



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد ابن باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology



Département de Génie Electrique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electronique
Spécialité: Électronique

POLYCOPIÉ PÉDAGOGIQUE

CAPTEURS ET INSTRUMENTATION

Établi par :

Dr. Aicha MEHIDI.

Maître de conférences classe B

Département de Génie Electrique

Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis (UMAB)

Laboratoire Signaux et Systèmes

Courriel : aicha.mehidi@univ-mosta.dz



Expertisé par :

Mr HADRI Baghdad

Professeur

Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis

Mr ABED Mansour

Maître de conférences classe A

Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis

Année universitaire 2021-2022

AVANT-PROPOS.....	1
CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition.....	2
I. Introduction.....	3
II. Structure d'une chaîne d'acquisition numérique	3
II.1. Principe	3
II.2. Importance du capteur dans la chaîne d'acquisition numérique	5
II.3. Acquisition de plusieurs grandeurs.....	6
III. Définitions et généralités sur les capteurs	7
III.1. Définitions	7
III.2. La Chaîne de mesure. Corps d'épreuve.....	9
IV. Les différents types de capteurs.....	10
IV.1. Capteurs passifs	10
IV.2. Capteurs actifs	11
IV.3. Capteurs composites	12
IV.4. Capteurs intégrés	12
IV.5. Capteurs intelligents	13
V. Phénomènes physiques utilisés dans les capteurs	15
V.1. Thermoélectricité	15
V.2. Photoélectricité	16
V.3. Induction électromagnétique	17
V.4. Effet Hall	17
V.5. Piézoélectricité	17
V.6. Pyroélectricité	18
V.7. Effet Doppler	18
VI. Conclusion	18
VII. Exercices corrigés.....	19
CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques.....	21
I. Introduction.....	22
II. Les Caractéristiques métrologiques	22
II.1. Etendue de mesure	22
II.2. Fonction de transfert	22
II.3. Sensibilité	22
II.4. Etalonnage	23

II.5. Précision.....	24
II.6. Fidélité	24
II.7. Justesse	25
II.8. Non-linéarité	25
II.9. Hystérésis	25
II.10. Bruit	26
II.11. Résolution	26
II.12. Rapidité	26
II.13. Bande passante	26
II.14. Temps de réponse	27
II.15. Incertitude apportée par un dispositif	27
II.16. Incertitude due par un dispositif	30
III. Conditions de fonctionnement	30
III.1. Environnement de mesure	30
III.2. Grandeur d'influence	30
III.3. Domaine d'utilisation	30
IV. Critères de choix d'un capteur	31
V. Conclusion.....	31
VI. Exercices corrigés.....	32
CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs.....	38
I. Introduction.....	39
II. Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs	39
II. 1. Principaux types de conditionneurs.....	39
II. 2. Qualités d'un conditionneur	40
III. Montage potentiométrique	41
III.1. Mesure des résistances	41
III.2. Mesures des impédances complexes	45
III.3. Inconvénients du montage potentiométrique	46
III.4. Montage potentiométrique avec amplification du signal.....	47
IV. Montage en pont	48
IV.1. Montage push-pull demi-pont	48
IV.2. Montage en pont complet	49
V. Montage oscillant	50
VI. Conclusion	50
VII. Exercices corrigés	51

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal.....	55
I. Problématique	56
II. Amplificateur opérationnel	56
II.1. Représentation symbolique	56
II. 2. Modèle en régime linéaire.....	57
II. 3. Spécificités réelles d'un amplificateur réel	57
II. 4. Modèle idéal de l'amplificateur opérationnel	57
III. Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure	57
III.1. Adaptation d'impédance	58
III.2. Capteur source de tension	59
III.3. Capteur source de courant	59
III.4. Capteur source de charge	60
IV. Mesure de la tension	60
IV.1. Problématique de la mesure de tension	60
IV.2. Amplificateur différentiel et taux de rejection du mode commun	61
IV.3. Modélisation de l'amplificateur différentiel	61
IV.4. Amplificateur d'instrumentation	62
V. Conclusion	66
VI. Exercices corrigés.....	67
CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs	73
I. Classification des capteurs	74
II. Quelques exemples de capteurs	74
II.1. Capteurs de températures	74
II.2. Capteurs à effet photoélectrique	77
II.3. Capteurs à effet piézoélectrique	81
III. Conclusion	82
IV. Exercices corrigés	83
Travaux pratiques	
TP n°1 Présentation d'une chaîne de mesure.....	87
Etude d'une photorésistance pour la détection de lumière	
TP n°2 Les capteurs de température (Les thermistances).....	91
TP n°3 Etude d'un circuit conditionneur d'un capteur (la thermistance)	93
TP n°4 le Capteur de lumière (photodiode)	95
Références bibliographiques.....	97

AVANT-PROPOS

Ce polycopié de capteurs et instrumentation est conforme au programme national officiel de 3^{ème} année LMD de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, spécialité électronique. Ce polycopié élabore des cours, des exercices corrigés et des travaux pratiques sur capteurs et instrumentation destinés aux étudiants de la troisième année Licence, spécialité électronique, pour l'unité d'enseignement fondamentale (CAPI).

L'objectif de ce polycopié est de présenter le plus large éventail possible des connaissances de base sur les capteurs et instrumentation. A cet effet, ce polycopié est consacré à la description des constituants d'une chaîne de mesure et circuits électroniques : éléments constitutifs d'une chaîne, structure globale d'une chaîne de mesure complète (acquisition, traitement, restitution), capteurs : types, caractéristiques, différents types de capteurs (passif, actif), phénomènes physiques utilisés dans les capteurs (Loi d'induction électromagnétique, effet hall, effet thermoélectrique, effet magnéto-résistif, effet photoélectrique, effet piézoélectrique, effet doppler, ...), les caractéristiques métrologiques (sensibilité, linéarité, courbe d'étalonnage, résolution, rapidité, temps de réponse et bande passante, limites d'utilisation, étalonnage, étendue de mesure, domaine nominal d'emploi, zone de non détérioration), critères de choix d'un capteur, conditionnement du capteur (montage potentiométrique, montage push-pull, montage en pont). Cette description sera suivie d'une présentation de la linéarisation analogique et des circuits de conditionnement et amplification du signal mesuré (amplificateur différentiel, amplificateur d'instrumentation, taux de réjection en mode commun, amplificateur d'isolation), classification des capteurs, et enfin quelques exemples de capteurs et de leur fabrication exposant les avantages et les inconvénients de chacun.

Ce document présente cinq chapitres et à la fin de chaque chapitre une série d'exercices corrigés renforçant la compréhension du cours. La thématique des exercices n'aborde souvent qu'un aspect de la problématique des capteurs (physique, électronique, statistique, etc.). Enfin une série des travaux pratiques est introduite dans le but de permettre aux étudiants de réaliser des montages électroniques sur plaque d'essai, et de valider leur fonctionnement au moyen des appareils de mesures. Les contenus sont construits dans une démarche d'analyse basée essentiellement sur la manipulation. Cette démarche, adaptée à la technologie, s'appuie sur une stratégie structurée et organisée selon les étapes suivantes :

- une « introduction » ou « problème posé » ou « mise en situation » pour donner sens à ce qu'on projette faire acquérir;
- un résumé des connaissances fondamentales ;
- un apprentissage suite à des activités pratiques significatives;
- une évaluation significative d'une autonomie.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux, qui à des degrés divers, ont contribué à la publication de ce polycopié. Je souhaite que ce manuel soit profitable et servira comme référence, à toute personne, intéressée par l'étude du capteur et instrumentation

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

I. Introduction.....	3
II. Structure d'une chaîne d'acquisition numérique	3
II.1. Principe	3
II.2. Importance du capteur dans la chaîne d'acquisition numérique	5
II.3. Acquisition de plusieurs grandeurs.....	6
III. Définitions et généralités sur les capteurs	7
III.1. Définitions	7
III.2. La Chaîne de mesure. Corps d'épreuve.....	9
IV. Les différents types de capteurs.....	10
IV.1. Capteurs passifs	10
IV.2. Capteurs actifs	11
IV.3. Capteurs composites	12
IV.4. Capteurs intégrés	12
IV.5. Capteurs intelligents	13
V. Phénomènes physiques utilisés dans les capteurs	15
V.1. Thermoélectricité	15
V.2. Photoélectricité	16
V.3. Induction électromagnétique	17
V.4. Effet Hall	17
V.5. Piézoélectricité	17
V.6. Pyroélectricité	18
V.7. Effet Doppler	18
VI. Conclusion	18
VII. Exercices corrigés.....	19

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

I. Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse,). C'est le rôle du capteur que d'assurer cette duplication de l'information en la transférant, au point même où se fait la mesure, de la grandeur physique (non électrique) qui lui est propre, sur une grandeur électrique. Ce chapitre introduit la notion de la mesure, structure globale d'une chaîne de mesure complète : acquisition et restitution. Description des constituants d'une chaîne de mesure et circuits électroniques : éléments constitutifs d'une chaîne, le capteur (types, caractéristiques), électriques, différents types de capteurs (passif, actif), phénomènes physiques utilisés dans les capteurs (Loi d'induction électromagnétique, effet hall, effet thermoélectrique, effet magnéto-résistif, effet photoélectrique, effet piézo-électrique, effet doppler, ...),

II. Structure d'une chaîne d'acquisition numérique

II.1. Principe

La chaîne d'acquisition a pour fonction de recueillir et transformer la grandeur à mesurer sous une forme adaptée à son exploitation. La chaîne d'acquisition de données convertie le signal analogique de sortie du capteur en signal numérique et après traitement du signal numérique délivre un signal analogique.

Une chaîne de mesure est essentiellement constituée d'un capteur, d'un conditionneur, d'un dispositif de filtrage si nécessaire, d'un convertisseur analogique numérique, d'un système numérique de calcul puis du dispositif d'affichage. Les capteurs transforment une grandeur physique en grandeur électrique.

Une chaîne d'acquisition numérique peut se représenter selon la figure suivante :

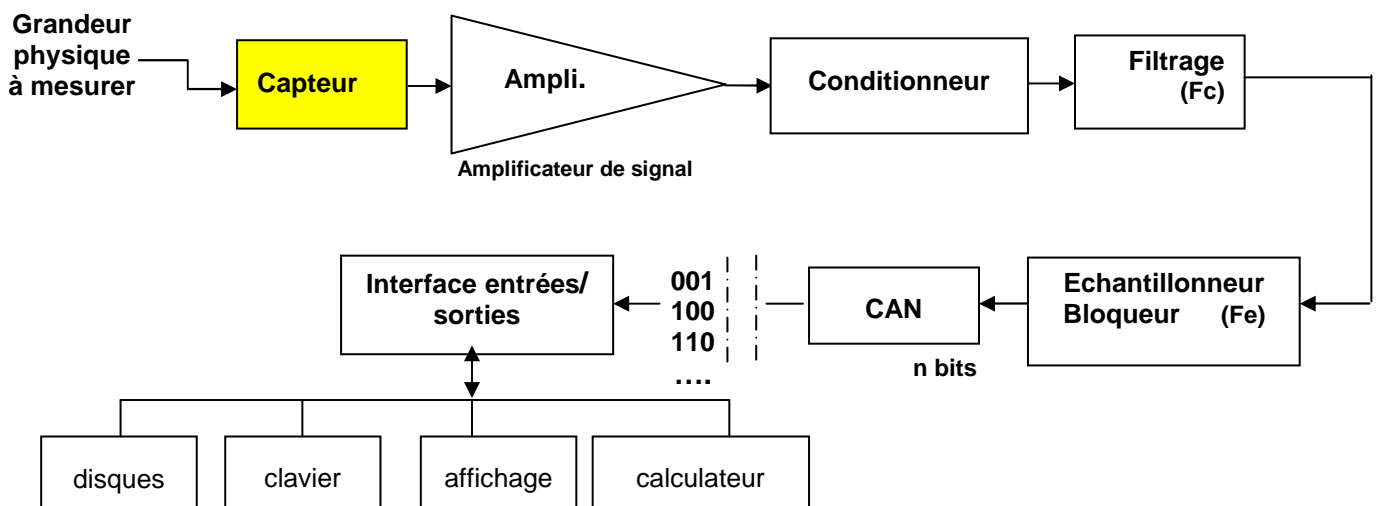


Fig. I.1. Structure de l'acquisition numérique

Le capteur est le premier élément de la chaîne de mesure

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

Elle est souvent associée à une chaîne de restitution ; ce type de chaîne fonctionne dans le sens inverse de la précédente :

Dans le cas d'un système de régulation d'une grandeur, la chaîne de restitution prend naissance dans une zone de stockage et est chargée, à partir d'un code numérique, de commander un organe de puissance appelé actionneur.

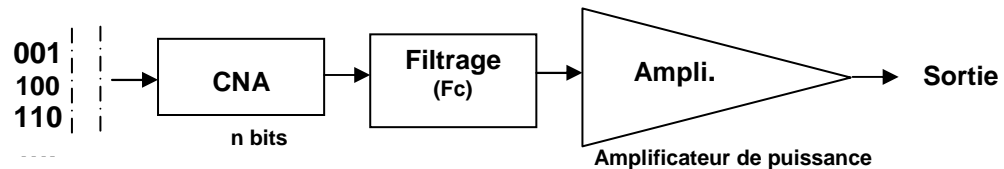


Fig. I.2. Structure de la chaîne de restitution

II.1.1. Capteur : Il est l'interface entre le monde physique et le monde électrique. En d'autres termes, le capteur délivre généralement un signal électrique.

II.1.2. Amplificateur de signal: Cette étape permet d'adapter le niveau du signal issu du capteur à la chaîne globale d'acquisition.

II.1.3. Conditionneur : L'étage de conditionnement du signal des capteurs à un rôle très important. Il converti en tension la grandeur de sortie du capteur, adapte l'impédance pour le capteur et limite l'amplification en mode commun.

II.1.4. Filtre d'entrée : Son rôle est de limiter le contenu spectral du signal aux fréquences qui nous intéressent. Ainsi il élimine les parasites. C'est un filtre passe bas que l'on caractérise par sa fréquence de coupure et son ordre.

II.1.5. L'échantillonneur: Son rôle est de prélever à chaque période d'échantillonnage (T_e) la valeur du signal. On l'associe de manière quasi-systématique à un bloqueur. Le bloqueur va figer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion. On parle d'échantillonneur bloqueur.

II.1.6. Le convertisseur analogique numérique (CAN) : Il transforme la tension de l'échantillon (analogique) en un code binaire (numérique).

II.1.7. La zone de stockage : Elle peut être un support de traitement (ordinateur,...), un élément de sauvegarde (RAM, Disque dur) ou encore une transmission vers un récepteur situé plus loin.

II.1.8. Le convertisseur numérique analogique (CNA) : Il effectue l'opération inverse du CAN, il assure le passage du numérique vers l'analogique en restituant une tension proportionnelle au code numérique.

II.1.9 Le filtre de sortie: Son rôle est de « lisser » le signal de sortie pour ne restituer que le signal utile. Il a les mêmes caractéristiques que le filtre d'entrée.

II.1.10 Amplificateur de puissance : Il adapte la sortie du filtre à la charge.

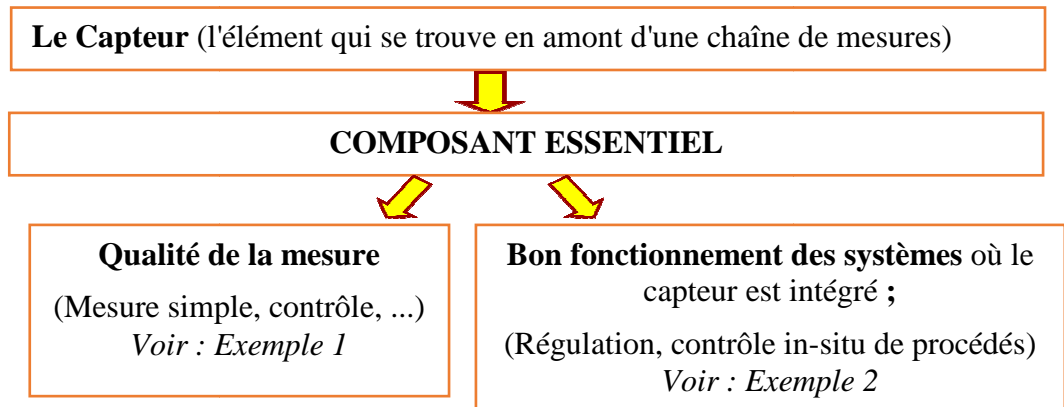
CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

II.2. Importance du capteur dans la chaîne d'acquisition numérique

On analyse les moyens mis en œuvre pour convertir une grandeur physique quelconque en une grandeur électrique qui est à son image. Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques. C'est le premier maillon de toute chaîne d'acquisition numérique.

Les objectifs de ces acquisitions sont divers :

- Opérations de mesurages (domaine de l'instrumentation, du laboratoire)
- Contrôle de paramètres de fabrication (domaine du contrôle de processus industriel)
- Gouvernabilité d'un système de régulation, d'asservissement. (Domaine de l'automatique)



Exemple 1 : Mesure simple

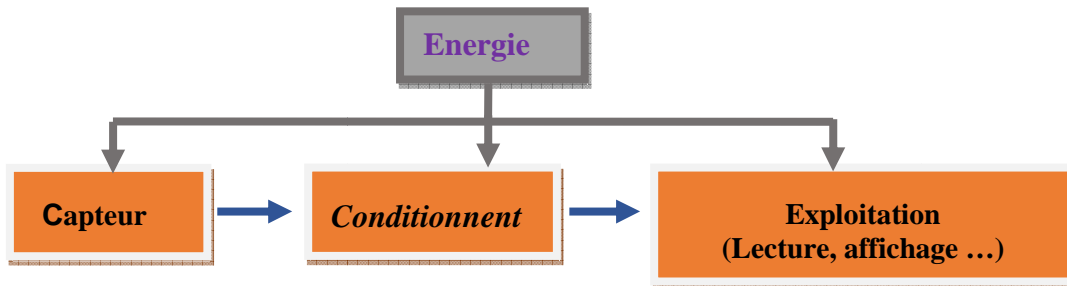


Fig. I.3. Mesure simple

Exemple 2 : Détection niveau et régulation

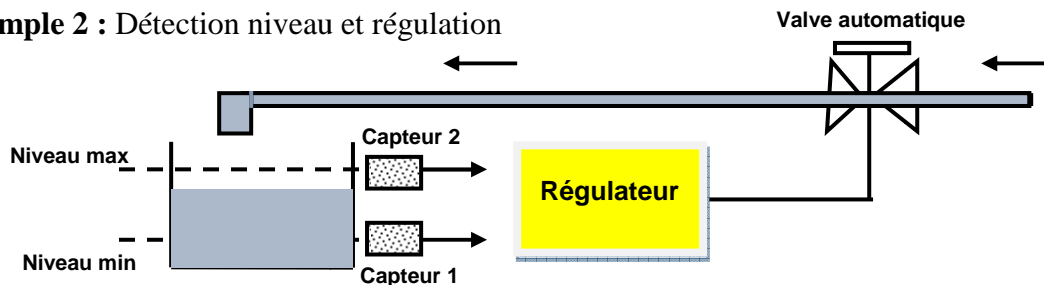


Fig. I.4. Détection niveau et régulation

Les mesures réalisées par les capteurs 1 et 2 permettent par le biais du régulateur de régler le niveau d'eau dans le récipient.

II.3. Acquisition de plusieurs grandeurs

Dans le cadre d'une chaîne d'acquisition traitant plusieurs capteurs (N) vers une même zone de stockage, il existe différentes structures qui diffèrent en terme de performances et de coût.

N Capteurs \Rightarrow 1 zone de stockage (traitement) numérique

II.3.1. Acquisition séquentielle décalée

Elle se base sur l'utilisation en amont d'un multiplexeur qui va orienter un capteur vers la chaîne unique d'acquisition :

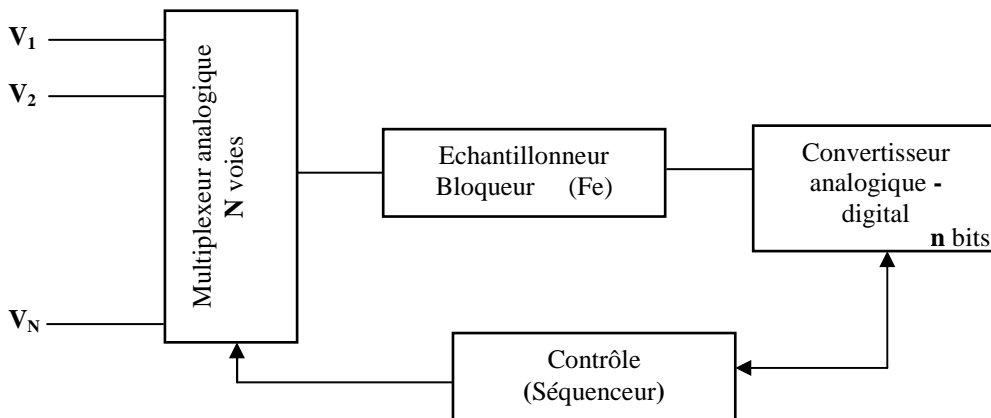


Fig. I.5. Structure séquentielle décalée

L'avantage de cette structure est bien évidemment son côté économique. Par contre il y a un décalage dans le temps des acquisitions. On réservera donc cette structure ne nécessitant pas une synchronisation entre les données numérisées. De plus le temps d'acquisition complet est a priori élevé car proportionnel au nombre de capteur.

II.3.2. Acquisition séquentielle simultanée

De manière à avoir des acquisitions « synchrones », on utilise la même structure que précédemment mais en utilisant des Echantillonneurs Bloqueurs (E/B) en amont du multiplexeur. On est dans une situation d'E/B en tête.

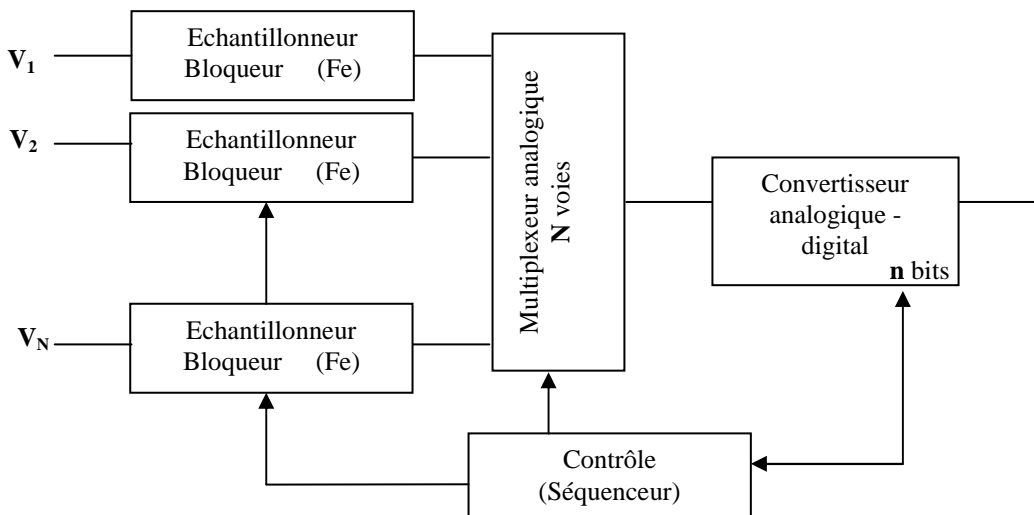


Fig. I.6. Structure séquentielle simultanée

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

La prise des échantillons s'effectue au même instant, la conversion est effectuée de manière progressive. Cela signifie que les E/B assurent un maintien de l'échantillon durant les N acquisitions sans introduire de pertes supérieures à la résolution du CAN.

II.3.3. Acquisition parallèle

C'est la structure la plus complète puisqu'elle consiste à disposer N chaînes d'acquisition en parallèle et de les connecter sur un bus de données commun.

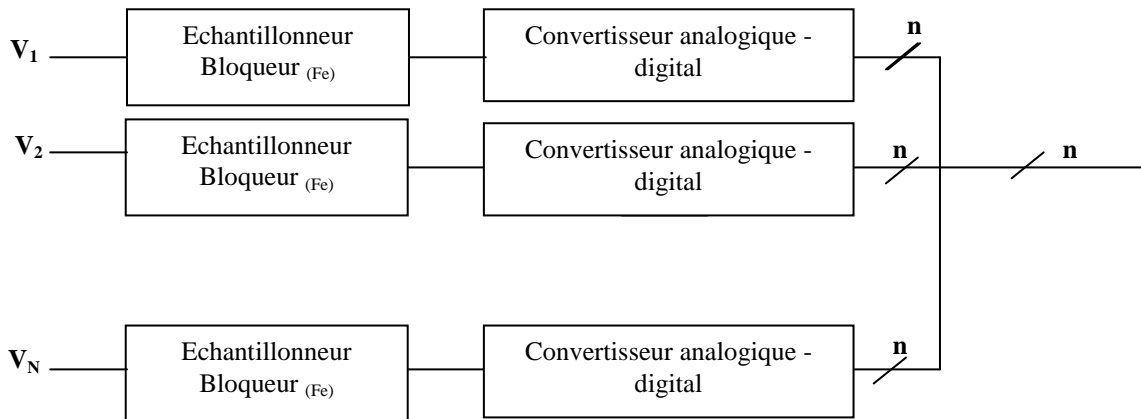


Fig. I.7. Structure parallèle

Avec cette structure, il est possible d'effectuer en même temps l'acquisition d'une donnée pendant que l'on en stocke une autre. De même, toutes les conversions peuvent être simultanées, le stockage s'effectuant après. Cela permet un gain de temps sur l'acquisition complète. Mais elle est coûteuse.

III. Définitions et généralités sur les capteurs

III.1. Définitions

III.1.1. Mesurande (m) : c'est la grandeur physique en général non électrique que l'on veut mesurer (déplacement, température, pression, ...). On peut distinguer plusieurs types de mesurandes :

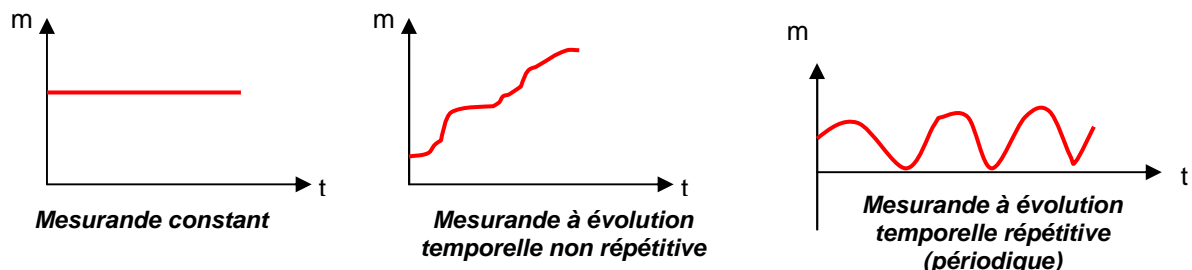


Fig. I.8. Les types de mesurande.

III.1.2. Types de grandeur physique (Mesurande) : On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une de ces 6 familles :

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

- **Mécanique** : déplacement, force, masse, débit etc.
- **Thermique** : température, capacité thermique, flux thermique etc.
- **Electrique** : courant, tension, charge, impédance, diélectrique etc.
- **Magnétique** : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique etc.
- **Radiatif** : lumière visible, rayons X, etc.
- **(Bio) Chimique** : humidité, gaz, etc.

III.1.3. Capteur : Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande (m), en une grandeur de nature électrique (en général) appelée réponse (s).

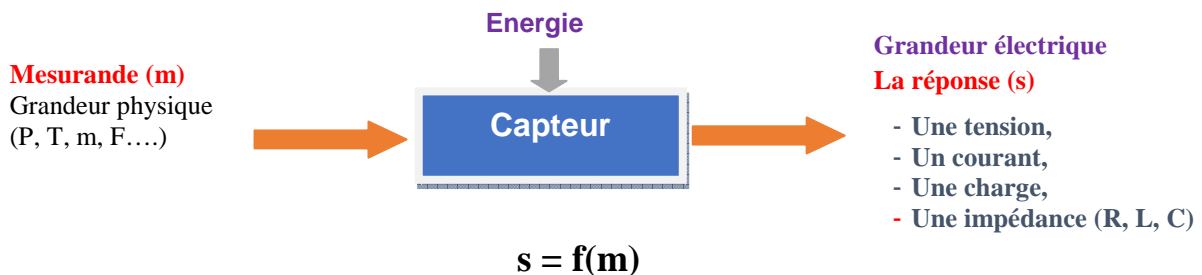


Fig. I.9. Structure d'un capteur

Toute valeur de **s** doit permettre de remonter à chaque instant à une seule valeur de **m** et inversement (Fig.1.10).

La relation $s = f(m)$ résulte dans sa forme théorique :

- des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur,
- dans son expression numérique de sa construction « géométrie, dimension »,
- des matériaux qui le constituent,
- les caractéristiques de son environnement et son mode d'emploi (température, alimentation...).

Pour tout capteur la relation $s = f(m)$ sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par étalonnage : pour un ensemble de valeurs de **m** connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de **s** ce qui permet de tracer la courbe d'étalonnage (Fig.1.11.a) ; cette dernière, à toute valeur mesurée de **s**, permet d'associer la valeur de **m** qui la détermine (Fig.1.11.b).

Pour des raisons de facilité d'exploitation on s'efforce de réaliser le capteur, ou du moins de l'utiliser, en sorte qu'il établisse une relation linéaire entre les variations Δs de la grandeur de sortie et celles Δm de la grandeur d'entrée :

$$\Delta s = S \cdot \Delta m$$

S est la sensibilité du capteur.

N.B. : Un des problèmes importants dans la conception et l'utilisation d'un capteur est la constance de sa sensibilité **S** qui doit dépendre aussi peu que possible :

- de la valeur de **m** (linéarité) et de sa fréquence de variation (bande passante),
- du temps (vieillessement),

- de l'action d'autres grandeurs physiques de son environnement qui ne sont pas l'objet de la mesure et que l'on désigne comme grandeurs d'influence.

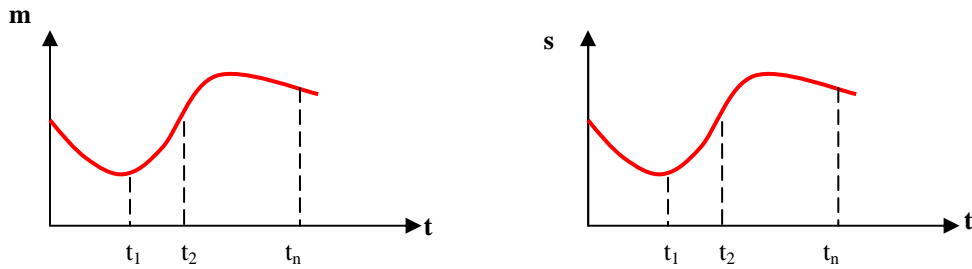


Fig. I.10. Exemple d'évolution d'un mesurande m de la réponse s correspondante du capteur.

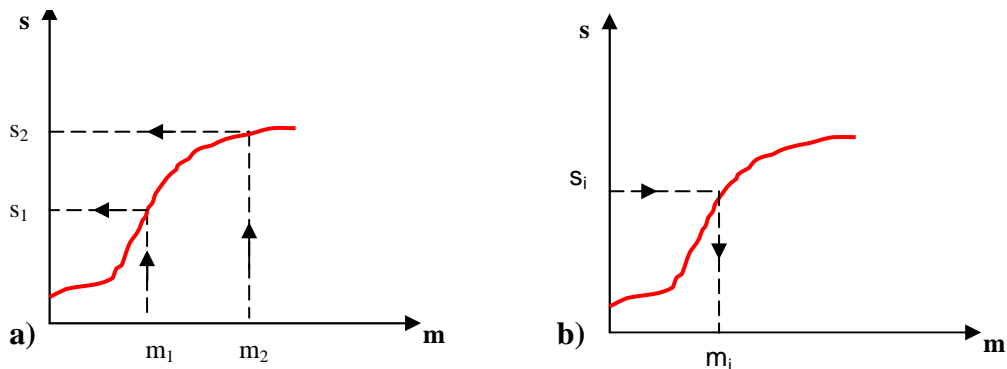


Fig. I.11. Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement à partir de valeurs connues du mesurande m ; b) son exploitation, à partir de valeurs mesurées de la réponse s du capteur.

III.2. La Chaîne de mesure. Corps d'épreuve

La chaîne de mesure est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible dans les meilleures conditions la détermination précise de la valeur ou l'évolution du mesurande.

A l'entrée de la chaîne, le capteur soumis à l'action du mesurande permet, directement s'il est actif ou par le moyen de son conditionneur s'il est passif, d'injecter dans la chaîne le signal électrique, support de l'information liée au mesurande.

A la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande :

- déviations d'un appareil à cadre mobile ;
- enregistrement analogique graphique ou oscillographique ;
- affichage ou impression d'un nombre

C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque indication en sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée.

Sous sa forme plus simple la chaîne de mesure peut comporter uniquement un capteur, et à son conditionneur éventuel, associé à un appareil de lecture :

- thermocouple et voltmètre,

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

- jauge de contrainte placée dans un pont de Wheatstone, avec pour instrument de lecture un galvanomètre ou un voltmètre.

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ses effets. Le **corps d'épreuve** a pour fonction de transformer la grandeur à mesurer (mesurande) en une grandeur physique secondaire (mesurande secondaire) plus facile à mesurer.

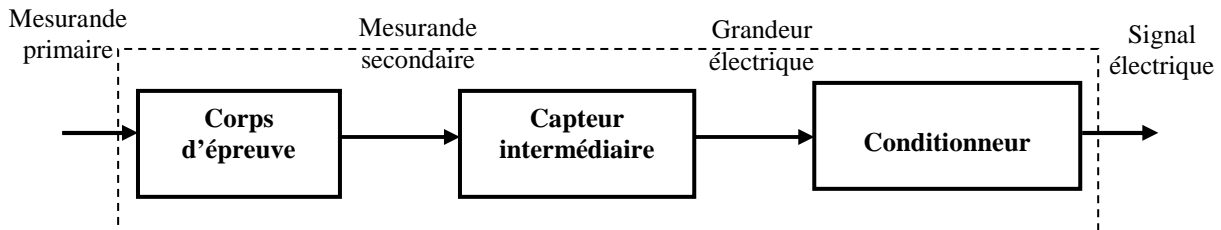


Fig. I.12. Chaîne de mesure

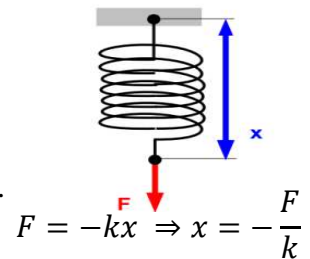
N.B: Pour de nombreux capteurs, il peut y avoir plusieurs corps d'épreuve avant la mesure électrique

Exemple simple 1 : Mesure d'une force mécanique

On utilise comme corps d'épreuve un élément élastique, respectant la loi linéaire (raideur constante).

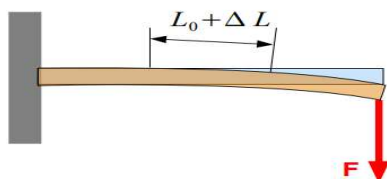
Le mesurande **force** est transformé en mesurande **déplacement**.

Le capteur de force utilise ainsi les technologies du capteur de déplacement.



Exemple simple 2 : Mesure d'une force mécanique

On utilise comme corps d'épreuve un élément élastique en flexion.



Le mesurande **force** est transformé en mesurande **élongation**.

Le capteur de force utilise ainsi les technologies des capteurs de déformation (jauges de contraintes)

IV. Les différents types de capteurs

IV.1. Capteurs passifs

Il s'agit d'impédances (R, L, ou C) dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés

- d'une part à sa géométrie et à ses dimensions,
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ .
- soit plus rarement sur les deux simultanément.

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

Tab. I.1. Capteurs passifs : principes physiques et matériaux.

Exemples résistifs :

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre, semi conducteurs
Flux de rayonnement optique	Résistivité	semi conducteurs
Déformation	Résistivité	Alliages de nickel, silicium dopé
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, antimoniure d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium,...

Le mesurande est évalué grâce à la mesure de la résistance.

Autres exemples :

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Très basse Température	Constante diélectrique	Verre
Déplacement	Self inductance	Bobine, matériaux magnétiques
Déplacement	Couplage mutuel	Transformateur magnétique
Déformation	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Humidité	Constante diélectrique	Alumine ; Polymères,...
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants

- Les capteurs passifs ont besoin d'une source d'excitation pour fournir un signal électrique de mesure ;
- Certains capteurs passifs ont besoin d'un circuit complexe pour fournir un signal électrique de mesure.

IV.2. Capteurs actifs

Fonctionnement en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

d'énergie propre au mesurande (énergie thermique, mécanique ou rayonnement). Les plus importants parmi ces effets sont regroupés Tab. I.2.

Tab. I.2. Capteurs actifs : principes physiques de base

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Photoémission Pyroélectricité Effet photovoltaïque effet photo-électromagnétique	Courant Charge Tension Tension
Force, Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Ces capteurs actifs ont besoin d'un circuit d'adaptation pour fournir un signal électrique de mesure utilisable

IV.3. Capteurs Composites

L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif constitue un capteur composite.

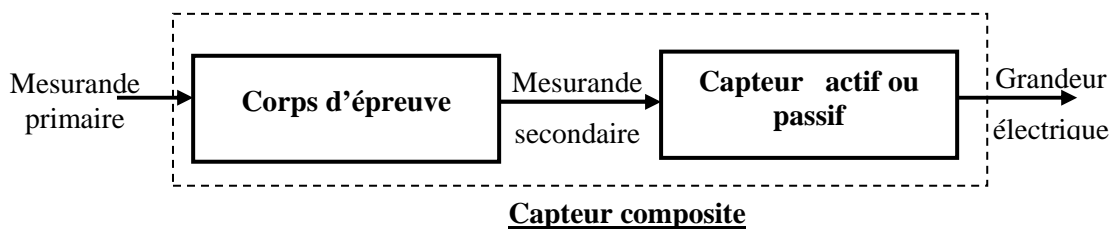


Fig. I.13. Structure d'un capteur composite

IV.4. Capteurs intégrés

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun le capteur proprement dit, le corps d'épreuve éventuel, des circuits électroniques de conditionnement du signal (Fig. I.14.)

L'intégration apporte de multiples avantages : miniaturisation, diminution des coûts par la fabrication en grande série, accroissement de la fiabilité par suppression de nombreuses

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

connexions soudées, interchangeabilité améliorée, meilleure protection vis-vis des parasites, le signal étant conditionné à sa source.

L'utilisation sur silicium impose cependant une limitation de la plage d'emploi de -50°C à 150°C environ.

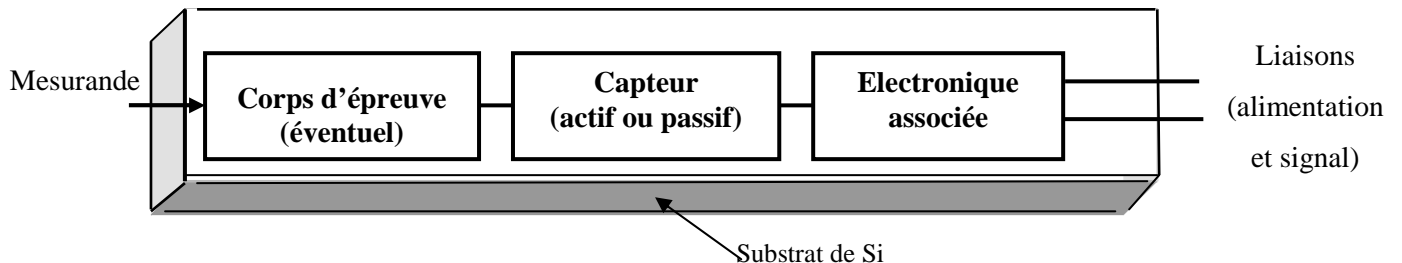


Fig. I.14. Structure générale d'un capteur intégré

Le capteur proprement dit met généralement à profit la sensibilité du silicium à diverses grandeurs physiques ; cette sensibilité, par ailleurs déjà souvent exploitée pour la réalisation de capteurs isolés, peut être mise en œuvre sous forme de capteurs résistifs, capacitifs ou moyen de diodes et de transistors.

Exemples de capteurs à base de silicium :

- Résistance thermométriques,
- Jauges extenso métriques,
- Photo diodes et phototransistors,
-

L'emploi de corps d'épreuve en silicium est justifié par les propriétés mécaniques excellentes du cristal : domaine élastique étendu, module d'Young comparable à celui de l'acier et limite de fatigue très élevée.

La fabrication des corps d'épreuve est rendue possible grâce aux techniques de micro-usinage chimique.

Les circuits électroniques associés au capteur sont réalisés selon les techniques classiques de fabrication des circuits intégrés : ils comportent selon les cas : des circuits de compensation thermique, de linéarisation, d'amplification, de transmission par conversion tension-fréquence, ou tension-courant....

IV.5. Capteurs intelligents

On désigne par capteur intelligent l'ensemble de mesure d'une grandeur physique constitué de deux parties (Fig. I.15)

- Une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur,
- Une interface de communication bidirectionnelle.

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

La chaîne de mesure comporte :

- Le capteur principal spécifique du mesurande étudié, et identifiable par un code stocké en PROM.
- Les capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influence susceptibles d'affecter la réponse du capteur principal.
- Les dispositifs classiques permettant l'obtention sous forme numérique de la grandeur de sortie de chaque capteur : conditionneur, multiplexeur, amplificateur, échantionneur -bloqueur, convertisseur analogique-numérique.
- Un microprocesseur assurant les tâches suivantes : gestion de l'acquisition, correction de l'effet des grandeurs d'influence au moyen des paramètres stockés en PROM et des données fournies par les capteurs secondaire, linéarisation, diagnostic des capteurs

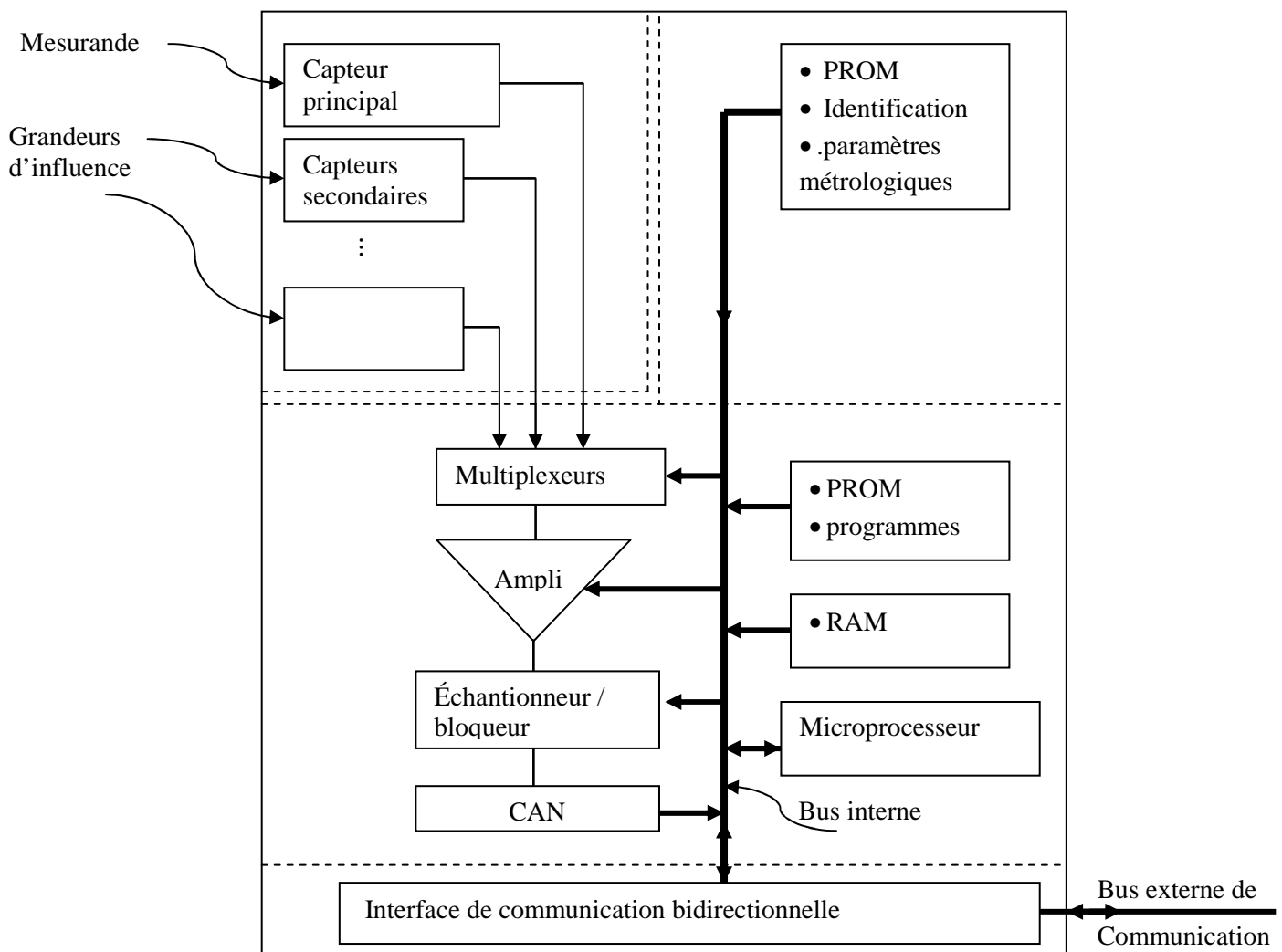


Fig. I.15. Structure générale d'un capteur intelligent.

L'interface de communication bidirectionnelle assure la liaison du capteur à un ordinateur central via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents (Fig. I.16).

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

Les messages porteurs du code du capteur concerné transitent par l'interface

Soit dans le sens ordinateur vers capteur : configuration, auto étalonnage....

Soit dans le sens capteur vers ordinateur : résultats de mesure, état de la chaîne (étendue de mesure, dépassements de gamme du mesurande ou d'une grandeur d'influence ...).

Le capteur intelligent offre des avantages spécifiques : configurabilité à distance ; crédibilité accrue des mesures et aide à la maintenance grâce aux informations d'état fournies ; réparation des taches, déchargeant le ordinateur central.

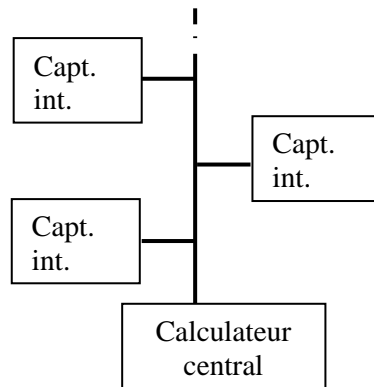


Fig. I.16. Liaison par bus d'un ensemble de capteurs intelligents à un ordinateur central.

V. Phénomènes physiques utilisés dans les capteurs

V.1. Thermoélectricité

C'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T_1 et T_2 .

⇒ Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température ($T_1 - T_2$).

- La soudure produit une tension liée à la nature des conducteurs et à la température absolue. C'est l'effet thermoélectrique découvert par **Seebeck** en 1821.

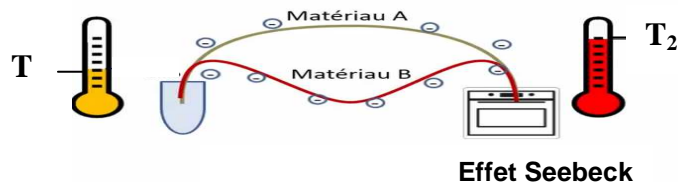


Fig. I.17. Effet thermoélectrique.

- L'effet inverse de l'effet Seebeck est l'effet **Peltier** : le passage d'un courant dans une jonction de deux matériaux provoque la diminution ou l'augmentation de température de cette jonction.

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

- L'effet **Thomson** est l'apparition d'un fém. le long d'un conducteur lorsque celui-ci est soumis à un gradient de température.

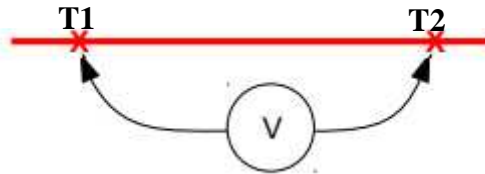


Fig. I.17. Effet Thomson

L'effet thermoélectrique est la somme des tensions de Seebeck et de Thomson

V.2. Photoélectricité

V.2.1. Propriétés fondamentales de la lumière

La lumière présente à la fois un aspect ondulatoire et un aspect corpusculaire.

Sous son aspect ondulatoire, la lumière est vue comme une onde électromagnétique se propageant à la vitesse $c = 299\,792\,458\text{ m.s}^{-1}$ dans le vide et à $v = c/n$ dans la matière (n étant l'indice de réfraction du milieu). Cette onde est caractérisée par sa fréquence f ou sa longueur d'onde λ .

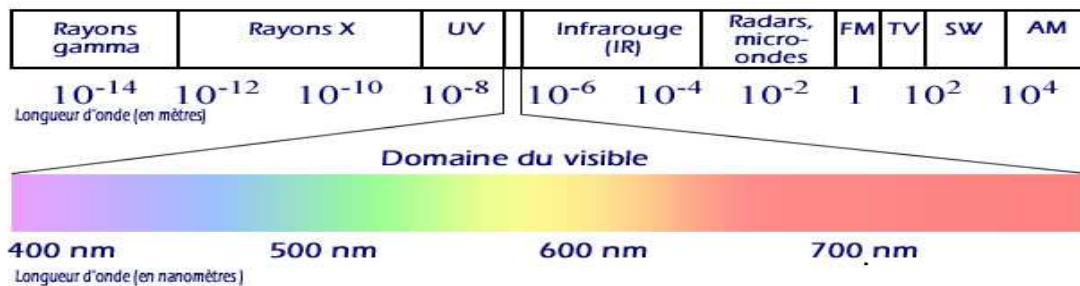


Fig. I.18. Propriétés de la lumière.

Sous son aspect corpusculaire, la lumière est vue comme une particule élémentaire, appelé photon, de masse nulle et d'énergie E :

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

h étant la constante de Planck égale à $6,6256 \cdot 10^{-34}\text{ J.s}$.

Cet aspect est généralement mis en évidence lors de l'interaction de la lumière avec la matière.

V.2.2. L'effet photoélectrique

Dans la matière, les électrons liés aux atomes peuvent devenir libres si on leur apporte une énergie E supérieure à leur énergie de liaison E_l .

L'absorption d'un photon provoquera la libération d'un électron à condition que $E_{\text{photon}} > E_l$.

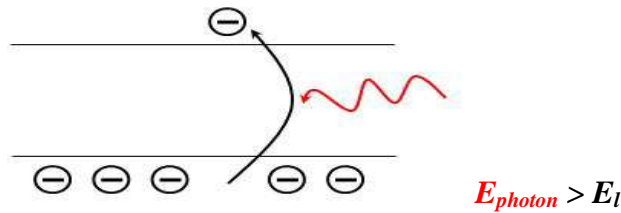


Fig. I.19. Effet photoélectrique

Sous l'influence d'un rayonnement lumineux, le matériau libère des charges électriques et celles-ci en fonction du rayonnement.

L'effet photoélectrique entraîne une modification des propriétés électroniques du matériau et est le principe de base des capteurs optiques.

V.3. Induction électromagnétique

La variation d'un flux magnétique engendre l'apparition d'une force électromotrice.

Application : la mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine.

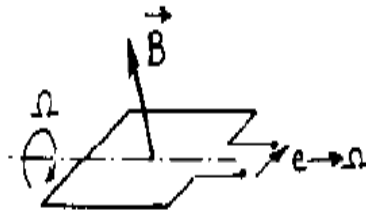


Fig. I.20. Induction électromagnétique

V.4. Effet Hall

Si une plaque conductrice est :

- Parcourue par un courant I
- Plongée dans un champ magnétique B

$$U_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

K_H est fonction du matériau,
 θ est l'angle entre I et B.

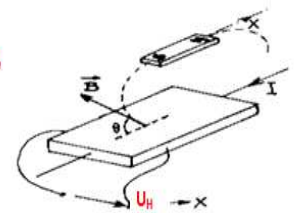


Fig. I.21. Effet Hall

Alors, voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, d'une différence de potentiel qui a pour expression

V.5. Piézoélectricité

L'application d'une force sur ce type de matériau engendre l'apparition de charges électriques créées par la déformation du matériau. C'est un phénomène réversible.

Effet direct de la Piézoélectricité :

FORCE \Rightarrow DEFORMATION \Rightarrow TENSION

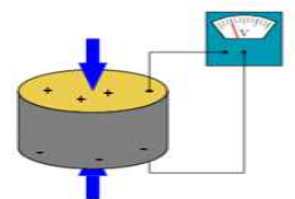


Fig. I.22. Piézoélectricité

V.6. Pyroélectricité

Certains cristaux présentent une polarisation électrique proportionnelle à leur température. Ainsi, en absorbant un flux de rayonnement, le cristal pyroélectrique va s'échauffer et ainsi sa polarisation va se modifier entraînant une variation de tension détectable.

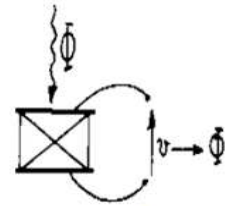


Fig. I.23. Pyroélectricité

V.7. Effet Doppler

L'effet Doppler est présent dans notre quotidien : radar, sirène d'un camion en mouvement... Cet effet se manifeste aussi bien par les ondes sonores que les ondes lumineuses.

On suppose une source **S** émettant une onde dans l'air, de longueur d'onde λ_s de vitesse v_s . Simultanément, la source se déplace avec une vitesse v :

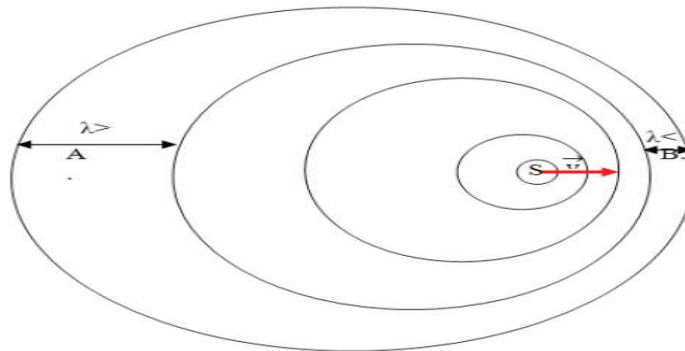


Fig. I.24. Effet Doppler.

Lorsque la source se rapproche de l'observateur B, les ondes émises par la source ont une longueur d'onde λ inférieure à λ_s . Réciproquement, l'observateur A reçoit des ondes dont la longueur λ est supérieure à λ_s . On a ainsi, entre la fréquence de l'émission $f_s = \frac{v_s}{\lambda_s}$ et la fréquence $f = \frac{v_s}{\lambda}$ de l'onde reçue par les observateurs, les relations :

Pour l'observateur A : $f = f_s \times (1 - \frac{v_s}{v})$, on a alors $f < f_s$.

Pour l'observateur B : $f = f_s \times (1 + \frac{v_s}{v})$, on a alors $f > f_s$.

N.B : La vitesse de la source (v) est très inférieure à la vitesse de l'onde (v_s).

VI. Conclusion

Le premier chapitre donne un aperçu général sur les capteurs et chaîne d'acquisition ainsi qu'elle présente les différents types de capteurs exprimant leurs phénomènes physiques utilisés dans les capteurs.

VII. Exercices corrigés

Exercice N°1

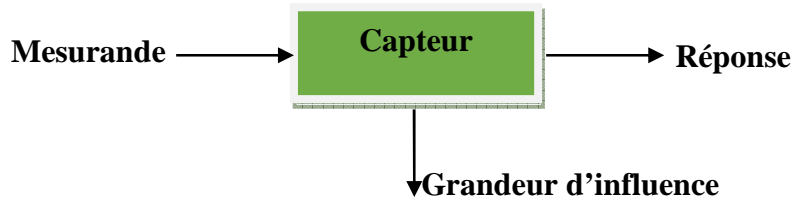


Fig. I.25. Fonctionnement d'un capteur

1. Quelle est la fonction réalisée par ce capteur ?
2. Qu'appelle-t-on mesurande ?
3. a. Que représente la grandeur d'influence ?
b. Comment doit être sa contribution au signal de sortie ?
c. Peut-on utiliser un capteur pour mesurer une grandeur d'influence ? Si oui donner un exemple.

Exercice N°2 : Effet Hall

Lorsqu'un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette **est** parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant I , une tension V_H perpendiculaire au courant et à l'induction apparaît. Cette dernière est donnée par la relation suivante :

$$V_H = K_H \times I \times B \times \sin\theta$$

Où K_H est une constante.

Pour des valeurs de θ proche de 0 ($\text{tg}\theta \approx \theta$), les erreurs effectuées sont de 2% sur I , 1% sur B et 3% sur θ . Calculer l'erreur possible sur V_H

Réponse

$$V_H = K_H I B \sin\theta$$

$$\ln V_H = \ln K_H + \ln I + \ln B + \ln \sin\theta$$

$$\frac{dV_H}{V_H} = \frac{dI}{I} + \frac{dB}{B} + \frac{\cos\theta}{\sin\theta} d\theta = \frac{dI}{I} + \frac{dB}{B} + \frac{1}{\text{tg}\theta} d\theta$$

Pour $\theta \approx 0$ $\text{tg}\theta \approx \theta$ Ce qui nous donne :

$$\frac{dV_H}{V_H} = \frac{dI}{I} + \frac{dB}{B} + \frac{d\theta}{\theta}$$

Ainsi :

$$\frac{\Delta V_H}{V_H} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta\theta}{\theta} = 1 + 2 + 3 = 6\%$$

CHAPITRE I : Les capteurs et chaîne d'acquisition

Exercice N°3

1. Donner une définition du circuit de conditionnement (dans un instrument électronique) et donner un exemple.
2. A quelles conditions peut-on appliquer la loi de probabilité de Gauss à un ensemble de N valeurs de mesure d'une grandeur X ?

Réponse

1. Le circuit de conditionnement sont des circuits électriques qui convertissent, compensent et manipulent le signal de sortie d'un transducteur en un signal électrique plus utile.

Exemple : Pont de Wheatstone qui converti une variation de résistance électrique en une variation de tension.

2. On peut assimiler la distribution de l'ensemble des résultats à une loi de Gauss si les résultats ne présentent que des erreurs aléatoires (pas d'erreurs systématiques).

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

I. Introduction.....	22
II. Les Caractéristiques métrologiques	22
II.1. Etendue de mesure	22
II.2. Fonction de transfert	22
II.3. Sensibilité	22
II.4. Etalonnage	23
II.5. Précision.....	24
II.6. Fidélité	24
II.7. Justesse	25
II.8. Non-linéarité	25
II.9. Hystérésis	25
II.10. Bruit	26
II.11. Résolution	26
II.12. Rapidité	26
II.13. Bande passante	26
II.14. Temps de réponse	27
II.15. Incertitude apportée par un dispositif	27
II.16. Incertitude due par un dispositif	30
III. Conditions de fonctionnement	30
III.1. Environnement de mesure	30
III.2. Grandeur d'influence	30
III.3. Domaine d'utilisation	30
IV. Critères de choix d'un capteur	31
V. Conclusion	31
VI. Exercices corrigés	32

I. Introduction

Le capteur, premier élément de la chaîne de mesure est la source déterminante du signal électrique que le reste de la chaîne doit traiter et exploiter. Le choix d'un capteur dépend de ses caractéristiques métrologiques qui sont un ensemble de spécifications décrivant son fonctionnement et fournies par le constructeur. Ces caractéristiques font référence à des étalonnages réalisés en laboratoire.

II. Les Caractéristiques métrologiques

II.1. Etendue de mesure

Elle est la plage de valeurs du mesurande pour lesquelles le capteur répond aux spécifications du constructeur.

$$E. M. = m_{\max} - m_{\min}$$

L'unité de l'E.M. est généralement l'unité du mesurande.

Exemple : Capteur de force à jauges piezorésistives N556-1

<u>Domaine</u>	<u>Mesurande</u>	<u>Température</u>
Nominal	0-10 N (E.M)	0°C à 60°C

II.2. Fonction de transfert

C'est la relation fonctionnelle qui relie le mesurande en entrée et la grandeur électrique en sortie du capteur. Elle est définie soit par un graphe, soit par une relation formelle (linéaire, exponentielle, logarithmique...).

II.3. Sensibilité

La sensibilité $S(M)$ d'un capteur, pour une valeur donnée du mesurande, est égale au rapport de la variation du signal électrique sur la variation du signal physique.

$$S(M) = \left(\frac{\Delta S}{\Delta M} \right)_{M_0} \quad \text{unité de } S = \frac{\text{unité grandeur électrique}}{\text{unité mesurande}}$$

Remarque : La sensibilité d'un capteur linéaire est constante.

La sensibilité peut se déterminer graphiquement à partir de la courbe d'étalonnage. La sensibilité est la pente de la courbe au point M_0 .

Lorsque la loi physique $S = f(M)$ est connue, la sensibilité σ se déduit par dérivation :

$$\sigma = \left(\frac{d\phi}{dM} \right)_{M_0}$$

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Exemple : Pour une thermistance ayant pour résistance R_0 à la température absolue T_0 , l'équation d'état est :

$$R(T) = R_0 \cdot \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

La sensibilité de ce capteur est donc :

$$\sigma(T) = \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \cdot R_0 \cdot \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

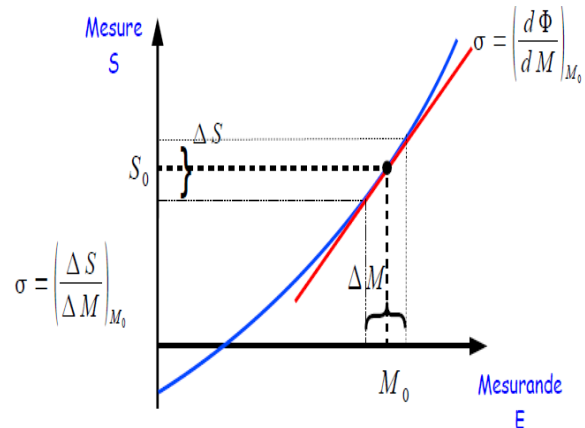


Fig. II.1. Evaluation graphique de la sensibilité

II.4. Etalonnage

L'étalonnage du capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'explicitier, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celles de la grandeur électrique de sortie et ceci, compte tenu de tous les paramètres additionnels susceptible de modifier la réponse du capteur.

Ces paramètres additionnels peuvent être :

- Soit des grandeurs physiques liées au mesurande et auxquelles le capteur est sensible : sens et vitesse de variation du mesurande, propriétés physiques du support matériel du mesurande ;
- Soit des grandeurs physiques, indépendantes du mesurande, auxquelles le capteur est soumis pendant son utilisation et qui peuvent modifier sa réponse : grandeurs d'influence d'ambiance : température, humidité ou grandeurs d'influence d'alimentation : amplitude, fréquence des tensions nécessaires au fonctionnement du capteur.

La courbe d'étalonnage peut être définie une relation fonctionnelle $S = f(m)$.

Exemple : Sonde de température type thermistance

$$R(T) = R_0 \cdot \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

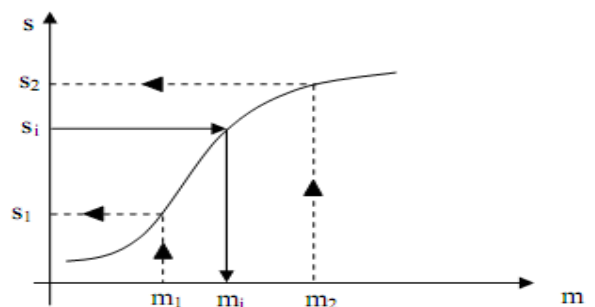


Fig. II.2. Courbe d'étalonnage d'un capteur

II.4.1. Etalonnage simple

Il s'applique à un mesurande défini par une grandeur physique unique et à un capteur non sensible ou non soumis à des grandeurs d'influence. Il s'agit en particulier des mesurandes statique.

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

a- Etalonnage direct ou absolu : Les diverses valeurs du mesurande sont fournies soit par des étalons soit par des éléments de référence.

b- Etalonnage indirect ou par comparaison : On utilise un capteur de référence dont on possède la courbe d'étalonnage et dont on est assuré de la stabilité.

II.4.2. Etalonnage multiple

Lorsque le mesurande à lui seul ne permet pas de définir la réponse du capteur, il faut que soit précisée, par une série d'étalonnages successifs l'influence de chacun des paramètres actifs additionnels.

II.4.3. Meilleure droite

L'étalonnage du capteur fournit à l'expérimentateur un certain nombre de points associés (s_i et m_i). Calculer l'équation d'une droite qui en est la représentation la plus probable. Cette droite, dite meilleure droite.

Soit $S=a \cdot m + b$ avec

$$a = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - \sum s_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} \quad b = \frac{\sum s_i \cdot \sum m_i^2 - \sum s_i \cdot m_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

N : Le nombre de points d'étalonnage

II.5. Précision

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure M proche de la valeur vrai m de la grandeur mesurée.

L'incertitude de mesure δM est telle que : $m = M \pm \delta M$;

L'erreur relative de précision = $\frac{\delta M}{M_{\max} - M_{\min}}$

N.B : *Erreur de précision = erreur de justesse + erreur de fidélité*

II.6. Fidélité

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des mesures concordant entre elles.

Les résultats de mesures répétées d'une même valeur de mesurande restent groupés autour d'une valeur moyenne.

La fidélité est souvent caractérisée par l'écart type.

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

II.7. Justesse

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des mesures proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prise en compte.

La valeur la plus probable du mesurande est très proche de la valeur vraie.

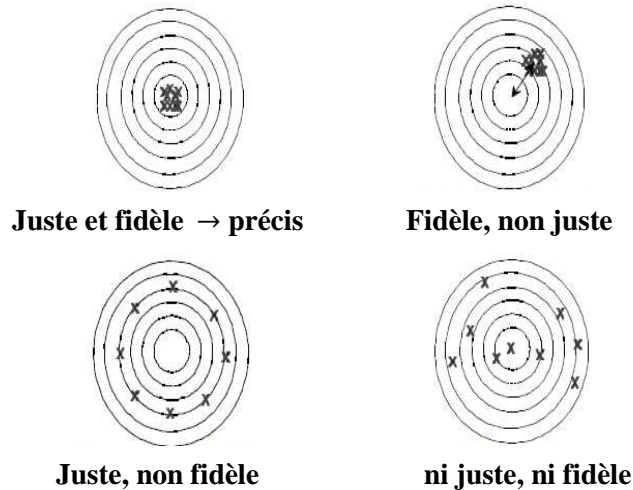


Fig. II.3. Illustrations de la fidélité et de la justesse

II.8. Non-linéarité

La non-linéarité est la déviation maximale de la réponse du capteur sur l'étendue de mesure, par rapport à la fonction de transfert linéaire.

Unité : % de l'E.M

$$\text{Erreur relative de linéarité} = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_0}$$

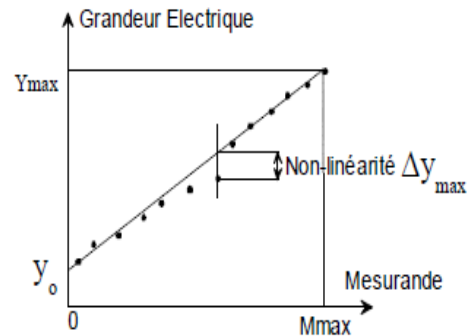


Fig. II.4. La non-linéarité par rapport à la fonction de transfert linéaire

II.9. Hystérésis

L'hystérésis ou la réversibilité caractérise l'aptitude d'un capteur à fournir la même indication lorsqu'on obtenu une même valeur de la grandeur mesurée par variation croissante continue ou par variation décroissante continue de la grandeur.

L'hystérésis est la différence maximale entre ces deux valeurs de sortie.

Unité : Unité du mesurande ou % de l'E.M.

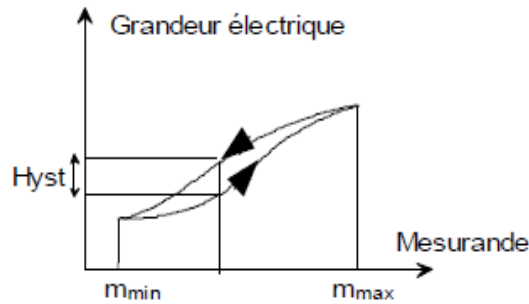


Fig. II.5. L'hystérésis d'un capteur

II.10. Bruit

- Les capteurs délivrant une tension électrique génèrent, en plus de l'information sur le mesurande, du bruit.
- Si ce bruit n'est pas négligeable, alors il limite les performances du capteur.
- Dans ce cas, le constructeur spécifiera la densité spectrale du bruit, en supposant que le bruit est blanc.

Unité typique : $\frac{V}{\sqrt{Hz}}$

II.11. Résolution

La résolution est le plus petit incrément du mesurande détectable.

Unité : celle du mesurande

Si le capteur génère du bruit, la résolution devient dépendante du niveau de bruit. Dans ce cas, elle s'obtient par le rapport de la densité spectrale du bruit sur la sensibilité.

Unité : $\frac{\text{unité du mesurande}}{\sqrt{Hz}}$

II.12. Rapidité

Elle caractérise l'aptitude d'un dispositif à répondre aux variations temporelles du mesurande. Elle est spécifiée soit par la bande passante, soit par le temps de réponse.

Les dispositifs de la chaîne doivent avoir des bandes passantes compatibles avec le signal de mesure.

II.13. Bande passante

Elle est définie comme étant la plage de fréquence de variation du mesurande où les caractéristiques du capteur spécifiées par le constructeur sont respectées.

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Si la fréquence du mesurande est comprise entre f_{basse} et f_{haute} , l'amplitude du signal de sortie sera conforme aux spécifications du constructeur.

$$\text{B.P.} = [f_{\text{basse}}, f_{\text{haute}}]$$

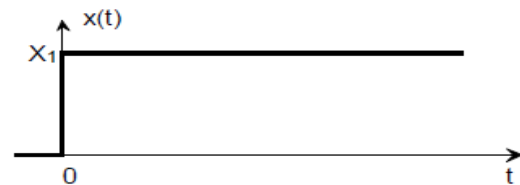
II.14. Temps de réponse

Le temps de réponse $t_r(\varepsilon)$ ou d'établissement à ε près est défini comme la durée minimale d'attente après l'application d'un échelon à l'entrée, pour que l'écart relatif de la sortie par rapport à sa valeur finale demeure toujours inférieur à ε .

- La grandeur d'entrée : $x(t) = X_1 \cdot U(t)$ Avec $U(t) = 0$ pour $t < 0$ et $U(t) = 1$ pour $t \geq 0$
- La grandeur de sortie $y(t)$ tend vers Y_1 quand $t \rightarrow \infty$ $\frac{Y_1 - y(t)}{Y_1} \leq \varepsilon$ pour $t \geq t_r(\varepsilon)$

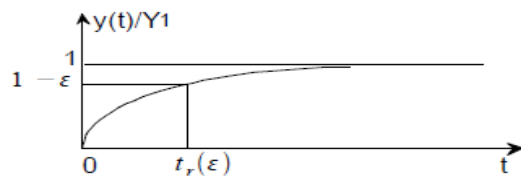
Exemples de temps de réponse :

Signal d'entrée $x(t)$



Temps de réponse d'un dispositif du 1^{er} ordre

a)



Temps de réponse d'un dispositif du 2nd ordre

b)

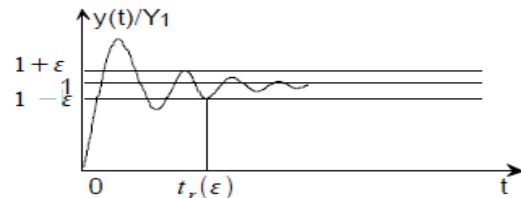


Fig. II.6. Réponse dans le temps : a) d'un système du premier ordre b) d'un système du second ordre à un échelon du mesurande

II.15. Incertitude apportée par un dispositif

Relation théorique (nominal) entre Entrée x et sortie y : $y_n = G_n \cdot x + y_{on}$

G_n gain nominal et y_{on} décalage nominal de zéro

Relation réelle entre Entrée x et sortie y : $y = G \cdot x + y_o$

G gain réel et y_o décalage réel de zéro.

Incertitude δy sur la grandeur de sortie du dispositif : $\delta y = y - y_n$ d'où $\delta y = \delta G \times x + \delta y_o$

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Les caractéristiques métrologiques permettent :

- de connaître G_n ,
- d'estimer l'incertitude associée.
- L'erreur associée à chaque dispositif est : $E = \frac{\partial y}{y_{\max} - y_{\text{on}}}$, $E = \frac{\partial y}{y_{\max}}$

A- Erreur de gain

La valeur réelle de G présente un écart maximum δG par rapport à sa valeur nominale.

L'erreur de gain : $E_{G_n} = \frac{\partial G}{G_n} = \frac{G - G_n}{G_n}$

E_{G_n} entraîne sur la sortie y une incertitude maximale δy_{G_n} :

$$\delta y_{G_n} = \partial G \times x_{\max} = \partial G \times \frac{y_{\max}}{G_n} \quad \text{et on a} \quad E_{G_n} = \frac{\partial y}{y_{\max}}$$

B- Erreur de gain (bande passante)

Pour une entrée sinusoïdale de fréquence f , on définit la réponse en fréquence du gain $G(f)$.

Les dispositifs d'une chaîne d'acquisition sont généralement de type passe-bas. ($G(0)$ gain statique).

La variation relative du gain à la fréquence f est : $E_{G(f)} = \frac{G(f) - G(0)}{G(0)}$

Si l'on ne tient pas compte de cette variation de gain, on introduit une incertitude maximale sur l'amplitude de sortie :

$$E_{G(f)\max} = \frac{G(F_h) - G(0)}{G(0)} = \frac{\partial G}{G(0)} = \frac{\partial y}{y_{\max}}$$

$E_{G(f)\max}$ est l'incertitude maximale sur la bande passante F_h est la fréquence maximale du signal d'entrée.

B-1. Dispositif à réponse du 1er ordre

$$G(f) = G(0) \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_c^2}}}$$

f_c : fréquence de coupure à -3 dB

Pour un signal dont $F_h \ll f_c$, l'incertitude relative sur le gain est :

$$E_{G(f)} = -\frac{1}{2} \left[\frac{F_h}{f_c} \right]^2$$

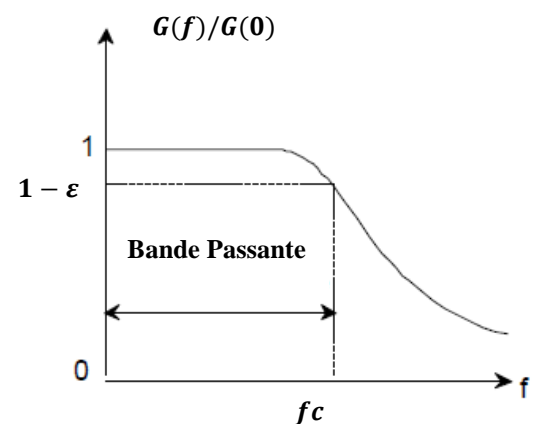


Fig. II.7. Réponse en fréquence d'un système du premier ordre (module).

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

B-2. Dispositif à réponse du 2nd ordre

$$G(f) = G(0) \times \frac{1}{\sqrt{(1 - (f/f_c)^2)^2 + 4\epsilon(f/f_c)^2}}$$

f_c : fréquence propre des oscillations non amorties

ζ : coefficient d'amortissement

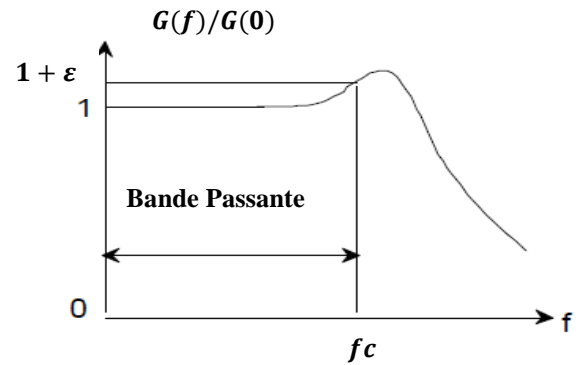


Fig. II.8. Réponse en fréquence d'un système du second ordre (module).

Pour un signal dont $F_h \ll f_c$, l'incertitude relative sur le gain est :

$$E_{G(f)} = -\frac{1}{2} \left[\frac{F_h}{f_c} \right]^2 \left[2 - 4\epsilon - \frac{F_h^2}{f_c^2} \right] \quad E_{G(f)} \approx \left[\frac{F_h}{f_c} \right]^2 [1 - 2\epsilon^2]$$

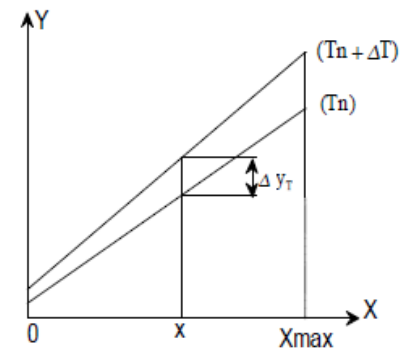
C- Dérives thermiques

Les dispositifs constituant la chaîne de mesure peuvent avoir des performances sensibles à la température de fonctionnement.

✓ Si à la température nominale T_n , on a : $y(T_n) = G(T_n) \times x + y_0(T_n)$

✓ A la température T , on a : $y(T) = G(T) \times x + y_0(T)$

Une variation δT entraîne une erreur δy_T



C-1. Dérive thermique du gain

Pour une température maximale T_{max} , l'incertitude liée à la dérive thermique du gain est

$$\delta y_{G(T)} = [G(T) - G(T_n)] \times x = \delta G \times x$$

On pose : $G(T) = G(T_n) \times (1 + \alpha_G \times \delta T)$

α_G est le coefficient de température du gain ;

$$\delta T = T - T_n$$

L'incertitude maximale est atteinte pour δT_{max} et x_{max} : $\delta y_{G(T)} = G(T_n) \times \alpha_G \times \delta T_{max} \times x_{max}$

L'incertitude relative maximale due à la dérive thermique du gain :

$$E_{G(T)} = \frac{\delta y_{G(T)}}{y_{max}} = \alpha_G \times \delta T_{max}$$

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

C-2. Dérive thermique du décalage à zéro

L'incertitude maximale $\delta y_{z(T)}$ due à la dérive thermique du décalage :

$$\delta y_{z(T)} = y_0(T_{max}) - y_0(T_n) = \frac{dy_0}{dT} \times \delta T_{max}$$

L'incertitude relative maximale s'écrit : $E_{z(T)} = \frac{\delta y_{z(T)}}{y_{max}} = \frac{1}{y_{max}} \times \frac{dy_0}{dT} \times \delta T_{max} = \frac{dE_z}{dT} \times \delta T_{max}$

Le constructeur fournit :

- soit la sensibilité thermique du décalage : $\frac{dy_0}{dT}$ (mV. °C⁻¹)

- soit la sensibilité thermique de l'incertitude : $\frac{dE_z}{dT}$ (% EM. °C⁻¹)

II.16. Incertitude due par un dispositif

- Chaque dispositif de la chaîne est source de plusieurs erreurs.

- L'incertitude maximale due à un dispositif est : $E_{max} = \sum |E_i|$

III. Conditions de fonctionnement

III.1. Environnement de mesure

Ce terme regroupe l'ensemble des grandeurs physiques ou chimiques dont l'influence sur les éléments de la chaîne est susceptible d'en modifier les performances :

Ex : températures, parasites, perturbations, vibrations électromagnétiques, humidité....

III.2. Grandeur d'influence

Grandeurs physiques ou chimiques « parasites » auxquelles peut être sensible la réponse du capteur.

Solutions : minimiser l'influence ; Protéger le capteur ; Stabiliser les grandeurs d'influence à une valeur connue ; Compenser l'influence des grandeurs parasites.

III.3. Domaine d'utilisation

Il peut survenir des modifications de caractéristique du capteur s'il subit des contraintes trop importantes.

Domaine nominal d'emploi : Conditions normales d'utilisations

Domaine de non-détérioration : Dépassement du D.N.E. Les caractéristiques du capteur sont modifiées de manière réversible.

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Domaine de non-destruction : Dépassement du domaine de non détérioration. Les caractéristiques du capteur sont modifiées de manière irréversible. Un nouvel étalonnage est nécessaire.

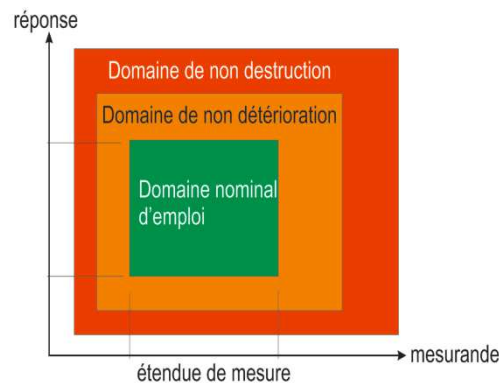


Fig. II.9. *Domaine d'utilisation.*

Exemple : Capteur de force à jauges piezorésistives N556-1

<u>Domaine</u>	<u>Mesurande</u>	<u>Température</u>
Nominal	0-10 N (E.M)	0°C à 60°C
Non-détérioration	1,5 x E.M	-20°C à 100°C
Non-destruction	3 x E.M	-50°C à 120°C

IV. Critères de choix d'un capteur

Le type de mesure définira le type du capteur. Le choix du capteur dépend de différents critères :

L'application, l'étendue de mesure, la précision, la fidélité, le temps de réponse, prix, durée de vie (la robustesse) et sa forme.

V. Conclusion

Ce chapitre, dédié à quelques caractéristiques métrologiques, Conditions de fonctionnement et les critères de choix d'un capteur.

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

VI. Exercices corrigés

Exercice N°1

Pour mesurer le débit d'un liquide dans un tube, une turbine peut être utilisée. Ce type de capteur est étalonné dans un environnement de 20°C et les caractéristiques « vitesse de rotation/débit liquide » obtenus sont résumées dans le tableau suivant :

Tab. II.1. Caractéristiques du capteur à 20°C

Rotational speed (rd/s)	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
Liquid flow (Kg/s)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50

1. Expliquer le principe de fonctionnement de ce type de capteur,
2. Déterminer sa sensibilité à 20°C,
3. Le capteur est utilisé pour mesurer le débit d'un liquide à 50°C, lister les différentes erreurs qui peuvent être faites et préciser si elles sont systématiques ou aléatoires, 4. L'expérience réalisée à 50°C montre que les caractéristiques de la turbine changent comme suit :

Tab. II.2 Caractéristiques du capteur a 50°C

Rotational speed (rd/s)	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
Liquid flow (Kg/s)	0,10	0,35	0,64	0,85	1,10	1,60

Déterminer la sensibilité à 50°C.

Exercice N°2

La résistance d'une thermistance à une température T est donnée par la relation suivante :

$$R = R_0 \exp \beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Où :

R_0 : La valeur de la résistance à la température T_0 [K], $R_0 = 5000 \Omega$ à 23 °C

β : une constante dans le domaine considéré

Un étalonnage est réalisé afin de déterminer la valeur de la constante β dans le domaine d'étude.

1. Donner la signification de l'étalonnage et expliquer comment conduire une telle d'expérience
2. Les résultats expérimentaux obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

Tab. II.3. Résultats de mesure de température

T	23	30	35	40	45	50	55	60
R(T) en Ω	5000	3950	365	2890	2500	2150	1860	1630

En utilisant la régression linéaire (méthode des moindres carrées) déterminer la meilleure estimation de β .

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Réponse

1. L'étalonnage consiste à déterminer des valeurs de l'output d'un instrument pour des valeurs constantes de l'input.

$$2. R = R_0 \exp \beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$\ln R = \ln R_0 + \beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Faisons le changement de variable suivant : $y = \ln R$, $x = \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$ et $b = \ln R_0$

Ainsi, la relation devient linéaire : $y = \beta x + b$.

Avec ce changement de variable, nous obtenons :

Tab. II.4 Changement de variables appliqué aux données

T(°C)	23	30	35	40	45	50	55	60
R(Ω)	5000	3950	365	2890	2500	2150	1860	1630
T(K)	296	303	308	313	318	323	328	333
X	0	-8E-5	-1E-4	-2E-4	-2E-4	-3E-4	-3E-4	-4E-4
Y	8,5	8,3	8,1	8,0	7,8	7,7	7,5	7,4

En appliquant la méthode de régression linéaire (moindres carrées) :

$$\beta = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - \sum s_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} \quad b = \frac{\sum s_i \cdot \sum m_i^2 - \sum s_i \cdot m_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

N : Le nombre de points d'étalonnage

Nous obtenons : $\beta = 2985,6$ K, $b = 8,52$

Exercice N°3

Lors de l'étalonnage d'un dispositif de la chaîne d'acquisition, le constructeur relève les points expérimentaux donnant la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie.

Entrée	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
sortie	0.45	1.06	1.37	2.01	2.56	3.12	3.42	3.85	4.49	5.12

a- Tracer le graphe défini pas ces points et tracer approximativement la « meilleure » droite passant pas ces points.

b- La relation nominale entre l'entrée et la sortie fournit par le constructeur est :

$$S = G_n \cdot E + S_{on}$$

Où

G_n est le gain nominal $G_n = 0.5044$

S_{on} est le décalage nominal $S_{on} = -0.0293$

----Justifier ces paramètres.

c- Calculer l'écart maximal de linéarité et l'erreur relative de linéarité.

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Exercice N°4

Soit un dispositif A de la chaîne de mesure (capteur, ampli) dont les caractéristiques métrologiques sont les suivants :

- Incertitude sur le gain $\pm 1.10^{-3}$
- Erreur maximale de linéarité $\pm 0.2.10^{-3}$
- Fréquence de coupure 20kHz
- Coefficient de température du gain $\alpha_G = 0.3.10^{-4}C^{-1}$
- Sensibilité thermique de l'incertitude de décalage $0.1.10^{-3}C^{-1}$

En sachant que la fréquence haute du signal de mesurande et $f_h=2KHz$ que la plage de variation de température est $\Delta T = 30^\circ C$ et que la réponse du dispositif est du premier ordre,

1. Calculer l'incertitude maximale apportée par le dispositif.
2. Un capteur de température est installé à proximité de ce dispositif, en vue de compenser les erreurs dues aux dérives thermiques. En sachant que l'étendue de mesure du capteur est de $0-100^\circ C$ et que sa précision est de 2%. Calculer l'incertitude maximale apportée par le dispositif après compensation des erreurs thermiques.

Réponse

1. l'incertitude maximale apportée par le dispositif :

$$\varepsilon_{tot} = |\varepsilon_{Gn}| + |\varepsilon_l| + |\varepsilon_{G(f)}| + |\varepsilon_{G(T)}| + |\varepsilon_{Z(T)}|$$

$$|\varepsilon_{Gn}| = 10^{-3}$$

$$|\varepsilon_l| = 0.2 \times 10^{-3}$$

$$|\varepsilon_{G(f)}| = \frac{1}{2} \left(\frac{f_h}{f_c} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2.10^3}{20.10^3} \right)^2 = 5 \times 10^{-3}$$

$$|\varepsilon_{G(T)}| = \alpha_G \Delta T_{max} = 0.3.10^{-4}.30 = 0.9 \times 10^{-3}$$

$$|\varepsilon_{Z(T)}| = \frac{de_z}{dT} \cdot \Delta T_{max} = 0.1.10^{-3}.30 = 3 \times 10^{-3}$$

$$\text{Donc } \varepsilon_{tot} = 10^{-3} + 0.2 \times 10^{-3} + 5 \times 10^{-3} + 0.9 \times 10^{-3} + 3 \times 10^{-3} = 1.01\%$$

Exercice N°5

Un capteur est étalonné dans un environnement à une température de $21^\circ C$. Les caractéristiques déflexion/charge sont illustrées dans le tableau suivant :

Tab. II.5. Caractéristiques déflexion/charge à $21^\circ C$

Charge (kg)	0	50	100	150	200
Déflexion (mm)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0

Quand il est utilisé à $35^\circ C$, ses caractéristiques changent comme suit :

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Tab. II.6. Caractéristiques déflexion/charge à 35°C

Charge (kg)	0	50	100	150	200
Déflexion (mm)	0.2	1.3	2.4	3.5	4.6

1. Déterminer la sensibilité du capteur à 21°C et 35°C. Que remarquez-vous ?
2. Calculer le décalage à zéro et l'écart de sensibilité à 35°C.

Exercice N°6

La sensibilité d'un thermomètre à résistance (sonde Pt100) dont la résistance vaut 100Ω à 0°C est de l'ordre de $3,9 \cdot 10^{-1} \Omega/^\circ\text{C}$, supposée sensiblement constante avec la température (variation linéaire de la résistance avec la température). Calculer la précision sur la mesure de température si l'on mesure la résistance de la sonde avec une incertitude de 0,1% au voisinage de 100°C .

Réponse

$$R = R_0 (1 + \alpha T) \text{ soit } dR/dT = R_0 \alpha = 0,39 \Omega/\text{K (uSI)}$$

$$R_{100} = 139 \Omega \text{ et } \Delta R/R = 0,1\% \Rightarrow \Delta R = 0,139 \Omega$$

$$\Delta T = 0,139/0,39 = 0,356^\circ\text{C} \approx 0,4^\circ\text{C}$$

Exercice N°7

Le curseur d'un potentiomètre est lié à une membrane ou capsule de manière à ce que la déformation de ce corps d'épreuve entraîne un déplacement du curseur.

Le potentiomètre de résistance totale R_n est alimenté par une f.e.m e. (Voir Fig. II.10)

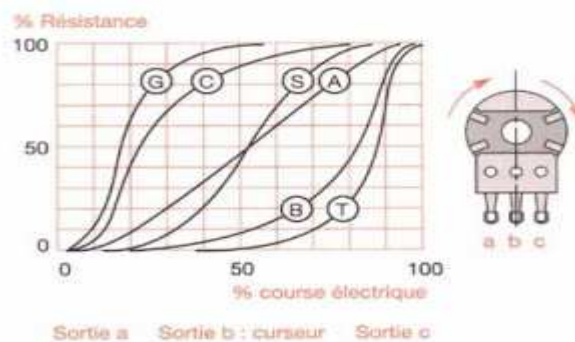


Fig. II.10. Potentiomètre par variation de résistance

1. Quelle est la grandeur physique pour laquelle ce capteur est spécifiquement conçu ?
2. Quel est le signal électrique fourni par ce capteur ?
3. a. Donner l'expression de la tension V_m entre le curseur et l'une de ces extrémités
 b. S'il y a une proportionnalité entre :
 - pression p à mesurer et déformation du corps d'épreuve
 - déformation du corps d'épreuve et déplacement x du curseur
 - déplacement x du curseur et résistance $R(x)$ Comment s'écrit alors V_m ?

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

4. L'amplitude du signal de sortie est de l'ordre du volt. Quel est l'avantage de disposer d'un signal de sortie élevé ?
5. A votre avis quels sont les inconvénients de ce type de capteurs ?
6. Proposer l'instrumentation associée a ce capteur.

Exercice N°8

On veut mesurer la stratification thermique dans un réservoir de stockage d'eau chaude. Pour cela, on place 10 sondes pour la mesure de la température de type PT100 espacées de 15 cm.

Pour une PT100, la caractéristique telle que donnée par le fabricant est la suivante :

$$R = R_0 [1 + 0,00385 T]$$

R est la résistance en Ohm

T est la température en °C

R₀ est la valeur de la résistance à 0°C. Sa valeur est 100 Ohms

A un instant t, on mesure les températures dans les différentes couches du ballon. On obtient le tableau suivant :

Tab. II.7. Résultats de mesure de température dans les différentes couches

Couche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resistance (Ω)	107,07	108,49	107,07	111,17	113,09	117,33	120,41	121,56	122,33	123,1

1. Chercher les valeurs de la température au niveau de chaque sonde
2. Tracer la courbe T = f(Z) On remarque que la température représente une irrégularité au niveau de la sonde N°5. On procède alors à son étalonnage, et on obtient le tableau suivant

Tab. II.8. Etalonnage de la sonde N°5

T [°C]	20	30	40	50	60
R (Ω)	106,15	110,25	114,30	118,35	122,45

3. Cherchez les caractéristiques de cette sonde. Qu'est ce que vous pouvez en déduire ?
4. Lors d'un test, on doit chauffer et bien mélanger l'eau au ballon jusqu'à 60°C. Le mélange doit être effectué jusqu'à ce que la différence entre la température de la couche N°1 et celle de la couche N°10 soit inférieure à 0.5°C. Quelle doit être la résolution de l'ohm mètre pour obtenir une telle précision ?

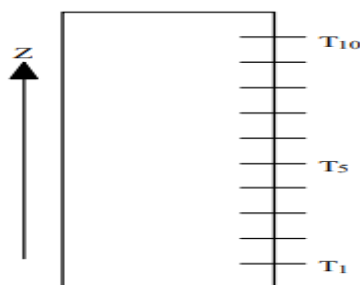


Fig. II.11.Placement des capteurs dans le ballon

CHAPITRE II : Quelques caractéristiques métrologiques

Réponse

1. Les niveaux de la température de chaque sonde sont déterminés à partir de l'équation :

$$R = R_0 [1 + 0,00385 T]$$

$$T = \frac{\frac{R}{R_0} - 1}{0,00385} = 2,597R - 259,74$$

Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tab. II.9. Variation de la résistance en fonction de la température

Couche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resistance (Ω)	107,7	107,09	108,47	111,17	113,09	117,33	120,41	121,56	122,33	123,1
Température T ($^{\circ}\text{C}$)	20	18,41	22	29	34	45	53	56	58	60

2. Traçons la courbe $T = f(Z)$

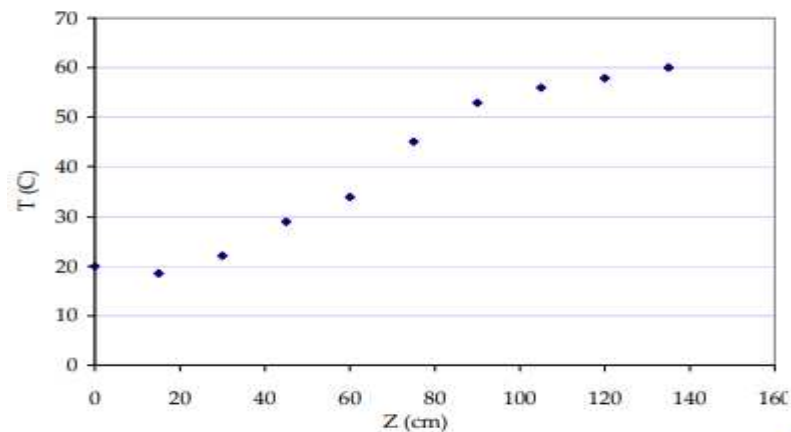


Fig. II.12. Variation de la température en fonction de Z

3. On remarque que la résistance varie de manière linéaire avec la température ($\rho = 2=1$), la sensibilité est égale à : $2,457 \Omega/\text{C}$ et le décalage au zéro est de $-240,83 \Omega$

CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

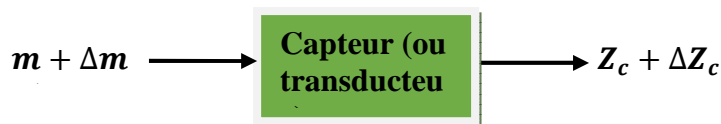
I. Introduction.....	39
II. Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs	39
II. 1. Principaux types de conditionneurs.....	39
II. 2. Qualités d'un conditionneur	40
III. Montage potentiométrique	41
III.1. Mesure des résistances	41
III.2. Mesures des impédances complexes	45
III.3. Inconvénients du montage potentiométrique	46
III.4. Montage potentiométrique avec amplification du signal.....	47
IV. Montage en pont	48
IV.1. Montage push-pull demi-pont	48
IV.2. Montage en pont complet	49
V. Montage oscillant	50
VI. Conclusion	50
VII. Exercices corrigés	51

I. Introduction

Après une présentation générale des deux types de capteurs, les passifs et les actifs, des différents éléments constituant une chaîne de mesure (chapitre. I), ce chapitre sera consacré aux conditionneurs de capteurs passifs ; les montages potentiométriques, montage push-pull, les ponts et les oscillateurs y seront décrits. Le conditionneur est l'élément de sortie du capteur qui transforme les variations du mesurande primaire ou secondaire en variations électriques exploitables (tension, courant, ...). Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. De la constitution du conditionneur dépend certain nombre de performances de l'ensemble de mesure.

II. Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs

La réponse d'un capteur passif à la variation du mesurande Δm se traduit comme une variation d'impédance $\Delta R, \Delta L, \Delta C$



Exemples :

- Capteurs résistifs : jauges de contraintes, sondes température métalliques, capteurs de déplacement,
- Capteurs capacitifs : microphones, capteurs de déplacement, détecteurs de proximité,
- Capteurs inductifs : capteurs de déplacement, détecteurs de proximité,

N.B :

- On associe donc toujours une source externe de tension ou de courant au capteur.
- Du point de vue de l'utilisation, on regroupe souvent les fonctions capteur- conditionneur sous un même terme de capteur ou transducteur.

II. 1. Principaux types de conditionneurs

Les variations de l'impédance Z_c d'un capteur passif liées aux évolutions d'un mesurande m ne peuvent être traduites sous la forme d'un signal électrique qu'en associant au capteur une source de tension e_s ou de courant i_s et généralement d'autres impédances Z_K constituant alors le conditionneur du capteur.

On peut distinguer deux groupes principaux de conditionneurs selon qu'ils transfèrent l'information liée aux variations d'impédance du capteur,

1^{er} groupe : on récupère une tension proportionnelle au mesurande : $V_m = e_s \cdot F(Z_c, Z_k)$

c'est le cas des montages potentiométriques et des ponts.

2^{ème} groupe : la fréquence du signal de sortie est modulée par le mesurande : $f_m = G(Z_c, Z_k)$

il s'agit alors d'oscillateurs.

II. 2. Qualités d'un conditionneur

II. 2.1. Sensibilité et linéarité

A la variation Δm du mesurande correspond une variation ΔZ_c de l'impédance du capteur qui selon le type de conditionneur entraîne soit une variation de l'amplitude de la tension de mesure soit de sa fréquence. La sensibilité globale S_a de l'association du conditionneur et du capteur est :

Dans le premier cas :

$$S_a = \frac{\Delta V_m}{\Delta m} \quad \text{soit} \quad S_a = \frac{\Delta V_m}{\Delta Z_c} \cdot \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$

Dans le second cas :

$$S_a = \frac{\Delta f_m}{\Delta m} \quad \text{soit} \quad S_a = \frac{\Delta f_m}{\Delta Z_c} \cdot \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$

La sensibilité propre du conditionneur est, selon le cas :

$$\frac{\Delta V_m}{\Delta Z_c} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta f_m}{\Delta Z_c}$$

alors que la sensibilité du capteur est :

$$S = \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$

- Le conditionneur est linéaire si sa sensibilité propre est indépendante de Z_c ;
- L'association d'un conditionneur linéaire et d'un capteur linéaire délivre un signal de mesure proportionnel aux variations du mesurande.
- Le conditionneur n'est pas linéaire il peut être linéarisé en remplaçant l'un des composants fixes par un second capteur (fonctionnement en push-pull)

II. 2.2. Compensation des grandeurs d'influence

Si le capteur est sensible à une grandeur d'influence, température ou rayonnement par exemple, il est important de pouvoir éliminer du signal de mesure sa contribution aux variations de Z_c .

On considère le cas d'un conditionneur et d'un capteur résistifs :

$$V_m = e_s \cdot F(R_c, R_k)$$

La grandeur d'influence, de valeur g , pouvant affecter aussi bien certains composants du conditionneur que le capteur lui-même, une variation dg entraîne une variation dV_m de la tension de mesure :

$$dV_m = \left(\sum_k \frac{\partial V_m}{\partial R_k} \cdot \frac{\partial R_k}{\partial g} + \frac{\partial V_m}{\partial R_c} \cdot \frac{\partial R_c}{\partial g} \right) dg$$

CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

Les évolutions de la grandeur d'influence n'ont aucun effet sur la tension de mesure lorsqu'est satisfaite la condition :

$$\sum_k \frac{\partial V_m}{\partial R_k} \cdot \frac{\partial R_k}{\partial g} + \frac{\partial V_m}{\partial R_c} \cdot \frac{\partial R_c}{\partial g} = 0$$

Si par exemple, une seule des résistances du conditionneur est rendue sensible à la grandeur d'influence et qu'elle est en outre, choisie identique à R_c :

$$\frac{\partial R_k}{\partial g} = \frac{\partial R_c}{\partial g}$$

et il y a compensation des variations de la grandeur d'influence si :

$$\frac{\partial V_m}{\partial R_k} = - \frac{\partial V_m}{\partial R_c} ;$$

III. Montage potentiométrique

III.1. Mesure des résistances

Le capteur de résistance R_c en série avec une résistance R_1 est alimenté par une source de résistance interne R_s et de f.é.m. e_s , continue ou alternative (Fig.III.1).

La tension V_m est mesurée aux bornes du capteur par un appareil de résistance R_d ; on établit immédiatement :

$$V_m = e_s \cdot \frac{R_c R_d}{R_c (R_s + R_1) + R_d (R_s + R_1 + R_c)}$$

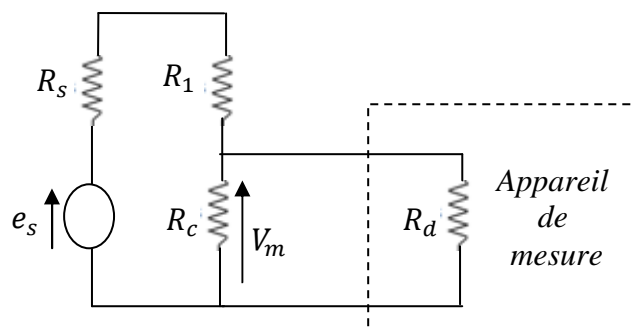
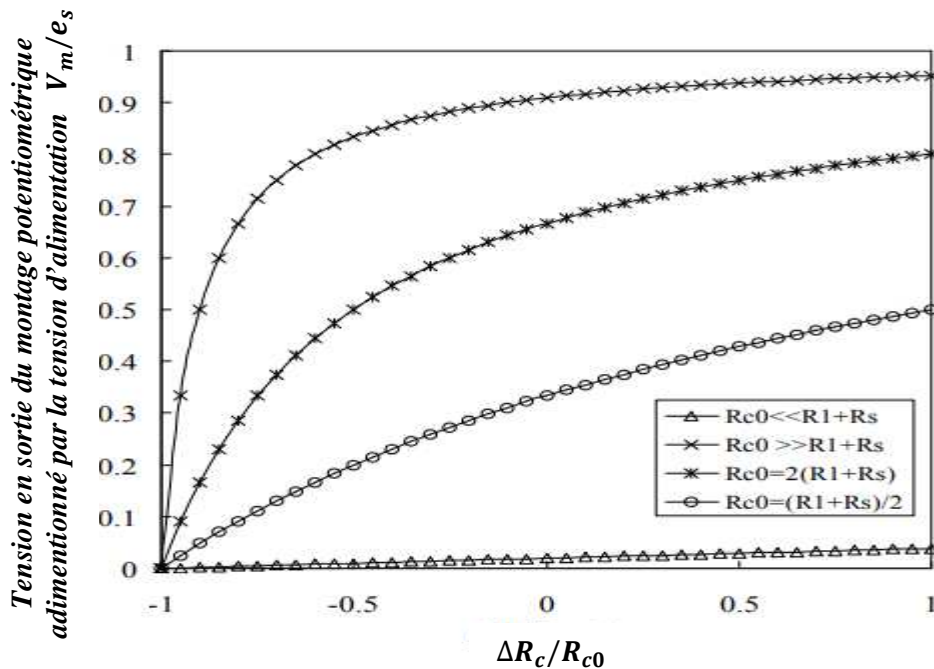


Fig. III.1. Mesure de la tension aux bornes d'un capteur résistif dans un montage potentiométrique

La tension aux bornes du capteur est indépendante de l'appareil de mesure utilisé à condition que $R_d \gg R_c$; dans ce cas

$$V_m = e_s \cdot \frac{R_c}{R_s + R_1 + R_c}$$

La tension V_m n'est pas une fonction linéaire de R_c . La sensibilité du montage n'est donc pas constante.



III.1.1. Linéarisation de mesure

On souhaite que la variation ΔV_m de la tension mesurée soit proportionnelle à la ΔR_c de la résistance du capteur.

a- Première solution : fonctionnement en « petits signaux »

La résistance du capteur variant de R_{c0} à $R_{c0} + \Delta R_c$ la tension V_m passe de V_{m0} à $V_{m0} + \Delta V_m$:

$$V_{m0} + \Delta V_m = e_s \cdot \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_s + R_1 + R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{R_s + R_1 + R_{c0}}}$$

A condition que $\Delta R_c \ll R_s + R_1 + R_{c0}$ et au second ordre près

On a

$$\Delta V_m = e_s \cdot \frac{(R_s + R_1) \Delta R_c}{(R_s + R_1 + R_{c0})^2}$$

La sensibilité du conditionneur $\Delta V_m/\Delta R_c$ est maximale si l'on choisit $R_s + R_1 = R_{c0}$; dans ce cas :

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}}$$

Si la résistance de source R_s est faible, le maximum de sensibilité étant large, la condition précédente se ramène, avec une bonne approximation à $R_1 \cong R_{c0}$.

CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

b- Seconde solution : alimentation par source de courant

Le montage est alimenté par une source de courant c'est-à-dire d'impédance interne R_s très élevée : $R_s \gg R_1 + R_{c0}$

Dans ce cas, la condition $\Delta R_c \ll R_s + R_1 + R_{c0}$ est toujours vérifiée. En posant : $i_s = \frac{e_s}{R_s}$

On a

$$\Delta V_m = i_s \cdot \Delta R_c$$

c- Troisième solution : montage push-pull

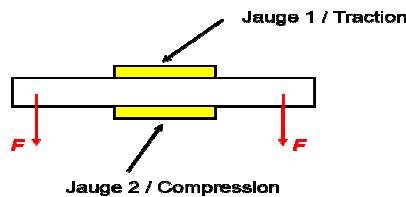
On remplace la résistance fixe R_1 par un second capteur, identique au premier, mais dont les variations sont des signe contraire : $R_1 = R_{c0} - \Delta R_c$. Cette association de 2 capteurs fonctionnant en opposition est dite push-pull.

$$V_{m_0} + \Delta V_m = e_s \cdot \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_s + R_{c0} - \Delta R_c + R_{c0} + \Delta R_c}$$

Soit

$$\Delta V_m = e_s \cdot \frac{\Delta R_c}{2R_{c0} + R_s}$$

Exemple : 2 jauges d'extensométrie identiques mais subissant des déformations égales et de signes contraires.



III.1.2. Compensation des grandeurs d'influence à l'aide d'un montage push-pull

Soit m le mesurande, Δm_1 et Δm_2 étant ses variations au niveau des capteurs 1 et 2,

La situation initiale prise comme origine des variations correspond à :

$$\begin{aligned} m &= m_0 & g &= g_0 \\ R_{c1} &= R_{c2} = R_{c0} & V_m &= V_{m_0} = e_s / 2 \end{aligned}$$

Après variation du mesurande et de la grandeur d'influence, on a :

$$\begin{aligned} R_{c1} &= R_{c0} + \Delta R_{c1} & \Delta R_{c1} &= S_g \Delta g + S \Delta m_1 \\ R_{c2} &= R_{c0} + \Delta R_{c2} & \Delta R_{c2} &= S_g \Delta g + S \Delta m_2 \end{aligned}$$

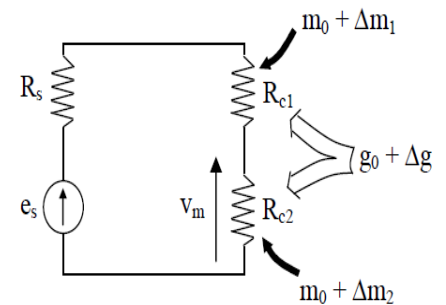


Fig. III.3. Réalisation du montage potentiométrique pour fonctionnement en push-pull

CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

$S_g = \frac{\Delta R_c}{\Delta g}$ étant la sensibilité de chacun des capteurs à la grandeur d'influence,

$S = \frac{\Delta R_c}{\Delta m}$ étant leur sensibilité au mesurande.

et la tension de mesure est alors : $V_m = V_{m_0} + \Delta V_m$.

En supposant que l'impédance interne du générateur de tension $R_s \ll R_{c_0}$, la variation de tension peut s'écrire:

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4R_{c_0}} \cdot \frac{\Delta R_{c_2} - \Delta R_{c_1}}{1 + (\Delta R_{c_1} + \Delta R_{c_2})/2R_{c_0}} \quad \text{Ce qui nous amène à distinguer les deux cas}$$

suivants:

• Cas n°1: le capteur 1 n'est pas soumis au mesurande

$$\Delta m_1 = 0 \rightarrow \Delta R_{c_1} = S_g \Delta g \quad \rightarrow \quad \Delta V_m = \frac{e_s}{4R_{c_0}} \cdot \frac{S \Delta m_2}{1 + S_g \Delta g / R_{c_0}} \quad \text{si } \Delta m_2 \ll R_{c_0}$$

• Cas n°2 : les deux capteurs fonctionnent en push-pull

$$\Delta m = \Delta m_2 = -\Delta m_1 \quad \rightarrow \quad \Delta V_m = \frac{e_s}{2R_{c_0}} \cdot \frac{S \Delta m}{1 + S_g \Delta g / R_{c_0}}$$

Dans les deux cas examinés, on obtient une variation de tension ΔV_m proportionnelle aux seules variations du mesurande mais il est important de noter que la sensibilité du montage $S_a = \Delta V_m / \Delta m$ dépend de la grandeur d'influence, d'une part explicitement par le terme $S_a = S_g \Delta g$ et d'autre part si la sensibilité S du capteur en dépend.

III.1.3. Elimination de la composante permanente de la tension de mesure

Avec la méthode potentiométrique, la variation de tension ΔV_m qui porte l'information est superposée à une tension V_{m_0} généralement supérieure. Ceci risque de rendre la mesure imprécise dans le cas de phénomènes statiques pour lesquels ΔR_c est constant ou lentement variable.

Exemple :

$V_{m_0} = 4 \text{ V}$ et $\Delta V_m = 5 \text{ mV}$, il est très difficile de faire une lecture précise de ΔV_m sur le calibre 6V du voltmètre.

a). Solution n°1 : L'alimentation symétrique

Elle impose aux deux extrémités du potentiomètre des tensions égales et opposées par rapport à la masse. La tension mesurée V_m a pour expression :

$$V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{R_c - R_1}{R_c + R_1 + R_s}$$

CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

En choisissant $R_1=R_{c0}$ et en supposant que $R_s \ll R_{c0}$, on a une tension de mesure non nulle

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \Delta R_c / 2R_{c0}}, \text{ lorsque le capteur varie } R_c = R_{c0} + \Delta R_c$$

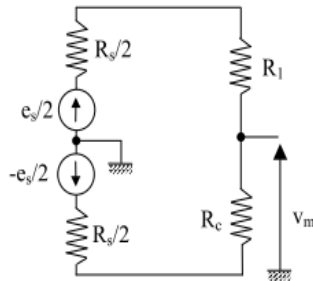


Fig. III.4. Montage potentiométrique avec alimentation symétrique

b). Solution n°2 : Filtre passe-haut

Dans le cas de phénomènes dynamiques ou les variations du mesurande sont alternatives, les variations de ΔR_c et de ΔV_m le sont aussi.

Si V_{m0} est une tension continue. Un filtre passe-haut simple, schématisé ci-contre, permet alors de séparer V_{m0} de ΔV_m

Il suffit que sa fréquence de coupure $f_c = \frac{1}{2\pi R_d C}$ soit inférieure à la fréquence la plus basse du phénomène étudié.

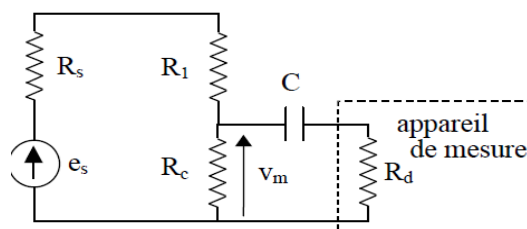


Fig. III.5. Montage potentiométrique : Elimination de la composante permanente

III.2. Mesures des impédances complexes (Z_c)

Le capteur est capacitif (détecteur de niveau par exemple) ou inductif (détecteur de position). On utilise alors une source d'alimentation sinusoïdale associée à pont diviseur.

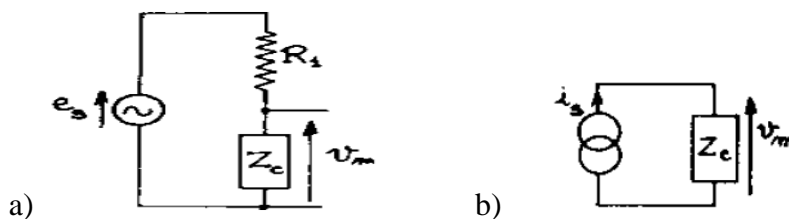


Fig. III.6. Mesure d'une impédance complexe à l'aide : a) d'une source de tension alimentant un montage potentiométrique ; b) d'une source de courant.

CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

- ❖ En supposant $R_1 < Z_c$, on obtient aux petites variations : $\Delta V_m = \frac{e_s}{R_1} \cdot \Delta Z_c$
- ❖ De même en utilisant une source de courant I : $\Delta V_m = i_s \cdot \Delta Z_c$

III.3. Inconvénients du montage potentiométrique

L'avantage de ce montage est bien sur sa simplicité de mise en œuvre !!!
La difficulté majeure lors de l'utilisation du montage potentiométrique risque de venir de sa sensibilité aux dérives de la source et aux parasites. Les deux exemples suivants l'illustrent

III.3.1. Alimentation dissymétrique

Si le circuit est le siège simultanément d'une variation de résistance du capteur $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$ et d'une fluctuation de la tension source $e_s = e_{s0} + \Delta e$, alors la variation de tension mesurée a pour expression si l'hypothèse $\Delta R_c \ll R_{c0}$ est respectée :

$$\Delta V_m = e_{s0} \cdot \frac{(R_s + R_1) \Delta R_c}{(R_1 + R_s + R_{c0})^2} + \Delta e \cdot \frac{R_{c0}}{R_1 + R_s + R_{c0}}$$

Il est donc difficile, à priori, de séparer dans la variation ΔV_m la part due à ΔR_c de celle due à Δe

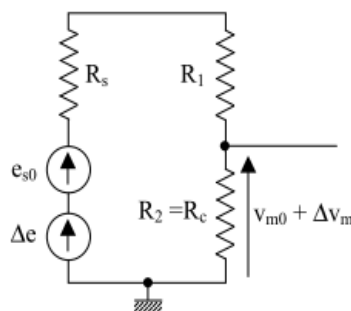


Fig. III.7. : Influence des dérives de la source ou des parasites dans le montage potentiométrique (alimentation dissymétrique)

III.3.2. Alimentation symétrique

Il faut considérer dans ce cas les tensions parasites Δe_1 et Δe_2 induites dans les deux branches de la source : elles superposent leurs effets à celui de ΔR_c .

La variation globale de la tension de mesure est, au second ordre près :

$$\Delta V_m = \frac{V_e}{2} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} + \frac{\Delta e_1 + \Delta e_2}{2}$$

Sauf dans le cas particulier où les variations de la source seraient $\Delta e_1 = -\Delta e_2$, il est impossible de mettre en évidence ΔR_c .

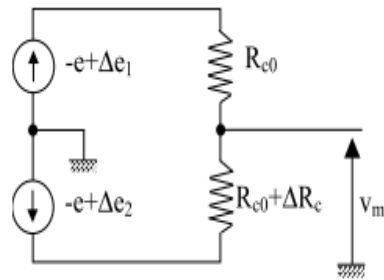


Fig. III.8. : Influence des dérives de la source ou des parasites dans le montage potentiométrique (alimentation symétrique)

III.4. Montage potentiométrique avec amplification du signal

Ce conditionneur est utilisé notamment pour les photorésistances ($R = f(\Phi)$)

A l'entrée de l'amplificateur opérationnel, on a :

$$V^- = \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_s$$

$$V^+ = \frac{R}{R + R_1} V_{CC}$$

or, on a : $V^+ = V^-$

donc :

$$\frac{R}{R + R_1} V_{CC} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_s$$

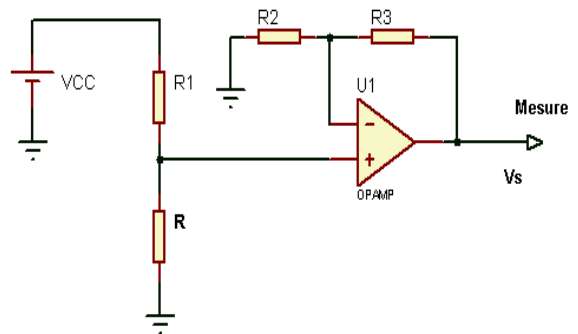


Fig. III.9. Montage potentiométrique avec amplification du signal

On obtient alors :

$$V_s = \frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} V_{CC}$$

Pour une photorésistance la variation $R = f(\Phi)$ est de la forme

$$R = ae^{-b\phi}$$

R diminue si l'intensité du flux lumineux augmente.

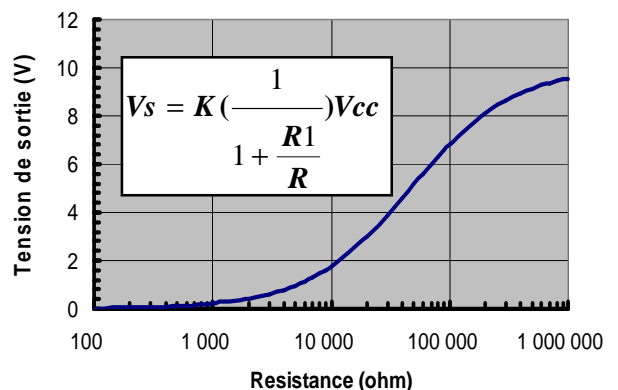


Fig. III.10. Conditionneur pour LDR

IV. Montage en pont

Calcul des potentiels :

$$\text{En A : } V_A = \frac{R_c}{R_c + R_1} e_s$$

$$\text{En B : } V_B = \frac{R_4}{R_4 + R_3} e_s$$

On obtient une tension de mesure encore appelée tension déséquilibre du pont :

$$V_m = V_A - V_B = \frac{R_c R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_c)(R_4 + R_3)} e_s$$

Cas $R_c = R_1 = R_2 = R_3 = R$:

Cela correspond à une *sensibilité maximum pour le cas du diviseur potentiométrique*, et l'on suppose que le mesurande évolue autour d'une valeur R_{c0} .

$$R_c = R_{c0} + \Delta R, \text{ Avec } R_{c0} = R$$

On obtient alors pour :

$$V_A = \frac{e_s}{2} \frac{(1 + \Delta R/R)}{(1 + \Delta R/2R)} \text{ et } V_B = e_s/2 \quad \text{Soit} \quad V_m = \frac{e_s}{4} \frac{\Delta R/R}{(1 + \Delta R/2R)}$$

Calcul pour de très faibles variations de R_c

En faisant une étude autour du voisinage de zéro ($\Delta R/R \ll 1$), on peut linéariser la relation entre V_m et ΔR :

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

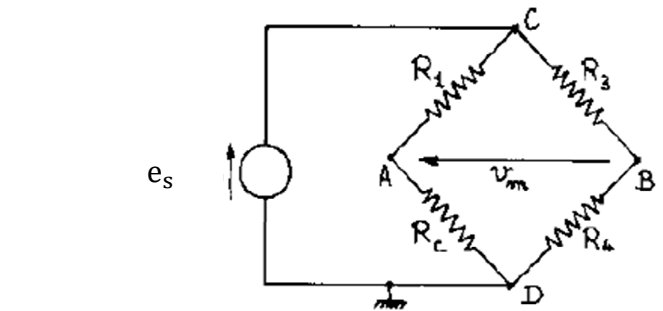


Fig. III.11. Montage en pont

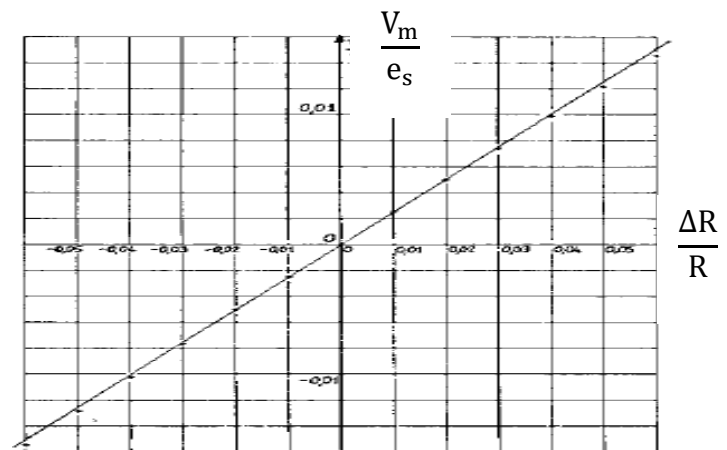


Fig. III.12. Représentation du déséquilibre du pont en fonction de la variation de R_c

On obtient une mesure avec une sensibilité constante autour du point d'équilibre.

IV.1. Montage push-pull demi-pont

Dans ce montage, la résistance fixe R_1 est remplacée par un second capteur identique au premier mais dont la variation est opposée au premier capteur : $R' = R_{c0} - \Delta R$. On a alors 2 résistances fixes R_3 et R_4 et 2 capteurs représentés par R et R' .

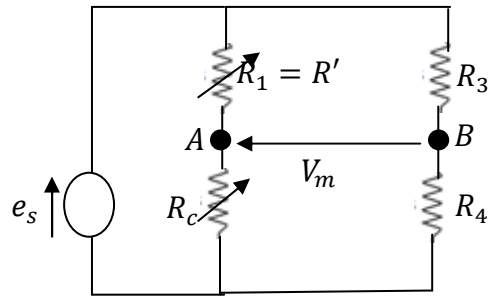


Fig. III.13. Montage push-pull demi-pont

$$R_c = R = R_{c0} + \Delta R \text{ et } R_l = R' = R_{c0} - \Delta R$$

$$\text{On a pour signal de sortie : } V_m = V_A - V_B = \left(\frac{R}{R' + R} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) e_s$$

$$\text{En fixant les valeurs de } R_4 \text{ et } R_3 \text{ égales à } R_{c0}, \text{ on a alors : } V_m = V_A - V_B = \left(\frac{R}{R' + R} - \frac{R_{c0}}{R_{c0} + R_{c0}} \right) e_s$$

$$\text{Soit, } V_m = \left(\frac{R_{c0} + \Delta R}{2R_{c0}} - \frac{R_{c0}}{R_{c0} + R_{c0}} \right) e_s$$

On obtient alors l'expression de V_m :

$$V_m = \left(\frac{R_{c0} + \Delta R}{2R_{c0}} - \frac{R_{c0}}{R_{c0} + R_{c0}} \right) e_s = \left(\frac{1}{2} + \frac{\Delta R}{2R_{c0}} - \frac{1}{2} \right) e_s = \frac{e_s}{2R_{c0}} \Delta R$$

Avantages du montage push-pull demi-pont

- ❖ La composante continue de V_m est annulée,
- ❖ La variation de V_m avec ΔR est linéaire.

IV.2. Montage en pont complet

Le montage ci-dessous délivre la tension : $V_m = \frac{e_s}{R_{c0}} \Delta R$ Ce montage, comparé aux précédents, est préférable puisqu'il délivre une tension plus importante.

$$\begin{aligned} R_c = R &= R_{c0} + \Delta R, \\ R_1 = R' &= R_{c0} - \Delta R, \\ R_3 = R_{c0} + \Delta R \text{ et} \\ R_4 &= R_{c0} - \Delta R \end{aligned}$$

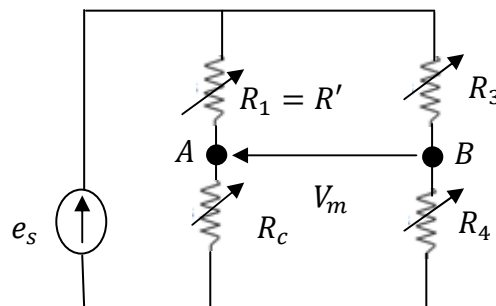


Fig. III.14. Montage en pont complet

V. Montage oscillant

Un circuit oscillant (LC) présente une fréquence de résonance F_0 telle que : $F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
Si on insère un capteur capacitif ou inductif dans un tel circuit, ses variations entraîneront une variation ΔF de la fréquence d'oscillation du circuit.

En supposant des petites variations on obtient une évolution :

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta L}{2L_0} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta C}{2C_0}$$

VI. Conclusion

Le troisième chapitre est consacré aux conditionneurs des capteurs passifs et mettre en évidence les quatre différents montages existant. Le capteur et son conditionneur éventuel sont la source du signal électrique dont la chaîne de mesure doit assurer le traitement de la façon la plus appropriée au but poursuivi. Dans le chapitre suivant on se propose d'étudier certain nombre de dispositifs de traitement, dits conditionneurs de signal.

VII. Exercices corrigés

Exercice N°1

Soit un montage potentiométrique, une résistance électrique R_c en série avec R_1 est alimentée par une source de tension E . La tension est mesurée aux bornes du R_c par un appareil de mesure de résistance R_i .

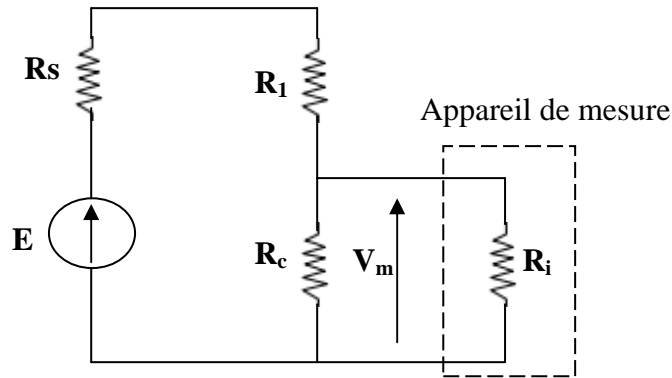


Fig.III.15 : Montage potentiométrique

1. Donner l'expression de la tension V_m , sachant que $V_m = V_{m0} + \Delta V_m$, $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$ et $R_1 = R_s = R_{c0}$.

Si la tension aux bornes de R_c est indépendante de l'appareil de mesure à condition que la résistance R_c soit très faible devant celle de résistance R_i .

2. Donner l'expression de la tension mesurée V_m
3. Donner la nouvelle expression de V_m pour les faibles variations.
4. Si l'erreur sur les résistances est de 1% et l'erreur sur E est de 2%, calculer l'erreur relative sur V_m pour $R_c = R_1 = R_s = 50 \Omega$.

Exercice N°2

On considère le pont de Wheatstone présenté sur la Fig.III.16

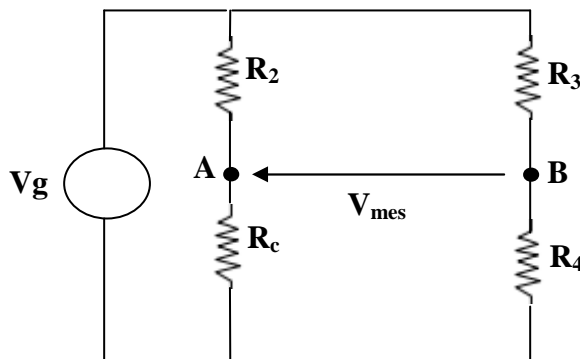


Fig.III.16. : Montage du Pont de Wheatstone

1. Montrer que la tension V_{mes} peut être obtenue par l'expression suivante :

CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

$$V_{mes} = \left(\frac{R_c}{R_c + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot V_g$$

2. A l'équilibre, la valeur de V_{mes} est égale à Zéro. En déduire une relation entre R_1 et les autres résistances.
3. On suppose que les résistances R_3 et R_4 sont égales, et que $R_c = 2 \times R_2$. Déterminer l'erreur relative sur V_{mes} sachant que l'erreur sur V_g est égale à 1%.

Réponse

$$\text{En A : } V_A = \frac{R_c}{R_c + R_2} V_g$$

$$\text{En B : } V_B = \frac{R_4}{R_4 + R_3} V_g$$

On obtient une tension de mesure encore appelée tension déséquilibre du pont :

$$V_{mes} = V_A - V_B = \frac{R_c R_3 - R_2 R_4}{(R_2 + R_c)(R_4 + R_3)} V_g$$

$$2. V_{mes} = 0 \Rightarrow \frac{R_c}{R_c + R_2} V_g = \frac{R_4}{R_4 + R_3} V_g \quad \text{ce qui donne } R_c R_3 = R_2 R_4$$

$$3. V_{mes} = V_g \cdot \left(\frac{2R_2}{3R_2} - \frac{R_4}{2R_4} \right) = \frac{1}{6} V_g \Rightarrow \frac{dV_{mes}}{V_{mes}} = \frac{dV_g}{V_g} = 1\%$$

Exercice N°3

Soit un montage potentiométrique (alimentation symétrique Fig.III.17).

1. Donner l'expression de la tension mesurée V_m , pour $R_1 = R_{c0}$.

On considère le deuxième montage de pont avec 3 résistances fixes telles que $R_1 = R_3 = R_4 = R_{c0}$, et d'un capteur R_2 dont la résistance est $R_2 = R_{c0} + \Delta R_c$.

1. Donner l'expression de la tension V_m .

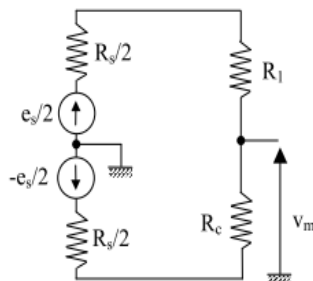


Fig. III.17. Montage potentiométrique avec alimentation symétrique

Si le circuit est le siège simultanément d'une variation de résistance du capteur et d'une fluctuation de la tension source e , voir Fig. ci-dessous (alimentation dissymétrique), alors donner la variation de tension mesurée si hypothèse est respectée.

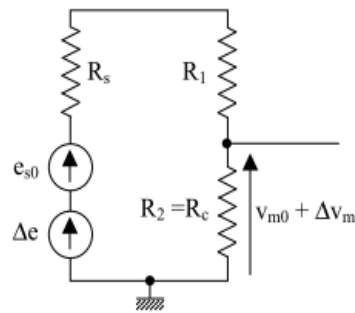


Fig.III.18 : Influence des dérives de la source ou des parasites dans le montage potentiométrique (alimentation dissymétrique).

Dans le montage symétrique Fig.III.19, il faut considérer les tensions parasites Δe_1 et Δe_2 induites dans les deux branches de la source : elles superposent leurs effets à celui de ΔR_c .

1. Donner la variation globale de la tension.
2. Il est possible de mettre en évidence ΔR_c si les variations de la source seraient $\Delta e_1 = \Delta e_2$

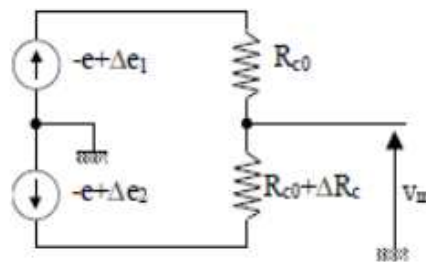
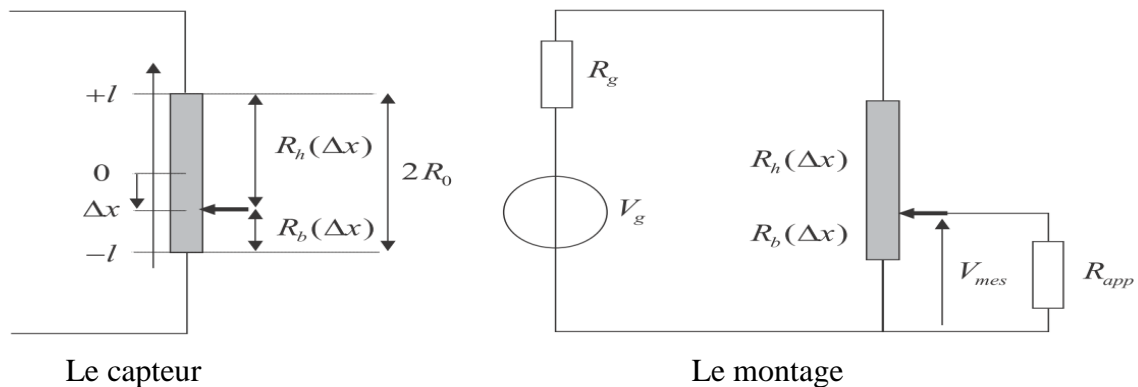


Fig.III.19 Influence des dérives de la source ou des parasites dans le montage potentiométrique (alimentation symétrique)

Réponse : (Voir : III.3)

Exercice N°4

Un capteur de déplacement rectiligne est constitué d'un potentiomètre linéaire schématisé sur la figure. On désigne par Δx la valeur du déplacement du curseur par rapport à la position milieu que l'on prend pour origine de l'axe x .



CHAPITRE III : Conditionneurs des capteurs passifs

1. La course utile du potentiomètre est $2l = 10 \text{ cm}$ et sa résistance totale est $2R_0$. En déduire l'expression des résistances $R_b(\Delta x)$ et $R_h(\Delta x)$ du potentiomètre (voir figure) pour un déplacement Δx du curseur par rapport à la position milieu.
2. Le potentiomètre est monté suivant le schéma de la figure. La tension de mesure V_{mes} , image de la position du curseur, est mesurée par une électronique d'impédance d'entrée R_{app} . Exprimer V_{mes} en fonction de $R_b(\Delta x)$, $R_h(\Delta x)$, R_g , R_{app} et V_g .
3. Que devient cette expression pour $R_{app} \gg R_0$? En déduire la sensibilité S_{mes} de la mesure.
4. Quelle valeur doit-on donner à R_g , pour que cette sensibilité soit maximale ? Que deviennent dans ce cas V_{mes} et S_{mes} ? Calculer la sensibilité réduite S_r .

Réponse

1.

$$\begin{aligned} R_b(\Delta x) &= R_0 + \frac{2R_0}{2l} \Delta x = R_0 \left(1 + \frac{\Delta x}{l}\right) \\ R_h(\Delta x) &= R_0 - \frac{2R_0}{2l} \Delta x = R_0 \left(1 - \frac{\Delta x}{l}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

2.

$$\begin{aligned} V_{mes} &= \frac{R_b(\Delta x) // R_{app}}{R_b(\Delta x) // R_{app} + R_h(\Delta x) + R_g} V_g \\ V_{mes} &= \frac{R_b(\Delta x) \cdot R_{app}}{R_b(\Delta x) \cdot R_{app} + (R_h(\Delta x) + R_g)(R_b(\Delta x) + R_{app})} V_g \end{aligned} \quad (2)$$

3. Pour $R_{app} \gg R_0$ a fortiori $R_{app} \gg R_b(\Delta x)$ et $R_{app} \gg R_h(\Delta x)$, en utilisant (1), (2) devient

$$V_{mes} = \frac{R_b(\Delta x)}{R_b(\Delta x) + R_h(\Delta x) + R_g} V_g = \frac{R_0}{R_g + 2R_0} \left(1 + \frac{\Delta x}{l}\right) V_g$$

Sous cette approximation la mesure est linéaire.

$$S_{mes} = \frac{\Delta V_{mes}}{\Delta x} = \frac{R_0}{R_g + 2R_0} \left(\frac{V_g}{l}\right)$$

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

I. Problématique	56
II. Amplificateur opérationnel	56
II.1. Représentation symbolique	56
II. 2. Modèle en régime linéaire.....	57
II. 3. Spécificités réelles d'un amplificateur réel	57
II. 4. Modèle idéal de l'amplificateur opérationnel	57
III. Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure	57
III.1. Adaptation d'impédance	58
III.2. Capteur source de tension	59
III.3. Capteur source de courant	59
III.4. Capteur source de charge	60
IV. Mesure de la tension	60
IV.1. Problématique de la mesure de tension	60
IV.2. Amplificateur différentiel et taux de rejection du mode commun	61
IV.3. Modélisation de l'amplificateur différentiel	61
IV.4. Amplificateur d'instrumentation	62
V. Conclusion	66
VI. Exercices corrigés	67

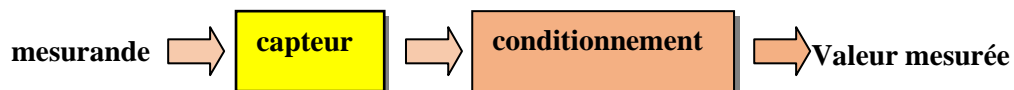
CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

I. Problématique

Les signaux électriques issus de capteurs (thermocouples, ponts, jauges de contrainte...) sont généralement de faible niveau. Il est donc nécessaire de les amplifier pour atteindre des valeurs compatibles avec les outils de mesure modernes (chaîne de mesure numérique).

La mesure ne doit pas perturber le phénomène étudié (modification électrique, modification thermique...).

La mesure doit être significative, même en environnement perturbé (perturbations électriques, thermique, lumineuse, autre grandeur d'influence...). La technique de conditionnement peut participer au rejet des perturbations et grandeurs d'influence.

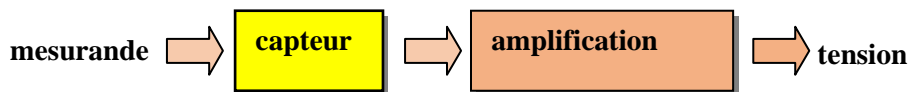


Les capteurs actifs fournissent un signal électrique par définition même.

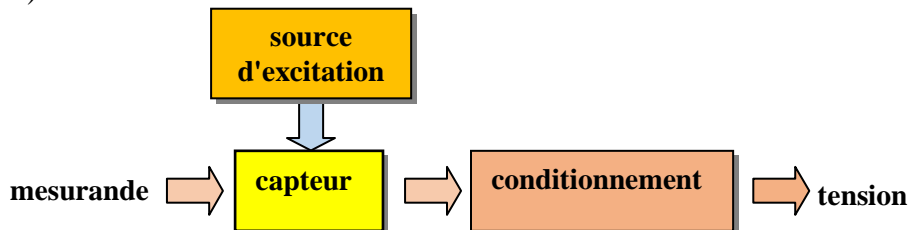
Les grandeurs usuelles sont :

- tension généralement de qqes millivolts
- courant en μA ou mA
- charge électrique

La mesure est une conversion de la grandeur en tension sans perturbation du phénomène source.



Les capteurs passifs demandent une source d'excitation (continue ou alternative) pour mettre en évidence la propriété électrique (variation de résistance, de capacité, d'inductance, de couplage...).

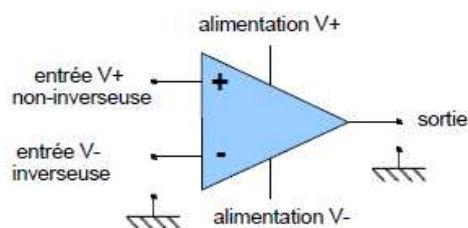


II. Amplificateur opérationnel

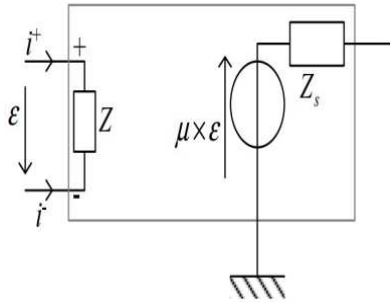
L'amplificateur opérationnel est la base du conditionneur.

Il permet de réaliser les principales fonctions de la mesure électronique des capteurs.

II.1. Représentation symbolique



II. 2. Modèle en régime linéaire



- Z_i impédance d'entrée de l'amplificateur 10^5 à 10^{10} ohms
- i_+ , i_- courant des entrées 10^{-8} à 10^{-12} A
- Z_s impédance de sortie de l'ordre de 10 à 100 ohms
- μ gain complexe basse fréquence à petits signaux

II. 3. Spécificités réelles d'un amplificateur réel

- les courants de polarisation i_+ , i_- présentent une composante continue statique qui circulent dans le circuit associé à l'entrée considérée
- les courants de polarisation i_+ , i_- ne sont pas identiques (offset de courant)
- il existe une tension de décalage entre les entrées v_+ et v_- (offset de tension)
- la vitesse de variation de la tension de sortie est limitée (slew rate), indépendamment de la bande passante.

II. 4. Modèle idéal de l'amplificateur opérationnel

- les courants de polarisation i_+ , i_- sont négligés, ainsi que l'offset de courant
- l'offset de tension est négligeable
- l'impédance d'entrée $Z_i \rightarrow \infty$
- le gain μ est ∞ → cette propriété n'est pas adaptée à l'usage en mesure !!!!

La tension de sortie étant finie (bornée par les valeurs d'alimentation), il en résulte que :

$$\varepsilon = (V_s + Z_s I_s) / \mu = 0$$

En régime linéaire, l'amplificateur idéal a un comportement tel que : $V_+ = V_-$

**L'amplificateur opérationnel est l'outil de base pour amplifier les signaux de mesure.
Son gain doit être adapté pour les usages en instrumentation**

III. Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure

Le capteur, associé à son conditionneur, équivaut à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne délivrant le signal au circuit qui le charge. Afin que le signal soit obtenu dans les meilleures conditions de sensibilité et de stabilité vis à des variations éventuelles de l'impédance interne, le générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée.

III.1. Adaptation d'impédance

Lorsque l'information correspondant au mesurande m est délivrée sous la forme d'une f.é.m. $e_c(m)$ en série avec une impédance Z_c , qui peut être importante et variable, le dispositif de mesure aux bornes duquel est recueilli V_m doit être d'impédance d'entrée Z_i très grande devant Z_c de manière à minimiser l'influence de cette dernière.

$$V_m = e_c(m) \cdot \frac{z_i}{z_i + z_c} \quad \text{si } z_i \gg z_c \text{ alors } V_m = e_c(m)$$

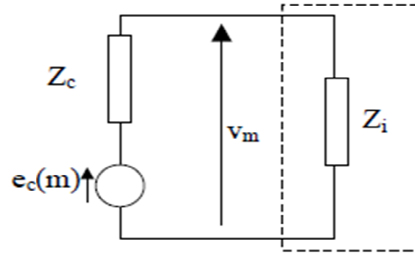


Fig. IV.1 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension : schéma électrique équivalent.

Les dispositifs à grande impédance d'entrée utilisables pour réaliser l'adaptation d'impédance sont à base :

- d'amplificateur opérationnel en montage suiveur simple ou suiveur /amplificateur,

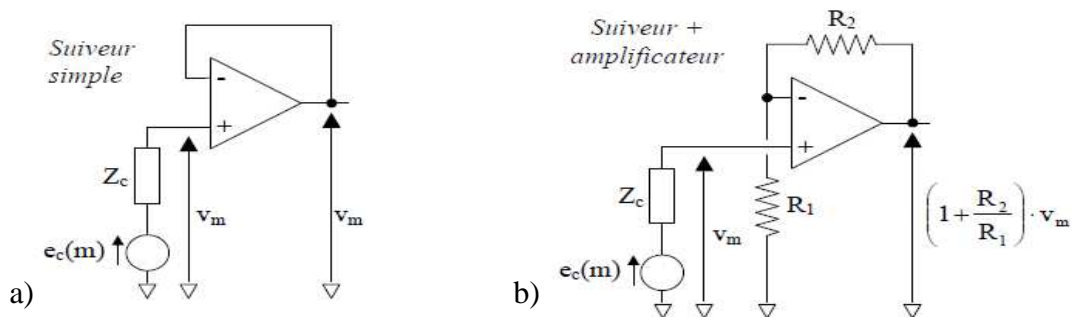


Fig. IV.2 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension : a) montage suiveur ; montage non inverseur

- d'amplificateur différentiel, en général sous la forme d'ampli d'instrumentation ou d'ampli d'isolement.

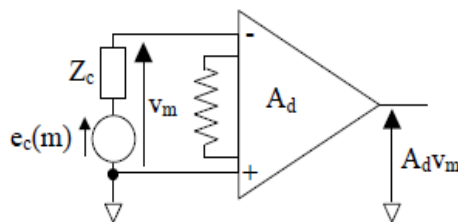


Fig. IV.3 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension : amplificateur d'instrumentation

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

III.2. Capteur source de tension

La fonction à réaliser par le conditionneur est une amplification de tension. La source E_c présente généralement une impédance de sortie Z_c . Le conditionneur charge cette source par sa propre impédance d'entrée. Par application de la règle du diviseur de tension, on obtient :

$$V_m = E_c \cdot \frac{z_i}{z_i + z_c}$$

Le conditionneur doit présenter une impédance d'entrée importante devant celle de la source. Le choix dépend de la précision souhaitée. Pour une précision 1/1000, il faut un rapport d'impédance de même valeur.

Exemple : Thermocouple

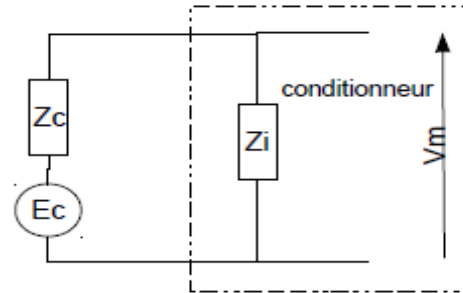


Fig. IV.4 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension : schéma électrique équivalent.

III.3. Capteur source de courant

III.3.1. Modèle du capteur à source de courant

- ❑ Le conditionnement peut se limiter à une simple résistance calibrée $Z_i = R$.
- ❑ La tension mesurée est fonction de la résistance de mesure et de l'impédance parallèle du générateur de courant.
- ❑ Solution acceptable pour un générateur de courant pur ($Z_c \rightarrow \infty$).

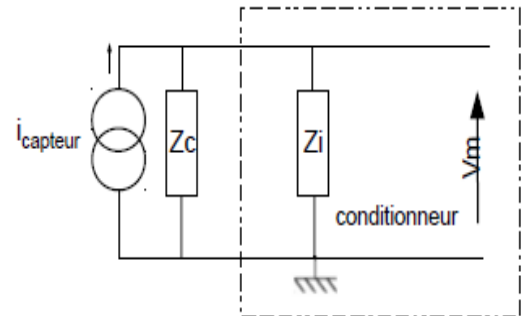


Fig. IV.5 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de courant : schéma électrique équivalent.

III.3.2. Convertisseur courant/tension

Le capteur devient source de courant à tension nulle (et constante). Sa conductance parallèle n'intervient pas dans la valeur mesurée. La bande passante est largement augmentée si le capteur présente une impédance fortement capacitive.

$$V_m = R \times I_c$$

Exemple : phototransistor

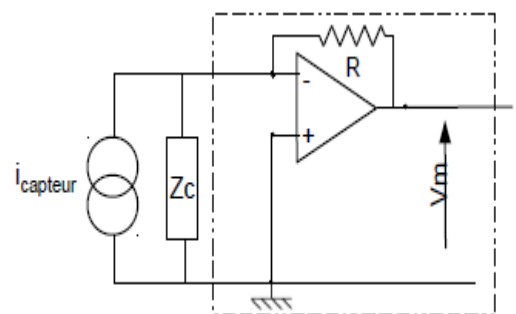


Fig. IV.6 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de courant : Convertisseur courant/tension.

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

III.4. Capteur source de charge

III.4.1. Modèle du capteur générateur de charges

$$V_m = \frac{q_c}{C_c + C_i}$$

- ❑ la résistance interne d'entrée R_i introduit une décharge de la source (circuit du premier ordre).
- ❑ Si la décharge est trop rapide (constante de temps faible), la mesure est impossible.
- ❑ Un tel capteur n'est adapté que pour des mesures à valeur moyenne nulle (accélération/ vibration par exemple)

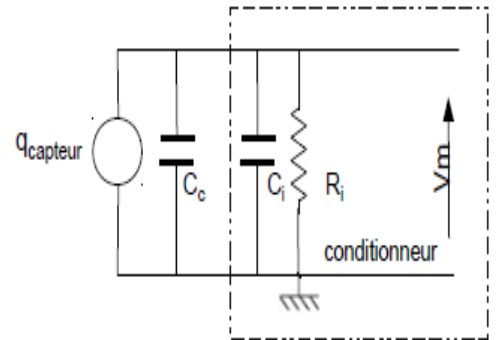


Fig. IV.7 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de charge : schéma électrique équivalent.

III.4.2. Convertisseur charge/tension : amplificateur de charges

Le capteur devient source de charges à tension nulle (et constante). Sa capacité parallèle n'intervient pas dans la valeur mesurée. La bande passante est largement augmentée si le capteur présente une impédance fortement capacitive. *Un circuit auxiliaire est nécessaire pour assurer la compensation de la dérive de l'intégrateur.*

Exemple : capteur piézo-électrique

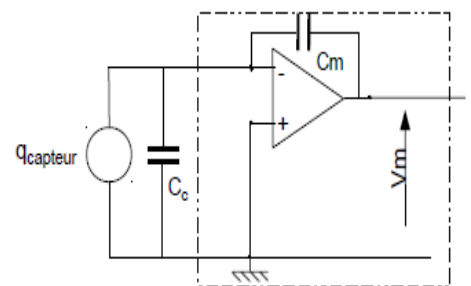


Fig. IV.8 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de charge : amplificateur de charges.

IV. Mesure de la tension

IV.1. Problématique de la mesure de tension

Les signaux issus de capteurs sont de faible niveau et doivent être amplifiés. Le signal utile est généralement une différence de potentiel entre deux points, alors que les outils de mesure usuels (amplificateur opérationnel) évaluent le potentiel par rapport à une référence imposée appelée masse.

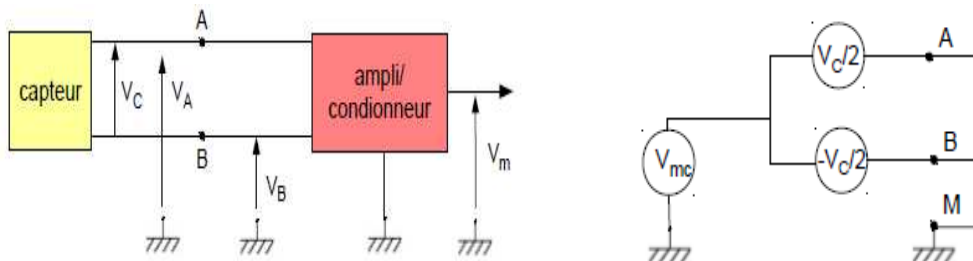


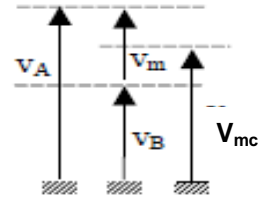
Fig. IV.9 : Définition générale des tensions différentielle et de mode commun.

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

❖ La tension de mesure V_C issue d'un capteur est la différence de potentiel entre les deux conducteurs A et B : $V_C = V_{\text{diff}} = V_m = V_A - V_B$

❖ On appelle tension de mode commun $V_{mc} = \frac{(V_A + V_B)}{2}$

d'où : $V_A = V_{mc} + \frac{V_C}{2}$ et $V_B = V_{mc} - \frac{V_C}{2}$



N.B. : La tension V_{mc} peut être très importante devant la tension de signal. Elle peut être stable, mais le plus souvent, elle est perturbée par des grandeurs externes (sources de bruits, couplages...)

IV.2. Amplificateur différentiel et taux de rejection du mode commun

La méthode la plus courante de mesure de potentiels est le voltmètre. Cet appareil permet d'évaluer la différence de potentiel entre ses deux points de mesure.

L'outil de mesure utilisé en instrumentation est l'amplificateur différentiel, composé de 2 amplificateurs et d'un soustracteur.

□ La tension de sortie est : $V_S = A_1 V^+ - A_2 V^-$

□ On pose : $V_{cm} = \frac{V^+ + V^-}{2}$ Et $V_{diff} = V^+ - V^-$

d'où

$$V_S = A_1(V_{cm} + V_{diff}/2) - A_2(V_{cm} - V_{diff}/2)$$

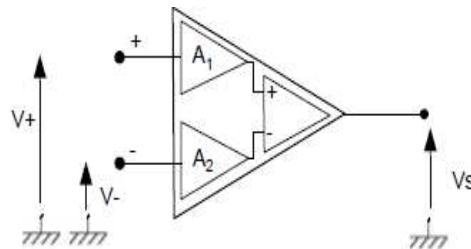


Fig. IV.10 : Structure de l'amplificateur différentiel.

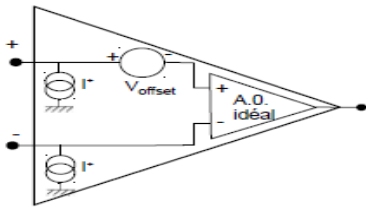
On définit le gain de mode commun et le gain différentiel : $A_{cm} = A_1 - A_2$ et $A_{diff} = \frac{A_1 + A_2}{2}$

$$V_S = A_{diff} \left(V_{diff} + \frac{1}{\tau} V_{mc} \right) \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{A_{diff}}{A_{cm}} \quad \text{taux de rejection du mode commun}$$

IV.3. Modélisation de l'amplificateur différentiel

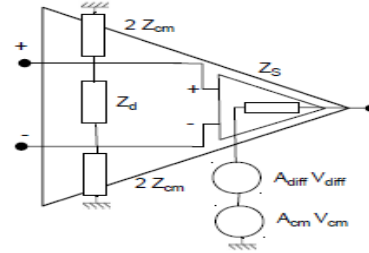
L'amplificateur différentiel se présente comme un amplificateur opérationnel, avec les mêmes défauts inséparables à réalisation technologique.

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal



Défauts statiques :

- courants d'entrée
- tension d'offset



Défauts dynamiques :

- impédances d'entrée de mode commun et différentielle.
- impédance de sortie.

Tab. IV.1. Exemple de caractéristiques d'amplificateur différentiel moderne TL 2372/TL2374

PARAMETER	TEST CONDITIONS	T _A	MIN	TYP	MAX	UNIT
V _{IO} Input offset voltage	V _{IC} = V _{DD} /2, V _O = V _{DD} /2, R _S = 50 Ω	25°C		2	4.5	mV
		Full range			6	
α _{VIO} Offset voltage drift		25°C		2		μV/°C
CMRR Common-mode rejection ratio	V _{IC} = 0 to V _{DD} , R _S = 50 Ω, V _{DD} = 5 V	25°C		55	72	dB
		Full range		54		
		25°C		67	80	dB
		Full range		64		
I _{IO} Input offset current	V _{DD} = 15 V, V _{IC} = V _{DD} /2, V _O = V _{DD} /2	25°C		1	60	pA
		70°C			100	
		125°C			1000	
I _{IB} Input bias current		25°C		1	60	pA
		70°C			100	
		125°C			1000	
r _{i(d)} Differential input resistance		25°C		1000		GΩ
C _{ic} Common-mode input capacitance	f = 21 kHz	25°C		8		pF
PSRR Supply voltage rejection ratio (ΔV _{DD} / ΔV _{IO})	V _{DD} = 2.7 V to 15 V, No load, V _{IC} = V _{DD} /2	25°C		70	80	dB
		Full range		65		

V.4 Amplificateur d'instrumentation

L'amplificateur d'instrumentation est l'amplificateur différentiel idéal.

❑ Caractéristiques souhaitées :

- mesure de la différence de potentiel pour une forte étendue de mode commun

$$V_s = A_{\text{diff}} (V^+ - V^-)$$

- impédance d'entrée infinie pour ne pas perturber le circuit à mesurer
 - impédance de sortie nulle (pas d'affaiblissement du signal sous l'effet d'une charge de sortie)
 - taux de réjection de mode commun infini.
 - Gain différentiel réglable pour un moyen simple (choix d'une résistance, liaison numérique...)
- ❑ La réalisation de l'amplificateur d'instrumentation est souvent basée sur un ou plusieurs amplificateurs opérationnels.

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

IV.4.1 Montage à amplificateur opérationnel soustracteur (idéal)

$$V^+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{e1}$$

$$V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{e2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$$

En régime linéaire : $V^+ = V^-$

d'où :

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left[\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{e1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{e2} \right]$$

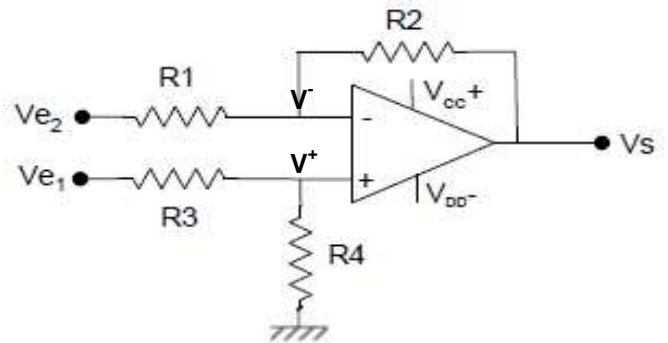


Fig. IV.11 : Montage à amplificateur opérationnel soustracteur.

Pour avoir le même gain sur les deux entrées, on choisit $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$:

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} (V_{e1} - V_{e2})$$

Si les résistances ne sont pas strictement égales ($R_1 \neq R_3$ ou $R_2 \neq R_4$), l'amplification ne concerne pas uniquement $(V_{e1} - V_{e2})$, et on peut écrire :

$$V_s = A_d (V_{e1} - V_{e2}) + A_c \frac{(V_{e1} + V_{e2})}{2}$$

A_c est l'amplification de mode commun

-> Si A_c est non nul, la tension de mode commun est mal « rejetée » : mauvais TRMC.

A. Impédances d'entrée

Le montage soustracteur présente sur chacune de ses entrées une résistance finie :

$$R_{in1} = V_{e1}/I_1 = R_1 + R_2 \text{ (pour } V_{e2} = 0)$$

$$R_{in2} = V_{e2}/I_2 = R_1 \text{ (pour } V_{e1} = 0)$$

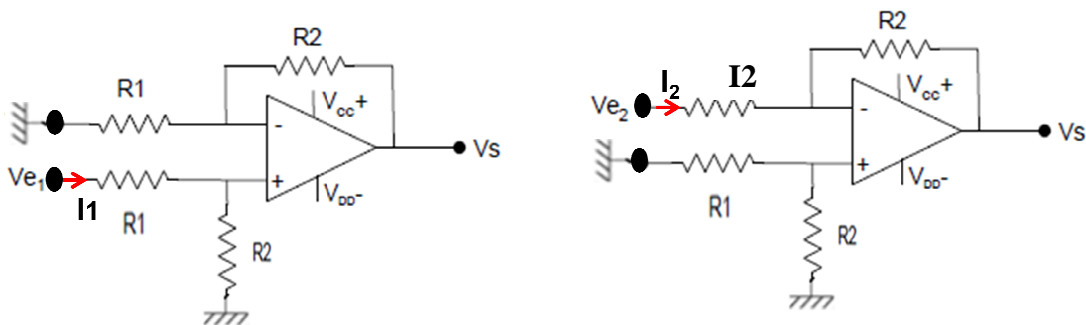


Fig. IV.12 : Impédances d'entrée d'un montage soustracteur.

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

B. L'inconvénient (Limites)

- ❑ Si on souhaite obtenir une amplification élevée, il faut R2 grande et R1 petite.
- ❑ Impédance d'entrée de l'ordre de grandeur de R1
 - Ce montage n'est donc adapté que si V_{e1} et V_{e2} sont des sorties d'autres amplis.
- ❑ Le taux de réjection du mode commun est directement lié à l'égalité des résistances.

C. Solutions

- ❖ On utilise l'impédance d'entrée « infinie » du montage non-inverseur : $R_{in} = R_{in\ AOP} \rightarrow \infty$
- ❖ Les résistances du soustracteur sont ajustées par le constructeur.

→ **Amplificateur d'instrumentation à 3 amplis**

IV.4.2 Amplificateur d'instrumentation à 3 amplis

Le montage est le suivant :

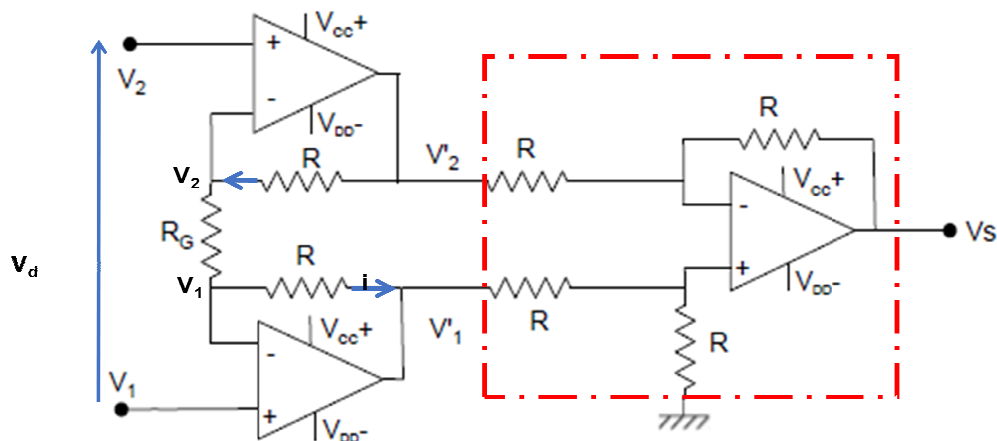


Fig. IV.13 : Amplificateur d'instrumentation à 3 amplis.

Les entrées sont amplifiées par des étages suiveurs dont l'impédance d'entrée dynamique est très élevée.

$$V'_1 = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right)V_1 - \frac{R}{R_G}V_2$$

$$V'_2 = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right)V_2 - \frac{R}{R_G}V_1$$

$$\text{d'où } V_s = \left(1 + 2\frac{R}{R_G}\right)(V_1 - V_2)$$

Le gain se fixe avec une seule résistance R_G ; il est au minimum de 1.

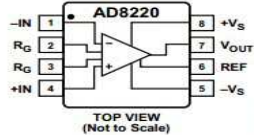
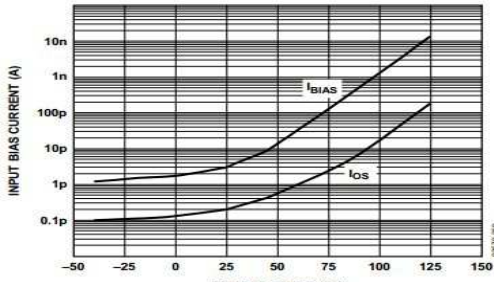
CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

N.B : Le rôle de l'amplificateur d'instrumentation est le même que celui de l'amplificateur de différence.

Cependant, on choisira :

- l'amplificateur de différence si la source d'entrée est à faible impédance ;
- l'amplificateur d'instrumentation si la source d'entrée est à grande impédance.

Exemple commercial AD 8220

	AD8220
FEATURES	PIN CONFIGURATION
Low input currents 10 pA maximum input bias current (B grade) 0.6 pA maximum input offset current (B grade)	
High CMRR 100 dB CMRR (minimum), G = 10 (B grade) 80 dB CMRR (minimum) to 5 kHz, G = 1 (B grade)	TOP VIEW (Not to Scale) Figure 1.
Excellent ac specifications and low power 1.5 MHz bandwidth (G = 1) 14 nV/√Hz input noise (1 kHz) Slew rate: 2 V/μs 750 μA quiescent supply current (maximum)	
Versatile MSOP package Rail-to-rail output Input voltage range to below negative supply rail 4 kV ESD protection 4.5 V to 36 V single supply ±2.25 V to ±18 V dual supply Gain set with single resistor (G = 1 to 1000) Qualified for automotive applications	Figure 2. Input Bias Current and Offset Current vs. Temperature
APPLICATIONS Medical instrumentation Precision data acquisition Transducer interfaces	

Limite :

- Si la tension de mode commun du signal est supérieure à la tension d'alimentation de l'amplificateur d'instrumentation, ce dernier ne peut être utilisé.
- Si des signaux de puissance partagent les mêmes lignes de masse que le signal utile, celui-ci risque d'être perturbé.
- Il faut alors séparer les signaux utiles et les signaux de puissance, ainsi que les masses de ces signaux. L'amplificateur d'isolement permet de résoudre ces problèmes.

IV.4.3. Amplificateur d'isolement

A. Fonctions

Un amplificateur d'isolement est un amplificateur d'instrumentation pour lequel les signaux d'entrée et de sortie sont isolés galvaniquement.

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

Il n'y a pas de chemin direct pour le passage d'un courant entre l'entrée et la sortie. Les circuits d'entrée et de sortie sont isolés électriquement : les références de tensions (masses) en entrée et en sortie peuvent être à des potentiels différents.

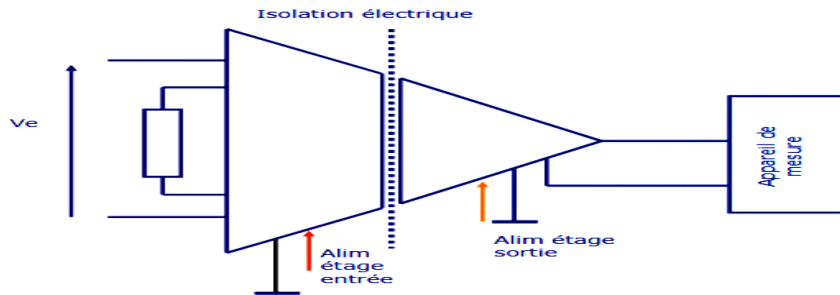


Fig. IV.14 : Amplificateur d'isolement.

B. Réalisation

Le signal utile est transmis par couplage

- Capacitif
- Optique
- magnétique (transformateur) ou galvanique

Dans ce dernier cas, l'alimentation du circuit d'entrée peut également être transmise au circuit de sortie par transformateur.

✓ Couplage « capacitif »

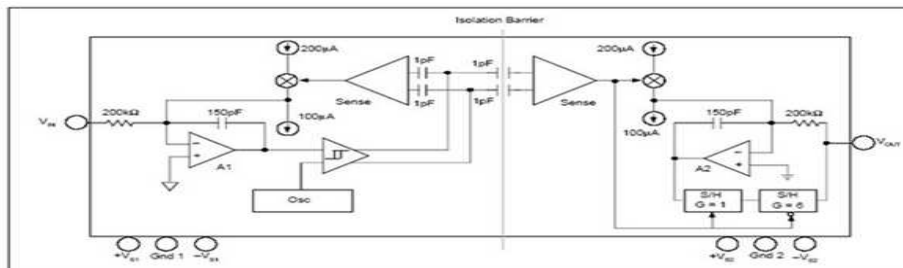


Fig. IV.15 : Couplage capacitif.

✓ ISO 100 isolation « optique »

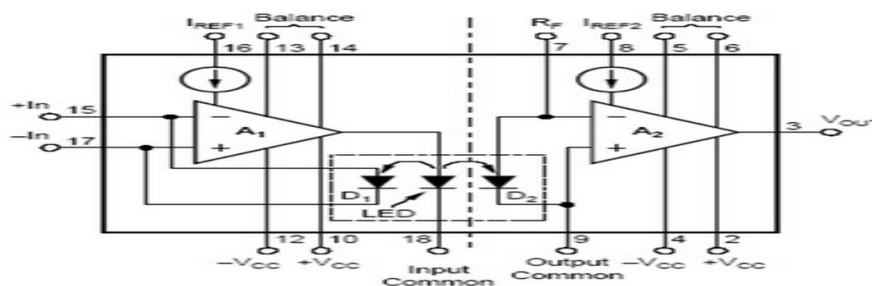


Fig. IV.16 : Couplage optique.

C. Exemple

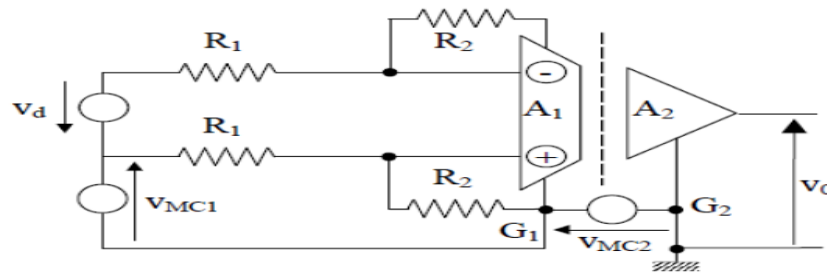


Fig. IV.17 : Schéma de principe d'un amplificateur d'isolement dont l'étage d'entrée est un amplificateur opérationnel en montage différentiel

L'ampli d'isolement est constitué d' :

- ❖ Un étage A1 dont l'entrée est un ampli opérationnel ou d'instrumentation, alimenté par une source flottante et dont le point commun G1 ("garde") est relié à la masse de la source du signal,
- ❖ Un étage A2 dont le point commun G2 est relié à la masse commune de l'ensemble de traitement en aval et de gain unité,
- ❖ Une barrière d'isolement qui rompt toute liaison ohmique entre les étages A1 et A2 tout en permettant le transfert du signal entre ces étages par couplage électromagnétique (Transformateur) ou optoélectronique (diode électroluminescente).
- ❖ La tension de mode commun V_{MC1} par rapport au point commun G1 du circuit d'entrée est, comme pour tout amplificateur, limitée à une dizaine de Volt et elle se trouve d'autant plus réduite en sortie que le taux de réjection T_{r1} est plus élevé. La tension de mode commun V_{MC2} par rapport au point commun G2 encore appelée tension d'isolement ; elle peut atteindre plusieurs milliers de Volts et est d'autant plus atténuée en sortie que T_{r2} est élevé. La tension V_0 est de la forme :

$$V_0 = A_d V_d \left(1 + \frac{1}{\tau_{r1}} \cdot \frac{V_{MC1}}{V_d} \right) + \frac{1}{\tau_{r2}} V_{MC2}$$

Avec pour ordre de grandeurs $Tr1=100dB$ et $Tr2=160dB$

D. Applications

L'amplificateur d'isolement trouve ses applications :

- Quand le signal e_c est superposé à une tension de mode commun très élevée,
- Quand pour des raisons de sécurité, par exemple, la source du signal doit être isolée de la chaîne de traitement.

V. Conclusion

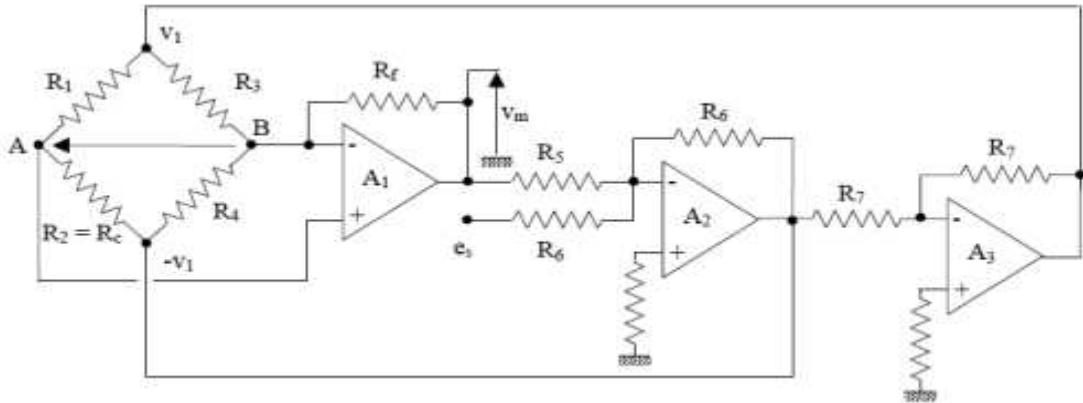
Ce chapitre présente la problématique des conditionneurs du signal électrique ainsi que le modèle en régime linéaire montrant les différents types d'adaptation utilisé en instrumentation. Cette description sera suivie d'une présentation de la linéarisation analogique et des circuits de conditionnement et amplification du signal mesuré (amplificateur différentiel, amplificateur d'instrumentation, taux de réjection en mode commun, amplificateur d'isolation),

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

VI. Exercices corrigés

Exercice N°1

Soit le montage de linéarisation par double réaction sur la tension de déséquilibre et sur la tension d'alimentation du pont



Donner les relations de V_m et V_1 pour la satisfaire la condition $\frac{R_6}{R_5} = \frac{R_{C0}}{2R_f + R_{C0}}$.

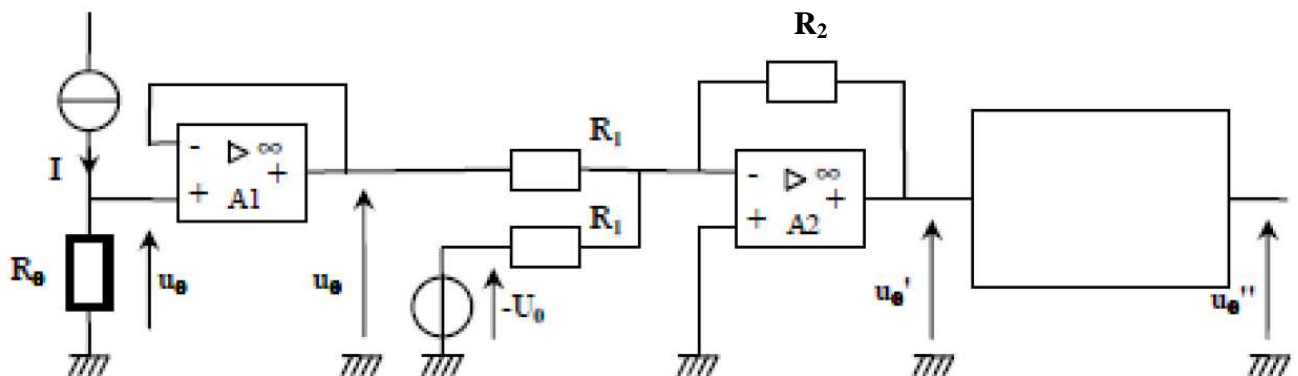
Exercice N°2

Un capteur de température (ruban de platine) possède une résistance R_0 qui varie avec la température θ suivant la loi : $R_0 = R_0(1 + a\theta)$ avec :

R_0 (Résistance à 0°C) $\rightarrow R_0 = 100 \Omega$

a (Coefficient de température) $\rightarrow a = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Ce capteur est inséré dans le circuit conditionneur de la figure ci-dessous :



On donne $I = 10,0 \text{ mA}$.

1. Montrer que la tension u_0 aux bornes de R_0 s'écrit sous la forme : $u_0 = U_0(1 + a\theta)$.

Exprimer U_0 en fonction de I et R_0 .

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

2. Quel est l'intérêt du montage de l'amplificateur opérationnel A1 ?
3. Dans le montage construit autour de A2, la tension U_0 est la même que celle définie à la question 1-.
 - a- Montrer que la tension u_{θ}' s'écrit sous la forme : $u_{\theta}' = -b\theta$
 - b- Exprimer b en fonction de a, U_0 , R_2 et R_1 .
4. On souhaite inverser la tension u_{θ}' pour obtenir la tension u_{θ}'' qui s'écrit : $u_{\theta}'' = b\theta$.

Représenter un montage à amplificateur opérationnel assurant cette fonction et qui complète ce conditionneur.

Réponse

$$1. u_{\theta} = R_{\theta} \cdot I = R_0 \cdot I \cdot (1 + a\theta) \quad U_{\theta} = U_0 \cdot (1 + a\theta) \quad U_0 = R_0 \cdot I.$$

2. C'est un montage suiveur qui permet de ne pas prélever du courant au capteur de température tout en reproduisant la même tension u_{θ} en sortie.
3. Le montage autour de A2 est un additionneur inverseur de tension :

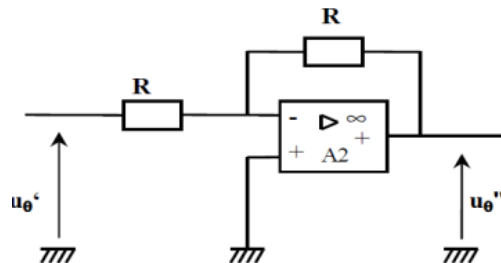
$$u_{\theta}' = -\frac{R_2}{R_1} (u_{\theta} + (-U_0)) = -\frac{R_2}{R_1} U_0 a \theta$$

$$u_{\theta}' = -b\theta = -\frac{R_2}{R_1} U_0 a \theta \quad \text{avec} \quad b = \frac{R_2}{R_1} U_0 a$$

4. Il faut utiliser un montage inverseur comme dans le schéma ci-dessous :

Cela donne :

$$u_{\theta}'' = -\frac{R}{R} u_{\theta}' = b\theta$$

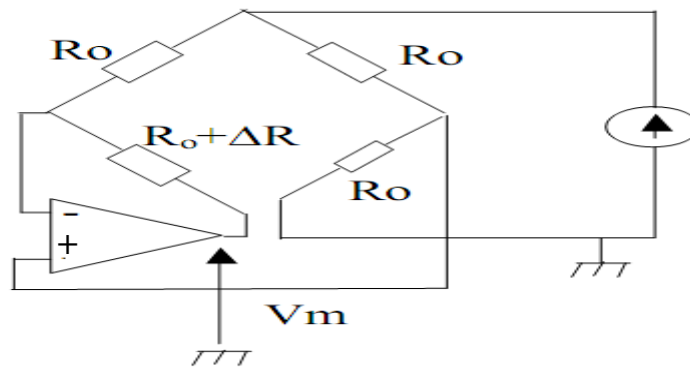


Exercice N°3

Afin de relever une variation de température, on utilise un capteur dont la résistance varie en fonction de la température selon la loi : $R_c = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$

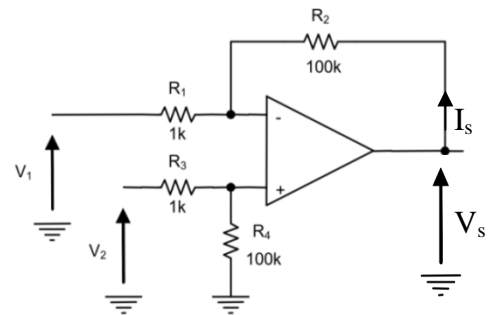
- a) Quelle type de conditionneur utilise t'on pour ce capteur ?
- b) Donner l'expression de la sensibilité de l'ensemble du système ?
- c) Montrer que la relation tension-mesurande en sortie du conditionneur peut être linéarisé grâce au montage suivant.

CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal



Exercice N°4

I- L'étude proposée concerne le montage de la figure ci-dessous dans lequel l'amplificateur de tension est supposé idéal.



1- Exprimer v_+ et v_-

2- En déduire que $V_s = -\frac{R_2}{R_1}V_1 + \left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right)V_2$.

3- En déduire l'expression de V_s en fonction de V_{mc} et V_d .

$$(\text{Rappel: } V_2 = V_{mc} + V_d/2 \quad \text{et} \quad V_1 = V_{mc} - V_d/2).$$

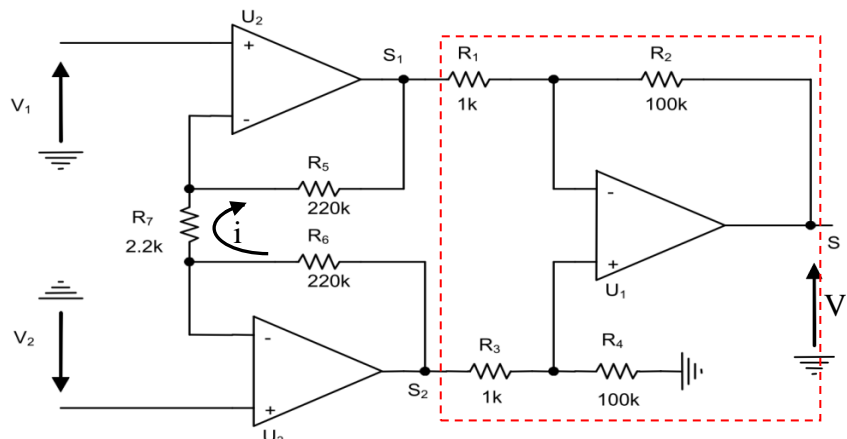
Faire ainsi apparaître l'expression de l'amplification de mode commun A_{mc} et de l'amplification différentielle A_d .

4- Donnez l'expression du $\tau_1 = TRMC$ (Taux de Rejet du Mode Commun) du montage.

5- Ecrivez la condition que doivent satisfaire les résistances pour que ce montage soit un étage différentiel.

- Calculer A_d , A_{mc} et le $\tau'_1 = TRMC$ ($R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$).

II- Un étage différentiel (U_2 , U_3) est placé à l'entrée du montage précédent, comme le montre la figure ci-dessous.



CHAPITRE IV : Conditionneurs du signal

1- Donnez l'expression de V_{s1} en fonction de V_1, V_2, R_5, R_7 . En déduire l'expression de V_{s1} en fonction de V_{mc} et V_d .

2- Donnez l'expression de V_{s2} en fonction de V_1, V_2, R_6, R_7 . En déduire l'expression de V_{s2} en fonction de V_{mc} et V_d .

3- En déduire l'expression de V_s en fonction de V'_{mc} et V'_d .

(Rappel: $V'_d = V_{s2} - V_{s1}$ et $V'_{mc} = (V_{s2} + V_{s1})/2, R_5 = R_6$)

Faire ainsi apparaître l'expression de l'amplification de mode commun A'_{mc} et de l'amplification différentielle A'_d .

4- Donnez l'expression du $\tau_2 = TRMC$ du montage complet.

5- Comparez les performances ce montage à celui du problème précédent.

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

I. Classification des capteurs	74
II. Quelques exemples de capteurs	74
II.1. Capteurs de températures	74
II.2. Capteurs à effet photoélectrique	77
II.3. Capteurs à effet piézoélectrique	81
III. Conclusion	82
IV. Exercices corrigés	83

(L'enseignant est libre de choisir l'étude de quelques capteurs parmi la liste ci-dessous :
Classification des capteurs, capteurs de température, capteurs de position et de déplacement,
capteurs de vitesse et d'accélération, capteurs de pression, capteurs de force et de déformation,
de niveau et de débit, capteurs optiques)

I. Classification des capteurs

Classification des capteurs en fonction :

- du mesurande qu'il traduit (capteur de température, de pression, ...),
- de leur rôle dans un processus industriel (contrôle de produits finis, de sécurité, ...),
- du signal qu'ils fournissent
 - capteur analogique (catégorie la plus importante)
 - capteur logique
 - capteur digitaux
- de leur principe de traduction du mesurande (capteur résistif, à effet de Hall, ...)
- de leur principe de fonctionnement
 - capteurs actifs,
 - capteurs passifs.

II. Quelques exemples de capteurs

II.1. Capteurs de températures

II.1.1. Les thermo-résistances

Principe : La résistance d'un matériau varie en fonction de sa température.

⇒ **mesure de la température par mesure de résistance.**

Les lois de variation de résistances sont différentes suivant qu'il s'agit d'un métal ou d'un agglomérat d'oxyde métallique.

Classification :

- ❖ Les résistances métalliques.
- ❖ Les thermistances.

Sensibilité thermique : $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$

A. Les résistances métalliques

Principe : La résistivité d'un métal ou d'un alliage dépend de la température :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0))$$

Relation résistance-température : Dans une étendue de mesure dépendant de chaque métal

$$R(T) = R(0)(1 + AT + BT^2 + CT^3)$$

avec :

- ✓ $R(0)$: résistance à 0°C;
- ✓ 3 autres points de calibrage permettent de connaître A, B, C.

Exemple : La sonde Pt100 : sonde platine de résistance 100 Ω à 100°C.

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Tab. V.1 : Critères de choix d'un métal

Platine	Précis, stable, durable Coûteux	E.M : -200°C, 650°C Jusqu'à 1400°C en fonction de l'enveloppe
Tungstène	Sensibilité thermique plus élevée que pour le platine Moins stable que le platine meilleure linéarité en haute température	E.M : -100°C, 1400°C
Nickel	Sensibilité thermique plus élevée Résistivité élevée Faiblement linéaire Peu stable	E.M : -60°C, 180°C
Cuivre	Linéaire Faible résistivité ⇒ encombrant Peu stable	E.M : -190°C, 150°C

Avantages & Inconvénients

Avantages

- ❖ Très précis.
- ❖ Simple à mettre en œuvre.
- ❖ Peu être approximé par une loi linéaire.

Inconvénients

- ❖ Sensible à l'auto-échauffement et à la variation des résistances de connexion.

B. Les thermistances

Caractéristiques

- ✚ résistances à base d'oxydes métalliques
- ✚ faible encombrement
- ✚ deux types de thermistances :

- à coefficient de température positif (PTC)
- à coefficient de température négatif (NTC)

Variation résistance/température

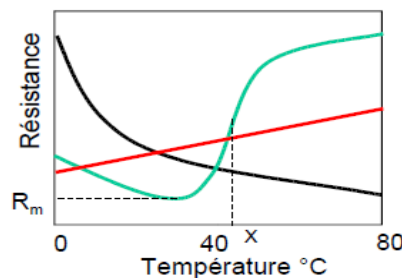


Fig. V.1 : Variation résistance/température

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Relation résistance-température des NTC :

$$R = R(0)e^{\frac{B}{T}} \quad \text{Avec } R(0) : \text{résistance à } 0^\circ\text{C}$$


Avantages & Inconvénients :

Avantages : temps de réponse rapide, moins chers.

Inconvénients : Loi non linéaire, diversité des caractéristiques dans les séries, sensible à l'auto-échauffement et à la variation des résistances de connexion.

II.1.2. Les capteurs de température à semi-conducteur

Principe : La tension aux bornes du semi-conducteur (formant une diode ou un transistor) et le courant qui le traverse dépendent de la température.


$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad \text{avec } I_0 = CT^m \cdot \exp\left(\frac{-qV_\phi}{kT}\right)$$

- V_ϕ hauteur de la bande interdite (1,12V pour le silicium)
- C constante dépendant de la géométrie de la jonction
- m coefficient voisin de 3
- k constante de Boltzman ($1.380\ 6488(13) \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

À courant constant I, la mesure de V est linéaire en fonction de la température $V = aT + b$

- a dépend de l'élément sensible
- $b = \frac{2k}{q} (\ln K - \ln I)$ K constante de température
- $b \approx -2\text{mV}/^\circ\text{C}$

Avantages & Inconvénients :

Avantage

- ❖ simplicité
- ❖ peu coûteux
- ❖ non linéarité faible

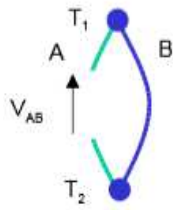
Défaut

- ❖ étendue de mesure limitée

II.1.3 Les Thermocouples

Principe : effet Seebeck (capteurs actifs)

Circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B de nature différente dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 différentes \Rightarrow Le thermocouple est le siège d'une force électromotrice dite de Seebeck V_{AB}



V_{AB} dépend de la nature des deux conducteurs et des températures T_1 et T_2

Les pouvoirs thermoélectriques des métaux et alliages (relation $V = f(T)$) sont définis dans des tables par rapport à un métal de référence (Pt) et par rapport à 0°C . Généralement la température de référence est la température ambiante

N.B : La relation force électromotrice/température de n'importe quel couple peut être déterminée.

Avantages et inconvénients :

Les thermocouples sont les capteurs les plus souvent utilisés pour la mesure de températures, car ils sont relativement peu onéreux, tout en étant précis, et peuvent fonctionner sur une *large gamme de températures*.

Les thermocouples présentent *un taux de réponse rapide* (de l'ordre de la milliseconde).

II.2. Capteurs à effet photoélectrique

II.2.1. Détecteurs optiques passifs : La photorésistance

Définition : La photorésistance (ou cellule photoconductrice) est un composant électronique dont la résistivité ρ varie en fonction de la quantité de lumière incidente.

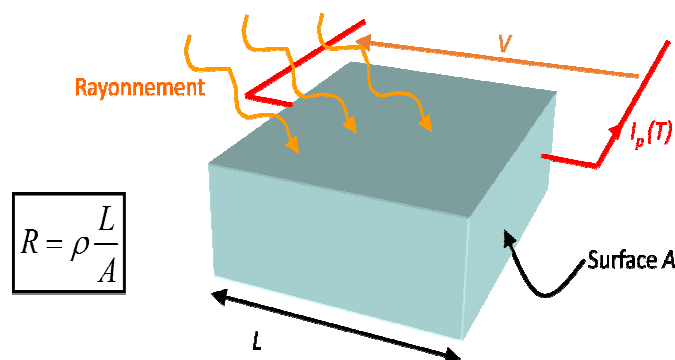


Fig. V.2 : Schéma de principe d'une cellule photoconductrice

Le phénomène physique à la base de son emploi (photoconduction) résulte d'un effet photoélectrique interne : libération dans le matériau de charges électriques sous l'influence de la lumière et augmentation corrélative de la conductivité (ou diminution de la résistivité).

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

La résistance peut alors s'exprimer de la façon suivante :

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A} = \frac{1}{q\mu n} \frac{L}{A}$$

Avec :

- σ : conductivité du matériau
- q : charge de l'électron
- μ : mobilité de l'électron
- n : densité d'électrons présents (fonction de l'éclairement)
- A et L : surface et longueur de la plaque



Fig. V.3 : La Photorésistance ou LDR (Light-dependent resistor)

Les cellules sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs homogènes polycristallins ou monocristallins, intrinsèques (purs) ou extrinsèques (dopés) :

- Matériaux polycristallins : CdS, CdSe, CdTe, PbS, PbSe, PbTe;
- Matériaux monocristallins : Ge et Si purs ou dopés par Au, Cu, Sb, Zn, SbIn, AsIn, PIn, CdHgTe

Caractéristique lumière/Résistance :

Exemple :

- Obscurité : $R_0 = 20 \text{ M}\Omega$
- Lumière naturelle : $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$
- Lumière intense : $R_2 = 100 \Omega$.

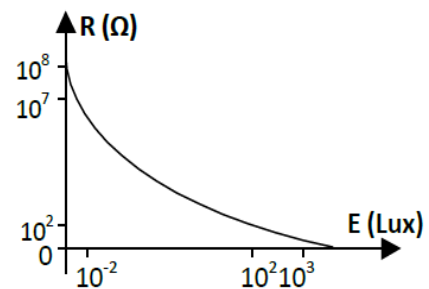


Fig. V.4 : Exemple de variation de la résistance d'une cellule photoconductrice en fonction de son éclairement.

Avantages & Inconvénients :

Avantages

- ❖ Bonne sensibilité
- ❖ la simplicité de certains montages d'utilisation.
- ❖ Faible coût et robustesse.

Inconvénients

- ❖ Non-linéarité de la réponse en fonction du flux,
- ❖ Temps de réponse en général élevé et bande passante limitée,
- ❖ Sensible à la chaleur.

Utilisation :

Détection des changements obscurité-lumière (éclairage public).

II.2.2. Détecteurs optiques actifs : La photodiode

Définition : La photodiode est un composant basé sur la jonction d'un semi conducteur de type P et d'un semi conducteur de type N :

- Chaque photon absorbé par le semi-conducteur peut créer une paire électron-trous,
- sous l'action du champ interne, l'électron se diffuse vers la zone N et le trou vers la zone P,

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

- on a une diffusion des trous et des électrons dans des sens opposés,
- ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération.

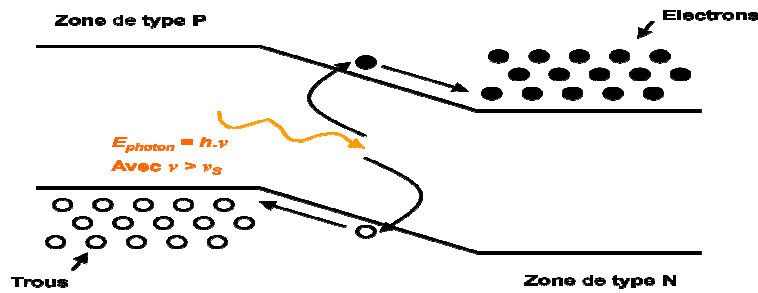


Fig. V.5 : Transferts électroniques dans semi-conducteur.

Au niveau du composant, la photodiode est composée d'un empilement de couches minces dont les épaisseurs respectives sont de l'ordre du micromètre, voire en dessous.

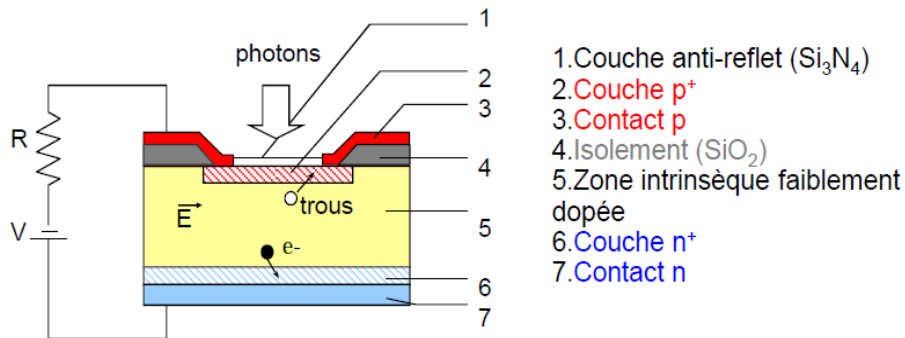


Fig. V.6 : Schéma de principe de la photodiode

Le montage de base

Le montage de base comporte une source E_s polarisant la diode en inverse et une résistance R_m aux bornes de laquelle est recueilli le signal.

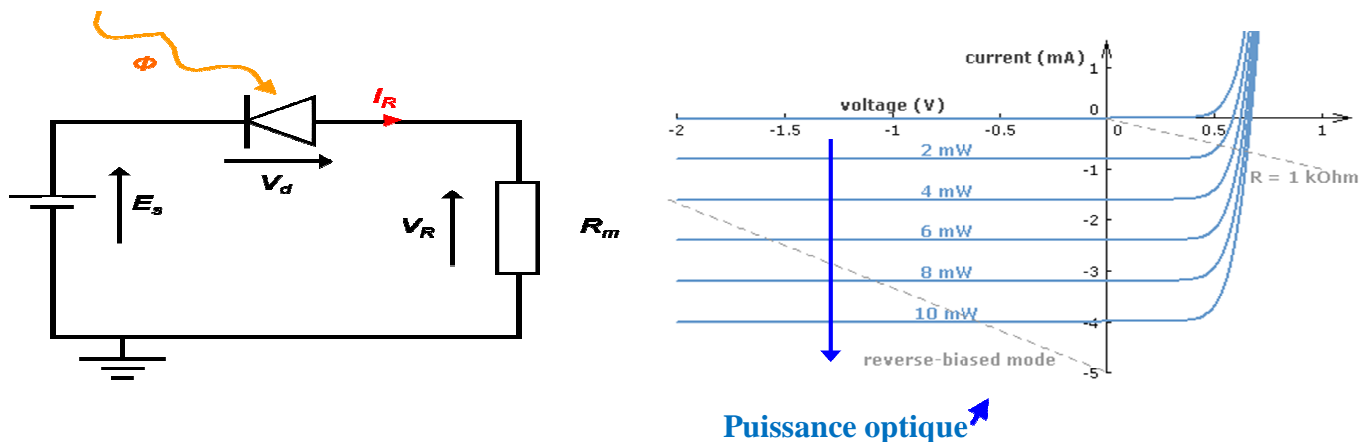


Fig. V.7 : Droite de charge de la photodiode

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Courbe

Le graphe $I = f(U)$ pour une photodiode dépend de l'éclairement de la jonction PN.

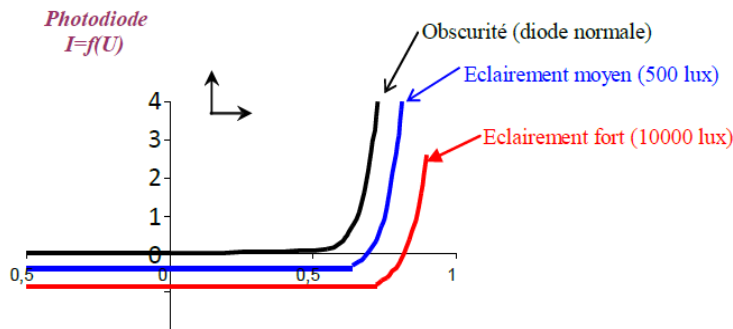


Fig. V.8 : Caractéristique courant/ tension d'une photodiode en fonction de

Avantages & inconvénients

Avantages :

- Bonne sensibilité.
- Faible temps de réponse (bande passante élevée).

Inconvénients :

- Coût plus élevé qu'une photorésistance.
- Nécessite un circuit de polarisation précis.

Utilisation

- Transmission de données Télécommande IR.
- Détection de passage.

II.2.3 Détecteurs optiques actifs : Le Phototransistor

Définition

Transistor dont la base est sensible aux rayonnements lumineux. Il crée un courant lorsque qu'il est éclairé sa sensibilité est entre 100 et 400 fois supérieure à celle d'une photodiode mais le courant d'obscurité est aussi plus important. De plus la constante de temps est plus importante (base plus épaisse) et donc la fréquence de coupure plus basse que celle des photodiodes.

Utilisation : Utilisé dans les optocoupleurs.

II.2.4. Détecteurs optiques actifs : Le Photographique

Définition

Il convertit un signal rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR) en un signal électrique analogique.

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Utilisation

Utilisé dans les appareils photos afin de convertir une lumière en un signal qui sera numérisé afin d'obtenir une image numérique.

II.3. Capteurs à effet piézoélectrique

II.3.1. Capteur de pression

Définition :

Lorsqu'un corps (gaz, liquide ou solide) exerce une force F sur une paroi S (surface) ; on peut définir la pression P exercée par ce corps avec la relation ci- dessous :

$$P = \frac{F}{S}$$

Le capteur de force est inséré dans la paroi d'une enceinte où règne une pression P . Une face du capteur est soumise à la force F (pression P) et l'autre face est soumise à la force F_0 (pression extérieure P_0)

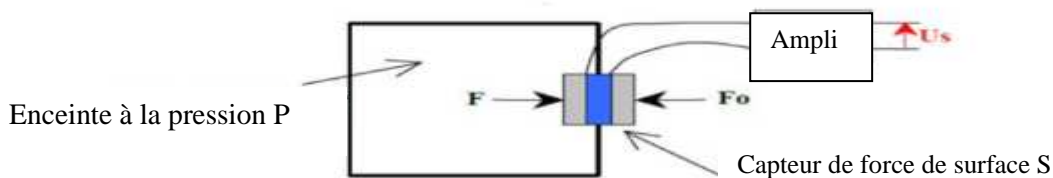


Fig. V.9 : Principe d'un capteur de pression

On a $F = P.S$; $F_0 = P_0.S$ et $U_S = k.(F + F_0)$ (Capteur de force, $k =$ constante).

Donc $U_S = k.S.(P + P_0)$ on pose $k.S = k'$ d'où $U_S = k'.(P + P_0)$

Il s'agit ici d'un capteur de pression qui mesure la somme de la pression extérieure P_0 et de la pression de l'enceinte P .

II.3.2. Capteur d'accélération

Définition :

L'augmentation de vitesse V du véhicule donne une accélération a qui induit une force F exercée par la masse sur le capteur. On a donc : $F = m.a$ mais $U_S = 2k.F$ et donc $U_S = 2k.m.a$

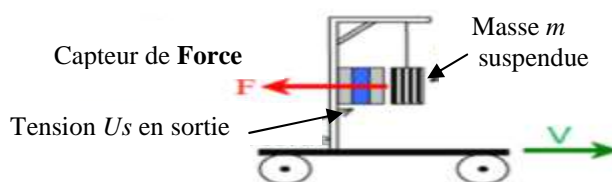


Fig. V.10 : Principe d'un capteur d'accélération

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

II.3.3 Capteur ultrason

La réception d'un son engendre une variation de pression à la surface du récepteur. Un capteur de pression sur cette surface donnera donc une tension image du signal ultrasonore.

III. Conclusion

Ce chapitre, elle donne quelques exemples de capteurs et leurs natures de fabrication exposant les avantages et les inconvénients de chacun.

IV. Exercices corrigés

Exercice N°1

Soit une enceinte qui est à maintenir à température constante $T_u = 20^\circ\text{C}$, au milieu d'un environnement à $T_0 = 10^\circ\text{C}$, par chauffage à partir d'une source thermique à température T_a . Pour mesurer ces températures, 3 thermocouples Chromel-Constantin sont utilisés. Les jonctions de références de ces thermocouples sont placées à la température ambiante T_0 .

1. Expliquer le principe de fonctionnement d'un thermocouple,
2. Quels sont les autres instruments de mesure de température que vous connaissez ?
3. Un voltmètre digital est branché aux bornes du thermocouple mesurant la température T_u ; Quelle devrait être la tension affichée par ce voltmètre ?
4. La valeur affichée par le voltmètre est en fait 0.652 mV. Que remarquez-vous ? Interpréter ce résultat,
5. Le voltmètre branché au thermocouple mesurant T_a affiche une tension de 6.112 mV, Quelle est la température de la source thermique ?

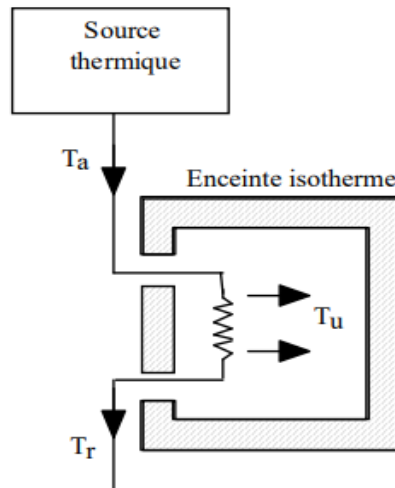
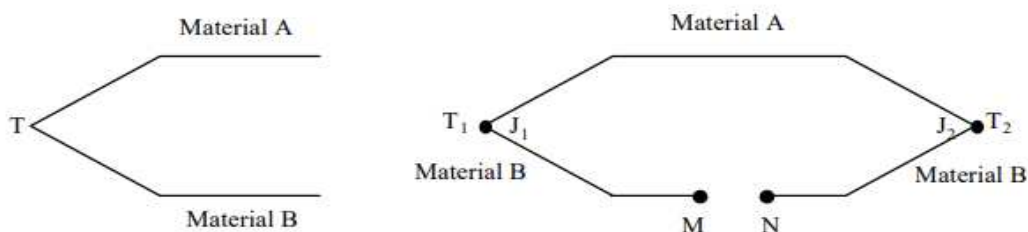


Fig.V.11 : Chauffage d'une enceinte isotherme

Réponse

1. Un thermocouple est une jonction entre deux métaux différents délivrant une tension (f.é.m.) lorsque les deux jonctions sont portées à deux températures différentes



$$V_0 = C_1 \times (T_1 - T_2) + C_2 \times (T_1^2 - T_2^2)$$

Fig.V.12. Principe de fonctionnement d'un thermocouple

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Un thermocouple fonctionne par l'effet Seebeck : C'est l'effet par lequel les électrons excités par la chaleur vont se déplacer de la région chaude vers la région froide.

2. La température peut être mesurée par différents types de capteur en se basant sur la mesure d'une caractéristique physique variant avec la température (longueur, résistance électrique, masse volumique, etc.). On peut citer comme exemples :

- Thermomètre avec un réservoir en liquide (dilatation)
- Bilame métallique : rayon de courbure varie avec la température
- La RTD "Résistance Température Sensor" (PT100) et la thermistance donnant une variation de la résistance en fonction de la température, respectivement, suivant les lois :

• RTD : $R = R_0 (1 + \gamma_1 T + \gamma_2 T^2 + \gamma_3 T^3 + \dots + \gamma_n T^n)$
Où R_0 est la valeur de la résistance à 0°C

• Thermistance : $R = R_0 \times \exp\left(\beta \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$

Où R_0 est la valeur de la résistance à T_0 . Les températures sont exprimées en K.

3.

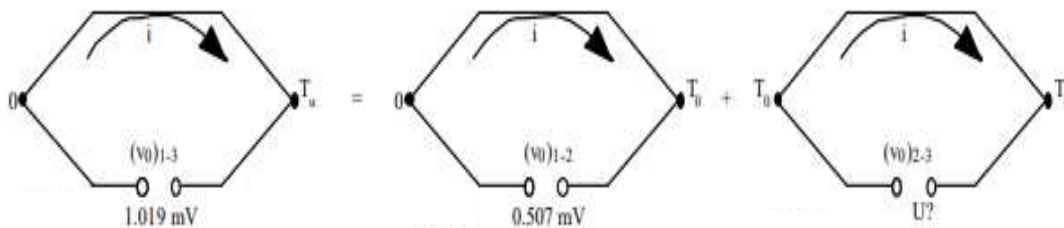


Fig.V.13. Calcul de la tension aux bornes du thermocouple

La tension délivrée par le voltmètre est $U = 1.019 - 0.507 = 0.512 \text{ mV}$

4. La valeur affichée par le voltmètre est en fait 0.652 mV . Ce résultat est différent à celui qu'on devrait trouver. Ceci peut être dû aux erreurs :

- d'auto-chauffage « self-heating » (Effet Peltier)
- Effet Thompson
- Caractéristiques intrinsèques de l'instrument
- Mauvaise valeur de la température de référence (erreur de lecture, etc.)
- Conditions opératoires, etc.

5. Le voltmètre branché au thermocouple mesurant T_a affiche une tension de 6.112 mV , Un thermocouple dont les jonctions entre T_a et 0°C donnerait comme f.é.m. :

$0.507 + 0.6115 = 6.190 \text{ mV}$. En consultant le tableau du thermocouple nous avons :

$116^\circ\text{C} \rightarrow 6.140 \text{ mV}$

$117^\circ\text{C} \rightarrow 6.195 \text{ mV}$

En faisant une interpolation linéaire, nous obtenons :

$$T = \frac{6,190 - 6,140}{6,195 - 6,140} \times (117 - 116) + 116 = 116,90\text{C}$$

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

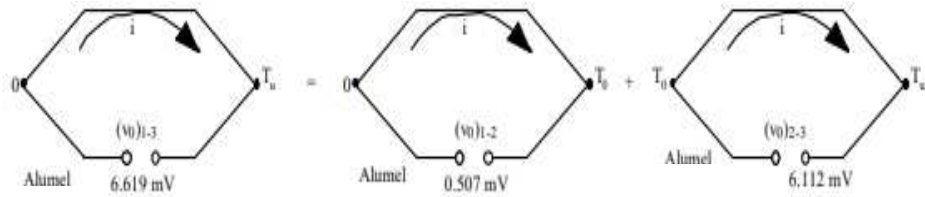


Fig.V.14. Règle d'utilisation d'un thermocouple

Exercice N°2

On souhaite mesurer un déplacement angulaire avec une résolution d'au moins 1° .

1. Quelles sont les différentes techniques utilisées ?
2. Donnez les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.
3. Présentez les caractéristiques métrologiques de la chaîne de mesures dans chaque cas.

Exercice N°3

On utilise une photodiode comme capteur de mesure de flux lumineux. La diode se comporte comme un générateur de courant $i = S_d \cdot \Phi$ où Φ est le flux lumineux incident à mesurer et S_d la sensibilité propre de la diode en A/W (indépendante de la fréquence de Φ). En fait, la grandeur électrique de sortie du montage est la tension v aux bornes de la résistance R_m (voir Fig.V.15.a) à la place du courant i . Le schéma électrique équivalent du montage peut être représenté par celui de la Fig.V.15.b, où C est la capacité de la jonction de la diode polarisée en inverse.

1. Quels sont les signaux d'entrée m et de sortie S de ce capteur de mesure du flux lumineux ?
2. Démontrer, à partir de l'équation du circuit électrique équivalent (Fig.V.5.b), que l'expression de l'amplitude I_1 du courant électrique peut s'écrire :

$$I_1 = j \times \omega \times C \times V_1 \times e^{j\varphi + \frac{V_1}{R_m}} \times e^{j\varphi}$$

On donne le flux incident modulé $\Phi(t) = \Phi_1 \times e^{j\omega t}$; le courant $i(t) = I_1 \times \Phi_1 \times e^{j\omega t}$; $I_1 = S_d \cdot \Phi_1$ et la tension de sortie $V(t) = V_1 \times e^{j(\omega t + \varphi)}$.

3. En supposant le système de premier ordre de signal de sortie S et d'entrée m , de la forme :

$$A \times \frac{dS}{dt} + B \times S = m, \text{ donner la fréquence de coupure du circuit } f_c = (B/2 \pi A).$$

4. Calculer la sensibilité de cette photodiode $s(f)$ et sa constante de temps $\tau = 1/(2\pi f_c)$.

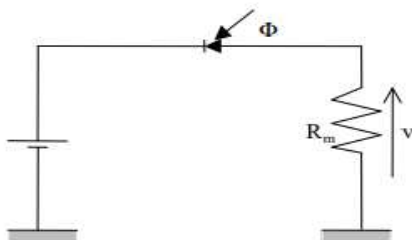


Fig.V.15.a

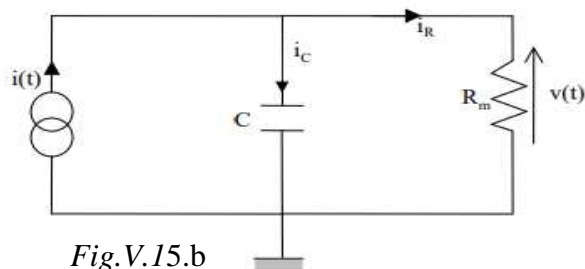


Fig.V.15.b

Travaux pratiques

TP n°1 Présentation d'une chaîne de mesure.....	87
Etude d'une photorésistance pour la détection de lumière	
TP n°2 Les capteurs de température (Les thermistances).....	91
TP n°3 Etude d'un circuit conditionneur d'un capteur (la thermistance)	93
TP n°4 le Capteur de lumière (photodiode)	95

TP n°1 Présentation d'une chaîne de mesure Etude d'une photorésistance pour la détection de lumière

1. Objectifs

Mettre en œuvre une chaîne de mesure. Etude d'un capteur de lumière photorésistance (la LDR) pour la détection de lumière.

2. Recherche bibliographique

Faire une recherche bibliographie concernant les chaînes de mesure et les capteurs de lumière (donnez les références).

3. Matériel utilisé

- 01 Alimentation stabilisée symétrique
- 02 Voltmètres numériques.
- 01 Ampli opérationnel: TL081
- 03 Résistances de 10 K
- 01 LED
- 01 photorésistance (LDR)
- 01 Lampe de forte puissance 12 V
- 01 Résistance de 2.2 K

4. Généralités

4.1. La chaîne de mesure

Une chaîne de mesure comprend:

Un capteur et son éventuel conditionneur de capteur pour traduire les variations physiques en tension électrique).

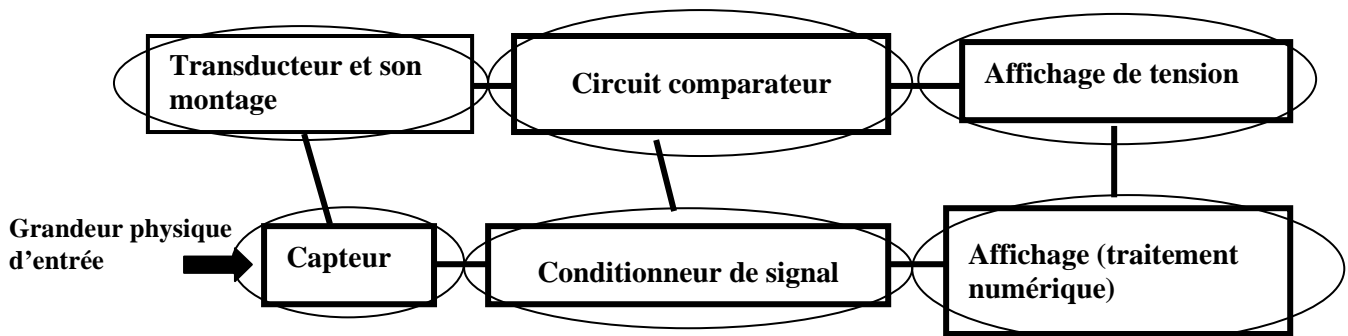
Un conditionneur de signal (qui amplifie, filtre, linéarise et adapte le signal à l'interface utilisateur)



Exemple : Le montage de détection de lumière utilisant une photorésistance.

Pour réaliser ce montage on met en œuvre une chaîne de mesure :

- Le capteur est une photorésistance, elle est montée sur un circuit : son conditionneur de capteur.
- Le circuit comparateur est le conditionneur de signal.
- Le résultat est ensuite affiché.



4.2. Les capteurs de lumières

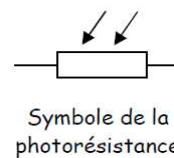
Les capteurs de lumières (ou photocapteurs) sont des composants électroniques qui convertissent un **signal lumineux** en **signal électrique**. Les trois principaux capteurs de lumière sont :

- La photorésistance
- La photodiode
- Le phototransistor

Les photocapteurs ont des applications très diverses : télécommande de téléviseur, capteurs CCD dans les caméscopes et appareils photos numériques, détecteurs de lumières....

Pour utiliser un photocapteur, il est nécessaire de connaître la variation d'une grandeur physique, caractéristique du photocapteur, en fonction de l'éclairement.

Ci-dessous est représenté une photorésistance ainsi que son symbole électrique :



5. Manipulation

5.1. Etude qualitative d'une photorésistance

5.1.1. Mesurer avec un ohmmètre la résistance, notée R_1 de la photorésistance dans l'obscurité puis à la lumière d'une lampe.

5.1.2. Quelle grandeur électrique caractéristique de la photorésistance varie en fonction de l'éclairement ?

5.1.3. Comment varie cette grandeur lorsque l'éclairement augmente ?

5.1.4. Définir une photorésistance.

5.2. La photorésistance : un capteur

- Quelle est la grandeur physique correspondant à la grandeur d'entrée E de la photorésistance ?

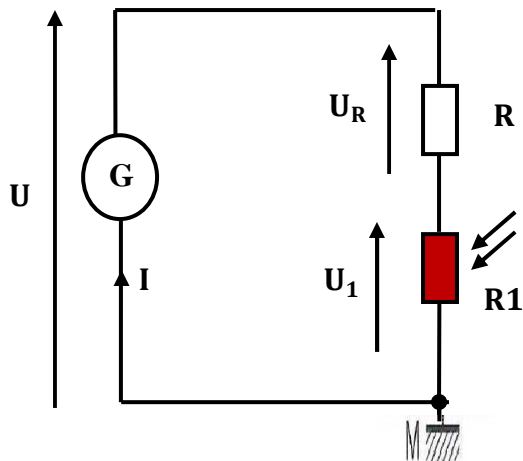
- Quelle est la grandeur électrique correspondant à la grandeur de sortie S de la photorésistance ?

5.3. Mise en œuvre d'une chaîne de mesure

Ce montage est constitué de deux parties que l'on réalise séparément : un circuit de conditionnement et un comparateur.

5.3.1. Conditionnement de la Photorésistance (LDR)

Afin de rendre la variation de résistance exploitable en électronique, il faut la convertir en tension. Pour cela, on utilise le pont diviseur de tension avec $R = 2,2 \text{ k}$ et $U = 6 \text{ V}$.



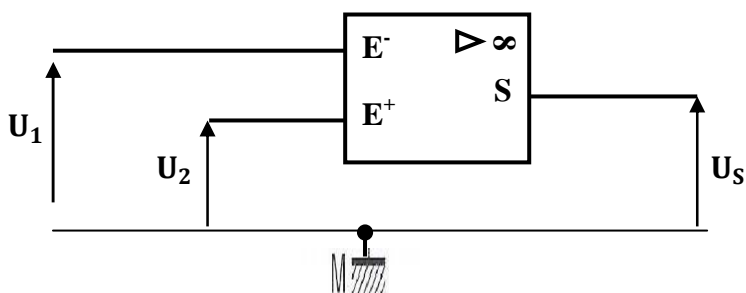
5.3.1.1. Rappeler l'expression de U_R en fonction de R , R_1 et U .

5.3.1.2. Mesurer U_R lorsque la photorésistance est éclairée puis lorsqu'elle est placée dans l'obscurité.

5.3.1.3. Observer les variations de U_R en fonction de l'éclairement.

5.3.1.4. Que constate-t-on ? Quel est l'inconvénient de ce montage ?

5.3.2. Le CI utilisé en comparateur



Afin d'améliorer la détection de l'éclairement, on peut ajouter au montage précédent un CI utilisé en comparateur.

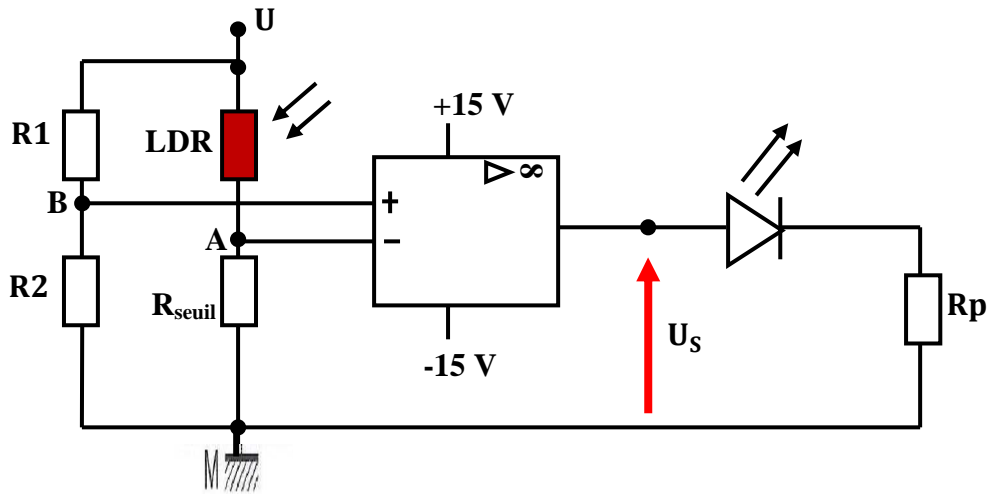
Principe de fonctionnement du montage comparateur :

Le CI fonctionne en régime saturé : la tension de sortie U_S ne peut prendre que deux valeurs : $+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$.

- Si $U_2 > U_1$ alors $U_S = +V_{sat}$
- Si $U_2 < U_1$ alors $U_S = -V_{sat}$

5.3.3. La chaîne de mesure

On insère le capteur à la chaîne de mesure suivante :



Avec

$$R_1 = R_2 = R_{seuil} = 10k\Omega$$

$$R_p = 2.2k\Omega, U = 15V$$

Ampli opérationnel : TL081

5.3.3.1. La tension U_B constitue le seuil de basculement. Mesurer cette tension et noter sa valeur.

5.3.3.2. Mesurer la tension U_A pour les deux cas extrêmes de luminosité (à l'obscurité puis à la lumière). Noter la valeur des deux tensions et indiquer l'état de la diode dans les deux cas.

5.3.3.3. Expliquer le fonctionnement de la chaîne de mesure.

5.3.3.4. Quelles pourraient être les applications de ce montage ?

TP n°2 Les capteurs de température (Les thermistances)

1. Objectifs

Connaître le fonctionnement et la modélisation d'un capteur de température.

2. Etude Bibliographique

Faites une étude bibliographique concernant les capteurs de température.

3. Présentation

Les thermistances sont des composants à semi conducteurs, petits, peu coûteux, très sensibles, leur principal inconvénient est d'avoir une loi de variation de leur résistance en fonction de la température non linéaire.

Il y a deux types de thermistances :

- Les thermistances à coefficient de température négatif ou CTN.
- Les thermistances à coefficient de température positif ou CTP.

4. Matériel utilisé

– Thermistances (CTN, CTP) – Ballon – Chauffe ballon – Thermomètre – Les supports
– Multimètre.

5. Étude d'une thermistance à coefficient de température négatif CTN et CTP

5.1. Etude d'une thermistance CTN

5.1.1. Manipulation

Noter la valeur de la température ambiante : T_{amb} .

A l'aide d'un ohmmètre, mesurer la résistance R_{CTN} de la thermistance CTN à la température ambiante. Tenir entre les doigts, la thermistance CTN et suivre l'évolution de la résistance. ($T_{corps} = 37^{\circ}C$).

- a) Comment varie la résistance de ce capteur en fonction de la température ?
- b) Définir une thermistance CTN.

Remarque : la CTN utilisée est une "CTN de $4.7\text{ k}\Omega$ " et la "CTP est de $30\ \Omega$ " c'est à dire qu'à $25^{\circ}C$ la résistance de la CTN est voisine de $4.7\text{ k}\Omega$ et celle de la CTP est de $30\ \Omega$.

Réaliser la manipulation et la faire vérifier.

On note R_{CTN} la résistance de la thermistance CTN. Pour étudier la résistance R_{CTN} en fonction de la température en degré Celsius (Temp.), il faut étalonner le capteur :

- remplir le fond ballon avec de l'eau froide sur 2 ou 3 cm en hauteur, placer le ballon dans le chauffe ballon et le fixer.

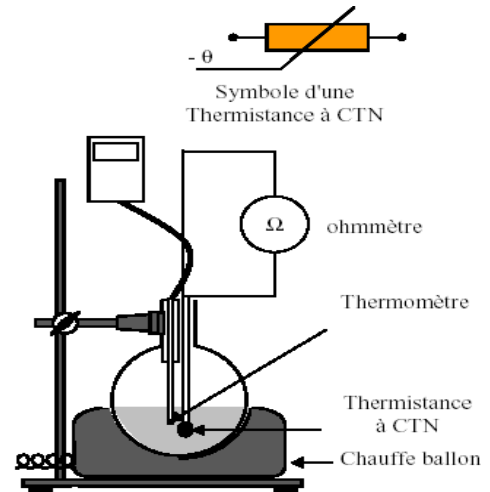
Travaux Pratiques

- plonger le thermomètre et le capteur CTN, reliés avec un élastique, dans l'eau du ballon.

- régler le chauffe ballon sur le maximum.

- relever simultanément R_{CTN} avec l'ohmmètre et la température sur le thermomètre, tous les 5 °C jusqu'à 80 °C.

- A 80°C retirer la CTN et le thermomètre.



Temp (°C)	20	25	30	35	80
R_{CTN} (Ω)										

5.1.2. Modélisation de la thermistance CTN

- faire tracer la courbe $R_{CTN} = f(\text{Temp})$.
- Quelles remarques faites-vous sur l'allure des courbes
- La résistance de la thermistance varie-t-elle ? Si oui dans quel sens ?
- Modèle en $R_{CTN} = R_0 \cdot e^{a(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$ où $T_0 = 25^\circ\text{C}(298\text{K})$

D'après le graphe, déterminer les valeurs de R_0 et a avec 3 chiffres significatifs.

- Calculer la valeur de la pente de la tangente $\frac{\Delta R}{\Delta T}$ et en déduire la valeur du coefficient de température de la CTN $\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T}$ à 25°C.
- Soit B , l'indice de sensibilité de la CTN. Calculer B sachant que $\alpha = -\frac{B}{T^2}$

5.2. Etude d'une thermistance CTP

Faite le même travail réalisé précédemment avec, dans ce cas, une thermistance à coefficient de température positif.

TP n°3 : Etude d'un circuit conditionneur d'un capteur (la thermistance)

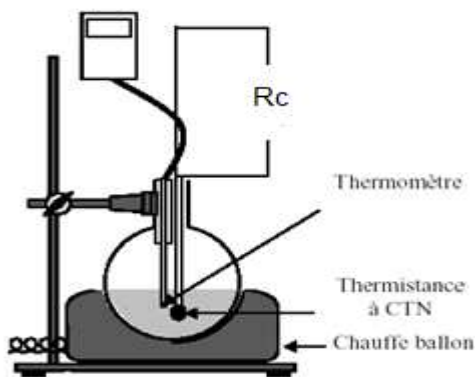
1. Objectifs

- Linéariser la thermistance CTN autour d'une certaine température en utilisant une résistance de linéarisation R, indépendante de T, insérée dans un montage conditionneur approprié.
- Etudier différents conditionneurs et relever la caractéristique $V_m=f(T)$ de la thermistance CTN.

2. Etude Bibliographique

Faites une étude bibliographique concernant les différents montages conditionneurs d'un capteur (Expliciter les références).

3. Dispositif expérimental (Le même que celui de TP2 avec utilisation d'un conditionneur)



4. Matériel utilisé

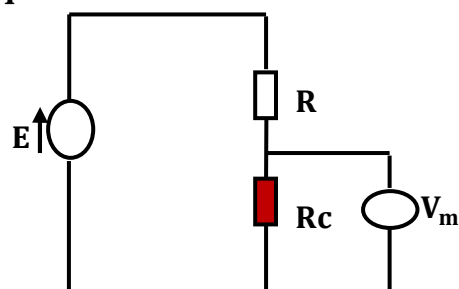
- CTN - Ballon - Chauffe ballon
- Thermomètre - Les supports - Voltmètre
- 03 résistances de $4.7\text{ k}\Omega$
- 01 alimentation stabilisée

5. Détermination d'une tension à partir de la température

5.1. utilisation d'un montage potentiométrique

Réaliser le montage ci dessus
avec

$$R=R_{c0}=4.7\text{ k}\Omega, R_c = R_{CTN}, E = 6\text{v.}$$



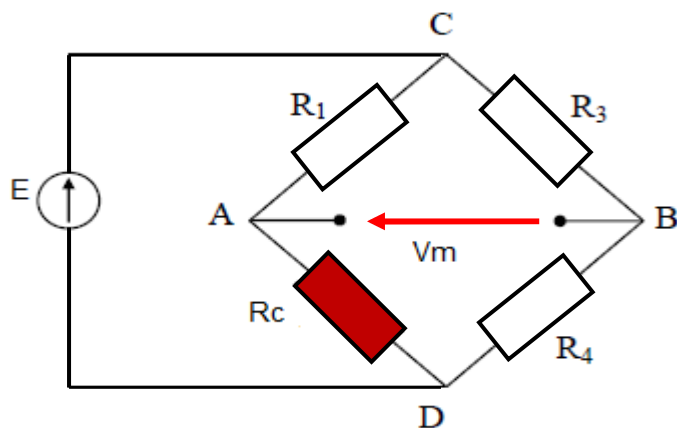
Travaux Pratiques

- Placer la CTN dans le ballon et le faire chauffer comme dans la manipulation du TP2.
- Commencer le chauffage de ballon, et noter pour chaque augmentation de la température de 5°C, La tension V_m aux bornes de R, remplissez le tableau suivant.

T (°C)	20	25	30	35	40	45	50	80
V_m (V) avec $R=4.7k \Omega$										

- 5.1.1. Calculer la valeur de la tension V_m en fonction de R_c , puis en fonction de sa température
- 5.1.2. Etudier la sensibilité du conditionneur.
- 5.1.3. Pour quelle valeur de R cette sensibilité est maximale ?
- 5.1.4. A quoi sert la résistance R dans le montage ?
- 5.1.5. Déterminer la valeur de R optimale qui permet de linéariser ce montage.
- 5.1.6. Expliquer le rôle de ce montage.

5.2) utilisation d'un montage en pont (double potentiométrique)



Le pont de Wheatstone est constitué de 3 résistances fixes telles que $R_1=R_3=R_4=R_{c0}=4.7k \Omega$ et d'un capteur dont la résistance est $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$.

- 5.2.1. Réaliser le montage conditionneur ci-dessus en suivant la même procédure remplissez le tableau précédent.
- 5.2.2. Montrer que la tension de déséquilibre du pont a pour expression :

$$\Delta V_m = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{2R_{c0}}}$$

- 5.2.3. Pour quelle condition ce conditionneur est linéaire ?
- 5.2.4. En déduire sa sensibilité
- 5.3. Tracer sur la même feuille les graphes $V_m = f(T)$ pour les différents montages.
- 5.4. Interpréter.
- 5.5. Conclure

TP n°4 Le capteur de lumière (photodiode)

1. Objectif

Connaître le fonctionnement de la photodiode

2. Etude Bibliographique

Faites une étude bibliographique concernant le phototransistor en citant les références (max 3 pages).

3. Matériel utilisé

- 01 Alimentation stabilisée
- 01 oscilloscope
- 01 GBF
- 01 Voltmètre
- 01 photodiode
- 01 diode
- 01 Résistances de 4.7 K
- 01 lampe de forte puissance 12 V
- 04 Résistances de 1 K
- 01 AOP
- 01 LED

4. Manipulation

4.1. Comparaison entre diode simple et photodiode

- Une photodiode est une diode qui est sensible à la lumière.

Le comportement d'une photodiode est différent de celui d'une diode simple comme nous allons le voir.

- Réaliser le montage ci-après avec une **diode simple** et le faire vérifier.

a) Quelle est la valeur de la tension mesurée par le voltmètre dans le montage comprenant la **diode simple** ?

b) Un courant circule-t-il dans le circuit ? Pourquoi ?

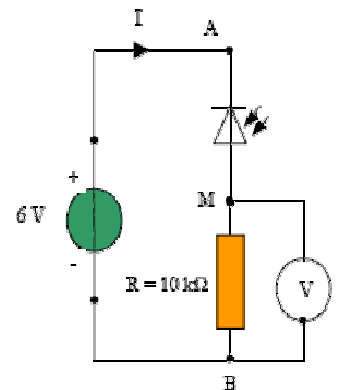
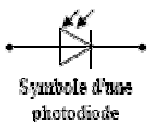
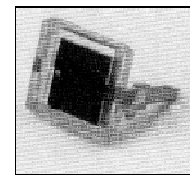
- Remplacer la **diode simple** par une **photodiode** montée dans le même sens (montée **en inverse** par rapport au courant délivré par le générateur de tension).

c) Quelle est la valeur de la tension mesurée dans le montage comprenant la **photodiode** ?

d) Un courant circule-t-il dans le circuit ? Si oui dans quel sens ?

e) Ce résultat dépend-il de l'éclairement ?

- Lorsque la photodiode, montée en inverse, est éclairée, un courant non nul traverse la photodiode dans le sens non passant. La valeur du courant inverse dépend de l'éclairement.

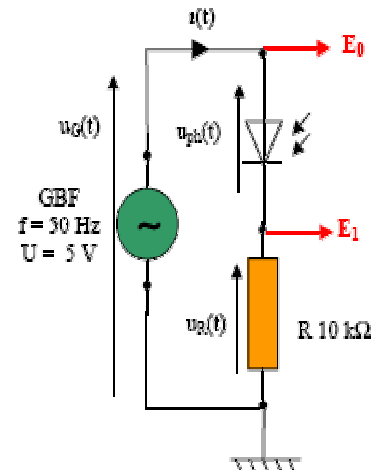


4.2. Caractéristique de la photodiode

- U_G la tension aux bornes du GBF.
- U_R la tension aux bornes de la résistance R.
- U_{ph} la tension aux bornes de la photodiode

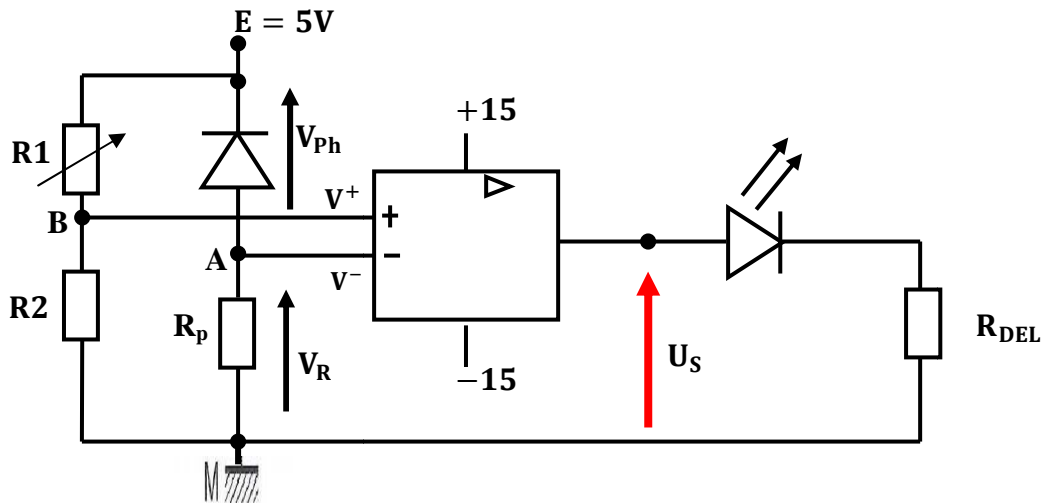
- Placer la photodiode dans l'obscurité totale avec le cache papier.
- Faire l'acquisition des signaux avec l'oscilloscope

- a) Relevez les signaux U_R et U_{ph}
- b) interpréter les résultats.
- c) Donnez des applications de la photodiode.



4.3. Application au réverbère

On va se servir de la tension V_+ en la comparant à une valeur seuil à partir de laquelle un réverbère doit se mettre en marche. On emploie un circuit comparateur à base de l'AOP.



$$R_1 = R_2 = R_p = R_{DEL} = 1k\Omega$$

- a) Déterminer expérimentalement la valeur de la résistance variable R_1 telle que la diode s'éteigne en cas de forte lumière.
- b) A quoi servent les deux résistances R_1 et R_2 ?
- c) Expliquer le fonctionnement de ce circuit dans les deux cas (lumière et obscurité).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Georges Asch et Collaborateurs, « Les capteurs en instrumentation industrielle », Dunod 2011.
- [2] P. Dassonvalle, « Les Capteurs : Exercices et problèmes corrigés », Dunod, 2005.
- [3] T. Lang, « Electronique des systèmes de mesure », Masson, 1992.
- [4] G. Asch, « Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur », Dunod, 2003.
- [5] F. Cottet, « Traitement des signaux et acquisition de données : Cours et exercices », Dunod, 1999.
- [6] M. Cerr, « Instrumentation industrielle », Tomes 1 et 2 ; Edition Tech et Doc.
- [7] G. Asch et al. « Acquisition de données », 3^e édition, Dunod, 2011.
- [8] P. Oguic, « Mesures et PC », Edition ETSF.
- [9] F. Boudoin, M. Lavabre, « Capteurs : principales utilisations », Edition Casteilla, 2007
- [10] J. G. Webster, « Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook », Taylor & Francis Ltd.
- [11] A. Migeon, « Applications industrielles des capteurs », Volume 2, Secteur médical, chimie et plasturgie ; Hermès Science Publications, 1997.
- [12] DESJARDINS M., « Capteurs de mesure », paris, la documentation française.
- [13] Pierre Bonnet - Master GSI – « Capteurs Chaînes de Mesures », université de Lille 1, sciences et technologies.
- [14] G. Lacroux, « Les actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements », Lavoisier 1994.
- [15] TS IRIS « Physique Appliquée », Christian BISSIERES <http://cbissprof.free.fr>
- [16] mesure et contrôle, Paris, Techniques de l'ingénieur.
- [17] M. Belhadj ; « capteurs et instrumentation », Université Tahri Mohamed de Bechar, 2017/2018
- [18] Gwenaëlle TOULMINET, asi, 2002-2003
- [19] L. Bergougnoux, « Conditionnement Electronique des capteurs », POLYTECH' Marseille, Département Mécanique Energétique.
- [20] Thomas BEGOU – Marcel PASQUINELLI, « CAPTEURS », 2011/2012
- [21] Pascal Dassonvalle, « Les capteurs, 62 exercices et problèmes corrigés », 2^e Édition, DUNOD, Paris, 2005, 2013
- [22] ENIT, Campus Universitaire, B.P. 37, 1002 Tunis Le Belvédère, Tunisie, <http://www.enit.rnu.tn>,