

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud MAMMERRI, Tizi-Ouzou**



**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique**  
**Département d'Automatique**

**Mémoire de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme

*D'Ingénieur d'Etat en Automatique*

***Thème***

*Etude d'anémomètre à température constante*

Proposé par : M<sup>r</sup> : HASNAOUI.M

Présenté par :

M<sup>elle</sup> : AKLIL Fetta.

M<sup>elle</sup> : AOUIMEUR Kahina

Soutenu le : 15 /07 /2010

*Promotion 2010*

# **REMERCIEMENTS**

*Au terme de ce travail, qui a été réalisé au département automatique de l'université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU,*

*Nous tenons à remercier notre promoteur :M<sup>r</sup> HASNAOULM pour son encadrement, son aide et surtout pour tous ses conseils et ses remarques qui nous ont permis de réaliser ce modeste travail.*

*Nos remerciements s'adressent également à : M<sup>r</sup> MAIDIA, M<sup>r</sup> GUERMAH.S et M<sup>elle</sup> CHILALI.O qui nous ont orientées et qui nous ont accueillies avec beaucoup de gentillesse et de patience.*

*Nous tenons à remercier vivement le président et les membres du jury qui nous feront honneur d'examiner notre travail.*

*En fin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

*Dédicaces*

*Je dédie ce Travail à ma très chère maman pour son soutien et son amour*

*A mon cher papa qui m'a offert son aide,*

*A mon adorable sœur Fazia qui m'a toujours soutenue dans les moments difficiles ; et à son époux et son fils Adel*

*Ames chers frères : Yazid, Ramdane, et Hassen et leurs épouses et tous leurs enfants : Moh, Dido, Nadouche, Lilia, Yasmine, Fariel, Samia, Titi, Kaissa, Samir.*

*A Joseph et toute sa famille.*

*Sans oublier tous mes ami(e)s et tous les étudiants de la promotion 2009-2010 du département automatique, en particulier, Bouf, Bina, Kahina, Koukou, Myri, Samo, Tbib, Djasmin Mourad, Stephan Sofiane, Hmimi, Kaki.*

*Fetta*

*Je dédie ce modeste travail à la lumière de ma vie ma très chère  
maman, à mon cher papa qui m'a offert tout son amour et son aide,  
aux étoiles de mon ciel ma sœur Lamia, mes frères :Yazid et Riadh et à  
mes demi frères et sœurs qui sont en France.*

*A Abdrezek et sa maman, son père et toutes ses sœurs et frères.*

*A mes cousines : Hassina et Samia.*

*A mes cousins : Moh et Djamel.*

*A toutes mes amies surtout : Kahina, Souhila, Bina, Kahina ADRYEN,  
Nadjia, Djimi, Mira et Fatima.*

*A mon binôme Fetta*

*A la mémoire de mon oncle Omar.*

*Kahina*



# Sommaire

## Introduction générale

### *Chapitre I : généralité sur les débitmètres*

I.1.Introduction .....	(2)
I.2-Définition d'un capteur.....	(2)
I. 3- Constitution d'un capteur.....	(2)
I.3.1.Corps d'épreuve .....	(2)
I.3.2.Transducteur.....	(2)
I.4.Classification des capteurs .....	(3)
I.4.1.Selon le mode de fonctionnement .....	(3)
I.4.2.Selon le signal de sortie .....	(3)
I.5.Caractéristiques des capteurs .....	(4)
I.5.1.Grandeurs d'influence .....	(4)
I.5.2.Durée de vie .....	(4)
I.5.3.temps de réponse .....	(4)
I.5.4.bande passante.....	(4)
I.6.Etalonnage des capteurs .....	(4)
I.6.1.étalonnage simple .....	(5)
I.6.2.étalonnage multiple.....	(5)
I.7. Chaîne de mesure .....	(5)
I. 8. Généralités sur les débitmètres .....	(6)
I.8.1 Débits.....	(6)
I. 8.2. Pertes de charge.....	(7)
I.8.3 Régimes d'écoulement dans une canalisation .....	(7)
I.8.3.1. Écoulement laminaire .....	(7)
I.8.3.2. Écoulement turbulent .....	(7)
I.8.4 Nombre de REYNOLDS .....	(7)
I.8.5 Facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans les conduites.....	(8)
I. 8.6 Mesure de débit .....	(9)
I.8.6.1. Mesure des débits volumiques des fluides .....	(9)
I.8.6.1.1.Par mesure de la vitesse de fluide .....	(10)
I.8.6.1.2.Par mesure de pression différentielle.....	(12)
I.8.6.1.3. Par débitmètre à section variable.....	(12)
I.8.6.1.4. Par mesure de pression dynamique .....	(14)

I.8.6. 2. Mesure des débits massiques des fluides .....	(15)
I.9-Conclusion.....	(16)
<b>Chapitre II : l'anémomètre à fil chaud</b>	
II.1 .Introduction .....	(17)
II.2.Définition de l'anémométrie .....	(17)
II.3.Les différents types d'anémomètres .....	(17)
II.3.1. Anémomètre à coupelle.....	(17)
II.3.2.Anémomètre à hélice .....	(17)
II.3.3.Anémomètre à laser.....	(17)
II.3.4.Anémomètre à plaque .....	(18)
II. 4. Étude d'anémomètre à fil chaud.....	(18)
II.4.1-Définition.....	(18)
II.4.2 Le principe de l'anémomètre à fil chaud.....	(19)
II.4.3 Bilan de puissance .....	(20)
II .4.4 Relation fondamentale de l'anémométrie : la Loi de King.....	(23)
II.4.4.1 Transfert de chaleur.....	(23)
II.4.4.2 Dépendance de capteur en fonction de la température .....	(24)
II.5. conditionnement de capteur.....	(25)
II.5.1 Anémométrie à Courant Constant (CCA).....	(25)
II.5.2. Anémométrie à température constante(CTA).....	(27)
II.6. Coefficient de surchauffe .....	(28)
II.7-conclusion .....	(29)
<b>Chapitre III : la régulation</b>	
III.1 Introduction .....	(30)
III.2. Asservissement.....	(30)
III.3. Régulation.....	(30)
III.4. Eléments constitutif d'une boucle de régulation.....	(30)
III.4.1.Le régulateur.....	(30)
III.4.2.Actionneur .....	(30)
III.4.3.Capteur .....	(30)
III.5.Schéma de principe d'une boucle de régulation.....	(31)

III.6.Les types de contrôles .....	(32)
III.6.1. La régulation en boucle fermée .....	(32)
III.6.2. La système en boucle ouverte .....	(32)
III.6.3.Association de boucle de régulation .....	(32)
III.7.Comportement statique et dynamique des systèmes à régler .....	(33)
III.7.1. Précision .....	(33)
III.7.2. Précision statique .....	(33)
III.7.3. Précision dynamique.....	(33)
III.7.4. Stabilité .....	(33)
III.7.5. Dépassement.....	(33)
III.7.6.la rapidité .....	(33)
III.8.Principaux réseaux de correcteurs.....	(34)
III.8.1.Régulateurs "tout ou rien" .....	(34)
III.8.2. Correcteur Proportionnel, P.....	(34)
III.8.3.Intégrateur pur .....	(35)
III.8.4.dérivateur pur .....	(36)
III.8.5. Correcteur proportionnel Intégrateur Dérivateur PID .....	(36)
- Structure parallèle .....	(37)
-Structure série .....	(37)
-Structure mixte.....	(38)
III.9.Conclusion .....	(39)
<b><i>Chapitre IV : Application sur l'anémomètre à température constante</i></b>	
IV.1.Introduction .....	(40)
IV.2.Description de montage de mesure .....	(40)
IV.3.Principe de fonctionnement .....	(41)
IV.4.Modèle dynamique d'anémomètre à température constante .....	(41)
IV.4.1.Modèle dynamique du régulateur .....	(41)
IV.4.2.Modèle dynamique de système bouclé .....	(46)
IV.5.La simulation et l'interprétation des résultats.....	(49)
IV.5.1 Simulation à une entrée constante .....	(49)

-Interprétation .....	(50)
IV.5.2.Simulation à une entrée sinusoïdale.....	(51)
-Interprétation.....	(51)
IV.5.2.1 La commande adaptative .....	(52)
-Définition .....	(52)
- Les taches principales de mécanisme d'adaptation .....	(52)
-Les différentes méthodes d'adaptations .....	(52)
-Commande adaptative à régulateur auto ajustable .....	(52)
IV.6.Conclusion .....	(54)
Conclusion générale .....	(55)
Bibliographie	

# Introduction générale

## **Introduction générale :**

Malgré les progrès récents des techniques optiques pour mesurer le débit, l'anémomètre est toujours un excellent instrument indispensable dans la métrologie des flux. Il permet les mesures de mutation rapide des flux dans une large gamme de vitesse, garantissant un rapport signal bruit favorable.

L'anémomètre est un matériel professionnel sers à mesurer la vitesse des fluides, il est idéal pour le contrôle des systèmes, grâce à cet avantage il est adapte à de nombreuse application dans le domaine des techniques de ventilation et de climatisation.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'anémomètre à fil chaud et les améliorations apportées à son modèle, et pour cela nous avons partagé notre travail en quatre chapitres :

-Le premier chapitre consiste en une description générale sur les capteurs et il intègre aussi une description sur les débitmètres et leur domaine d'utilisation.

-Le deuxième chapitre porte sur les types d'anémomètres et le principe de fonctionnement d'anémomètre à fil chaud, en basant sur les échanges thermiques.

- La régulation et ces caractéristiques seront abordées dans le troisième chapitre .ce chapitre consiste à représenter l'effet des actions de la régulation standards les plus utilisé sur un système à régler.

-Dans le dernier chapitre : nous avons modélisé l'anémomètre à température constantes() puis nous avons fait une simulation avec le logiciel Matlab.

-Le mémoire se termine par une conclusion générale.

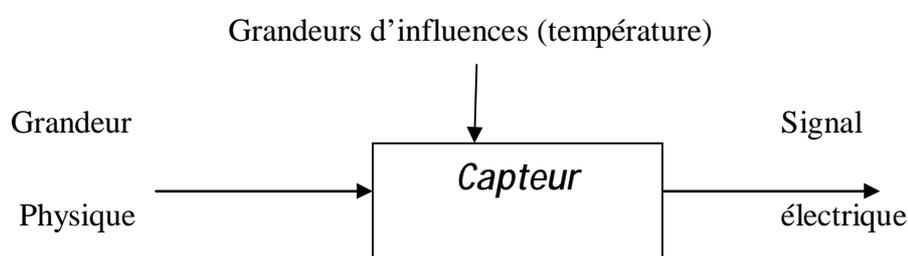
# Chapitre I: Généralité sur les débimètres

### I.1.Introduction

Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure. Ils transforment les grandeurs à mesurer d'un processus en signaux électriques. Cette transformation doit être le reflet aussi parfait que possible de ces grandeurs. Cet objectif n'est atteint que si l'on maîtrise en permanence la réponse des capteurs qui peut être affectée par des défauts produits par des signaux parasites qui se superposent aux signaux utiles.

### I.2-Définition d'un capteur

C'est un dispositif qui transforme une grandeur physique en une grandeur exploitable, souvent de nature électrique. Le choix de l'énergie électrique vient du fait qu'un signal électrique se prête facilement à de nombreuses transformations difficiles à réaliser avec d'autres types de signaux.



### I. 3- Constitution d'un capteur

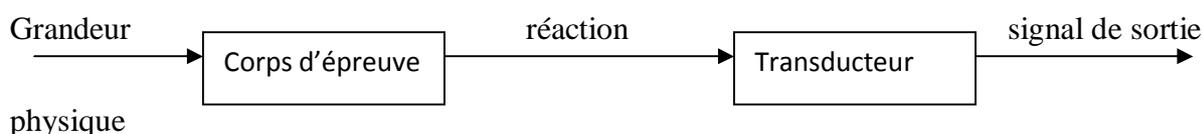


Figure I.1 schéma d'éléments d'un capteur

**I.3.1.Corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement aux variations de la grandeur à mesurer. Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

**I.3.2.Transducteur** : il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

### I.4. Classification des capteurs

Les capteurs peuvent être classés selon leur mode de fonctionnement et leur type du signal de sortie.

#### I.4.1. Selon le mode de fonctionnement :

On a deux types :

##### Ø Capteurs passifs :

Les capteurs dont le signal électrique délivré est une variation d'impédance sont dits passifs car ils nécessitent une source d'énergie électrique pour que l'on puisse avoir un signal électrique.

##### Ø Capteurs actifs :

Fonctionne en générateur, l'énergie physique prélevée sur le mesurande est transformée directement en énergie électrique qui constitue le signal de sortie.

#### I.4.2. Selon le signal de sortie

##### Ø capteur analogique :

Le signal élaboré par le capteur est lié au mesurande par une loi continue, parfois linéaire, qui caractérise l'évolution des phénomènes physiques mesurés. Il peut être de toute nature :

- courant 0 - 20 mA, 4 - 20 mA
- tension 0 - 10 V, 0 - 5 V

##### Ø capteur numérique :

Le signal élaboré par le capteur se présente sous la forme d'impulsions électriques générées simultanément (mode parallèle, sur plusieurs fils) ou successivement (mode série, sur un seul fil). Cette transmission est compatible avec les systèmes informatiques de traitement.

Ø capteur logique :

Le signal de sortie ne compte que deux valeurs possibles, c'est un signal tout ou rien.

### I.5. Caractéristiques des capteurs

**I.5.1. Grandeurs d'influence** : Sont des grandeurs étrangères qui peuvent provoquer des perturbations sur le capteur, par exemple : la température, les vibrations.

**I.5.2. Durée de vie** : c'est la durée de fonctionnement d'un dispositif jusqu'à défaillance.

**I.5.3. temps de réponse** : caractéristique de la vitesse d'évolution du régime transitoire. Un capteur est d'autant plus rapide que son temps de réponse est plus court.

**I.5.4. bande passante** : plage de fréquence pour laquelle l'atténuation de la courbe de réponse en fréquence est inférieure à 3 dB de la valeur maximale.

### I.6. Etalonnage des capteurs

La quantité que l'on cherche à mesurer sera appelée le mesurande, soit  $m$ . Le but assigné au capteur est de convertir  $m$  en une grandeur électrique que l'on appellera  $s$ . La mesure  $s$  peut être une impédance, une charge électrique, un courant ou une différence de potentiel. La relation qui lie  $s$  à  $m$ , soit  $s = F(m)$ , dépend de la loi physique régissant le capteur.

L'expression  $F(m)$  est établie par une opération que l'on appelle l'étalonnage : on connaît (à l'aide par exemple d'un étalon) différentes valeurs de  $m$ , on relève pour ces valeurs de  $m$  ( $m_1, m_2, \dots, m_i$ ) les signaux électriques délivrés par le capteur ( $s_1, s_2, \dots, s_i$ ) et on trace la courbe  $s(m)$  qui est appelée courbe d'étalonnage du capteur (Figure I.6.2).

L'utilisation du capteur consiste à lire la valeur du signal électrique  $s$  lorsqu'est appliqué un mesurande  $m$  inconnu. La courbe d'étalonnage permet alors d'en déduire  $m$ .

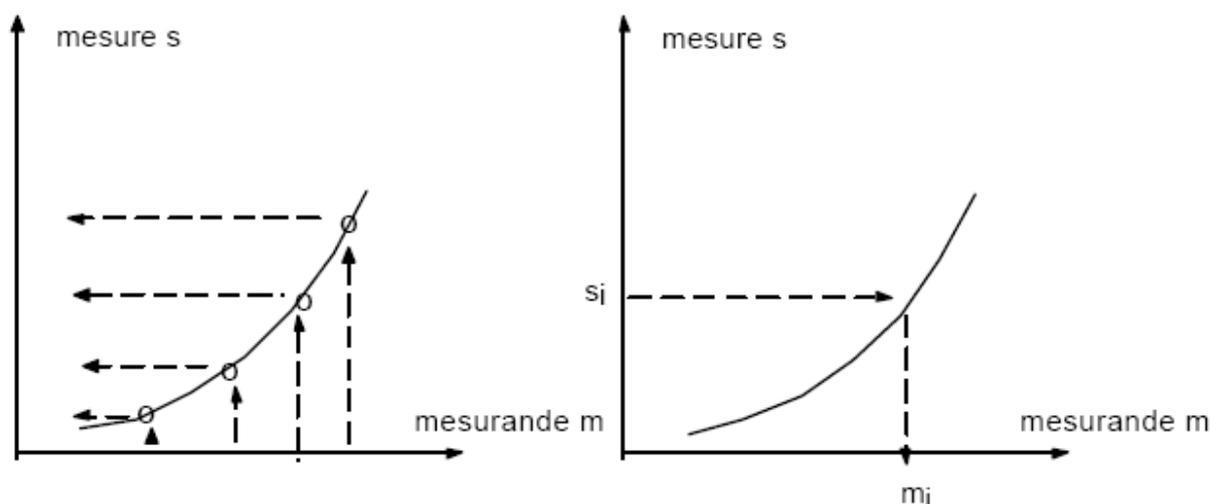


Figure I.2 : étalonnage puis lecture d'un capteur

On a deux types d'étalonnages :

I.6.1. **étalonnage simple** : il s'applique à un mesurande défini par une grandeur physique unique et à un capteur non sensible à des grandeurs d'influence.

I.6.2. **étalonnage multiple** : lorsque le mesurande à lui seul ne permet pas de définir la repense du capteur, il faut que soit précisée par une série d'étalonnage successifs.

**La sensibilité(S)** : elle est définie autour d'une valeur  $m_i$  constante du mesurande, par le rapport de la variation de la grandeur de sortie à la variation du mesurande.

$$ds/dm=F'(m).$$

Pour que la sensibilité soit indépendante de la valeur  $m$ , il faut que le capteur soit linéaire :

$$F'(m) = \text{constant} = S \text{ soit encore } s = S*m+s_0$$

Où  $s_0$  est la valeur du signal  $s$  pour  $m = 0$ .

Bien entendu, on peut toujours définir une plage de valeurs de  $m$  où  $S$  est constante, c'est à dire où le capteur est linéaire.

### I.7. Chaîne de mesure :

Généralement, le signal  $s$  n'est pas directement utilisable. On appelle chaîne de mesure l'ensemble des circuits ou appareils qui amplifient, adaptent, convertissent, linéarisent, digitalisent le signal avant sa lecture sur le support de sortie.

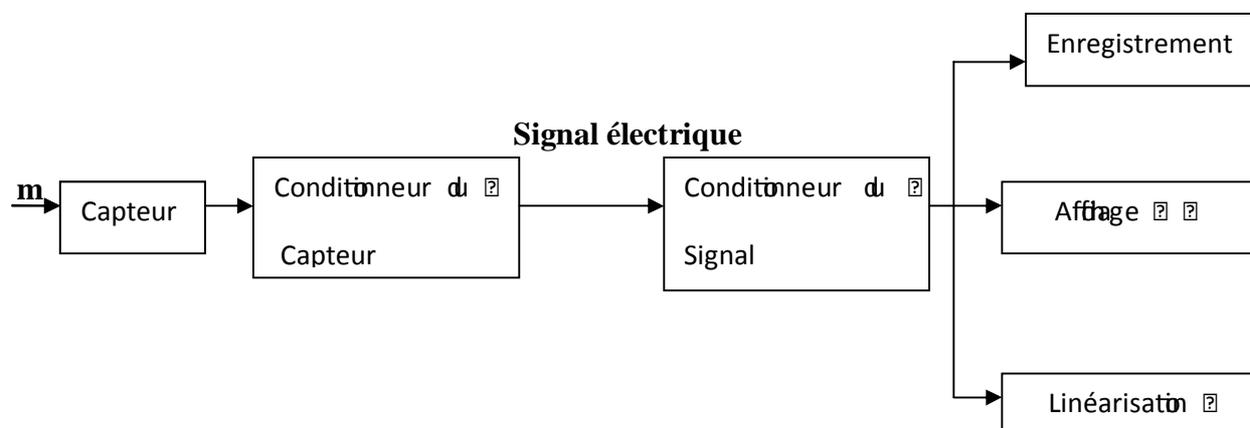


Figure I.3 schéma de la chaîne de mesure

## I. 8. Généralités sur les débitmètres

### I. 8.1 Débits

Le débit est habituellement mesuré par déduction, en mesurant la vitesse moyenne à travers une section connue. Le débit mesuré par cette méthode indirecte est le débit volumique  $Q_v$ .

$$Q_v = S \cdot V$$

- $S$  est la surface de section de la conduite en  $m^2$
- $V$  est la vitesse moyenne du fluide en  $m/s$

Le débit volumique  $Q_v$  est le volume de fluide écoulé pendant l'unité de temps (en  $m^3/s$ )

Le débit massique  $Q_m$  est la masse de fluide écoulée pendant l'unité de temps (en  $kg/s$ )

En appelant  $\rho$  la masse volumique du fluide (en  $kg/m^3$ ) :  $Q_m = \rho \cdot Q_v$

- Pour l'eau douce,  $\rho = 1000 \text{ Kg } / m^3$

Les liquides peuvent être considérés (à température constante) comme incompressibles, c'est à dire que leur volume ne dépend pas de la pression. Ce n'est pas le cas des gaz et des vapeurs pour lesquels la masse volumique est proportionnelle à la pression. On peut donc considérer que, à température constante, le débit massique d'un fluide est

proportionnel à son débit volumique. Pour un gaz, il n'y a proportionnalité qu'à pression et température constante. La plupart des débitmètres indiquent le volume écoulé par unité de temps, ce sont des débitmètres volumiques. Toutefois, dans certaines applications nécessitant la connaissance de l'énergie thermique d'un combustible, il est nécessaire de connaître le débit massique. On a recours alors à des débitmètres massiques, dont la valeur mesurée est directement le débit massique. Cependant, bon nombre de débitmètres prétendent " massiques ", déduisent le débit massique à l'aide de l'équation:  $Q_m = \rho \cdot Q_v$

### I. 8.2. Pertes de charge

Les pertes de charge sont la diminution de la pression totale entre deux sections d'un écoulement. Elles s'expriment en mètres de colonne d'eau (MCE) et sont fonction de la section du tuyau, du débit véhiculé et de la nature du liquide.

### I.8.3 Régimes d'écoulement dans une canalisation

#### I.8.3.1. Écoulement laminaire :

Les lignes de courant demeurent parallèles entre elles, les couches de fluide glissant les unes sur les autres sans se mélanger. Les pertes de charge sont alors proportionnelles à la vitesse.

#### I.8.3.2. Écoulement turbulent :

Les lignes de courant ne gardent plus leur individualité, mais s'enchevêtrent, chaque particule de fluide est animée de vibrations aléatoires. Le vecteur vitesse est la somme de deux composantes la vitesse moyenne qui présente le mouvement global du fluide et une vitesse de fluctuations à caractère aléatoire. Les pertes de charge sont proportionnelles au carré de la vitesse.

### I.8.4 Nombre de REYNOLDS

Pour faciliter la comparaison entre deux écoulements, on utilise des nombres sans dimension. Ainsi, dans un écoulement incompressible (pression = constante) et isotherme

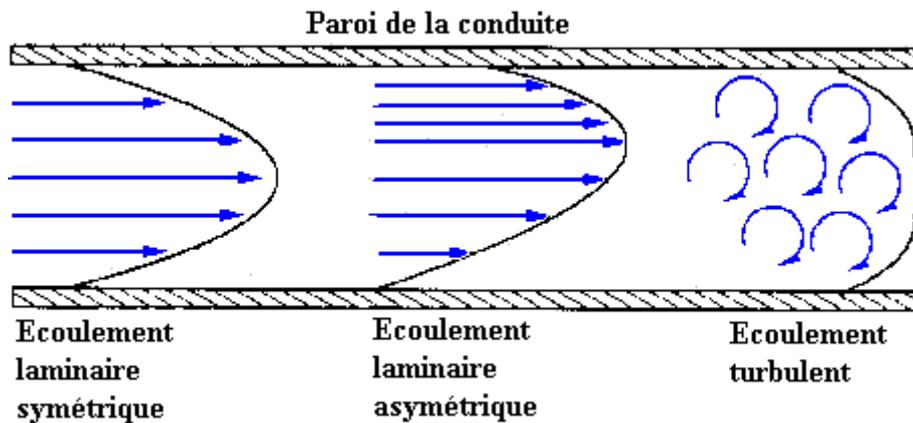
(température = constante), un seul paramètre sans dimension est suffisant pour caractériser l'écoulement, c'est le nombre de REYNOLDS.

$$R = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

- $V$  : vitesse moyenne de débit en m/s
- $D$  : diamètre de la canalisation en mètre
- $\nu$  : viscosité cinématique du fluide en  $\text{m}^2/\text{s}$  (eau douce  $\nu = 1,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
- $\mu$  : viscosité dynamique du fluide en poise (1 centipoise = 1 millipascal.seconde)
- La viscosité cinématique du fluide est :  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

Dans une conduite de section circulaire :

- si  $R < 2000$ , l'écoulement est laminaire.
- si  $2000 < R < 4000$ , le régime est incertain, mais, s'il est turbulent à un certain instant, alors, il le restera.
- Si  $R > 4000$ , le régime est turbulent.



### I.8.5 .Facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans les conduites.

Les principaux facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans une conduite sont les suivants :

- Vitesse du fluide
  - Frottement du fluide en contact avec la conduite
  - Viscosité du fluide
  - Masse volumique du fluide
- Ø Vitesse du fluide : elle dépend de la charge qui force le fluide à traverser la conduite. Plus la charge est élevée, plus le débit de fluide est important et, par conséquent, plus le volume d'écoulement est important. Le diamètre de la conduite influe également sur le débit.
- Ø Frottement de la conduite : il réduit le débit du fluide dans les tuyaux et la vitesse du fluide est plus lente près des parois de la conduite qu'au centre. Il est donc considéré comme un facteur négatif. Plus la conduite est lisse, de grand diamètre, les frottements ont d'effet moins sur la vitesse du débit du fluide.
- Ø Viscosité dynamique du fluide : elle réduit, tout comme le frottement, le débit du fluide près des parois de la conduite. Elle augmente ou diminue en fonction des variations de température.
- Ø Masse volumique du fluide : elle influe également sur le débit, car un fluide plus dense exige une charge supérieure pour maintenir le débit souhaité.

### I. 8.6 Mesure de débit

#### I.8.6.1. Mesure des débits volumiques des fluides

Différentes méthodes sont utilisées pour mesurer le débit d'un fluide :

- Ø Par mesure de la vitesse de fluide.
- Ø Par mesure de pression différentielle à l'aide d'organes déprimogènes.
- Ø Par débitmètre à section variable.
- Ø Par mesure de pression dynamique.
- Ø Par compteur volumétriques.

I.8.6.1.1. Par mesure de la vitesse de fluide.

▼ Débitmètre électromagnétique

Un champ magnétique est créé par deux enroulements inducteurs placés de part et d'autre d'un même diamètre de la canalisation. Quand un conducteur rectiligne se déplace dans ce champ magnétique, une force électromotrice **f.e.m** est induite dans ce conducteur. Cette force électromotrice est proportionnelle au flux coupé par unité de temps donc à la vitesse de déplacement du fluide. Pendant la durée **dt**, le mouvement de translation dans un champ d'induction  $\vec{B}$  d'un segment conducteur de longueur  $\ell$  faisant un angle  $\theta$  avec la vitesse de fluide.

On peut écrire :

-La section coupée :  $d\vec{S}_c = \vec{\ell} \wedge \vec{U} dt$

-Le flux coupé :  $d\vec{\varphi}_c = \vec{B} \cdot d\vec{S}_c$

-La f.e.m induite :  $e = \frac{d\varphi_c}{dt} = \vec{B} \cdot (\vec{U} \wedge \vec{\ell})$

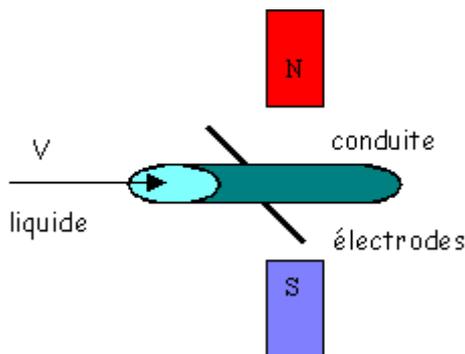


Figure 1.4 Schéma de débitmètre électromagnétique.

La force électromotrice mesurée est proportionnelle à la vitesse moyenne du liquide, donc au débit volumique du liquide.

- domaine d'utilisation : cette technique de mesure est appliquée à tout liquide conducteur d'électricité ce qui n'est pas le cas des hydrocarbures.
- diamètre de canalisations : 3 mm à 3 m.
- bonne précision de l'ordre de 1 %.

- mesure ne dépendant pas des caractéristiques physique du liquide (viscosité, densité, granulométrie) et possible à haute température (450 °C) et haute pression (1000 bars).

### ▼ Débitmètre à ultrason

Un émetteur et un récepteur sont montés en opposition de manière à ce que les ondes acoustiques allant de l'un à l'autre soient à 45 ° par rapport au sens d'écoulement dans la conduite. La vitesse du son allant de l'émetteur au récepteur constitue la vitesse intrinsèque du son, plus un apport dû à la vitesse du fluide. La mesure du temps  $t$  mis par le signal pour parcourir la distance  $L$  permet de connaître la vitesse du fluide et d'en déduire le débit.

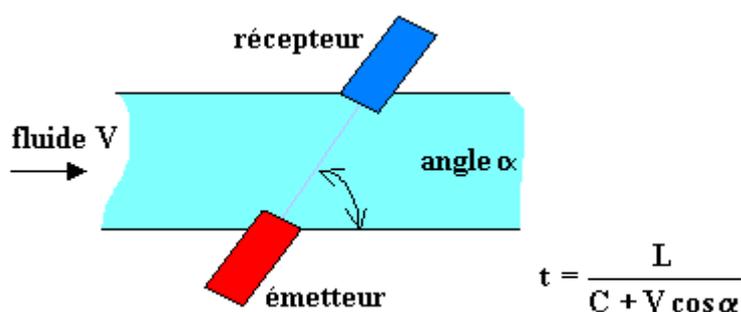


Figure I.5 Schéma de débitmètre à ultrason.

$C$  : vitesse de propagation du son dans le fluide,  $V$  : vitesse du fluide,  $L$  : distance entre émetteur et récepteur.

Il est primordial que le fluide ne véhicule pas de gaz ou de solides, pour éviter la dispersion des ondes acoustiques entre les deux transducteurs. L'ensemble du dispositif, à l'extérieur de la conduite, est insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge.

- domaine d'utilisation : fréquemment utilisé pour les écoulements turbulents, pour les fluides non conducteurs (notamment hydrocarbures), là où les débitmètres électromagnétiques ne conviennent pas.
- diamètre de canalisations : généralement important (6000 mm).
- précision : peut atteindre 0,5 %.
- temps de réponse très rapide, jusqu'à 1 ms.

### I.8.6.1.2. Par mesure de pression différentielle

- **Diaphragme**

Il s'agit d'un disque percé en son centre, réalisé dans le matériau compatible avec le liquide utilisé. Le diaphragme concentrique comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre de celui-ci. Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. C'est le dispositif le plus simple, le moins encombrant et le moins coûteux.

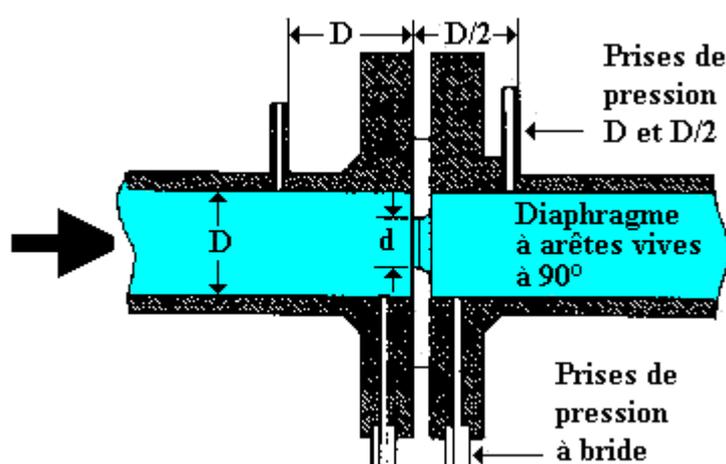


Figure I.7 Schéma de diaphragme

- domaine d'utilisation : ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme. Il introduit une perte de charge importante.
- diamètre de canalisation : tous diamètres disponibles.
- précision : 2 à 5 %.

### I.8.6.1.3. Par débitmètre à section variable

- **Rotamètre**

Il est constitué d'un petit flotteur placé dans un tube conique vertical. Le flotteur est en équilibre sous triple action de :

- son poids (m.g).
- de la force de poussée d'Archimède ( $\rho \cdot g \cdot \text{volume du flotteur}$ ).
- de la poussée du liquide:  $\rho \frac{Sc \cdot V^2}{2}$ .

m: masse du flotteur en kg.

g : accélération de la pesanteur 9,81 m/s<sup>2</sup>.

$\rho$ : masse volumique du liquide en kg/m<sup>3</sup>

V : vitesse du fluide en m/s

S : surface du flotteur en m<sup>2</sup>

C : coefficient de traînée du flotteur (sans unité)

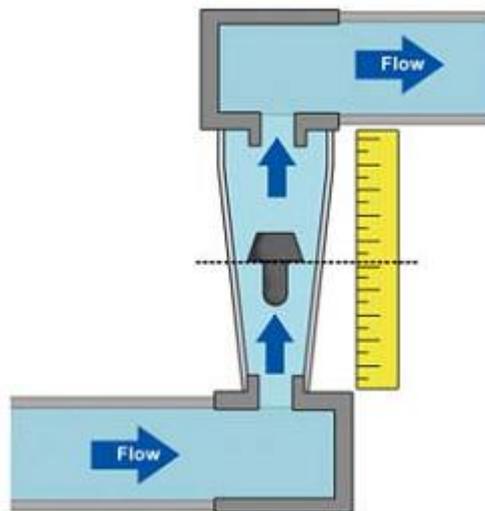


Figure I.8.Schéma de rotamètre

Le diamètre du tube en verre étant plus grand en haut qu'en bas, le flotteur reste en suspension au point où la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure équilibre le poids. Une encoche dans le flotteur le fait tourner sur lui-même et stabilise sa position. Le repérage de la position du flotteur se fait par lecture directe sur le tube en verre qui est muni de graduations ou par l'intermédiaire d'un couplage optique ou magnétique entre

le flotteur et l'extrémité du tube. Il introduit une perte de charge qui est fonction du débit et doit être étalonné dans ses conditions d'emploi.

- domaine d'utilisation : Il ne tolère pas de haute pression (20 bars au maximum pour les modèles en verre). Souvent utilisés pour les débits de purge.
- diamètre de canalisation : 4 à 125 mm.
- précision : 2 à 10 % de l'étendue de mesure.

### I.8.6.1.4. Par mesure de pression dynamique

- **Tube de PITOT**

La méthode consiste à utiliser deux tubes qui mesurent la pression en des endroits différents à l'intérieur de la canalisation. Ces tubes peuvent être montés séparément dans la conduite ou ensemble dans un seul boîtier.

L'un des tubes mesure la pression d'arrêt  $P_D$  (ou pression dynamique) en un point de l'écoulement.

$$P_D = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Le second tube mesure uniquement la pression statique  $P_S$ , généralement sur la paroi de la conduite.

On a la pression totale :

$$P_T = P_S + P_D$$

La pression différentielle mesurée de part et d'autre du tube de PITOT est proportionnelle au carré de la vitesse.

$$\Delta P = P_D = \frac{1}{2} \rho V^2$$

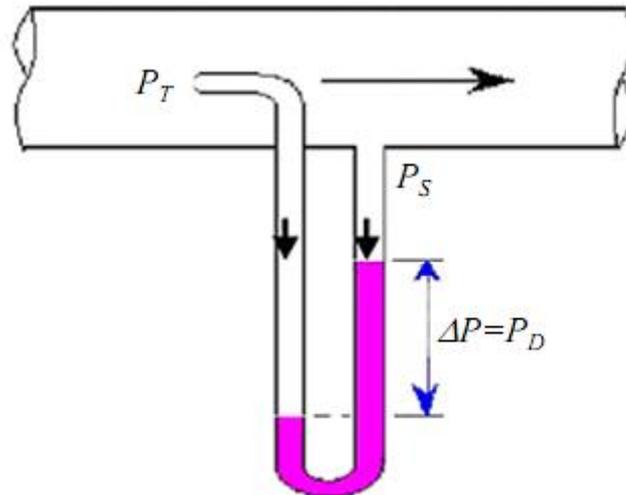


Figure I.9 Schéma du tube Pitot

- domaine d'utilisation : pour les liquides propres ou visqueux, la mesure de débit de gaz, la variation de la vitesse d'écoulement entre la moyenne et le centre n'étant pas aussi importante qu'avec les autres fluides. Ils sont facilement bouchés par des corps étrangers présents dans le fluide.
- diamètre de canalisation : à partir de 300 mm et jusqu'à 3,8 m.
- précision : 1 à 2 % de la valeur réelle.

### I.8.6. 2. Mesure des débits massiques des fluides

- **Débitmètre massique thermique**

Le principe est basé sur la mesure des transferts caloriques par le fluide lui-même. Ces dispositifs sont constitués d'un tube métallique à paroi mince, des résistances chauffantes sont bobinées à l'extérieur du tube, la circulation du fluide provoque un déséquilibre thermique entre l'amont et l'aval du tube, le déséquilibre est proportionnel au débit massique.

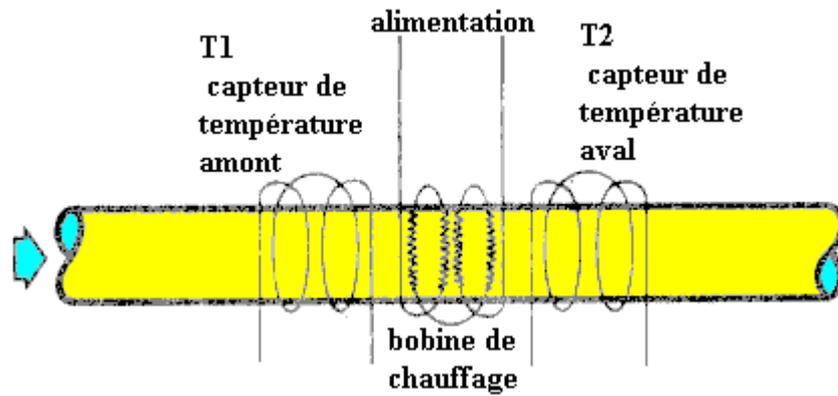


Figure I.10 Schéma de débitmètre massique thermique.

- domaine d'utilisation : liquide propre, gaz, vapeur
- diamètre de canalisation : tous diamètres
- précision : de l'ordre de 1 %.

#### **I.9-Conclusion :**

La mécanique des fluides à un domaine d'application très vaste et très divers et cette diversité entraîne une grande variété dans l'instrumentation et dans les méthodes de mesure.

Parmi ces méthodes celles qui se basent sur les échanges thermiques entre le fluide et le capteur, c'est le principe de l'anémométrie.

# Chapitre II: l'anémomètre à fil chau

## II.1 .Introduction

L'anémométrie est une technique de mesure de la vitesse des fluides. Malgré les progrès récents des techniques optiques pour la mesure de débit, l'anémomètre à fil chaud est toujours un excellent instrument indispensable dans la métrologie des flux.

## II.3.Les différents types d'anémomètres

Il existe plusieurs types d'anémomètre :

- Ø L'anémomètre à coupelle.
- Ø L'anémomètre à hélice.
- Ø L'anémomètre à laser.
- Ø L'anémomètre à plaque.

### II.3.1. Anémomètre à coupelle

L'anémomètre à coupelle, constitué de trois ou quatre demi-sphères, leur principe de fonctionnement est simplissime: Le vent s'engouffrant dans les coupelles fait tourner l'anémomètre autour de son axe dont la vitesse de rotation est directement proportionnelle à la vitesse du vent.

### II.3.2.Anémomètre à hélice:

L'axe de l'anémomètre à hélice est placé parallèlement à la vitesse de l'écoulement .Dans le cas où on néglige les frottements, on peut estimer que l'hélice se visse, en quelque sorte, dans l'écoulement ; on aurait alors une relation de la forme :

$$U=h.N$$

U : la vitesse de l'écoulement.

N : le nombre de tours par seconde de l'hélice.

h : une constante.

Parmi les types d'anémomètres moins courants, on trouve des anémomètres constitués de deux hélices tournant autour de deux axes fixes, horizontaux et perpendiculaires. On calcule la force et la direction du vent en corrélant les vitesses de rotation des deux hélices. C'est également le cas sur les éoliennes.

### II.3.3.Anémomètre à laser

Principe de fonctionnement :

Deux faisceaux issus d'un laser sont focalisés sur un même volume ( $0.1 \text{ mm}^3$ ) de fluide où il y a formation de franges d'interférence ; l'expression de l'interfrange d est :

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière et  $\theta$  l'angle formé par les deux faisceaux.

Si des particules entraînées par l'écoulement traversent la zone d'interférence, elles franchissent tour à tour des régions éclairées et des régions obscures ; la lumière qu'elles diffusent et qui est reçue par un capteur optique est donc modulée à une fréquence  $f_d$ , fonction de la vitesse des particules et de la valeur de l'interfrange :

$$f_d = \frac{U}{d} = \left( \frac{2U}{\lambda} \right) \sin \frac{\theta}{2}$$

U étant la composante de la vitesse du fluide perpendiculaire aux franges .la fréquence  $f_d$  est fonction linéaire de la vitesse U dont les valeurs mesurables par cette méthode sont généralement comprises entre  $10^{-3}$  m/s et  $10^3$  m/s.

### II.3.4. Anémomètre à plaque

Le plus simple des anémomètres de ce type consiste en une plaque carrée ou circulaire maintenue en face du vent par une girouette. On mesure la force exercée par le vent sur la plaque. Les instruments de ce type sont très précis pour les vents faibles ou lors de variations lentes de celui-ci.

## II. 4. Étude d'anémomètre à fil chaud

### II.4.1-Définition

Le Fil chaud est un capteur passif sert à mesure la vitesse de l'écoulement d'un fluide.la variation de la vitesse est déduite de la variation de résistance due au refroidissement du filament par le fluide.

Il est constitué d'un fin fil d'environ 1 mm de long, de 1 à 10  $\mu\text{m}$  de diamètre, tendu entre deux broches. Les mesures sont effectuées le plus souvent dans l'air (pour des vitesses de 0,1 m/s à plusieurs centaines de m/s), mais aussi dans l'eau et plus généralement dans tous les fluides. Divers compromis entre résistivité, conductivité thermique et robustesse mécanique conduisent à privilégier pour le fil des matériaux comme le tungstène, le platine ou certains alliages.

### II.4.2 Le principe de l'anémomètre à fil chaud

Le fil chaud est un capteur de mesure de la vitesse de l'écoulement d'un fluide. Ce fil chauffé est placé dans un écoulement, à l'équilibre, la puissance électrique  $P$  nécessaire pour le chauffer à une température  $T$  supérieure à la température du fluide est égale à la quantité de chaleur  $Q$  dissipée dans l'écoulement.

#### ▼ Plusieurs effets contribuent à la dissipation de cette chaleur :

- **Conduction vers le fluide**, due à la diffusion moléculaire de la chaleur dans le fluide.
- **Convection vers le fluide**, où la chaleur est transportée par le mouvement du fluide environnant.
- **Conduction vers les supports**, due à la diffusion de la chaleur le long du fil.
- **Rayonnement thermique** : puissance transférée sous forme de rayonnement électromagnétique (c'est le principe de fonctionnement d'une ampoule électrique).

La quantité de chaleur transférée du fil au fluide est alors fonction des paramètres suivants :

- Ø vitesse du fluide, écart de température entre le fluide et le fil, propriétés physiques du fil, orientation, dimensions de ce dernier, nature et propriétés du fluide considéré.
- Ø La température d'équilibre du fil qui constitue le capteur est déterminée par la mesure de sa résistance : elle est fonction de la puissance joule dissipée et de la vitesse de fluide qu'il s'agit de déterminer.
- Ø Le métal utilisé pour la réalisation de capteur doit avoir un coefficient de température de la résistance élevé ; dans les gaz on utilise un fil de platine ou de tungstène très fin ( $0.6\mu\text{m} < d < 10\mu\text{m}$ ), dans les liquides, pour des raisons de solidité, le capteur est un film mince de platine, déposé sur un cône ou un cylindre isolant et gainé de quartz.

Le principe de mesure est basé sur les phénomènes physiques suivants :

- Ø effet joule : l'échauffement du fil due à la résistance électrique du fil. On a donc une relation entre le courant qui passe dans le fil et la quantité de chaleur dissipée.
- Ø la variation de résistance du matériau constituant le fil en fonction de la température.

∅ le transfert thermique par convection entre le fil et le fluide qui est une fonction de la vitesse du fluide et de la température à la surface.

### II.4.3 Bilan de puissance

On considère un fil de longueur  $l$  et de diamètre  $d$  (fig. II.4.2.1), tel que le rapport d'aspect  $l/d$  soit très grand. On fait circuler dans ce fil de résistance  $R_\omega$  ( $\omega$  pour wire) un courant d'intensité  $I$ .

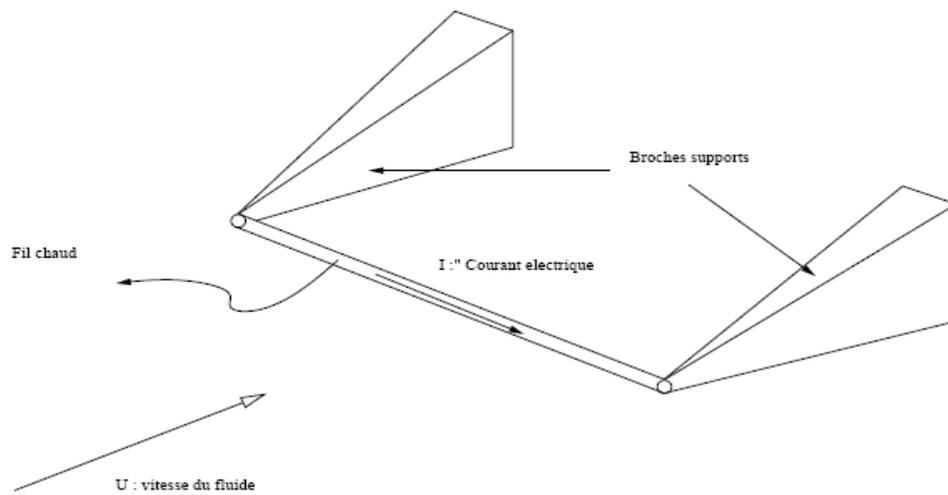


Figure II.1

En notant  $E$  l'énergie stockée sous forme de chaleur dans le fil, on peut écrire le bilan de puissance :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d\omega}{dt} - \frac{dQ}{dt}$$

Où :  $d\omega/dt = R_\omega I^2 > 0$  la puissance apportée par effet Joule

$dQ/dt > 0$  la chaleur transférée depuis le fil vers l'extérieur (fig. 1.3).

Le fil sera ainsi porté à une température  $T_\omega$ , supérieure (d'environ  $100^\circ\text{C}$ ) à la température du fluide environnant  $T_0$  (supposée constante). La couche limite thermique autour du fil ;

$T_f = (T_\omega + T_0)/2$  est la température du fil fluide chaud.

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.

Reste à modéliser les deux premiers effets : conduction et convection vers le fluide.

**Rappel sur les lois newton de Fourier :**

**Transfert par convection; loi de Newton**

Il se fait avec transfert de matière dans un fluide initialement (ou maintenu) hors équilibre.

Dans de nombreux cas, au transfert de chaleur convectif s'ajoute un transfert conductif.

Au niveau de la paroi de la canalisation dans laquelle s'écoule le fluide: on parle alors de couplage conducto-convectif. Le flux thermique surfacique, noté  $j_{cc}$  (c'est-à-dire la chaleur transférée par unité de temps et par unité de surface) peut dans de nombreux cas être décrit par la loi dite de Newton\_:

$$j_{cc} = h(T_{pario} - T_{Fluide})$$

Où  $h$  est un coefficient empirique appelé coefficient de transfert convectif. Son unité est  $W.m^{-2}.K^{-2}$ .

**Transfert par conduction; loi de Fourier.**

Contrairement à la convection, la conduction se fait sans mouvement macroscopique de matière: c'est donc le mode de transfert d'énergie prépondérant dans les solides.

La conduction correspond à un mode de transfert d'énergie interne. Elle se produit dans un milieu hors équilibre. Le maintien de ce déséquilibre, ou le retour à l'équilibre se traduit par un flux thermique (ou flux de chaleur) émis des régions chaudes vers les régions froides.

Au flux thermique  $\phi$  (chaleur transférée par unité de temps à travers une surface  $dS$ ), on associe un vecteur noté  $\vec{J}_Q$  appelé vecteur densité de flux (ou de courant) thermique (ici d'origine conductif), dont la norme représente le flux thermique surfacique, en  $W.m^{-2}$ .

La Puissance thermique transférée par conduction s'écrit :  $\phi = \iint \vec{J}_Q \cdot \vec{dS}$

La loi de Fourier se traduit par la relation:

$$\vec{J}_Q = -k_f \overrightarrow{\text{grad}} T$$

$k_f$ : est toujours positif, représente la conductivité thermique du matériau. Son unité est  $W.m^{-1}.K^{-1}$ .

Le signe moins dans la loi de Fourier traduit l'orientation de  $\vec{JQ}$  vers les basses températures.

Dans notre cas (l'anémomètre à fil chaud). La puissance dissipée par le fil est le flux de chaleur :  $\vec{JQ} = -k_f \vec{\text{grad}}$  (Loi de Fourier). Elle est intégrée sur la surface du fil  $A = \pi.d.l$ .

Cette puissance ne devra dépendre après intégration que de la différence caractéristique de température,  $T_\omega - T_0$ .

En introduisant le coefficient de transfert  $h$  (en  $W. m^{-2}.K^{-1}$ ), on peut écrire cette puissance par unité de surface

$$\frac{dQ}{dt} = A. h(T_\omega - T_0) \quad (1.2)$$

$h$  : représente la puissance par unité de surface transférée pour une différence de température donnée. On adimensionne ce coefficient de transfert en introduisant le nombre de Nusselt  $Nu$  :

$$Nu = hd/k_f$$

En remplaçant les expressions de  $Nu$  et  $A$  dans (1.2), on obtient finalement :

$$\frac{dQ}{dt} = \pi l k_f (T_\omega - T_0) Nu$$

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.

Le bilan de puissance (1.1) s'écrit ainsi

$$dE/dt = R_\omega I^2 - \pi l k_f (T_\omega - T_0) Nu$$

L'énergie  $E$  stockée dans le fil peut s'écrire en fonction de la température  $T_\omega$  du fil :

$$\frac{dE}{dt} = mcd \frac{dT_\omega}{dt}$$

Où  $m$  est la masse du fil et  $C$  sa capacité calorifique. La température du fil peut varier, cependant nous supposons dans la suite  $T_\omega$  comme indépendant du temps, soit  $dE/dt = 0$ .

Notre bilan de puissance devient alors :

$$R_\omega I^2 = \pi l k_f (T_\omega - T_0) Nu \quad (1,3)$$

**Application :**

Calculons l'ordre de grandeur de chacun des termes de l'équation (1.3). En fonctionnement usuel dans l'air.

A l'équilibre on a :  $\frac{dE}{dt} = 0$

On a pour:

La valeur de la résistance  $R_\omega = 100 \Omega$ , l'intensité du courant  $I = 0,05 \text{ A}$ ,

La tension aux bornes du fil est :  $R_\omega I = 5 \text{ V}$  et la puissance dissipée  $R_\omega I^2 = 0,25 \text{ W}$ .

Avec  $l = 1 \text{ mm}$  et  $k_f = 0,02 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$  (air à température ambiante) et pour

$T_\omega - T_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , on obtient  $Nu = 10$  le transfert par convection est environ 10 fois plus efficace que par conduction pure.

**II .4.4 Relation fondamentale de l'anémométrie : la Loi de King**

**II.4.4.1 Transfert de chaleur :**

Tout le problème de l'anémométrie à fil chaud est maintenant de déterminer la loi de transfert de chaleur  $Nu$  en fonction de la vitesse  $U$ , c'est-à-dire du nombre de Reynolds  $Re_\omega$  basé sur le fil :

$$Re_\omega = U.d/v_f$$

Dans notre cas,  $Nu$  est fonction de  $Re_\omega$  uniquement. A vrai dire cette relation n'existe pas car le nombre de Nusselt  $Nu$  dépende d'autres paramètres tels que nombre de Prandtl, rapport d'aspect  $l/d$ .

King (1914) propose la loi :

$$Nu = 1 + \sqrt{2\pi Re_\omega} \quad (1.4)$$

Le résultat remarquable de (1.4) est la variation en  $Re_\omega^{1/2}$ , propre aux transferts de chaleur en écoulement laminaire.

**Application :**

Dans le cas d'un fil de diamètre  $d = 5 \mu\text{m}$ , avec  $U = 10 \text{ m/s}$  dans l'air

( $v_f = 15.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), le nombre de Reynolds est de  $Re_\omega = 3$  : l'écoulement autour du fil peut bien être considéré comme laminaire (l'écoulement lui-même peut évidemment être turbulent à plus grande échelle, mais le fil est si petit qu'à l'échelle de son diamètre l'écoulement est bien laminaire).

Il existe bien d'autres lois que (1.4), on a par exemple une des lois les plus utilisées est la loi de Kramers, qui fait intervenir le nombre de Prandtl :

$$Nu = 0.42Pr^{1/5} + 0.57\sqrt{Re_\omega} Pr^{1/3} \quad (1.5)$$

(Rappelons que  $Pr = 0.7$  pour l'air et  $Pr = 6$  pour l'eau). D'une manière générale, nous pourrions écrire notre loi de transfert sous la forme :

$$Nu = a_0 + b_0\sqrt{Re_\omega} \quad (1.6)$$

Où les coefficients sans dimension  $a_0$  et  $b_0$  peuvent dépendre de tout, sauf évidemment de la vitesse  $U$ .

#### II.4.4.2 Dépendance de capteur en fonction de la température :

Reprenons notre bilan de puissance (1.3) avec la loi de transfert (1.6)

$$R_\omega I^2 = \pi l k_f (T_\omega - T_0) (a_0 + b_0\sqrt{Re_\omega}) \quad (1.7)$$

Pour les matériaux généralement utilisés, on peut écrire une dépendance linéaire de la résistance avec la température :  $R_\omega(T_\omega) = R_0(1 + \alpha(T_\omega - T_0))$

Où le paramètre  $\alpha = \frac{1}{R_\omega} \frac{\partial R_\omega}{\partial T}$

#### Application :

Pour une résistance en platine de valeur de  $100 \Omega$  à une température de  $20^\circ\text{C}$

Si on augmente la température de  $20$  à  $40^\circ\text{C}$  fait passer la résistance de  $100 \Omega$  à  $100(1 + 20\alpha) = 110 \Omega$ . Les paramètres  $R_0$  et  $T_0$  sont des références arbitraires, mais il est évidemment judicieux de choisir  $T_0$  comme la température du fluide et  $R_0 = R_\omega(T_0)$  la résistance correspondante en l'absence de chauffage.

En reportant  $T_\omega - T_0 = (R_\omega - R_0)/\alpha R_0$  dans (1.7), on obtient la relation fondamentale de l'anémométrie, ou loi de King :

$$\frac{R_\omega I^2}{R_\omega - R_0} = a + b\sqrt{U} \quad (1.8)$$

Avec :

$$a = \frac{\pi l k}{\alpha R_0} a_0 \quad \text{et} \quad b = \frac{\pi l k}{\alpha R_0} b_0 \sqrt{d/v_f}$$

Maintenant nous avons la relation entre le membre de droite  $a+b\sqrt{U}$  et la tension mesurée  $e = R_\omega I$ ,

∅ Deux stratégies s'offrent maintenant à nous :

- ✓ Garder le courant  $I$  constant et mesurer  $U$  à travers les fluctuations de  $R_\omega$  uniquement, C'est l'Anémométrie à Courant Constant (CCA) — obsolète aujourd'hui.
- ✓ Garder la résistance  $R_\omega$  constante, et donc la température du fil  $T_\omega$  constante, et mesurer  $U$  à travers les fluctuations de  $I$ , c'est l'Anémométrie à Température Constante (CTA).

## II.5. conditionnement de capteur

Nous allons dans le paragraphe suivant décrire brièvement les deux circuits électroniques correspondant à chacune de deux stratégies, en insistant sur la seconde (CTA) qui est la plus répandue.

### II.5.1 Anémométrie à Courant Constant (CCA)

La première stratégie, la plus simple, consiste à mesurer les fluctuations de  $R_\omega$  à  $I$  constant.

Les fluctuations temporelles de vitesse induisent des fluctuations de la résistance de fil, que l'on peut écrire sous la forme :

$$R_\omega(t) = \overline{R_\omega} + \delta R_\omega(t).$$

Afin d'obtenir une mesure précise des fluctuations  $\delta R_\omega(t)$ , il est judicieux de retrancher la valeur moyenne  $\overline{R_\omega}$ . Ceci s'effectue au moyen d'un montage électronique, le pont de Wheatstone, représenté en figure. II.5.1. Dans ce circuit, les deux branches sont équilibrées en moyenne, (on règle la résistance d'équilibre  $R_{eq} = \overline{R_\omega}$ ), et reçoivent donc chacune un courant

$I = I_0/2$ , où  $I_0$  = constante est le courant d'alimentation du pont, la tension mesurée  $\delta e$  est donc nulle.

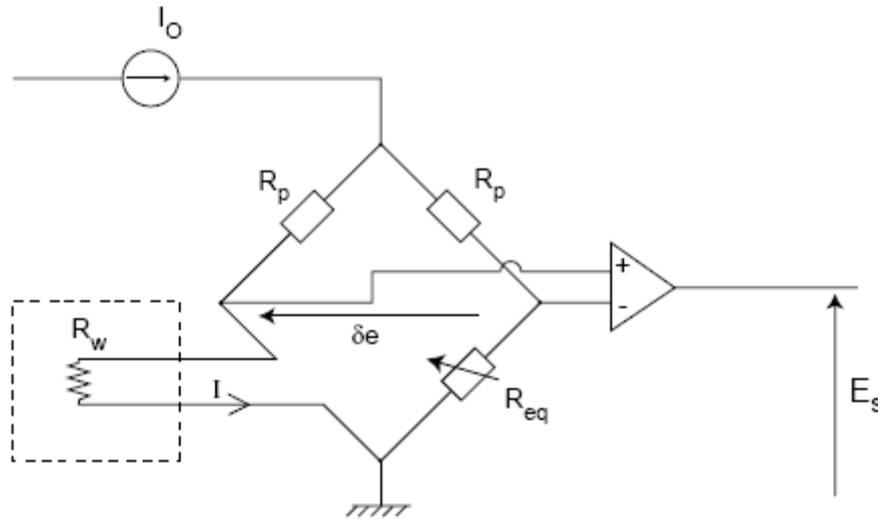


Figure II.1. Circuit électronique utilisé en anémométrie à courant constant.

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

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

L'avantage de cette méthode est que  $\delta e$  est nul en moyenne, et peut donc être amplifié ( $E_s = G\delta e$ , ou  $G = 10^3$  est le gain de l'amplificateur) afin d'optimiser le rapport signal /bruit.

Cette méthode a été très employée jusque dans les années 1960, où elle a été supplantée par l'anémométrie à température constante, de réalisation plus compliquée de principe plus naturel.

Le principal défaut de la CCA tient dans le fait que la température de fil  $T_w$  fluctue. Or, le bilan de puissance a été obtenu avec l'hypothèse de stationnarité  $T_w = cste$ , qui n'est donc pas respectée dans ce cas. Ce bilan peut toutefois rester valide à condition que le temps caractéristique de mise à l'équilibre de la température soit petit comparé au temps typique des fluctuations. En pratique, ce temps n'est pas négligeable, et ne permet des mesures qu'à fréquence modérée, limitée typiquement à 700Hz. Au-delà, le fil chaud agira comme un filtre passe-bas, éventuellement compensable électroniquement.

Un autre problème rend les fluctuations de  $T_\omega$  peu satisfaisantes : la conductivité thermique  $k$  et la viscosité cinématique  $\nu$  sont choisies à la température du film,

$k_f = k(T_f) = k(T_\omega + T_0/2)$  et  $\nu_f = \nu(T_f)$ . bien que cette définition ne soit pas justifiée rigoureusement, il est souhaitable que cette température reste constante afin de ne pas multiplier les raisons possibles de fluctuations de transfert de chaleur.

Dans la limite d'un courant  $I$  très faible, on aura  $T_\omega = T_0$ , et la mesure de  $e = R_\omega I$  donne donc une mesure de la température du fluide  $T_0$  (c'est le principe du thermomètre à fil froid) .

### II.5.2. Anémométrie à température constante(CTA)

Les défauts de la CCA (inertie thermique et propriétés physique du fil variables) seront corrigés si l'on trouve le moyen de garder la température du fil  $T_\omega$  et donc la résistance  $R_\omega$  constante : c'est le principe de la CTA.

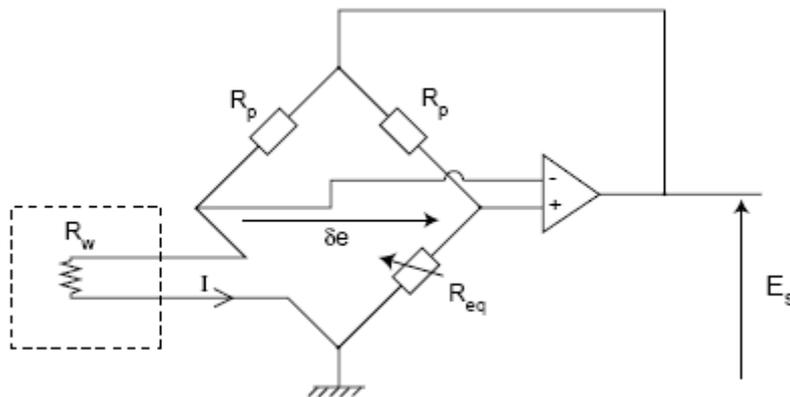


Figure II.2.Circuit électronique utilisée en anémomètre à température constante.

Dans cette seconde stratégie, c'est le courant  $I$  qui fluctue, et que l'on mesure à travers les fluctuations de la tension  $e(t) = R_\omega I(t)$ . Ainsi, l'équation fondamentale de l'anémométrie

$$(1.8) \text{ devient } e = R_\omega I = \sqrt{R_\omega (R_\omega - R_0)} (a + b\sqrt{U}) .$$

$$\text{Soit une tension de sortie : } E_s = \sqrt{a + b\sqrt{U}}$$

Les constantes  $a$  et  $b$  peuvent dépendre des nombres sans dimension mentionnée précédemment.

### Hypothèse de stationnarité

Supposons une augmentation brusque de la vitesse  $U$ , conduisant à une diminution de  $T_\omega$  et donc de  $R_\omega$ . la tension  $e=R_\omega I$  diminue. Il faut trouver un moyen d'augmenter  $I$  afin de chauffer la sonde, et ainsi rétablir  $R_\omega$  et  $T_\omega$  à leur valeur initiale. Pour cela, il faut introduire une rétroaction (feedback) négative entre la tension  $e$  et le courant  $I$ . Cette rétroaction est effectuée en bouclant la mesure du pont  $\delta e = I(R_\omega - R_0)$  sur l'alimentation du pont lui-même (voir le schéma électronique, figure. II.5.3). Ainsi la diminution de  $\delta e$  va conduire à une augmentation de courant  $I$ , et la résistance  $R_\omega$  va retrouver sa valeur initiale. la mesure de la rétroaction  $E_s = G \delta e$  (où  $G$  le gain de l'amplificateur) fournit donc le signal recherché.

Contrairement au circuit CCA, ici le pont n'est jamais à l'équilibre : la tension  $E_s$  mesure justement le déséquilibre du pont, maintenu grâce à la rétroaction. L'amplitude moyenne de ce déséquilibre est réglée au moyen de la résistance  $R_{eq} (\neq R_\omega \text{ dans ce cas})$ , permettant ainsi de choisir la température d'asservissement  $T_\omega$ .

Ces étapes de compensation sont réalisées quasi instantanément par le circuit électronique, le temps caractéristique d'équilibre du pont avec rétroaction n'est limité que par la rapidité de l'électronique, et est donc très petit devant le temps caractéristique d'équilibre thermique de la sonde. une telle boucle d'asservissement permet de mesurer des fluctuations pouvant atteindre le MHz, amplement suffisantes pour des mesures en écoulement turbulent.

### II.6. Coefficient de surchauffe

Disposant d'un anémomètre à fil chaud en fonctionnement CTA le seul paramètre sur lequel on peut jouer est la résistance d'équilibre  $R_{eq}$  du pont, ou de façon équivalente le coefficient de surchauffe :

$$\alpha = R_\omega / R_0 > 1$$

C'est ce paramètre qui permet en pratique de choisir la température  $T_\omega$  de fonctionnement :  $T_\omega = T_0 + (\alpha - 1) / \alpha$ . afin d'optimiser le rapport signal/bruit, il est évidemment avantageux de choisir  $\alpha$  suffisamment grand, tout en restant compatible avec la gamme d'amplification du circuit électronique. en pratique, un coefficient de l'ordre de 1.5 à 2 est utilisé (soit une surchauffe  $T_\omega - T_0$  de l'ordre de 100 à 200 °C).

Certaines applications particulières nécessitent cependant des précautions liées aux propriétés du fluide .pour des mesures dans l'eau par exemple ,on prendra soin de ne pas avoir  $T_w > 100^\circ\text{C}$  pour éviter la cavitation sur le fil (nucléation de bulles de vapeur ),qui affecterait grandement les transferts de chaleur .pour l'étude des fluides complexes ,pour lesquels une trop forte température altérerait les propriétés du fluide ,on doit se contenter d'une surchauffe beaucoup plus basse ,de quelques degrés seulement .

### **II.7-conclusion :**

Il existe plusieurs types d'anémomètres qui servent à mesurer la vitesse de l'air où bien d'un fluide en générale à titre d'exemple on a l'anémomètre à fil chaud.

L'anémomètre à fil chaud a deux montages de mesure :

Anémomètre à courant constant (CCA) sans la boucle de rétroaction et l'anémomètre à température constante (CTA) avec la boucle de rétroaction.

# Chapitre III: la régulation

### III.1 Introduction

Dans la plupart des appareils et installations industrielles, il est nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs bien déterminées, en dépit des variations externes ou internes influant ces grandeurs.

A cet effet, les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs PID (proportionnel intégral dérivé) car ils permettent d'améliorer à l'aide de ses trois paramètres les performances du système (stabilité, précision et la rapidité).

### III.2. Asservissement

On appelle asservissement un système asservi dont la sortie doit suivre le plus fidèlement possible la consigne (consigne variable).

Exemple: suivi de trajectoire.

### III.3. Régulation

On appelle régulation un système asservi qui doit maintenir constante la sortie conformément à la consigne (constante) indépendamment des perturbations.

Exemple: Régulation de température.

### III.4. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation

Une boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants :

#### 1. Le régulateur

Il se compose d'un comparateur qui détermine l'écart entre la consigne et la mesure et d'un correcteur qui élabore à partir du signal d'erreur l'ordre de commande.

#### 2. Actionneur

C'est l'organe d'action qui apporte l'énergie au système pour produire l'effet souhaité, il est commandé par le signal de commande provenant du régulateur.

Il agit sur la grandeur réglant du procédé pour modifier la grandeur physique à maîtriser.

#### 3. Capteur

Le capteur prélève sur le système la grandeur réglée (information physique) et la transforme en un signal compréhensible par le régulateur. La précision et la rapidité sont deux caractéristiques importantes du capteur.

La boucle de régulation est souvent complétée par : un enregistreur, des convertisseurs et

des sécurités.

### III.5. Schéma de principe d'une boucle de régulation

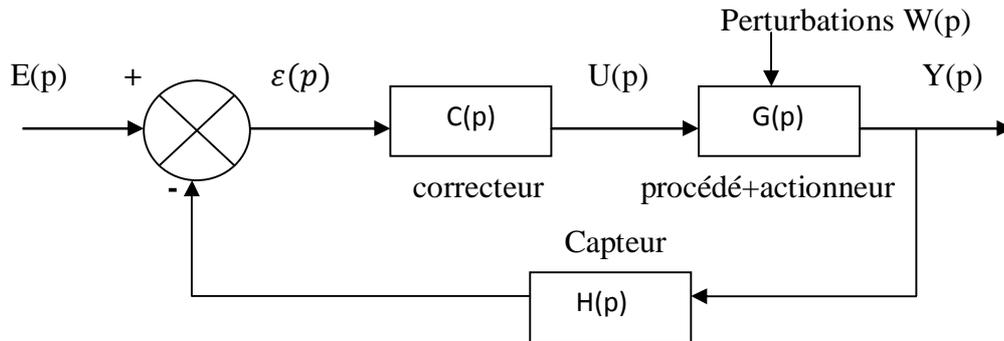


Figure III.1 Schéma de principe d'une boucle de régulation

Ø Entrée  $E(p)$ :

C'est l'action sur la quelle pouvons agir pour modifier, contrôler où bien commander l'état de système.

La consigne ( $E(p)$ ) représente le signal d'excitation du système.

Ø Sortie  $Y(p)$  :

C'est la grandeur d'observation que nous renseignent sur l'état de système.

Ø Perturbation :

On appelle perturbation tout phénomène physique intervenant sur le système qui modifie l'état de la sortie. Un système asservi doit pouvoir maintenir la sortie à son niveau indépendamment des perturbations.

Ø Écart, erreur ( $\varepsilon$ ) :

On appelle écart ou erreur, la différence entre la consigne et la sortie.

Ø  $U(p)$  :

C'est le signal de commande délivrer par le régulateur a fin de maintenir la sortie à une valeur désirée.

### III.6. Les types de contrôles

#### 1. La régulation en boucle fermée

C'est une commande asservie, on mesure une image de la grandeur physique de la sortie que l'on vient comparer à la valeur de la consigne (de l'entrée).

#### 2. Le système en boucle ouverte

Un système est en boucle ouverte lorsqu'on n'a aucune information sur la sortie, la commande en boucle ouverte est très utilisée dans les cas simples de systèmes stables avec une moindre exigence sur la sortie.

#### 3. Association de boucle de régulation

La régulation en boucle ouverte se rencontre souvent associée à une boucle fermée. Ces boucles ouvertes ont des temps de réponses très courts vis-à-vis des temps de réponses de la boucle fermée, elles permettent d'améliorer la rapidité de la boucle fermée.

Ces associations de boucles se rencontrent aussi bien dans les installations de chauffage que dans les installations de climatisation ou de froid.

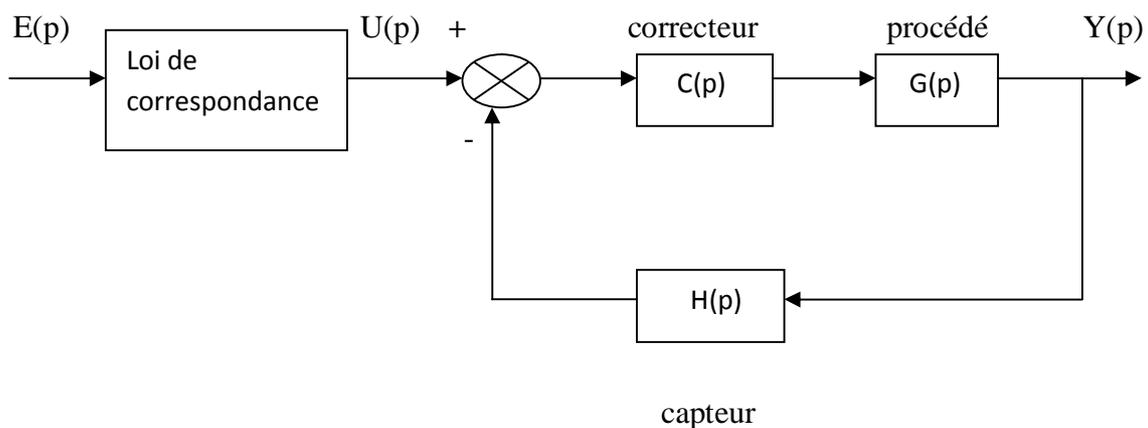


Figure III.2 .Système en boucle ouvert avec association de la boucle de régulation.

### **III.7. Comportement statique et dynamique des systèmes à régler**

#### **1. Précision**

La précision est caractérisée par l'écart entre la consigne et la sortie.

##### **- Précision statique**

On appelle précision statique, l'écart entre la sortie et l'entrée du système bouclé lorsque le système est stabilisé ( $t \rightarrow +\infty$ ).

##### **- Précision dynamique**

La précision dynamique est l'écart entre la sortie et l'entrée pendant l'évolution du signal.

##### **Ø Erreur indicielle**

Dans le cas où la consigne est constante (échelon) on définira l'erreur indicielle comme la différence entre la sortie demandée et la sortie obtenue. L'erreur peut être constante, nulle ou tendre vers l'infini.

##### **Ø Erreur de traînage**

Si la consigne est une rampe, on note erreur de traînage l'écart entre la droite de consigne et la sortie, cette erreur peut être nulle, constante ou tendre vers l'infini.

#### **2. Stabilité**

On dit qu'un système est stable si pour une entrée constante, la sortie reste constante quelles que soient les perturbations.

#### **3. Dépassement**

Le dépassement est mesuré par le taux de dépassement. On définit le premier dépassement par :

$$D_1 \% = (S(t_1) - S_\infty) / S_\infty$$

$S_\infty$  : représente la valeur finale de la sortie.

$S(t_1)$  : la valeur de la sortie au premier dépassement.

#### **4. La rapidité**

La rapidité caractérise le temps mis par le système pour que la sortie atteigne sa nouvelle valeur. On définit, pour caractériser la rapidité le temps de repense à 5%, c'est le temps mis

par le système pour atteindre sa valeur finale à 5% près.

Les systèmes asservis pouvaient présenter des défauts, une précision insuffisante, un temps de réaction trop lent, un dépassement trop important.

Si l'on souhaite améliorer les caractéristiques de précision, stabilité et la rapidité du système il est nécessaire d'introduire dans la boucle de commande un correcteur.

Les correcteurs doivent permettre de réaliser le meilleur compromis entre précision, stabilité et rapidité du système étudié.

### III.8.Principaux réseaux de correcteurs

#### III.8.1. Régulateur "tout ou rien"

##### Ø Définition

Un régulateur «tout ou rien» est un régulateur qui élabore une action de commande discontinue qui prend deux positions ou deux états 0 et 1 (ou 0 et 100%).

##### Ø Domaine d'utilisation

Les régulateurs tout ou rien sont utilisés pour la commande des systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas importante. A titre d'exemple la régulation d'un four à l'aide d'une résistance chauffante.

##### Ø Fonctionnement d'un régulateur «tout ou rien»

Dans ce type de régulateur, la commande  $U$  du correcteur agit sur un relais électromécanique à contact. Lorsque  $U=1$ , une bobine est excitée et ferme le contact du relais pour alimenter la résistance de chauffe et est désexcitée lorsque  $U=0$  (le contact s'ouvre alors).

#### III.8.2. Correcteur Proportionnel, P

##### Ø Principe

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi, il permet d'améliorer la précision.

Dans le cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée  $u(t)$  est proportionnelle à l'écart  $\varepsilon(t)$ :

$$U(t)=k_p.\varepsilon(t)$$

La fonction de transfert de correcteur est donc :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)}=k_p$$

**Ø Effet**

L'action Proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler, elle permet de vaincre les grandes inerties de système.

Afin de diminuer l'écart et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (on diminue la bande proportionnelle (BP%=1 /K<sub>p</sub>)) mais on est limité par la stabilité du système.

Le régulateur proportionnel est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante, exemple : régler le niveau dans un bac de stockage.

**III.8.3.Intégrateur pur**

**Ø principe**

Pour un intégrateur pur la loi de commande u(t) est de la forme :

$$U(t)=\frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t). dt$$

La fonction de transfert d'un correcteur pur est :

$$C(p) = 1 / T_i . P$$

Le correcteur Intégrateur est en général associé au correcteur proportionnel et la loi de commande corrigée est de la forme :

$$U(t)=k_p (\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t). dt)$$

La fonction de transfert du correcteur est donc :

$$C(p) =K_p (1+T_i.P)/T_i .p$$

**Ø Effet**

L'intérêt principal de ce correcteur est d'ajouter dans la chaîne de commande une intégration, la présence d'une intégration dans la FTBF annule l'erreur résiduelle en régime permanent donc il améliore la précision, mais malheureusement il introduit un déphasage de -90° et risque de rendre le système instable (diminution de la marge de phase).

### III.8.4.dérivateur pur

#### Ø principe

La loi de commande est de la forme :

$$u(t)=T_d d\varepsilon(t)/dt$$

La fonction de transfert est donc :

$$C(p)=T_d \cdot p$$

Ce type de correcteur est purement théorique, un système physique ne peut pas avoir un numérateur de degré supérieur au dénominateur.

Le correcteur approchant permettant d'avoir un effet dérivé est un correcteur de la forme :

$$C(p)=T_d \cdot p/1+\tau P$$

Avec  $\tau=T_d/N$  et  $N$  entier  $> 1$

#### Ø Rôle et le domaine d'utilisation :

La présence de l'action dérivée permet d'augmenter la rapidité du système. Dans l'industrie, l'action dérivée n'est jamais utilisée seule mais en général avec l'action intégrale. On recommande de l'utiliser pour le réglage des paramètres lents tels que la température. Par contre en présence des paramètres bruités, l'action dérivée est déconseillée. En effet un signal bruité ayant par exemple la fréquence du réseau (50 Hz) sera amplifiée en le dérivant.

Exemple :  $x(t)=0.1 \sin (2\pi 50t)$

$$x'(t)=0.1 * 2\pi 50 \sin (2\pi 50t)$$

### III.8.5. Correcteur proportionnel Intégrateur Dérivateur PID

#### Ø Principe

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  du correcteur PID permet d'améliorer à la fois la précision, la stabilité et la rapidité.

Ø Différentes structure de régulateur PID

✓ Structure parallèle

Equation temporelle :

$$U(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d d\varepsilon(t)/dt$$

Fonction de transfert :

$$C(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = k_p + \frac{1}{pT_i} + T_d p$$

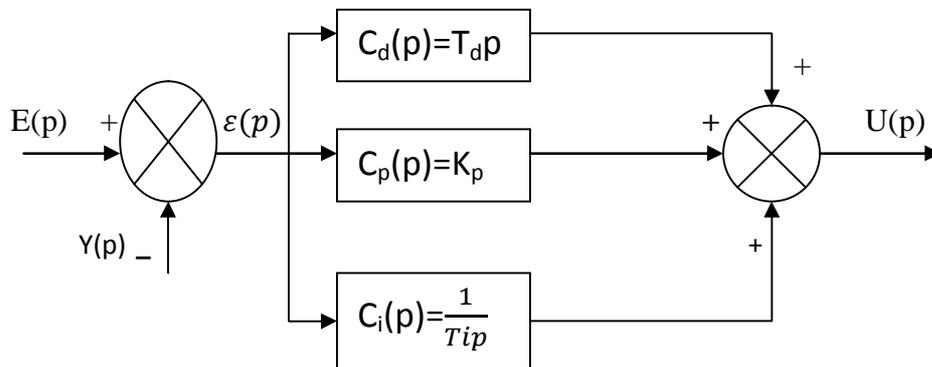


Figure III.3.régulateur PID à structure parallèle.

✓ Structure série

Equation temporelle :

$$U(t) = \alpha \cdot k_p \varepsilon(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_p T_d d\varepsilon(t)/dt$$

$$\alpha = \frac{T_i + T_d}{T_i}$$

La fonction de transfert:

$$C(P) = \frac{U(P)}{\varepsilon(P)} = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) (1 + T_d p)$$

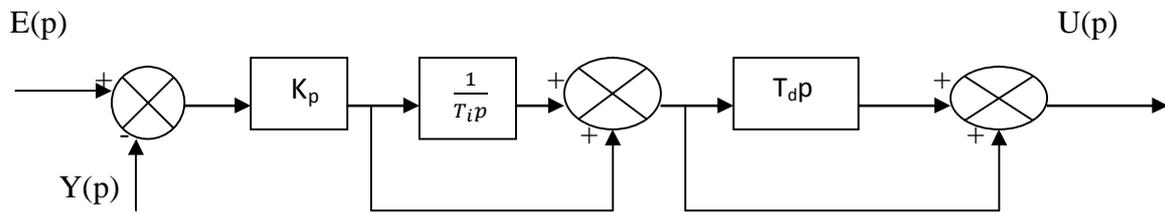


Figure III.4.régulateur PID à structure série

▼ Structure mixte

Equation temporelle :

$$U(t)=k_p \varepsilon(t)+\frac{k_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) . dt+k_p T_d d\varepsilon(t)/dt$$

Fonction de transfert:

$$C(p)=\frac{y(p)}{\varepsilon(p)}=k_p \left(1+\frac{1}{T_i p}+p T_d\right)$$

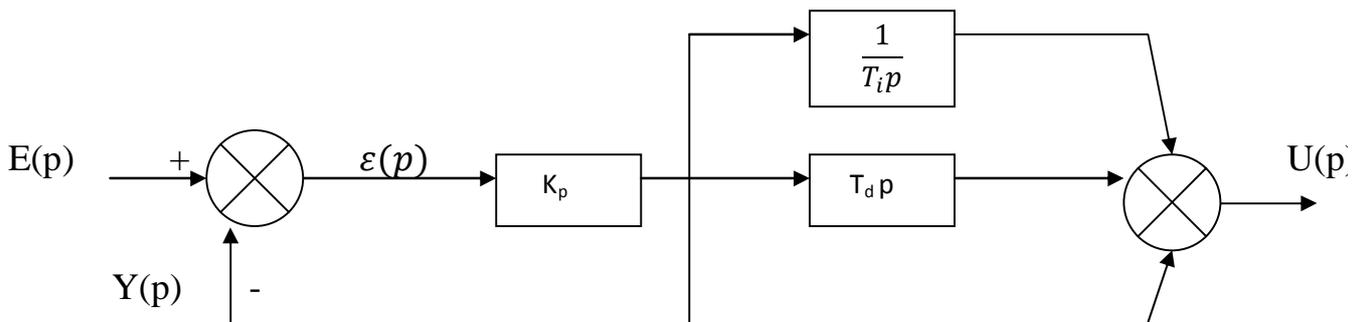


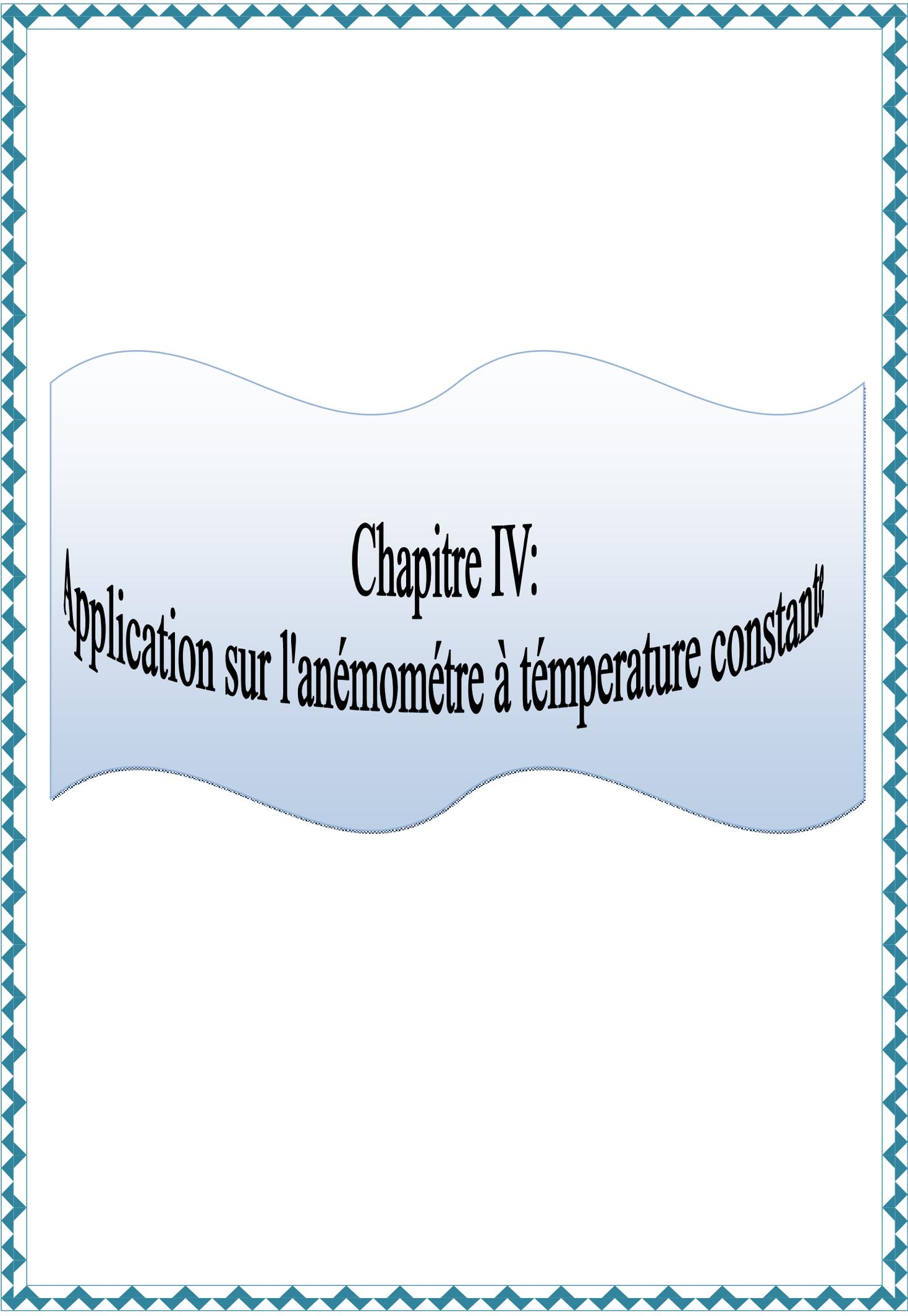
Figure III.5 régulateur PID à structure mixte

Ø Effet

Le correcteur P.I.D se comporte pour les basses fréquences comme un intégrateur donc le système sera précis d'un point de vue statique, aux hautes fréquences l'avance de phase est de +90° donc une amélioration de la stabilité.

### III.9. Conclusion

La régulation d'un système doit être suffisamment robuste pour garantir trois niveaux de performance : la stabilité, une bonne précision statique et une rapidité suffisante. Le gros problème est que ces trois critères sont contradictoires : la précision comme la rapidité sont liées au gain, mais trop de gain peut avoir un effet déstabilisant. En effet, corriger un système asservi, c'est assurer une compatibilité entre ces critères contradictoires et le correcteur sera l'élément intelligent qu'on ajoutera au système initial pour assurer cette compatibilité.



Chapitre IV:  
Application sur l'anémomètre à température constante

### IV.1 .Introduction

Dans le deuxième chapitre nous avons vu les deux types de montage de l'anémomètre à fil chaud : l'anémomètre à intensité constante et l'anémomètre à température constante. Dans ce chapitre nous représentons un schéma de réalisation d'anémomètre à fil chaud où le retour est assuré par un régulateur proportionnelle intégrale analogique.

### IV.2. Description du montage de mesure

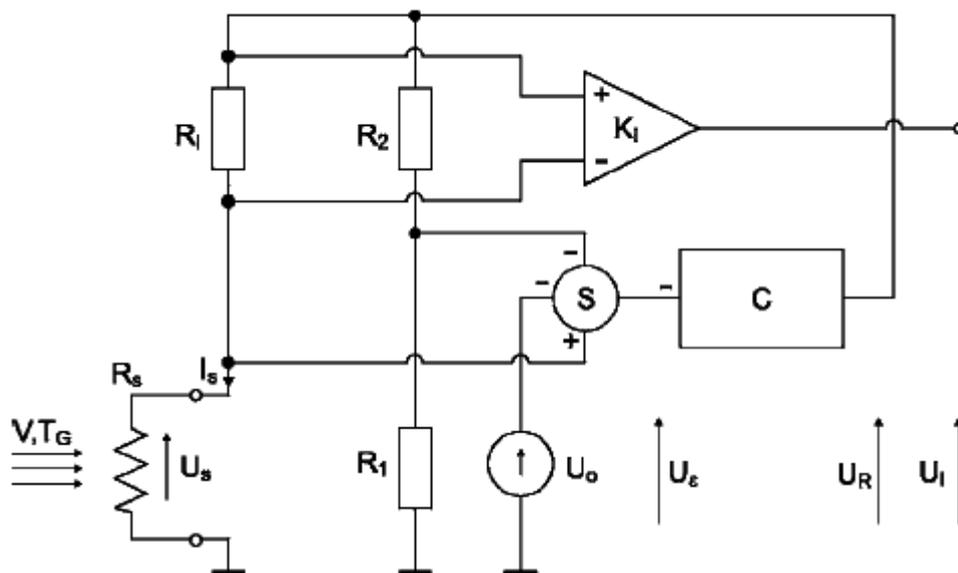


Figure .IV.1- montage de mesure d'anémomètre à température constante.

L'anémomètre à fil chaud est constitué d'un fin fil métallique en tungstène d'environ 1 mm de longueur, de  $3 \mu m$  de diamètre, et un coefficient de surchauffe  $\alpha = 3.33 * 10^{-3} K^{-1}$ . Il est Conditionné par un pont de Wheatstone. Le pont est alimenté par la sortie du régulateur.

Pour mesurer la vitesse on prélève la tension aux bornes de la résistance  $R_l$  qui est amplifiée à l'aide d'amplificateur d'instrumentation de gain  $K_i$ , cette tension est fonction du courant  $I_s$  donc de la température  $T_\omega$ .

Quand le fil est mis à un écoulement de vitesse  $V$ , on aura un signal d'erreur  $U_\varepsilon$  à l'entrée de régulateur qui délivra en sortie le signal de commande  $U_R$ . Le régulateur comporte deux actions : l'action proportionnelle qui permet d'améliorer la rapidité et l'action intégrale qui annule l'écart statique. Ce qui entraîne le maintien de la température  $T_\omega$  à une température constante.

Remarque : l'inertie thermique (temps de réponse) intervient moins dans la réponse du système grâce à ce contrôleur.

### IV.3 .Principe du fonctionnement

Le principe de l'anémomètre à fil chaud consiste à mesurer la puissance transférée depuis le fil chauffé par effet joule et refroidi par le passage de fluide. La puissance emportée par le fluide donne donc une mesure indirecte de la vitesse de l'écoulement.

Si on chauffe le fil à une température  $T_\omega$  (d'environ 100°C) et on place l'anémomètre dans un écoulement de vitesse  $\vec{V}$  et de température  $T_0$  ( $T_0 \ll T_\omega$ ), on aura la variation de la température  $T_\omega$ . Cette variation provoquera le déséquilibre du pont ( $\delta e \neq 0$ ) ce qui produit un signal d'erreur  $U_\varepsilon$  à l'entrée de régulateur. Ce dernier délivre un courant  $I$  qui passe à travers la contre réaction afin de maintenir la température du fil chaud constante.

$$\delta e = U_R \left( \frac{R_s}{R_s + R_L} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \neq 0$$

$U_R$  : C'est la tension en sortie de régulateur.

$$U_\varepsilon = \delta e - U_0$$

### IV.4-Modèle dynamique d'anémomètre à température constante

#### IV .4.1.Modèle dynamique du régulateur

Ø Rappel sur l'amplificateur opérationnel parfait (AOP)

L'AOP est un amplificateur différentiel muni de deux entrées, l'une dite non inverseuse ( $V_+$ ) et l'autre inverseuse ( $V_-$ ), et d'une sortie (s) :

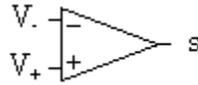


Fig. IV.4.2 Symbole d'un amplificateur différentiel.

La fonction de transfert complète en continu de cet amplificateur est donnée par la formule :

$$S = A_{vd}(V_+ - V_-) + A_{vmc} \left( \frac{V_+ + V_-}{2} \right)$$

$A_{vd}$  est le gain en tension différentiel de l'amplificateur, et  $A_{vmc}$  le gain en tension de mode commun.

On peut donner un schéma équivalent de l'AOP :

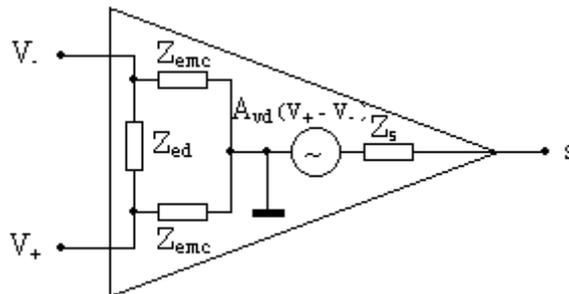


Figure IV.3. Schéma équivalent d'un AOP.

Pour que cet amplificateur soit parfait, les gains en tension doivent répondre aux caractéristiques suivantes :  $A_{vd} = \infty$  ,  $A_{vmc} = 0$

On distingue deux types d'impédances d'entrée dans un AOP : l'impédance différentielle et celles de mode commun, qui sont définies sur le schéma de la figure 2. Un ampli parfait doit répondre aux critères suivants du point de vue des impédances :

$$Z_{ed} = \infty , Z_{emc} = \infty , Z_s = 0.$$

Un amplificateur opérationnel parfait est un amplificateur de différence pur à gain différentiel infini, rejetant parfaitement le mode commun, dont les impédances d'entrées sont infinies et l'impédance de sortie est nulle, il n'a pas de tension d'offset ni de courant de polarisation. Il est polarisé symétriquement par rapport à la masse. Les tensions d'alimentation

des amplificateurs opérationnels courants peuvent varier dans une large gamme, typiquement de  $\pm 2.5V$  à  $\pm 5V$  jusqu'à  $\pm 18V$  à  $\pm 22V$ .

Ces caractéristiques traduisent le fait que l'amplificateur opérationnel parfait ne perturbe pas le signal qu'il va augmenter et que sa tension de sortie dépend seulement de la différence de tension entre ses deux entrées.

La présence d'un gain différentiel illimité implique que la moindre différence de potentiel entre les deux entrées de l'amplificateur l'amènera à saturer. Si on ne désire pas que la tension de sortie de l'amplificateur soit seulement limitée à  $\pm V_{sat}$  suivant le signe de la différence de potentiel entre les deux entrées de l'amplificateur, l'utilisation d'une contre-réaction négative est obligatoire.

L'absence de contre-réaction sur l'entrée non-inverseuse de l'AOP amènera l'amplificateur en saturation positive ou négative suivant le signal appliqué en entrée. On parle alors de mode comparateur.

Cette contre-réaction sert à soustraire une partie du signal de sortie au signal d'entrée de l'amplificateur. Grâce à cette soustraction, la contre-réaction négative sert à garder une différence de potentiel nulle en entrée de l'amplificateur. On parle alors de mode linéaire car on peut faire fluctuer la tension de sortie entre  $+$  et  $- V_{sat}$  suivant la tension appliquée en entrée.

L'AO réel présente les défauts suivants : présence d'un offset en entrée dû au fait que les transistors d'entrée ne sont pas identiques, influence de la tension de mode commun sur la tension de sortie, impédance non nulle en sortie, impédance non illimitée en entrée et variation du gain selon la fréquence.

L'amplificateur opérationnel permet de réaliser de nombreuses opérations électroniques à titre d'exemple l'intégration, dérivation, soustraction....

Le schéma suivant représente le montage de régulateur proportionnel intégral où l'amplificateur opérationnel est indiqué par les lignes discontinues utilisé dans notre système (CTA) :

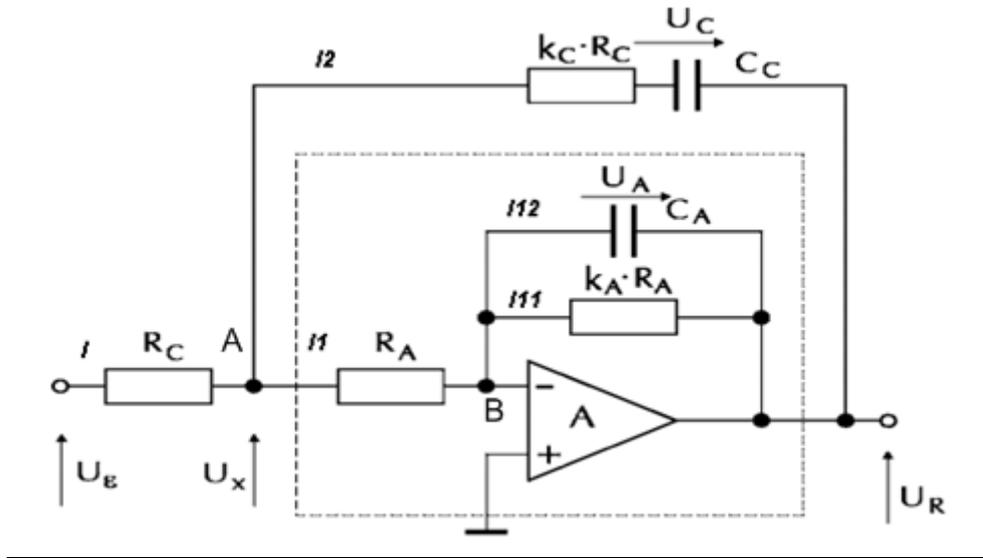


Figure IV.4. montage de correcteur proportionnel intégral.

En appliquant la loi des nœuds :

$$\sum I_{\text{Entrants}} = \sum I_{\text{Sortants}}$$

▼ **Le nœud A :**

$$I = I_1 + I_2 \Rightarrow \frac{U_\varepsilon - U_x}{R_C} = \frac{U_x - U_R + U_C}{K_C R_C} + \frac{U_x}{R_A} \quad (1)$$

$$I_2 = I_C$$

$$U_C = -\frac{1}{C} \int I_C dt \Rightarrow I_C = -C \frac{dU_C}{dt}$$

▼ **Le nœud B :**

$$I_1 = I_{11} + I_{12} \Rightarrow \frac{U_x}{R_A} = \frac{-U_R}{R_A K_A} - C_A \frac{dU_R}{dt} \quad (2)$$

$$U_A = U_R$$

$$(1) \Rightarrow U_x \left( \frac{1}{R_A} + \frac{1}{K_C R_C} + \frac{1}{R_C} \right) = \frac{U_\varepsilon}{R_C} + \frac{U_R - U_C}{K_C R_C} \quad (3)$$

$$(2) \Rightarrow U_x = \frac{-U_R}{K_A} - R_A C_A \frac{dU_R}{dt} \quad (4)$$

En remplaçant l'expression de la tension  $U_x$  dans l'équation (3) et En multipliant l'équation obtenu par  $K_A$  on obtient l'expression suivante :

$$\left(\frac{-U_R + \tau_A dU_R/dt}{K_A}\right) * \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{K_C R_C} + \frac{1}{R_C}\right) = \frac{U_\varepsilon}{R_C} + \frac{U_R - U_C}{K_C R_C} \quad (6)$$

Avec  $\tau_A = C_A R_A K_A$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{K_A R_A U_C - (K_A R_A + K_C R_C + K_C R_A + R_A) U_R - K_C K_A R_A U_\varepsilon}{\tau_A (K_C R_C + K_C R_A + R_A)} \quad (7)$$

**▼ Equation 2**

On a:  $U_X - U_R = -U_C + R_C K_C I_{C_C}$

Avec  $I_{C_C} = -C_C \frac{dU_C}{dt}$

On remplace l'expression de courant  $I_{C_C}$  on aura

$$U_X = U_R - U_C - \tau_C \frac{dU_C}{dt} \quad (8)$$

Avec  $\tau_C = C_C K_C R_C$

En appliquant la loi d'Ohm aux bornes de  $R_C$  on obtient :

$$U_\varepsilon - U_X = R_C (I_1 + I_{C_C})$$

$$U_\varepsilon - U_X = R_C \left( \frac{U_X}{R_A} - C_C \frac{dU_C}{dt} \right) \quad (9)$$

$$-U_X \left( 1 + \frac{R_C}{R_A} \right) = -R_C C_C \frac{dU_C}{dt} - U_\varepsilon \quad (10)$$

On remplace l'expression de  $U_X$  dans l'équation (10) on obtient l'expression suivante :

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{-(K_C R_C + K_C R_A) U_C + (K_C R_C + K_C R_A) U_R - K_C R_A U_\varepsilon}{\tau_C (K_C R_C + K_C R_A + R_A)} \quad (11)$$

- Le régulateur est régit par les équations différentielles suivantes qui dépendent de :

$U_C, U_R$  et  $U_\varepsilon$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_C}{dt} = \frac{-(K_C R_C + K_C R_A) U_C + (K_C R_C + K_C R_A) U_R - K_C R_A U_\varepsilon}{\tau_C (K_C R_C + K_C R_A + R_A)} \\ \frac{dU_R}{dt} = \frac{K_A R_A U_C - (K_A R_A + K_C R_C + K_C R_A + R_A) U_R - K_C K_A R_A U_\varepsilon}{\tau_A (K_C R_C + K_C R_A + R_A)} \end{array} \right.$$

Avec :

$U_C$ : La tension aux bornes de condensateur.

$U_R$ : La tension à la sortie de régulateur.

$U_\varepsilon$ : Le signal d'erreur.

**IV.4.2.Modèle dynamique du système bouclé :**

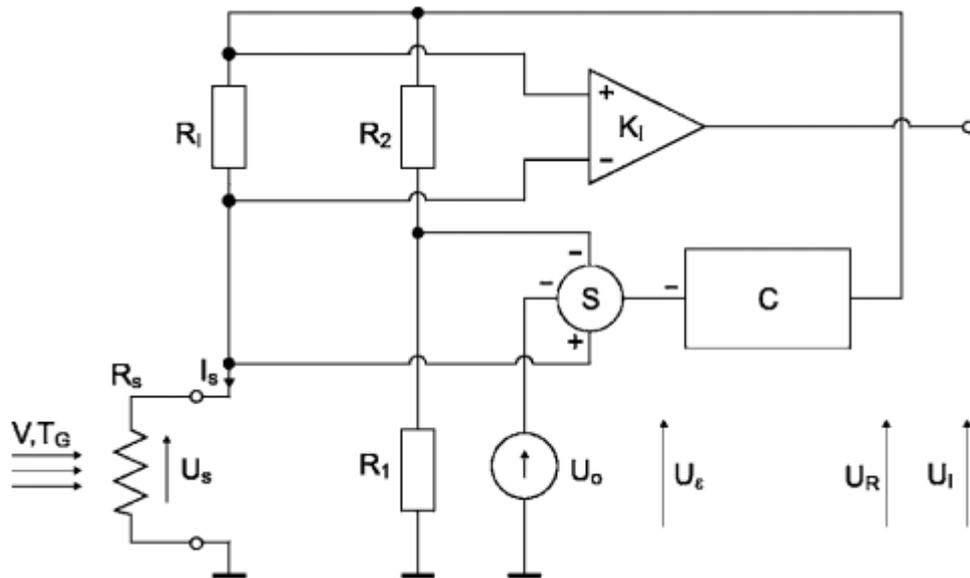


Figure IV.5. montage de mesure d'anémomètre à température constante.

A la sortie de soustacteur on a le signal d'erreur  $U_\varepsilon$ :

$$U_\varepsilon = U_R \left( \frac{R_S}{R_S + R_L} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) - U_0$$

$U_0$  : représente la tension de offset.

$\delta e = U_R \left( \frac{R_S}{R_S + R_L} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$  : représente la tension de déséquilibre du pont.

En remplaçant l'expression  $U_{\mathcal{E}}$  dans les équations différentielles de régulateur on aura :

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{-k_c(R_C+R_A)U_C + k_c\left\{R_C+R_A-R_A\left[\frac{R_S}{(R_S+R_L)} - \frac{R_1}{(R_1+R_2)}\right]\right\}U_R + k_cR_AU_0}{\tau_C(k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (12)$$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{k_A R_A U_C - \left\{k_A R_A + k_C R_C + k_C R_A + R_A - k_A k_C R_A \left[\frac{R_S}{(R_L+R_S)} - \frac{R_1}{(R_1+R_2)}\right]\right\}U_R + k_C k_A R_A U_0}{\tau_A(k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (13)$$

Déterminons l'équation différentielle qui régit le capteur (l'expression de  $R_S$ ) en fonction des différents paramètres.

Le fil chaud est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$I_S^2 R_S = I_L^2 (R_S - R_{SG}) \left[1 + \left(\frac{V}{V_L}\right)^n\right] + I_L^2 \tau_L \frac{dR_S}{dt} \quad [3] \quad (14)$$

Avec :

$R_S$  : La résistance de capteur.

$R_{SG}$  : La valeur de la résistance pour une vitesse  $V_L = 4 \text{ m/s}$ .

$I_S$  : L'intensité du courant I qui passe dans le capteur  $R_S$  lorsque le capteur est soumis à une vitesse V.

$I_L$  : L'intensité du courant I qui passe dans la résistance  $R_L$  quant  $V = V_L$  et la température du fil égale à 20°C.

$V_L$  : vitesse de référence.      V : entrée du capteur.      n : constante.

$\tau_L$ : Inertie thermique (constante de temps).

En appliquant la loi d'Ohm l'intensité aux bornes de la résistance  $R_S$  on aura:

$$I_S = \frac{U_S}{R_S} \quad \text{Avec} \quad U_S = U_R \left(\frac{R_S}{R_S+R_L}\right)$$

En remplaçant l'expression de  $I_S$  dans l'équation (14) on obtient:

$$\frac{dR_S}{dt} = \frac{\left[ \frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L)^2} \right] - (R_S - R_{SG}) [1 + (V/V_L)^n]}{\tau_L} \quad (15)$$

**Ø Détermination de l'équation de la sortie du système :**

En régime permanent on a :  $\frac{dR_S}{dt} = 0$ .

De l'équation (15) on trouve l'expression de la sortie en fonction des états de système :

$$U = V_L \left[ \frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L)^2 (R_S - R_{SG})} - 1 \right]^{1/n} \quad (16)$$

$U$  : représente la vitesse mesuré en m/s.

En posant :  $U_C = x(1)$  ;  $U_R = x(2)$  ;  $R_S = x(3)$

Le système est représenté par l'ensemble d'équations différentielles non linéaires suivantes :

$$\frac{d x(1)}{dt} = \frac{-k_c(R_C + R_A)x(1) + k_c \left\{ R_C + R_A - R_A \left[ \frac{x(3)}{(x(3) + R_L)^{-R_1}} / (R_1 + R_2) \right] \right\} x(2) + k_c R_A U_0}{\tau_C (k_C R_C + k_C R_A + R_A)}$$

$$\frac{d x(2)}{dt} = \frac{k_A R_A x(1) - \left\{ k_A R_A + k_C R_C + k_C R_A + R_A - k_A k_C R_A \left[ \frac{x(3)}{(R_L + x(3))^{-R_1}} / (R_1 + R_2) \right] \right\} x(2) + k_C k_A R_A U_0}{\tau_A (k_C R_C + k_C R_A + R_A)}$$

$$\frac{d x(3)}{dt} = \frac{\left[ \frac{x(2)^2 x(3)}{I_L^2 (x(3) + R_L)^2} \right] - (x(3) - R_{SG}) [1 + (V/V_L)^n]}{\tau_L}$$

$$U = V_L \left[ \frac{x(2)^2 x(3)}{I_L^2 (x(3) + R_L)^2 (x(3) - R_{SG})} - 1 \right]^{1/n}$$

**IV.5. La Simulation et l'interprétation des Résultats**

On a testé notre modèle à l'aide du logiciel matlab ( version 7.5) en prenant comme valeurs des paramètres celles données dans les tableaux ci dessous et avec des conditions initiales  $U_{C0} = 0 \text{ V}$ ,  $U_{R0} = 0 \text{ V}$ ,  $R_{S0} = 2 \Omega$ , le temps d'intégration  $t_f = 20 \text{ s}$  et  $K_c = 65$ .

Tableau 1 : les Paramètres du fil chaud [3]

$R_{SG}$ ( $\Omega$ )	$T_G$ (K)	$\alpha_G$ (1/K)	$I_L$ (A)	$V_L$ (m/s)	$\tau_L$ (s)	n
5	293	$3.33 \times 10^{-3}$	$45 \times 10^{-3}$	4	$0.25 \times 10^{-3}$	0.5

Tableau 2 : les paramètres du système électronique [3]

$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$k_A$	$U_0$ (V)	$R_A$ ( $\Omega$ )	$\tau_A$ (s)	$R_C$ ( $\Omega$ )
10	100	$10^6$	$10^{-6}$	$10^6$	$10^{-2}$	100

**IV.5.1 Simulation à une entrée constante**

$v=50 \text{ m/s}$ , Le résultat illustré dans la figure ci-dessous

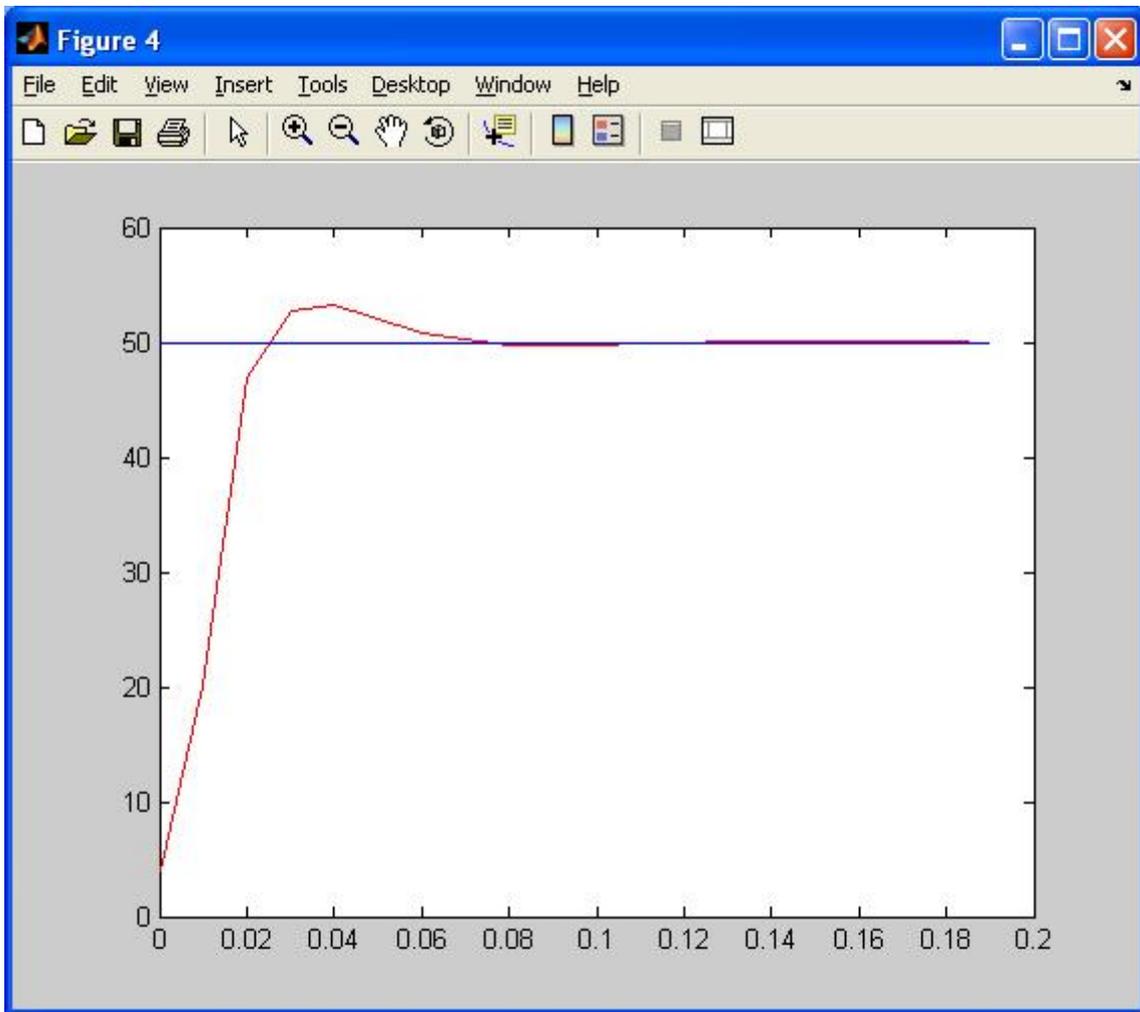


Figure IV.6.réponse du système à une entrée constante.

Interprétation :

L'allure du graphe de sortie du système bouclé est satisfaisante, la sortie suit la consigne avec des performances convenable (temps de réponse =0.02, un seul dépassement).

### IV.5.2. Simulation à une entrée sinusoïdale

$V = V_M + \Delta v \times \sin(2\pi ft)$ , la réponse est celle présentée dans la figure suivante

Avec :  $V_M = 50, \Delta v = 30, f = 1 \text{ Hz}$ .

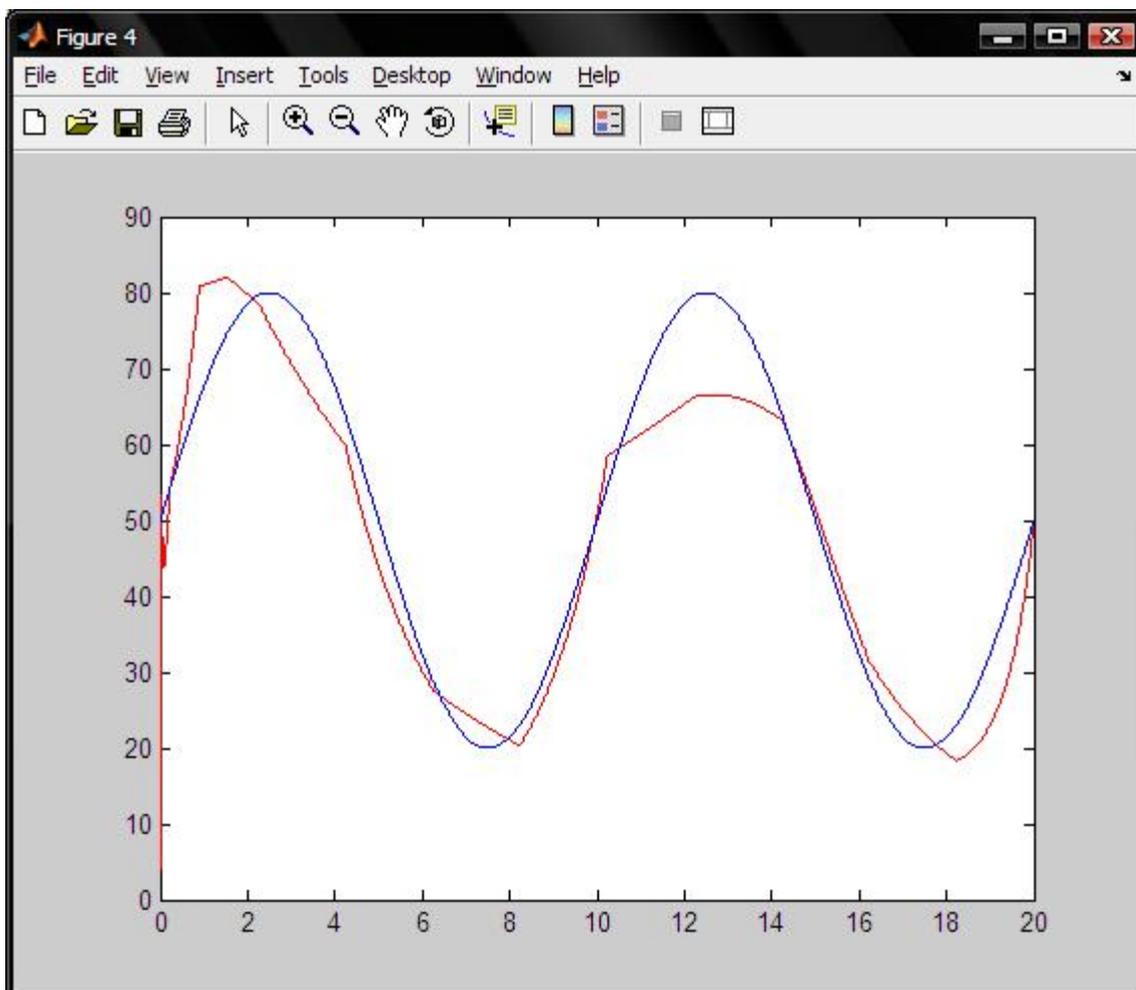


Figure IV.5.7. réponse du système à une entrée sinusoïdale.

Interprétation :

Le résultat de simulation montre que la sortie n'a pas pu suivre fidèlement la consigne.

Afin de résoudre ce problème et dans le souci d'améliorer les performances du système, on propose d'utiliser une commande qui permettra de faire l'ajustement optimal des paramètres

de régulateur en fonction de changement dynamique de système et cette commande c'est la commande adaptative à régulateur auto ajustable.

### IV.5.2.1 La commande adaptative

#### Ø Définition

La commande adaptative est un ensemble de concept et de technique utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs mis en oeuvre dans des boucles de commande à fin de réaliser ou maintenir un certain niveau de performances quand les paramètres de procédé à commander sont variable dans le temps.

#### Ø Les tâches principales de mécanisme d'adaptation

- Ajustement automatique des régulateurs et optimisation de leurs paramètres en divers points de fonctionnements de processus.
- Maintien des performances exigées en cas de variation des paramètres de processus.
- Détection des variations anormales des caractéristiques du processus.

#### Ø Les différentes méthodes d'adaptations

Selon le caractère des adaptations programmées on distingue les systèmes de commande adaptative suivants :

- § Commande adaptative à gain préprogrammé.
- § La commande adaptative direct dans la quelle les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir de la comparaison entre les performances réelles et les performances désirées (commande adaptative à modèle de référence).
- § La commande adaptative indirecte qui suppose une estimation des paramètres de processus par une procédure d'identification (c'est le cas de régulateur auto ajustable).

#### Ø commande adaptative à régulateur auto ajustable

Ce type de commande adaptative consiste à insérer des régulateurs auto ajustable dans la chaine d'action de commande. la réalisation de cette commande se divise en deux étapes distinctes.

1-identification des processus.

2-mise à jour des paramètres de régulateur.

Lorsque les paramètres de processus ont été identifiés, ils sont alors transmis au bloc de calcul des paramètres de régulateur, ce bloc en fonction des paramètres fournis et de spécifications définies par le cahier de charge (rapidité, amortissement) va calculer les nouveaux paramètres de régulateur et les lui transmettre, permettant une mise à jour de ce dernier.

Pour implanter cette commande adaptative dans notre modèle, on fait une adaptation de la commande ( $U_R$ ) au gain proportionnel de régulateur  $K_C$ , qui est représenté par l'expression suivante:

$$k_C = \frac{k_{C0}}{1 + \beta[(U_R - U_{R0})/U_{R0}]} \quad [3]$$

Avec

$k_{C0}$  : Le gain optimal pour une vitesse minimale,  $k_{C0}$  est égal à 200.

$U_{R0}$  : La tension de sortie de régulateur pour une vitesse minimale,  $U_{R0}$  est égale à 0.7688v

$\beta$  : Le terme de correction déterminé expérimentalement est égal à 2.7.

Le résultat de simulation obtenue est illustré dans la figure suivante :

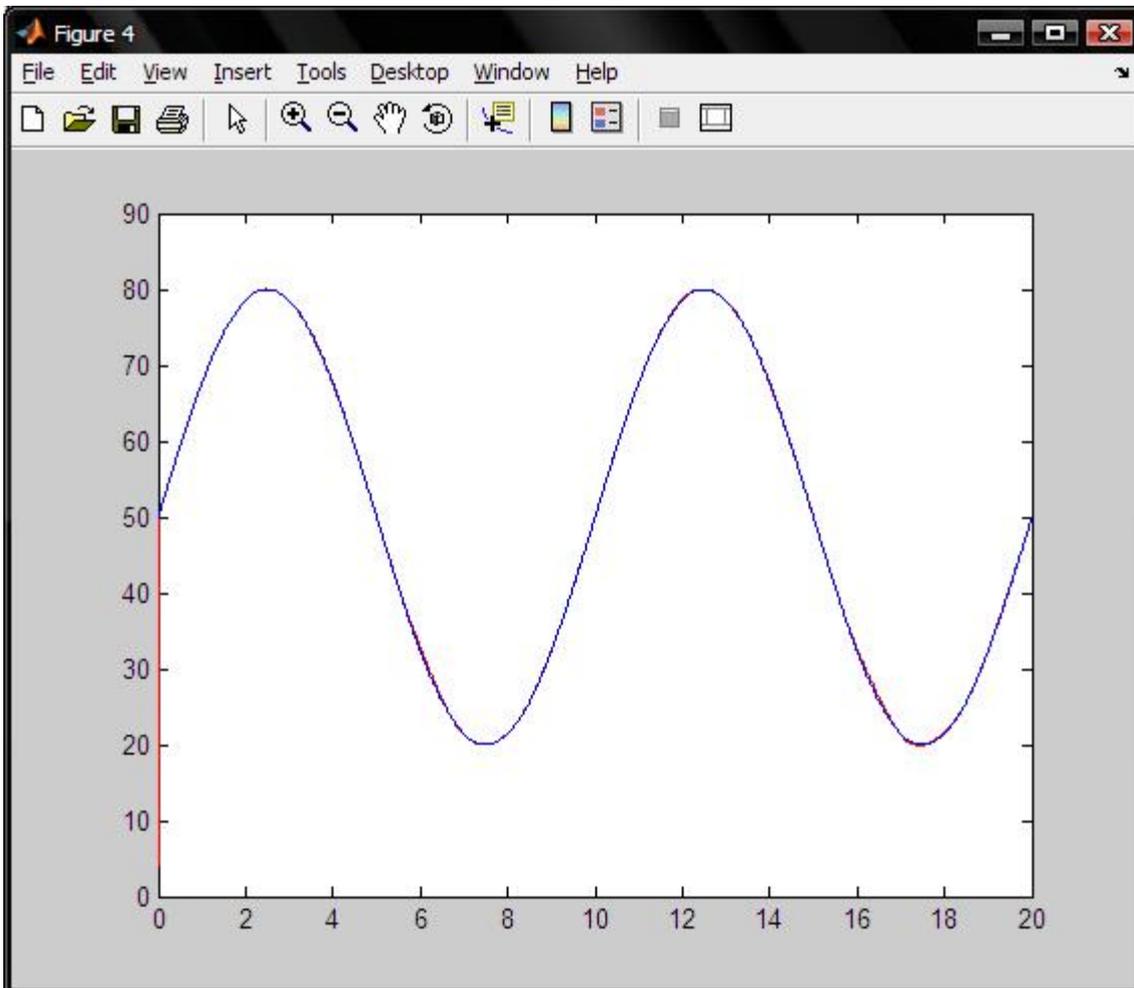


Figure IV.8 réponse du système à une entrée sinusoïdale en adaptation de gain proportionnel.

D'après la figure IV.5.8 on remarque que la sortie suit la consigne, malgré la variation dynamique de système à commander, la commande adaptative donne des bons résultats.

### IV.6. Conclusion :

L'anémomètre à température constante(CTA) permet la mesure des changements rapide de la vitesse, dans la solution classique de la CTA, la bande de transmission est en fonction de la vitesse de l'écoulement. Il s'agit d'un inconvénient mineur, qui peut conduire à des erreurs dynamique lorsque la vitesse de l'écoulement varie dans une fourchette considérable. Une modification est décrite, par laquelle un contrôleur adaptatif est incorporé dans le système pour que la bande passante de la CTA reste constante en fonction de la

vitesse de l'écoulement .la seconde boucle de réaction est fournit pour modifier les paramètres de contrôleur à fin de garder la bande passante constante.

# Conclusion générale

### Conclusion générale :

L'élaboration du présent travail, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances théoriques sur l'anémomètre à température constante et les débitmètres en général.

Nous avons modélisé le système (l'anémomètre à température constante, CTA) grâce à des lois physiques (loi de Fourier, loi d'Ohm) et nous avons obtenu un système d'équations non linéaires.

La CTA permet la mesure des fluctuations rapides de la vitesse, bien que la bande de transmission est toujours en fonction de la vitesse de l'écoulement.

Nous avons vu que à fin de maintenir la température de l'élément chaud constante, un régulateur proportionnel intégral est appliqué sur le système (CTA).

Les mesures de l'évolution des flux rapides exigent que les propriétés dynamique de la CTA doivent être correctement ajusté afin d'atteindre la bande passante plus large à des vitesses mesurée plus élevée et en même temps assurer un fonctionnement stable de l'anémomètre.

A fin d'obtenir une bande passante constante pour des faible et des haute vitesses, une modification est proposée selon laquelle le circuit de la CTA devrait intégrer un contrôleur adaptatif pour que la bande de transmission reste constant en fonction de la vitesse de l'écoulement. A cette effet une seconde boucle de rétroaction est intégré, Cette boucle porte sur l'adaptation du gain proportionnel de correcteur au signale de commande de régulateur.

La simulation de ce modèle avec le logiciel matlab nous a permis de voir l'évolution de la sortie pour une entrée donnée et cette sortie représente la vitesse à mesure par le système.

Nous espérons que ce travail sera d'un apport considérable pour les promotions à venir, et qui enrichira la documentation universitaire.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] : **Georges Asch et collaborateurs**, 'Les capteurs en instrumentation industrielle', Dunod, Paris, 1999.

[2] : **Jean-Marie Flaus**, 'La régulation industrielle' HERMES Science publications, Paris, 1994 ,2000.

[3]: **P,Ligeza**, constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer review of scientific instruments 78 075104( 2007) .



[4]: **F.Moisy**, méthodes expérimentales en mécanique des fluides, polycopié de cours master 1 de mécanique –physique 2009- 2010 Université Paris-sud11.

[5] : **Ouldamer Salim** , mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Etude et régulation du phénomène de pompage dans le compresseur centrifuge BCL405/C avec implémentation de l'algorithme anti-pompage sur automate S7/300.Université Mouloud MAMMERY .TIZI OUZOU ,Facute de Génie Electrique et d'informatique ,Département d'Automatique (2009) .

## Résumé :

L'anémomètre est un matériel professionnel sers à mesurer la vitesse des fluides, il est idéal pour le contrôle des systèmes, grâce à cet avantage il est adapte à de nombreuse application dans le domaine des techniques de ventilation et de climatisation.

La CTA (l'anémomètre à température constante) permet la mesure des fluctuations rapides de la vitesse, bien que la bande de transmission est toujours en fonction de la vitesse de l'écoulement.

Nous avons vu que à fin de maintenir la température de l'élément chaud constante, un régulateur proportionnel intégral est appliqué sur le système (CTA).

Les mesures de l'évolution des flux rapides exigent que les propriétés dynamique de la CTA doivent être correctement ajusté afin d'atteindre la bande passante plus large à des vitesses mesurée plus élevée et en même temps assurer un fonctionnement stable de l'anémomètre.

A fin d'obtenir une bande passante constante pour des faible et des haute vitesses, une modification est proposée selon laquelle le circuit de la CTA devrait intégrer un contrôleur adaptatif pour que la bande de transmission reste constant en fonction de la vitesse de l'écoulement. A cette effet une seconde boucle de rétroaction est intégré, Cette boucle porte sur l'adaptation du gain proportionnel de correcteur au signale de commande de régulateur.

La simulation de ce modèle avec le logiciel matlab nous a permis de voir l'évolution de la sortie pour une entrée donnée et cette sortie représente la vitesse à mesure par le système.