

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE



N° d'Ordre :
N° de série :

Mémoire en vue de l'obtention
Du diplôme de master II

DOMAINE : Génie électrique.

FILIERE : Automatique.

SPECIALITE : Commande des systèmes.

Thème

Régulation d'un anémomètre à fil chaud à température constante.

Présenté par :
OUAMARA Dehbia
NAIT SAADA Megdouda

Encadré par :
LAGHROUCHE Mourad
MAIDI Ahmed

Jury de soutenance :

Président : KARA Radouane , Professeur.
Encadreur 1 : LAGHROUCHE Mourad , Professeur.
Encadreur 2 : MAIDI Ahmed , Professeur.
Examineur 1: MELLAH Rabah, Professeur.
Examineur 2: OUBABAS Hocine, M.A.A.

Promotion : 2016/2017

Remerciements

Nous tenons à remercier nos promoteurs Mr.LAGHROUCHE et Mr.MAIDI pour leurs conseils, et la confiance qu'ils nous ont accordée et qui nous a permis de mener à terme ce travail.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions également tous les enseignants du département Automatique de l'UMMTO pour leur aide, leurs conseils et leur compréhension durant notre cursus.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma famille

A tous mes Amis(es)

Et à tous ceux qui me sont chers.

Megdouda

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A ma chère famille

A tous ceux et celles

Qui m'ont accompagné et soutenu

Durant mon cursus universitaire.

Dehbia

.....**Sommaire**.....

Introduction générale..... 1

Chapitre I : généralités sur les capteurs

I.1 Introduction 2

I.2 Définitions et caractéristiques..... 2

 I.2.1 .1Le mesurande 2

 I.2.1.2Le mesurage 2

 I.2.1.3Le capteur..... 3

I.3 Etape de l'opération de la mesure 4

 I.3.1 Grandeurs d'influence 4

 I.3.1.1 Exemple des grandeurs d'influence 5

I.4 Caractéristique d'un capteur 5

 I.4.1 Grandeur physique observée..... 5

 I.4.2 Temps de réponse 5

 I.4.3 Etendu ou plage de mesure 5

 I.4.4 Sensibilité..... 5

 I.4.5 Précision..... 6

 I.4.6 Fidélité et justesse 6

 I.4.7 Linéarité 7

 I.4.8 Bande passante..... 7

 I.4.9 Résolution 7

 I.4.10 Hystérésis 7

 I.4.11 Gamme de température d'utilisation 8

 I.4.12 Stabilité 8

 I.4.13 Repetabilité et reproductibilité..... 8

 I.4.14 Bruit de fond 8

I.5 Types de capteurs 8

I.5.1 Capteur passifs	8
I.5.2 Capteur actif.....	9
I.5.2.1 Définition	9
I.5.2.2 Effets physique d'un capteur actif	10
I.6 Fonction d'un capteur	10
I.6.1 Situation des capteurs	10
I.7 Critères du choix d'un capteur	11
I.7.1 Exemple de conditions à prendre en compte	12
I.7.2 Autres critères	12
I.8 Conclusion	13

Chapitre II : Anémomètre à fil chaud et sa modélisation

II.1 Introduction	14
II.2 Types d'anémomètres.....	14
II.2.1 Anémomètre à coupelles.....	14
II.2.2 Anémomètre à hélice	16
II.2.3 Anémomètre à laser	17
II.2.4 Anémomètre à plaques	18
II.2.5 Anémomètre moulinet	18
II.2.6 Anémomètre ultrason	18
II.2.7 Anémomètre bidirectionnel	19
II.2.8 Anémomètre à résonance acoustique.....	20
II.3 Anémomètre à fil chaud	20
II.3.1 Rappel	20
II.3.2 Structure d'un anémomètre à fil chaud	21
II.3.3 Principe de fonctionnement anémomètre à fil chaud	22
II.3.4 Conditionnement d'un anémomètre à fil chaud	22
II.3.4.1 Anémomètre à tension constante	22
II.3.4.2 Anémomètre à courant constant.....	23
II.3.4.3 Anémomètre à température constante	23

II.3.4.3.1 CTA dans un circuit	24
II.3.4.3.2 CTA comme contrôleur automatique	25
II.4 Modélisation	26
II.4.1 Notion du modèle	26
II.4. 2 Définition du modèle mathématique	26
II.5 Modélisation d'un anémomètre à température constante	26
II.5.1 Simulation et interprétation des résultats	28
II.5.2 Courbe obtenue en boucle ouverte	29
II.5.3 Interprétation de la courbe	30
II.6 Conclusion	30

Chapitre III. Régulation automatique

II.1 Introduction	31
III.2. Définitions	31
III.2.1. Asservissement	31
III.2.2. Régulation	31
III.2.3. Amplificateur opérationnel	31
III.3 Boucle de régulation.....	31
III.3.1 Etapes nécessaires	31
III.3.2 Terminologie employée.....	32
III.3.3 Régulation en boucle ouverte	32
III.3.4 Régulation en boucle fermée	32
III.4 Qualités d'une régulation	33
III.4.1 Stabilité	33
III.4.2 Amortissement	34
III.4.3 Rapidité	35
III.4.4 Précision	35
III.5. Régulateur PID	36
III.5.1 Rôle du régulateur	36
III.5.2 Régulateur PID	36
III.5.3 Régulateurs physiques.....	36
III.5.4 Mode automatique ou mode manuel	37
III.5.5 Sens d'action d'un régulateur	37
III.5.6 Choix du sens	37

III.5.7 Action proportionnelle	37
III.5.7.1 bande proportionnelle.....	37
III.5.7.2 Equation	38
III.5.7.3 Réalisation pratique de l'action proportionnelle	38
III.5.7.4 Fonction de transfert	38
III.5.8 Action intégrale	39
III.5.8.1 Coefficient d'action intégrale	39
III.5.8.2 Equations	39
III.5.9 Régulateurs PI	39
III.5.9.1 Fonction de transfert	39
III.5.9.2 Réalisation pratique.....	39
III.5.10 Action dérivée	40
III.5.10.1 Coefficient de l'action dérivé	40
III.5.10.2 Equation	40
III.5.11 Le régulateur Proportionnel Dérivé.....	40
III.5.11.1 Fonction de transfert.....	40
III.5.11.2 Réalisation pratique	41
III.5.12 Régulateur PID	41
III.5.12.1 Fonction de transfert.....	41
III.5.12.2 Réalisation pratique	41
III.6 Effets des actions PID	42
III.6.1 Effets de l'action proportionnelle	42
III.6.2 Effets de l'action intégrale	42
III.6.3 Effets de l'action Dérivé	42
III.7. Réglage des actions PID.....	43
III.7.1 Réglage de l'action proportionnelle	43
III.7.2 Réglage de l'action Intégrale	43
III.7.3 Réglage de l'action Dérivé	44
III.8 Compromis	44
III.9 Conclusion	44

Chapitre 4 : Application d'un régulateur PI sur l'anémomètre à fil chaud

IV.1 Introduction	45
IV.2 Montage du CTA avec les deux actions P et I suivi de ses équations	45
IV.3 Modèle dynamique du système bouclé	48
IV. 4 Simulation et interprétation des résultats	51
IV.4.1 Courbe obtenue en boucle fermée.....	51
IV.4.2 Interprétation de la courbe	52
IV.4.3 Courbe du signal d'erreur en boucle fermée	52
IV.4.4 Interprétation de la courbe	53
IV.5 Conclusion	53
Conclusion générale	54

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma des éléments d'un capteur	3
Figure I.2 : Constituants d'un capteur	4
Figure I.3 : Situation d'un capteur dans une chaine de mesure.....	11
Figure II.1 : Anémomètre à coupelle	15
Figure II.2 : Exemple d'un anémomètre à hélice.....	16
Figure II.3 : Exemple d'anémomètre ultrason.....	19
Figure II.4 : Exemple d'anémomètre bidirectionnel à ultrason.....	20
Figure II.5 : Exemple d'anémomètre à fil chaud.....	21
Figure II.6 : Description de l'anémomètre à fil chaud.....	21
Figure II.7 : Bloc fonctionnel du CTA avec contrôleur.....	24
Figure II.8. Montage de mesure d'un anémomètre à température constante.....	25
Figure II.9 : Montage de mesure d'un anémomètre à température constante.....	27
Figure III.1 : Situation d'un régulateur dans une chaine ouverte.....	31
Figure III.2 : Situation d'un régulateur dans une chaine fermée.....	32
Figure III.3 : Stabilité pour plusieurs mesures.....	34
Figure III.4 : Réponse indicielle en fonction du coefficient d'amortissement h d'une fonction de transfert du second ordre.....	34
Figure III.5 : situation du régulateur PID.....	36
Figure III.6 Schéma d'un régulateur Proportionnel.....	38
Figure III.7 : Schéma d'un régulateur Proportionnel intégral.....	40
Figure III.8 : Schéma d'un régulateur Proportionnel intégral.....	41
Figure III.9 : Schéma des trois actions Proportionnel intégral et dérivée.....	41
Figure IV.1 : Montage du correcteur proportionnel et intégral.....	45
Figure IV.2 : Montage de mesure d'anémomètre à température constante.....	48
Figure IV.3 : Réponse du système en boucle fermé.....	52
Figure IV.4 : Le signal d'erreur entre la vitesse mesurée $v(t)$ et la vitesse du vent $V(t)$	53

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Effets utilisé pour réaliser la mesure dans les capteurs passifs.....	9
Tableau I.2 : Effets utilisé pour réaliser la mesure dans les capteurs actifs.....	9
Tableau I.3 : Condition pour le choix d'un capteur.....	12
Tableau II.1 : Les paramètres du fil chaud.....	28
Tableau IV.1 : Les paramètres du fil chaud.....	51
Tableau IV.2 : Les paramètres du système électronique.....	51

Introduction générale

Introduction générale

L'anémomètre est un matériel professionnel qui sert à mesurer la vitesse des fluides, il est adapté à de nombreuses applications dans plusieurs domaines comme le transport aérien et météorologie .

Généralement le fonctionnement de l'anémomètre en boucle ouverte est influencé par des erreurs de mesure. L'erreur entre la vitesse du vent mesurée et celle réelle peut être importante. Pour réduire cette erreur et améliorer la précision du capteur, l'utilisation d'un régulateur est indispensable.

L'objectif du mémoire consiste à étudier un anémomètre utilisé pour mesurer la vitesse du vent. L'étude concerne la modélisation, l'évaluation de ses performances en boucle ouverte et l'amélioration de sa précision en utilisant un régulateur PI.

Le mémoire est constitué de quatre chapitres :

Dans le chapitre I, nous aborderons la présentation des capteurs, leur fonctionnement et leur tâche dans un système.

Le chapitre II donne une idée générale sur les anémomètres. Puis l'étude est sur l'anémomètre à fil chaud. On présente son fonctionnement, son conditionnement et la modélisation de ce type d'anémomètre. Les performances de ce dernier sont évaluées en boucle ouverte.

Le chapitre III sera consacré à la régulation automatique basée sur le régulateur PID.

On s'intéresse particulièrement à sa réalisation par des circuits électriques.

Dans le chapitre IV, un correcteur PI est conçu pour améliorer la précision de l'anémomètre.

Le mémoire se termine par une conclusion.

CHAPITRE I

Généralités sur les capteurs

Chapitre I : Généralités sur les capteurs.

I.1 Introduction

Chaque fois que l'on veut évaluer une grandeur physique nous sommes amenés à comparer une grandeur de même nature prise comme étalon, c'est le principe même de la mesure. Toutefois, il arrive que la connaissance d'une grandeur ne soit pas directement accessible. Dans une telle situation, on fait appel à des dispositifs influencés par cette grandeur. L'appréciation de cette influence nous renseignera alors sur l'état de la grandeur que nous souhaitons examiner. Ces dispositifs qui nous délivrent des signaux desquels nous pouvons extraire des informations sur les grandeurs désirées sont désignés sous le terme de capteurs. Le capteur est le premier élément d'une chaîne de mesure. Il fournit un signal électrique proportionnel à la grandeur physique à mesurer. Les capteurs jouent un rôle fondamental dans la technologie moderne grâce à eux les systèmes électroniques peuvent communiquer avec le monde extérieur. Les capteurs ont nettement amélioré l'efficacité de la chaîne de mesure, les applications de mesures les plus rencontrées sont :

La mesure de température, la mesure de pression, la mesure de débit, la mesure de débit, la mesure de position et la mesure de vitesse.

I.2 Définitions et caractéristiques

I.2.1 Définitions

Devant l'accoisement de différents types de capteurs mais surtout l'élargissement grandissant de leurs domaines d'utilisation, fait que l'étude de ces dispositifs revêt une grande importance en technologie. En effet une étude détaillée ferait appel à des développements en électronique et en automatique.

I.2.1.1 Mesurande

Le mesurande représente la grandeur physique que l'on veut mesurer ou dont on souhaite connaître l'état ; la grandeur en question peut être un déplacement, une vitesse, une température...etc

I.2.1.2 Mesurage

On désigne par mesurage l'ensemble des opérations conduisant à l'appréciation du mesurande. Cette appréciation sera traduite par un nombre que nous appelons la mesure de la grandeur physique, il arrive parfois que la valeur exacte de la mesure ne soit pas d'une

Chapitre I : Généralités sur les capteurs.

extrême importance lorsque les limites de cette mesure sont très utiles. Par exemple le fait que la température ait atteint ou dépassé une valeur seuil. L'information concernant le mesurande nécessite souvent un traitement électronique pour être utilisable.

I.2.1.3 Capteur

Le capteur représente ce dispositif permettant de produire des signaux électriques lorsqu'il se trouve soumis à l'influence du mesurande lequel est généralement de nature non électrique. Un tel capteur, soumis à l'action du mesurande pourra alors nous fournir en sortie une charge électrique, une tension ou un courant. Ce capteur pourra aussi se comporter comme une impédance dont la valeur sera sensible au mesurande. La grandeur délivrée par le capteur est généralement représentée par la lettre s (grandeur de sortie). Nous pouvons donc modéliser le fonctionnement du capteur en définissant une fonction mathématique F reliant la grandeur d'entrée ou mesurande m à la grandeur de sortie s soit :

$$s = F(m) \quad (1)$$

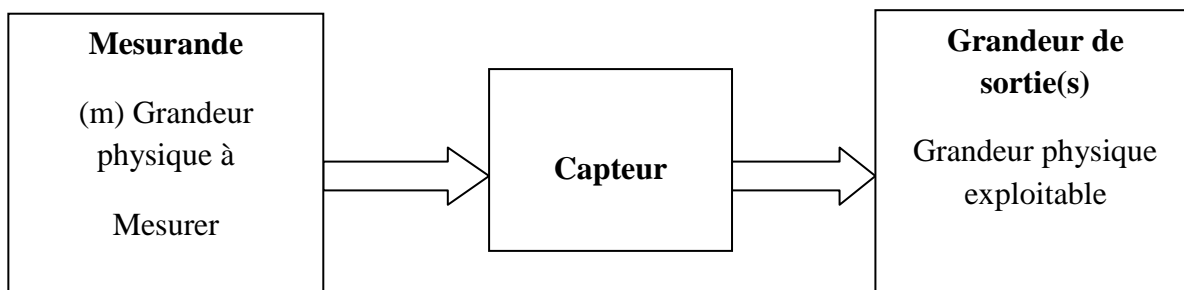


Figure I.1 : Entrée sortie d'un capteur .

$S=F(m)$ est une fonction qui traduit la grandeur de sortie S est une fonction de la grandeur d'entrée m . Dans la terminologie propre aux capteurs, la grandeur de sortie S est souvent appelée la réponse du capteur alors que la grandeur d'entrée m (le mesurande) est souvent appelée l'excitation. Lorsque nous considérons le rôle dévolu au capteur, nous nous rendons vite à l'évidence que la réponse (la grandeur de sortie) du capteur doit être l'image la plus parfaite possible de la grandeur analysée c'est-à-dire le mesurande ou grandeur d'entrée. Cet

Chapitre I : Généralités sur les capteurs.

objectif ne peut être correctement atteint que si nous maîtrisons parfaitement en permanence la réponse du capteur, laquelle n'est pas toujours à l'abri de phénomène de perturbation. Ces phénomènes peuvent trouver leur origine dans les parasites qui viendraient superposer au signal fondamental, dans les conditions d'utilisation, dans le processus même à la base du capteur ou dans l'environnement dans lequel le capteur est utilisé.

I.3 Etapes de l'opération de la mesure

Les constituants d'un capteur sont résumés dans la figure ci dessous

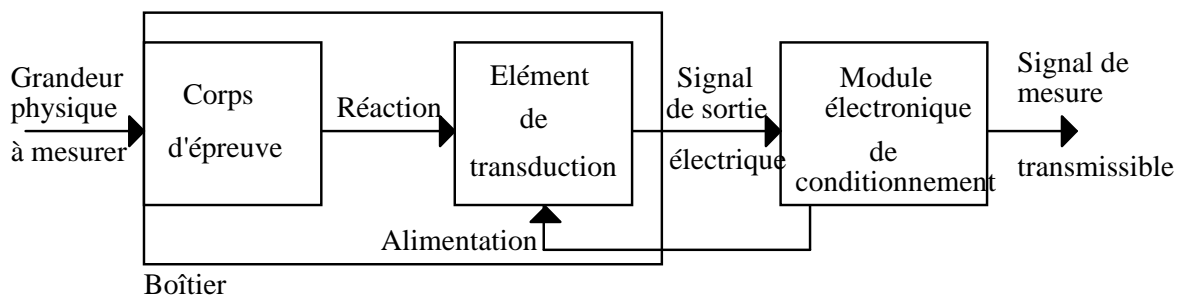


Figure I.2 : Constituants d'un capteur.

- Corps d'épreuve : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande).
- Elément de transduction : élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.
- Boîtier : élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.
- Module électronique de fonctionnement : il possède essentiellement les fonctions suivantes :
 - Alimentation électrique du capteur (si nécessaire).
 - Mise en forme et amplification du signal de sortie du capteur.
 - Conversion du signal (CAN).

I.3.1 Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les capteurs. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie.

I.3.1.1 Exemple des grandeurs d'influence

On distingue plusieurs grandeurs qui peuvent influencer les caractéristiques du capteur :

- La température.
- La pression environnante.
- Les vibrations mécaniques ou acoustiques.
- La position du capteur et sa fixation.
- L'humidité, la projection d'eau, l'immersion.
- Les ambiances corrosives.
- Les perturbations électromagnétiques.
- Les rayonnements nucléaires.
- Les accélérations et la pesanteur.
- L'alimentation électrique du capteur.

I.4 Caractéristiques d'un capteur

Un capteur peut être caractérisé selon de nombreux critères dont les plus courants sont les suivants :

1.4.1 La grandeur physique observée

C'est la grandeur qu'on veut mesurer comme la température, la pression

1.4.2 Temps de réponse

La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de telle façon la grandeur de sortie suite dans le temps les variations du mesurande, autrement dit c'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information est prise en compte par la partie commande.

1.4.3 Etendue ou plage de mesure

Domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. On appelle les valeurs limites du domaine, « portée minimale » et « portée maximale ».

1.4.4 Sa sensibilité

C'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer.

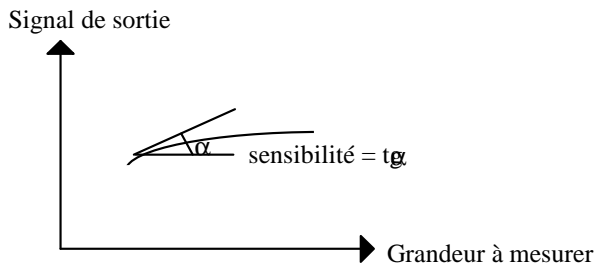
Chapitre I : Généralités sur les capteurs.

C'est à dire à la pente de la courbe de réponse du capteur pour une valeur donnée :

$$S = ds/de \quad (2)$$

ds : variation de sortie

de : variation de l'entrée



I.4.5 Précision

Le capteur est d'autant plus exact que les résultats de mesure qu'il indique coïncident avec la valeur vraie (par définition théorique) que l'on cherche à mesurer, autrement dit c'est l'aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

I.4.6 Fidélité et justesse

La **justesse** est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises.

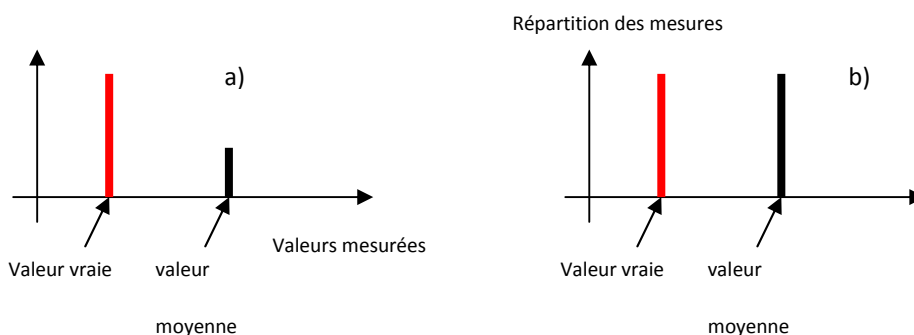
La **fidélité** est la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer.

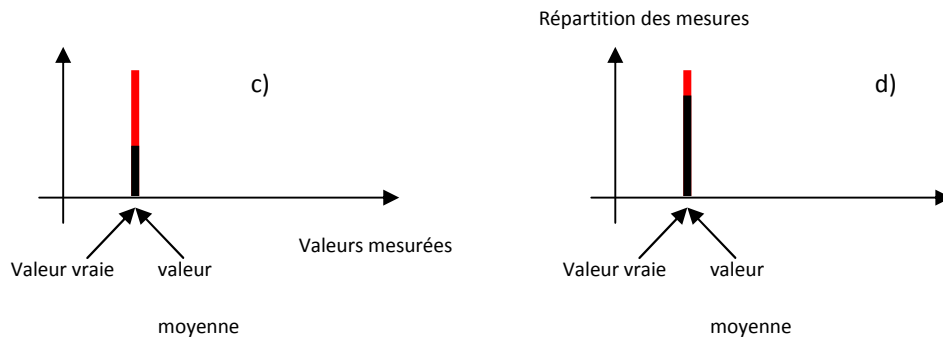
a : capteur ni fidèle, ni juste (erreurs et incertitudes de mesure importantes).

b : capteur fidèle mais non juste

c : capteur juste mais non fidèle

d : capteur juste et fidèle, donc précis (erreurs et incertitudes de mesure réduites)





I.4.7 linéarité

Surtout en analogique, les valeurs de sortie sont toujours proportionnelles aux valeurs d'entrée dans toute l'étendue de la mesure.

I.4.8 Bande passante

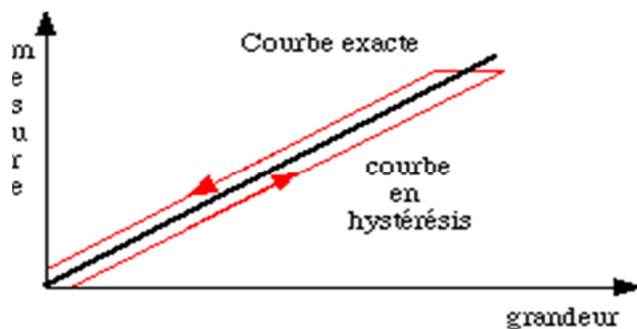
Intervalle de fréquences pour lesquelles la réponse d'un appareil est supérieure à un minimum. Elle est généralement confondue avec la largeur de bande passante qui mesure cet intervalle.

I.4.9 Résolution

C'est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible par le capteur.

I.4.10 Hystérésis

Retard de l'effet sur la cause, la propriété d'un système qui tend à demeurer dans un certain état quand la cause extérieure qui a produit le changement d'état a cessé. Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.



I.4.11 Gamme de température d'utilisation

C'est une plage de température allant d'une valeur minimale à une valeur maximale.

I.4.12 Stabilité

La stabilité qualifie la capacité d'un capteur à conserver ses performances pendant une longue durée (problème de dérive du zéro par exemple).

I.4.13 Répétabilité et Reproductibilité

La **répétabilité** est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur effectuée avec la même méthode, par le même observateur, avec les mêmes instruments de mesure et à des intervalles de temps assez courts.

La **reproductibilité** est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur dans le cas où les mesures sont effectuées dans les conditions différentes que pour la répétabilité.

I.4.14 Bruit de fond

C'est une variation parasite, souvent aléatoire, du signal de sortie, dont la valeur moyenne est nulle et qui vient se superposer à la valeur à mesurer.

I.5 Types de capteurs

Selon le mode de fonctionnement des capteurs on peut les classer en deux types, les capteurs actifs et les capteurs passifs.

I.5.1 Les capteurs passifs

Dans la plupart des cas, les capteurs passifs ont besoin d'une énergie extérieure pour fonctionner (comme dans le cas des jauges de contraintes, thermistances...), ils sont souvent modélisés par une impédance. Une variation du phénomène physique étudié (mesuré) engendre une variation de l'impédance. Il faut leur appliquer une tension pour obtenir un signal de sortie.

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif. En fonction du mesurande, on utilise plusieurs effets pour réaliser la mesure.

Chapitre I : Généralités sur les capteurs.

Tableau I. 1 : Effets utilisés pour réaliser la mesure dans les capteurs passifs [1].

Mesurande	Effet Utilisé (Grandeur de sortie)	Matériaux
Température Très basse température	Résistivité Constante diélectrique	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteurs. Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistance : bismuth, antimoine d'indium.

I.5.2 Capteurs actifs

I.5.2.1 Définition

Lorsque le phénomène physique qui est utilisé pour la détermination du mesurande effectue directement la transformation en grandeur électrique, on est en présence d'un capteur actif. C'est la loi physique elle-même qui relie le mesurande et grandeur électrique de sortie.

Tableau I.2 : Effets utilisés pour réaliser la mesure dans capteurs actifs [1].

MESURANDE	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Tension
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

I.5.2.2 Effets physiques des capteurs actifs

- **Effet thermoélectrique**

Un circuit forme de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique (T_1, T_2) [3].

- **Effet piézo-électrique**

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électrique (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées [2].

- **Effet d'induction électromagnétique**

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique) [2].

- **Effet photo-électrique**

La libération des charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.

- **Effet Hall :**

Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel U_H [2].

- **Effet photovoltaïque**

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes [2].

I.6 Fonction d'un capteur

I.6.1. Situation des capteurs dans la chaîne de mesure

Les capteurs font partie de la chaîne d'information d'un système cela est représentée dans la figure ci-dessous

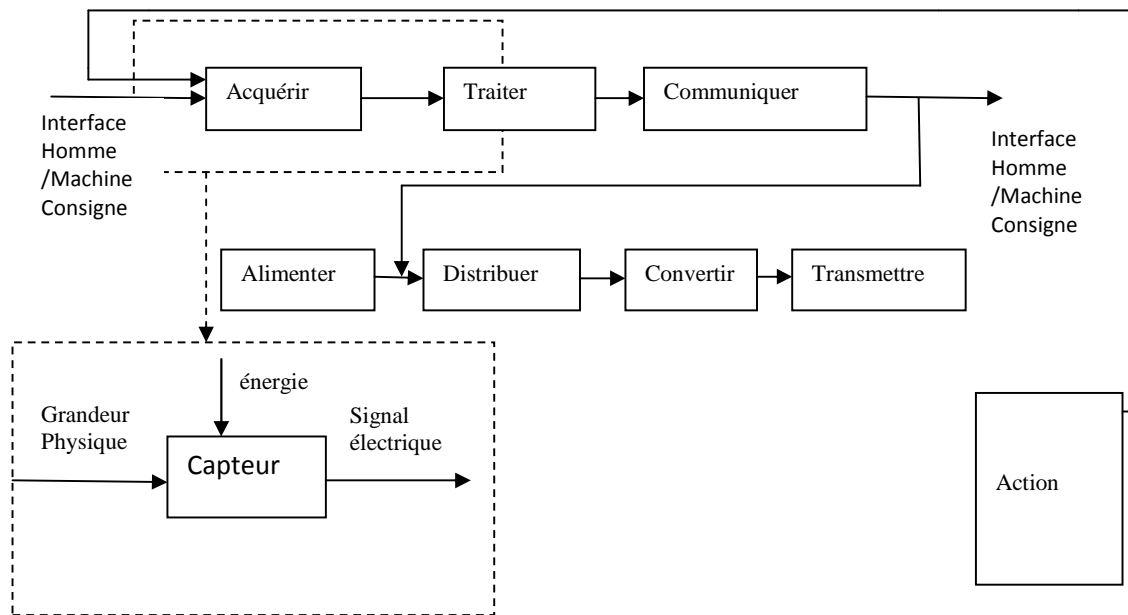


Figure I.3. Situation d'un capteur dans une chaîne de mesure [1].

I.7 Critère du choix d'un capteur

Le choix d'un capteur approprié s'effectue en vérifiant que ses caractéristiques métrologiques sont compatibles avec les conditions imposées par le cahier des charges. Ces conditions sont de deux types :

- conditions sur la mesurande
- conditions sur l'environnement de mesure.

Chapitre I : Généralités sur les capteurs.

I.7.1 Exemple de conditions à prendre en compte

Les autres conditions qu'on puisse vérifier sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau I.3 : Conditions pour le choix d'un capteur

MESURANDE Conditions imposées	CAPTEUR Caractéristiques métrologiques
Plage de variation	Etendue de mesure
Variation minimale à mesurer	Résolution
Spectre de fréquence ou vitesse de rotation	Bande passante
Précision de mesure	Erreur de linéarité Erreur d'hystérésis
Plage de température de fonctionnement	Dérive thermique du zéro Tenue en température
Localisation	Encombrement
Composition de l'atmosphère	Inertie chimique Protection
Parasites	Blindage Isolement ou non par rapport à la masse

I.7.2 Autres critères

- Fidélité
- Obtention du même résultat pour 2 captations effectuées dans les mêmes conditions à des instants différents.

Chapitre I : Généralités sur les capteurs.

I.8 Conclusion

Il existe plusieurs techniques pour mesurer de nombreuses grandeurs physiques (position, température, pression, déplacement, intensité lumineuse, vitesse des fluides).

La grandeur au quelle on s'intéresse est la vitesse du vent et pour se faire on utilise la méthode des échanges thermiques entre le capteur et le fluide, c'est le principe de l'anémométrie qui sera présenté dans le chapitre suivant.

chapitre II

Anémomètre à fil chaud et sa modélisation

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 plusieurs domaines en météorologie par exemple, car le vent est un des paramètres qui déterminent l'évolution du temps et de la prévision météorologique. Il sert également dans de nombreux domaines connexes comme le transport aérien, la navigation, la prise de données pour estimer les effets du vent sur les bâtiments ou le transport des radioactives, des poussières industrielles, etc.

Lors des mesures effectuées dans les stations météorologiques, l'anémomètre sera placé sur un mât de 10 mètres selon les critères de l'Organisation Météorologique Mondiale. Le principe peut cependant se plier à des usages particuliers. Ce chapitre est consacré à la présentation d'un anémomètre et sa modélisation.

II.2 Types d'anémomètre

Il existe plusieurs types d'anémomètres :

II.2.1 Anémomètre à coupelles

L'anémomètre à coupelles a été inventé par John Romney Robinson. Il se compose de trois demi-coquilles (de la taille d'une balle de tennis) disposées sur des bras horizontaux disposés à 120 degrés et montées sur un axe vertical équipé d'un dispositif de comptage de tours ; la vitesse de rotation de l'anémomètre est proportionnelle à la vitesse du vent. Lorsque le vent souffle, il rencontre alternativement une coupelle creuse puis bombée. Selon les lois de l'aérodynamique, un creux oppose plus de résistance qu'une forme bombée au passage de l'air. Cette différence provoque la rotation de l'anémomètre. La vitesse du vent est alors très approximativement égale à la vitesse de déplacement du centre des coupelles, elle-même proportionnelle au nombre de tours par seconde de l'anémomètre :

$$V = 2 \pi \cdot F(N) \cdot R \cdot N \quad (1)$$

Avec :

V : vitesse du vent [m/s]

R : rayon moyen des bras (de l'axe de rotation jusqu'au centre des coupelles) [m]

N: nombre de tours par seconde [1/s]

$F(N)$: fonction d'étalonnage

La fonction d'étalonnage traduit les propriétés aérodynamiques de l'anémomètre et les frottements qui altèrent le mouvement de rotation de l'anémomètre. Elle dépend des dimensions et matériaux de l'anémomètre et de sa vitesse de rotation. Seuls des essais en soufflerie à différents régimes de vent permettent de la déterminer précisément. Pour l'anémomètre standard (diamètre des coupelles de 6 centimètres), une vitesse de rotation d'un tour par seconde correspond à un vent soufflant à une vitesse de 1 m/s, soit 3,6 km/h. Ce type d'anémomètre est capable de mesurer des vitesses de vent comprises entre 0 et près de 200 km/h. Des vitesses supérieures entraîneraient des contraintes que les coupelles ne pourraient pas supporter. Mais des vents d'une telle violence ne se rencontrent que dans les tornades ou les cyclones. Les deux grands mérites de cet anémomètre sont sa simplicité et pratiquement l'absence d'une limitation dans la gamme de vitesses mesurables ; mais s'il est utilisé sans équipement d'enregistrement de données électroniques, une rafale courte mais violente n'est pas enregistrée. Malheureusement, quand Robinson a présenté son anémomètre, il a déclaré que la taille des coupelles et la longueur des bras n'avaient pas d'influence sur le résultat de la mesure. Cette affirmation était apparemment confirmée par quelques expériences indépendantes. Il s'est avérée plus tard que le rapport entre la vitesse du vent et la dimension des coupelles (le facteur) n'est pas constant et dépend en grande partie de la dimension de coupelles et de la longueur des bras [3].

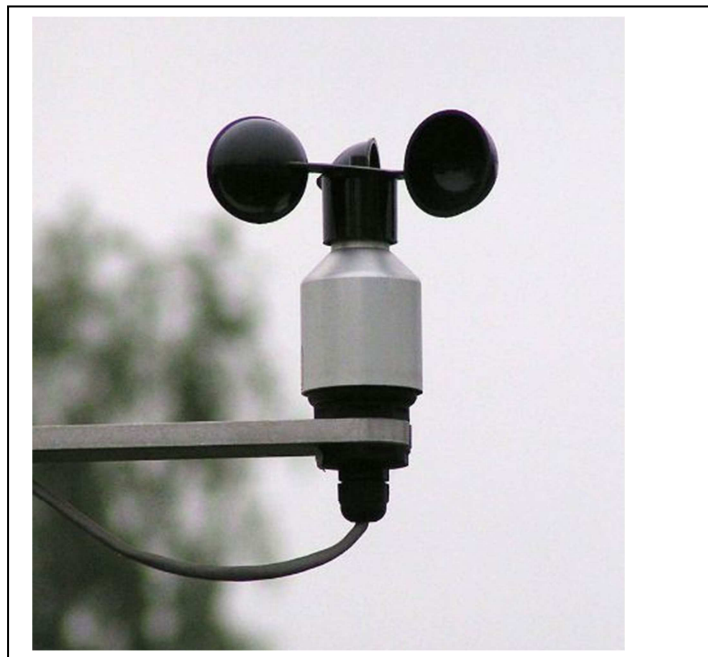


Figure II.1 : Anémomètre à coupelle [3].

II.2.2 Anémomètre à hélice

Ressemblant à de petits avions, ils sont couplés à une girouette et s'orientent dans la direction du vent. L'hélice, qui mesure la vitesse du vent, tourne autour d'un axe horizontal.

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 [4].

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 quelques sortes, dans l'écoulement ; on aurait alors une relation de la forme :

$$U = h \cdot N \quad (2)$$

U : La vitesse de l'écoulement.

N : Le nombre de tours seconde de l'hélice.

h : Une constante [4]



Figure II.2 : Exemple d'un anémomètre à hélice [5].

II.2.3 Anémomètre à laser

Un anémomètre laser utilise la vélocimétrie laser pour mesurer le déplacement de l'air et donc le vent. Le faisceau émis par un laser est divisé en deux. Le premier faisceau est dirigé vers l'atmosphère environnant où il est rétrodiffusé par les aérosols ambiants. Comme ceux-ci sont légers, ils se déplacent plus ou moins exactement à la vitesse du vent et le faisceau retourné subit un décalage de fréquence. Le récepteur capte la lumière retourné et en compare la fréquence avec le second faisceau pour calculer le décalage et donc la vitesse [6].

Comme la vitesse ainsi mesurée ne donne que la composante radiale de la vitesse, c'est-à-dire la vitesse d'éloignement ou de rapprochement par rapport à l'anémomètre, il faut que ce dernier soit orienté par une girouette pour être dans l'axe du vent. D'un autre côté, il est possible de placer deux anémomètres Doppler à 90 degrés l'un de l'autre ce qui permet d'obtenir les deux composantes orthogonales du vent, quelle que soit l'orientation de l'anémomètre, et ainsi permettre de calculer le vent réel.

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

$$d = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} \quad (3)$$

Où λ est la longueur d'onde de la lumière et θ l'angle formé par les deux faisceaux.

Si des particules entrainés 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 est qui est reçue par un capteur optique est donc modulé à une fréquence f_d , fonction de la vitesse des particules et de la valeur de l'interfrange :

$$f_d = \frac{U}{d} = \left(\frac{2U}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

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.2.4 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.2.5 Anémomètre à moulinet

L'anémomètre à moulinet est un instrument mesurant la vitesse du vent par la rotation d'un moulinet à axe horizontal ou vertical. Le principe est similaire à l'anémomètre à hélices où ces dernières sont remplacées par des pales. La différence essentielle entre ces deux types est que le moulinet est un capteur planaire (il mesure la composante du vecteur vent sur un plan perpendiculaire à son axe de rotation) alors que l'hélice est un capteur cartésien mesurant la projection du vecteur vent sur son axe de rotation [7].

II.2.6 Anémomètre à ultrason

Il existe aussi des anémomètres à ultrasons qui ont été développés à partir des années 1950. La mesure du vent est basée sur la mesure de la durée de déplacement d'une onde ultrasonore. Deux couples de transducteurs ultrasonores sont alternativement émetteurs et récepteurs d'un train d'onde ultrasonore. Les temps de transit allé et retour sont mesurés et on en déduit, par l'écart entre les vitesses aller et retour, la vitesse du vent le long de l'axe formé par les deux transducteurs. La mesure de la température ambiante est utilisée pour déterminer la vitesse du son ce qui permet de raffiner le résultat. Le pouvoir de résolution de ces appareils dépend de la distance entre les transducteurs, typiquement entre 10 et 20 cm, et de la fréquence de répétition des impulsions sonores utilisée (généralement plus de 20 Hz).

L'intérêt de ce type d'anémomètre est de ne pas avoir de pièces en mouvement et de pouvoir mesurer un vent turbulent. Ils peuvent ainsi être utilisés dans des conditions extrêmes durant de longues périodes sans entretien, sur une bouée météorologique ou un site éloigné par exemple, alors qu'un anémomètre conventionnel serait affecté rapidement par les embruns ou la poussière. Comme la vitesse du son varie avec la température, mais peu avec la variation de pression, les anémomètres à ultrasons peuvent être aussi utilisés comme thermomètres. Le principal désavantage de l'appareil est la distorsion du flux d'air par les supports des transducteurs. Une correction de cet effet doit être obtenue en soufflerie avant l'utilisation.

Il y a différents arrangement des capteurs pour un tel anémomètre en deux dimensions :

- À deux chemins : quatre capteurs sont montés sur un mât et se font face deux à deux. Chaque couple est orthogonal à l'autre ce qui permet d'obtenir les composantes est-ouest et nord-sud du vent. Il s'agit du type le plus courant.
- À trois chemins : trois capteurs sont montés sur le mât et s'interrogent tour à tour pour obtenir les deux composantes orthogonales. Ce montage minimise la distorsion du flux d'air [8].



Figure II.3 : Exemple d'anémomètre ultrason [9].

II.2.7 Bidirectionnel

L'anémomètre bidirectionnel est un appareil employé dans l'étude de la turbulence pour recueillir simultanément des données sur les composantes horizontale et verticale du vent. Il s'agit d'une variante du précédent ayant des émetteurs-récepteurs dans la verticale et l'horizontale [10].



Figure II.4 : Exemple d'anémomètre bidirectionnel [11].

II.2.8 A résonance acoustique

Un anémomètre à résonance acoustique est une variation récente de l'anémomètre à ultrasons, il utilise une onde émise en continue dans une cavité ouverte au lieu d'une onde pulsée pour mesurer la vitesse du vent. L'émission des transducteurs produit une onde stationnaire ultrasonique dans la cavité dont la phase varie avec la vitesse de l'air qui passe dans la cavité. En mesurant le déphasage perçu par les récepteurs de chaque transducteur, il est possible d'extraire la mesure du vent horizontal et de sa direction. Les propriétés de la résonance acoustique dans l'air permet de faire cette mesure avec une cavité en général plus petite que les dimensions des anémomètres acoustiques traditionnels. Cela a pour avantage de miniaturiser le détecteur, de le rendre plus robuste et d'incorporer une unité chauffante pour faire fondre neige ou verglas qui s'y accumulerait. Il est donc idéal pour la prise de données sur des éoliennes ou autres endroits très exposés. Il a cependant une résolution moindre qu'un anémomètre mécanique [12].

II.3 Anémomètre à fil chaud

II.3.1 Rappel

Il a été inventé en 1894, puis la théorie du fil chaud fut développée par King en 1914. L'anémomètre à fil chaud est un capteur passif qui sert à mesurer la vitesse de l'écoulement

du vent, son grand avantage est son excellente résolution spatiale et temporelle, un exemple d'anémomètre à fil à chaud est représenté dans la figure suivante :



Figure II.5 : Exemple d'un anémomètre à fil chaud [13].

II .3.2 La structure d'un anémomètre à fil chaud

Il se compose essentiellement d'un fil métallique très fin de 1mm de long ,1 à 10 μ m de diamètre tendu entre deux branches rigides, la figure suivante représente sa description.

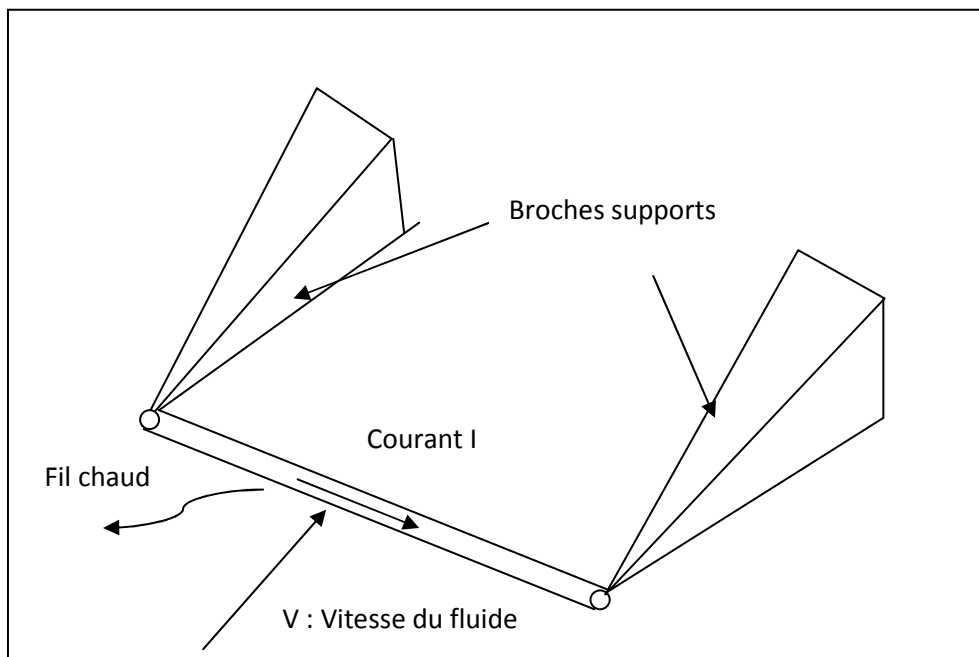


Figure II.6 : Description de l'anémomètre à fil chaud.

II.3.3 Principe de fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud

Sa fonction est la mesure de la vitesse du vent et cela se fait comme suit :

On chauffe un fil métallique en y faisant traverser un courant électrique. La résistance électrique augmente avec la température. Le fil est refroidi par le vent. Plus le vent souffle fort, plus le fil est refroidi et plus la résistance électrique diminue. L'élément résistif étant placé dans un pont de Wheatstone, la variation de résistance due à la convection déséquilibre le pont. Un voltmètre placé au milieu de ce dernier permet de lire la tension de déséquilibre du pont. Dans ce mode de fonctionnement l'intensité du courant de chauffe du fil est constante. Une autre utilisation du fil chaud consiste à avoir une température de fil constante. La température du fil est mesurée comme explicité précédemment, et un système d'asservissement permet d'adapter l'intensité envoyée dans le fil pour maintenir cette température constante. On peut alors remonter à la vitesse du fluide en partant de la puissance envoyée dans le fil. Il est à noter que le fonctionnement d'un fil chaud est basé sur un échange thermique. Or le nombre de Nusselt ne dépend que du nombre de Reynolds (nombre sans dimension, il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime) lorsque l'on se place en écoulement incompressible, ce qui rend l'utilisation des mesures fil chaud simple. Cependant lorsque l'on se place en écoulement compressible, le nombre de Nusselt (nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques entre un fluide et une paroi) dépend d'autres grandeurs, nécessitant ainsi de connaître une mesure locale de la densité du fluide pour pouvoir remonter à la vitesse à l'aide d'un fil chaud.

II .3.4 Conditionnement de l'anémomètre à fil chaud

Le conditionnement de l'anémomètre à fil chaud se fait par garder sa tension, sa température ou son courant à des valeurs constantes.

III.3.4.1 Anémomètre à tension constante(CVA)

La première application De l'anémomètre à tension constante (CVA) a été réalisée par Lachowicz et Chokani , puis l'anémomètre à tension constante est bien adapté pour les mesures en supersonique. Le CVA est souvent actionné dans un mode de fonctionnement libre, les hautes sensibilités et faibles constante du temps du fil chaud ; par rapport au CTA (anémomètre à température constante) le CVA est beaucoup moins sensible au bruit

électromagnétique. Des études approfondies sur la réponse en fréquence du CVA ont montré que ce dernier avait peu de dépendance aux conditions de fonctionnement (surchauffe du fil).

II.3.4.2 Anémomètre à courant constant(CCA)

La première stratégie la plus simple consiste à mesurer les fluctuations de R_{ω} à I constant. Un anémomètre à fil chaud alimenté par un courant constant I, la vitesse d'écoulement est en fonction de la température du fil et du fluide, la température du fil est mesuré en fonction de sa résistance électrique. Si la température d'écoulement est mesurée indépendamment, la vitesse du fluide peut être réduite en fonction de la température du fil seule. À son tour, la température du fil est liée à la mesure de la résistance du fil R_w . Par conséquent, la vitesse du fluide peut être liée à la résistance du fil. Le principal défaut de la CCA tient dans le fait que la température T_{ω} fluctue. Or, le bilan de puissance a été obtenue avec l'hypothèse de stationnarité $T_{\omega}=\text{cste}$, qui n'est pas donc respecté dans ce cas [14].

II.3.4.3 Anémomètre à température constante (CTA)

Une configuration typique pour le fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud est le circuit à température constante et cela en impliquant une commande automatique du courant alimentant le capteur à fin que la température du fil reste fixe. Le système à température constante intègre un circuit de comparaison et un régulateur fonctionnant en boucle fermée. Dans une telle configuration, le courant du capteur est fonction de pertes thermiques du fil et indirectement de la vitesse d'écoulement à mesurer. Le CTA permet de mesurer l'évolution rapide des fluctuations de vitesse, bien que la bande de passante soit toujours en fonction de la vitesse d'écoulement. A cet effet une seconde boucle de rétroaction est prévue et le signal de sortie de l'anémomètre régulera les paramètres du contrôleur de telle sorte que la largeur de la bande reste constante. L'anémomètre modifié peut être utilisé dans la mesure des flux variables à hautes fréquences dans une large gamme de vitesse. La modification proposée permet aussi de minimiser les erreurs de mesures dynamique ceci est une lacune lorsque la vitesse d'écoulement ne change pas d'une manière significative, mais il pourrait conduire à des erreurs dynamiques majeurs lorsque la vitesse de l'écoulement varie d'une façon considérable. Les mesures des écoulements rapides exigent que les propriétés dynamiques du CTA soient proprement ajustées afin d'obtenir une bande de passante la plus large possible et en même temps assurer un fonctionnement stable de l'anémomètre [15].

II.3.4.3.1 CTA dans un circuit

Une modification du circuit CTA devrait intégrer un contrôleur adaptatif de telle sorte que la bande de passante de l'anémomètre reste constante. A cet effet une deuxième boucle de rétroaction est prévue. Le signal de sortie de l'anémomètre règle ses paramètres de telle sorte que la bande passante reste identique pour les grandes vitesses ; comme le montre la figure II.2. Le CTA avec un contrôleur intègre un capteur de mesure R relié au circuit de comparaison de résistance A, où la résistance du capteur est comparée à la résistance prééglée. Le signal d'erreur ε est minimisé à l'aide du circuit de comparaison de résistance de commande et les opérateurs du contrôleur C. La première boucle de rétroaction L1 est utilisée pour le maintien de résistance constante et par conséquent on aura sa température constante.

Le signal de sortie U est une fonction de la mesure de débit de vitesse il devient donc le signal de sortie du contrôleur C et cela par l'intermédiaire du bloc F, ceci est réalisé par l'intermédiaire de la deuxième boucle de rétroaction L_2 .

L'anémomètre à bande passante constante peut être appliqué dans une mesure de turbulence générée par la turbine ou une hélice. Il peut également être utilisé dans la mesure du profil de turbulence dans les tuyaux et les buses.

Un circuit de mesure classique de CTA fonctionne dans la configuration du pont est représenté dans la figure II.2 [16].

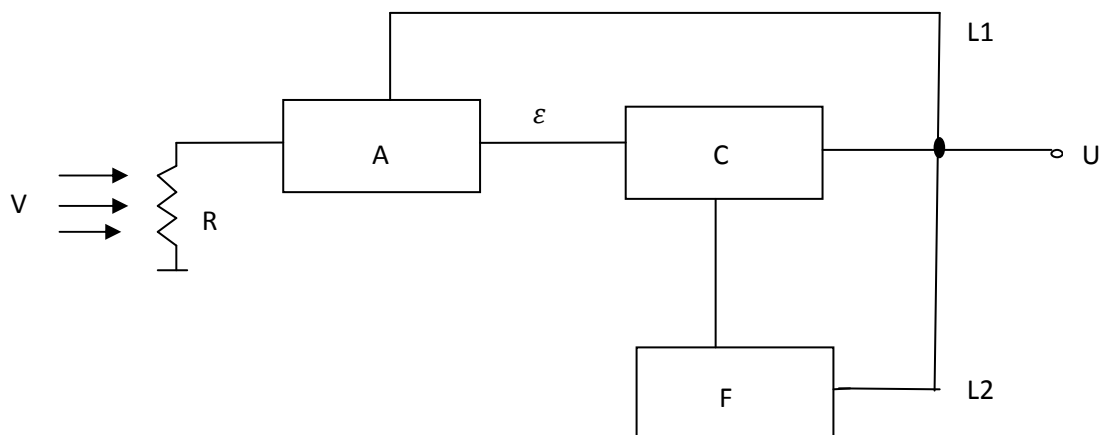


Figure II.7 : Bloc fonctionnel du CTA avec contrôleur.

II.3.4.3.2 CTA comme contrôleur automatique

Le circuit de température constante est composé d'un pont de Wheatstone et un régulateur en boucle fermée. Il fonctionne comme un système de contrôle automatique. L'élément de détection est le fil chaud (capteur) R_S placé dans un flux testé avec la vitesse V et de la température T_G . Le capteur et les éléments R_1 , R_2 et R_l forment le pont de résistance. Le signal du pont entraîne le régulateur C par les nœuds de sommation qui produisent une tension d'erreur U_ϵ . Le régulateur fournit au pont une tension U_R telle que lors du chauffage du fil R_S le pont de résistances devrait être le plus possible à l'équilibre. Un autre élément de la tension offset U_0 qui permet le fonctionnement du système au moment où il est allumé, et aussi il contrôle les paramètres statiques du circuit.

Dans l'état d'équilibre la tension d'erreur U_ϵ tend vers zéro, l'équation suivante est satisfaite

$$U_R \left(\frac{R_S}{R_S + R_l} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) - U_0 = 0 \quad (5)$$

En supposant que la tension de sortie soit proche de zéro la résistance du capteur et la température resteront à un niveau constant; le signal de sortie est $U_l = K_l R_l I_S$ qui est proportionnel au courant du capteur I_S ; l'amplificateur K_l est utilisé pour amplifier la tension à travers la résistance R_l , comme le montre la figure ci-dessous [17].

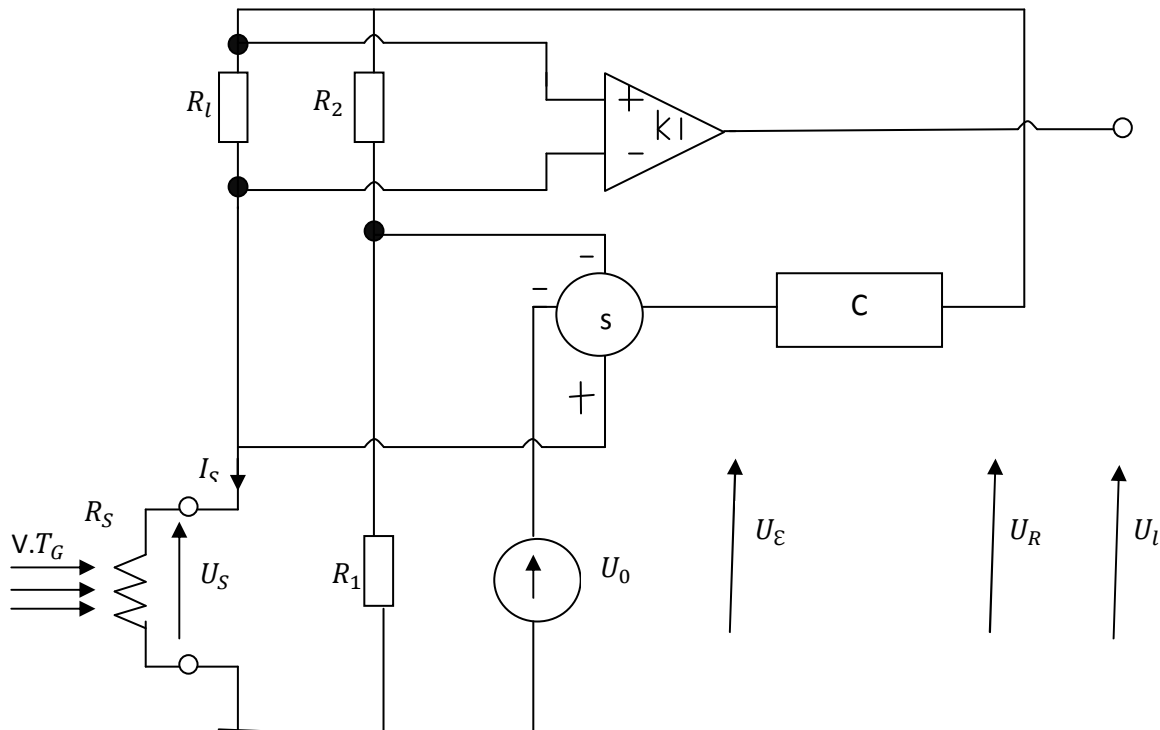


Figure II.8 : Montage de mesure d'un anémomètre à température constante [17].

II.4 La modélisation

II.4.1 Notion de Modèle

Pour pouvoir utiliser les schémas précédents, il faut pouvoir décrire chaque processus physique situé à l'intérieur des blocs rectangulaires. Pour pouvoir analyser le comportement de ces processus, il est intéressant de pouvoir disposer d'un modèle mathématique de ces processus. La phase de modélisation est essentielle dans le processus de mise au point de régulateurs.

II.4.2 Définition du modèle mathématique

On définit le modèle mathématique d'un système dynamique comme un ensemble d'équations qui représentent le comportement dynamique du système avec la précision souhaitée. Il est obtenu en écrivant les lois de la physique qui régissent le comportement du système (lois fondamentales de la dynamique, bilan des forces, de matière, etc...). Pour obtenir le modèle on suit les étapes suivantes :

- Définir le système étudié et ses composants élémentaires
- Formuler le modèle mathématique idéal (modèle de connaissance) et dresser la liste des hypothèses à retenir
- Ecrire les lois de la physique (équations différentielles)
- Définir le modèle dédié à la régulation (fonction de transfert).

Il ne sert pas à grand chose de vouloir obtenir par les équations un modèle mathématique très compliqué. En effet, mieux vaut émettre plusieurs hypothèses simplificatrices afin de simplifier l'étude du système et la démarche future de mise au point de régulateur. Toutefois, le modèle mathématique devra être suffisamment précis pour refléter le comportement réel du système. On voit donc apparaître un compromis précision/complexité dans l'étape de modélisation. De plus, étant donné le caractère non-linéaire des processus réels, on est naturellement amenés à faire des simplifications telles que la linéarisation autour d'un point de fonctionnement en utilisant le développement en série de Taylor).

II.5 Modélisation d'un anémomètre à température constante

Le montage de l'anémomètre à température constante est constitué d'un pont de Wheatstone, un amplificateur opérationnel, un régulateur Proportionnel intégral, la figure ci-après montre l'emplacement de chaque constituant.

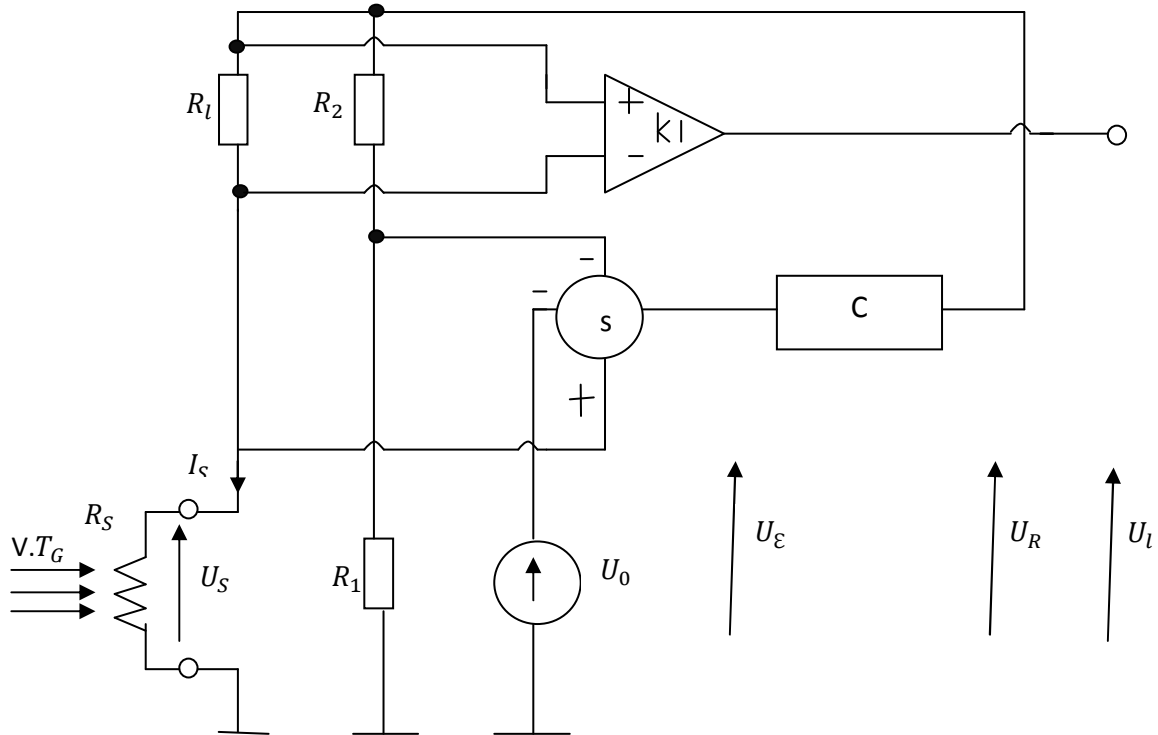


Figure I.9 : Montage de mesure d'un anémomètre à température constante [16].

Le fil chaud est décrit par :

$$I_S^2 R_S = I_L^2 (R_S - R_{SG}) \left[1 + \left(\frac{V}{V_L} \right)^n \right] + I_L^2 \tau_1 \frac{dR_S}{dt} \quad (6) \quad [18]$$

R_S : la résistance du capteur.

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

I_S : Courant qui passe par R_S .

I_L : Le courant qui passe par R_L ($V = V_L$ si $T = 20^\circ\text{C}$).

τ_1 : Inertie thermique (constante du temps).

n : constante, $n=0.5$.

En appliquant la loi d'Ohm aux bornes de la résistance R_S , on aura :

$$I_S = \frac{U_S}{R_S} \quad (7)$$

$$U_S = U_R \left(\frac{R_S}{R_S + R_L} \right) \quad (8)$$

On remplace l'équation (8) dans l'équation (6) on aura :

$$\frac{dR_S}{dt} = \frac{I_S^2 R_S - I_L^2 (R_S - R_{SG}) \left(1 + \left(\frac{V}{V_L} \right)^n \right)}{I_S^2 \tau_l} \quad (9)$$

On remplace I_S par son équation :

$$\frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L)} = (R_S - R_{SG}) \left(1 + \left(\frac{V}{V_L} \right)^n \right) \quad (10)$$

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

$$\left(\frac{V}{V_L} \right)^n = \frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L) (R_S - R_{SG})} - 1 \quad (11)$$

L'équation de la vitesse est donc :

$$V = \left[\frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L) (R_S - R_{SG})} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

II.5 Simulation et 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 conditions initiales :

$$U_R = 1 \text{ V}, R_{S0} = 6 \Omega.$$

Tableau 1 : Les paramètres du fil chaud [19]

R_{SG} (Ω)	T_G (K)	α_G (1/K)	I_L (A)	V_L (V)	τ_l (s)	N
5	293	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$	4	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,5

II.5.1 courbe obtenue en boucle ouverte :

Pou étudier le capteur en boucle ouverte, on applique numériquement une vitesse de vent et on essaie de la récupérer à partir de la mesure de la résistance. A l'instant $t=0.1s$, on augmente l vitesse du vent. Les résultats obtenus sont donnés par la figure II.5.

L'expression de la vitesse du vent utilisé est :

$$V = V_M + M \cdot D_V \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (13)$$

V_M : Vitesse maximale du vent.

D_V : L'amplitude de la vitesse.

M : Perturbation appliquée sur le système à $t=0.05s$.

f : Fréquence du signal.

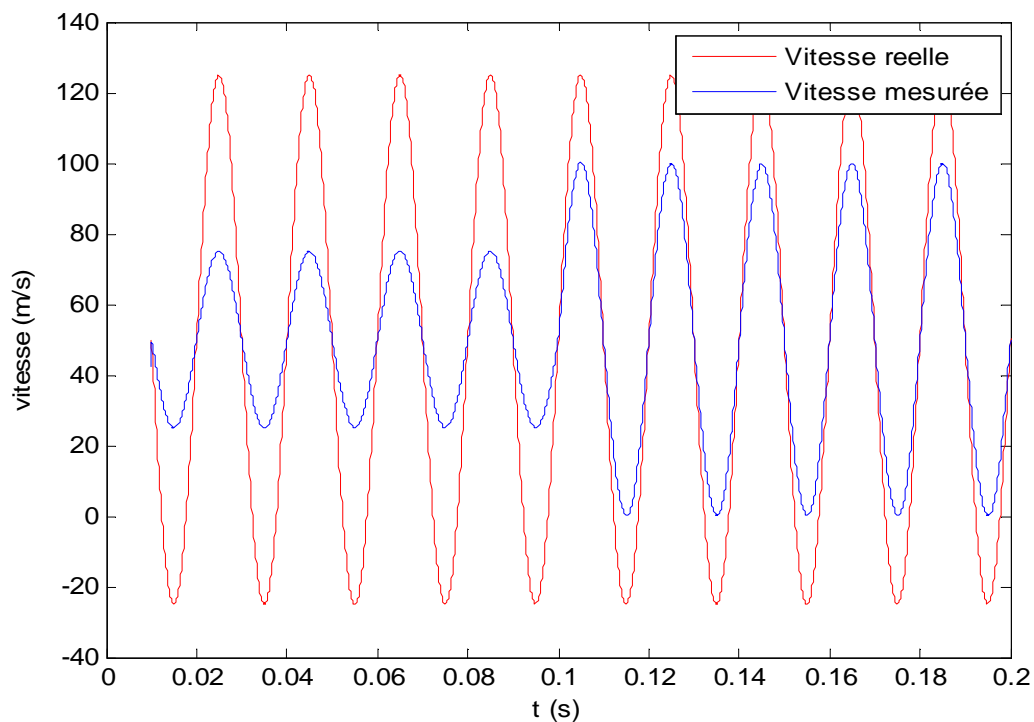


Figure II.10 : Réponse du système en boucle ouverte.

II.5.2 Interprétation de la courbe

La vitesse représentée en rouge est la vitesse appliquée au capteur, est une sorte de consigne, et celle en bleu représente la sortie de notre système qui est une vitesse mesurée. On constate une erreur importante entre les vitesses. Par conséquent le capteur nécessite un bouclage du système et le bon choix du régulateur (prendre les bons paramètres).

II.6 Conclusion

L'anémomètre à fil chaud dans son fonctionnement peut être conditionné par plusieurs grandeurs, par la tension ce qui nous donne le CVA, par le courant (CCA) et par la température (CTA).

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le CTA. Ce dernier est caractérisé par un signal d'erreur considérable entre les vitesses mesurées et réelles qu'on ne peut pas négliger. Pour corriger cet écart, on doit introduire un régulateur. Le chapitre suivant est consacré à la régulation automatique.

CHAPITRE III

Régulation Automatique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux régulateurs. Ces régulateurs ont pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

III.2 Définitions

III. 2.1 Asservissement

Il faut effectuer des cycles de consignes correspondant en fonctionnement normal pour plusieurs valeurs de perturbations et vérifier que la sortie suit l'entrée dans ces conditions. Il est éventuellement possible d'ajuster les paramètres [20].

III. 2.2 Régulation

Il s'agit d'imposer une consigne qui correspond au cahier des charges et en agissant sur les perturbations, de vérifier que le système a les performances attendues indépendamment des perturbations. Eventuellement, nous pouvons modifier les paramètres du correcteur pour ajuster les performances [20].

III.2.3 Amplificateur opérationnel

Pour la réalisation des diverses structures de régulateurs, nous admettrons que les amplificateurs opérationnels sont idéaux. La régulation doit garantir le fonctionnement du procédé selon un objectif. Cet objectif, traduit en une consigne, est assuré en maîtrisant une ou plusieurs grandeurs mesurées quelles que soient les perturbations subies par le procédé. Dans le cahier des charges on chiffre par exemple le temps de réponse minimal, ou maximal, lors d'un changement de la consigne et les écarts maximaux tolérés lors de perturbations [21].

III.3 Boucle de régulation

III.3.1 Étapes nécessaires

Pour réaliser une boucle, ou une chaîne, de régulation, trois étapes sont nécessaires :

- l'observation de la grandeur à maîtriser, faite par le capteur transmetteur.
- la réflexion sur l'action à entreprendre, qui est fonction de l'écart en rapport avec l'objectif fixé, effectuée par le régulateur.
- l'action sur une grandeur incidente, à l'aide d'un actionneur, vanne ou moteur.

Chapitre III : Régulation automatique

La régulation peut être manuelle, effectuée par un technicien, ou automatique, assurée par un régulateur [22].

III.3.2 Terminologie employée

- Grandeur réglée : grandeur à maîtriser.
- Grandeur incidente : grandeur ayant une influence sur la grandeur réglée.
- Grandeur réglante : grandeur incidente commandée par le régulateur.
- Grandeur perturbatrice : grandeur incidente non contrôlée.

III.3.3 Régulation en chaîne ouverte

L'observation n'est pas celle de la grandeur à maîtriser mais celle d'une grandeur incidente. La réflexion est l'étape où la commande prend en compte une relation préétablie entre la grandeur observée et la grandeur réglante. L'action modifie alors la grandeur à maîtriser. Cette régulation forme une chaîne ouverte car l'action ne modifie pas la grandeur mesurée [22].

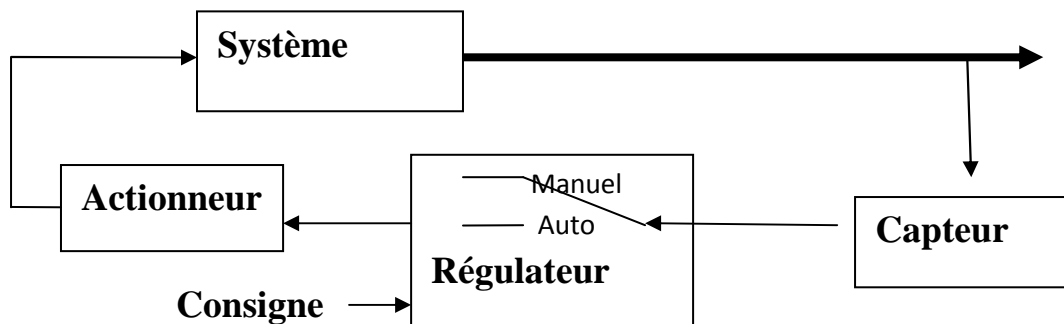


Figure III.1 : Situation d'un régulateur dans une chaîne ouverte.

III.3.4 Régulation en boucle fermée

L'observation se porte sur la grandeur à maîtriser. L'étape de réflexion détermine l'écart entre la consigne et la grandeur à maîtriser. En fonction de cet écart et des règles d'évolution fixées, on en déduit l'action à entreprendre. L'action modifie la grandeur réglante et finalement la grandeur à maîtriser. Cette régulation forme une boucle fermée car l'action modifie la grandeur mesurée. Elle comporte une contre réaction ou retour d'information [22].

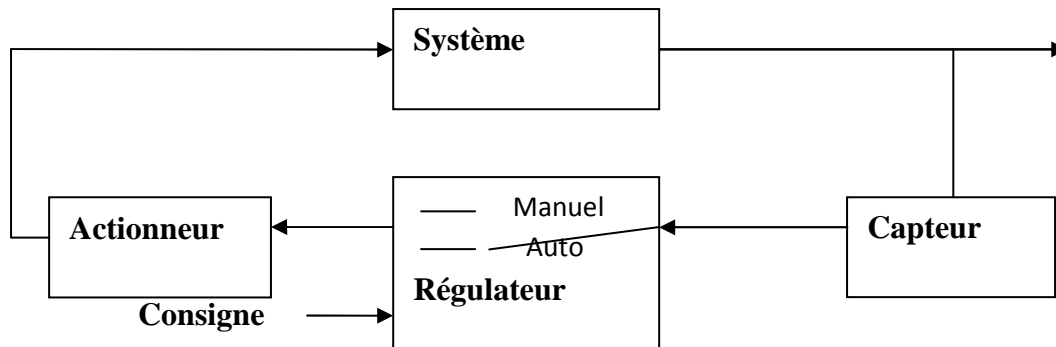


Figure III.2 : Situation d'un régulateur dans une chaîne fermée.

Remarque :

Ne pas confondre boucle ouverte et boucle en mode manuel : une boucle ouverte peut fonctionner en mode automatique ou en mode manuel.

Une boucle fermée mise en mode manuel devient une boucle ouverte.

III.4 Qualités d'une régulation

La première qualité à assurer d'une régulation est la stabilité puisque toute instabilité conduit à la perte de contrôle du procédé. L'amortissement quantifie le degré de stabilité dans l'espace temporel.

La précision, statique ou dynamique, est souvent la deuxième qualité attendue d'une régulation. La rapidité est une qualité opposée à la précision dynamique et liée à l'amortissement.

III.4.1 Stabilité

- Stabilité dans le domaine temporel

La boucle de régulation est stable lorsqu'elle est soumise à un incrément de consigne ou d'une grandeur perturbatrice, la mesure retrouve un état stable.

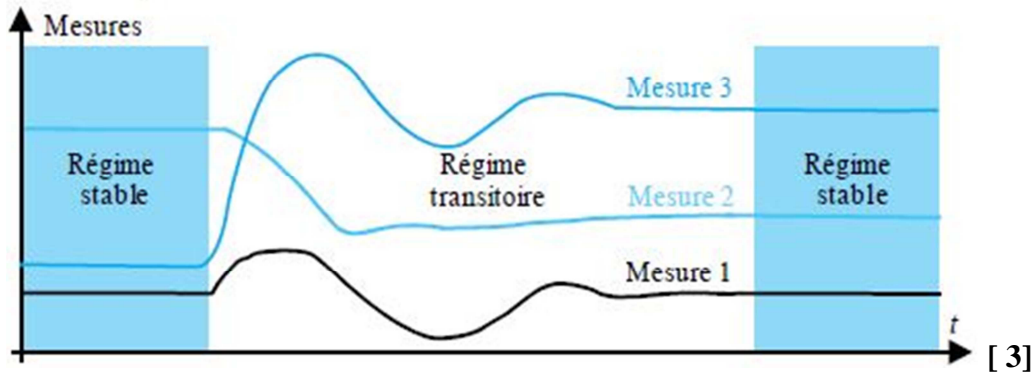


Figure III.3 : Stabilité pour plusieurs mesures.

III.4.2 Amortissement

Lorsqu'une boucle de régulation est stable, l'amortissement caractérise l'atténuation des oscillations de la mesure suite à une variation de consigne ou d'une grandeur perturbatrice. Un amortissement faible engendre de grands dépassements, et des dépassements faibles ou inexistants correspondent à un fort amortissement.

Le comportement d'une fonction de transfert du second ordre à un échelon unitaire montre l'influence entre la valeur du coefficient d'amortissement h et les dépassements $D1$ et $D2$ transitoires. Imposer un facteur d'amortissement h à la boucle de régulation permet de régler le dépassement maximal autorisé lors du régime transitoire sur un changement de consigne, le comportement lors d'une perturbation étant d'évolution similaire.

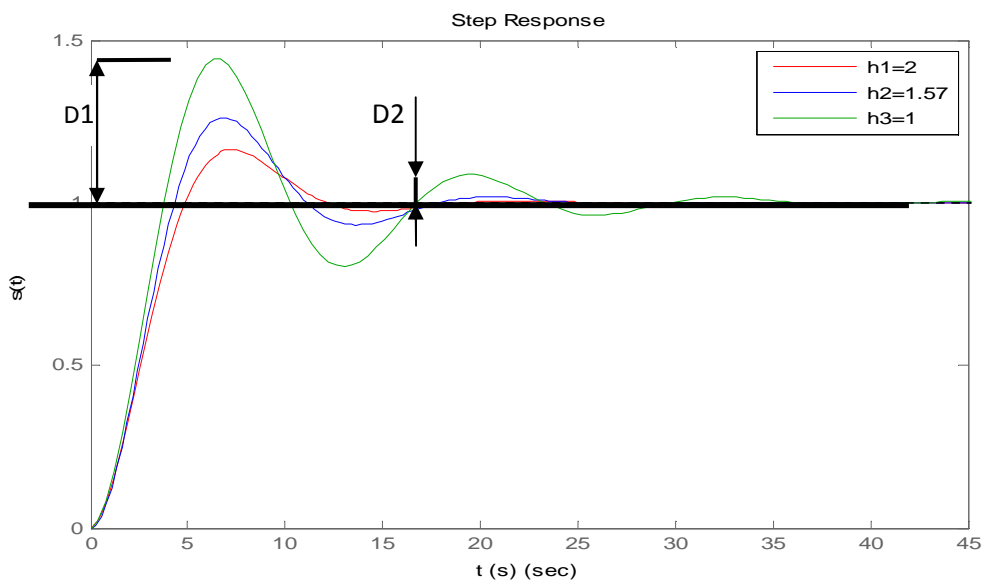


Figure III.4 : Réponse indicielle en fonction du coefficient d'amortissement h d'une fonction de transfert du second ordre.

III.4.3 Rapidité

Elle traduit la durée du régime transitoire et s'évalue, au choix, par :

- le temps de réponse t_r correspondant au temps que met la mesure à rester dans une zone à $\pm 5\%$ de la variation finale soit entre 95 % et 105 % ;
- le temps de montée t_m correspondant au temps nécessaire à la mesure pour passer de 10 % à 90 % de la valeur finale.

III.4.4 Précision

Elle est évaluée par son aptitude à obtenir une mesure proche de la consigne en régime permanent ou en régime transitoire lors d'un changement de consigne ou d'une perturbation.

- En régime permanent : La précision d'une régulation de maintien ou de poursuite se chiffre par la différence entre la consigne et la mesure.
- En régime transitoire : La précision dynamique d'une régulation de poursuite est évaluée par l'écart maximal obtenu pour le premier dépassement lors d'un changement de consigne.

La précision dynamique d'une régulation de maintien est évaluée par l'écart maximal obtenu entre la consigne et la mesure lors du régime transitoire.

Remarque :

Le facteur amortissement est lié à la précision dynamique : un amortissement faible correspond à un dépassement important et conduit à une précision dynamique médiocre.

III.5 Régulateur PID

III.5.1 Rôle du régulateur

Le régulateur doit maintenir une mesure égale à une consigne quelles que soient les perturbations subies par le procédé. Le réglage des paramètres de son algorithme dépend des performances attendues en temps de réponse et en précision dynamique lors de ces perturbations, mais aussi des changements de consigne.

III.5.2 Régulateur PID

Un régulateur est constitué d'un comparateur pour observer l'écart entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Le correcteur a une action PID (Proportionnelle, Intégrale et Dérivée) et, associé à un comparateur, forme un régulateur PID comme le présente la figure ci-dessous :

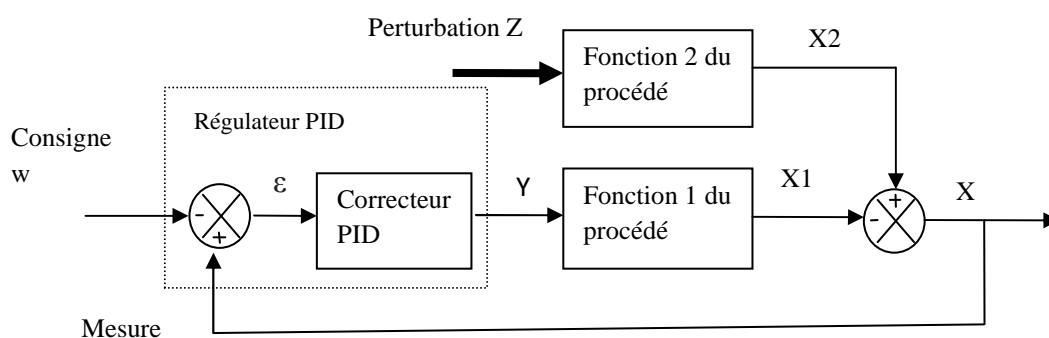


Figure III.5 : Situation du régulateur PID.

Notation :

X signal de mesure ; W consigne (valeur entrée ou signal), et ε signal d'écart (ou d'erreur) sont exprimés dans la même unité.

Le signal Y élaboré par le régulateur est le signal de commande.

L'écart = mesure – consigne soit $\varepsilon = X - W$.

III.5.3 Régulateur physique

Le régulateur se présente sous plusieurs formes : un appareil indépendant, un module intégré dans l'unité centrale d'un Automate Programmable Industriel (API), ou un bloc fonctionnel de la bibliothèque de cet API. En bus de terrain, une fonction. Le PID est intégrée dans les capteurs-transmetteurs et les actionneurs.

III.5.4 Mode automatique ou mode manuel

Deux modes de fonctionnement du régulateur sont disponibles :

- Le mode automatique est le mode normal de fonctionnement de la régulation. La valeur de la sortie Y est calculée par le régulateur et dépend de la valeur de l'écart ε à ce même instant. Le technicien ne peut pas modifier la valeur de la sortie.
- Le mode manuel est le mode permettant au technicien de commander directement le procédé en fixant lui-même la valeur de la sortie. Le correcteur n'agit plus, le régulateur devient alors une station de commande manuelle.

Le démarrage des installations se fait très souvent en mode manuel.

III.5.6 Sens d'action d'un régulateur

- Le régulateur est à action directe lorsque la sortie évolue dans le même sens que l'écart.
- Le régulateur est à action inverse lorsque la sortie évolue dans le sens inverse de l'écart.

III.5.6 Choix du sens d'action du régulateur

Un régulateur doit donc présenter une inversion de sens par rapport au procédé. La connaissance du sens d'évolution du procédé (direct ou inverse) permet de choisir le sens du régulateur (respectivement, inverse ou direct).

III.5.7 Action proportionnelle

III.5.7.1. Bande proportionnelle

L'action proportionnelle est réglée, au choix du fabricant, soit par :

- le coefficient d'amplification, noté A , aussi appelé « gain » et noté K_r ou G_r .
- la bande proportionnelle (BP ou XP) exprimé en pourcentage :

$$BP(\%) = \frac{100}{A} \quad (1)$$

III.5.7.2 Équation

Régulateur en sens direct	Régulateur en sens inverse
$Y(t) = + A \cdot \varepsilon(t) + Y0$	$Y(t) = - A \cdot \varepsilon(t) + Y0$

$Y0$ est le centrage de bande proportionnelle ou biais (traduction de l'anglais *bias*).

En l'absence de $Y0$, lorsque l'écart $\varepsilon(t)$ est nul, la correction est nulle et la valeur de sortie ne peut alors maintenir la mesure égale à la consigne. Le centrage de bande $Y0$ est indispensable au fonctionnement, et sa valeur est déterminée à partir de la caractéristique statique du procédé

III.5.7.3 Réalisation pratique de l'action proportionnelle

Le montage des deux actions proportionnelle et intégrale est donné par la figure ci-après :

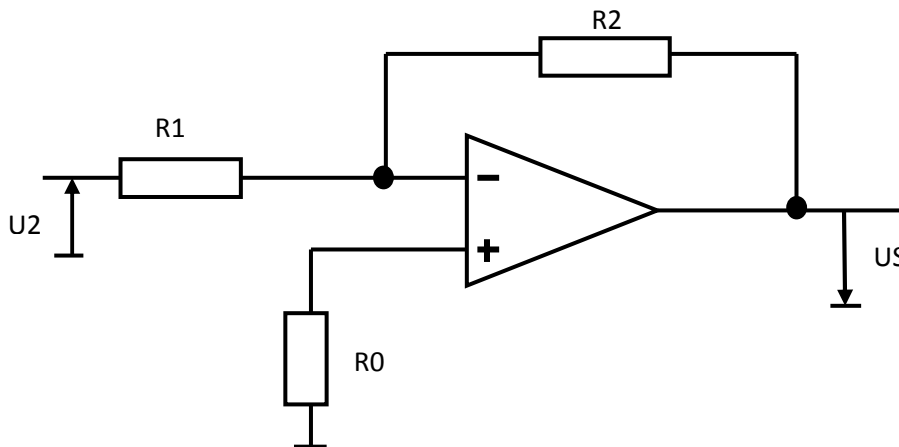


Figure III.6 Schéma d'un régulateur Proportionnel.

On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur

$$U_{\varepsilon} \frac{1}{R_1} = u_{\varepsilon} \frac{1}{R_2}.$$

III.5.7.4 Fonction de transfert

La fonction de transfert sera de la forme : $G_R(s) = \frac{U_S(s)}{U(s)} = \frac{R_2}{R_1}.$

III.5.8 Action intégrale

III.5.8.1 Coefficient d'action intégrale

L'action intégrale est réglée, soit par :

- la constante de temps d'action intégrale, notée T_i , exprimée très souvent en minute.
- le coefficient ou taux d'action intégrale K_i .

III.5.8.2 Équation

Équation temporelle	Fonction de transfert
$Y(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt = K_i \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt$	$G_i(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{T_i P} = \frac{K_i}{P}$

L'action intégrale est obligatoirement couplée à l'action proportionnelle. Le centrage de bande fixe Y_0 n'existe plus : c'est l'action intégrale, par son effet de mémoire, qui change en permanence la valeur de Y .

III.5.9 Régulateur PI

III.5.9.1 Fonction de transfert

La fonction de transfert du régulateur PI prend la forme générale suivante :

$$G_r(s) = K_p \frac{1 + s \cdot T_i}{s \cdot T_i}$$

III.5.9.2 Réalisation pratique

Le schéma de principe d'un régulateur PI (proportionnel-intégrateur) possède un circuit de contre-réaction formé d'un condensateur C_2 mis en série avec la résistance R_2 , cela est présenté par la figure ci-après

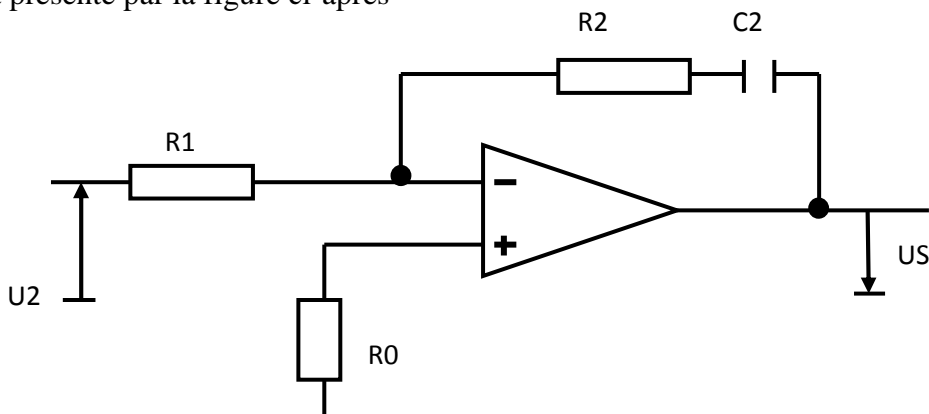


Figure III.7 Schéma d'un régulateur Proportionnel intégral.

On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur

$$U_e = \frac{1}{R_1} = U_s \frac{1+sR_2C_2}{sC_2}$$

Et finalement la fonction de transfert :

$$G_r(s) = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1+sR_2C_2}{sC_2}$$

III.5.10 Action dérivée

III.5.10.1 Coefficient d'action dérivée

L'action dérivée est réglée par la constante de temps d'action dérivée, notée T_d , exprimée en seconde

III.5.10.2 Équations

Deux possibilités pour cette action :

Dérivé sur l'écart		Dérivée sur la mesure
Equation temporelle	Fonction de transfert	Equation temporelle
$Y(t) = t_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$	$C_d(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} \cdot T_d \cdot P$	$Y(t) = T_d \cdot \frac{dX(t)}{dt}$

L'action dérivée sur la mesure n'a aucune influence sur la sortie Y lors d'un changement de consigne. L'action dérivée est obligatoirement associée à l'action proportionnelle.

III.5.11 Régulateur PD :

III.5.11.1 Fonction de transfert :

$$G_R(s) = \frac{U_S(s)}{U_e(s)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1+s(R_{C1}+R_1)C_1}{1+sR_{C1}C_1}$$

Avec :

$$K_P = \frac{R_2}{R_1}; \quad T_d = \frac{1}{(R_C+R_1)C_1}; \quad T_d = \frac{1}{R_{C1}C_1}$$

III.5.11.2 Réalisation pratique :

Le montage des deux actions proportionnelle et intégrale est donné par la figure ci-après :

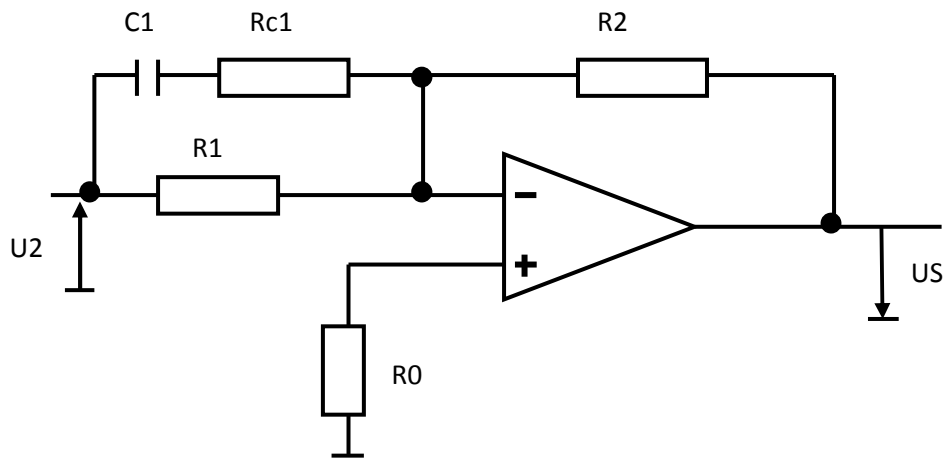


Figure III.8 : Schéma d'un régulateur Proportionnel intégral.

III.5.12 Régulateur PID

III.5.12.1 Fonction de transfert

La fonction de transfert du régulateur avec les deux actions proportionnelle et dérivée est donnée comme suit :

$$G_R = K_P \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \frac{1 + sT_2}{(1 + sT_{P1})(1 + sT_{P2})}$$

III.5.12.2 Réalisation pratique

La réalisation des trois actions

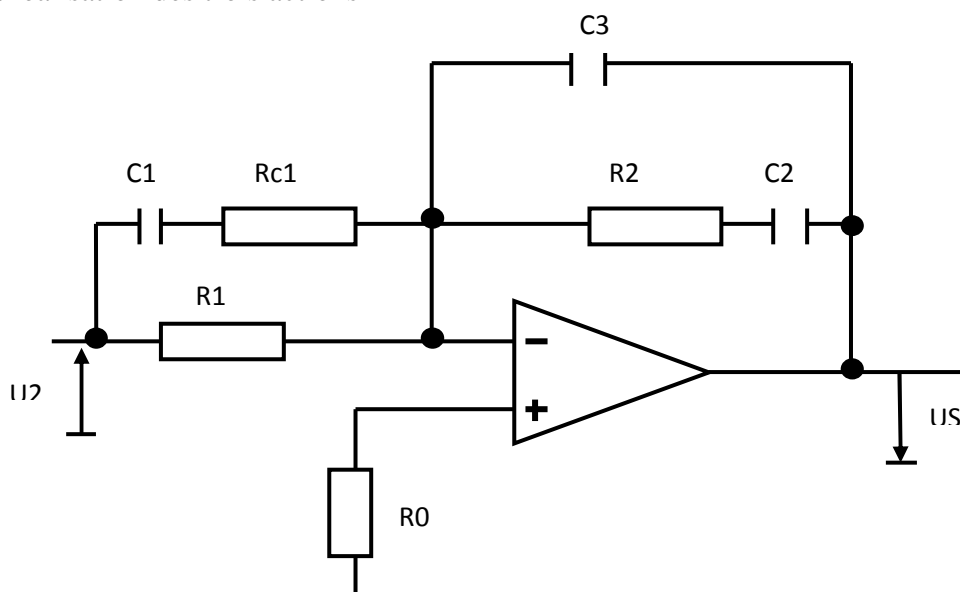


Figure III.9 : Schéma des trois actions Proportionnel intégral et dérivée.

III.6 Effets des actions PID

III.6.1 Effet de l'action proportionnelle

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne.

L'étude de l'action proportionnelle sur un système naturellement stable en boucle fermée, montre que lors d'un changement de consigne, le régime permanent atteint un écart résiduel.

Lors d'une perturbation, la mesure s'écarte de la consigne, la régulation proportionnelle tend à la ramener tout en laissant subsister un écart résiduel ε , lorsque le régime permanent est atteint.

III.6.2 Effet de l'action Intégrale :

Le rôle de l'action intégrale est d'annuler l'écart entre la mesure et la consigne. Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est proportionnel à l'intégrale de l'écart mesure-consigne. L'action intégrale est généralement associée à l'action proportionnelle.

Comme dans le cas de l'action proportionnelle, une augmentation excessive de l'action intégrale (diminution de T_i) peut être source d'instabilité. Le comportement de l'action intégrale sur un procédé instable, est sensiblement le même que sur un procédé stable. Il faut noter que l'action intégrale est nécessaire. Lors de changement de consigne, son intérêt est moindre car l'écart s'annule naturellement du fait que le procédé est lui-même intégrateur. Dans ce cas l'action intégrale donne une réponse plus rapide qu'en régulation à action proportionnelle seule.

III.6.3 Rôle de l'action dérivée :

Le rôle de l'action dérivée est de compenser les effets du temps mort (retard) du procédé. Elle a un effet stabilisateur mais une valeur excessive peut entraîner l'instabilité. Son rôle est identique quelle que soit la nature du procédé. La sortie du dérivateur est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart. Notons que l'action dérivée ne peut pas être utilisée seule.

Dans le cas d'un signal de mesure bruité, la dérivée amplifie le bruit, ce qui rend son utilisation délicate ou impossible. La solution à ce problème consiste, soit à filtrer le signal de mesure, soit à utiliser un module de dérivée filtrée avec un gain transitoire réglable. Dans tous

Chapitre III : Régulation automatique

les algorithmes PID, la dérivée est filtrée, mais la valeur du filtre (gain transitoire), est rarement réglable sur les régulateurs monoblocs ; elle l'est parfois, sur les modules PID des systèmes numériques.

III.7 Réglage des actions PID

III.7.1 Réglage de l'action proportionnelle

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement.
- Mettre le régulateur en P seul, ($T_i = \max.$ ou $n = 0$ et $T_d = 0$).
- Afficher un gain Gr faible ($Gr < 1$).
- Egaliser la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Observer l'enregistrement de l'évolution du signal de mesure.
- Si elle est sur amortie (apériodique), augmenter le gain Gr (ou diminuer BP %).
- Si elle présente plus de deux oscillations, diminuer le gain Gr (ou augmenter BP %).

Au cours des réglages, les observations suivantes peuvent être faites à mesure ne rejoint pas la consigne.

- L'écart diminue avec le gain mais la stabilité se dégrade
- La réponse s'accélère en augmentant le gain
- Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité

III.7.2 Réglage de l'action intégrale

- Conserver les valeurs des actions proportionnelle et dérivée déterminée précédemment.
- Afficher une action intégrale faible.
- Pour un premier essai afficher $T_i =$ quelques minutes.
- Egaliser la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %. Si la réponse est sur amortie ou trop lente, diminuer T_i .
- Si la réponse présente un dépassement trop important, on augmente T_i .
- L'action intégrale donne la précision statique
- La mesure rejoint la consigne
- La réponse s'accélère en augmentant l'action intégrale
- Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

III.7.3 Réglage de l'action dérivée

- L'action dérivée ne se justifie que si la mesure a un certain retard.
- Conserver la valeur de l'action proportionnelle déterminée précédemment et l'intégrale minimale.
- Afficher une action dérivée faible (T_d égal à quelques secondes ($\tau/3$)).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Si la réponse ne s'amortie pas, augmenter T_d .
- Si la réponse est oscillante ou si elle est plus lente, diminuer T_d .
- L'action dérivée a un effet anticipatif.
- L'action dérivée stabilise la réponse du procédé.
- La réponse s'accélère en augmentant l'action dérivée.
- Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

III.8 Compromis

Les comportements en régulation de maintien ou de poursuite étant différents, le réglage idéal n'existe pas. Un bon réglage est un compromis entre les trois actions, pour obtenir une réponse rapide et précise en dynamique comme en statique.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé des généralités sur la régulation automatique. Puis on s'est intéressé aux régulateurs PID en étudiant ces différentes actions proportionnelle, intégrale et dérivée, et leur mise en œuvre pratique dans des circuits électriques.

Dans le chapitre suivant, un PI sera utilisé pour améliorer la précision de l'anémomètre étudié au chapitre précédent.

CHAPITRE IV

Application d'un régulateur PI sur un anémomètre à température constante

IV.1 Introduction

Notre but dans ce chapitre est d'améliorer des performances de l'anémomètre, pour ce faire on utilise un capteur à fil chaud qui est conditionné avec un circuit température constante en lui intégrant un régulateur proportionnel intégral (PI) à fin de minimiser le signal d'erreur et atteindre la valeur la plus proche possible de la vitesse réelle du vent .

IV.2 Montage du régulateur

Le montage du correcteur proportionnel et intégral est présenté dans la figure IV.1

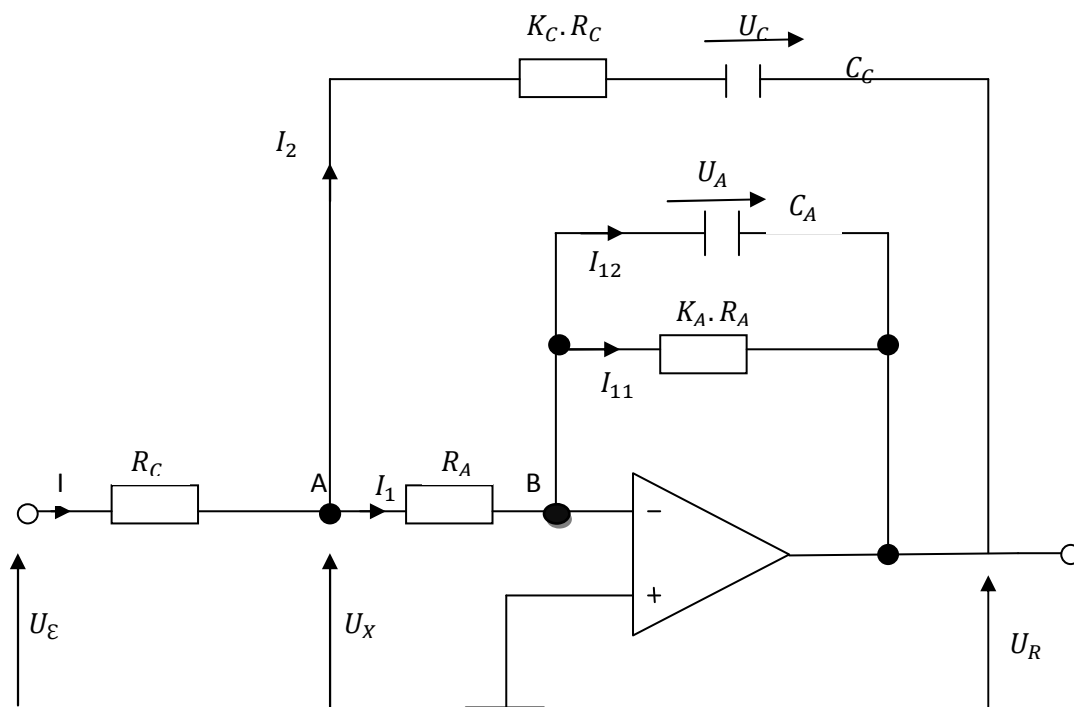


Figure IV.1: Montage du correcteur proportionnel intégral

Déterminant les équations du circuit

Variation de la tension U_R

Nœud A :

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

$$I_2 = I_C$$

$$U_C = -\frac{1}{c} \int I_C dt \Rightarrow I_C = -C_C \frac{dU_R}{dt}$$

Nœud B :

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

$$U_R = U_A$$

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

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

En remplaçant l'expression de la tension U_X dans l'équation (3), on obtient :

$$-\frac{U_R}{K_A} - R_A C_A \frac{dU_R}{dt} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{K_C R_C} + \frac{1}{R_C} \right) = \frac{U_\varepsilon}{R_C} + \frac{U_R - U_C}{K_C R_C} \quad (5)$$

En multipliant l'équation obtenue par K_A :

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

Avec $\tau_A = C_A R_A K_A$

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

Variation de la tension U_C

$$U_X - U_R = -U_C + R_C K_C I_{CC}$$

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

$$U_x - U_R = -U_c - R_c K_c C_c \frac{dU_c}{dt} \implies U_x = U_R - U_c - R_c K_c C_c \frac{dU_c}{dt} \quad (8)$$

On pose $\tau_c = R_c K_c C_c$

$$U_x - U_R = -U_c - \tau_c \frac{dU_c}{dt} \quad (9)$$

La loi d'ohm aux bornes de R_c nous donne :

$$U_\varepsilon = R_c I + U_x$$

$$U_\varepsilon - U_x = R_c (I_1 + I_{cc})$$

$$U_\varepsilon - U_x = R_c \left(\frac{U_x}{R_A} - C_c \frac{dU_c}{dt} \right)$$

$$-U_x \left(1 + \frac{R_c}{R_A} \right) = -R_c C_c \frac{dU_c}{dt} - U_\varepsilon \quad (10)$$

En remplaçant (9) dans (10), on obtient :

$$\left(-U_R + U_c + \tau_c \frac{dU_c}{dt} \right) \left(1 + \frac{R_c}{R_A} \right) = -R_c C_c \frac{dU_c}{dt} - U_\varepsilon$$

$$-U_R \left(\frac{R_A + R_c}{R_A} \right) + U_c \left(\frac{R_A + R_c}{R_A} \right) + \tau_c \left(\frac{R_A + R_c}{R_A} \right) \frac{dU_c}{dt} = -R_c C_c \frac{dU_c}{dt} - U_\varepsilon$$

$$\frac{dU_c}{dt} \left(\frac{\tau_c(R_A + R_c) + R_c C_c R_A}{R_A} \right) = U_R \left(\frac{R_A + R_c}{R_A} \right) - U_c \left(\frac{R_A + R_c}{R_A} \right) - U_\varepsilon R_A$$

On multiplie cette dernière équation par K_c on aura :

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{U_c(R_A K_c + R_c K_c) + U_R(R_A K_c + R_c K_c) - U_\varepsilon R_A K_c}{\tau_c(R_A K_c + R_c K_c + R_A)} \quad (12)$$

Le régulateur est régi par les équations différentielle suivantes qui dépendent de :

$$U_\varepsilon, U_R, U_c.$$

$$\begin{cases} \frac{dU_R}{dt} = \frac{K_A R_A U_C - (K_A R_A + K_C R_C + K_C R_A + R_A) U_R - K_C K_A R_A U_\varepsilon}{\tau_A (K_C R_C + K_C R_A + K_A)} \\ \frac{dU_C}{dt} = \frac{U_C (R_A K_C + R_C K_C) + U_R (R_A K_C + R_C K_C) - U_\varepsilon R_A K_C}{\tau_c (R_A K_C + R_C K_C + R_A)} \end{cases}$$

U_C : la tension aux bornes de condensateur.

U_R : la tension à la sortie de régulateur .

U_ε : Signal d'erreur.

IV.3 Model dynamique du système bouclé :

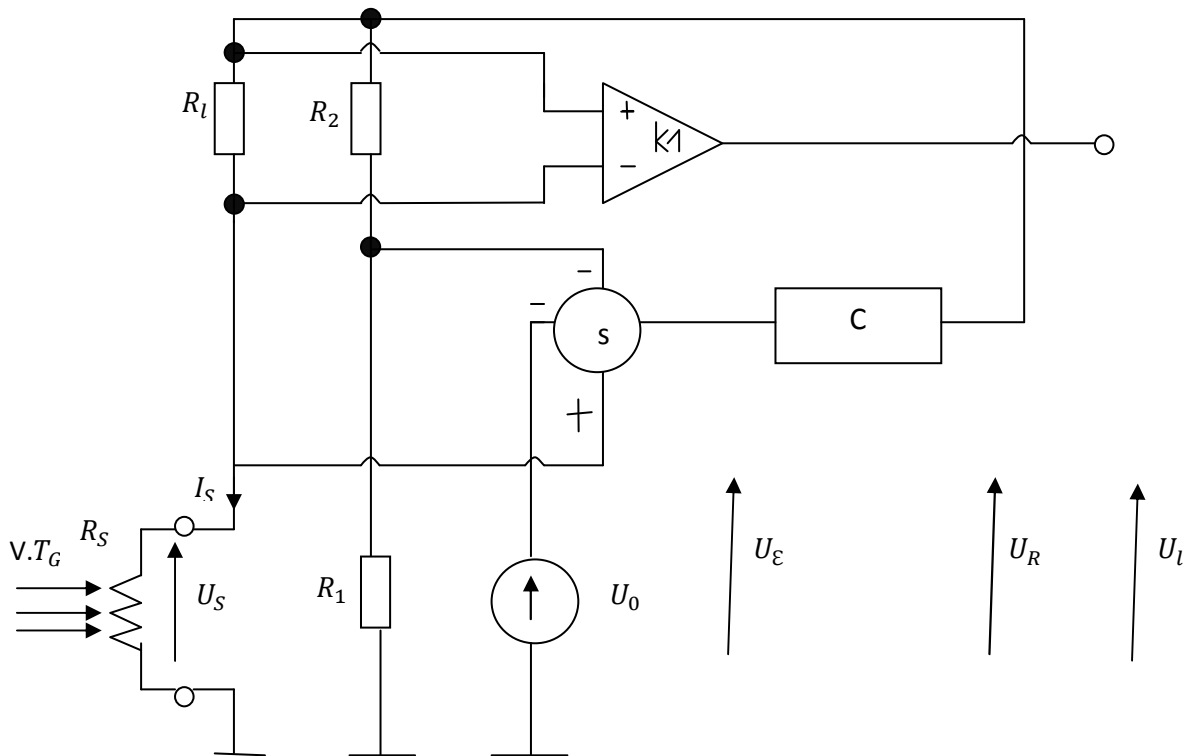


Figure IV.2. Montage de mesure d'anémomètre à température constante.

A la sortie de soustracteur on a le signal d'erreur U_ε :

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

U_0 : 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_e dans les équations différentielles du régulateur on aura :

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{-K_C(R_C + K_A)U_C + K_C\{R_C + R_A - R_A \left[\frac{R_S}{R_S + R_L} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right]\}U_R + K_C R_A U_0}{\tau_c (R_A K_C + R_C K_C + R_A)} \quad (13)$$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{K_A R_A U_C - \{K_A R_A + K_C R_C + K_C R_A + R_A - K_A K_C R_A \left[\frac{R_S}{R_S + R_L} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right]\}U_R + K_C K_A R_A U_0}{\tau_c (R_A K_C + R_C K_C + R_A)} \quad (14)$$

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

Le fil chaud est décrit par :

$$I_S^2 R_S = I_L^2 (R_S - R_{SG}) \left[1 + \left(\frac{V}{V_L} \right)^n \right] + I_L^2 \tau_1 \frac{dR_S}{dt} \quad (15)$$

R_S : la résistance du capteur

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

I_S : Courant qui passe par R_S .

I_L : Le courant qui passe par R_L ($V = V_L$ si $T = 20^\circ\text{C}$).

τ_1 : Inertie thermique (constante du temps).

On appliquant la loi d'ohm l'intensité aux bornes de la résistance R_S on aura :

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

On les remplace dans l'équation (A) on aura :

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

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

On remplace I_S par son expression dans l'équation (15), on obtient :

$$\frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L)} = (R_S - R_{SG}) \left(1 + \left(\frac{V}{V_L} \right)^n \right)$$

$$\left(\frac{V}{V_L} \right)^n = \frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L) (R_S - R_{SG})} - 1$$

$$V = V_L \left[\frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_L) (R_S - R_{SG})} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

En posant $U_C = x_1(t)$; $U_R = x_2(t)$; $R_S = x_3(t)$

Le système est représenté par le modèle d'état suivant :

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{-K_C(R_C + K_A)x_1(t) + K_C \left\{ R_C + R_A - R_A \left[\frac{x_3(t)}{(x_3(t) + R_L)} - \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \right] \right\} x_2(t) + K_C R_A U_0}{\tau_c (R_A K_C + R_C K_C + R_A)}$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{K_A R_A - \{K_A R_A + K_C R_C + K_C R_A + R_A - K_A K_C R_A \left[\frac{x_3(t)}{(x_3(t) + R_L)} - \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \right]\} x_2(t) + K_C K_A R_A U_0}{\tau_c (R_A K_C + R_C K_C + R_A)}$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = \frac{X_2(t)^2 R_S / I_L^2 (X_3(t) + R_L)^2 - (X_3(t) - R_{SG}) [1 + (V/V_L)^n]}{\tau_L}$$

$$V = V_L \left[\frac{X_2(t) X_3(t)}{I_L^2 (X_3(t) + R_L)^2 (X_3(t) - R_{SG})} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}$$

IV.4 Simulation et interprétation des résultats :

Pour tester les performances du capteur avec le régulateur PI, on considère les valeurs des paramètres résumés dans le tableau ci après, les valeurs initiales sont :

$$U_{C0} = 1V, U_{R0} = 1V, R_{S0} = 6 \Omega \text{ et } K_C = 100$$

Tableau 1 : Paramètres du fil chaud

R_{SG} (Ω)	T_G (K)	α_G (1/K)	I_L (A)	V_L (V)	τ_l (s)	n
5	293	$3,33.10^{-3}$	45.10^{-3}	4	$0,25.10^{-3}$	0.5

Tableau 2 : Paramètres du système électronique

R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	K_A	R_A (Ω)	U_0 (V)	τ_A (s)	R_C (Ω)
10	100	10^6	10^{-6}	10^6	10^{-2}	100

IV.4.1 Courbe obtenue en boucle fermée :

Pour évaluer les performances du capteur avec le régulateur PI, nous avons effectué le même test effectué au chapitre précédent. Les résultats obtenus sont donnés par la figure ci-après :

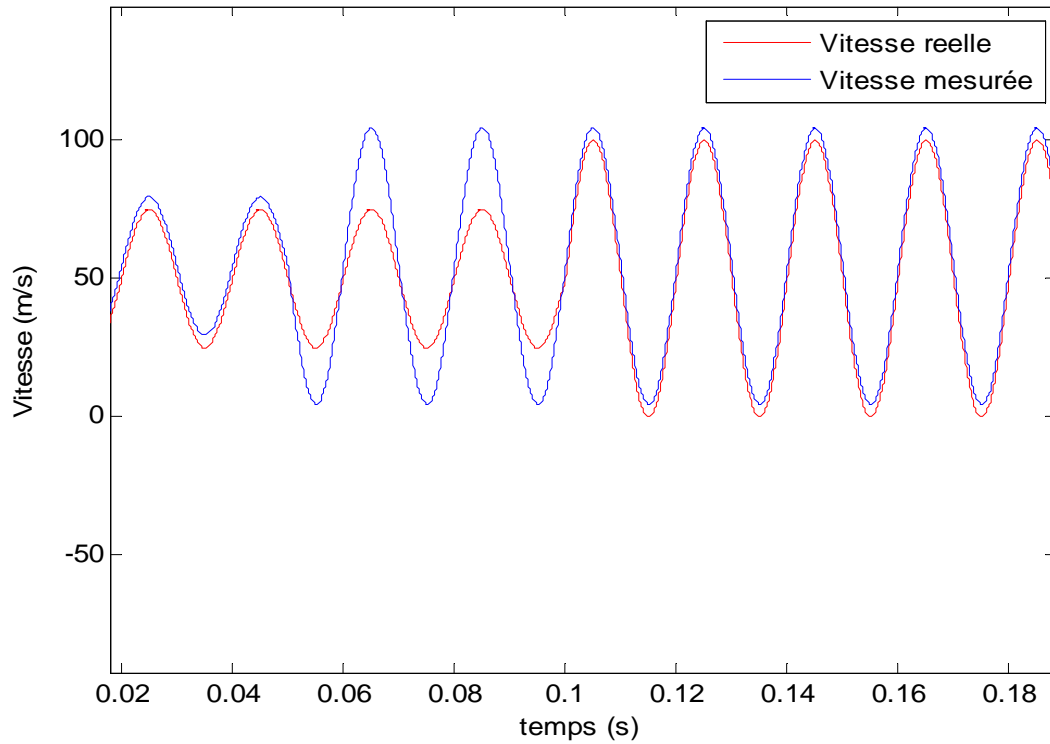


Figure IV.3 : Réponse du système en boucle fermée

IV.4.2 Interprétation de la courbe

Selon le graphe, les deux vitesses sont presque identiques ce qui montre le que régulateur a bien joué son rôle dans le montage du fil chaud à température constante monté en boucle fermée.

Le grand décalage en $t=0.05$ s est dû à la perturbation appliquée au système à cet instant.

IV.4.3 courbe du signal d'erreur en boucle fermé:

La courbe de l'erreur entre la vitesse réelle et mesurée est donnée par la figure ci-après

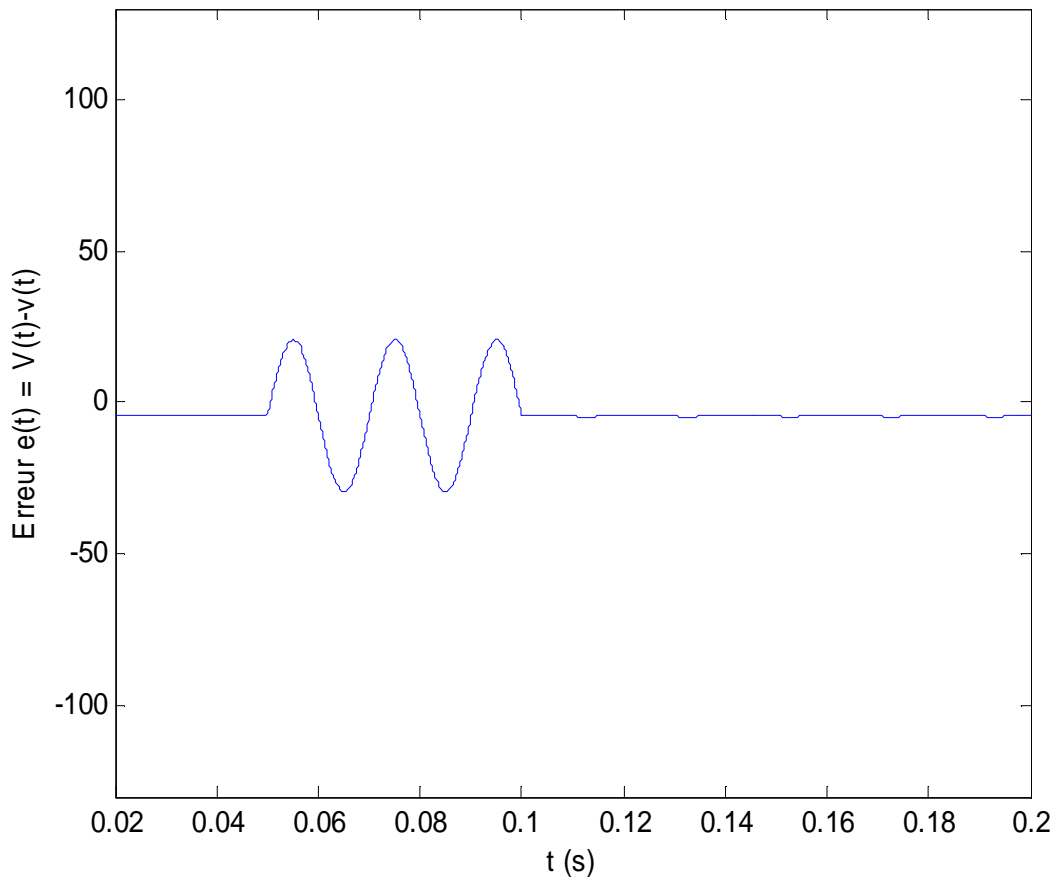


Figure IV.4 : Le signal d'erreur entre la vitesse mesurée $v(t)$ et la vitesse du vent $V(t)$

IV.4. Interprétation de la courbe

Le signal d'erreur obtenu, hormis le régime transitoire après l'application de la perturbation est presque nulle. Cette courbe démontre l'apport du régulateur PI.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons conçu un régulateur PI pour l'anémomètre à fin d'anémomètre à fin d'améliorer sa précision. Après avoir présenté le schéma électronique du capteur avec régulateur, nous avons écrit les équations du système (capteur + PI) en boucle fermée. Puis, nous avons simulé le système résultant pour évaluer ses performances. Les résultats obtenus démontrent clairement l'apport du régulateur PI.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le capteur de vitesse du vent désigné sous le vocable anémomètre. L'objectif consiste à améliorer la précision de l'anémomètre en utilisant un régulateur de type PI.

Le mémoire a commencé par un rappel sur les capteurs, puis sur l'anémomètre et sa modélisation. Après, nous nous avons introduit des généralités sur la régulation particulièrement la régulation avec un PID. Ce dernier est utilisé par la suite pour améliorer la précision d'un anémomètre dont les performances en boucle ouverte ne sont pas satisfaisantes.

Les résultats de simulation obtenus montrent clairement que les performances d'un anémomètre peuvent être amplement améliorées en utilisant une régulation adéquate. Ainsi, la précision du capteur a été améliorée puisque l'erreur entre les vitesses mesurées et réelles est très faible dans le cas d'un régulateur PI.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Fiche de cours « les capteurs », lycée ROBERT GARNIER , STI2D.
- [2] P.Hoarau ,« Acquisition et codage de l'information »,STI2D .29.08.2011
- [3] F.Moisy,« Méthodes expérimental en mécanique des fluides »,Université Paris sud,26 novembre 2014.
- [4] organisation météorologique mondiale, « anémomètre a hélice sur Eumetcal ».
- [6] Paul D.Iten, « laser doppler anemometer »
- [7] Bureau de la traduction « anémomètre a moulinette », Termium sur travaux public et service gouvernementaux canada consulté le 20septembre2014).
- [8] principe de fonctionnement, LCG, capteurs (13 février 2016).
- [10] organisation météorologique mondiale, « anémomètre bidirectionnel sur Eumetcal (consulté le 20 septembre 2014)
- [12] brevet européenne No EPO 801311 a et brevet americaine.No5,877,416(1999)
- [15] K . Clombor, M.Gawor, P.Ligez, J.Palaez, E.Poleszezyk, A.Rachalski,J.Rysz,Arch.of mining Sci.49.4(2003).
- [16] P.Lipgeza,Polish Patent No. P 380579 (07 septembre 2006)
- [17] P.Ligeza,Rev,Sci,Instrum,71,1 (2000)
- [18] P. Ligeza ,Rev,Sci,Instum,76,1 (2005)
- [19] P.Legeza.Rev,Sci Instrum 78 (7), 075104. (2007).
- [20] M.Bensoam , « notion d'asservissements et de régulation »,régulation,2000-2001.
- [21] M.Correvon, « Institut d'Automatisation industrielle « système électronique » ,HESSO, Suisse.

Bibliographie

[22] P.Provost, « instrumentation et régulation en 30 fichiers », édition DUNOD, paris, 2010

[23] E.Magarotto, « cours de régulation », édition IUT, septembre 2004.

Liste des sites

[5] <http://www.directindustry.fr>.« Anémomètre à hélice ».consulté le 20 mai 2017.

[9] <http://www.directindustry.fr>. « Anémomètre à ultrason ».consulté le 20 mai 2017.

[11] <http://www.directindustry.fr>. « anémomètre bidirectionnel à ultrason ».consulté le 20mai 2017.

[13] <http://www.directindustry.fr>. « anémomètre à fil chaud ».20 mai 2017.

[14] www.fast.u-psud.fr. « anémomètre à fil chaud ».consulté le 20avril 2017.