du fil et d son diamètre.

Il n'existe pas d'expression générale de Nu en fonction de tous ces paramètres. On peut se contenter de certaines expressions empiriques de Nu en fonction du type de mesures que l'on souhaite effectuer [10].

I.4 Classification des principaux débitmètres

La mesure de débit de fluide industriel a une grande importance, en raison de la présence de ces derniers dans les opérations de commercialisation des produits soit en liquide ou en état gazeux. Pour assurer le transport et la distribution de ces fluides sans grande perte, des appareils de mesure de débit sont nécessaires afin de minimiser ces pertes.

Les appareils mesurant le débit s'appellent débitmètres. Les appareils mesurant le volume de fluide (quelle que soit la durée) ou la masse écoulée s'appellent des compteurs.

Un débitmètre c'est un groupe de composants liés qui fournissent un signal relié uniquement au débit ou la quantité de fluide entrante dans une conduite.

L'objectif d'installation des débitmètres est d'obtenir une mesure du débit, généralement sous forme d'un signal électrique.

Depuis l'apparition des premiers débitmètres et, avec le développement de l'industrie gazière, ceux-ci n'ont cessé d'évoluer. Les volumes échangés sont en constante augmentation et la qualité du comptage prend de plus en plus d'importance. Une grande diversité des moyens de comptage existe. En électronique, les progrès réalisés et la miniaturisation ont permis le développement de nouveaux moyens de comptage ou l'évolution des moyens existants. Cette diversité doit permettre l'utilisation d'un débitmètre bien adapté aux besoins et aux conditions d'utilisation. Les principales « familles » de débitmètre sont :

- les débitmètres volumétriques auxquels on peut ajouter les débitmètres fluidiques : le volume de gaz qui les traverse est mesuré par remplissage cyclique de capacités de contenance déterminée ;
- les débitmètres de vitesse : le volume de gaz dépend directement de la vitesse d'écoulement mesurée ;
- les débitmètres massiques [11].

Les divers types de débitmètres sont, en fonction de leur principe et de l'application à laquelle ils sont destinés, spécifiés pour une pression de service maximale et pour une plage de température de service [12]. La figure suivante présente la répartition des différents types de débitmètres dans l'industrie :

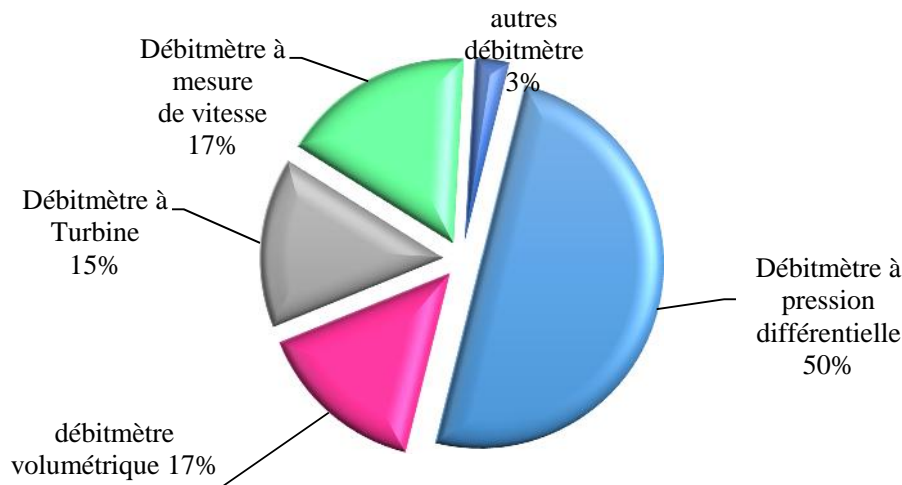


Figure I.4: Répartition des débitmètres dans l'industrie [13].

I.4.1 Débitmètre déprimogènes

Le choix d'un dispositif primaire est susceptible d'être le plus important influencé par l'exécution en service établie (acceptation d'industrie), l'existence des normes de mesure pour la technologie, l'investissement de capital d'équipement, et les frais d'exploitation. Le débitmètre déprimogène est peut-être le dispositif connu le plus ancien pour mesurer ou régler l'écoulement des fluides. Les historiens ont attribué au Romains le développement de cette technologie pour régler l'écoulement de l'eau aux maisons.

Pour mesurer un débit à partir d'une différence de pression, on doit étrangler la conduite pour provoquer une chute de pression. Le fluide devant s'écouler par un passage plus étroit, la pression en amont du rétrécissement sera plus élevée qu'en aval. Cette baisse de pression

augmente la vitesse du fluide puisque une même quantité de matière s'écoule en aval et en amont de l'étranglement. Or, la vitesse varie avec en fonction du débit, donc un débit plus élevé amènera une plus grande différence de pression en amont et en aval de l'étranglement. Ainsi, nous pouvons en mesurant une différence de pression (ou pression différentielle) de part et d'autre de l'étranglement, on peut déterminer le débit. La partie de l'appareil servant à rétrécir la conduite s'appelle l'organe déprimogène [14].

Ces débitmètres ont été parmi les premiers utilisés, suite à la découverte en 1797 par G. Venturi du tube qui porte son nom. Ils sont largement répandus en secteur industriel et en génie civil (station de pompage, usine de traitement des eaux, centrale hydroélectrique, ...) tant pour les liquides que pour les gaz et vapeurs ; les organes déprimogènes sont caractérisés par leur rapport de contraction de diamètre et regroupent les tubes de Venturi, les tuyères et les diaphragmes [15].

I.4.1.1 Principe et théorie

La méthode de mesure est basée sur la propriété de conservation d'énergie lors d'un écoulement permanent d'une masse de fluide, dont l'équation de *Bernoulli* constitue l'expression la plus connue. Elle utilise aussi le principe de continuité qui stipule que le débit massique d'un fluide est constant en toute section d'une conduite continue [2].

Dans sa mise en œuvre, elle consiste à interposer un élément primaire tel qu'un diaphragme, un tube de Venturi ou une tuyère sur le passage d'un fluide s'écoulant en charge dans une conduite, ce qui a pour résultat la création d'une pression différentielle au sein du fluide entre l'amont et le col ou l'aval de cet élément déprimogène. Le débit massique est lié à la pression différentielle par la formule de base suivante [16] :

$$Q = \frac{c}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (\text{I. 11})$$

Avec :

Q : le débit massique [Kg/s] ;

C : est le coefficient de décharge du débitmètre ;

β : le rapport d'ouverture ou rapport des diamètres $\beta = d/D$;

: coefficient de détente ;

: est la masse volumique du fluide [Kg/m³] ;

p₁ : la pression en amont de la plaque [Pas] ;

p₂ : la pression en aval [Pas].

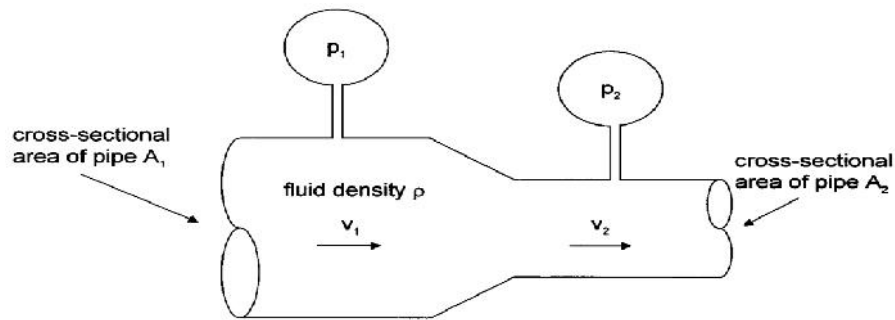


Figure I.5: Principe d'un organe déprimogène [16].

I.4.1.2 La norme ISO 5167

Les mesures de débit au moyen d'organes déprimogènes font l'objet de la norme internationale ISO5167. La normalisation définit les spécifications de construction et les conditions d'utilisation de ces débitmètres ainsi que les procédures de calcul. Elle concerne principalement :

- La définition des éléments primaires. Ceux-ci sont composés des appareils déprimogènes et des prises de pression qui leur sont associées, les appareils secondaires couvrant tous les autres instruments et dispositifs utilisés dans la chaîne de mesurage ;
- Les conditions générales de validité des mesures, relativement à l'élément primaire, à la nature du fluide et à l'installation ;
- Les valeurs des coefficients de décharge C et de détente a .

Les principaux types d'organes déprimogènes décrits par la norme sont :

- Les diaphragme ou plaque à orifice concentrique
- Les orifices profilés (tuyères, tubes de Venturi et les Venturi-tuyères) [17].

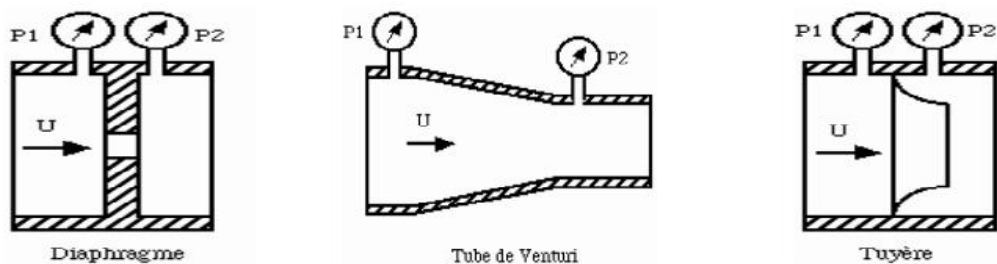


Figure I.6: Les principaux débitmètres à organes déprimogènes [18].

L'ensemble de mesure comprend :

- ✓ Un élément primaire composé de l'organe déprimogène (diaphragme, Venturi, tuyère) et des prises de pressions associées ;
- ✓ Les appareils secondaires nécessaires au mesurage (transducteurs de pression et de pression différentielle, ..).

Les paramètres de base d'un élément primaire (organe déprimogène) sont :

- Le rapport d'ouverture β qui définit la géométrie de la contraction de l'écoulement ;
- Le nombre de Reynolds, Re , qui définit l'aspect dynamique de l'écoulement.

❖ **Incertitude de mesure :**

Les normes permettent de déterminer les incertitudes ou les erreurs de mesure pour les organes déprimogènes ; Elles sont de l'ordre de :

- $\pm 2 \%$ pour le diaphragme et la tuyère normalisés ;
- $\pm 1.5 \%$ pour le tube de Venturi normalisé.

I.4.1.3 Les types d'organe déprimogènes

Les éléments primaires comprennent les appareils déprimogènes et les prises de pression qui leur sont associées. Les organes déprimogènes sont caractérisés par leur rapport de diamètres $\beta = d / D$ [17].

I.4.1.3.1 Diaphragmes

Le diaphragme est l'organe déprimogène débitmétrique le plus répandu. Il consiste en une plaque de métal mince dont le centre est percé. Sur un côté, une languette donne les caractéristiques du diaphragme. Le côté amont du diaphragme est habituellement en biseau. La figure I.7 montre un diaphragme typique [14]. Le diaphragme, appelé aussi « plaque à orifice » est l'organe déprimogène le plus courant en raison de sa simplicité de construction, de sa facilité de fabrication, donc de son faible prix de revient, enfin, de son interchangeabilité, avantage non négligeable en exploitation. La version habituelle est munie d'un chanfrein sur la partie aval d'un angle qui doit être compris entre 30 et 45° et d'une arête vive en amont de l'orifice. le diamètre intérieur d doit être tel que β soit compris entre $0,20$ et $0,80$ selon le type du diaphragme, l'épaisseur de la partie cylindrique e doit être compris entre $0,005 D$ et $0,02 D$ et l'épaisseur totale E doit être compris entre e et $0,05 D$. les diaphragmes peuvent se mettre dans

les deux sens de l'écoulement, et ils doivent être symétriques et doivent comporter des arêtes vives sur les deux faces [2].

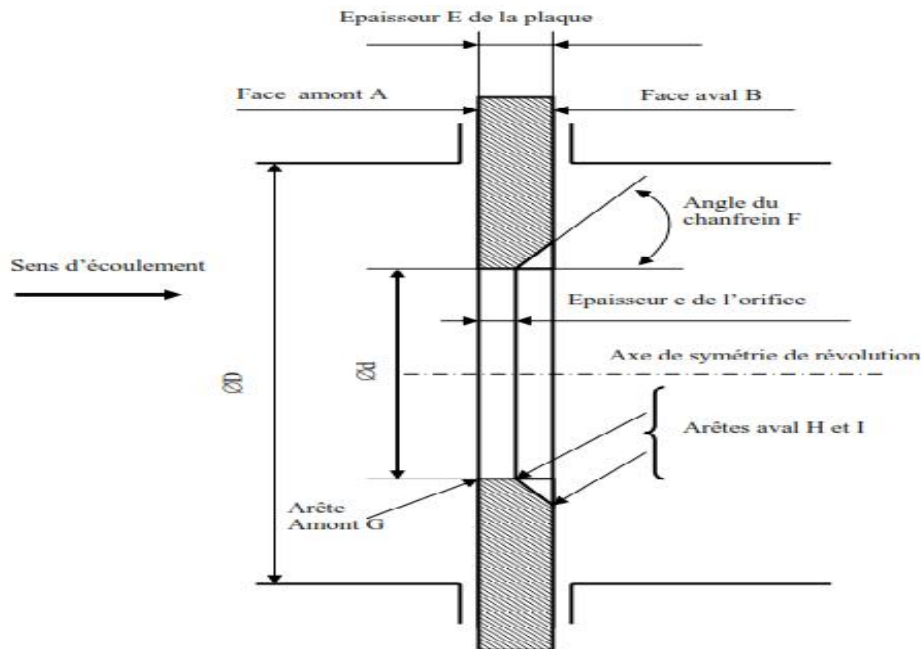


Figure I.7: Diaphragme débitométrique. Plaque d'orifice [17].

I.4.1.3.2 Tubes de Venturi

Les tubes de venturi sont constitués d'un convergent suivi d'un divergent, ils sont caractérisés par une faible perte de charge et ne nécessitent pas de longueur droite. Ils sont tout particulièrement adaptés aux fluides chargés.

Les avantages principaux sont une moindre perte de charge et un faible encrassement. Ils sont donc bien adaptés à la mesure de fluide visqueux ou chargé. Ils sont cependant plus chers à l'achat qu'un diaphragme [19].

Il existe deux types de tubes de venturi :

- ✓ Venturi classique ;
- ✓ Venturi tuyère.

La géométrie de ces deux modèles est décrite par la norme ISO 5167, elle est schématisée sur la figure suivante :

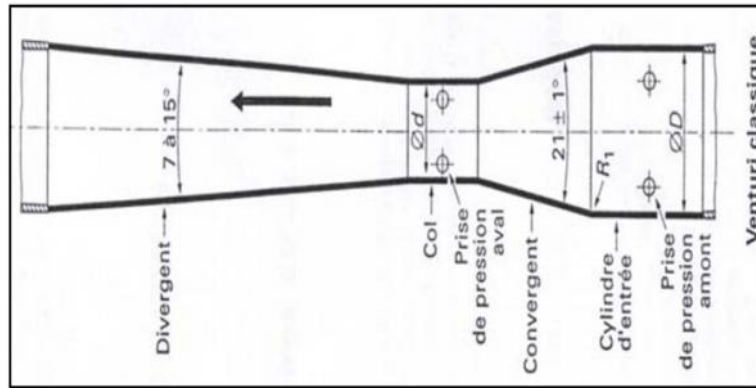


Figure I.8: Tube de venturi classique [2].

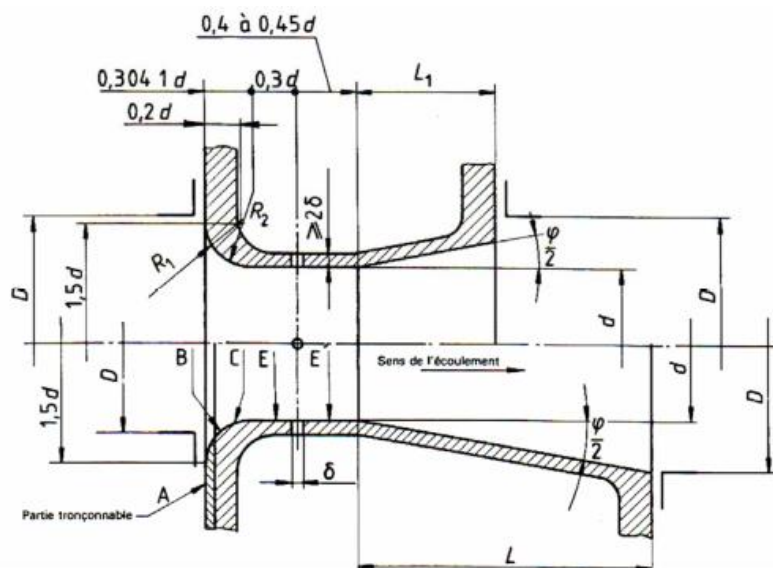


Figure I.9: Tube de venturi tuyère [17].

I.4.1.3. 3 Tuyères

Elle est constituée d'un col cylindrique précédé d'un convergent. Il existe deux types de tuyères normalisées : la tuyère ISA 1932 et la tuyère à long rayon schématisés sur les figures suivantes :

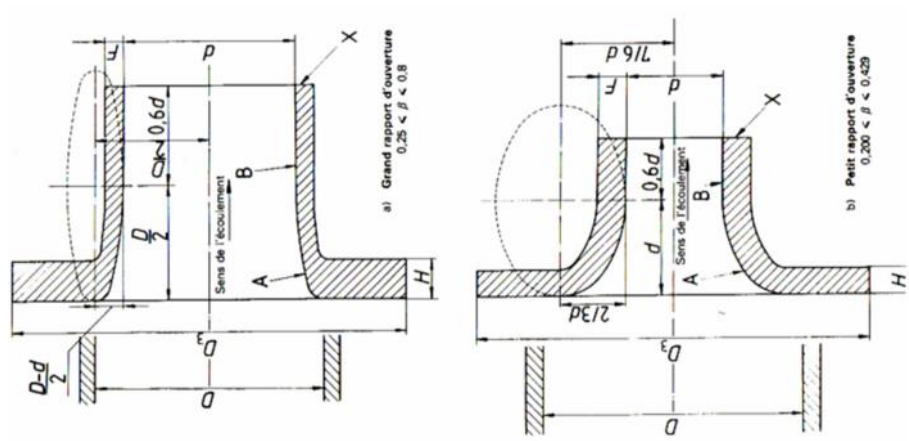


Figure I.10: Tuyère à long rayon [2].

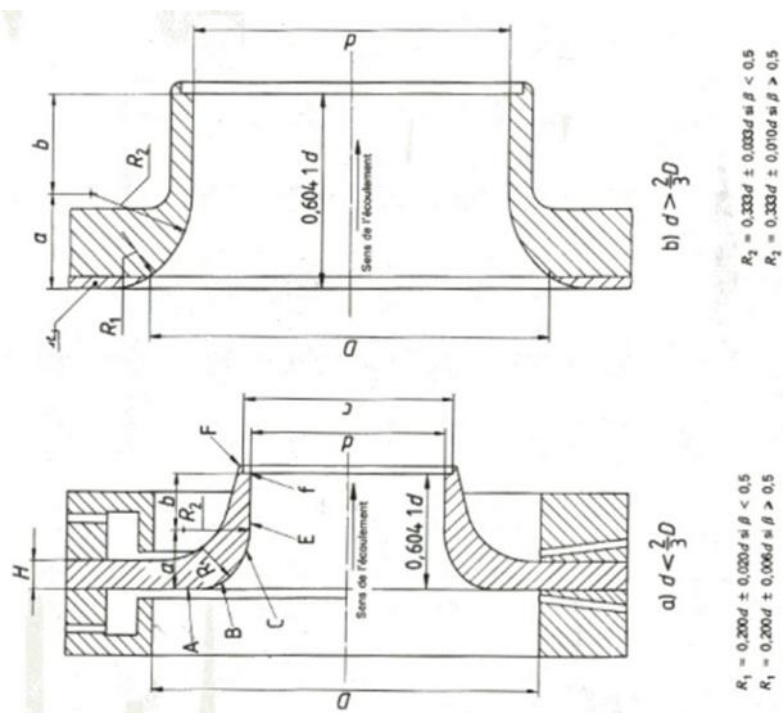


Figure I.11: Tuyère ISA 1932 [2].

I.4.2 Débitmètre à ultra son

La technique de comptage par ultrasons est connue depuis 1928, mais elle n'a pu être exploitée de façon intégrale que 40 ans après dans le domaine industriel, ceci grâce aux progrès dans le domaine de l'électronique et de la technologie numérique. Les premiers appareils sont donc apparus dans les années 60 et cette technologie n'a cessé de se développer depuis [20].

Le débitmètre ultrasonique a été développé dans les années 60 pour aider au lancement des missiles sous-marins dans les sous-marins. Parmi les deux classes générales des débitmètres ultrasoniques (temps de transit, Doppler), la méthode de temps de transit a démontré des performances acceptable pour le comptage du gaz naturel [21].

I.4.2.1 Principe d'utilisation de la méthode de temps de transit

Le principe de mesure dans la méthode acoustique repose sur le fait qu'une onde acoustique se propage d'une source qu'on appelle émetteur vers un récepteur. La méthode de temps de transit calcule le temps de transition d'une impulsion acoustique émise par la source 1 vers la source 2 à travers le fluide. La mesure du temps mis par l'onde pour parcourir la distance L_w entre l'émetteur et le récepteur nous permet de connaître la vitesse du fluide. Les deux temps mis par l'onde ultrasonore pour aller dans le fluide sont donnés par :

$$t_{12} = \frac{L_w}{c+v.\cos\varphi} \qquad t_{21} = \frac{L_w}{c-v.\cos\varphi} \qquad (I.12)$$

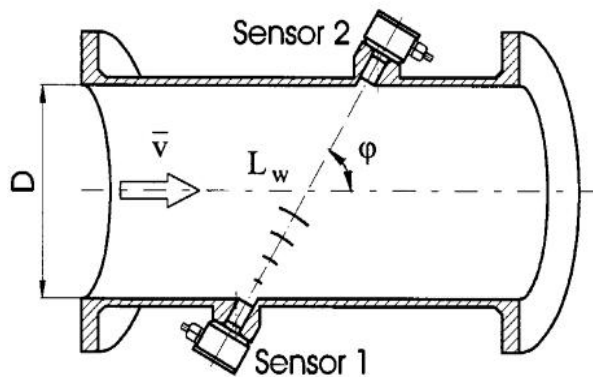


Figure I.12: Principe de la méthode temps de transit [22].

Avec :

L_w : la distance entre les deux transducteurs [m] ;

c : est la vitesse de propagation du son dans le fluide [m^2/s] ;

v : Vitesse du fluide [m^2/s] ;

φ : Angle entre la vitesse v et les directions définies par le couple émetteur/récepteur [red].

La vitesse à travers le fluide est donnée par :

$$v = \frac{L_w}{2 \cos\varphi} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{D}{2 \cos\varphi \sin\varphi} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \qquad (I.13)$$

Avec : D , diamètre de la conduite [22].

L_{ω} et $\cos\varphi$ sont définis par construction ; il en résulte que v , donc le débit, peut être connu, indépendamment de la célérité du son, par la seule connaissance des temps t_{12} et t_{21} , ces deux informations étant traitées par une électronique de calcul associée. L'incertitude ne dépend que de l'incertitude de mesure des paramètres géométriques, et de l'incertitude de mesure des temps. Les appareils les plus récents atteignent des résolutions de mesure des temps de transit de $\pm 0,1$ ns.

I.4.2.2 Avantages de la méthode

Le débitmètre à temps de transit comporte de nombreux avantages en comparaison des techniques traditionnelles de comptage (orifice, turbine, vortex ou diaphragme) :

- Tout d'abord, ce système n'obstrue pas l'écoulement et crée des chutes de pression tout à fait négligeables ;
- Il ne possède aucune pièce en mouvement dans la conduite et de ce fait ne subit pas de phénomène d'usure ;
- Il reste insensible aux changements de composition du gaz ;
- Il permet d'acquérir des informations redondantes qui laissent la possibilité de contrôler simplement la précision du compteur dès le stade de la mesure ;
- Les possibilités d'auto-vérification du compteur sont nombreuses et une alarme automatique peut y être associée.
- Il permet également une mesure bidirectionnelle ;
- Il possède une rapidité de réponse appréciable pour effectuer des mesures dans le cas d'écoulements transitoires ou pulsants [13].

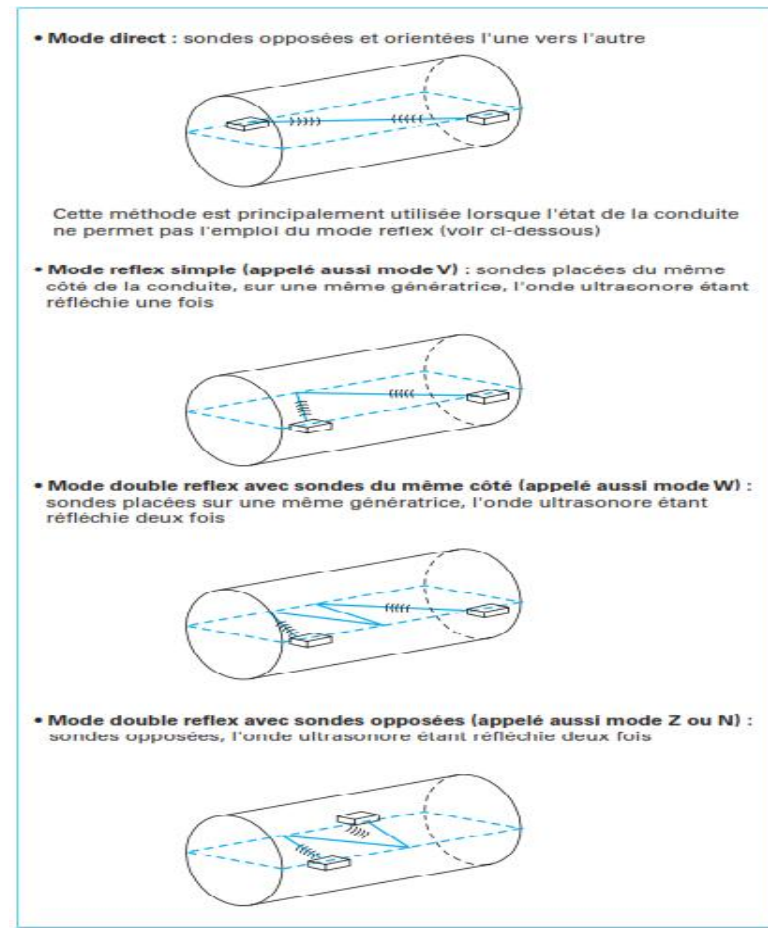


Figure I.13: Compteur à ultrasons : différents principes de montage des sondes [11].

I.4.2.2 Débitmètre à ultrasons à effet Doppler

L'effet Doppler est un phénomène qui se produit lorsqu'une source d'ultrasons de fréquence donnée f est en mouvement par rapport à un observateur, ce qui se traduit pour ce dernier par une modification de la fréquence perçue f' qui est plus grave (diminution de la fréquence perçue). La différence de fréquence est mesurée et elle est représentative de la vitesse moyenne d'écoulement v dans la conduite. D'où, la possibilité d'estimer la valeur du débit volumique [20]. Il ne fonctionne qu'en présence de particules ou de bulles de gaz, mais en quantité limitée pour éviter l'absorption du signal d'excitation. La mise en œuvre la plus simple utilise deux transducteurs ; l'exactitude est cependant meilleure avec deux séries de transducteurs (deux mesures de vitesse). Le matériau de la conduite peut réfracter les ondes sonores. Ce type de débitmètre est surtout utilisé en version portable [12].

I.4.2.3 Caractéristiques métrologiques

L'intérêt de ce dispositif est qu'il est non intrusif ; l'ensemble du dispositif est à l'extérieur de la canalisation. Il est donc insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge. Il permet des mesures de débit compris entre $0,1\text{m}^3/\text{h}$ et $105\text{m}^3/\text{h}$, selon le diamètre de la conduite qui peut être compris entre quelques millimètres et plusieurs mètres. Ce débitmètre est utilisé par exemple pour mesurer les débits des hydrocarbures [23, 13].

La métrologie d'un compteur à ultrasons monocorde dépend énormément des conditions d'installation. Dans de très bonnes conditions, l'exactitude peut être de l'ordre de 1 %. Le plus souvent, il est utilisé comme indicateur de débit à quelques pour-cent près. Il présente, dans ce cas, des avantages en termes de coût [11].

I.4.3 Débitmètre à turbine

Les spirales, les vis et les moulins à vent ont une longue histoire dans la mesure de vitesse. Robert Crochet a proposé un petit moulin à vent en 1681 pour mesurer la vitesse de l'air et plus tard un pour la mesure de distance. En 1870, Reinhard Woltmann développa un ventilateur multi lame pour mesurer le débit des rivières. Le dispositif a été un précurseur de la longue hélice de type à vis, largement utilisée pour les flux de tuyauterie dans le secteur de l'eau. Le premier débitmètre moderne de ce type, a été élaboré en États-Unis en 1938 [21]. Le dispositif le plus anciennement utilisé était fondé sur le principe de l'anémomètre : une hélice d'une forme plus ou moins élaborée occupait toute la section de passage du flux gazeux. La vitesse de rotation est, en première approximation, proportionnelle à la vitesse d'écoulement, donc au débit. Si cette hélice entraîne un totalisateur, celui-ci indique le volume ayant traversé l'appareil. Pendant de nombreuses années, ces appareils ont eu une étendue de mesure faible et des qualités métrologiques douteuses qui en ont freiné le développement. Aujourd'hui, ces débitmètres sont très largement utilisés, en particulier en transport de gaz. Ils présentent une excellente exactitude en débit stabilisé. Ils sont moins encombrants et moins chers que les débitmètres à pistons rotatifs de calibre équivalent [24].

I.4.3.1 Principe et théorie

Un axe libre de rotation porte une turbine (cas des liquides) ou une hélice (cas des gaz) est placée au centre de la conduite où on veut mesurer le débit ; Sous l'action des forces de pression et de viscosité exercées sur les pales, l'hélice de la turbine se met à tourner à une vitesse ω qui dépend du débit de l'écoulement [13].

❖ *Équation du problème qui régit le phénomène physique :*

Considérons un compteur tel que celui représenté sur la figure I.14 (a et b) et plaçons-nous dans les hypothèses suivantes :

- la vitesse v à l'amont du rotor est parallèle à l'axe ;
- le fluide quitte les pales selon la direction des bords de fuite. Grâce au tranquillisier D, la vitesse v du fluide à l'amont du rotor est constante :

$$v = \frac{q}{S} \quad (14)$$

Avec q débit-volume instantané du fluide, S section de passage au droit des pales.

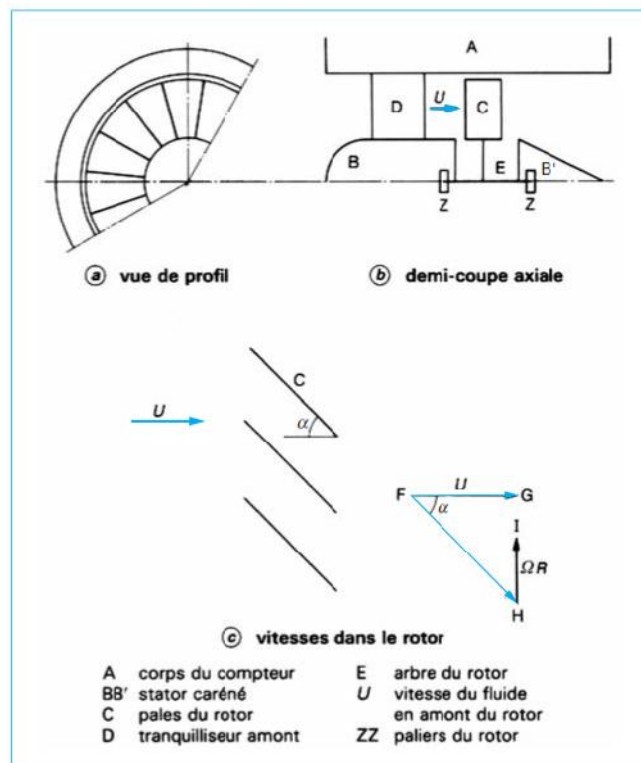


Figure I.14: Compteur à turbine : théorie [24]

C'est un débitmètre de vitesse qui fonctionne grâce à l'énergie cinétique du gaz qui le traverse. Le débitmètre est constitué d'une roue à aubes (à profil hélicoïdal) libre en rotation et centrée dans une section de canalisation. Le gaz provoque la rotation de la roue. La vitesse angulaire de la turbine est proportionnelle à la vitesse moyenne du gaz traversant le compteur [2].

I.4.3.2 La norme ISO 2715

Les normes ISO 2715 (1981) relative aux hydrocarbures liquides décrivent la turbine comme un débitmètre à mesure volumétrique. Le principe d'un compteur à turbine est schématisé sur la figure suivante :

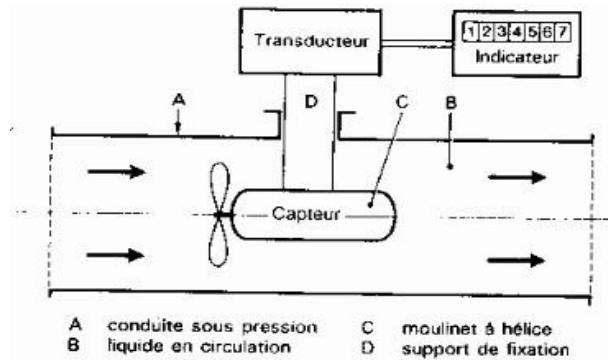


Figure I.15: Principe d'un débitmètre à turbine [13].

Le débitmètre à turbine se compose généralement des organes principaux :

- Le capteur (souvent appelé mesureur) constitué par un rotor à pales hélicoïdales placé à l'intérieur d'un corps cylindrique ;
- Un Transducteur (appelé aussi sortie ou émetteur) transformant la rotation du rotor en un signal électrique exploitable par l'indicateur ;
- Un indicateur de débit ou de volume du liquide en circulation.

Les principaux organes constitutifs d'un mesureur, d'après la norme internationale ISO 2715 :

- Un corps tubulaire ;
- Un rotor, coaxial au corps, et muni d'un bulbe central important ;
- Des paliers ou coussinets de support pour l'arbre du rotor ;
- Une chemise enveloppant le corps ;
- Des déflecteurs amont et aval (redresseur ou tranquiliseur d'écoulement).

Le rôle du bulbe centrale de la turbine est prévu pour accélérer l'écoulement de fluide au niveau des pales par effet Venturi. Cette accélération de l'écoulement génère une énergie cinétique suffisante pour minimiser les forces de frottement solide et fluide au niveau des pales. Le tranquiliseur d'écoulement permet de réduire les perturbations spatiales de la vitesse amont sur la réponse de la turbine.

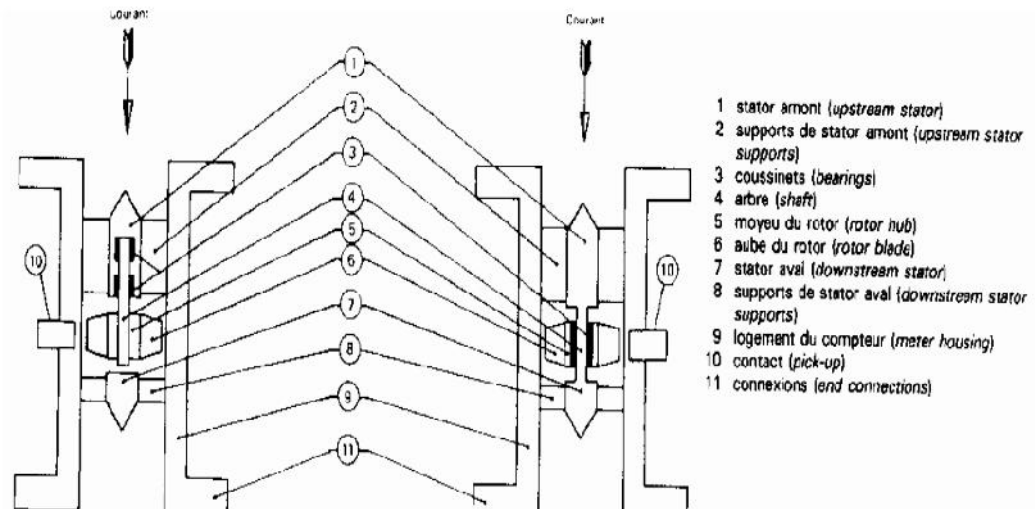


Figure I.16: Nomenclature des parties d'un compteur à turbine (D'après l'ISO 2715).

Suivant le type de la turbine, la mesure est obtenue :

- Soit par comptage d'impulsions électriques ;
- Soit au moyen d'un compteur mécanique relié par un jeu d'engrenages à l'axe de la turbine.

I.4.3.3 Métrologie

Certains compteurs à turbine présentent une exactitude comprise entre $\pm 0.25\%$ et $\pm 0.5\%$ pour des débits supérieurs à $0,2 Q_{\max}$. Souvent, ces compteurs à haute performance sont dépourvus de totalisateur, ce qui permet de supprimer toute la transmission, et donc d'éliminer la majeure partie des couples résistants. La turbine est alors libre dans les paliers et la vitesse de rotation est détectée par un capteur de déplacement électromagnétique.

La répétabilité d'un compteur à turbine atteint 0,1 %. Cette répétabilité facilite l'étalonnage du compteur, en diminuant le nombre de mesures nécessaires.

Le couple disponible est d'autant plus élevé que la masse volumique du gaz est élevée, et donc que la pression l'est aussi. Cela est très important surtout à faible débit, où le couple résistant prend le plus d'importance [13].

I.4.4 Débitmètres massiques thermiques

La mesure de débitmètre massique thermique, qui remonte aux années 1930, est une méthode quasi directe, adapté, surtout à la mesure du débit de gaz. Les débitmètres massique thermiques déduisent les propriétés thermiques du fluide en écoulement (tels que la chaleur

spécifique et la conductivité thermique) et ils sont capables de fournir des mesures qui sont proportionnels à la masse du milieu. Dans les plages normalement rencontrés dans l'industrie des processus, la chaleur spécifique du gaz est essentiellement indépendant de la pression et de la température et proportionnelle à la densité et donc à la masse. Les deux façons les plus courantes de mesure le débit en utilisant des techniques thermiques sont de mesurer le taux de perte de chaleur du corps chauffé dans le courant d'écoulement, ou de mesurer la hausse de la température du fluide en écoulement quand il est chauffé [25].

Un débitmètre thermique massique produira généralement un signal lié au débit massique, et convertir la variable mécanique (débit) par l'intermédiaire d'une variable thermique (transfert thermique) en signale électrique (courant ou tension) qui peut être traité après par un microcontrôleur par exemple. Le schéma suivant illustre ce principe de fonctionnement. La gamme de fonctionnement de n'importe quel débitmètre massique dépend des propriétés du fluide telles que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité [26]. Le principe est illustré sur la figure I.17.

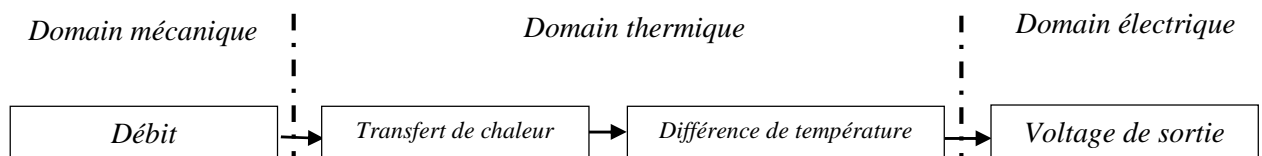


Figure I.17: Processus d'un débitmètre thermique avec une sortie électrique [26].

I.4.4.1 Principe et théorie

Les débitmètres thermiques mettent en œuvre une ou plusieurs sources de chaleur, généralement d'origine électrique, et un ou plusieurs détecteurs de température. Le débit de fluide est déduit des variations de puissance thermique ou des variations de température provoquées par l'écoulement. La littérature correspondante est abondante et reflète la variété des schémas possibles. Les réalisations industrielles reposent principalement sur :

- ✓ le micro débitmètre symétrique, utilisé pour les gaz seulement ;
- ✓ le débitmètre asservi à mesure de capacité thermique, principalement appliqué aux liquides ;
- ✓ le débitmètre asservi convectif, pour les forts débits gazeux ; sa précision est modérée.

Trois principes physiques sont exploités :

- ✓ le débit de capacité thermique ;
- ✓ la mesure par convection ;
- ✓ la mesure du temps de transfert (ou « temps de vol ») : méthode impulsionnelle.

I.4.4.1.1 Mesure du débit de capacité thermique

Le débit est déduit de la puissance thermique nécessaire pour augmenter la température du fluide en écoulement d'une faible valeur prédéterminée (quelques degrés) ; on peut réciproquement exploiter la variation de température du fluide lorsqu'il reçoit une puissance fixe :

$$P = M C_p \delta T \quad (I.15)$$

Avec P puissance thermique mise en œuvre, M débit-masse mesuré, Cp capacité thermique massique du fluide à pression constante, T élévation de température du fluide. Ce principe ne s'applique que si toute la masse du fluide est uniformément chauffée et se trouve en équilibre avec les détecteurs thermiques. Pratiquement, cela n'est réalisable que pour de faibles débits : quelques grammes ou dizaines (centaines) de grammes par heure. Ces appareils sont donc toujours constitués d'un capteur sensible de faible débit nominal.

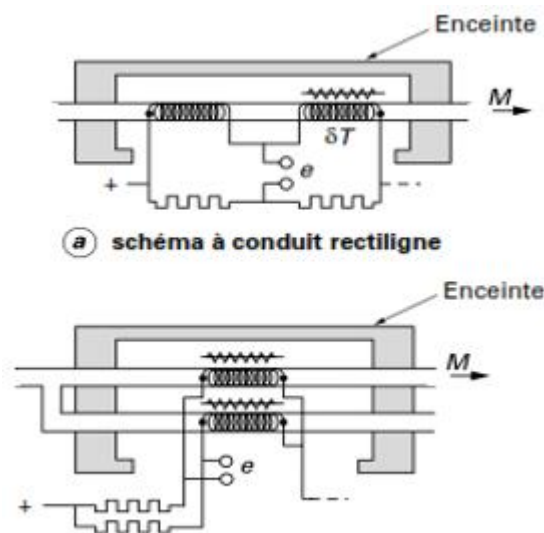


Figure I.18: Débitmètre à capacité thermique [27].

I.4.4.1.2 Mesure par convection

Le débit est déterminé à partir de la puissance thermique P prélevée à un élément chauffé, par convection forcée ou fluide en écoulement :

$$P = \alpha S \delta T \quad (I. 16)$$

Avec S surface de l'élément chauffé, T surchauffe de l'élément par rapport à la température du fluide loin de la zone d'échange (pratiquement température du fluide entrant), coefficient de convection. Ce dernier coefficient varie fortement avec les conditions d'écoulement, donc avec le débit. Lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 5 000 environ, on observe :

$$P \approx k M^{0.8} \delta T \quad (I. 17)$$

Avec K : constante de construction ;

M : débit-massique [Kg/s].

L'appareil n'est pas utilisable à faible débit (faible nombre de Reynolds). Deux fonctionnements réciproques sont possibles :

- la puissance est imposée, et l'on détermine la température de l'élément chauffé ;
- la température est imposée, et l'on détermine la puissance dissipée par convection. Le transfert thermique n'intéresse initialement que la partie du fluide proche de l'élément chauffé. La surchauffe moyenne du fluide est faible ou négligeable devant l'écart de température entre l'élément chauffé et le fluide entrant. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, la puissance mise en œuvre est beaucoup plus faible (dix fois, par exemple) que par la méthode de capacité thermique : ce débitmètre s'applique aux débits élevés, et le capteur accepte la totalité du débit, sans répartiteur. Sa précision est modérée (1 à 5 %). On peut considérer comme débitmètre thermique à convection un tronçon de canalisation dans lequel est placé un anémomètre à fil chaud ou à thermistance.

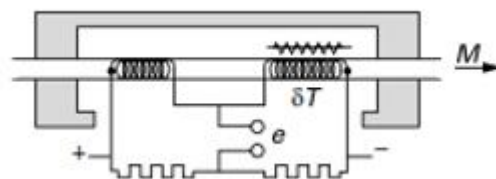


Figure I.19: Débitmètre à convection [27].

I.4.4.1.3 Mesure du temps de transfert ou temps de vol. Méthode impulsionnelle

Le fluide s'écoule dans une canalisation comportant une source thermique de petite dimension et un détecteur situé en aval de la source. La source, alimentée de façon discontinue, émet des impulsions de faible durée détectées en aval. Le débit est déduit du temps de transfert entre la source et le détecteur. Dans certaines réalisations, l'impulsion de la source est commandée par le signal reçu par le détecteur, de sorte que la fréquence des impulsions est proportionnelle au débit ; le nombre des impulsions est proportionnel à la quantité écoulée. Ce système s'applique de préférence aux liquides [27].

I.5 Conclusion

Le présent travail entre dans le cadre du thème portant sur l'étude des différents débitmètres utilisés pour le comptage du gaz. L'objectif était de visualiser les différents travaux publiés dans la littérature sur les débitmètres et d'illustrer l'importance pratique ainsi que l'aspect économique du comptage.

Chapitre II :

*Etat d'art des compteurs
thermiques*

II.1 Introduction

Le débitmètre massique thermique est fondé sur le principe de la cinétique du transfert de chaleur au sein d'un fluide ; il exploite à cet effet une propriété caractéristique de la matière qui est sa capacité thermique (appelée aussi *chaleur spécifique*). Parmi les capteurs de débit d'écoulement existant, nous trouvons les capteurs massiques thermiques qui possèdent un groupe de trois types.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents capteurs thermique décrits dans la littérature, leurs principe de fonctionnement, les variétés des modèles existants dans les domaines de recherches et dans les domaines d'application et leurs évolutions pendant ces dernières années.

II.2 Capteurs massique thermique

Pour mesurer le débit avec un capteur thermique, les trois modes suivants peuvent être appliqués :

- Perte de chaleur (anémomètre thermique) ;
- Principe de Thermotransfert (calorimétrie) ;
- Capteurs à Temps-de-vol (TOF).

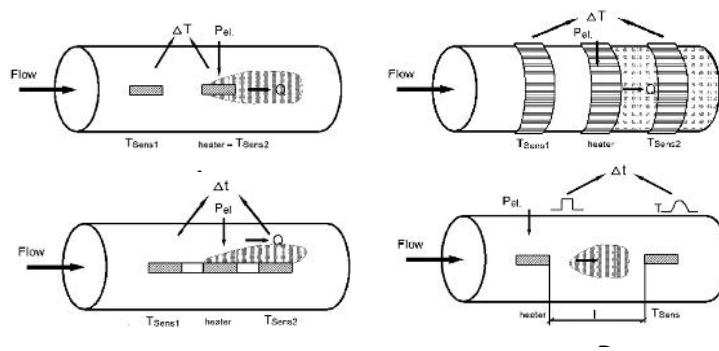


Figure II.1 : Les 3 principes utilisés dans les débitmètres thermiques [28].

Le principe des anémométries thermiques est que le flux est mesuré par son effet de refroidissement par rapport à une sonde chauffée. Pour les sondes de débit calorimétriques, une autre sonde de température est placée séparément de la sonde chauffée et dans la même région thermique. Les sondes de débit de Temps-de-vol sont des sondes de température placées en dehors de la couche thermique de la sonde chauffée et mesurent le temps prit pour qu'une

impulsion thermique atteint les sondes. Une sonde de débit thermique idéale est sensible seulement aux effets thermiques de l'écoulement [28].

II.3 Les anémomètres thermiques

L'anémomètre, terme du XVIII^e siècle, composé du préfixe « anémo » (en grec « μ », « anemos », en français « vent ») et du suffixe « mètre » (« mesure »), est un appareil permettant de mesurer la vitesse ou la pression du vent [29].

L'anémométrie à fil chaud est une technique classique de mesure de la vitesse instantanée d'un fluide s'écoulant autour d'une sonde à fil chaud placée au sein de l'écoulement à partir de celle de transfert thermique pour un élément sensible. Son point fort est son excellente résolution spatiale et temporelle, qui en fait la technique de choix pour l'étude des fluctuations turbulentes. Ses points faibles sont sa fragilité et (dans la configuration la plus simple) la limitation de la mesure à une seule composante de la vitesse [10, 7].

Le principe de l'anémométrie à fil chaud consiste à placer un fil fin, chauffé électriquement, dans un écoulement [30] et mesurer la puissance transférée depuis ce fil chauffé par effet Joule et refroidi par le passage du fluide. La puissance emportée par le fluide donne donc une mesure indirecte de la vitesse de l'écoulement mais pas de sa direction [10]. Il existe deux types des capteurs qui fonctionnent selon ce principe : le fil chaud et le film chaud.

Les anémomètres à fils chauds usuels sont constitués d'un fin fil métallique d'environ 0.4 à 2.2 mm de long, et de 0.5 à 10 μm de diamètre, tendu entre deux broches et placé à l'endroit où les mesures sont souhaitées. Divers compromis entre résistivité, conductivité thermique et robustesse mécanique conduisent à privilégier pour le fil des matériaux noble comme le tungstène, le platine qui présente une meilleure tenue mécanique [7, 31]

Le matériau doit suivre les caractéristiques suivantes :

- Coefficient a élevé de variation de la résistance avec la température ;
- Résistivité élevée ;
- Bonne résistance mécanique ;
- Conductivité thermique faible, pour réduire la conduction vers le support ;
- Matériau ductile, pour pouvoir être étiré en fils de petits diamètres. [10, 7].

D'autre part, la longueur et le diamètre du fil doivent être choisis de façon à avoir une résolution maximale, et de très faibles pertes vers les broches pour pouvoir obtenir une distribution uniforme de la température le long du fil. Pour cela, le rapport entre la longueur du fil et son diamètre doit être le plus grand possible ($l = 100D$) [7].

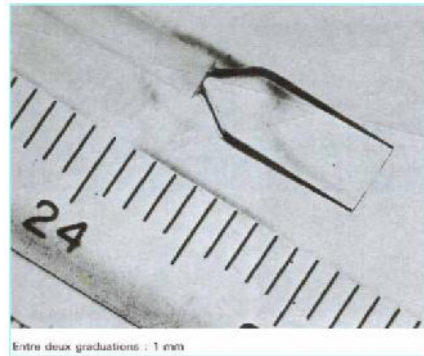


Figure II.20 : Sonde à fil chaud droit [32].

Le fil chaud est adapté à la mesure de vitesse dans les gaz. Les mesures dans les liquides, qui sont souvent conducteurs, ou les mesures dans des écoulements diphasiques (liquide, vapeur) nécessitent que l'élément chauffant soit isolé électriquement et soit relativement peu chauffé (10 à 20°C) au-dessus de la température du fluide pour éviter l'apparition des bulles, ainsi on peut utiliser des films chauds. C'est un film métallique très mince (de 0.1 μm d'épaisseur) en Nickel ou en platine déposé sur un support en Quartz, recouvert d'une couche mince isolante. Ces sondes ont une résistance mécanique beaucoup plus élevée, et elles sont donc utilisées dans des conditions plus dures que les fils. De nombreuses formes de films existent dans le commerce : coniques, cylindriques, plans, sphériques, etc. [7, 32].

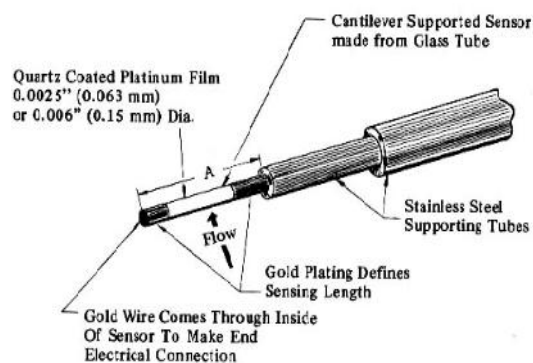


Figure II.3 : Capteur à film chaud à une seule extrémité [33].

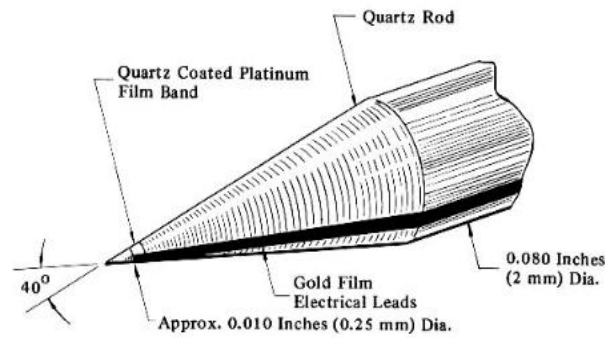


Figure II.4 : Capteur à film chaud en forme de cône [33].

A partir du principe du fil chaud, plusieurs catégories de fil chaud sont réalisables. Un fil simple permet de mesurer une composante de vitesse et une sonde à fils croisés deux composantes de vitesse. Les sondes peuvent également être alignées sur une antenne pour des mesures multi points [33, 34].

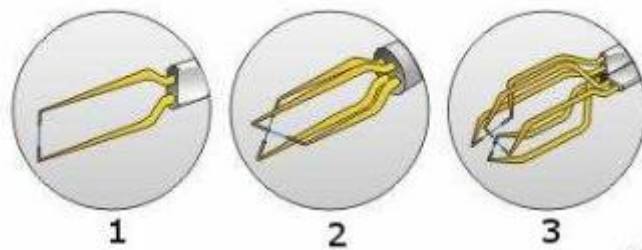


Figure II.5 : Trois catégories de sondes à fil chaud [34].

II.3.1 Bilan thermique pour un fil chaud

Le développement de la théorie pour le bilan thermique d'un fil chauffé par effet *Joule* permet d'établir ses paramètres d'utilisation. L'étude du bilan thermique en régime permanent et transitoire permet de définir les relations statique et dynamique entre le fil et le fluide en mouvement. Afin de simplifier les équations pour le bilan thermique, on suppose que le transfert de chaleur est monodimensionnel [35].

On considère un fil de longueur l et de diamètre d (figure II.6), tel que le rapport d'aspect l/d soit très grand (typiquement $l/d \approx 200$). On fait circuler dans ce fil de résistance R_w un courant d'intensité I . Le transfert de chaleur Q du fil à l'écoulement est fonction de la vitesse du fluide, de la différence de température entre le fil et le fluide ($T_w - T_0$), ou T_w est la température de fil et T_0 de fluide, ainsi que d'autres paramètres physiques du fluide [10, 36].

En notant E, l'énergie stockée sous forme de chaleur dans le fil, le bilan de puissance de fil chaud est représenté sur la figure II.6.

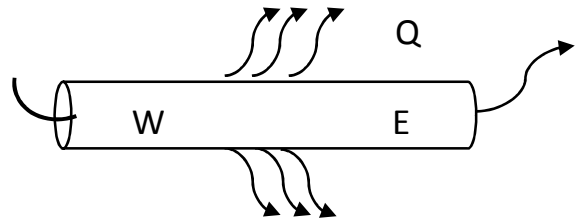


Figure II.6 : Bilan de puissance sur le fil chaud [10].

On peut écrire le bilan de puissance de la forme :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dW}{dt} - \frac{dQ}{dt} \quad (II.1)$$

Où : $dW = I^2 dR_w > 0$ est la puissance apporté par l'effet Joule et dQ la chaleur transféré depuis le fil vers le fluide.

Plusieurs effets contribuent à la dissipation de cette chaleur. Pour établit le bilan thermique Q en considérant les effets physique suivants :

- énergie emmagasinée par l'élément (capacité thermique du fil $\frac{dE}{dt}$)

$$\rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (II.2)$$

- énergie cédée au fluide par convection :

$$\pi dh(T_w - T_0) dx \quad (II.3)$$

- énergie cédée au fluide par rayonnement :

$$\pi d\sigma\varepsilon(T_w^4 - T_0^4) dx \quad (II.4)$$

- énergie cédée au fluide par conduction :

$$k_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \quad (II.5)$$

En écrivant le bilan thermique total du fil, nous avons :

$$\rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx = I^2 R_w - \pi dh(T_w - T_0) dx - \pi d\sigma\varepsilon(T_w^4 - T_0^4) dx - k_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \quad (II.6)$$

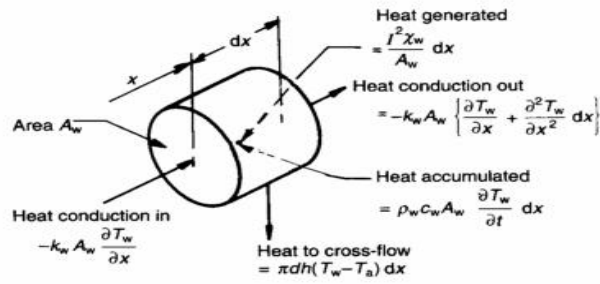


Figure II.7 : Bilan thermique de fil chaud [37]

Nous négligerons dans un premier temps la conduction vers les supports, en prenant un rapport d'aspect $l/d \gg 1$. Nous admettrons également dans toute la suite que la puissance rayonnée est négligeable et en posant $\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{dT_w}{dt}$ (car on a supposé que la température du fil est uniforme) et en intégrant sur la longueur l du fil, nous obtenons :

$$\rho_w c_w A_w \frac{dT_w}{dt} l = I^2 R_w - \pi dh (T_w - T_0) l \tag{II.7}$$

Dans des conditions équilibrées, on néglige également la petite conduction de la chaleur limite pour les fils minces. La température du fil peut varier, cependant nous supposons que le régime est stationnaire ou permanent et T_w est indépendant du temps, soit $\frac{dT_w}{dt} = 0$.

Le bilan de puissance devient alors :

$$I^2 R_w = \pi l dh (T_w - T_0) \tag{II.8}$$

C'est-à-dire que toute l'énergie fournie au fil par effet Joule est équilibrée par une perte égale en convection [35].

Pour obtenir le coefficient de transfert thermique, h , nous employons le nombre de Nusselt, Nu :

$$Nu = \frac{hd}{k_f} \tag{II.9}$$

On remplaçant hd dans l'équation par $Nu \cdot k_f$ on obtient :

$$I^2 R_w = \pi l k_f (T_w - T_0) Nu \tag{II.10}$$

II.3.1.1 Relation fondamentale de l'anémométrie : la Loi de King

Nous avons une relation qui montre la dépendance de nombre de Nusselt et la vitesse, maintenant on doit déterminer la loi de transfert de chaleur Nu en fonction de la vitesse v , c'est-à-dire du nombre de Reynolds Re_w basé sur le fil :

$$Re_w = \frac{vd}{\vartheta} \quad (II.11)$$

Où v est la vitesse de fluide, d le diamètre de fil et ϑ la viscosité cinématique.

L.V. King en 1914 [38] a proposé une relation qui relie le nombre de Nu et le nombre de Reynolds par :

$$Nu = a + b\sqrt{Re_w}^n \quad (II.12)$$

Donc :

$$I^2 R_w = \pi l k_f (T_w - T_0) \cdot (a + b\sqrt{Re_w}^n) \quad (II.13)$$

$$\frac{I^2 R_w}{(T_w - T_0)} = \left(a + b \sqrt{\frac{vd}{\vartheta}}^n \right) \pi l k_f \quad (II.14)$$

$$\frac{I^2 R_w}{(T_w - T_0)} = (A_0 + B_0 \sqrt{v}^n) \quad (II.15)$$

Où A_0 et B_0 sont des constantes déterminées lors de l'étalonnage statique de la sonde. King a trouvé une valeur pour l'exposant n de 0.5.

II.3.1.2 Dépendance de $R_w = f(T_w)$

Reprenons notre bilan de puissance avec le transfert de chaleur :

$$I^2 R_w = \pi l k_f (T_w - T_0) (a + b\sqrt{Re_w})$$

L'avantage de l'anémométrie à fil chaud réside dans la dépendance de la résistance R_w avec la température T_w , permettant ainsi d'accéder à la température T_w du fil.

Les sondes à fils chauds ont comme élément sensible un fil de métal dont la résistance électrique varie avec la température. En fait, il s'agit plus exactement de la résistivité du métal qui varie avec la température. Ce changement de résistivité produit un changement de résistance électrique suivant la relation :

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (II.16)$$

ρ est la résistivité de matériau, l sa longueur et A sa surface.

La résistance électrique $R(T)$ peut s'exprimer à partir d'une expansion en série de Taylor centrée sur T_0 , cette dernière étant une température de référence à laquelle la résistance est R_0 . Dans le cas où seule la température fait varier la résistance, on obtient :

$$R = R_0 + (T - T_0) \frac{\partial R}{\partial T_{T_0}} + \frac{(T - T_0)^2}{2!} \frac{\partial^2 R}{\partial T^2_{T_0}} + \dots + \frac{(T - T_0)^n}{n!} \frac{\partial^n R}{\partial T^n_{T_0}} + r_n(T) \quad (II.17)$$

En notant :

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\partial R}{\partial T_{T_0}}, \beta = \frac{1}{2! R_0} \frac{\partial^2 R}{\partial T^2_{T_0}}$$

La série de Taylor peut être réécrite sous la forme d'un polynôme de degré n (pour des applications particulières, certains utilisent jusqu'à $n = 20$...) :

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \dots] \quad (II.18)$$

Pour des variations de température relativement faibles (par exemple 0 à 100°C) plusieurs se limitent à une loi d'étalonnage linéaire :

$$R_w(T_w) = R_0 [1 + \alpha(T_w - T_0)] \quad (II.19)$$

$$\text{Ou : } \alpha = \frac{1}{R_w} \frac{\partial R_w}{\partial T}$$

En remplaçant, $T_w - T_0 = \frac{(R_w - R_0)}{\alpha R_0}$ dans (II.15), on obtient la relation fondamentale de l'anémométrie, ou loi de King :

$$\frac{I^2 R_w}{(R_w - R_0)} = A + B \sqrt{v} \quad (II.20)$$

$$\text{Avec } A = \frac{\pi l k_f}{\alpha R_0} A_0 \text{ et } B = \frac{\pi l k_f}{\alpha R_0} B_0 \sqrt{d/\vartheta}$$

II.3.1.3 La dépendance de nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt, caractérisant l'efficacité du transfert convectif. Plusieurs expressions ont été proposées pour le nombre de Nusselt, mais aucune n'est strictement valide pour un mélange particulier [39]. La relation générale proposée par Bruun en 1995 est [37] :

$$Nu = f\left(Re, Pr, Kn, M, \frac{l}{d}\right) \quad (II.21)$$

Plus tard Kramer [40], à la base des essais dans différents fluides, a établi une relation empirique entre le nombre de Nusselt, le nombre de Prandtl et le nombre de Reynolds [36]. La loi de Kramer (pour le cas du cylindre circulaire infiniment long) [40] :

$$Nu = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.5} \quad (II.22)$$

La loi de Kramer est valide dans la plage du nombre de Reynolds de $1 < Re < 10000$ [35].

La loi de Collis et Williams (tient compte des effets de la variation de température du milieu) :

$$Nu = (0.24 + 0.56Re^{0.45})\left(\frac{T_m}{T_0}\right)^{0.17} \quad (II.23)$$

Où T_m est la température moyenne de film avec : $T_m = \frac{T_w + T_0}{2}$ [39].

On s'aperçoit donc que toutes ces lois peuvent s'écrire sous la forme de la loi de King. Les valeurs que peuvent prendre les constantes A, B et n sont résumées dans le tableau. Soulignons que les lois de Kramer et de Collis & Williams ont été élaborées pour des cylindres de longueur infinie. L'étalonnage de Fiedler a été effectué sur une sonde de longueur finie ($l = 1 \text{ mm}$ et $d = 0.65 \text{ }\mu\text{m}$).

	A	B	n
Kramer	$3.226 \cdot 10^{-5}$	$8.715 \cdot 10^{-6}$	0.5
Collis et Williams	$1.975 \cdot 10^{-5}$	$11.23 \cdot 10^{-6}$	0.45
Étalonnage Fiedler	$2.25 \cdot 10^{-5}$	$6.55 \cdot 10^{-6}$	0.5

II.3.2 Mode de fonctionnement des anémomètres

Nous avons la loi de King :

$$I^2 R_w = A + B\sqrt{v} \quad (II.20)$$

Nous avons maintenant un lien entre le membre de droite représenté par la vitesse et le membre de gauche représenté par la tension IR_w . On a deux possibilités maintenant :

- ❖ Garder le courant I constant et mesurer v à travers les fluctuations de R_w uniquement c'est l'Anémométrie à Courant Constant (CCA) ;
- ❖ Garder la résistance R_w constante, et donc la température du fil T_w constante, et mesurer v à travers les fluctuations de I : c'est l'Anémométrie à Température Constante (CTA).

II.3.2.1 L'Anémométrie à Courant Constant (CCA)

Dans ce cas, le courant passant par le fil chaud est constant. Les fluctuations temporelles de vitesse induisent des fluctuations de la résistance de fil, que l'on peut écrire sous la forme :

$$R_w(t) = \bar{R}_w + \delta R_w(t) \quad (II.24)$$

Afin d'obtenir une mesure précise des fluctuations $\delta R_w(t)$, il est judicieux de retrancher la valeur moyenne \bar{R}_w . Ceci s'effectue au moyen d'un montage électronique, le pont de Wheatstone. Dans ce circuit, les deux branches sont équilibrées en moyenne (on règle la résistance d'équilibre $R_{eq} = \bar{R}_w$), et reçoivent donc chacune un courant $I = I_0/2$, où $I_0 = cst$ est le courant d'alimentation du pont ; la tension mesurée δe est donc nulle [10].

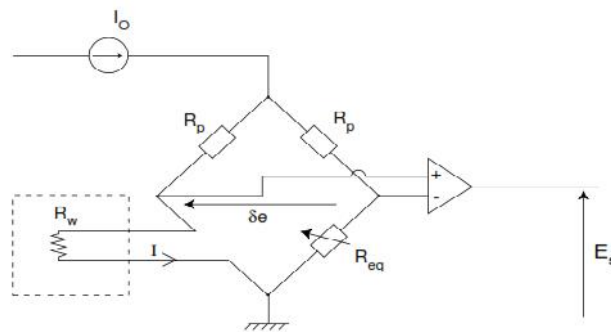


Figure II.8 : Circuit électronique utilisé en anémométrie à courant constant [10].

Les fluctuations de résistance $\delta R_w(t)$ vont induire un léger déséquilibre du pont, mesurable par la fluctuation de tension :

$$\delta e(t) = I(R_w(t) - R_{eq}) = I\delta R_w(t) \quad (II.25)$$

L'avantage de cette méthode est que δe est nul en moyenne, et peut donc être amplifié

($E_s = G\delta e$, où $G \simeq 10^3$ est le gain de l'amplificateur) afin d'optimiser le rapport signal/bruit.

Cette méthode de mesure n'est pas adaptée à la mesure de fluctuations de l'écoulement à haute fréquence. Le fil peut être facilement brûlé quand la vitesse est élevée. Par contre, si la vitesse est trop faible, le signal devient trop faible [10, 36].

II.3.2.2 Anémométrie à Température Constante (CTA)

Les défauts de la CCA (inertie thermique et propriétés physiques du film variables) seront corrigés si l'on trouve le moyen de garder la température du fil T_w , et donc la résistance R_w constante : c'est le principe de la CTA [10].

Le fonctionnement de l'anémométrie à température constante est le suivant : le fil ou le film est chauffé électriquement par effet Joule de façon à compenser les pertes thermiques par convection dans l'écoulement, par conduction dans les broches et par rayonnement. Une rétroaction électronique fournit à chaque moment la puissance électrique nécessaire pour maintenir la résistance, donc la température du fil toujours constante face aux variations de vitesse de l'écoulement [7, 34].

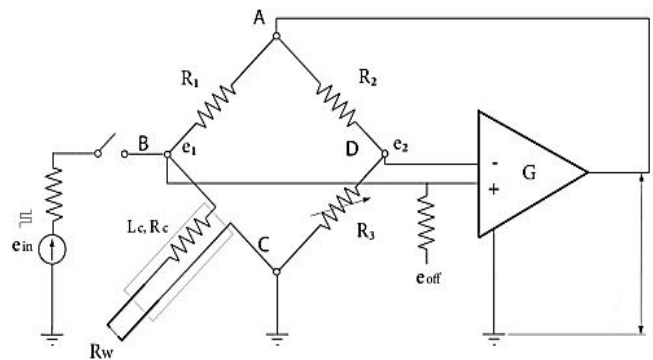


Figure II.9 : Circuit électronique utilisé en anémométrie à température constante [36].

De cette manière, c'est le courant I qui fluctue, et que l'on mesure à travers les fluctuations de la tension $e(t) = R_w I(t)$. Ainsi, l'équation fondamentale de l'anémométrie devient :

$$e = R_w I = \sqrt{R_w(R_w - R_0)(a + b\sqrt{v})} \quad (II.26)$$

Donc, la tension de sortie est de la forme :

$$E_s = \sqrt{A + B\sqrt{v}}$$

Afin de contrôler l'équilibrage du pont, le point B , entre le fil chaud et la résistance R_1 et le point D entre la résistance R_2 et la résistance variable R , sont connectés à l'entrée du servo amplificateur. De plus, une tension supplémentaire e_{off} est fournie à l'entrée de l'amplificateur.

Si le pont est en équilibre, on a $R_1 R_3 = R_w R_2$ et la différence entre les potentiels e_1 , dans le point B et e_2 , dans le point D est égale à zéro. Au contraire, si le pont n'est pas équilibré, la tension à la sortie de l'amplificateur devient :

$$E = (e_{off} + (e_1 - e_2))G \quad (II. 27)$$

Où G est le coefficient d'amplification ou le gain.

Un paramètre très important du fonctionnement de l'anémomètre est le rapport du pont R_1/R_2 . Habituellement, on utilise un rapport du pont 1:1 ou 1:20. Le rapport 1:1 rend le pont plus sensible aux fluctuations de l'écoulement. Le rapport 1:1 est couramment utilisé quand le câble de connexion du fil chaud est long et quand on a besoin d'augmenter la fréquence de mesure. Un autre paramètre important est le coefficient de surchauffe $a = \frac{R_w}{R_0}$. Ce coefficient représente le rapport entre l'augmentation de résistance durant le fonctionnement et la résistance du fil chaud à froid [36].

Du point de vue rapport signal/bruit, les deux modes de fonctionnement sont équivalents quand les conditions de mesures sont identiques. Les anémomètres CTA sont plus faciles à utiliser et ce mode est actuellement le plus employé.

L'avantage principal de CTA est que la réponse en fréquence n'est pas limitée par l'inertie thermique du fil, puisque sa température ne varie pas (à la différence du CCA). La fréquence de coupure peut aller jusqu'à plus de 100 kHz [7].

II.3.3 Réponse en fréquence

Etant donné que le fil chaud est utilisé pour les mesures instantanées, la résistance réactive devient importante et pour équilibrer le pont, l'inductance du câble doit être prise en compte. Pour équilibrer cette induction, soit, on branche une bobine en série avec R_2 , soit, un condensateur en série avec le fil chaud. Afin d'obtenir l'équilibrage dynamique du pont, on utilise un test électronique. Ainsi, dans le point B du pont on branche une source de tension et on envoie un signal carré. Pour avoir une réponse optimale aux perturbations, le signal à la

sortie de l'amplificateur doit avoir la forme présentée sur la figure suivante. Le temps de suppression de perturbation permet de calculer la fréquence de mesure maximale :

$$f_c = \frac{1}{1.3\tau_w} \quad (II. 28)$$

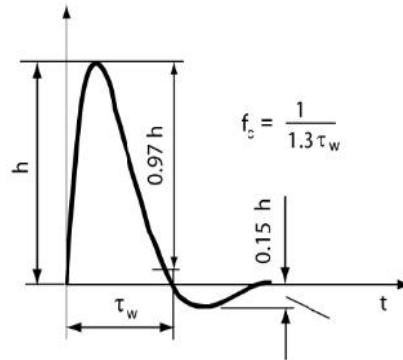


Figure II.10 : Réponse à un signal carré [37].

II.3.4 Etalonnage

L'équation qui permet d'évaluer analytiquement les coefficients A, B et n de la loi de King, ne donne que des valeurs très approximatives. En réalité, la vitesse calculée à l'aide de ces coefficients présente un écart important et l'étalonnage de fil chaud avant chaque mesure devient indispensable. Le but de l'étalonnage est d'extraire les coefficients de fil chaud réels à partir d'un tableau expérimental composé par N couples des valeurs de la tension E_s et de la vitesse correspondante v , et on ajuste les coefficients A et B de la loi de King. Il suffit ensuite d'inverser (électroniquement ou informatiquement) la loi de calibration pour en déduire $v(t)$ à partir du $E_s(t)$ mesuré.

Remarquons que la non-linéarité de cette loi de King est la principale difficulté de l'utilisation de l'anémométrie à fil chaud : Une petite erreur sur la mesure de $E_s(t)$ peut conduire à une erreur importante sur v .

Expérimentalement, on observe qu'une loi de King modifiée est de la forme :

$$E_s^2 = A + Bv^n$$

(Avec n entre 0.4 et 0.6). Afin de déterminer les coefficients A, B et n, on mesure à vitesse nulle $A = E_s^2$, puis on trace en coordonnées logarithmiques :

$$\log(E_s^2 - A) = \log B + n \log v \quad (II. 29)$$

On obtient l'exposant n en mesurant la pente de la droite $\log(E_s^2 - A)$ en fonction de v , et B grâce à l'ordonnée à l'origine [10, 36].

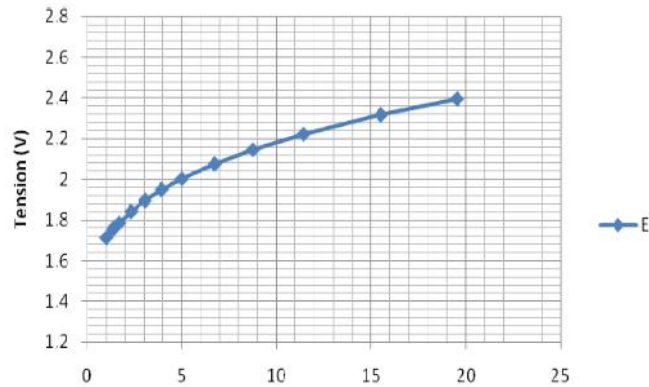


Figure II.11 : Étalonnage d'un fil chaud selon la Loi de King [36].

II.3.5 L'évolution de l'anémométrie à fil chaud

Comte-Bellot [31] a noté que l'origine précise de l'anémométrie à fil chaud ne peut pas être précisément déterminée. L'une des études antérieures de transfert de chaleur à partir d'un fil métallique chauffé a été faite par Boussinesq en 1905. Les résultats obtenus par Boussinesq ont été utilisés par L.V. King en 1914 où il a vérifié expérimentalement ses résultats théoriques. Ces enquêtes antérieures de l'anémométrie à fil chaud considèrent que la chaleur moyenne caractéristique est transférée par le fil chauffé. Les premières mesures quantitatives des fluctuations des écoulements incompressibles subsoniques ont été faites en 1929 par Dryden et Kuethe en utilisant un anémométrie à courant constant où la réponse en fréquence de fil a été étendue par l'utilisation d'un amplificateur compensateur. En 1934, Ziegler a développé un anémométrie à température constante pour la mesure des fluctuations à l'aide d'un amplificateur de contre-réaction pour maintenir la température du fil constante jusqu'à une fréquence donnée. Dans les années 1950, Kovasznay [41] a étendu l'anémométrie à fil chaud aux écoulements compressibles où il avait constaté expérimentalement que dans un écoulement supersonique le fil chauffé est sensible seulement au débit massique et la température totale. Kovasznay a développé une technique graphique pour obtenir ces fluctuations, utilisée surtout en écoulement supersonique. Dans un écoulement subsonique compressible le transfert de chaleur à partir d'un fil est fonction de la vitesse, la densité, la température totale et la température de fil [41]. Højstrup et al, ont examiné les effets des fluctuations dans la température d'écoulement sur la distribution de la température du fil. Cependant, aucune fluctuation dans le coefficient ou le courant de transfert thermique n'était considérée, et la résistance globale du fil n'était pas

maintenue constante. Freymuth, 1979, a défini un rapport de fluctuation comme le rapport du transfert thermique aux hautes fréquences, quand les fluctuations de conduction sont moins que zéro dans l'état d'équilibre. Bien que la température moyenne de fil était gardée constante. Les résultats sont seulement applicables pour de bas rapports de surchauffe et aucune solution générale n'est donnée, bien que deux fréquences distinctes de coupure aient été trouvées. Parantoon et al, ont fait une analyse plus détaillée et qu'ils ont été confirmé par des résultats expérimentaux jusqu'à la fréquence expérimentale maximum de 800 Hertz. Dans ce cas-ci, comme avec Freymuth, les paramètres dépendants ne sont pas clairement exprimés, ni le fond physique.

La tentative la plus récente de compenser des effets à haute fréquence expérimentalement est réalisé par Brouckaert (1998) qu'il a employé un changement d'étape de la température d'écoulement. Une série d'équations du premier ordre ont été développées et utilisés pour compenser les effets de conduction à toutes les fréquences. Ceci a l'avantage d'être expérimentalement dérivé et applicable à tout fil chaud : cependant, ni la dérivation ni l'application de ce procédé sont claires [37].

II.4 Principe de Thermotransfert calorimétrique

Les sondes calorimétriques sont des sondes thermiques à débit qui mesurent l'asymétrie des profils de la température autour de l'élément de chauffage. La figure II.12(a) montre la distribution théorique du champ de température autour d'un élément de chauffage. La figure II.12(a) montre le champ de température mesuré sur une membrane de silicium avec un élément de chauffage au centre. Dans le cas où il n'y a pas de flux, le profil de la température est symétrique. Quand un flux existe de droite à gauche, le profil de la température devient asymétrique. Deux sondes de mesure de température en amont et en aval mesurent cette asymétrie et par conséquent, le débit [42].

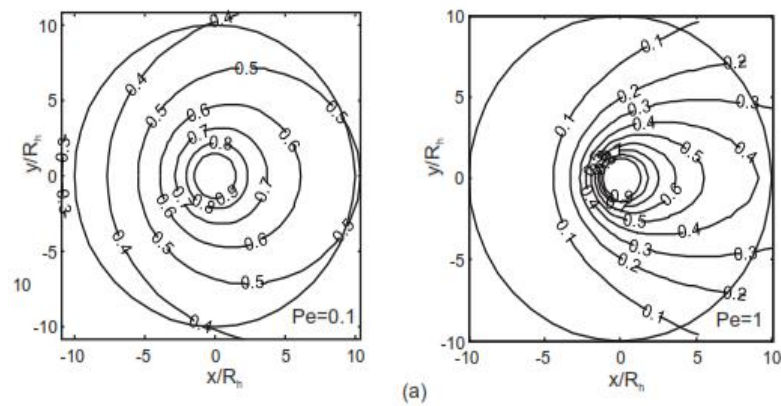


Figure II.12 : Distribution théorique de champ de température autour d'un élément de chauffage [42].

Le déplacement du profil de température provoquée par l'écoulement de fluide autour d'un élément de chauffage peut être utilisé pour mesurer de très faible débit de masse. En fonction de l'emplacement des éléments de chauffage et de détection, il existe deux types de capteurs : les capteurs calorimétriques intrusifs qui se trouvent dans le fluide, et non intrusifs situés en dehors du fluide.

Le type intrusif a de nombreuses limites. L'appareil de chauffage et les capteurs de température doivent être enfoncés dans le fluide. Par conséquent, la corrosion et l'érosion endommagent ces éléments facilement.

Dans le type de capteur non intrusif, le dispositif de chauffage et les capteurs de température essentiellement entourent l'écoulement en étant situé à l'extérieur du tube qui contient le flux. Le principal avantage de ce capteur est le fait qu'aucun capteur n'est exposé au fluide s'écoulant, qui peut être très corrosif [42, 43].

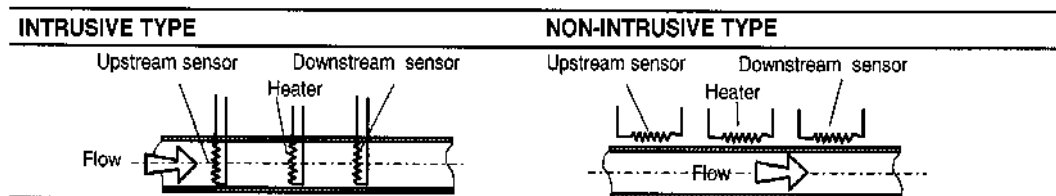


Figure II.13 : Deux types des sondes calorimétriques [43].

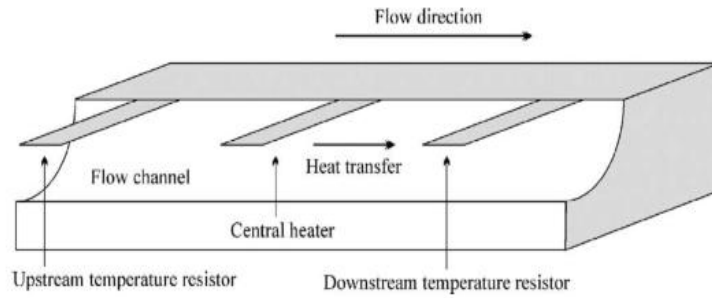


Figure II.14 : Schéma d'un capteur calorimétrique [44].

Cette classe des mesures thermiques de débit emploie au moins deux éléments : une sonde chauffante et une sonde en aval. La sonde en aval mesure le changement de température du fluide par l'élément chauffé. Presque toujours un second capteur est placé en amont. Cela rend le capteur de débit bidirectionnel et fournit un signal différentiel, de sorte que l'effet de la conduction à travers le substrat peut être enlevé. Un décalage est toujours créé dans les cas où la température des capteurs en amont et en aval diffère [43].

II.4.1 Model analytique de la sonde calorimétrique

La température est supposée constante et linéaire le long de l'axe du canal et perpendiculaire à l'écoulement de fluide.

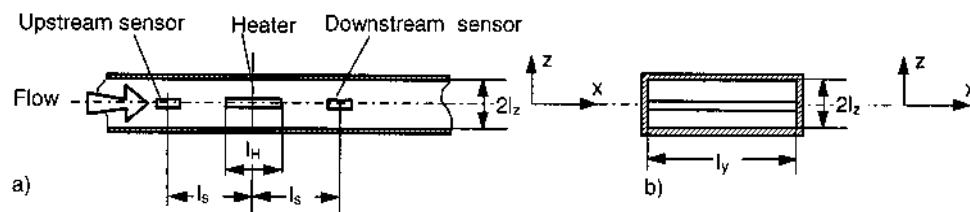


Figure II.15 : Principe de fonctionnement de la sonde calorimétrique [43].

Prenant la structure montrée sur la figure II.15, avec A la surface du canal d'écoulement ($A = l_y 2l_z$), ρ la densité de fluide, c_p sa capacité calorifique, v sa vitesse moyenne, k_f sa conductivité thermique, on trouve :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \left(\frac{\rho c_p}{k_f} \right) - \left(\frac{T}{l^2_z} \right) = 0 \tag{II.30}$$

Ou :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \left(\frac{v}{\lambda}\right) - \left(\frac{T}{l_z^2}\right) = 0 \quad (II.31)$$

Avec $\lambda = \frac{k_f}{\rho c_p}$ est la diffusivité thermique de fluide. Résoudront l'équation différentielle passée en utilisant la longueur de la sonde chauffante, le transfert thermique Q et les conditions aux limites :

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} T(x) = 0 \quad (II.32)$$

La distribution de température est comme suite :

$$T(x) = T_0 \exp[\gamma_1(x + \frac{l_H}{2})] \text{ pour } x < -\frac{l_H}{2} \quad (II.33)$$

$$T(x) = T_0 \text{ pour } -\frac{l_H}{2} < x < \frac{l_H}{2} \quad (II.34)$$

$$T(x) = T_0 \exp[\gamma_2(x - \frac{l_H}{2})] \text{ pour } x > \frac{l_H}{2} \quad (II.35)$$

Avec :

$$\gamma_{1,2} = \left[\frac{v \pm \sqrt{v^2 + \frac{4\lambda^2}{l_z^2}}}{2\lambda} \right] \quad (II.36)$$

$$T_0 = \frac{P}{\left[\left(\frac{2k_f l_y l_H}{l_z}\right) + Ak_f(\gamma_1 - \gamma_2)\right]} \quad (II.37)$$

La différence de température entre les deux sondes, la sonde en amont en $(x=l_s)$ et la sonde en aval en $x=-l_s$ est :

$$\Delta T(v) = T_0 \left\{ \exp \left[\gamma_2 \left(\frac{l_s - l_H}{2} \right) \right] - \exp \left[\gamma_1 \left(\frac{-l_s + l_H}{2} \right) \right] \right\} \quad (II.38)$$

II.4.2 Evolution des capteurs calorimétrique

Comme pour les anémomètres thermiques, la sonde chauffante peut être employée en différents modes : CC, CV et CP. Lammerink et al dans [45] ont calculé le comportement des trois sondes calorimétriques dans des micro-canaux.

En plaçant une paire des capteurs perpendiculairement à la première paire, un capteur de débit en 2D est obtenu [46, 47, 48]. Une autre classe des sondes de débit calorimétriques utilise des sondes chaudes doublées : la sonde chauffante doublée mesure la différence de perte de chaleur entre les sondes en amont et en aval [49, 50, 51]. Ce qui différencie ces sondes des sondes de pont de Wheatstone est que la différence de température entre la sonde en amont et en aval est un résultat du transfert thermique induit entre elles, l'une chauffe l'autre par le fluide.

Le schéma II.16 illustre qu'aux basses vitesses d'écoulement, la différence de la température entre la sonde en aval et la sonde en amont ΔT augmente linéairement. Cependant, aux vitesses croissantes, la sonde chauffante est refroidie et la ΔT diminue encore.

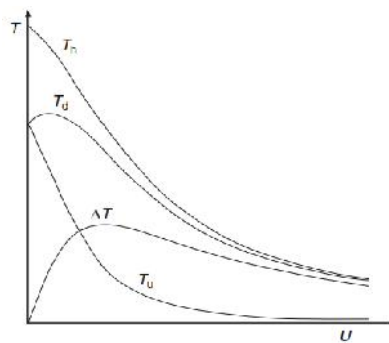


Figure II.16 : Comportement de la vitesse d'écoulement en fonction de la température [52].

Le mode de contrôle CT de l'élément de chauffage surmonte ce problème et fournit une augmentation monotone de ΔT . Comme les anémomètres thermiques, il est également possible de contrôler la température de l'élément chauffant pour maintenir un CTD (température de différence constante) avec le fluide. Le mode de fonctionnement de la TBA (anémomètre à température de balance) de [49] est basée sur deux éléments chauffés à une petite distance l'un de l'autre maintenu à la même température par un contrôleur CP. La puissance totale pour les deux éléments chauffants reste constante et le rapport de la distribution de puissance entre les deux éléments est une mesure pour le débit. Comme les thermocouples métal semi-conducteur, une variante AC a été présentée par [53] qu'est composé de deux éléments chauffants déphasés

de 90° et un troisième élément entre eux pour capter les variations de température à l'aide d'un amplificateur à verrouillage de phase. Bien que le plus souvent l'élément chauffant et le capteur de température n'exige pas un mode spécifique, une sous-classe spécifique de capteurs sur la base de l'effet pyroélectrique est réalisée. Les matériaux pyroélectriques forment une sous-classe de matériaux piézoélectriques qui distinguent eux-mêmes par la génération d'une charge de surface lorsqu'ils subissent des changements de température. La figure II.17 montre un croquis du dispositif inventé par [54] dans lequel les électrodes sur un substrat lithium tantalate (LiTaO₃) permettent la lecture de charge locale en amont et en aval d'une résistance chauffante.

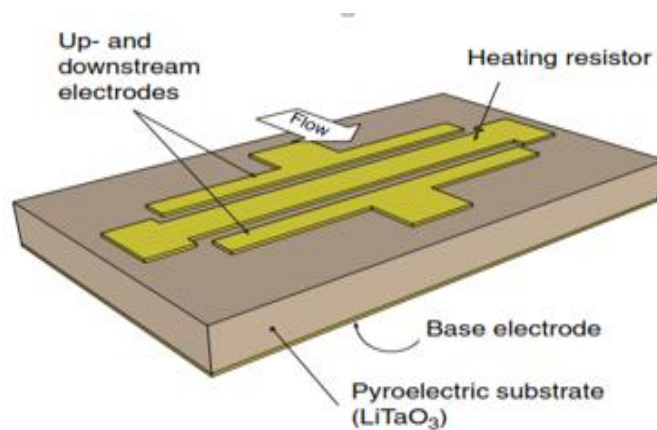


Figure II.17 : Capteur de flux basé sur le principe de pyroélectricité [54].

Récemment, un nouveau domaine d'application des capteurs de débit calorimétrique est émergé. Au lieu d'éviter l'effet de la convection naturel, le dispositif de chauffage est chauffé jusqu'à une haute température (150-700°C) pour créer un écoulement de fluide loin de l'élément chauffé. S'il est placé dans une cavité fermée, la direction de l'écoulement est déterminée uniquement par l'accélération de la force agissante sur lui et le flux d'air devient une mesure pour l'accélération et l'inclinaison. Le principe a été breveté par Plöchinger en 1994, et une variante des micromachines suivies après peu de temps [52].

D.F. Reyes-Romero et al ont proposé une sonde qui permet de mesurer la réponse en fréquence d'une sonde thermique de flux pour des différentes vitesses, elle est composée par cinq thermistances amorphes de Germanium et une thermistance chauffante placée sur une membrane circulaire isolée thermiquement de diamètre 1 mm. La thermistance centrale (CT) occupe le centre tandis que les quatre autres thermistances restantes (UT, DT, ST1 et ST2) sont distribuées concentriquement autour d'elle. Cet arrangement permet de mesurer la direction de flux avec une erreur maximale de 3.5°.

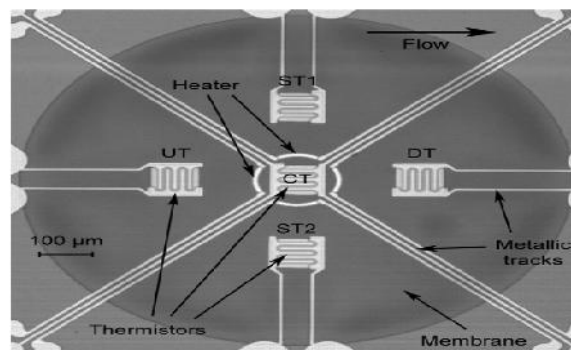


Figure II.18 : Élément chauffant et les thermistances placées sur une membrane isolée thermiquement en SiN_xSiO_2 (central, upstream, downstream, side1 et side2) [52].

II.5 Capteur à Temps de vol

Le capteur à temps de vol est constitué d'un élément chauffant et un ou plusieurs capteurs de température en aval, son principe de fonctionnement est de mesurer le temps qu'il faut à une impulsion de chaleur pour se déplacer à partir de l'élément chauffé jusqu'au capteur. Comme les capteurs de débit calorimétrique, ce type de capteur peut également être utilisé pour la connaissance de direction. Cependant, sur une échelle microscopique, la diffusivité thermique de fluide joue un rôle important pour la mesure du signal d'écart de la relation idéale $t_{pic} = \frac{x}{v}$ entre la crête de l'impulsion mesurée à une distance x et la vitesse v . Pour le cas simplifié d'une source de chaleur dans une ligne d'écoulement uniforme, Marshall provient à une solution analytique décrivant la réponse thermique à une impulsion de chaleur.

Pour cela, il a commencé avec la diffusion combinée et l'équation de transport de chaleur par convection $\frac{q}{\rho c}$, où q est la chaleur générée (Wm^{-1}), ρ la densité du milieu, et c_p la capacité de chaleur spécifique du fluide :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v\nabla T = \lambda \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c_p} \quad (II.39)$$

La solution générale d'un point à une distance x de la source d'impulsions de chaleur pour des vitesses différentes est tracée sur la figure II.19 (a). A faible vitesse, l'impulsion thermique élargit considérablement avant d'atteindre le point voulu. Le temps où le pic de température d'un point situé à une distance x de l'impulsion de chaleur de la source est exprimé sur la Figure II.19 (b) :

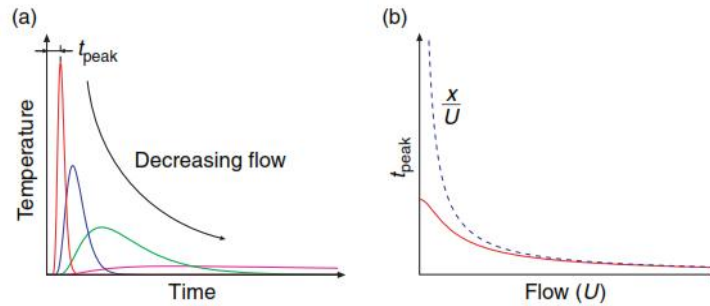


Figure II.19 : L'allure de vitesse en fonction de température et du temps [52].

$$t_{pic} = \frac{\sqrt{4\lambda^2 + v^2 x^2} - 2\lambda}{v^2} \quad (II.40)$$

La réécriture en fonction de la vitesse d'écoulement, donne l'équation suivante :

$$v = \frac{\sqrt{x^2 - 4\lambda t_{pic}}}{t_{pic}} \quad (II.41)$$

Ceci implique que, pour que la relation idéale $t_{pic} = \frac{x}{v}$ doive être valide, $4\lambda t_{pic}$ doit être beaucoup plus petit que x^2 .

II.5.1 Evolution des capteurs à temps de vol

Lammerink [55] a utilisé les résultats de Marshall publié en 1958 pour développer un capteur de débit qui calcule à la fois la vitesse d'écoulement et la diffusivité par la combinaison d'un anémomètre thermique avec un capteur thermique à temps de vol. Avec ces valeurs de mesure utilisant comme entrées vers un réseau neuronal artificiel, le débit d'écoulement et la composition d'un mélange Azote / Hélium vont être déterminée.

La figure II.20 (a) montre le capteur à temps de vol présenté par Shoji et Esashi en 1994. L'élément chauffé et le capteur de température sont des résistances Pt thermiquement isolés par $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ membrane et supporté par un cadre de silicium dopé P^+ . Conçu pour mesurer les débits d'air supérieur à 5 ms^{-1} , Il mesure à trois distances différentes (1, 4.2 et 10.2 mm).

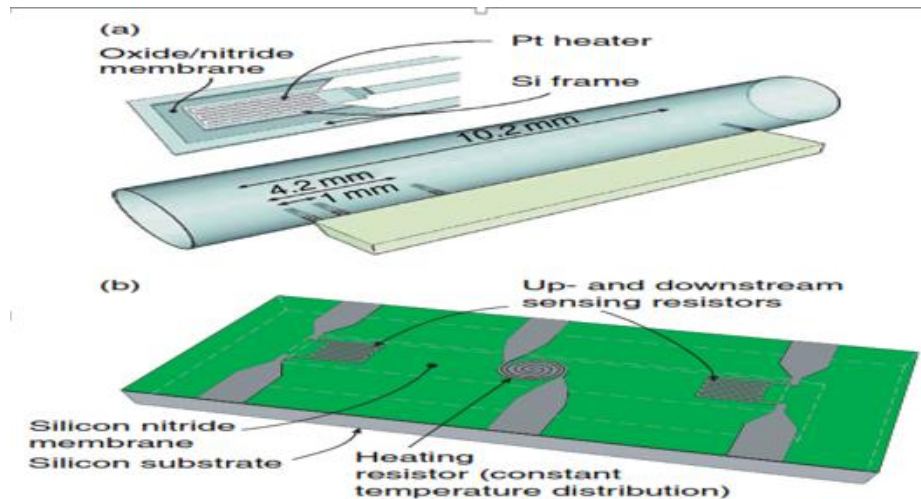


Figure II.20 : Capteur de temps de vol [52].

Des capteurs de Phase à base de temps - de - vol ont également été présenté par Bedö dans [56]. Les auteurs ont résolu la diffusion en 1D combinée et l'équation de transfert de chaleur par convection pour une variation de température sinusoïdal à un point dans le flux. Comme pour les résultats attribué par van Kuijk [57], une limite de détection de vitesse d'écoulement peut être formulée à l'endroit où le transfert de chaleur par conduction devient plus grande que le transfert de chaleur par convection. La fréquence angulaire en dessous de laquelle le transfert de chaleur par conduction commence à dominer est calculée pour l'Azote et l'eau pour l'expérience décrite avec 2 mm de distance entre l'élément chauffé et le capteur sont 10 MHz et 1,5 Hz respectivement.

Ashauer et al [58] ont montré qu'une conception à base de la membrane de nitrure de Silicium avec une résistance en poly-Silicium et une thermopile comme capteurs de chaque côté de la résistance peut être utilisée dans les trois modes en modifiant la distance entre l'élément chauffant et les jonctions chaudes des thermocouples.

Si les sondes chaudes sont placées à proximité de la résistance chauffante, l'élément chauffant et le capteur agissent comme une entité unique thermique, et le capteur peut être utilisé comme un anémomètre thermique. En plaçant les sondes chaudes à une plus grande distance, le dispositif peut être utilisé dans la calorimétrie (pour des faibles vitesses d'écoulement) et le

mode temps – de-vol (pour des vitesses de haut débit). Le mode calorimétrique peut être utilisé à partir de 0,125 jusqu'à 8 mms^{-1} après cette valeur le mode temps de vol donne des valeurs de mesure valide allant jusqu'à 128 mms^{-1} .

II.6 Technologies MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)

Pour répondre aux critères requis pour les capteurs, un effort de miniaturisation a été entrepris ces dernières années, aidé par l'utilisation de technologies dérivées de la fabrication des micro-processeurs et la technologie de semi-conducteur, d'où sont apparus les capteurs et actuateurs de la technologie dite MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems).

La compatibilité de micromachine et la microélectronique fait l'intégration de l'électronique et des éléments mécaniques possibles. Les premiers sonde de flux basées sur la technologie de Silicium ont été présentés en 1974 par van Putten et Middelhoek. Dans les années 80 où la micromachine et micro-électro-mécanique des systèmes ont été introduits dans le monde professionnel, certains firmes industriels ont développé des nouveaux produits micromachine tel que la sonde de flux basé sur le principe de film chaud. Depuis la fin des années 80 et au début des années 90, le développement des sondes micromachine a invoqué un champ important de recherches par de nombreux établissements académiques internationaux. Dans les années 90, le développement allait vers la fabrication des systèmes micro fluidique complexe (sondes de flux micro, pompes et les valves dans un système). Par conséquent, il y a un besoin de la sonde de débit qui peut mesurer des débits très petits. Le résultat de ce défi est une nouvelle classe des sondes de débits micromachine qui ont un canal micro intégré [59].

II.6.1 Capteurs de flux Thermo résistifs

Le premier capteur de flux thermique basé sur la technologie de silicium a été publié par van Putten et Middelhoek de l'Université de Technologie de Delft en 1974. En commençant par le principe de capteur à fil chaud, le capteur était développé à un anémomètre intégré en Silicium double pont. En outre, la centre de recherche de Toyota et les laboratoires de développement ont développé un autre capteur de flux thermorésistif en Silicium en 1986.

Le principe de travail est basé sur l'anémométrie classique à fil chaud. La puce de capteur comporte deux résistances en platine à film mince qui sont utilisés comme un élément de chauffage et un capteur de température de fluide.

Un an plus tard, le même principe a été présenté par le Central Research Laboratories de Scharp Corporation. Le verre a été utilisé comme substrat porteur. Pour le contrôle d'une température de dispositif de chauffage constante, un dispositif de chauffage à résistance de détection de température a été intégré.

Le capteur de débit de Honeywell sciences physiques Center (États-Unis) se compose d'une résistance de température sensible (Permalloy) stratifiées au sein d'une couche de nitrure de Silicium thermiquement isolé de 1 μ m d'épaisseur. Le type commercial de ce capteur comporte des résistances en platine. La puce se trouve dans un canal de fluide. La différence de résistance peut être évaluée à l'aide d'un pont de Wheatstone et un amplificateur différentiel.

Le capteur de débit développé par le centre de capteur et actuateur de Berkeley (États-Unis) a amélioré l'isolation thermique des résistances dopées en Polysilicium. Dans la conférence internationale des transducteurs en 1985, un capteur de débit micromachine avec un canal micro intégré a été présenté pour la première fois par Peterson Transensory of devices Inc (États-Unis).

Le capteur de débit présenté par l'Université de Twente (Pays-Bas) utilise les résistances CrAu comme sonde de chauffage et capteurs de température . Les résistances sont réalisées par une grille en nitrure de silicium. Un autre capteur de débit avec les canaux intégrés a été fabriqué par l'Université technique de Chemnitz-Zwickau. Pour la première fois, le capteur a une structure de résistance en dehors du canal de flux. Le contact direct avec le fluide peut être évité. La poursuite de développement de ce capteur dispose de structures de résistance sur une membrane de Silicium mince qui permet d'améliorer le capteur dynamique [60, 61].

II.6.2 Capteurs thermiques de flux Multiaxes

Le flux est un phénomène en 3D, bien que dans des cas spécifique tels que l'écoulement laminaire à travers un tube, un écoulement en 1D peut être considéré. Les méthodes de fabrications utilisées dans les microsystèmes se prêtent bien pour l'intégration des capteurs de flux multiples sur une puce, offrant un avantage sur des procédés classiques, où la complexité de la fabrication et donc le coût pour des capteurs de débit classiques augmente de façon spectaculaire que plusieurs axes sont à entreprendre pour la mesure.

Les capteurs de débit colorimétriques sont les plus simples des dispositifs pour s'étendant dans une deuxième dimension car pour placer une paire de détecteurs perpendiculaire à la première paire habituellement ça ne pose pas de problèmes structurels. Des puces chaude

2D ont été prouvées et ont également été commercialisé comme des capteurs de vent en raison de leur facilité de fabrication.

Pour réaliser l'isolation thermique, l'ensemble des structures du dispositif de chauffage et les capteurs peuvent être placés sur une membrane ou un canal en forme de croix semi-ouvert comme s'était utilisée par Fürjes et al qui ont conçu un capteur de débit 2D pyroélectrique où une électrode de détection a été partagée [44]. Kim et al [62] ont obtenu un capteur sensible à la direction par l'aide d'un anémomètre thermique qui mesure la vitesse d'écoulement et un capteur de flux calorimétrique pour mesurer la direction [62].

La réalisation des mesures 3D est plus complexe pour les capteurs calorimétrique parce qu'il est difficile de fabriquer une structure capteur-chauffeur-capteur dans la direction hors du plan de la plaquette. La sensibilité à la troisième dimension est réalisée par une paire de fils l'un au-dessus de l'autre, un de chaque côté de la plaquette, comme illustré sur la figure II.21.

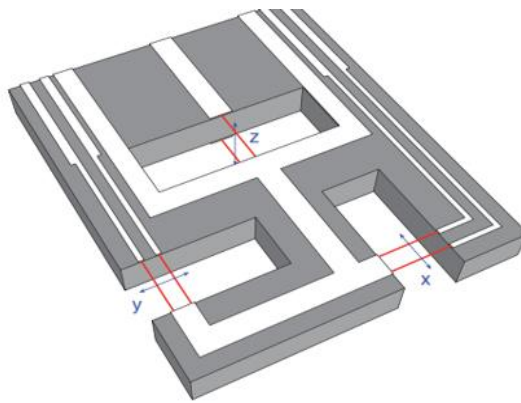


Figure II.21 : Capteur micro flux trois dimensionnelle [52].

Pour les anémomètres thermiques fonctionnant en applications multiaxes, une asymétrie doit être présente dans la conception de l'élément de chauffage et de détection. Dans la pratique, ceci implique que le capteur est un fil et ne peut pas être une petite résistance circulaire. Des capteurs en deux dimensions ont été conçus par Breuer et al, les fils sont placés sur une ligne en zig-zag pour obtenir la mesure de deux composantes (figure II.22) [52, 60].

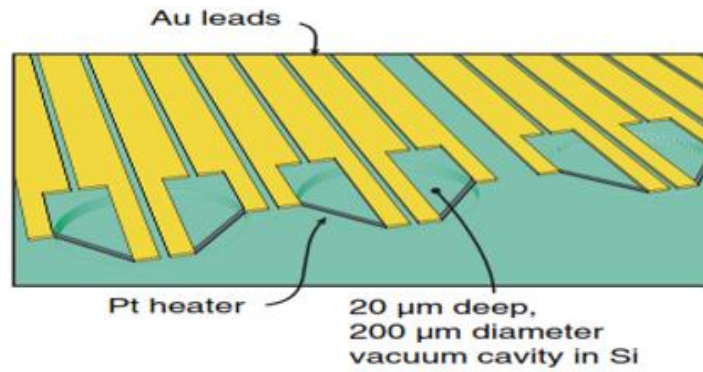


Figure II.22 : Conception d'un capteur à deux dimensions [52].

II. 7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents capteurs thermiques de flux existants dans les domaines de recherches. Le type de capteur et son échelle dépendent des besoins voulus par le chercheur et des spécifications de chaque type.

Chapitre III :

*Les débitmètres massiques
thermiques industriels*

III.1 Introduction

Les débitmètres thermiques industriels sont des dispositifs conçus pour effectuer la mesure de la quantité de fluide durant son écoulement dans une application industriel. La norme descriptive des types des débitmètres et leurs utilisations prend la dénomination « ISO/CD 14511 ». Cette norme couvre deux types des débitmètres, le premier type est le débitmètre thermique massique capillaire (en Anglais : capillary thermal mass flowmeter (CTMF)). Le second type est le débitmètre thermique massique à passage intégral ou à dispersion (en Anglais : immersif thermal mass flowmeter (ITMF), disponible en tant que sonde insérée ou sonde intégrée. Il fonctionne selon le principe de mesure thermique d'un anémomètre à fil chaud pour la mesure de la vitesse locale d'écoulement.

Ainsi, ce chapitre prend en charge l'ensemble des débitmètres massiques thermiques industriels et les différentes technologies utilisées par leurs fabrications.

III.2 Débitmètre massique thermique

Les débitmètres massiques thermiques sont relativement nouveaux dans le domaine du comptage industriel. Ce type de débitmètre consiste à mesurer le débit massique de fluide par l'intermédiaire de transfert de chaleur par convection à partir d'une surface chauffée. Dans le cas de débitmètre massique thermique à dispersion, ou immergeables la chaleur est transférée à la couche frontière du fluide s'écoulant au-dessus de la surface chauffée. Dans le cas du type de tube capillaire, la chaleur est transférée à la masse du fluide s'écoulant à travers un petit tube capillaire chauffée. Les principes de fonctionnement des deux types sont tous les deux de nature thermique.

Comme montré sur la figure III.1, il existe deux types de débitmètre massique mesurent directement le taux d'écoulement massique de fluides, les débitmètres massique à effet Coriolis et les débitmètres massique thermique. Le débitmètre massique à effet Coriolis mesure directement le taux d'écoulement de la masse des fluides, liquides ou gaz, et il n'exige pas la connaissance de la nature, ou de la composition du fluide.

Le débitmètre massique thermique mesure le taux de l'écoulement de la masse de gaz mais, il exige la connaissance de sa composition. Les débitmètres massiques à effet Coriolis ont une exactitude élevée et plus efficace avec les liquides mais reste relativement chères. Les débitmètres massiques thermiques ont une exactitude moyenne plus applicable aux gaz et peu coûteux.

Les deux technologies de Coriolis et thermiques mesurent directement le taux de débit massique sans demande aucune autres aucunes mesures secondaires pour donner le taux de débit en sortie. Plusieurs sortes des débitmètres mesurent le débit volumétrique, comme ultrasonique, vortex, turbine et orifice. Pour fournir le taux de débit, ils doivent devenir des débitmètres multi-variable exige des mesures secondaires de la température et de la pression. La mesure directe du taux d'écoulement de la masse est préférable car elle élimine les erreurs dues à la deuxième mesure. Les débitmètres massiques thermiques sont classés en deux types :

- ✓ Les débitmètres massiques thermiques à dispersion ou immersif [63];
- ✓ Les débitmètres massiques thermiques à tube capillaires [63].

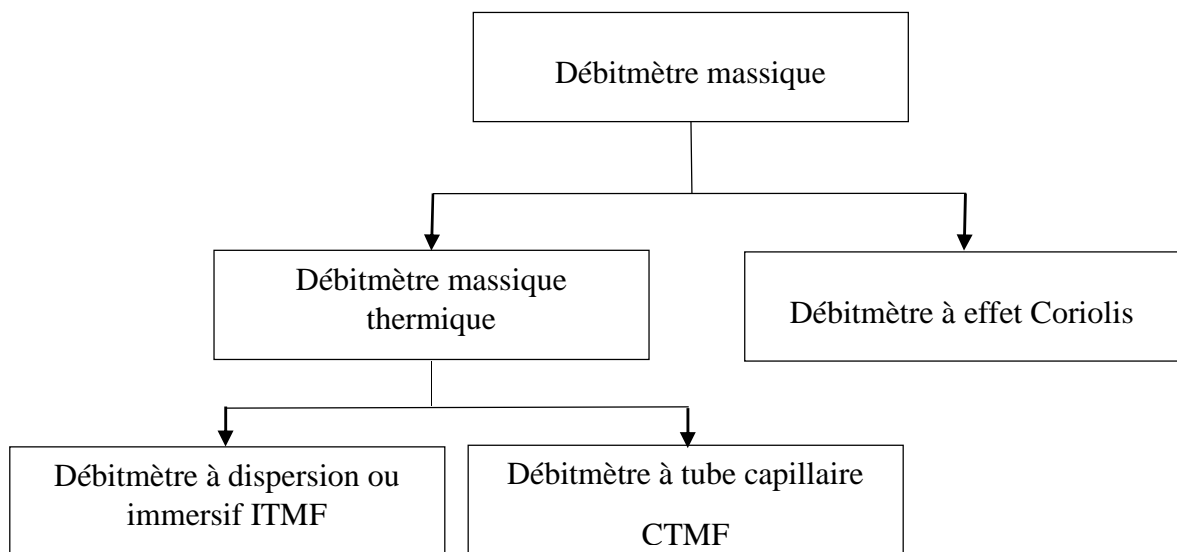


Figure III.1 : Classification des débitmètres massique thermiques [63].

III.3 Débitmètre massique thermique à dispersion ou immersif ITMF

Les débitmètres massiques thermiques à dispersion comprennent une famille d'instruments pour la mesure du débit massique total d'un fluide, principalement des gaz, s'écoulant à travers des conduites fermées. L'opération de débitmètres massiques thermiques à dispersion est attribuée à LV King qui, en 1914, a publié sa loi de King [38] montrant comment un fil chauffant immergé dans un écoulement de fluide mesure la vitesse de masse à un point dans l'écoulement. King a appelé son instrument un "anémomètre à fil chaud" [64]. Il a fallu attendre les années 1960 et 1970 pour que les débitmètres massiques thermique à dispersion et à revêtement métallique de qualité industrielle deviennent applicable et répondant aux résoudre besoins incessants de l'industrie et deviennent disponible dans le commerce [63]. Les

débitmètres thermiques à dispersion sont généralement employés pour des applications industrielles générales d'écoulement de gaz dans des conduites, les deux types mesurent le taux d'écoulement au moyen de transfert convectif de chaleur à partir d'une surface de chauffage au fluide débordant. L'arrangement de l'élément de chauffage et l'élément sensible diffère selon le fabricant, mais le principe de base reste le même. Ce débitmètre est produit par un nombre croissant de fabricants ces dernières années et deviennent une solution incontournable aux besoins d'un débitmètre massique trop sensible [65].

Les gaz typiques qui peuvent être mesurés par ces débitmètres sont : l'air, le Méthane, le Propane, le gaz naturel, le gaz carbonique, l'Azote, l'Oxygène, l'Argon, l'Hélium, l'Hydrogène. Des mélanges de ces gaz et des mélanges de gaz d'hydrocarbures sont également inclus. Les applications courantes sont: l'air de combustion; l'air préchauffé; l'air comprimé ; chaudières; centrales électriques, chauffage des mélange; séchage de matériaux; l'industrie alimentaires et des boissons; distribution de gaz naturel, cogénération au biogaz; gaz combustible; gaz brûlé; fabrication de semi-conducteurs; ventilation et climatisation [66]. Cependant, durant ces dernières années, ils sont devenus de plus en plus importants pour la mesure d'écoulement du gaz dans le procédé industriel, offrant une approche de la mesure de débit massique à faible coût que l'alternative de Coriolis [67, 68].

Le débitmètre thermique à dispersion a deux configurations principales :

- ❖ Débitmètre à insertion dans une tuyauterie ;
- ❖ Débitmètre en ligne.

La figure suivante montre les deux modèles d'ITMF de la compagnie ENDRESS HAUSER EH :

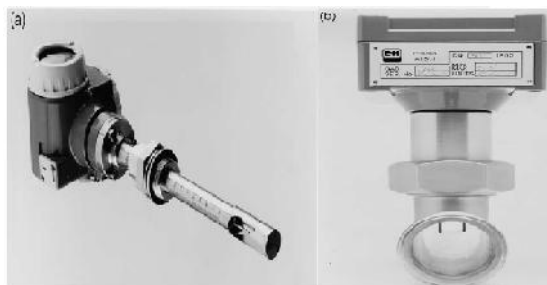


Figure III.2 : Deux modèles d'ITMF de la compagnie E +H [67].

- ❖ **Débitmètre en ligne** : un débitmètre installé directement dans la ligne de conduite et en plein écoulement du fluide dans le tuyau qui le traverse. Un débitmètre avec des capteurs

montés dans un corps en écoulement, qui joue le rôle de partie intégrante de la conduite [69].

- ❖ **Débitmètre à insertion** : un débitmètre inséré dans la ligne de tuyaux mesure la vitesse en un point (ou un petit volume) dans la surface de section transversale de la conduite avec des capteurs montés sur une sonde, insérée à travers la paroi de la canalisation [64, 69].

III.3.1 Configuration de Débitmètre en ligne

Les débitmètres massiques thermiques à dispersion en ligne sont généralement appliqués à des tuyaux et des conduites avec des diamètres de 10 à 100 mm. Comme représenté sur la figure III.3, les débitmètres en ligne se composent des principaux éléments suivants : le corps d'écoulement, le procédé de raccordement, capteur de débit, sonde de capteur de débit, conditionneur d'écoulement, enceinte d'émetteur et l'émetteur. Les Débitmètres en ligne mesurent le débit massique total circulant à travers le tuyau. Les procédés de raccordement sont des brides, des filetages de tubes, ou des installations de compressions. Le conditionneur d'écoulement séparé ou intégré en amont du capteur d'écoulement réduit la longueur droite du tuyau en amont du corps d'écoulement requise pour atteindre un profil d'écoulement indépendant des perturbations et des non-uniformité de débit en amont [64].

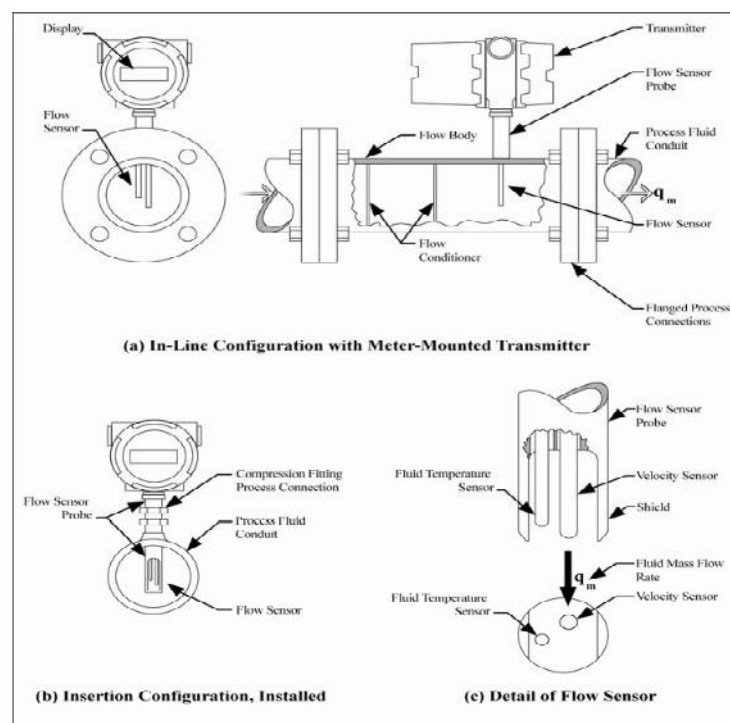


Figure III.3 : Configurations des débitmètres ITMF [64].

III.3.2 Configuration du débitmètre à insertion

Les débitmètres à insertion sont généralement appliqués à des tuyaux et des conduites de diamètres de 75 mm à 5 m. Parce qu'ils sont plus économiques que les débitmètres en ligne, on les trouve dans les applications des petites conduites. Les débitmètres d'insertion ont les mêmes composants principaux comme les débitmètres en ligne sauf le corps d'écoulement. Leur procédé de raccordement est une installation de compression ou des brides soudé ou vissée dans une conduite de fluide. Les débitmètres à insertion mesurent la vitesse de masse à un point dans la zone de section transversale de la conduite [70].

III.3.3 Principe de fonctionnement

Un débitmètre massique thermique industriel mesure soit la vitesse à un point dans un écoulement du gaz ou le débit massique totale à travers un canal ou un tuyau. Comme représenté sur la figure III.4, le capteur de débit des deux configurations en ligne et insertion possède un capteur de vitesse chauffé électriquement et un capteur de température immergée dans le fluide en écoulement. C'est pourquoi les débitmètres massiques thermiques à dispersion sont aussi appelés "Immersif".

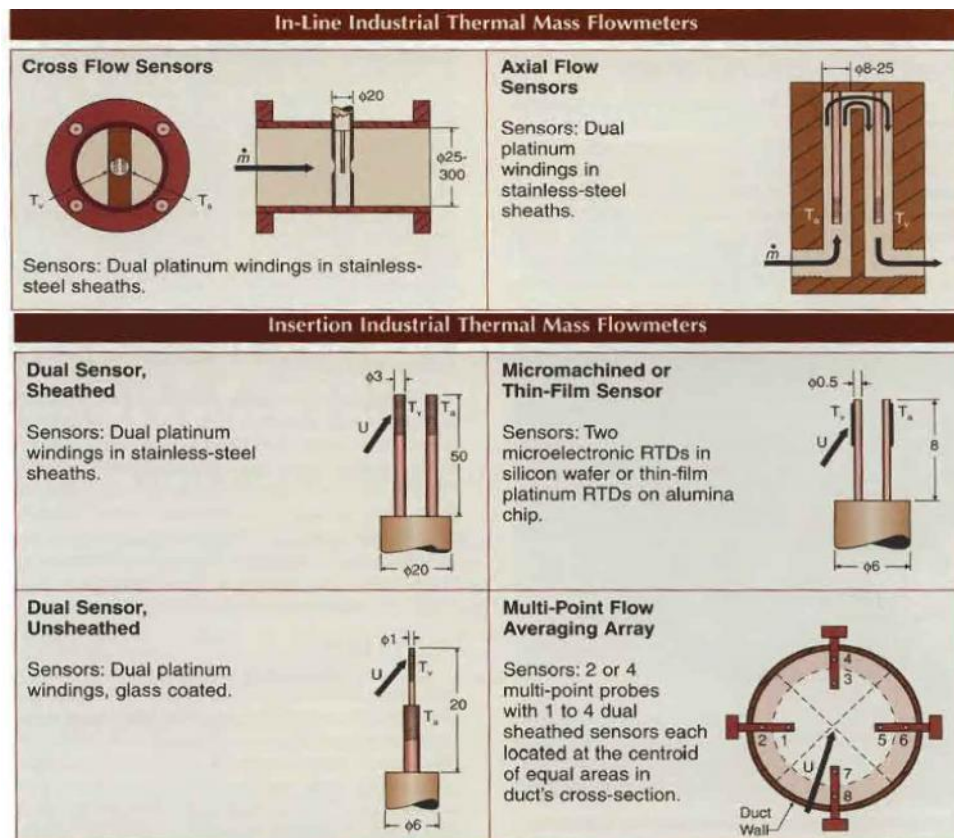


Figure III.4 : Capteurs utilisés dans les débitmètres thermiques industriels [70].

La figure III.5 montre un élément de détection du flux massique thermique. Il se compose de deux capteurs : un capteur de vitesse de débit et un capteur de température qui corrige automatiquement les changements dans les températures du gaz. La section chauffée du capteur de vitesse est constitué d'un capteur de température auto-chauffé qui chauffe le capteur et mesure sa propre température moyenne T_v . Le capteur de température de fluide n'est pas auto-chauffé et mesure la température T_f de fluide. Les deux capteurs sont des résistances détectrices de température (RTD) en platine. La résistance électrique des RTD augmente avec l'augmentation de la température, ainsi, ils sont les capteurs les plus utilisés pour la mesure de température exacte. D'autres types d'éléments de détection, tels que les thermocouples, les thermistances et les dispositifs micro-électroniques usinés sont utilisés par certains fabricants [71].

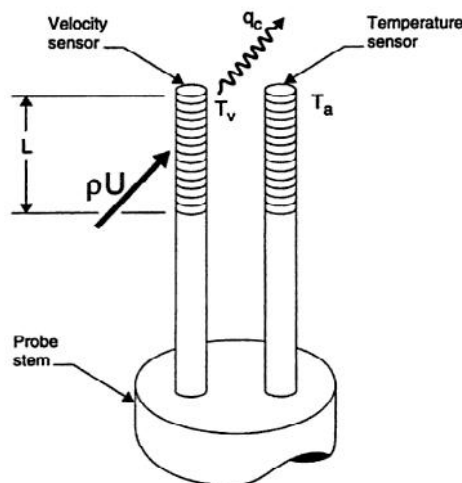


Figure III.5 : Élément de détection de flux massique thermique [71].

Le courant électrique passe à travers le capteur de débit massique pour le chauffer jusqu'à une température différentiel constante ($T_v - T_f$) au-dessus de la température du gaz T_f et mesure la quantité de chaleur Q_c emporté par le refroidisseur de gaz lorsque le flux passe par le capteur. Par conséquent, il est appelé " anémomètre thermique à température constante". Etant donné que la chaleur est évacuée par les molécules de gaz, le capteur chauffé mesure directement la vitesse de débit de gaz v . La vitesse de débit v est généralement exprimé par mètres par

seconde, ou nm / s , par rapport aux conditions normales de température de 0° ou de 20°C et de 1 atm.

Le capteur de vitesse d'un anémomètre thermique industriel est un fil en platine de $25 \mu\text{m}$ de diamètre et de résistance de 20Ω enroulé autour d'un mandrin en céramique cylindrique, tel que l'Alumine. Autrement, le capteur est un film mince de platine déposé sur un substrat de verre ou en céramique ou une résistance RTD. Les anémomètres thermiques de recherche mesurent la vitesse en un point et/ou la turbulence des gaz propre dans les domaines de recherche. Le capteur de vitesse de débit des anémomètres de recherche est aussi un fil chaud ou film chaud comme les anémomètres industriels ainsi montré sur la figure suivante [71].

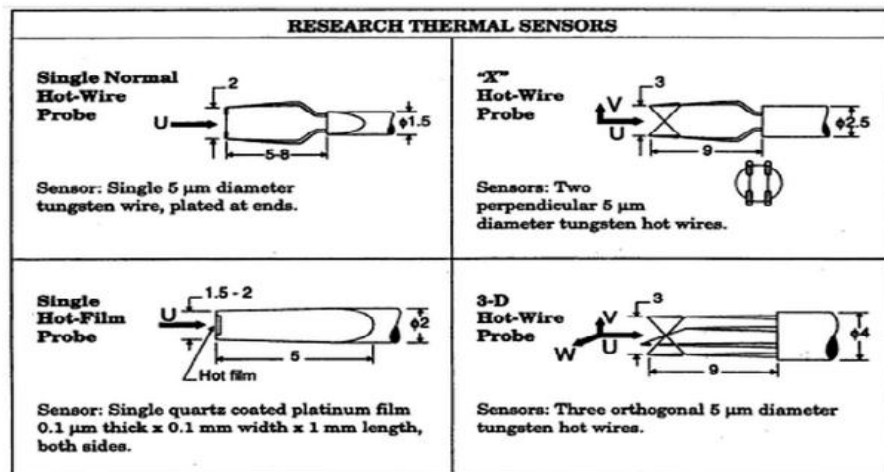


Figure III.6 : Anémomètres utilisés dans le domaine de recherche [71].

Les capteurs de débit de la plupart des débitmètres massique thermiques à dispersion industriel ont des sondes de vitesse et de température de fluide cylindrique asymétriques monté côte à côte comme représenté sur la figure II.7. Les deux sondes sont engagées dans des gaines métalliques résistant à la corrosion tubulaire.

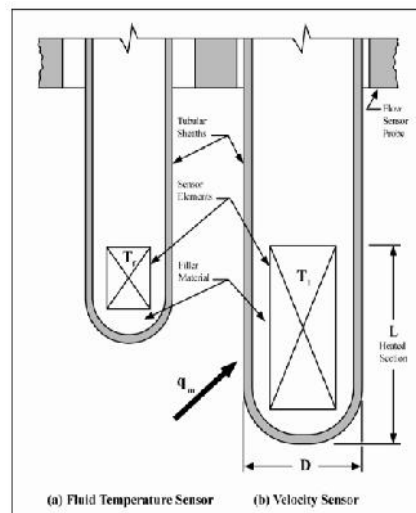


Figure III.7 : Emplacement de deux sondes [64].

De point de vue fonctionnel, la sonde de température du fluide mesure la température de fluide T_f , la sonde envoie une commande à l'émetteur pour fournir le courant électrique nécessaire à la sonde de vitesse pour qu'elle s'auto chauffe à une température moyenne T_v élevé au-dessus de la température de fluide. La chaleur transférée par convection de la sonde de vitesse de débit au fluide débordant fournit le taux de débit massique q_m désiré.

La commande de la sonde de débit est souvent réalisée par un pont analogue de Wheatstone. La sonde du débit et la sonde de température de fluide sont situées sur les branches opposées du pont de Wheatstone. Ceci fournit la compensation analogue pour les changements de la température du fluide [70].

III.3.3.1 Mode de fonctionnement

La commande de sonde du débit obéit à deux modes de fonctionnement : le mode de température constante et le mode de courant constant

❖ Mode de la différence de température constante

Dans ce mode de fonctionnement, la commande maintient la sonde de débit à une valeur différentiel constante $T = T_v - T_f$ entre la température de la sonde de débit chauffée T_v et la température de fluide T_f . Le signal de sortie est la tension électrique E assure le chauffage de la sonde de débit requise pour garder T à une valeur la constante.

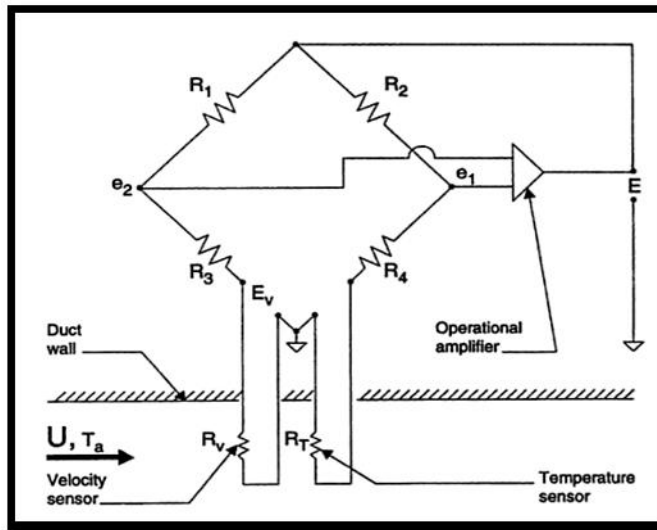


Figure III.8 : Mode de température constante [71].

❖ Mode de courant Constant

Dans ce mode de fonctionnement, la commande maintient la sonde de débit à une valeur constante du courant électrique. Le signal de sortie est T .

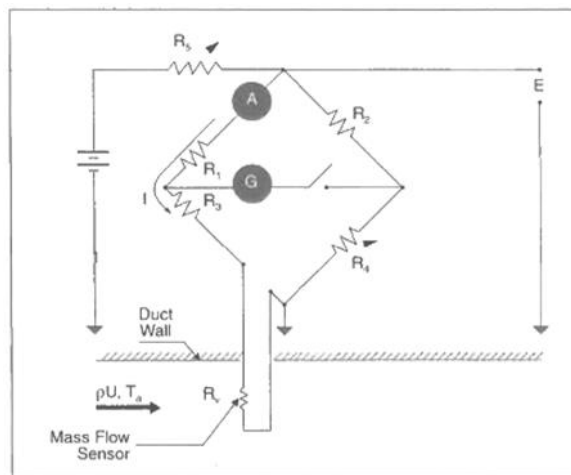


Figure III.9 : Mode de courant constant [70].

III.3.3.2 Modèle mathématique de fonctionnement

Les débitmètres massiques thermiques à dispersion mesurent la chaleur convective transférée à partir de la sonde de vitesse chauffée aux molécules de gaz. Puisque les molécules représentent la masse du gaz, les débitmètres thermiques à dispersion mesurent directement le taux de débit massique. La figure suivante montre le premier principe de la thermodynamique appliqué à la section chauffée du capteur de débit. La première loi réside dans le fait que l'énergie dans le volume contrôlé égale à l'énergie sortante plus l'énergie stockée. Pour des simplifications de fabrication l'énergie stockée et la chaleur transférée par rayonnement sont négligeables, nous obtenons :

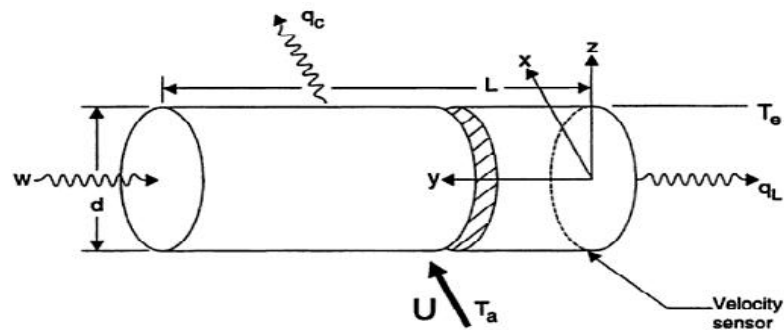


Figure III.10 : Première loi de thermodynamique [71].

$$w = q_c + q_l \quad (III.1)$$

Avec :

$w = IR_v^2$: Puissance électrique fournie au capteur de résistance électrique R_v ;

q_l : Transfert de chaleur par conduction vers les supports de la sonde de débit ;

q_c : Quantité de chaleur transférer par convection au fluide exprimée par :

$$q_c = hA_v(T_v - T_a) \quad (III.2)$$

Avec :

h : Coefficient de transfert de chaleur ;

A_v : Surface extérieur du capteur de débit ;

Donc :

$$w = IR_v^2 = hA_v(T_v - T_a) + q_l \quad (III.3)$$

la conduction de chaleur vers les supports de capteur de débit est une quantité indésirable et elle est généralement minimisée par les fabricants en prenant le rapport $L/d \gg 1$, ou L est la longueur de la sonde et d son diamètre. Donc W devient :

$$w = IR_v^2 = hA_v(T_v - T_a) \quad (III. 4)$$

Le coefficient h se trouve à l'aide des corrélations empiriques. Les corrélations pour les paramètres h sont exprimées en fonction des paramètres sans dimension suivants :

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, Ma, Kn) \quad (III. 5)$$

Nu : nombre de Nusselt $Nu = \frac{hd}{k}$;

Re : nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho vd}{\mu}$;

Pr : nombre de Prandtl $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$;

Gr : nombre de Grashof ;

Ma : nombre de Mach ;

Kn : nombre de Knudsen.

k est la conductivité thermique du gaz, μ sa viscosité et c_p la capacité calorifique du fluide ont une pression constante. Si on prend les considérations suivants tels que :

- ❖ la convection naturelle est fonction de Re et Pr ;
- ❖ la vitesse est inférieure à <100m/s ;
- ❖ l'écoulement n'est pas au niveau élevé

Alors, nous pouvons ignorer les effets de Gr, Ma et Kn. Ainsi, la relation de Nu devient :

$$Nu = f(Re, Pr)$$

De nombreux travaux ont été réalisés pour trouver la corrélation universelle pour le transfert de chaleur autour des cylindres en écoulement. Pour un fluide iso thermique, King [38] a trouvé sa fameuse relation :

$$Nu = A + BRe^{0.5} \quad (III. 6)$$

Avec A et B des constantes empiriques trouvés par calibration pour chaque fluide. Kramers a trouvé une autre corrélation pour les gaz ayant des propriétés variables comme la pression et la température. Sa relation est défini par :

$$Nu = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.50} \quad (III.7)$$

Ces relations sont vérifiées pour les fils un rapport L/d suffisamment grand pour assurer l'élimination de transfert de la chaleur par conduction.

La corrélation universelle proposée pour les sondes de débit est :

$$Nu = A + BPr^{0.33}Re^n \quad (III.8)$$

Avec A, B et n des constantes déterminées par calibration.

A partir de l'équation de Nu, on a :

$$h = \frac{kNu}{d} \quad (III.9)$$

En intégrant cette relation dans l'équation (4), on trouve

$$w = IR_v^2 = \frac{E_v^2}{R_v} = \frac{kNu}{d} A_v (T_v - T_a) \quad (III.10)$$

$$\frac{E_v^2}{R_v} = \frac{kNu}{d} 2\pi dL(T_v - T_a) \quad (III.11)$$

$$\frac{E_v^2}{R_v} = (kA + BkPr^{0.33}Re^n)(T_v - T_a) \quad (III.12)$$

Avec A, B et n des nouvelles constantes déterminées par la calibration.

Pour les températures de gaz inférieur à 200°C, la résistance électrique des RTD est définie par :

$$R_v = R_{v0}(1 + \alpha_v(T_v - T_0)) \quad (III.13)$$

$$R_T = R_{T0}(1 + \alpha_T(T_T - T_0)) \quad (III.14)$$

Avec R_{v0} et R_{T0} sont les résistances des sondes de débit et de température dans les conditions normales T_0 (0°C ou 20°C) et α_v et α_T sont les coefficients de résistivité des deux sondes dans la température T_0 . Lorsque la température de la sonde de débit est évalué à une température T_a , sa résistance électrique devient :

$$R_a = R_{v0}(1 + \alpha_v(T_a - T_0)) \quad (III.15)$$

En combinant ces équations on trouve :

$$(T_v - T_a) = \frac{R_v - R_a}{\alpha_v R_{v0}} \quad (III.16)$$

Insérant cette relation dans l'équation (III.12) :

$$\frac{E_v^2}{R_v(R_v - R_a)} \approx A \cdot k + B \cdot k \cdot Pr^{0.33} Re^n \quad (III.17)$$

$$\frac{E_v^2}{R_v(R_v - R_a)} = A \cdot k + B \cdot k \cdot Pr^{0.33} \left(\frac{\rho d v_s}{\mu}\right)^n \quad (III.18)$$

$$\frac{E_v^2}{R_v(R_v - R_a)} \approx A \cdot k + B \cdot k \left(\frac{\rho d}{\mu}\right)^n Pr^{0.33} v^n \quad (III.19)$$

A et B les constantes absorbant les coefficients α_v et R_{v0} . En simplifiant cette relation, on trouvera :

$$I^2 R_v = C + D v^{0.5} \quad (III.20)$$

La dernière expression montre que la relation existante entre la puissance électrique fournie à la sonde de débit et la vitesse de fluide. Une autre relation est donnée par :

$$w = K'(1 + K q_m^{0.5}) \Delta T \quad (III.21)$$

Avec :

K' : la conductivité thermique de fluide ;

K : constante dépendant de la surface du pipe de fluide et du coefficient de transfert de chaleur ;

w : Puissance électrique fournie au fil chaud ;

q_m : Débit massique recherché [64, 65, 67, 70].

III.4 Débitmètres massique thermique à dispersion ITMF en industrie

III.4.1 Débitmètre massique thermique Proline t-mass B 150 de ENDRESS + HAUSER

Pour la mesure simple et économique de gaz industriels



Figure III.11 : Proline t-mass B150 de E+H [72].

➤ **Domaine d'application**

- Appareil de mesure économique pour différentes applications industriels sur gaz ;
- Optimisation des installations grâce à une surveillance ciblée de gaz en industrie ;
- Reconnaissance de fuite dans les réseaux de gaz ;
- Approprié pour la facturation de consommations internes ;

➤ **Fonctionnement**

Mesure de valeurs de sortie multi variables : débit massique, débit volumique corrigé, débit volumique et température. Le principe de mesure thermique repose sur le refroidissement d'une thermo résistance chauffée (PT100), dont on extrait de la chaleur à l'aide de l'écoulement de gaz. Dans la section de mesure, le gaz passe sur deux thermo résistances PT100, l'une d'entre elles étant utilisée comme sonde de température, l'autre comme élément chauffant. La sonde de température surveille et mesure la température réelle du processus pendant que la thermo résistance chauffée est maintenue à une température différentielle constante (par rapport à la température du gaz mesurée) grâce à une régulation du courant électrique consommé par l'élément chauffant. Le refroidissement est d'autant plus important que le débit massique au niveau de la thermo résistance chauffée l'est aussi, et ainsi l'intensité du courant requise pour le maintien d'une température différentielle constante. Le courant de réchauffage mesuré permet ainsi de déduire le débit massique du gaz.

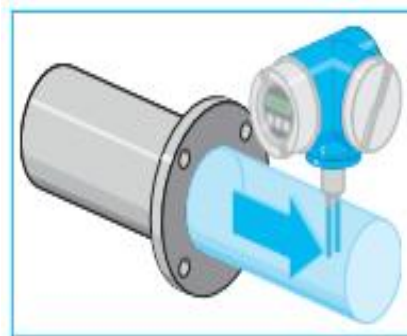
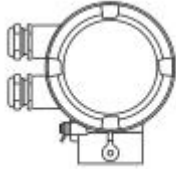



Figure III.12 : Principe de fonctionnement de Proline t-mass 150 [72].

<p>t--mass 150</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Matériaux : Alu revêtu AlSi10Mg ❖ Configuration : ❖ Affichage local à 4 lignes avec configuration par touches et par menus pour les différentes applications ❖ Outils de configuration (par ex. FieldCare) ❖ Egalement disponible sans affichage local
---	--

❖ Capteur

<p>t-mass B</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Version à insertion ❖ Gamme de diamètres nominaux : DN 80...1500 (3...60") ❖ Longueurs du capteur : 235 mm (9,25 in), 335 mm (13,2 in), 435 mm (17,1 in), 608 mm (24,0 in) ❖ Element sensible : acier inox 1.4404/1.4435/316L
---	--

❖ Grandeur mesurée

- ✓ *Grandeurs mesurées directes*
 - Débit massique ;
 - Température du gaz ;
- ✓ *Grandeurs mesurées calculées*
 - Débit volumique corrigé ;
 - Débit volumique FAD.

❖ Montage

Les appareils de mesure thermiques nécessitent un profil d'écoulement bien développé pour une mesure de débit correcte. Pour cette raison, il est nécessaire de respecter les points suivants lors du montage de l'appareil de mesure :

- Eviter les perturbations du profil d'écoulement étant donné que le principe de mesure thermique y est très sensible ;

- Utiliser des dispositifs permettant d'éviter la condensation (par ex. collecteur de condensat, isolation thermique etc) ;
- Pour les capteurs ayant un poids propre élevé, il est recommandé - pour des raisons mécaniques et pour la protection de la conduite - de mettre en place un support (par ex. montage d'une sonde rétractable).

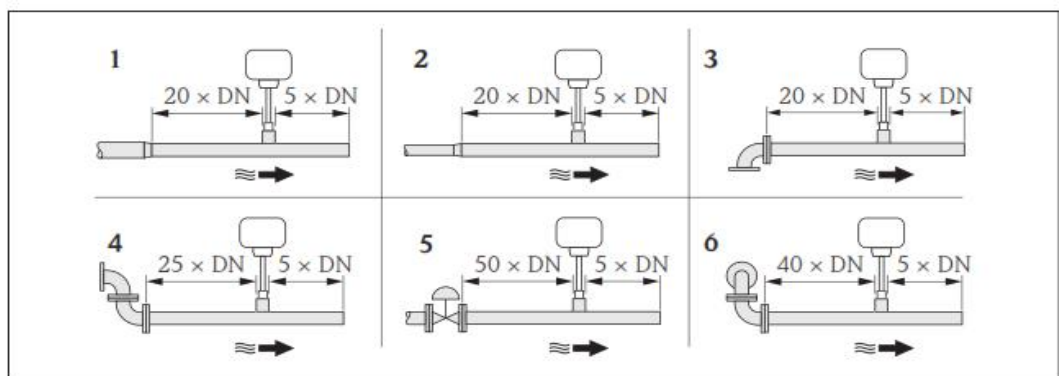
❖ Sélection de la longueur du capteur

La longueur minimale du capteur dépend de la longueur d'insertion nécessaire. La longueur d'insertion nécessaire calculée doit se situer dans la plage de réglage de la version à insertion choisie.

❖ Longueurs droites d'entrée et de sortie

Le principe de mesure thermique est très sensible aux perturbations du profil d'écoulement.

- Aussi l'appareil de mesure devrait être monté aussi loin que possible d'éléments perturbateurs du débit ;
- Le capteur doit, dans la mesure du possible, être monté en amont d'éléments comme les vannes, T, coudes etc. Pour atteindre la précision de mesure spécifiée pour l'appareil de mesure, il convient de respecter au moins les longueurs droites d'entrée et de sortie indiquées ci-dessous. En présence de plusieurs perturbations du profil d'écoulement, il faut respecter la longueur droite d'entrée la plus longue indiquée.



1 Convergent ; 2 Divergent ; 3 Coude 90 ° ou T ; 4 : 2 x coude 90 ° ; 5 Vanne de régulation ; 6 : 2 x coude 90 ° tridimensionnel [72].

III.4.2 GF90 et GF92 de FCI (Fluid Components International LLC)



Figure III.13 : Deux modèles de FCI [73].

La référence [73] décrit les procédures nécessaires pour installer, utiliser, entretenir et dépanner les débitmètres modèles GF90 et GF92. Le débitmètre est composé d'un capteur de mesure à dispersion thermique déporté interconnecté à un boîtier électronique de commande et d'affichage à base de microprocesseur (transmetteur de débit). Le capteur peut être relié directement au transmetteur de débit (instrument local) ou connecté à lui par un câble mesurant jusqu'à 300 mètres (électronique à distance).

❖ Capteur de débit

La sonde comprend 4 puits thermométriques. Ceux-ci sont des tubes métalliques creux soudés ensemble pour former 2 paires de puits thermométriques. Une des paires contient le capteur de température à résistance (RTD) actif et un réchauffeur. L'autre paire contient la RTD de référence et un puits thermométrique vide permettant d'égaliser la masse thermique. La figure III.14 illustre le capteur de mesure.

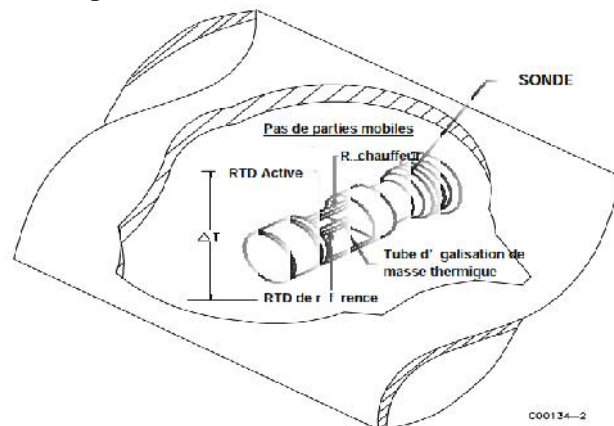


Figure III.14 : Capteur de mesure de GF90 et GF92 [73].

❖ Transmetteur de débit

L'autre partie du débitmètre est le transmetteur de débit. Les fonctions de base du transmetteur de débit sont de fournir de l'énergie au capteur de mesure, mesurer la température différentielle (ΔT) entre les deux résistances RTD en faisant fonction de résistance, d'amplifier et linéariser la mesure de résistance différentielle (ΔR) du signal d'entrée de mesure de débit de la sonde et de fournir un signal de sortie. Ce signal de sortie est calibré selon le débit en fonction de la vitesse, du volume standard ou du débit massique. Pour remplir ces fonctions, les circuits électroniques basés sur microprocesseur sont utilisés pour acquérir les signaux analogiques de tension provenant des RTD, numériser et interpréter pour la fonction précise.

❖ Mesure du débit massique de gaz

GF90 : Conduites ou tuyaux ayant au moins un diamètre intérieur nominal de 2.0 pouces (5,1 cm).

GF92 : Conduites de 0.125 à 3 pouces (0,3175 à 7,62 centimètres).

✓ Plage de températures :

De -50°F à $+350^{\circ}\text{F}$ (-45°C à $+176.7^{\circ}\text{C}$) pour une plage de température standard de la sonde, le GF90 est disponible ainsi en configuration sonde haute température destinée à une plage de température de -100°F à $+850^{\circ}\text{F}$ (-73.3°C à $+454.4^{\circ}\text{C}$).

✓ Pression de service : Jusqu'à 68.9 bar.

✓ Débit :

Précision : $\pm 1\%$ de la lecture $\pm 0.5\%$ en pleine échelle.

Répétabilité : $\pm 0.5\%$ ou mieux de la lecture.

Plage de mesure : Plage de mesure de 2:1 à 1000:1. Les coefficients de marge de réglage effective jusqu'à 1000:1. La plage de mesure jusqu'à 1000 :1 sont possibles dans certaines applications. La sortie de signaux peut être définie pour être ou non à base zéro.

Pour obtenir les meilleurs résultats avec l'instrument, le capteur doit être situé à 20 diamètres de conduite en aval de toute perturbation de l'écoulement (vanne, coude, etc.) et à 10 diamètres de conduite en amont de toute perturbation [73].

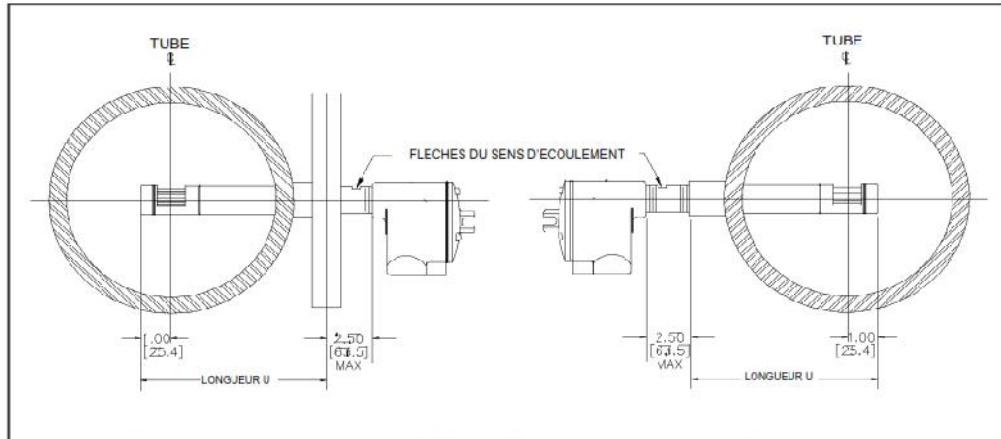


Figure III.15 : Exemple de montage de débitmètre GF90 [73].

III.4.3 Nouveau paradigme pour les Débitmètres massiques thermique à dispersion de la compagnie Sierra



Figure III.16 : Nouveau débitmètre utilisé par la compagnie Sierra [74].

La nouvelle innovation de grande haute performance diffère des débitmètres massiques thermiques à dispersion traditionnel de précision intermédiaire (1,0 % à 5,0 % en pleine échelle). L'innovation récente dans la conception des capteurs de flux thermique et des algorithmes de calcul a créé un changement de paradigme dans la technologie et la performance

des débitmètres thermique à dispersion. La technologie des débitmètres thermique à dispersion est maintenant capable de mesurer avec une précision de mesures de 0.5%. La nouvelle innovation de sonde de débit est basée sur l'utilisation de quatre capteurs de mesure au lieu de deux utilisé avec l'ancienne technologie. Dans les débitmètres traditionnels "à deux capteurs", la perte de chaleur par conduction vers les supports de la sonde n'est pas prise en compte. Cela peut introduire des erreurs élevé jusqu'à 20%, selon le gradient entre la température de gaz et la température extérieur de la conduite. La nouvelle conception "quatre-capteur" résout ce problème en ajoutant deux autres capteurs à la sonde traditionnelle.

Comme le montre la figure III.17, deux nouveaux capteurs de température (T4 et T2) sont ajoutés aux deux capteurs (T3 de température et T1 de vitesse). T4 et T2 fournissent des mesures en temps réel de la conduction vers les supports et la chaleur perdu à l'environnement extérieur. Cette innovation est principalement responsable pour le paradigme de changement de précision offerte par cette technologie.

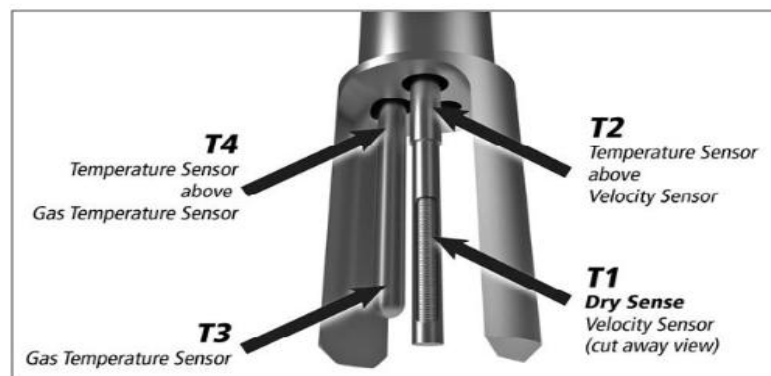


Figure III.17 : Configuration des quatre capteurs des nouveaux débitmètres [74].

Dans les débitmètres massiques thermiques à dispersion traditionnelle, un pont de Wheatstone est utilisé pour maintenir la consigne T de température différentielle constante. Cette approche a certaines inconvénient tel que :

- ❖ La résolution devient limité aux débits élevés ;
- ❖ Les changements dans les propriétés de gaz en raison des changements de température et de pression du procédé ne sont pas pris en compte.

Des nouvelles avancées dans la technologie de débitmètre thermique à dispersion remplacent le circuit de pont traditionnel par un microprocesseur puissant qui fait fonctionner un algorithme de mesure d'écoulement. Cet algorithme utilise la technologie de capteur sec et

les entrées des quatre capteurs de température pour régler la première loi de thermodynamique dans une fraction de seconde pour chaque donnée de débit massique par point. Il permet de gérer les changements dans :

- ❖ Le débit massique de gaz ;
- ❖ La température des gaz ;
- ❖ La pression de gaz ;
- ❖ Température extérieure (taille et rugosité) ;
- ❖ Profil d'écoulement.

Cet algorithme calcule la conduction vers les supports et tous les autres composants de transfert de chaleur non désirées les soustraient de la puissance électrique mesurée en entrée, puis il calcule le débit massique restant de la composante de la convection [74].

III.5 Débitmètre massique thermique à tube capillaire CTMF

Les débitmètres massiques thermiques à tube capillaire ont été commercialisés pour la première fois en 1960, où l'industrie de l'espace était un des premiers utilisateurs avant l'apparition de l'industrie des dispositifs à semi-conducteur. Après l'énorme découverte des circuits intégrés à semi-conducteur et avec leur croissance exceptionnelle, le marché des débitmètres thermiques à tube capillaire a connu aussi un développement en parallèle.

À partir des années 1970 et 1980, l'industrie a identifié les avantages pour l'emploi des débitmètres massiques thermiques à tube capillaire dans une large gamme d'applications et plusieurs nouvelles compagnies étaient formé pour servir ce marché croissant [63]. Elle est d'ailleurs née pour les besoins spécifiques de l'industrie des semi-conducteurs. Au début des années 70, Celle-ci doit apprendre à réguler les faibles débits de gaz, notamment pour déposer des dopants ou autres composés à l'état gazeux sur les matériaux semi-conducteurs. C'est ce qu'on appelle la CVD pour *Chemical Vapor Deposition*. Très vite, le principe thermique apparaît comme le seul adapté à des débits de gaz aussi faibles que quelques millilitres par minute [75].

III.5.1 Principe de fonctionnement

Dans la conception de débitmètre massique thermique à tube capillaire, l'écoulement entrant prend deux chemins, une partie de gaz traverse un tube capillaire de diamètre très petit contenant une sonde chauffante avec un rapport suffisant de longueur sur diamètre pour assurer

l'écoulement laminaire et deux éléments de sensation de température (T_1 , T_2) placés en amont et en aval de la sonde chauffante. La deuxième partie traverse un tube parallèle au tube capillaire. La résistance thermique de transfert la chaleur au gaz à travers la paroi de tube. La différence de température entre l'amont et l'aval de l'élément chauffant permet de déduire le débit massique à condition de connaître la chaleur spécifique du gaz. La figure (III.18 a) montre une configuration de ce type des débitmètres. L'incertitude typique d'un débitmètre thermique à tube capillaire est de $\pm 1\%$. Pour la réalisation de dosages et de mélanges, les débitmètres sont associés à une vanne de régulation : on parle alors de contrôleur thermique. Ce principe de mesure apporte avec lui un avantage décisif : il donne un débit massique. Ce dernier, contrairement à un débit volumique, peut être corrélé tout de suite à la quantité de matière. Or, l'équilibre des masses est la loi sur laquelle sont basées toutes les réactions chimiques, car la masse des composants influe directement sur la consistance de mélanges. Enfin, la masse est une unité primaire de mesure indépendante de la pression ou de la température. L'équation caractéristique de ce phénomène est :

$$q_m = \frac{q_h}{K c_p \Delta T} \quad (III. 22)$$

Avec :

q_m : le débit massique en g/s ;

q_h : la puissance thermique en J/s ;

K : constante ;

c_p : la chaleur spécifique du gaz en J/kg.K;

ΔT : la différence de température mesurée en Kelvin.

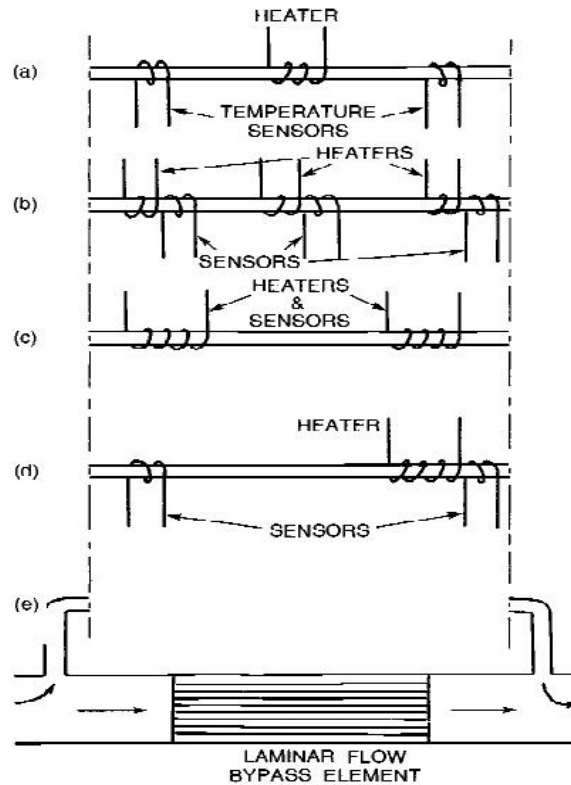


Figure III.18 : Différentes configurations de CTMF [65].

Dans le mode de fonctionnement alternative illustré sur la figure III.18 b, la sonde de température est utilisée pour ajuster la chaleur dans les trois éléments de chauffage pour les garder à température constante.

Le deuxième mode est illustré sur la figure (III.18 c) montre une conception qui emploie la différence de température entre les deux enroulements placés le long de l'axe du tube, les deux sont chauffés. Les enroulements agissent également comme des thermomètres. Lorsqu'il y a un écoulement, la sonde en aval est refroidie moins que la sonde en amont et la différence de température est utilisée pour mesurer le débit. La figure (III.18 d) montre une conception avec deux éléments de sensation de température et d'un élément de chauffage. Pour les grands écoulements, un élément de dérivation laminaire est utilisé comme montré sur la figure (III.18 e).

III.5.2 Plages de fonctionnement

Quand on pense au débitmètre thermique, on pense surtout aux applications “faibles débits de gaz”. Les plages de mesure annoncées par les fournisseurs descendent jusqu'à 2 ou

3ml/min avec une rangeabilité typique de 1 à 50 et une détection minimale de l'ordre de quelques centièmes de ml/min. On retrouve ces débitmètres sur des conduites de tout petit diamètre, à partir de 2 mm et jusqu'à 50, voire 80 mm [75].

Un compteur de 100 mm de diamètre devrait normalement donner une portée allant jusqu'à 250 m³/h et d'un compteur de diamètre de 200 mm à environ 1000 m³/h. Ces compteurs peuvent être en mesure de fonctionner pour certains modèles jusqu'à 200 bar ou même, dans certains cas, une pression de 300 bar. La Gamme de température de fonctionnement varie de 0 à 65 °C avec un coefficient inférieur à 0,1%. Des Exigences d'alimentation portent généralement sur 15 à 24 VDC, quand combiné avec un contrôleur, il peut tirer jusqu'à 180 mA résultant en puissance de la consommation elles sont de l'ordre de 3,5 W [65].

III.5.3 Débitmètre massique thermique à tube capillaire CTMF industriel

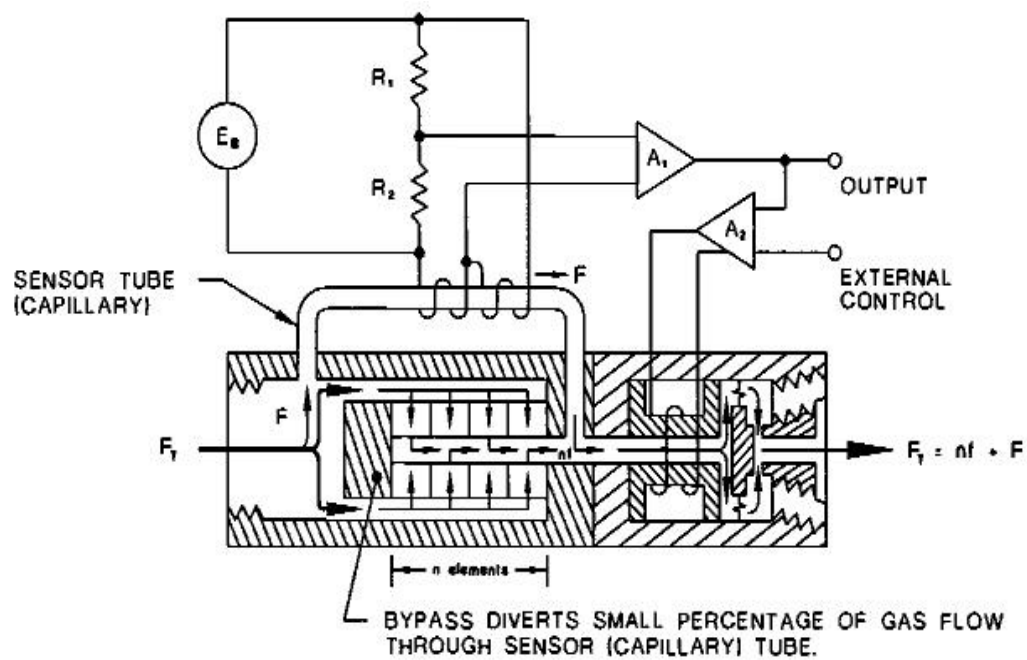


Figure III.19 : CTMF réel avec bypass par n éléments [65].

La Figure III.19 montre un CTMF réelle avec un bypass par n éléments identiques, où n peut être sélectionnée pour la plage du débit approprié. Elle montre également la soupape exploitée à partir d'un second amplificateur commandant l'écoulement. Dans une autre conception [Figure III.20], le chauffage du tube se fait par un courant passant le long de la paroi du tube, qui, à son tour, chauffe le fluide. Deux dissipateurs de chaleur, un à chaque extrémité pour l'évacuation de la chaleur passé vers le haut du tube. Le fluide refroidit le tube, et la différence de température qui en résulte est mesurée à deux endroits avec les thermocouples TC1 et TC2.

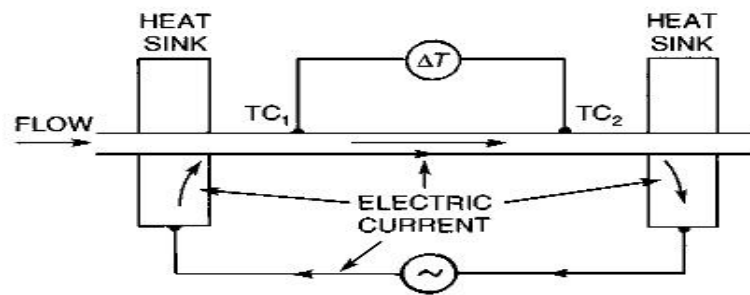


Figure III.20 : Tube chauffé de débitmètre CTMF [65].

III.5.3.1 Applications

Les CTMF sont le plus souvent appliquées à de faibles flux de gaz sec (par exemple, le mélange de gaz, de l'industrie des semi-conducteurs). Les gaz cités par les fabricants comprennent l'air, l'Acétylène, l'Ammoniac, l'Argon, l'Arsine, l'Azote, le Butane, le Dioxyde de Carbone, le Monoxyde de Carbone, du Chlore, de l'Ethane, l'Ethylène, le Fluor, le Fréon 11, le Méthane, le Néon, l'Oxyde Nitreux, l'Oxygène, le Propane, le Propylène, le Silane, et le Xénon [65].

III.5.3.2 CTFM industriel de la compagnie Sierra



Figure III.21 : CTFM industriel de compagnie Sierra [63].

Les débitmètres massiques thermiques à tube capillaire mesurent directement le taux d'écoulement de la masse des gaz propre et les mélanges de gaz dans les faibles écoulements. Le contrôleur massiques thermiques de tube capillaire ajoute une soupape de commande intégralement montée au corps d'écoulement de débitmètre massique et tous les deux surveillent le taux massique d'écoulement et la commande pour être égale à une consigne choisie par l'utilisateur.

Le débitmètre thermique de tube capillaire et le contrôleur thermique sont pour des usages industriels, dans les laboratoires et dans la fabrication des dispositifs à semi-conducteur. Les composants principaux de débitmètre thermique à tube capillaire sont : le corps d'écoulement, le conditionneur d'écoulement, la déviation, le tube capillaire, la partie électronique. Le contrôleur thermique a les mêmes composants en ajoutant une soupape de commande.

Dans le cas de débitmètre massique thermique de tube capillaire décrit dans [63], le flux entrant se divise en deux voies d'écoulement internes. Un chemin s'écoule à travers un tube capillaire de petit diamètre et relativement une longue longueur chauffé par une sonde. La deuxième voie est parallèle au tube capillaire constitué d'un élément d'écoulement laminaire qui shunts la majeure partie de l'écoulement à travers le tube de la sonde. Le rapport des débits

à travers la dérivation et le tube capillaire est constant. La sonde de tube capillaire mesure le débit massique interne par l'intermédiaire de la capacité thermique du gaz qui transporte la chaleur d'un enroulement d'une résistance détecteur de température (RTD) en amont à une résistance en aval, tous les deux situés à l'extérieur du tube de la sonde. La différence des résistances électriques des deux enroulements fournit la mesure de la vitesse de débit massique à travers le tube capillaire, et de ce fait le débit massique total dans la conduite d'écoulement [63, 25].

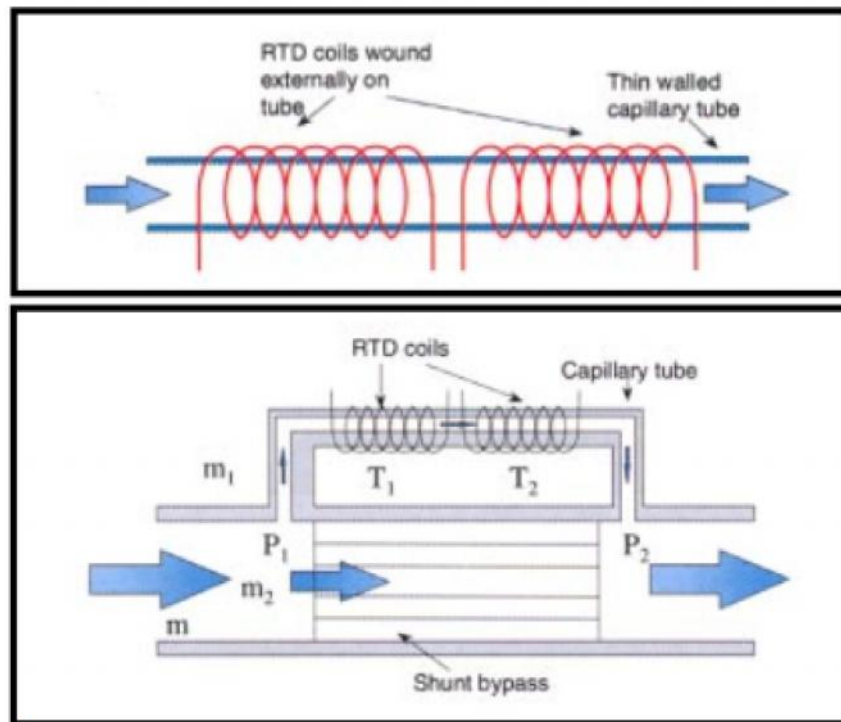


Figure III.22 : Principe de fonctionnement de débitmètre CTMF [25].

Un contrôleur de débit massique thermique à tube capillaire ajoute une soupape de régulation de l'écoulement montée intégralement au corps de la MFM et les deux surveillent et contrôlent le débit massique pour qu'il soit égal à une consigne sélectionnée par l'utilisateur.

Le taux de débit massique mesuré par le débitmètre thermique à tube capillaire et le contrôleur de débit massique est généralement exprimé par slpm (litres standard par minute) et les bas débits en sccm (centimètres cubiques par minute) [25].

III.6 Conclusion

Les débitmètres massiques thermiques à passage intégrale ou à dispersion sont des dispositifs mettant en œuvre la technologie des anémomètres à fils chaud. L'anémomètre

thermique est devenu largement répandu pendant plusieurs années en tant qu'outil de recherche et d'industrie. L'étude de ces débitmètres nous a informés des différentes technologies existantes et des conditions appropriées pour l'utilisation de chaque type.

Chapitre IV :

*Modélisation et simulation de
débitmètre massique thermique*

IV.1 Introduction

Les débitmètres massiques thermiques à passage intégrale ou à dispersion sont des dispositifs mettant en œuvre la technologie des anémomètres à fil chaud. Il s'agit de l'utilisation d'un petit élément électriquement chauffé exposé à un fluide débordant pour mesurer sa vitesse et d'autres propriétés comme la turbulence, le modèle d'écoulement et le niveau de ce fluide. Le principe de l'anémomètre à fil chaud est basé sur le transfert thermique par convection. Dans ce chapitre nous allons attribuer un modèle pour l'anémomètre à fil chaud à température constante (CTA) et de construire et simuler ce dernier par Matlab/Simulink.

IV.2 Théorie de l'opération

Les anémomètres thermiques étaient mis en service pendant plusieurs décennies grâce à leur simplicité et facilité de fabrication [76]. Les anémomètres à fil chaud sont généralement utilisés pour mesurer la vitesse d'un écoulement, ils sont habituellement mis en application en utilisant des architectures qui maintiennent la température de sonde constante (CTA) ou le courant de sonde constant (CCA). Les anémomètres thermiques à température constante peuvent utiliser des sondes thermo-résistive du type PTC (coefficient positif de température) ou de type NTC (coefficient négatif de température). Dans l'architecture CTA, la sonde est chauffée par un courant électrique, dû à l'effet de Joule, jusqu'à une température de référence. La température est maintenue constante par l'utilisation de la commande de rétroaction en utilisant une configuration de pont de Wheatstone, comme montré sur la figure IV.1, qui compense les variations thermiques et réduit le temps de réaction du système. La sonde thermo-résistive est placée dans un bras du pont et l'autre fonctionne avec des résistances fixes, ce que fait n'importe quelle perturbation dans l'équilibre thermique induit une variation de température de sonde, causant le changement de la résistance de sonde et faisant le déséquilibre du pont. Dans ce cas, l'amplificateur opérationnel agit pour changer la tension de sortie, compensant les variations sur la température de sonde, rendant la température presque constante [77].

IV.2.1 Architecture de l'anémomètre à fil chaud à température constante CTA

En mode de température constante, le courant passant par le fil est ajusté pour maintenir la température constante. Le courant maintient le fil à une température constante et proportionnelle à la perte de chaleur par convection. C'est l'intensité du courant fourni au pont,

ou la tension aux bornes du pont, qui traduit donc les fluctuations de vitesse de l'écoulement incident.

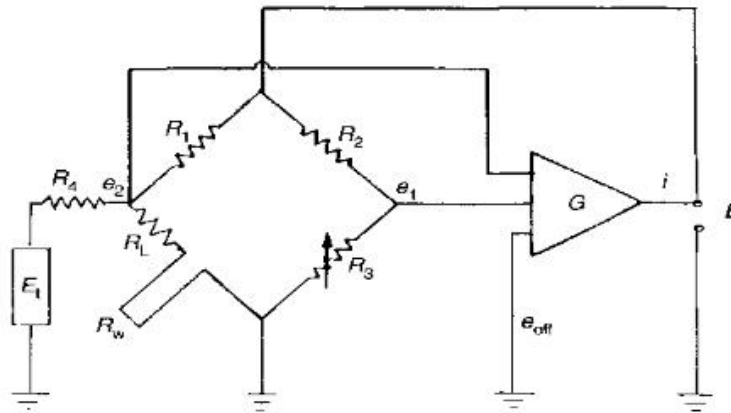


Figure IV.1 : Architecture de circuit CTA [78].

La température de la sonde de détection à n'importe quel instant dépend de la vitesse de transfert de chaleur à partir du capteur. Le transfert de chaleur dépend des trois types des transferts : conduction, convection et rayonnement. Cette partie porte sur le transfert de chaleur entre la sonde et le fluide dans lequel elle se trouve. Ici, le transfert de chaleur principal est dû au transfert de chaleur par convection.

A partir de la loi de thermodynamique, la loi de conservation de l'énergie thermique du capteur à température T_w ($^{\circ}\text{C}$) et la température de fluide à T_f ($^{\circ}\text{C}$) est donnée par :

$$w = I_w^2 R_w = h(v) \cdot A_s \cdot (T_w - T_f) \quad (\text{IV. 1})$$

Avec :

$w = I_w^2 R_w$: La puissance électrique fournie au capteur de résistance électrique R [W] ;

$h(v)$: coefficient de transfert de chaleur par convection entre le capteur et le fluide [W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)] ;

A_s : surface extérieur du capteur de débit [m^2].

IV.2.2 Capteur de débit de fluide auto chauffé par le courant

Si le courant I passant à travers un élément thermo-résistif, comme un fil fin métallique, alors l'élément est chauffé à une température T supérieure à la température T_f de fluide environnant. La température de l'élément résistif T_w et sa résistance R_w dépendent de l'harmonie entre l'énergie électrique $I_w^2 R_w$ et le taux de transfert de chaleur par convection entre l'élément

et le fluide. L'élément est utilisé comme capteur de la vitesse du fluide et la première loi de thermodynamique exprime le bilan thermique total comme suit :

$$w = I_w^2 R_w = h(v) \cdot A_s \cdot (T_w - T_f) + mc \frac{dT_s}{dt} \quad (IV.2)$$

Avec :

m : masse de fil chaud [Kg] ;

c : capacité calorifique du fil ;

Si I_0 , R_{T0} , T_0 , v_0 représentent les conditions d'équilibre, nous avons :

$$I_{w0}^2 R_{wT0} - h(v_0) \cdot A_s \cdot (T_0 - T_f) = 0 \quad (IV.3)$$

Et si I , R , v et T représentent les petites variations à partir de l'état d'équilibre, nous aurons :

$$I_w = I_{w0} + \Delta I \quad ; \quad R_w = R_{wT0} + \Delta R_{wT}$$

$$T_w = T_0 + \Delta T \quad ; \quad h(v) = h(v_0) + \sigma \Delta v$$

Avec $\sigma = \frac{\partial h}{\partial v}$ représente le taux de changement de h en fonction de la vitesse v calculé en v_0 d'équilibre. A partir de l'équation (IV.2) et (IV.3), nous aurons :

$$(I_{w0} + \Delta I)^2 (R_{wT0} + \Delta R_{wT}) - (h(v_0) + \sigma \Delta v)(T_0 + \Delta T - T_f) A_s = mc \frac{d\Delta T}{dt} (T_0 + \Delta T) \quad (IV.4)$$

En négligeant les termes de petite variation, nous trouvons :

$$(I_{w0}^2 + 2I_0 \Delta I) R_{wT0} + I_{w0}^2 \Delta R_{wT} - h(v_0)(T_0 - T_f) A_s - h(v_0) \Delta T \cdot A_s - \sigma A_s (T_0 - T_f) \Delta v = mc \frac{d\Delta T}{dt} \quad (IV.5)$$

En soustrayant (IV.3) de (IV.5), nous trouverons :

$$2I_{w0} R_{wT0} \Delta I + I_{w0}^2 \Delta R_{wT} - h(v_0) \Delta T \cdot A_s - \sigma (T_0 - T_f) \Delta v \cdot A_s = mc \frac{d\Delta T}{dt} \quad (IV.6)$$

Les sondes à fil chauds ont comme élément sensible un fil de métal dont la résistance électrique varie avec la température. En fait, il s'agit plus exactement de la résistivité du métal qui varie avec la température. Pour des variations de température relativement faibles (par exemple 0 à 300°C) des chercheurs se limitent à une loi d'étalonnage linéaire :

$$R_w(T) = R_0[1 + \alpha(T_w - T_f)] \quad (IV.7)$$

Ou : $\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T}$, avec R_0 la température de référence de la résistance R.

En remplaçant ΔT par le coefficient de résistivité de l'élément α , nous trouverons :

$\Delta T = (\frac{1}{\alpha})\Delta R_T$, l'équation (6) devient :

$$\left[\frac{h(v_0)A_s}{\alpha} - I_{w0}^2 \right] \Delta R + \frac{mc}{\alpha} \frac{d\Delta R_T}{dt} = 2I_{w0}R_{wT0}\Delta I - \sigma A_s(T_0 - T_f)\Delta v \quad (IV.8)$$

$$\Delta R_T + \tau_v \frac{d\Delta R_T}{dt} = K_I \Delta I - K_v \Delta v \quad (IV.9)$$

Avec :

$$\tau_v = \frac{mc}{[h(v_0)A_s - I_{w0}^2 \alpha]} \quad K_I = \frac{2\alpha I_{w0}R_{T0}}{[h(v_0)A_s - I_{w0}^2 \alpha]} \quad K_v = \frac{\alpha \sigma A_s (T_0 - T_f)}{[h(v_0)A_s - I_{w0}^2 \alpha]}$$

La transformé de Laplace de l'équation (9) donne :

$$(1 + \tau_v s)\Delta R_T = K_I \Delta I - K_v \Delta v \quad (IV.10)$$

La fonction de transfert de la sonde de vitesse est donnée par :

$$\Delta R_T = \frac{K_I}{(1 + \tau_v s)} \Delta I - \frac{K_v}{(1 + \tau_v s)} \Delta v \quad (IV.11)$$

Le bloc diagramme du capteur de débit est le suivant :

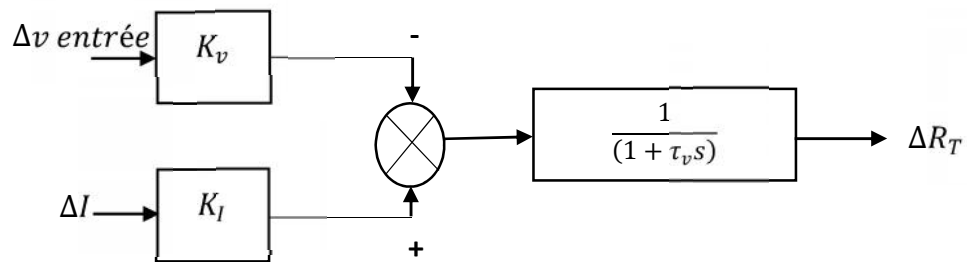


Figure IV.2 : Bloc diagramme du capteur de débit.

IV.2.3 Systèmes d'anémomètre à température constante

La figure IV.1 schématise le mode de fonctionnement de l'anémomètre à température constante. Il s'agit d'un pont de Wheatstone d'auto-équilibrage qui maintient la résistance R_w du capteur à une valeur constante R. Lorsque le pont est équilibré la tension E_{out} est nulle. On s'arrange pour que l'amplificateur à courant fournisse un courant I non nul lorsqu' E_{out} est nulle.

Lorsque l'on place la sonde dans le fluide, la température du fil diminue, donc sa résistance R_w aussi. De ce fait une tension de déséquilibre E apparaît et le courant I fourni par l'amplificateur varie. Cette variation de I ramène le pont à l'équilibre. Ainsi la résistance R_w et donc la température du fil sont asservies. Les variations de courant I , dues aux variations de vitesses du flux, entraînent les variations de tension de sortie. C'est en appliquant la loi de King après détermination des coefficients A et B que l'on remonte à la vitesse du flux. Le temps de réponse du fil chaud aux fluctuations de vitesses du flux étant de microseconde, c'est pour cette raison que le fil chaud est très utilisé dans l'étude de la turbulence [79].

L'équation d'équilibre en régime permanent pour un capteur de vitesse du fluide avec courant d'auto-chauffage est :

$$I_w^2 R_w = h(v) \cdot A_s (T_w - T_f) \quad (IV.12)$$

Dans le mode de fonctionnement de CTA la résistance R_w et de la température T_w du capteur sont maintenus à des valeurs constantes. À partir de l'équation (12), on voit que si la vitesse de fluide v augmente, elle provoquera une augmentation en $h(v)$, le système doit augmenter le courant I à travers le capteur de façon à rétablir l'équilibre. Étant donné que la résistance R de la sonde reste constante, la chute de tension (IR) à travers l'élément augmente, donnant ainsi un signal de tension dépendant de capteurs de vitesse de fluide.

Le coefficient h se trouve à l'aide des corrélations empiriques. Si on fait introduire le nombre de Nu pour trouver la relation qui relie Nu et h. La fameuse relation de King est :

$$Nu = a + b \cdot Re^n \quad (IV.13)$$

Avec a, b et n des constants empiriques trouver par calibration pour chaque fluide. Dans la suite de notre travaille, nous allons travailler avec la corrélation universelle de Kramer proposée pour les sondes de débit est :

$$Nu = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33} Re^{0.5} \quad (IV.14)$$

Cette relation est valable pour $0.01 < Re < 10\,000$ et $0.71 < Pr < 1000$ [faivre.pdf].

Avec : $h = \frac{kNu}{d}$ (k : la conductivité thermique de gaz, d : le diamètre de la sonde) et $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$

(μ : sa viscosité [m²/s], v : sa vitesse [m/s], ρ : la masse volumique [Kg/m³]), nous trouverons :

$$h = \frac{k}{d} \left[0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33} \left(\frac{\rho v d}{\mu} \right)^{0.5} \right] \quad (IV.15)$$

Donc :

$$h = A_0 + B_0 \sqrt{v} \quad (IV.16)$$

Avec :

$$A_0 = \frac{k}{d} 0.42 Pr^{0.2} \quad , \quad B_0 = \frac{k}{d} 0.57 Pr^{0.33} \left(\frac{\rho d}{\mu} \right)^{0.5}$$

(Pr est un nombre spécifique à chaque fluide).

Nous voyons que, A et B dépendent de la dimension du capteur et des propriétés physiques du fluide k, et μ , sont constants pour un capteur donné pour un fluide donné.

On remplaçant (IV.12) dans (IV.16), nous obtiendrons :

$$I_w^2 R_w = (A_0 + B_0 \sqrt{v}) \cdot A_s (T_w - T_f) \quad (IV.17)$$

De (IV.12), (IV.16) et (IV.17), nous obtiendrons :

$$I_w^2 R_w = (A_0 + B_0 \sqrt{v}) \cdot A_s \frac{(R_w - R_0)}{\alpha R_0} \quad (IV.18)$$

$$\frac{I_w^2 R_w}{(R_w - R_0)} = A + B \sqrt{v} \quad (IV.19)$$

$$\text{Avec :} \quad A = \frac{A_s}{\alpha R_0} A_0 \quad \text{et} \quad B = \frac{A_s}{\alpha R_0} B_0$$

Donc :

$$E_{out} = I R_w$$

$$E_{out}^2 = R_w [(R_w - R_0)(A + B \sqrt{v})] \quad (IV.20)$$

$$E_{out} = (E_0 + \gamma \sqrt{v})^{0.5} \quad (IV.21)$$

Avec :

$$E_0 = R_w (R_w - R_0) A \quad \text{et} \quad \gamma = R_w (R_w - R_0) B$$

Nous remarquons bien que dans un écoulement où la température et la vitesse varient, la variation du transfert de chaleur ne peut être l'unique indice de la variation de la vitesse.

IV.2.4 Caractéristiques dynamiques de CTA

Nous calculons maintenant la fonction de transfert du système CTA pour voir si la réponse en fréquence est suffisante pour détecter des fluctuations rapides de vitesse dues à la turbulence.

L'architecture classique d'un CTA à base de pont de Wheatstone est illustrée sur la figure (IV.1). Cette architecture nous permet d'extraire les équations représentative de chaque bloc de CTA.

Il y en a :

- L'équation caractéristique du capteur trouvé dans la partie (IV.2.2) est :

$$\Delta R_T = \frac{K_I}{(1 + \tau_v s)} \Delta I - \frac{K_v}{(1 + \tau_v s)} \Delta v \quad (IV.22)$$

- Le pont de Wheatstone délivre une tension dans sa sortie. L'équation caractéristique est :

$$\Delta V = K_B \Delta R_R \quad (IV.23)$$

- Puisque l'amplificateur est employé pour faire l'équilibrage du pont de Wheatstone, et puisque le seul paramètre qui peut jouer le rôle de régulateur du courant, la sortie de l'amplificateur est le courant représenté par l'équation suivante :

$$\Delta I = K_A \Delta V \quad (IV.24)$$

- L'équation de la tension de sortie est : $\Delta E_{out} = R_w \Delta I$ (IV.25)

- Le changement de la résistance du pont est représenté par l'équation suivante :

$$\Delta R_R = \Delta R - \Delta R_T$$

$$\Delta R_R = -\Delta R_T \quad (IV.26)$$

De (IV.23), (IV.24), (IV.25) et (IV.26), nous trouvons :

$$\Delta R_T = \frac{-1}{R_w K_B K_A} \Delta E_{out} \quad \text{et} \quad \Delta I = \frac{\Delta E_{out}}{R_w} \quad (IV.27)$$

De (IV.22) et (IV.27), nous trouvons :

$$\frac{-1}{R_w K_B K_A} \Delta E_{out} = \frac{1}{(1 + \tau_v s)} \left[\frac{K_I}{R_w} \Delta E_{out} - K_v \Delta v \right]$$

Alors :

$$[(1 + K_I K_A K_B) + \tau_v s] \Delta E_{out} = K_v K_A K_B R_w \Delta v$$

Donc la fonction de transfert de système CTA est :

$$\frac{\Delta E_{out}}{\Delta v}(S) = \frac{K_{CTA}}{1 + \tau_{CTA}S} \tag{IV.28}$$

Avec :

$$K_{CTA} = \frac{K_v K_A K_B R_w}{1 + K_I K_A K_B} \quad \text{et} \quad \tau_{CTA} = \frac{\tau_v}{1 + K_I K_A K_B}$$

Le bloc diagramme de système d'anémomètre à température constante CTA est le suivant :

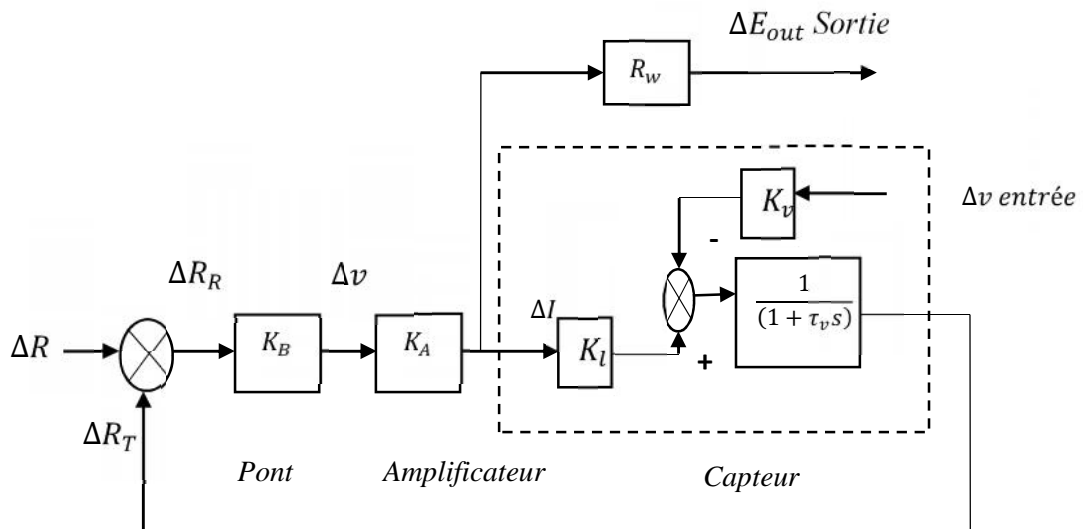


Figure IV.3 : Bloc diagramme de système CTA.

IV.3 Procédure de comptage de gaz

SONATRACH, TOTAL et REPSOL ont signé le 28 janvier 1996, un Contrat d'Association pour le Développement et l'Exploitation du Gaz Humide du Gisement de TIN FOUYE TABANKORT (TFT) situé aux coordonnées géographiques 28° 26' N 7° 33' E, à 1500 Km au Sud d'Alger dans la région Nord du Sahara.

Le gisement considéré est le gaz cap des champs d'huile déjà existant. Les réserves récupérables sont estimées à 144,6 billions Nm³ de gaz, 15,6 millions tonnes de GPL et 16,6 millions tonnes de condensât.

L'estimation de la production journalière des puits est de 20 millions Nm³ du gaz naturel.

Les conditions de procès de base pour le design de la nouvelle unité de comptage sont :

Données Process	Gaz sec
Fluide	Gaz
Température (°C)	60
Pression (barg)	77,4
Débit mini	375 000 N/m ³ /h
Débit normal	747 683 N/m ³ /h
Débit max	875 000 N/m ³ /h
Densité	0,647
Viscosité (cp)	0,014
Poids moléculaire	18,72
Z facteur	0,902

Les compositions molaires des produits de base sont les suivants :

Composants	Gaz sec (%moles)
Méthane	84,2
Ethane	10,63
Propane	1,57
i-Butane	0,04
n-Butane	0,07
i-Pentane	0,01
n-Pentane	0,01
n-hexane	0
NC7	0
2MHP	0
NC8	0
2MO	0
NC9	0
2MNON	0
NC10	0
NC11	0
PLUS	0
Azote	1,92
Dioxyde de carbone	1,55

VI.3.1 Composants du gaz

La composition chimique du gaz est un paramètre de base et a une influence très importante sur les résultats dans le comptage du gaz.

La concentration de chaque composant nous permet de calculer un facteur très important qui est le pouvoir calorifique supérieur et aussi la densité et la masse volumique du gaz.

Pour calculer le facteur de compressibilité du gaz nous tiendrons compte de la concentration de CO₂ et N₂.

Le but de cette analyse est la détermination de la teneur en eau, le point de rosé hydrocarbure et la teneur en soufre.

La détermination des composants chimiques du gaz se fait par la méthode de chromatographique, qui est une méthode d'analyse basée sur la séparation de constituants d'un mélange.

La masse volumique d'un gaz est le rapport de la masse d'une quantité de ce gaz au volume qu'il occupe à la pression et de température considérées

$$\rho = \frac{M_m}{V} \quad (IV.29)$$

Considérons la quantité de gaz égale à 1Kmole et avec l'équation d'état, on aura dans le cas pratique le gaz est réel

$$\rho = \frac{PM_m}{ZRT} \quad (IV.30)$$

$$R = 82,05 \cdot 10^5 \text{ lPa/kg.mol.K.}$$

$$Z = 0,9974 \text{ dans les conditions } P = 10^5 \text{ Pa et } T = 288,15 \text{ K.}$$

$$\text{Donc } \rho = 0,7901 \text{ kg/m}^3$$

Données réelles de l'industrie de GTFT/ Sonatrach

Au point de livraison, LE GAZ NATUREL doit avoir les spécifications suivantes :

Humidité : 50 ppmv max ;

Pression : 71 barg max

Température : 60 °C [80].

Données present pour la simulation

```

α=0.003; % le coefficient de température de résistance du
fil ici « le platine" en J.kg-1.K-1 ;
d=5.10-4; % diamètre de fil chaud en m;
l=2.2.10-3;
S=pi*d*l
s=1e+2
k=330e-6; % conductivité thermique en w/m.k
μ=0.014; % viscosité en Pa s
=0.7901; % masse volumique en kg/m3;
Pr=0.75; % nombre de Prandlet;
R0=123.24; % résistance de fil à 60C°
Rw=153; % résistance de sonde à 100C°

```

IV.4 Simulation sous Matlab/Simulink

L'objectif de cette partie est, après analyse et modélisation du comportement du fil chaud, de simuler ce système constitué par le capteur de vitesse, le système complet par Matlab/Simulink et de simuler la partie électronique de ce dernier par Simulink.

La simulation informatique, ou simulation numérique, est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film vidéo.

Un simulateur peut réagir à des modifications de paramètres et modifier ses résultats en conséquence. Une simulation numérique peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles. L'ordinateur résout alors ces équations numériquement en utilisant des méthodes de calcul.

IV.4.1 Description de Matlab

MATLAB est le « noyau dur » d'un logiciel de mathématiques spécialement étudié pour traiter des matrices. Un langage de programmation spécifique permet de faire des manipulations sur des matrices et toutes sortes de calculs et de présentation graphique de ces calculs. Différentes « boîtes à outils » peuvent y être adjointes pour simuler le comportement des systèmes linéaires ou non. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'utiliser le langage de programmation car une interface graphique permet d'avoir accès de façon intuitive à des schémas réalisant une fonction particulière.

SIMULINK est un outil d'analyse des systèmes linéaires qui permet de décrire sous forme de schéma Simulink le système à étudier, de lancer une simulation temporelle et de récupérer les résultats pour les exploiter. Simulink est une interface graphique qui facilite l'analyse des systèmes dans le domaine temporel. Cette approche est, en effet, facilitée, dans le sens où, les systèmes ne sont plus décrits par des lignes de code Matlab mais simplement définis à partir d'un bloc diagramme, dont tous les éléments sont prédéfinis dans des bibliothèques de blocs élémentaires, qu'il suffit d'assembler. Lorsque le schéma bloc du système que l'on veut étudier est représenté sous Simulink, il est possible d'analyser sa réponse temporelle (à des entrées aussi diverses sous Simulink tels qu'un échelon, une rampe, un signal rectangulaire, un

sinus, un signal aléatoire...) en lançant une simulation. Ce module permet de construire des schémas fonctionnels à partir d'éléments contenus dans des bibliothèques [81].

IV.4.2 Construction du bloc de capteur sous Simulink

Le schéma fonctionnel ci-dessous présente la modélisation de la fonction de transfert de bloc de capteur à partir des éléments de base de Simulink. En reprenant l'équation (IV.11) qui représente la variation de la résistance de capteur, elle se traduit par le schéma Simulink ci-dessous :

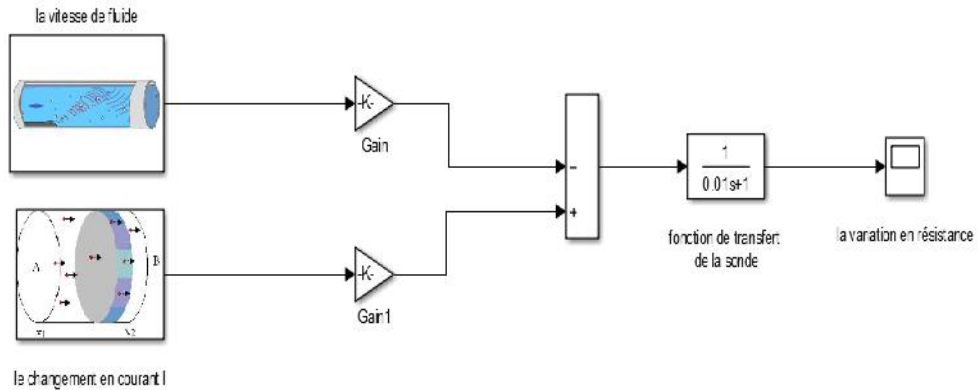


Figure IV.21: Bloc de capteur sous Simulink.

La simulation de ce bloc avec les paramètres prise pour le gaz naturel nous a donné le graphe schématisé sur la figure suivante :

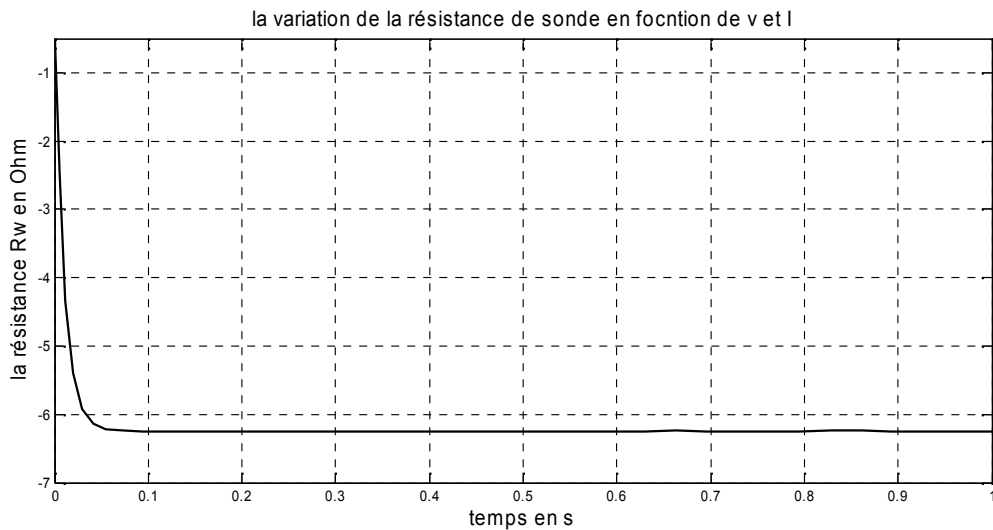


Figure IV.5 : Allure de variation de résistance de sonde en fonction de V et I.

L'écoulement extrait de la chaleur au fil, ce qui a tendance à abaisser sa température donc sa résistance, le décline de la courbe en fonction du temps et les valeurs négatifs (-)

indiquent clairement que la variation de température $R_T < 0$ ce qui indique qu'il y a un refroidissement du capteur dû à la vitesse du fluide.

IV.4.3 Construction du bloc d'anémomètre à fil chaud à température constante sous Simulink

En reprenant l'équation de la fonction de transfert de l'anémomètre à fil chaud à température constante CTA :

$$\frac{\Delta E_{out}}{\Delta v}(S) = \frac{K_{CTA}}{1 + \tau_{CTA}S}$$

Elle se traduit par le schéma Simulink ci-dessous :

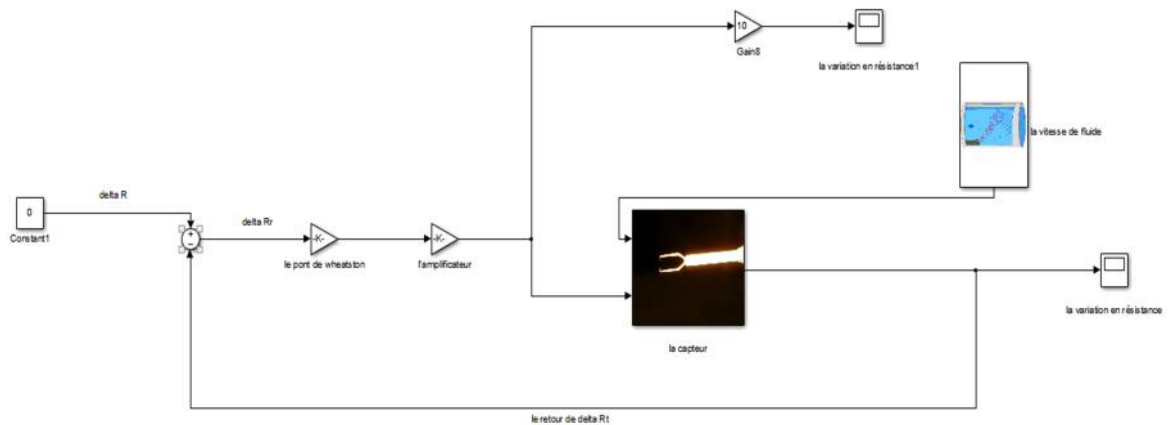


Figure IV.6 : Schéma de la fonction de transfert de CTA.

La simulation de ce bloc avec la prise en charge de tous les paramètres du sous bloc du pont de Wheatstone, l'amplificateur et de la variation de résistance nous donne le graphe ci-dessous qui montre la variation de la tension E en fonction de la vitesse v :

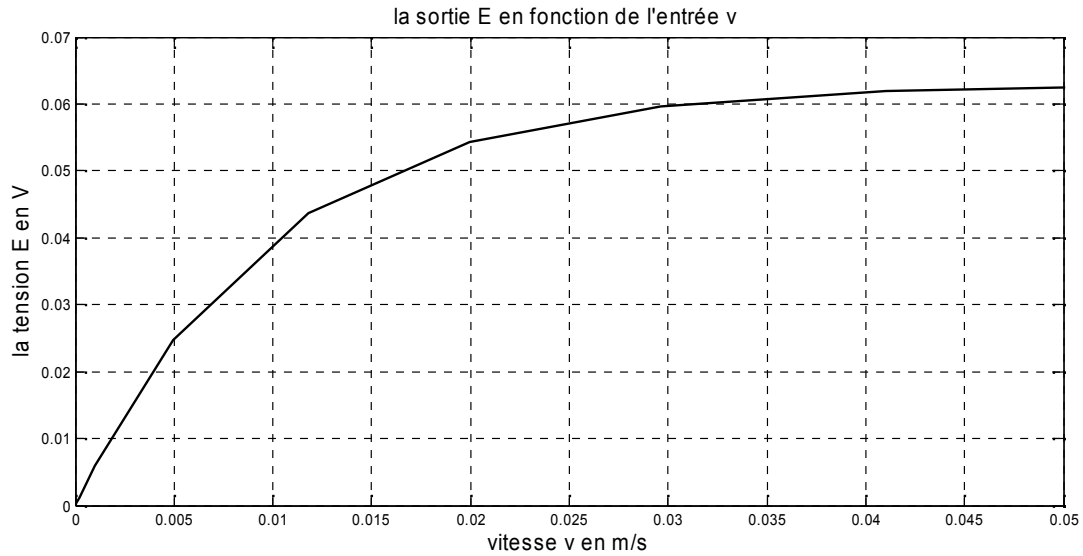


Figure IV.7 : Sortie E en fonction de l'entrée v.

Cette courbe montre que la réponse du fil chaud n'est pas linéaire confirmant ainsi ce qui a été annoncé dans l'étude théorique. On remarque bien que des petits changements en vitesse donnent aussi des variations de la tension E, ce qui implique que le bloc suit bien les variations dues à la fluctuation de vitesse.

IV.4.4 Construction du circuit électronique de l'anémomètre à fil chaud sous Simulink

Le but de cette partie est de mettre au point un système électronique qui permet de mesurer la tension de sortie en fonction de l'écoulement du fluide en respectant les lois définies jusqu'ici. La figure ci-dessous schématise le circuit électronique avec des sub-systemes de la bibliothèque Simulink. La figure IV.9 montre un schéma détaillé de ce bloc.

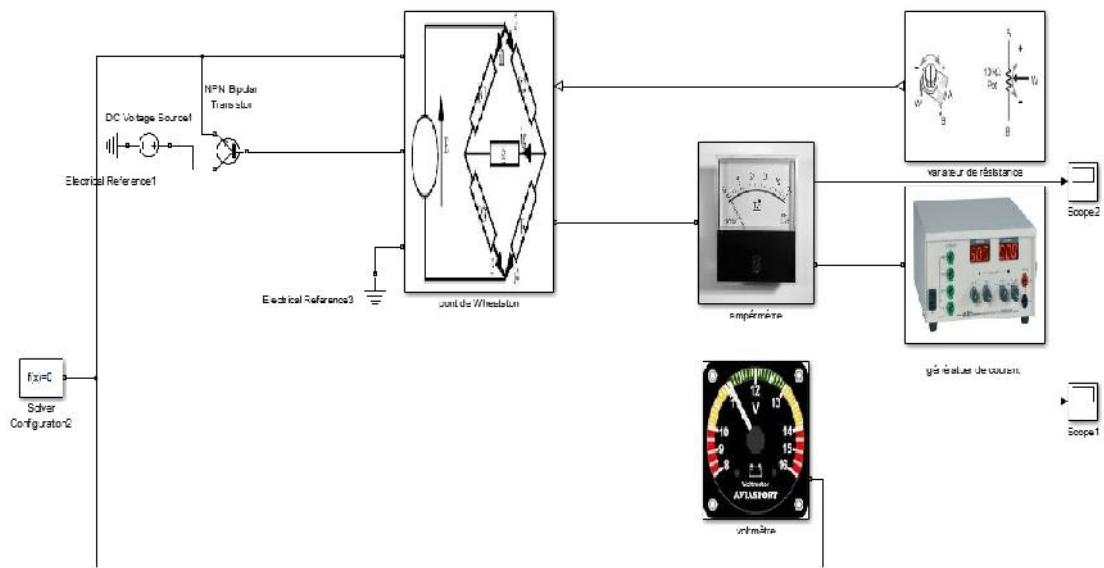


Figure IV.8 : Subsysteme du bloc CTA.

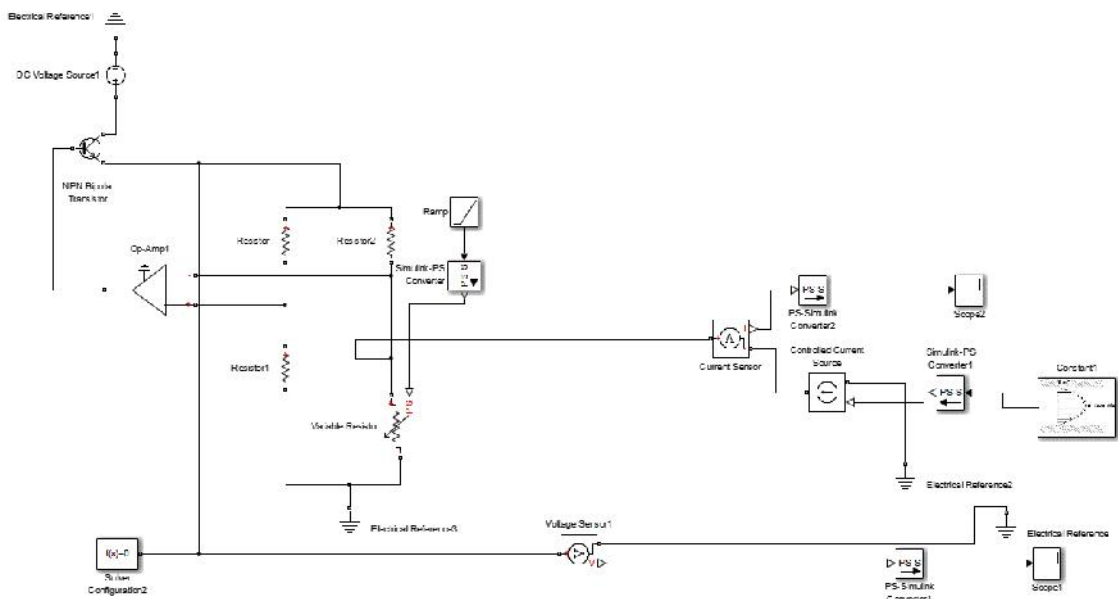


Figure IV.9 : Bloc complet du CTA.

Le capteur fonctionne par effet joule, il a de plus une résistance très faible, ce qui nécessite un circuit qui puisse délivrer assez de courant pour le maintenir sensible. L'amplificateur opérationnel délivre des courants pour maintenir le fil à une température constante pour les différentes vitesses.

Le dispositif de mesure le plus généralement utilisé du fait de sa grande sensibilité est le pont de Wheatstone. Le pont est équilibré si le rapport des résistances est identique dans ses

deux branches. Si cette condition n'est pas satisfaite, du fait de l'insuffisance du courant initial, ou encore du fait d'un refroidissement du capteur par un écoulement de vitesse, il se crée une différence de tension entre les points milieu du pont. Cette tension d'erreur est appliquée aux bornes de l'amplificateur différentiel qui pour s'opposer à la différence de tension entre ses bornes délivre une tension à sa sortie.

L'écoulement extrait de la chaleur au fil, ce qui a tendance à abaisser sa température donc sa résistance, ce qui se traduit instantanément par un déséquilibre du pont mesuré par l'amplificateur de différence qui, par la contre réaction injecte le courant nécessaire pour annuler la différence de tension entre ses borne, c'est-à-dire rééquilibré le pont.

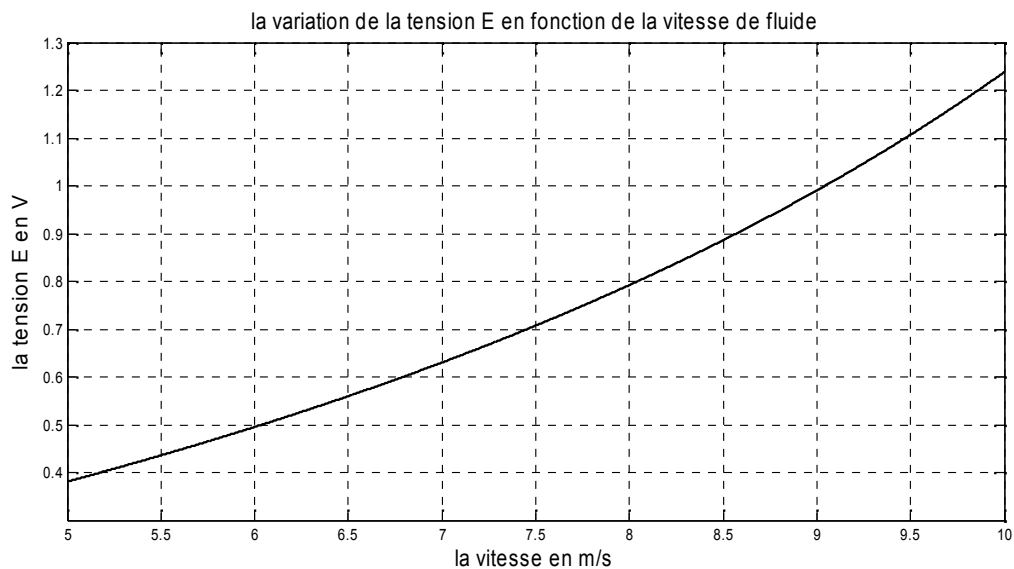


Figure IV.10 : Variation de E en fonction de la vitesse v.

La variation de la tension E en fonction de la vitesse v est illustrée sur la figure IV.10. On remarque bien que l'allure n'est pas parfaitement linéaire ce qu'est validé par les résultats théoriques.

IV.5 Simulation de l'équation caractéristique de CTA sous Matlab

Dans la partie théorique, nous avons développé la fonction de transfert thermique entre le fluide et le fil chaud.

La formule générale de King donne :

$$R_w I_w^2 = (A + Bv^n)(T_w - T_f) \quad (IV. 17)$$

Les contraintes sont :

- Le circuit doit faire opérer le fil à une température constante, on impose deux température, la température de fluide qui vaut 60°C et la température de travail du fil chaud supposée égale à 140°C ;
- Les résistances trouvés pour ces deux température sont $R_0=123.24$ et $R_w=153.57$;
- Pour minimiser l'effet du gradient de température entre les extrémités des supports de filament, on prend le rapport $l/d > 200$, on prend un fil avec une longueur de 2.2 cm et un diamètre de $2\mu\text{m}$;
- Proposer des valeurs pour un fluide déterminé afin de pouvoir calculer les différents paramètres de l'équation ci-dessus, le calcul est fait pour le gaz naturel.

Après détermination des coefficients A, B et des températures de fonctionnement, le graphe suivant est ainsi établi :

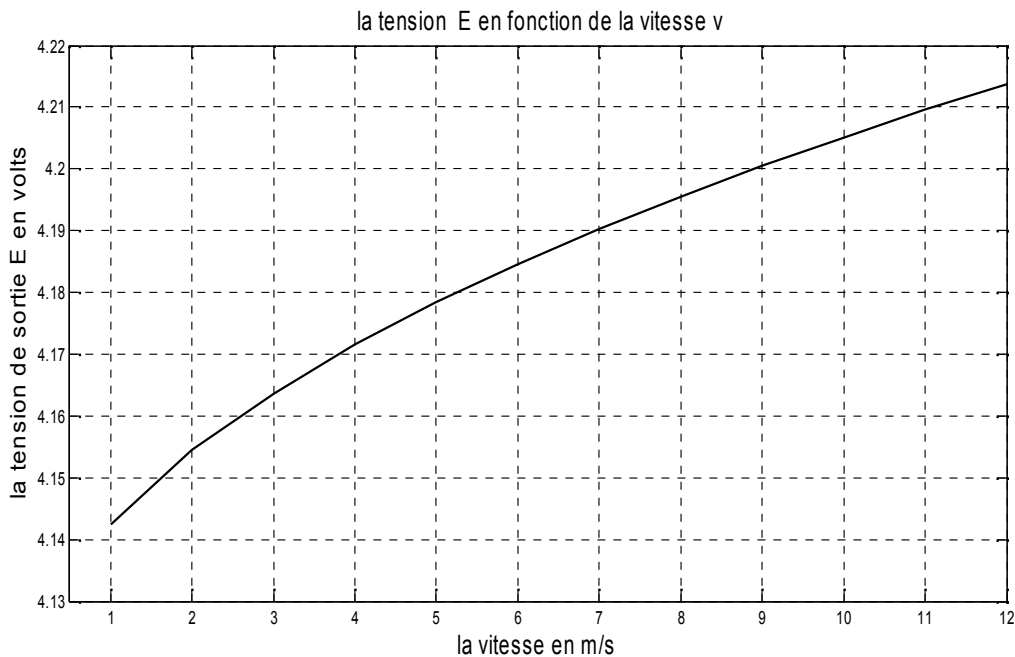


Figure IV.11 : Changement de tension en fonction de la vitesse.

On remarque bien que les changements de vitesse causent des changements en tension de sortie, ce qui montre que les petites variations de vitesse causent des changements en tension pour pouvoir les suivre et rééquilibre le pont à nouveau. Ces variations sont influencées par plusieurs paramètres, parmi eux on trouve le diamètre du fil d . Dans la figure ci-dessous on a changé le diamètre pour voir son influence sur le comportement de la tension E.

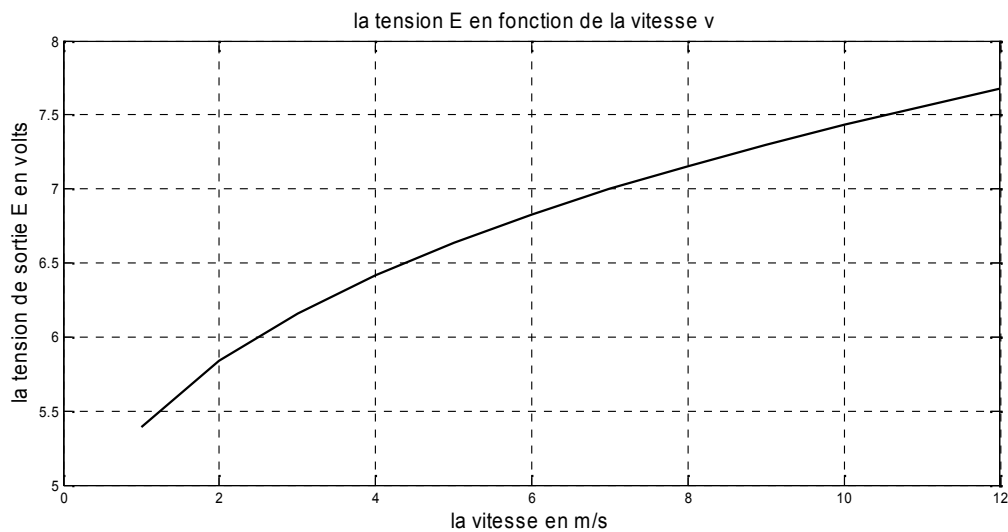


Figure IV.12 : Variation de E en changeant le diamètre d.

On remarque bien qu'un petit changement en d engendre proportionnellement un changement en E.

IV.5 Débit massique en fonction de la vitesse de fluide

Jusqu'à maintenant, nous avons vu la relation de King qui relie la tension et la vitesse d'un écoulement de fluide et nous avons pu simuler cette relation par Matlab/Simulink. Dans la partie suivante nous allons proposer une plage de variation de la tension et d'essayer d'extraire la vitesse d'écoulement à partir de celle-ci. Nous avons la relation originale de King tel que :

$$R_w I_w^2 = (A + Bv^n)(T_w - T_f)$$

A partir de l'équation (IV.20), nous pouvons tirer la relation qui relie la vitesse en fonction de la tension de la manière suivante :

$$E_{out}^2 = R_w [(R_w - R_0)(A + B\sqrt{v})]$$

$$\text{Donc : } v = \left[\frac{E_{out}^2 - A}{R_w \cdot (R_w - R_0) \cdot B} \right]^2 \quad (31)$$

L'équation (IV.31) montre que la vitesse de l'écoulement dépend de la tension de sortie, les coefficients A, B et les résistances du fil et du fluide.

En supposant qu'on a une plage de variation de la tension de sortie de 2 à 4 volts avec un pas de variation de 0.1, nous obtiendrons le graphe de la variation de vitesse suivant :

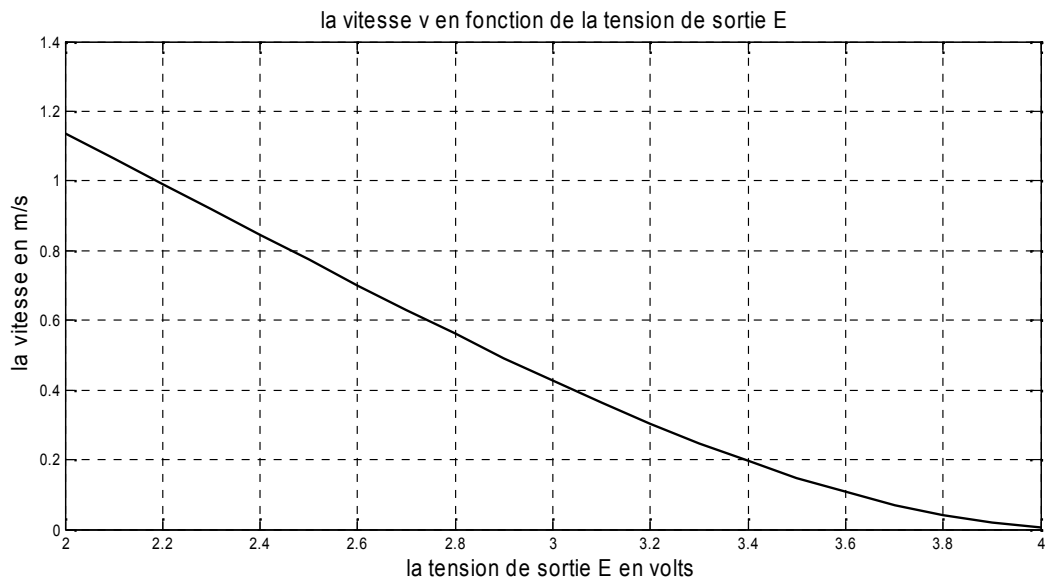


Figure IV.13 : Variation de la vitesse v en fonction de tension E .

On remarque bien que la vitesse est inversement proportionnelle à la tension. Les faibles augmentations en tension provoquent des changements opposés de la vitesse.

L'étape suivante consiste à calculer le débit massique à partir de la vitesse trouvé précédemment.

Le débit massique n'a pas une relation directe avec la vitesse de fluide, il faut tout d'abord passer par le débit volumique et à partir de celui-ci on calcule le débit massique.

L'équation de débit volumique est donnée par :

$$Q_v = S \cdot v \quad (IV.32)$$

Le débit massique est défini par :

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad (IV.33)$$

$$\text{Donc : } Q_m = S \cdot v \cdot \rho \quad (IV.34)$$

Avec :

Q_v : le débit volumique de fluide [m³/s] ;

S : la surface de canal ou pipe ou le fluide s'écoule [m] ;

V : la vitesse de fluide [m/s] ;

Q_m : le débit massique [Kg/s] ;

ρ : la masse volumique de fluide [Kg/m³] ;

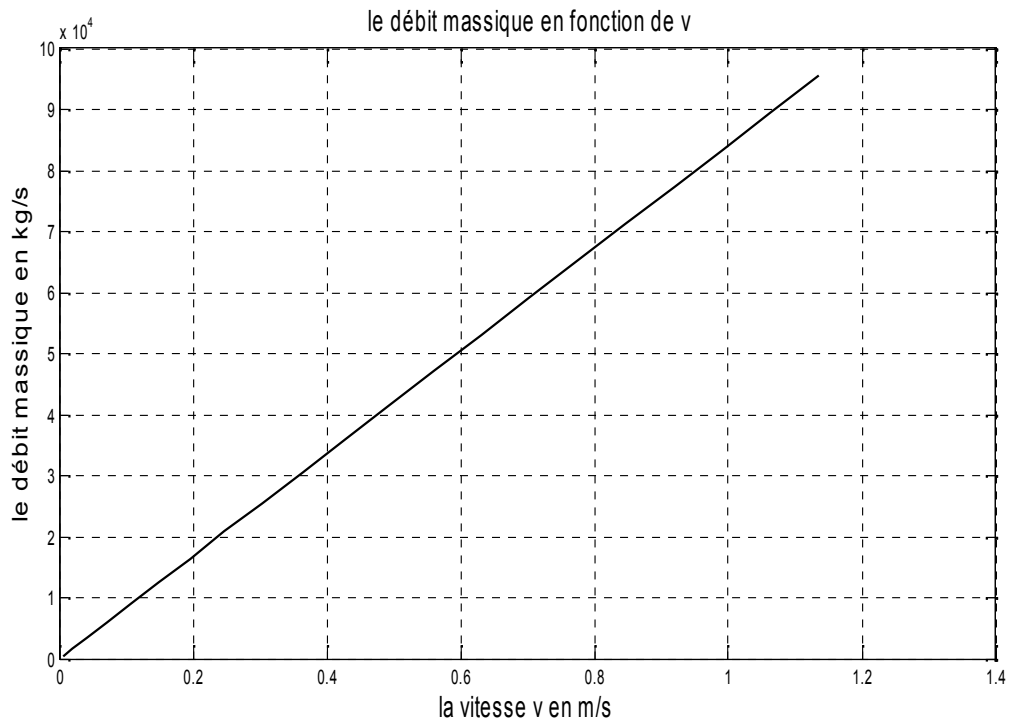


Figure IV.14 : Débit massique Q_m en fonction de la vitesse v .

Le débit massique augmente avec l'augmentation de la vitesse de l'écoulement de fluide. Il a une relation linéaire avec la vitesse ce qui valide la relation théorique trouvée dans l'équation (IV.34).

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'architecture d'un anémomètre à fil chaud à température constante et simulé ce dernier par Matlab/Simulink. Les résultats trouvés nous ont permis de conclure que le débitmètre thermique construit à partir d'un fil chaud peut donner des résultats probants pour le calcul du débit massique en fonction de la vitesse du fluide.

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce travail porte sur l'étude des débitmètres massiques thermiques basée sur le principe de l'anémomètre à fil chaud. Le principe de l'anémomètre à fil chaud est basé sur la loi de King et des transferts thermiques entre ce fil et le fluide en écoulement. Les effets de transfert de chaleur, les propriétés physique-chimique de fluide ainsi que les propriétés physique du fil sur la quantité de débit calculé ont été étudié et simuler numériquement.

Dans le premier Chapitre, les procédés de comptage des débits des fluides industriels avec précision ont été exposés. Le choix de type de comptage et la précision de mesure dépend des facteurs exigé par les compagnies.

Le deuxième Chapitre a donné lieu à une revue de la littérature relative aux débitmètres massiques thermiques. Les différents types des débitmètres massiques thermiques existants et la dépendance de chaque type selon son échelle micro ou macroscopique nous a permis de conclure que le type à perte de chaleur ou anémomètre thermique est le meilleur choix pour notre étude.

Le troisième Chapitre, fait l'objet d'une présentation des différents débitmètres massiques thermiques trouvés dans l'industrie et leurs conditions d'installation. Les recherches faites dans ce chapitre ont permis d'identifier clairement les deux types des débitmètres massiques thermiques à tube capillaire CTMF ou à passage intégrale ITMF et les exigences d'utilisation de chaque type suivant les caractéristique physique de la canalisation et suivant le type de fluide. Ce qu'a permis de déduire que le type ITMF est le plus approprié pour le comptage de gaz naturel.

Le quatrième Chapitre est consacré à la conception des modèles mathématiques et la simulation de ces derniers par Matlab/Simulink. La présentation des résultats et leurs discussions suivent aussi dans ce chapitre.

Le comptage du gaz par un débitmètre massique thermique présente beaucoup d'avantages relativement à sa loi de calcul directe de vitesse de l'écoulement. L'emploi de peu de paramètre comme la température de fluide, le transfert de chaleur et les propriétés physique de fluide représente son point fort en le comparant avec les autres types des débitmètres existants.

Les recherches bibliographiques entrepris présentés dans la littérature technique ont montré que la loi des débitmètres massiques thermiques et le peu des matériels utilisés peuvent causer des erreurs minimales sur la précision de mesure de cet instrument.

L'étude numérique montre que la vitesse de fluide joue un rôle très important dans le calcul de débit massique de fluide.

Une étude expérimentale des écoulements à travers les débitmètres massique thermique est recommandée pour valider les différents résultats théorique et numérique trouvés.

Bibliographie

- [1] : Pascal Bigot, chapitre I : Les débits, CIRA.
- [2] : Guemena Mouloud, Mesure de gros débit de gaz, contribution des venturis tuyère à colsonique, Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougueera Boumerdes, Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, 2002.
- [3] : Michel Scotto, Masse volumique des fluides en conduite fermée, Techniques de l'ingénieur, Métrologie relative aux fluides - Masses et volumes, 10/03/2008.
- [4] : Riadh Ben Hamouda, Notions de mécanique des fluides, cours et exercices corrigés, Centre de Publication Universitaire, Tunis 2008.
- [5]:http://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/jcms/c_181621/fr/capteur-de-debit
- [6] : Projet expérimental de physique statistique, étude d'un jet turbulent. hebergement.u-psud.fr/projetsdephysiquestatistique/m1/.../poly_jt_1213
- [7] : Elena Sanz García, Influence de la micromorphologie de surface dans les échanges thermiques convectifs, Thèse de doctorat, l'école Centrale de Lyon, Mécanique et Énergétique, octobre 2007.
- [8]: Jacob Fraden, Handbook of modern sensors, physics, designs, and applications, third edition, Springer, 2004.
- [9] : Michael F. Modest, Radiation, heat and mass transfer, cha 3, 65-66, the CRC press, 2000.
- [10] : F. Moisy, Méthodes expérimentales en mécanique des fluides, Master 1 de physique appliquée et mécanique, Université Paris sud, Septembre 2013.
- [11] : Claude Della Bella, Compteurs de volume de gaz - partie 1, techniques de l'ingénieur, Métrologie relative aux fluides, 10/09/2007.
- [12] : Jean-Michel Montel, Débitmètres électromagnétiques (DEM), techniques de l'ingénieur, Métrologie relative aux fluides - vitesses et débits, 10/09/2011.
- [13] : Cherigui Mohamed, Etude expérimental des effets d'Installation sur les débitmètres à organes déprimogènes utilisés pour le comptage des fluides industriels, Mémoire de magister en mécanique des fluides appliquée, Université de Mostaganem, faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, 2003.
- [14] : Instrumentation fondamentale : Appareils de mesure et régulation PID, principes de science et de fonctionnement des réacteurs, instrumentation et contrôle groupe de formation technique, 2007.
- [15] : Débitmètre a orifice déprimogène, Dm de Physique N°13, 4 Mars 2014.
- [16] : Richard Thorn, Differential pressure flowmeters, chapter 28.1 in John G. Webster, Halit Eren, The Measurement, Instrumentation and Sensor Handbook, CRC Press 1999.
- [17]: International Standard ISO 5167-1, « Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices », third edition 2003.
- [18] : Hadjadj Ahmed et al, Etude de la problématique du comptage transactionnel des hydrocarbures entre Sonatrach et les partenaires étrangers dans le cadre de la nouvelle loi et du système fiscal Algérien, projet PNR.
- [19] : Ludovic Jezequel, Débitmètre a organe déprimogène, bts chimiste – Lycée coeffin – Baie Mahault.

- [20] : Bouakaz Ali, Comptage des hydrocarbures débitmètre à ultrasons, métrologie et sécurité routière, Bulletin périodique d'information de l'Office National de Métrologie Légale "O.N.M.L", Juillet 2010.
- [21] : James E. Gallagher, Natural gas measurement handbook, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 2006.
- [22] : Hans-Peter Vaterlaus et al, Ultrasonic flowmeters, chapter 28.7 in John G. Webster, Halit Eren, The Measurement, Instrumentation and Sensor Handbook, CRC Press 1999.
- [23] : Chap. V : Capteurs de débit, instrumentation CIRA, 2006/2007.
- [24] : Regine Gaucher, Compteurs de volume de gaz, Techniques de l'ingénieur, Mesures physiques, 01/10/1992.
- [25] : Mike Crabtree's, Flow handbook - 2nd edition issued November 2000.
- [26] : Huibert-Jan Verhoeven, Smart thermal flow sensors, Delft, 15Janvier 1996.
- [27] : Jean-Louis Daudon, Débitmètres thermiques, Techniques de l'ingénieur, Métrologie relative aux fluides - Vitesses et débits, r2270, 10/12/1999.
- [28] : M. Ashauer et al, Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles, Sensors and Actuators 73 (1999), p.7-13.
- [29] : Sabrina Ben Yahya et Sammy Fergoug, La physique au bout du fil, Lycée Suger de Saint-Denis, Olympiades de Physique, France 2011-2012.
- [30] : Aloui Fethi, Etude de Contrôle des écoulements, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Dynamique des Fluides, Mars 2010.
- [31] : Comte-Bellot G., 1976, Hot-wire anemometry, Annu. rev. fluid mech., 8, 209-231
- [32] : Jean-Paul Schon, Anémomètres à fil ou à film chaud, techniques de l'ingénieur, Instrumentation et méthodes de mesure, 10/04/1994.
- [33] : Comte-Bellot. G, Turbulence et anémométrie à fil chaud, <https://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebooks/moreau/>.
- [34] : Munif Jourieh, Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien, Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers ParisTech, Spécialité mécanique, Décembre 2007.
- [35] : Remy Dufour, Développement d'un peigne de fils froids pour l'étude d'écoulements turbulents en présence d'un champ thermique, Mémoire de maîtres sciences (M.Sc), Université de Laval, génie mécanique, Aout 1998.
- [36] : Ivan Dobrev, Modèle hybride de surface active pour l'analyse du comportement aérodynamique des rotors éoliens a pales rigides ou déformables, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech, spécialité mécanique, Décembre 2009.
- [37] : http://www.robots.ox.ac.uk/~sjp/publns/sjp_thesis_c4_chapter4.pdf.
- [38] : L.V. King, On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid, Philos. Trans. R. Soc. A 214 (1914) 373.
- [39] : Benoit Talbot, Mélange et dynamique de la turbulence en écoulements libres à viscosité variable, Thèse de Doctorat, 2001.
- [40] : T.-W. Lee, Thermal and flow measurements, CRC Press 2008.

- [41] : P.C. Stainback et K.A. Nagabushana, Review of Hot-Wire Anemometry Techniques and the Range of their Applicability for Various Flows, Electronic journal of fluids engineering, Transactions of the ASME.
- [42] : Nam-Trung Nguyen et Steven T. Wereley, Fundamentals and Applications of Microfluidics, Artech House, 2006.
- [43] : Nam-Trung Nguyen, Thermal mass flow sensors, chapter 28.9 in John G. Webster, Halit Eren, the Measurement, Instrumentation and Sensor Handbook, CRC Press 1999.
- [44] : P. Fürjes et al, Thermal characterisation of a direction dependent flow sensor, Sensors and Actuators A 115 (2004), p.417–423.
- [45] : Lammerink T et al, Microliquid flow sensor. Sens. Actuators A (Phys.) A37–A38,(1993), p.45–50.
- [46] : Fürjes P et al, Thermal characterisation of a direction dependent flow sensor. Sens. Actuators A Phys. 115(2–3),2004, p.417–23.
- [47] : Kim S et al, Measurement of flow direction and velocity using a micromachined flow sensor. Sens. Actuators A Phys. 114(2–3) (2004), p.312–318.
- [48] : Mayer F et al, Thermoelectric CMOS anemometers. Proc. SPIE – Int. Soc. Opt. Eng. 2882, 1996, p.236–46.
- [49] : Lammerink T et al, A new class of thermal flow sensors using $\Delta T=0$ as a control signal. Proc. IEEE 13th Annu. Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems, Miyavaki, Japan, 2000, p. 525–530.
- [50] : Lyons C, et al, A high-speed mass flow sensor with heated silicon carbide bridges. Proc. MEMS 98. IEEE.11th Annu. Int. Workshop Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, Heidelberg, Germany, 1998, pp. 356–360.
- [51] : Van Oudheusden B et al, Integrated sensor for non-invasive monitoring of flow in pipes. Sens. Actuators 18(3–4), 1989, p.259–67.
- [52] : Sjoerd Haasl and Göran Stemme, Flow Sensors, Comprehensive Microsystems, volume 2, Physical Sensing, 2008, p.209-272.
- [53] : Lammerink T et al, AC-driven temperature-balance flow sensor. Transducers '01. Eurosensors XV. 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators. Dig. Tech. Pap, Munich, Germany, Vol. 2, 2001, p. 1448–51.
- [54] : Zemel J N, Rahnamai H, Pyroelectric anemometer. Tech. Rep. US Pat, University of Pennsylvania (USA), 1980.
- [55] : Lammerink T S et al, Intelligent gas-mixture flow sensor. Sens. Actuators A Phys. 47(1–3 pt4), (1995).
- [56] : Bedo G, Fannasch H, Muller R 2000 Silicon flow sensor for gases and liquids using AC measurements. Sens. Actuators A Phys. 85(1), 124–32.
- [57] : Van Kuijk J, Lammerink T S, de Bree H-E, Elwenspoek M, Fluitman J H J 1995 Multiparameter detection in fluid flows. Sens. Actuators A (Phys.) A47(1–3), 369–72.
- [58] : Ashauer M et al, Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles. Sens. Actuators A (Phys.) A73(1–2), (1999), p.7–13.

Bibliographie

- [59] : Nicolas Getin, Simulation numérique du contrôle actif par jets pulsés de l'écoulement turbulent autour d'un cylindre circulaire, Thèse de Doctorat, acoustique, Ecole centrale de Lyon, Mai 2000.
- [60] : N. T. Nguyen, Micromachined flow sensors—a review, *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 8, No. 1, (1997), pp. 7–16.
- [61] : M. Elwenspoek, Thermal flow micro sensors, mechanical micro-sensors, 1999, p.423-435.
- [62] : Kim S et al, Measurement of flow direction and velocity using a micromachined flow sensor. *Sens. Actuators A Phys.* 114(2–3), (2004), p.312–318.
- [63] : J.G. Olin, *Capillary tube thermal mass flow meters & controllers a user's guide*, Sierra press 2013.
- [64] : John G. Olin, *Thermal dispersion mass flow meters*, Sierra press 2008.
- [65] : Roger C. Baker, *Flow measurement handbook*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [66] : <http://www.flowcontrolnetwork.com/articles/90912-a-new-paradigm-for-thermal-dispersion-mass-flowmeters?page=1>.
- [67] : Roger C. Baker, Chris Gimson, The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters, *Flow Measurement and Instrumentation* 12 (2001), p.113–121.
- [68] : *Flow handbook*, Endress+Hauser press.
- [69] : <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14511:ed-1:v1:en:sec:foreword>
- [70] : J.G. Olin, “Industrial thermal mass flow meters—Part 1: Principles of Operation,” *Measurements and Control*, Issue 193, Février 1999, p.83-90.
- [71] : John G. Olin, Thermal anemometry, chapter 29.2 in John G. Webster, Halit Eren, the measurement, instrumentation and sensor handbook, CRC
- [72] : Proline t-mass B 150 Débitmètre massique thermique Pour la mesure simple et économique de gaz industriels, Endress+Hauser press, Février 2012.
- [73] : Sonatrach , réalisation d'une unité de traitement de brut à Hassi Messaoud sud Algérie , Transmetteur de débit massique, manuel d'installation, utilisation et maintenance, Janvier 2010.
- [74] : John G. Olin, A new paradigm for thermal dispersion mass flowmeters, *The ASME standard and recent technology advances*, Sierra press, Février 2013.
- [75] : Marie-Pierre Vivarat-Perrin, Mesure de débit, le débitmètre thermique, un faux vrai massique, *Mesures* 731, p.63-68, Janvier 2001.
- [76] : Matthew J. Waldron, Design, simulation, and fabrication of a flow sensor for an implantable micropump, Thèse de Doctorat, Rochester Institute of Technology RIT Scholar Works, 12-1-2009.
- [77] : L. V. Araujo et al, A controlled-temperature hot-wire anemometer with voltage feedback linearization, *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, p : 325-330, May 2014.
- [78] : Nirupa Majhi et Monalisha Topno, fluid flow measurement syste using hot wire anemometer, Bachelor of Technology In Electronics and Instrumentation Engineering,

Bibliographie

Department of Electronics & Communication Engineering National Institute of Technology, Rourkela, 2012.

[79] : perso.ens-lyon.fr/christophe.perge/cperge_rapport_stage_m1.pdf

[80] : Procédure site, procédure de comptage Gaz, GPL et condensat de GTFT, Service Process (Département Exploitation), PS XP/PRO 01, Rév 3 25/06/2007.

[81]: Bousifi Achraf, Belrhali Yasser, Etude et simulation d'une régulation thermique par logique floue, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2009/2010.

Résumé

Les économies modernes des pays reposent principalement sur les fluides énergétiques ce qui nécessite le contrôle et la mesure des quantités ou des volumes de fluides mis en jeu dans un processus de fabrication ou dans une transaction commerciale pour gérer intelligemment les rendements et les volumes d'entrée et de sortie des fluides.

Le transport des fluides industriels dans les conduites et les mesures de leurs débit sont nécessaires pour la plus part des opérations de production et de commercialisation. La nature des fluides peut être modifiée en causant des variations dans la composition ou dans les paramètres de ces derniers (la température, la pression ou la vitesse).

Le présent travail permet d'explorer pour la première fois en Algérie, la technologie du compteur thermique basé sur la loi de King. Le principe de mesure thermique repose sur le fait qu'un fluide s'écoulant à travers une zone chauffée soutirera une quantité de chaleur connue lors de son passage.

L'objectif de ce travail est d'étudier théoriquement et numériquement les compteurs thermiques et la réduction des effets thermiques sur le processus de mesure d'une façon générale.

Mots clés – débitmètre thermique, débit, anémomètre à fil chaud, loi de King, CTMF, ITMF.

Abstract

Modern economies rely mainly on energy extracted from fluids that requires control and measurement of fluid quantities or volumes involved in the manufacturing process or in business transaction to manage intelligently yields and volumes of inlet and outlet.

The transport of industrial fluids in pipes and the measurement of their speed are required for the most of the production operations and marketing. The nature of the fluids can be modified by changing the fluid composition or in the parameters of the latter (the temperature, pressure or speed).

This work allows us to explore for the first time in Algeria the technology of thermal flow meter based on the King's law. The thermal measurement principle is based on the fact that a fluid flowing through a heated zone will extract a known amount of heat during its passage.

The objective of this work is to study theoretically and numerically the thermal metering and the reduction of thermal effects on the measurement process in general.

Keywords - thermal flow meter, flow, hot wire anemometer, King's Law, CTMF, ITMF.

لاقتصادات الحديثة تعتمد أساسا على الطاقة المستخرجة من السوائل التي تتطلب مراقبة وقياس كميات السوائل أو وحدات التخزين المشاركة في عملية التصنيع أو في المعاملات التجارية للإدارة بذكاء تعاطي الأحج .

نقل السوائل الصناعية في الأنابيب وقياس سرعتهم عمل مهم في معظم عمليات الإنتاج والتسويق. طبيعة السوائل يمكن تعديلها عن طريق تغيير تكوين السائل أو في مكوناته (في درجة الحرارة والضغط أو السرعة).

هذا العمل يسمح لنا لاستكشاف لأول مرة في الجزائر تكنولوجيا مقياس التدفق المتري الحراري على أساس قانون كينج. ويستند مبدأ القياس الحراري على حقيقة أن السوائل التي تتدفق من خلال منطقة ساخنة واستخراج كمية معروفة من الحرارة أثناء مرورها بها.

الهدف من هذا العمل هو دراسة نظريا وعدديا القياس الحراري والحد من التأثيرات الحرارية على عملية القياس بشكل عام.

الكلمات المفتاحية - مقياس التدفق المتري الحراري ، التدفق، مقياس السلك الساخن لشدة الريح ، قانون كينج.