

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Polycopié de Cours

Capteurs et Chaines de Mesure

Présenté par :

Dr : LARBAOUI Ahmed

Ce cours est destiné aux étudiants de la 3^{ème} année Licence Science
Technologie / Electromécanique

Algérie
2021

Avant-propos

Ce présent polycopié pour la matière " Capteurs et chaînes de mesures ", s'adresse aux étudiants de la troisième année universitaire LMD spécialité Electromécanique et Electrotechnique dans le cadre du programme officiel du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique algérienne, à la lecture facultative, introduit la notion de la mesure, structure globale d'une chaîne de mesure complète: acquisition, traitement, 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 (passifs et actifs), 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, le conditionnement du capteur (montage potentiométrique, montage push-pull, montage en pont), les circuits de conditionnement du signal mesuré (mmplificateur d'isolation, mmplificateur d'instrumentation (notion de tension en mode commun, amplificateur différentiel) et les connaissances de base concernant la chaîne d'acquisition de données.

Nous recevons avec plaisir toutes les critiques et suggestions destinées à améliorer ce travail.

Connaissances préalables recommandées:

1. Mesures électriques;
2. Bases de l'électronique;
3. Lois des circuits électriques et notions fondamentaux;
4. Principe de la conversion électromagnétique.

Semestre: 6

Unité d'enseignement: UEF 3.2.1

Matière 3: Capteurs et chaînes de mesure

VHS: 22h30 (Cours: 1h30)

Crédits: 2

Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement:

Après avoir acquis cette unité, l'étudiant est censé maîtriser les différents éléments constitutifs d'une chaîne de mesure, le principe de base de fonctionnement d'un capteur et les caractéristiques métrologiques dont il faut tenir compte lors de l'utilisation et le choix d'un capteur.

Connaissances préalables recommandées:

Electricité Générale, Mesures électriques et électroniques.

Contenu de la matière:

Chapitre 1. Notions de chaîne de mesure : (1 Semaine)

Définition, synoptique d'une chaîne de régulation industrielle, capteurs actifs et passifs, classification des capteurs.

Chapitre 2. Caractéristiques métrologiques des capteurs : (1 Semaine)

Définition, étalonnage d'un capteur, sensibilité, linéarité, précision, sensibilité dynamique.

Chapitre 3. Circuit de conditionnement d'un capteur: (3 Semaines)

Montages de base des amplificateurs opérationnels (inverseur, non inverseur, différentiel, sommateur, ...). Amplificateur d'instrumentation, Amplificateur d'isolation. Ponts conditionneurs. Linéarisation des caractéristiques statiques des capteurs.

Chapitre 4. Mesure de température : (3 semaines)

Introduction à la thermométrie, Thermométrie par résistances, Thermocouple, Thermistance, Pyromètre.

Chapitre 5. Mesure de pressions : (2 semaines)

Notions de pression, pression absolue, pression relative et pression différentielle. Capteurs de pression piézorésistifs

Chapitre 6. Mesure de niveaux et débits : (3 semaines)

Capteurs à flotteurs, Capteurs à ultrasons à effet Doppler

Chapitre 7. Mesure de déplacements et de vitesse : (2 semaines)

Codeurs optiques, Codeurs incrémentaux, Capteurs à réluctance variable.

Mode d'évaluation:

Examen: 100%.

Références bibliographiques:

1. George Asch et Coll, « les capteurs en instrumentation industrielle », 6^{ème} édition Dunod, 2006.
2. Pascal Dassonville, « Les capteurs : 50 exercices et problèmes corrigés », Dunod, 2004.

3. Georges Asch, Patrick Renard, Pierre Desqoutte, Zoubir Mammeri, Eric Chambérod, Jean Gunther, « Acquisition de données », 3ème édition, Dunod, 2011.
4. Fèrid Bélaïd, « Introduction aux capteurs en instrumentation industrielle », Centre de Publication Universitaire 2006.
5. J. P. Bentley, "Principles of measurement systems", Pearson education 2005.
6. J. Niard et al, « Mesures électriques », Nathan, 1981.

Table des Matières

Avant Propos	i
Notations et Abréviations	ii
Introduction	1
Chapitre 1 Notions de Chaîne de Mesure	4
1.1 Introduction	4
1.2 Définition	4
1.3 Situation des capteurs dans un système	4
1.3.1 Exemple : Portail Automatique	5
1.3.2 La description textuelle du fonctionnement du portail automatique	6
1.4 Capteurs actifs	7
1.5 Capteurs passifs	9
1.6 Classification des capteurs	11
1.6.1 Classification en fonction du signal délivré	11
1.7 Classification en fonction du mode de détection	15
1.7.1 Détecteurs de position	15
1.7.2 Codeurs de position	16
1.7.3 Potentiomètres	17
1.7.4 Capteurs de vitesse	18
1.7.5 Accéléromètres... ..	19
1.7.6 Capteurs d'effort	20
1.7.7 Capteur de température	21
1.8 Structure et fonctions principales d'un capteur	23
1.8.1 Constitution d'un capteur	23
Chapitre 2 Caractéristiques Métrologiques des Capteurs	25
2.1 Introduction	25
2.2 Différentes erreurs possibles	25
2.2.1 Erreurs systématiques	25
2.2.2 Erreurs aléatoires ou erreur de répétabilité.....	26
2.2.3 Erreurs accidentelles	26
2.3 Différents types d'erreurs classiques	26
2.3.1 Erreur de zéro (offset)	26
2.3.2 Erreur d'échelle (gain)	27
2.3.3 Erreur de linéarité	27
2.3.4 Erreur due au phénomène d'hystérésis	27
2.3.5 Erreur de mobilité	28
2.4 Identification des sources d'erreurs	28
2.4.1 Moyen	28

2.4.2 Méthode	28
2.4.3 Matière	28
2.4.4 Milieu	28
2.4.5 Main d'œuvre	28
2.5 Erreurs totales d'un système de mesure	28
2.5.1 Erreur d'un produit	28
2.5.2 Erreur d'une somme	29
2.5.3 Erreur d'une différence	29
2.6 Étalonnage du capteur	29
2.6.1 Étalonnage simple	30
2.6.2 Étalonnage direct ou absolu	30
2.6.3 Étalonnage indirect ou par comparaison	30
2.6.4 Étalonnage multiple	30
2.6.5 Validité d'un étalonnage : répétabilité et interchangeabilité	31
2.7 Qualité d'une chaîne de mesure	32
2.8 Sensibilité.....	33
2.8.1 Définition	33
2.8.2 Sensibilité en régime statique	34
2.8.3 Sensibilité en régime dynamique et réponse en fréquence	34
2.9 Linéarité	39
2.9.1 Conditions de linéarité	39
2.9.2 Régression linéaire	39

Chapitre 3 Circuit de Conditionnement d'un Capteur 41

3.1 Introduction	41
3.2 Amplificateur opérationnel	42
3.2.1 Représentation symbolique	42
3.2.2 Fonction de transfert	43
3.2.3 Règles de simplification pour circuits avec Ampli-OP	43
3.3 Amplification.....	44
3.3.1 Amplificateur inverseur	44
3.3.2 Amplificateur non inverseur	45
3.3.3 Suiveur	46
3.4 Montages opérationnels.....	46
3.4.1 Additionneur inverseur (mélangeur)	46
3.4.2 Soustracteur (différentiel)	48
3.5 Autres montages	49
3.5.1 La conversion courant tension	49
3.5.2 La conversion tension courant	50
3.5.3 Amplificateur d'instrumentation	50

3.6 Comparateur non inverseur	51
3.6.1 Fonctionnement	51
3.6.2 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e\ ref} = 0$	51
3.6.3 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e\ ref} \neq 0$	52
3.7.1 Comparateur inverseur	52
3.7.2 Fonctionnement	52
3.7.3 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e\ ref} = 0$	53
3.7.4 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e\ ref} \neq 0$	53
3.8 Conditionnement actif	53
2.8.1 Le capteur est une source de courant	53
3.8.2 Le capteur est une source de charge	54
3.9 Conditionneurs des capteurs passifs	54
3.9.1 Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs	54
3.10 Conditionneurs du signal	63
3.10.1 Adaptation de la source du signal à La Chaîne de mesure	63
3.10.2 Linéarisation	66
3.10.3 Amplification du signal et réduction de la tension de mode commun	71
3.10.4 Détection de l'information	75
Chapitre 4 Mesure de Température	77
4.1 Introduction	77
4.2 Le Thermomètre a dilatation de liquide	77
4.2.1 Description	77
4.2.2 Loi de variation	78
4.2.3 Liquides thermométriques.....	78
4.2.4 Nature de l'enveloppe	78
4.2.5 Colonne émergente	78
4.3 Thermomètre a dilatation de gaz	79
4.3.1 Principe	79
4.3.2 Description	79
4.4 Thermomètre a tension de vapeur	80
4.4.1 Principe	80
4.4.2 Liquides de remplissage et domaines d'utilisation	81
4.5 Le Thermomètre a dilatation de solide	82
4.5.1 Principe	82
4.5.2 Le bilame (bi-metallic-strip thermometer)	82
4.5.3 Pyromètre linéaire	83
4.6 Thermomètres électriques	83
4.6.1 Thermomètres à résistance	83
4.6.2 Thermistances	85

4.6.3 Les Thermocouples	88
Chapitre 5 Mesure de Pressions	98
5.1 Introduction	98
5.2 Expression de la pression	98
5.2.1 Pression dans un fluide	98
5.2.2 Pression exercée par un solide	99
5.2.3 Différentes unités de pression	99
5.2.4 Echelles de pression.....	99
5.3 Différentes sortes de pressions.....	100
5.3.1 Vide	100
5.3.2 Pression atmosphérique ou barométrique	100
5.3.3 Pression absolue.....	101
5.3.4 Pression relative ou effective	101
5.3.5 Pression différentielle	101
5.3.6 Pressions statique, dynamique et totale	101
5.4 Capteurs de pression (ou manomètres de pression).....	103
5.4.1 Principe	103
5.4.2 Modes de détermination de la pression	103
5.4.3 Classification des capteurs (manomètres)	104
5.4.4 Pression pour les fluides (liquide et gaz).....	104
5.5 Manomètres hydrostatiques	105
5.5.1 Fonction remplie	105
5.5.2 Manomètre a tube en U	105
5.5.3 Mesure de la pression atmosphérique.....	106
5.5.4 Problème de la capillarité	107
5.5.5 Avantages et inconvénient des manomètres à tubes	107
5.5.6 Domaine d'emploi	108
5.6 Manomètres à déformation de solide	108
5.6.1 Manomètre à tube de Bourdon.....	108
5.6.2 Fonctionnement	108
5.6.3 Utilisation	109
5.6.4 Avantages et inconvénients.....	109
5.7 Manomètre à membrane	109
5.7.1 Fonctionnement	109
5.7.2 Utilisation	110
5.8 Manomètre de pression absolu	110
5.8.1 Fonctionnement	110
5.8.2 Utilisation	111
5.9 Manomètre à capsule	111

5.9.1 Fonctionnement	111
5.9.2 Utilisation	111
5.10 Manomètres pour pression différentielle	111
5.10.1 Fonctionnement	111
5.10.2 Utilisation	112
5.11 Capteurs électriques	112
5.12 Procédés de conversion	113
5.12.1 Variation de résistance.....	113
5.12.2 Variation de capacité	113
5.12.3 Variation d'inductance	115
5.12.4 Jauges d'extensiométrie	117
5.12.5 Conversion par effet piézo-électrique	118
5.13 Capteurs à balance de forces ou équilibre de forces	119
5.13.1 Présentation	119
5.13.2 Capteurs à jauges de contrainte (capteurs piézo-resistifs)	119
5.13.3 Capteur potentiométrique	119
5.13.4 Capteur à variation de capacité	120
5.13.5 Capteur à variation d'induction	120
5.13.6 Capteur à cristal piézoélectrique.....	121
Chapitre 6 Mesure de Niveaux et Débits.....	123
6.1 Introduction	123
6.2 Echelles Limnimétriques	123
6.3 Méthodes hydrostatiques	125
6.3.1 Rappel de physique	125
6.3.2 Flotteur.....	125
6.3.3 Plongeur	125
6.4 Méthodes électriques de mesures de niveau	126
6.4.1 Sondes Conductives	126
6.4.2 Sondes capacitives	127
6.4.3 Méthodes de Mesures fondées sur le principe de rayonnement.....	128
6.4.4 Mesures par radars	128
6.4.5 Absorption de rayonnement gamma	128
6.5 Mesure de débit	130
6.5.1 Débit	130
6.5.2 Régime laminaire et régime turbulent	130
6.5.3 Vitesse	132
6.6 Débitmètres volumiques	132
6.6.1 Débitmètre à tube de Pitot	132
6.6.2 Débitmètres à organe déprimogène	132

6.6.3	Caractéristiques métrologiques	133
6.6.4	Montage du transmetteur de pression différentielle	134
6.6.5	Débitmètre à Ludion	134
6.6.6	Débitmètre à coupelle, à hélic ou à turbine	135
6.6.7	Débitmètre à palette	136
6.7	Définition de l'effet Doppler	137
6.8	Définition d'ultrasons	138
6.8.1	Débitmètres ultrasoniques	138
6.8.2	Effet Doppler ultrasonore	139
Chapitre 7	Mesure de Déplacements et de Vitesse	145
7.1	Capteurs de déplacement	145
7.1.1	Introduction	145
7.1.2	Les Codeurs optique	145
7.1.3	Les Codeurs absolus.....	145
7.2	Capteurs de vitesse	153
7.2.1	Génératrice Tachymétrique	153
7.2.2	Capteur tachymétrique à impulsions ou codeurs magnétiques	154
7.2.3	Capteur utilisant la réluctance variable	155
7.2.4	Les capteurs actifs magnéto-résistifs (807)	155
7.2.5	Les capteurs actifs à Effet Hall ou magnéto-résistifs à aimant intégré (206 et Partner)	157
7.2.6	Contrôle des capteurs actifs	158
Exercices	159
Annexes	175

Notations et Abréviations

V^+	Tensions d'entrée non inverseuse
V^-	Tensions d'entrée inverseuse
V_s	Tension de sortie
$+V_{cc}$	Tension de saturation haute
$-V_{cc}$	Tension de saturation basse
V_0	Volume du liquide à 0°C
V	Volume du liquide à T(°C)
a	Coefficient de dilatation du liquide (°C ⁻¹)
P	Pression (Pa)
T	Température (K)
R	Constante des gaz parfaits (8.31 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
n	Nombre de moles
L	Longueur de la tige à la température T (°C)
L_0	Longueur de la tige à 0°C
α	Coefficient de dilatation linéaire du métal (°C ⁻¹)
R_0	Résistance à 0°C
a, b et c	Des coefficients de température positifs, spécifiques au métal considéré.
R_0	Résistance à la température T_0
β	Coefficient qui dépend de la température, compris généralement entre 3000 et 5000 K
$P_{s,A}$	Pression statique ou hydrostatique au point A exprimée en (Pa)
ρ	Masse volumique du liquide contenu dans le réservoir exprimée en kg/ m ³
g	Accélérateur de pesenteur exprimée en m/s ²
H	Profondeur du point A exprimée en m
$P_{d,B}$	Pression dynamique ou hydrodynamique au point B exprimée en (Pa)
g	Accélérateur de pesenteur exprimée en m/s ²
V_A	Vitesse du fluide (m/s)
h	Profondeur du point A exprimée en m
$P_{s,A}$	Pression statique ou hydrostatique au point A exprimée en (Pa)
R	Résistance en Ω
ρ	Résistivité du conducteur en Ωm
l	Longueur du conducteur en m
S	Section du conducteur en m ²
ϵ_0	Permittivité du vide = 8, 8510 ⁻¹²
ϵ_r	Permittivité relative de l'isolant
e	Epaisseur de l'isolant en m
N	Nombre de spire
I	Courant en A
R	Reluctance du circuit magnétique en H ⁻¹
Φ	Flux traversant les spires en Wb
L	Longueur caractéristique de la canalisation en m
ν	Viscosité cinématique du fluide en m ² /s
μ	Viscosité dynamique en kg/ms ou N/m ² s ou Pas
Q	Débit du fluide,
V	Vitesse du fluide
S	Section de la canalisation
ρ	Masse du fluide
C_x	Coefficient de traînée du flotteur selon l'axe x
S	Maître couple (sa surface projetée sur le plan yz) en m ²

U	Vitesse du fluide en m/s
M	Masse du flotteur en kg
V	Vitesse du son exprimé m/s
γ	Coefficient d'élasticité du milieu
r	Constante physique de gaz parfait soit $281,8 \text{ J/Kg}$
θ	Température de milieu, exprimé en degré Kelvin.
t	Temps en s ;
c	Vitesse de propagation du son dans le fluide en m/s
α	Angle entre U est la direction définie par le couple émetteur / récepteur
F_e	Fréquence d'émission
ΔF	Fréquence doppler
C_0	Vitesse des ultrasons
d_{max}	Distance maximale
F_e	Fréquence d'émission de la sonde
F_r	Fréquence de réception de la sonde
V	Vitesse des éléments figurés dans le vaisseau
θ	Angle entre l'axe du vaisseau et l'axe du faisceau ultrasonore
C	Vitesse moyenne des ultrasons dans le corps humain ($1\ 540 \text{ m/s}$)
U_{ref}	Amplitude de l'excitation du rotor
ω_r	Fréquence de l'excitation du rotor
θ	Angle de la position absolue du rotor
μ_0	Perméabilité dans le vide
μ_f	Perméabilité relative
l	Longueur moyenne des lignes de champ dans la partie ferromagnétique
S	Section constante du tube de flux

Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs...), on a besoin de contrôler des paramètres physiques (température, pression, niveau, vitesse, luminosité...). Le capteur est l'élément indispensable à la détection de ces grandeurs physiques. Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

En toute rigueur, le capteur désigne l'enveloppe mécanique qui protège le transducteur proprement dit et assure parfois également une part du conditionnement. En pratique, on fait souvent l'amalgame entre les deux notions.

Le transducteur est un dispositif (souvent un simple matériau) réalisant intrinsèquement la conversion de la grandeur physique à mesurer en une grandeur de nature différente, le plus souvent électrique. C'est en effet sous forme d'une grandeur électrique qu'il est le plus facile de représenter et de traiter une information au niveau de l'organe de traitement.

Les phénomènes physiques mis en jeu pour réaliser la conversion sont logiquement ceux qui combinent des grandeurs de nature différente (à la fois mécanique et électrique par exemple), phénomènes que nous appellerons "multiphysiques". Nous rencontrerons ainsi des phénomènes particuliers appelés "thermoélectricité", "magnétorésistance", etc... dont le nom à lui seul indique quelles grandeurs sont concernées [1].

Certains transducteurs délivrent directement une tension électrique (cas le plus simple).

D'autres délivrent une grandeur électrique sous une forme plus "brute": un courant, une charge électrique, une valeur de résistance ou de réactance (inductance ou capacité).

Enfin, pour certains transducteurs, la valeur mesurée est liée à la fréquence (et non pas à l'amplitude) de la tension ou du courant délivrés.

On notera que la plupart des convertisseurs utilisés mesurent et traduisent la grandeur à asservir en tension électrique du fait que les circuits de comparaison et d'asservissements sont réalisés actuellement à l'aide de circuits électroniques.

L'actionneur est l'élément qui actionne le système à contrôler pour l'amener d'un état donné vers l'état souhaité. Il travaille souvent à puissance élevée. Les signaux de commandes sont en général faibles et servent à exciter des systèmes de puissances. Par exemple, le signal de commande qui agit sur

une électrovanne est faible mais qui permet de libérer beaucoup d'énergie qui permet d'augmenter ou de diminuer le débit d'eau chaude. Il s'agit souvent de moteurs.

La liaison des capteurs aux actionneurs nécessite parfois l'utilisation des systèmes de communication. On utilise de plus en plus des techniques de télé-contrôle comme en télérobotique (téléchirurgie, exploration spatiale, etc). Les systèmes modernes peuvent donc être très complexes et avoir une architecture distribuée. Les moyens et les distances peuvent différer d'une situation à l'autre. Il existe des problèmes spécifiques compte tenu de la nature de l'information à communiquer (texte, image, son.), du canal de transmission, de la technologie utilisée : avec fil ou hertzienne, du protocole de communication pour l'extraction de l'information utile, de la conversion de cette information. Par exemple, pour les communications en temps réel, les retards et les perturbations peuvent gêner le contrôle. Avec les réseaux Internet et Ethernet, il y'a de nouveaux problèmes [8].

Il s'agit des amplificateurs et les correcteurs qui élaborent la loi de commande qui est une fonction de l'erreur. On appelle écart ou erreur, la différence entre la consigne et la sortie. Le comparateur détermine l'écart entre la consigne et la mesure de la grandeur à asservir. Le correcteur peut être analogique ou digital.

Ce polycopié a pour but de présenter le plus large éventail possible des connaissances de base des capteurs et chaînes de mesures. 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, le capteur (types, caractéristiques), électriques, différents types de capteurs (passifs et actifs), 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, le conditionnement du capteur (montage potentiométrique, montage push-pull, Montage en pont), cette description sera suivi d'une présentation de la linéarisation analogique et des circuits de conditionnement du signal mesuré (amplificateur d'isolation, amplificateur d'instrumentation, amplificateur différentiel).

La pression tout comme la température, la vitesse ou le débit, intervient, en tant que variable, dans les phénomènes liés aux fluides liquides ou gazeux et aux solides qui exercent ou subissent des pressions.

Si on considère les applications industrielles, où se posent, surtout, les problèmes de mesure, dont la mesure de pression, on constate déjà qu'à lui seul le domaine énergétique absorbe une grande partie des instruments de mesure de pression [2].

C'est évident car les installations hydrauliques, thermiques, nucléaires, etc... fournissent l'énergie mécaniques ou électrique, nécessitent la surveillance permanente des pressions à ne pas dépasser, ce dépassement pouvant entraîner la détérioration d'enceintes et canalisations sans parler du risque d'éclatement des parois et d'accidents graves pouvant en découler, comme il peut diminuer le rendement

d'une réaction chimique se produisant dans un réacteur, ce qui influe sur la production de l'usine, d'où l'intérêt de la mesure de la pression [3].

La rédaction de ce polycopié s'est très inspirée et beaucoup d'informations restent dans ce domaine.

Chapitre 1

Notions de Chaîne de Mesure

1.1 Introduction

Dans les systèmes techniques, de nombreuses grandeurs physiques (température, pression, intensité lumineuse, position, déplacement,...) sont à mesurer et à prendre. Il a fallu développer des organes techniques permettant l'acquisition de ces grandeurs physiques, la transformation et la transmission d'informations exploitables Aux unités de traitement. Cet organe technique qui est à l'origine de cette chaîne d'acquisition est défini par un terme générique : **Capteur**.

1.2 Définition

Un capteur est un constituant ou un organe capable d'acquérir une grandeur physique à mesurer, et de la transformer en une grandeur exploitable par une unité de traitement. Le signal de sortie d'un capteur est très souvent électrique (Courant ou tension).

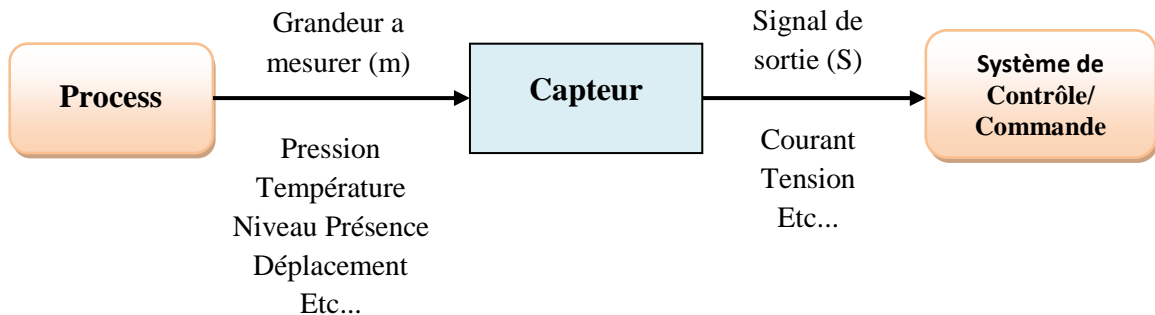


Figure 1.1 : principe d'un capteur.

Le capteur est caractérisé par sa fonction : $s = f(m)$ où s est la grandeur de sortie ou la réponse du capteur et m la grandeur physique à mesurer (Mesurande).

1.3 Situation des capteurs dans un système

Les capteurs font partie de la chaîne d'information d'un système. Une chaîne d'information est une association structurée de composants qui à partir d'une information source permet, de l'acquérir (capteur), de la traiter et de restituer une information ou une consigne qui peut être utilisable directement par l'utilisateur ou qui permet d'actionner une chaîne d'énergie.

Toute chaîne d'information est composée des groupes fonctionnels :

- ✓ Acquérir l'information;
- ✓ Traiter l'information;
- ✓ Communiquer l'information.

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité...). La chaîne d'acquisition permet de transformer une grandeur à mesurer en un signal électrique exploitable.

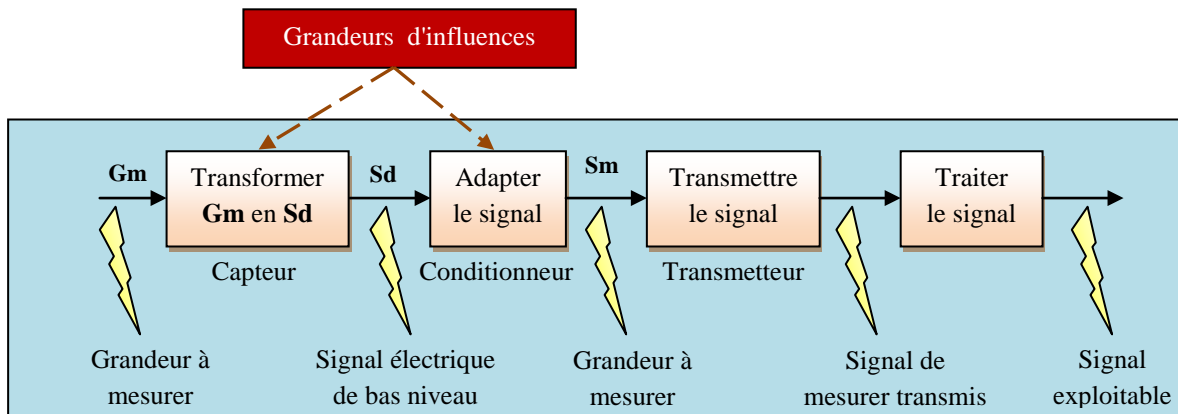


Figure 1.2 : la chaîne d'acquisition des données.

La chaîne d'acquisition est intégrée dans des systèmes qui nécessitent le pilotage d'une grandeur. On obtient le schéma classique suivant :

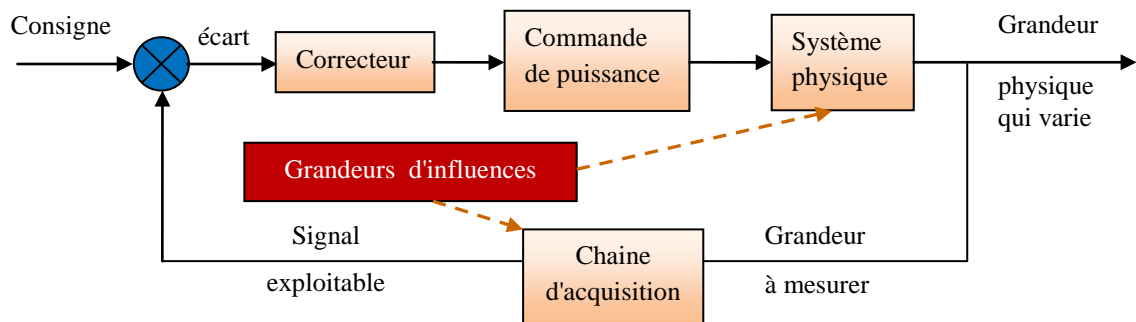


Figure 1.3 : schéma d'un système de régulation.

1.3.1 Exemple : portail automatique (voir schéma illustre dans la figure 1.3)

Les cellules photoélectriques permettent de détecter une présence (véhicule, personne, animal, objet,...) dans la zone de déplacement du portail. Pendant la phase de fermeture, si une présence est détectée, l'ordre d'inversion du sens de rotation du moteur est donné par l'armoire de commande afin de provoquer l'entraînement du portail en sens inverse et éviter ainsi tout accident ou détérioration du matériel.

La représentation schématique suivante met en évidence les constituants de la chaîne d'information (et d'énergie) permettant d'assurer cette fonction liée à la sécurité anti-coincement.



Figure 1.4 : Schéma d'un portail automatique.

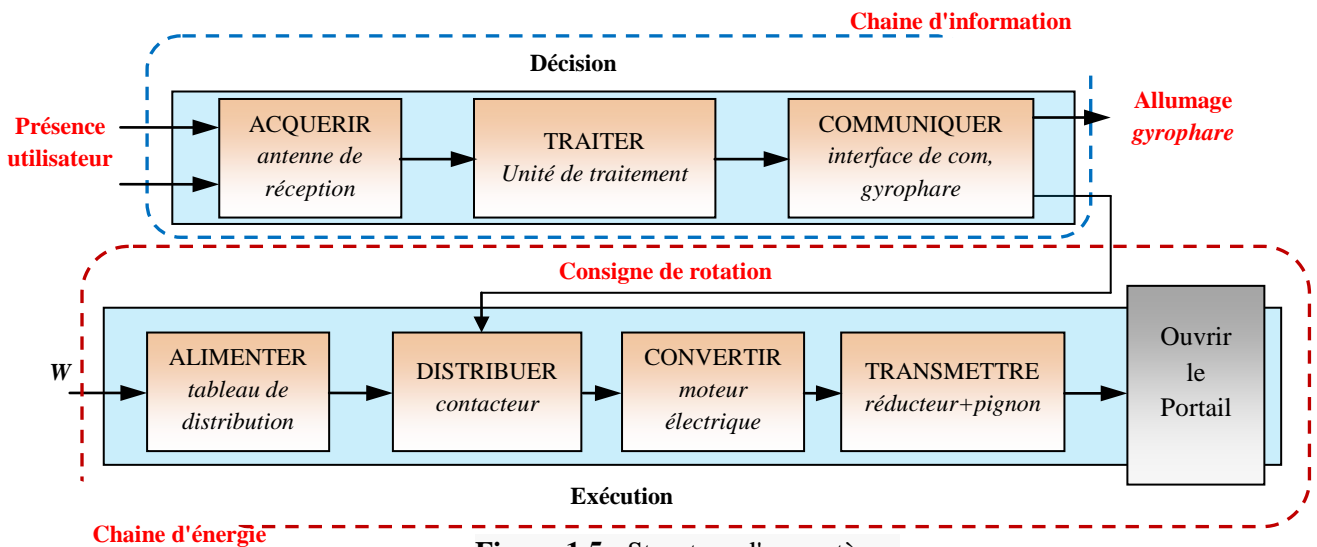


Figure 1.5 : Structure d'un système.

1.3.2 La description textuelle du fonctionnement du portail automatique

Une personne déclenche l'ouverture du portail avec la télécommande (émetteur);

- ✓ Le gyrophare clignote et les porte s'ouvrent;
- ✓ Le portail est ouvert;
- ✓ Les gyrophare s'éteint;
- ✓ Le véhicule est passé entre les photocellules de détection;
- ✓ Les portes se referment et le gyrophare clignote.

L'information source (position obstacle) est détectée par les photocellules. Cette information est convertie en signal électrique et transmise à l'unité de traitement. En fonction de son programme interne, l'unité de traitement décide alors d'envoyer une consigne de rotation en sens AR au contacteur par l'intermédiaire de l'interface de communication ainsi que la signalisation de la mise en mouvement par allumage du gyrophare.

En tant qu'élément de circuit électrique, le capteur se présente, vu de sa sortie :

Soit comme un générateur, s étant une charge, une tension ou un courant et il s'agit alors d'un capteur actif; soit comme une impédance, s étant alors une résistance, une inductance ou une capacité : le capteur est alors dit passif. Cette distinction entre capteurs actifs et passifs basée sur leur schéma électrique équivalent traduit en réalité une différence fondamentale dans la nature même des phénomènes physiques mis en jeu. Le signal électrique est la partie variable du courant ou de la tension qui porte l'information liée au mesurande : amplitude et fréquence du signal doivent être liées, sans ambiguïté à l'amplitude et à la fréquence du mesurande.

Un capteur actif qui est une source, délivre immédiatement un signal électrique ; il n'en est pas de même d'un capteur passif dont les variations d'impédance ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'elles entraînent dans un circuit par ailleurs alimenté par une source extérieure. Le circuit électrique nécessairement associé à un capteur passif constitue son conditionneur et c'est l'ensemble du capteur et du conditionneur qui est la source du signal électrique.

1.4 Capteurs actifs

Fonctionnant 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 d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les plus importants parmi ces effets sont regroupés tableau 1.1 ; dans la suite du paragraphe, on en donne une description sommaire destinée à éclairer leur mode d'application, comme représenté sur la [1].

Tableau 1.1: Capteurs actifs : principes physiques de base.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur se sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photo électromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectrique	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet hall	Tension

Effet thermoélectrique

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$.

Application : détermination à partir de la mesure de e d'une température inconnue T_1 lorsque T_2 (0°C par exemple) est connue figure 1.6a.

Effet pyroélectrique

Certains cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température ; ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : un flux de rayonnement lumineux absorbé par un cristal pyroélectrique élève sa température ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension aux bornes d'un condensateur associé figure 1.6b.

Effet piézoélectrique

L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques, le quartz par exemple, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées. **Application :** mesure de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézoélectrique les variations de sa charge figure 1.6c.

Effet d'induction électromagnétique

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une *f.é.m.* proportionnelle au flux coupé par unité de temps, donc à sa vitesse de déplacement. De même, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction variable du fait de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la *f.é.m.* dont il est le siège est égale (et de signe contraire) à la vitesse de variation du flux d'induction.

Application : la mesure de la *f.é.m.* d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine figure 1.6d .

Effets photoélectriques

On en distingue plusieurs, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau.

Effet photoémisif

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique.

Effet photovoltaïque

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semiconducteurs *P* et *N* illuminée ; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

Effet photoélectromagnétique

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement.

Applications: Les effets photoélectriques qui permettent d'obtenir courant ou tension fonction de l'éclairement d'une cible sont à la base de méthodes de mesure des grandeurs photométriques d'une part, et ils assurent d'autre part, la transposition en signal électrique des informations dont la lumière peut être le véhicule figure 1.6e.

Effet Hall

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. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension v_H qui a pour expression :

$$v_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin\theta \quad (1.1)$$

où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette. Application : un aimant lié à l'objet dont on veut connaître la position détermine les valeurs de *B* et θ au niveau de la plaquette : la tension v_H , qui par ce biais est fonction de la position de l'objet en assure donc une traduction électrique figure 1.6f .

Remarque : les capteurs basés sur l'effet Hall peuvent être classés parmi les capteurs actifs puisque l'information est liée à une *f.é.m.* ; ce ne sont cependant pas des convertisseurs d'énergie car c'est la source du courant I et non le mesurande qui délivre l'énergie liée au signal.

1.5 Capteurs passifs

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés [1] :

- 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 . La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande :
 - soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;
 - soit sur les propriétés électriques des matériaux ;
 - soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable. Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position ; c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement : potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile.

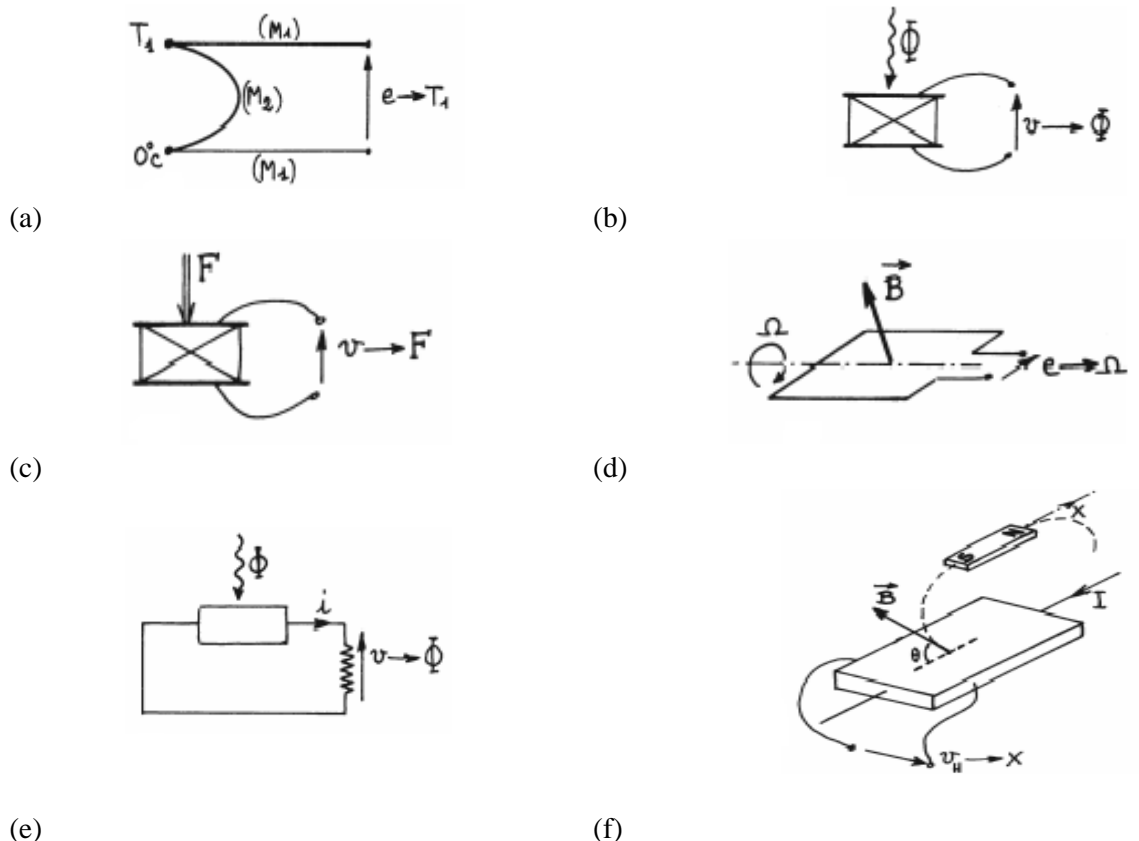


Figure 1.6 : Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs : (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall.

Dans le second cas, la déformation résulte de forces

- ou de grandeurs s’y ramenant (pression, accélération)
- appliquées soit directement soit indirectement au capteur : armature d’un condensateur soumise à une pression différentielle, jauge d’extensomètre liée rigidement à une structure soumise à contrainte. La modification d’impédance qu’entraîne la déformation du capteur est liée aux efforts auxquels celui-ci ou la structure intermédiaire se trouve soumis et elle en assure une traduction électrique.

Les propriétés électriques des matériaux, selon la nature de ces derniers, peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairement, pression, humidité... Si l’une seule de ces grandeurs est susceptible d’évolution, toutes les autres étant maintenues constantes il s’établit une correspondance univoque entre la valeur de cette grandeur et celle de l’impédance du capteur. La courbe d’étalonnage traduit cette correspondance et permet, à partir de la mesure de l’impédance de déduire la valeur de la grandeur physique agissante qui est le mesurande.

Le tableau 1.2 donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de capteurs passifs ; on y remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs [2].

Tableau 1.2 : Capteurs passifs : principes physiques et matériaux.

Mesurande	Caractéristique Electrique sensible	Type de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux: platine , nickel, cuivre.
Très basse Température	Constante diélectrique	Semi-conducteur. Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétique.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants: Bismuth, antimoniure d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants .

L’impédance d’un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu’en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur. Les types de conditionneurs le plus généralement utilisés sont :

- le montage potentiométrique : association en série d’une source, du capteur et d’une impédance qui peut être ou non de même type ;
- le pont d’impédances dont l’équilibre permet la détermination de l’impédance du capteur ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance ;
- le circuit oscillant qui contient l’impédance du capteur et qui est partie d’un oscillateur dont il fixe la fréquence ;
- l’amplificateur opérationnel dont l’impédance du capteur est l’un des éléments déterminants de son gain.

Le choix d’un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d’un ensemble de mesure. C’est, en effet, l’association capteur-conditionneur qui détermine le signal électrique ; de la

constitution du conditionneur dépendent un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sensibilité, linéarité, insensibilité à certaines grandeurs d'influence. L'étude approfondie des conditionneurs est l'objet du **Chapitre 3**.

1.6 Classification des capteurs

1.6.1 Classification en fonction du signal délivré

L'information transmise par un capteur peut être :

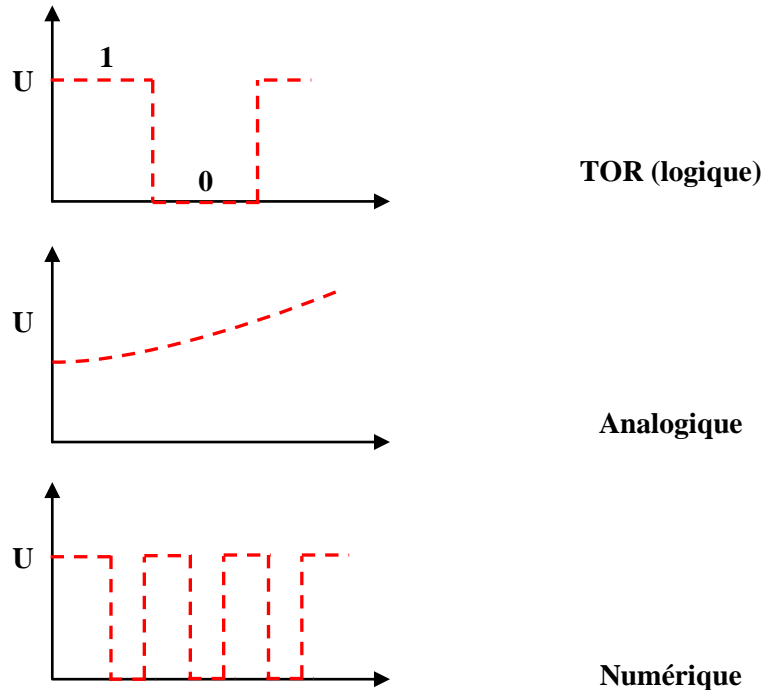


Figure 1.7: Classification en fonction du signal délivré.

a) Capteur TOR

Un capteur TOR (Tout Ou Rien) est un capteur dont la sortie ne peut prendre que deux états généralement représenté par 0 et 1. Ce sont les capteurs les plus répandus en automatisation (interrupteurs de position, détecteurs de proximité...). Les capteurs TOR ne délivrant que deux états 0 et 1 sont généralement appelés des **Détecteurs**.

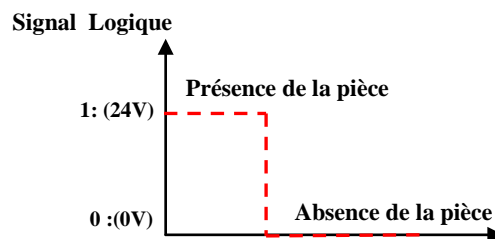


Figure 1.8: Capteur TOR (Tout Ou Rien).

Domaine d'utilisation des capteurs TOR :

- Détection de la présence, d'un passage
- Détection d'un seuil de T° (Thermostat), d'un seuil de pression (Pressostat),...



Figure 1.9 : Exemple des capteurs TOR.

b) Capteur analogique

Signal analogique : est un signal qui évolue dans le temps de façon continue. Un capteur analogique délivre une information (électrique, visuelle,...) qui évolue de façon continue entre deux bornes.

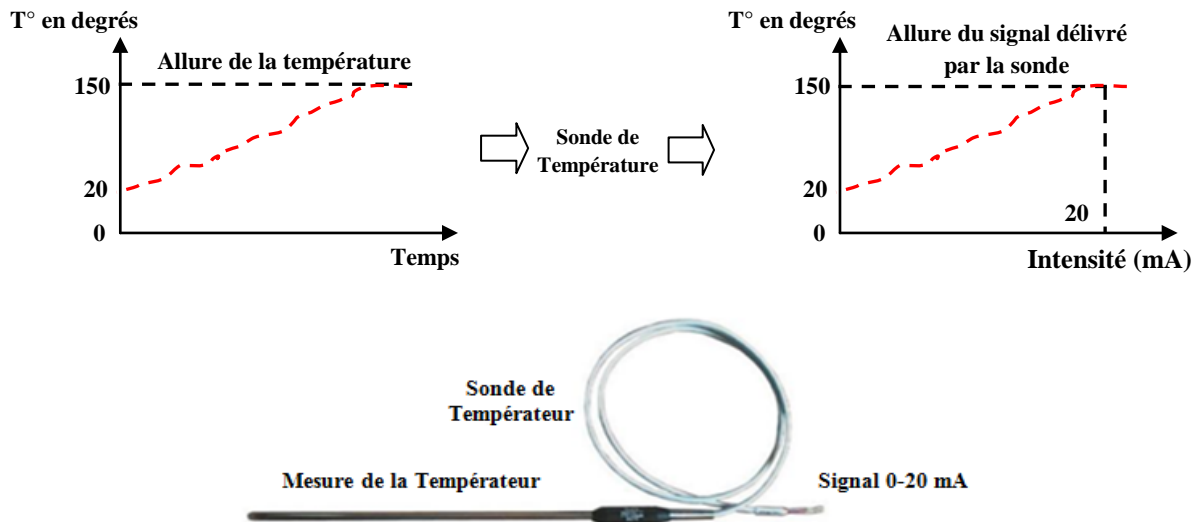


Figure 1.10: Capteur analogique.

Domaines d'utilisation des capteurs analogiques :

- Mesure de grandeurs physiques (température, pression, niveau, tension, force, luminosité, couleur,...)



Figure 1.11: Exemples des Capteurs analogiques.

c) Capteur numérique

Signal numérique : est un signal composé d'un nombre fini de valeurs numériques. Les informations délivrées par le capteur numérique peuvent être sous la forme d'un code binaire (avec un nombre de bits définis), d'un train d'impulsions (avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise).

1*) Echantillonnage

Un signal numérisé est un signal analogique qui a été échantillonné. Cela signifie que l'on a à intervalles réguliers la valeur du signal. Le nombre d'évènements lus par secondes correspond à la fréquence d'échantillonnage. Cette fréquence doit être suffisamment grande si l'on veut préserver la forme originale du signal.

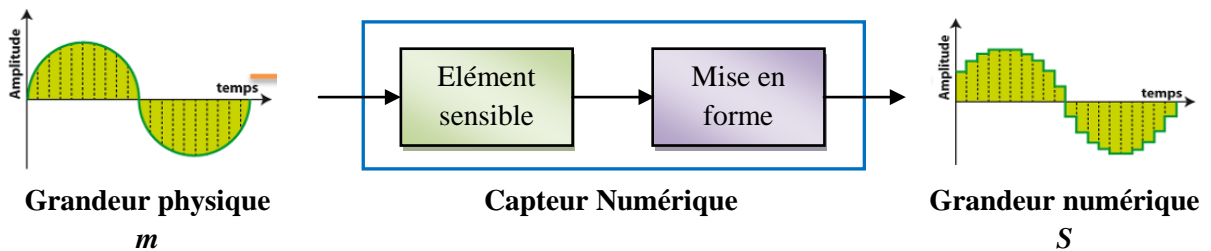


Figure 1.12: Capteur numérique.

Le théorème de Nyquist-Shannon dit que la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure à 2 fois la fréquence maximale contenue dans le signal. La qualité du signal numérique dépend également directement du nombre de bits utilisés pour coder le signal source. Le nombre de valeurs différentes pouvant être discrétisées est égal à 2^n (n = nb de bits utilisés).

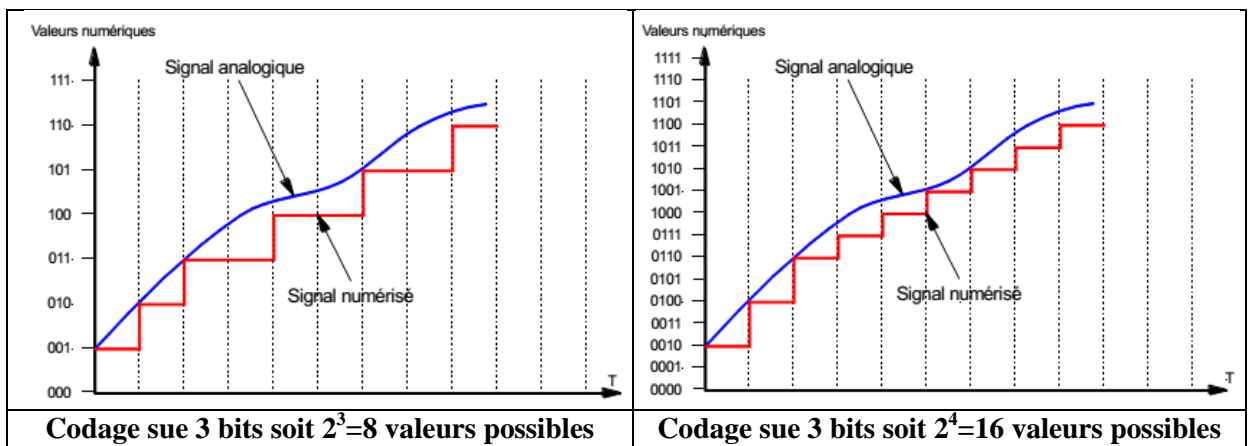


Figure 1.13: Signal analogique et numérique.

Exemple : échantillonnage de la musique

Notre oreille perçoit les sons jusqu'à environ 20 000 Hz. La fréquence d'échantillonnage doit être au moins de l'ordre de 40 000 Hz. Dans le cas d'un CD audio cette fréquence est d'environ 44 000 Hz. Le signal est codé sur 16 bits soit $2^{16} = 65536$ valeurs différentes pour chaque échantillon.

Entre deux échantillons, le signal a été « gommé ». C'est la raison pour laquelle les mélomanes préfèrent écouter la musique à partir d'un disque vinyle plutôt qu'un CD.

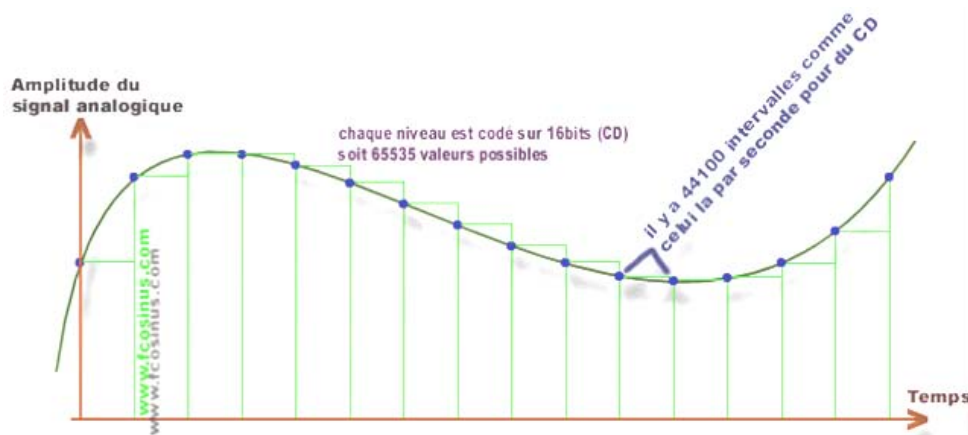


Figure 1.14: Echantillonnage d'un signal analogique .

2*) Transmission du signal

Les capteurs numériques vont être capables de transmettre des valeurs déterminant des positions, des pressions, des températures, etc...

Les informations qui sont des combinaisons de signaux 0-1, sont transmises à l'unité de traitement et peuvent être lues soit en parallèle, soit en série.

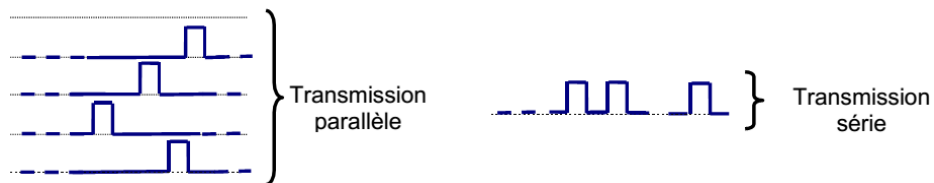
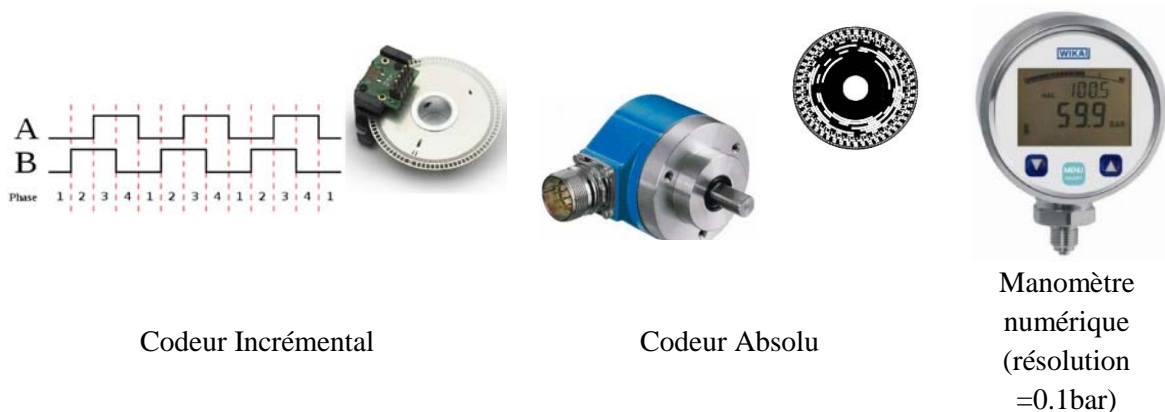


Figure 1.15: La forme de transmission du signal.

Domaines d'utilisation des capteurs numériques :

- Détection en continu d'une grandeur (T°, Pression, Niveau, Tension, Force, Luminosité, Couleur,...)
- Traitement numérique de l'information.



Codeur Incrémental

Codeur Absolu

Manomètre numérique (résolution =0.1bar)

Figure 1.16: Exemple des capteurs numériques.

1.7 Classification en fonction du mode de détection

Les capteurs utilisent une grande variété de solutions technologiques, dont vouloir dresser un catalogue exhaustif serait vain. Chaque phénomène physique pouvant donner naissance à une famille de capteurs.

On retiendra les technologies associées aux mesures plus courantes : position, vitesse, accélération, effort, température.

1.7.1 Détecteurs de position

La détection de la position est souvent réalisée par un capteur TOR; les technologies sans contacts sont plus robustes dans les environnements industriels et les détecteurs à ultrasons tendent à remplacer les détecteurs inductifs [4].

a) Capteur mécanique fin de course

Sortie par commutation d'un contact. L'information est récupérée sur un "contact sec" qui est câblé soit directement dans un schéma de commande, soit relié à une entrée d'automate.

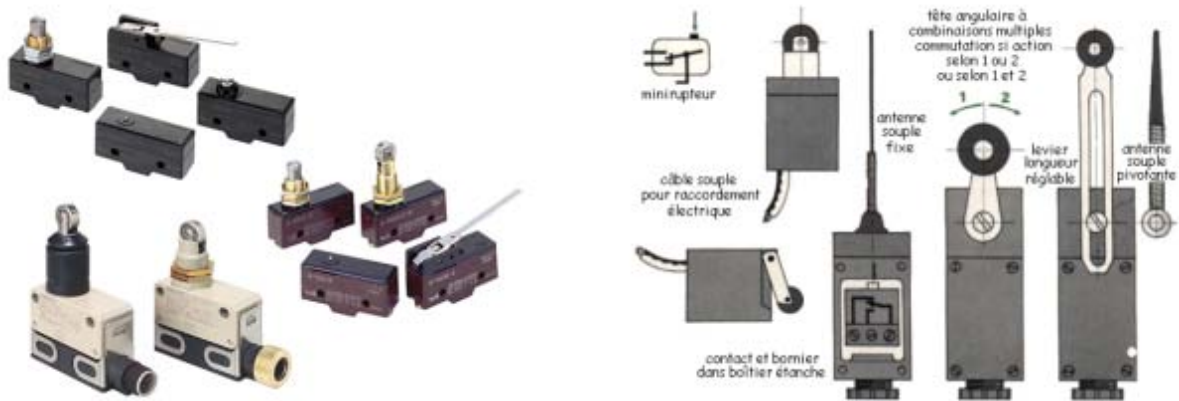


Figure 1.17 : Exemples de capteurs mécaniques de fin de course.

b) Capteur de proximité inductif et capacitif

Sortie par commutation d'un transistor (bloqué ou saturé). L'information correspond à un niveau de tension récupérée en sortie de transistor, qui est interprétée comme étant un 0 ou un 1 par l'entrée d'automate. Sortie 2 fils ou 3 fils.



Figure 1.18: Exemples de capteurs inductifs et capacitifs.

Remarque inductif ou capacitif

De par leur principe de fonctionnement, les capteurs inductifs ne peuvent détecter sans contact que des objets métalliques. Cette restriction ne s'applique pas aux capteurs capacitifs, qui sont en revanche légèrement plus chers .

c) *Fourche optique*

Sortie par commutation d'un transistor (bloqué ou saturé). Comme avec les barrages photoélectriques, l'émetteur et le récepteur sont face-à-face.



Figures 1.19: Exemples de fourches optiques .

d) *Capteur de proximité à ultrasons*

La technologie ultrason permet de s'affranchir pour l'objet à détecter, du type de matériau, de sa couleur, de sa forme ainsi que des conditions d'ambiances. Le détecteur ultrason est "Plug and Play", pas de réglage, pas d'apprentissage, pas d'ajustement dans le temps.



Figure 1.20: Exemples de capteurs de proximité à ultrasons.

1.7.2 Codeurs de position

La valeur de la position est mesurée par un codeur absolu ou incrémental.

a) *Codeur incrémental*

Un disque imprimé solidaire de l'axe est associé à une détection optique qui délivre en général 5 ou 6 signaux. Le comptage des impulsions donne au déplacement une valeur relative. La combinaison des voies A et B permet de discriminer le sens de rotation.

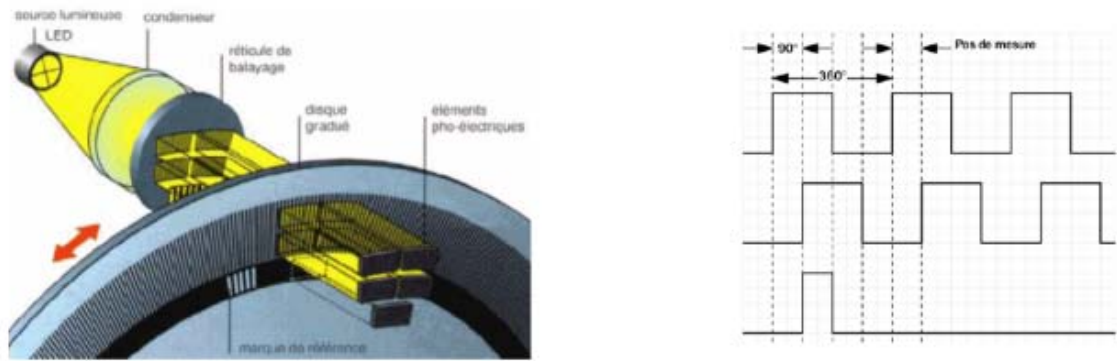


Figure 1.21: Principe de fonctionnement d'un capteur linéaire (on n'a alors plus un disque, mais une règle).

b) Codeur absolu

- ❖ **Solution 1 :** on utilise le code Gray (ou binaire réfléchi, voir ci-contre), ce qui nécessite une conversion en binaire naturel pour être exploitable par un microcontrôleur.
- ❖ **Solution 2 :** une piste supplémentaire (ci- dessous à droite la piste extérieure, pour un codeur rotatif) autorise la lecture du code de position seulement dans son axe, le code binaire naturel peut alors être utilisé pour imprimer le disque.

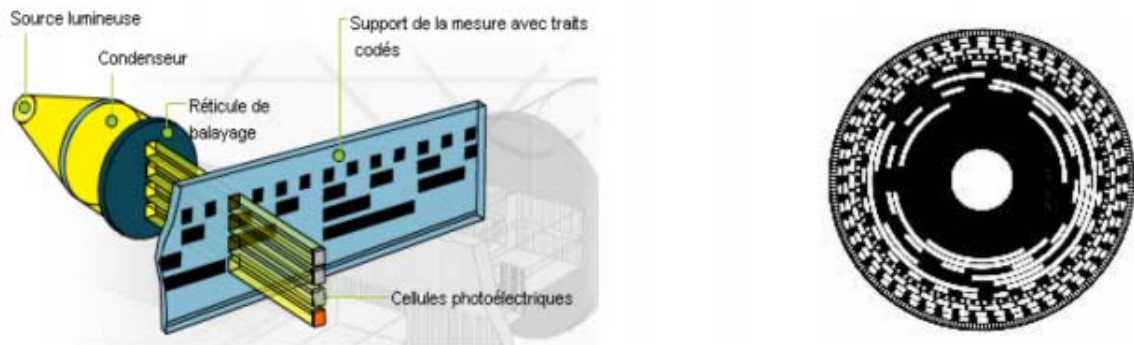


Figure 1.22: Principe de fonctionnement d'un codeur absolu (linéaire ou rotatif).

1.7.3 Potentiomètres

Un potentiomètre est un type de résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes. Ce système permet de recueillir, sur la borne reliée au curseur, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance. Ce capteur traduit donc l'angle ou la distance à mesurer en tension entre la borne C et la borne A. à noter que le débattement angulaire ou la course sont limités par construction.

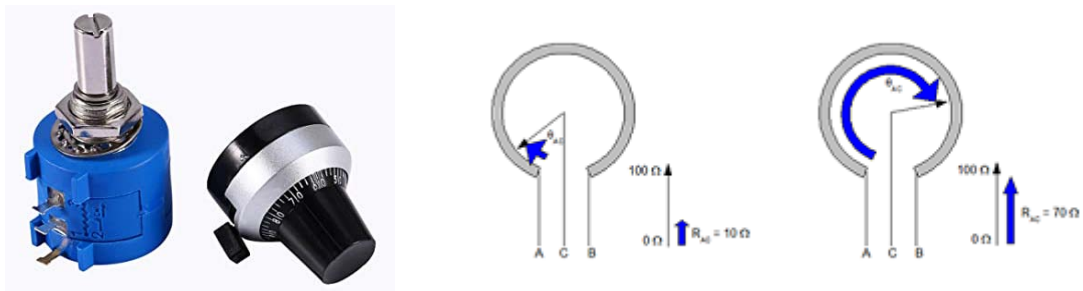


Figure 1.23: Potentiomètre rotatif et principe de fonctionnement

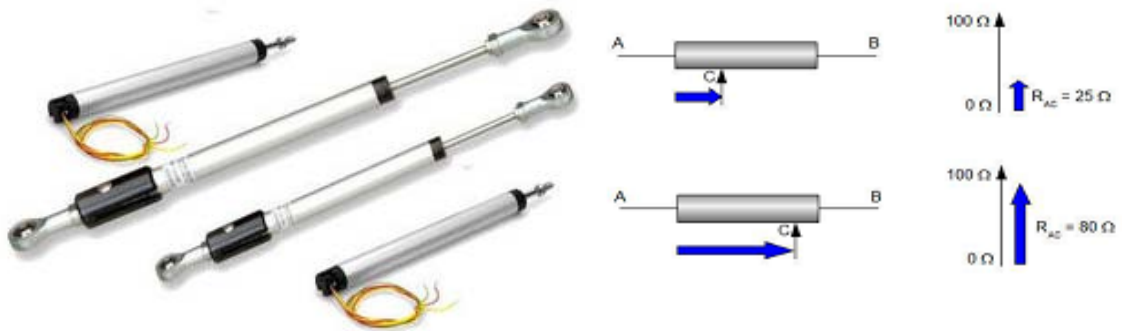


Figure 1.24: Potentiomètres linéaires et principe de fonctionnement.

1.7.4 Capteurs de vitesse

a) Génératrice tachymétrique

Machine à courant continu utilisée en génératrice (à vide). La mesure utilise la relation de couplage nécessite en général un filtrage du signal.



Figure 1.25 : Exemples de génératrices tachymétriques.

b) Codeur incrémental

Un codeur incrémental peut donner, par mesure de la fréquence des signaux de sortie A et B, une image de la vitesse angulaire.



Figure 1.26: Exemples de codeurs incrémentaux.

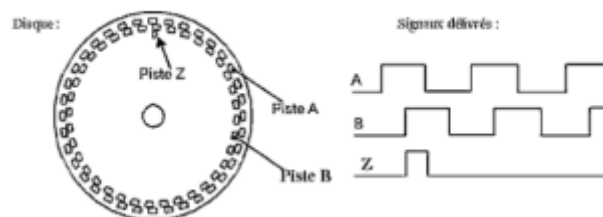


Figure 1.27: Signaux types renvoyés par un codeur incrémental.

c) Capteur de vitesse et déplacement embarqué

Technologie IR LEDs (Infrarouge à diode électroluminescente). le capteur LFIIP mesure la vitesse entre 0.3 et 400km/h et la distance parcourue .sa précision est de 0.1 km/h et 0.1% en mesure de distance .Très robuste et léger 250g , le LFIIP fournit les données par les sortie analogique , numérique (USB ET RS232) et CAM .Installation discrète sous châssis ou sous nez de formule 1 . les parties optiques sont faces à la route , le cylindre vers l'avant.



Figure 1.28: Capteur IR LED embarqué.

1.7.5 Accéléromètres

le principe de tous les accéléromètres est basé sur le principe fondamentale de la dynamique appliqué à la masse sismique du capteur : $\vec{F} = m\vec{a}$.

ce principe de base peut être décliné par un système masse / ressort ou un système pendulaire .un accéléromètres et toujours composé d'une masse sismique qui lorsqu'elle est soumise à une accélération va se déplacer . un élément sensible utilisant des technologies très différentes suivant les cas permet de mesure ce déplacement et d'en déduire l' Accélération galiléenne à laquelle est soumis le capteur .

Il existe un grand nombre d'accéléromètres non asservis différents :

- à détection piézoélectrique ;
- à détection piézorésistive ;
- à jauge de contrainte ;
- à détection capacitive (à diélectrique gaz);
- à détection inductive;
- à détection optique;
- à poutre vibrante ;
- à ondes de surface.

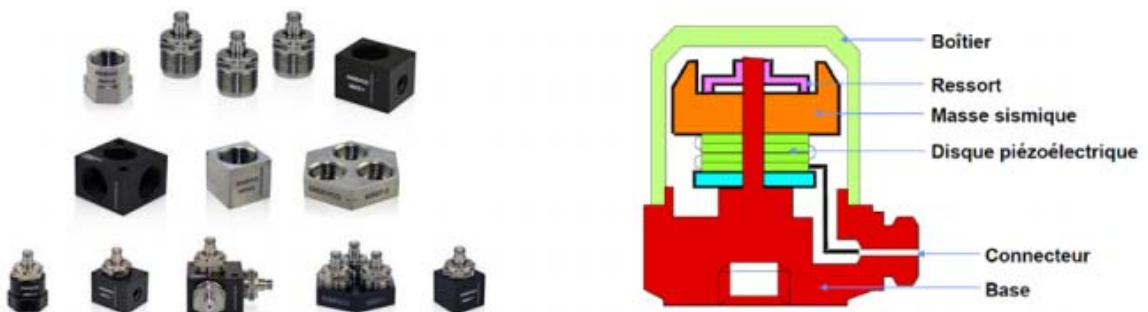


Figure 1.29 : Exemples d'accéléromètres et principe d'un d'accéléromètre piézoélectrique.

1.7.6 Capteurs d'effort

Historiquement, les capteur à jauge de contraintes sont les plus simple à fabriquer , donc les plus répandus , mais la maîtrise de la cristallisation a permis la fabrication de capteur piézoélectrique qui sont des solutions plus fiables et plus faciles à mettre en œuvre l'utilisation .

a) Capteurs à jauges de contrainte

De son vrai nom : capteur à jauge d'extensoimètre .collée sur un corps d'épreuve , la jauge subit une déformation qui fait varier la valeur de sa résistance .La déformation du corps d'preuve provoque un allongement relatif de la matière à la surface de celui-ci .C'est cette variation de longueur (en général , on a comme ordre de grandeur $\varepsilon = 10^{-6}$. Par conséquent , le fait de mesure une déformation nécessite la précise de très petites variation de la résistance .

Implantation de 4 jauge de contrainte sur un même corps d'épreuve .lors de l'application d'une force , deux jauges s'étirent alors que les deux autres sont comprimées

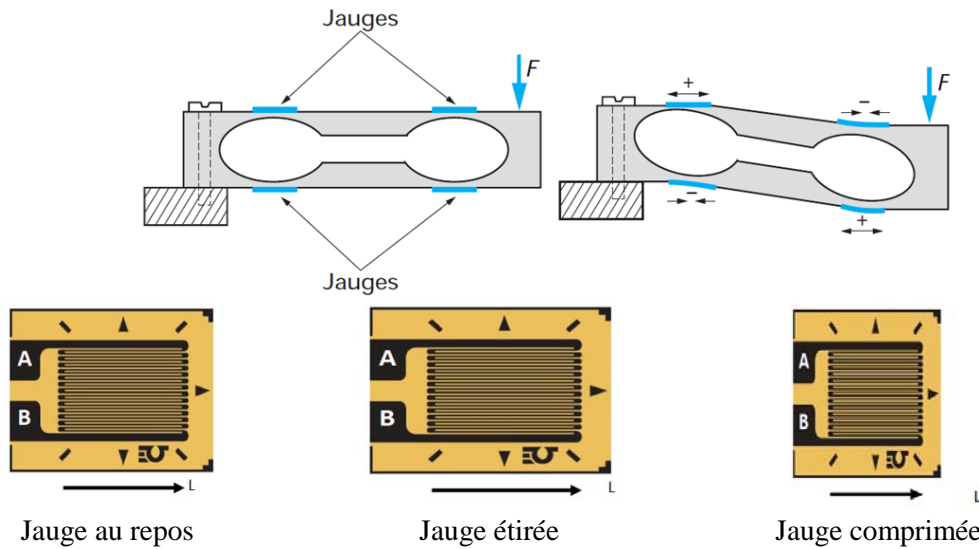


Figure 1.30: Capteur d'effort avec ses jauge de contrainte .A droite , vue déformée du corps d'épreuve .

Les jauge de contrainte sont presque toujours utilisées dans une configuration en pont avec une source d'excitation de tension . Le pont de wheatstons se compose de quatre branches résistives avec une tension d'excitation , U_{a1} , appliquée sur le pont . Les jauge en diagonale sont sur la même face .

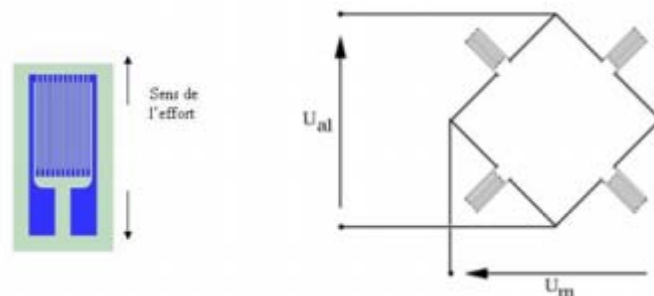


Figure 1.31: Jauge de contrainte et pont de Wheatstons.

Le fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge, proportionnellement à sa déformation. C'est le coefficient ou facteur de jauge k qui traduit cette proportionnalité, suivant la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L} \quad (1.2)$$

k est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge.

En fonction du choix du matériau du capteur et de sa forme, le capteur sera plus ou moins sensible à l'effort appliqué.

Concrètement :

Un capteur de force à jauge de contrainte est généralement alimenté en 10V, sa sensibilité ou signal de sortie est de 2mV par Volt d'alimentation. Cela signifie que le capteur va générer un signal de sortie de 20 mV pleine échelle.

b) Capteur piézoélectrique

La piézoélectricité est la propriété qui possède certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique.

De façon simple, on peut retenir que la charge électrique Q (Coulomb) qui apparaît sur les électrodes du capteur est proportionnelle à l'effort F , soit :

$$Q = kF \quad (1.3)$$

Avec :

k de l'ordre de $10 \cdot 10^{-10} C \cdot N^{-1}$.

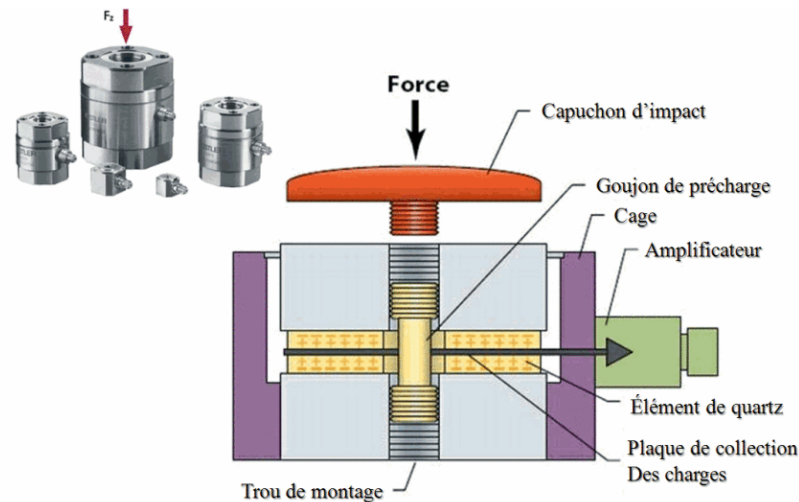


Figure 1.32: Capteur d'effort piezoelectrique et principe de fonctionnement.

1.7.7 Capteur de température

a) Thermistance

Une thermistance est un dispositif à semiconducteur composé d'oxydes métallique compressés à hautes température pour leur donner la forme d'une petite bille, d'un disque, d'une plaque ou toute autre forme. Enfin, elles sont recouvertes d'époxy ou de verre [5].

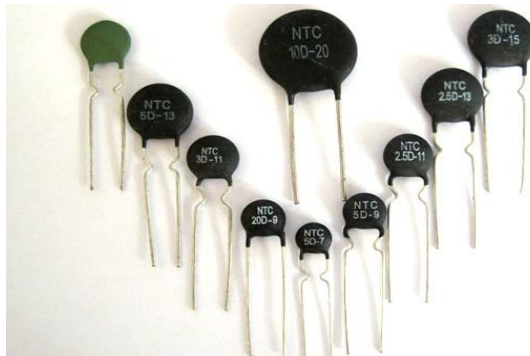


Figure 1.33: Thermistance CTN / thermistance CTP

La valeur de leur résistance est une fonction de la température , croissante (CTP coefficient de température positif) ou décroissante (CTN) .

b) Thermomètre à résistance de platine

Plus connu sous le nom PT100 ($100\ \Omega$ à $0\ ^\circ\text{C}$) est une thermistance. Le platine permet une bonne reproductibilité du comportement du capteur et permet son échange sans réétalonnage.



Figure 1.34: Sonde thermométrique à résistance Pt100.

c) Thermocouple

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. Un thermocouple est créé lorsque deux métaux différents entrent en contact, ce qui produit, au point de contact, une faible tension en circuit ouvert qui correspond à température. vous pouvez utiliser cette tension thermoélectrique, communément appelée tension Seebeck, pour calculer la température. Pour de petites variations de températures, la tension est approximativement linéaire.



Figure 1.35: Sonde de température de thermocouple de type k.

d) *Thermomètre infrarouge*

Un thermomètre infrarouge est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir de l'émission de lumière de type corps noir qu'il produit. Un thermomètre est parfois appelé à tort thermomètre laser s'il est aidé d'un laser pour viser, ou encore thermomètre sans-contact pour illustrer sa capacité à mesurer la température à distance. On utilise également le terme de pyromètre de manière à exprimer la différence avec un thermomètre à contact classique puisqu'il mesure le rayonnement thermique émis et non la température elle-même. En connaissant la qualité d'énergie émise par un objet, et son émissivité, sa température peut être déterminée.

La mesure IR est une mesure de surface : le point laser de cet appareil compact indique le point central de la zone circulaire de mesure.

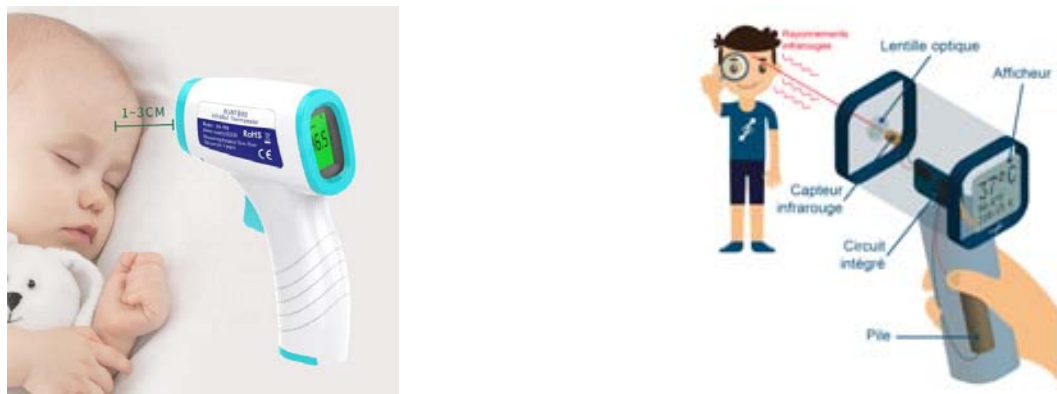


Figure 1.36: Thermomètre infrarouge et principe de fonctionnement.

Schématiquement, le procédé consiste à mesurer l'énergie lumineuse (située dans l'infrarouge) sur un détecteur permettant de la convertir en un signal électrique. Cette méthode permet de mesurer la température à distance, contrairement aux autres types de thermomètres comme les thermocouples.

1.8 Structure et fonctions principales d'un capteur

1.8.1 Constitution d'un capteur

De façon simple, un capteur peut être défini comme un transducteur convertissant une grandeur physique (mesurande) en un signal électrique (mesure). Cette transformation peut être directe dans quelques cas simples, mais en réalité, la technologie des capteurs fait souvent appel à plusieurs conversions de phénomène physique avant d'arriver au signal de sortie.

Ainsi, la structure d'un capteur répond de manière générale au schéma ci-dessous :

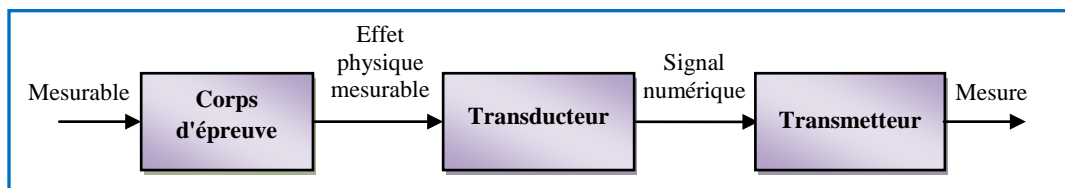


Figure 1.37: Structure d'un capteur.

A°) Corps d'épreuve

C'est un élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer. Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

B°) Transducteur

Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

C°) Transmetteur

Il réalise la mise en forme, l'ampliation, le filtrage, la mise à niveau du signal de sortie pour sa transmission à distance. Il peut être incorporé ou non au capteur proprement dit.

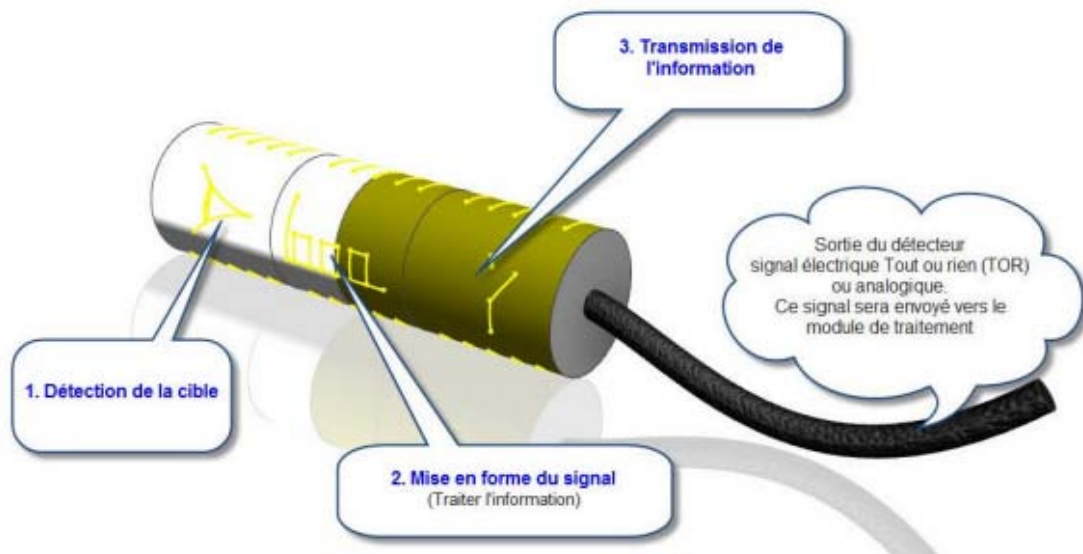


Figure 1.38: constitution d'un capteur.

Chapitre 2 **Caractéristiques Métrologiques des Capteurs**

2.1 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. L'adaptation du capteur et de la chaîne de mesure implique que celle-ci n'ajoute pas au signal initial des incertitudes ou limitations supérieures à celles apportées par le capteur. C'est donc de la qualité du capteur que dépendent en premier lieu : d'une part, la plus ou moins bonne concordance entre valeur mesurée et valeur vraie du mesurande ; et d'autre part, les limites de l'incertitude sur la valeur mesurée.

2.2 Différentes erreurs possibles

Les erreurs de mesure ont des causes systématiques que l'expérimentateur peut corriger ou non. Ces erreurs ont des causes clairement identifiées et prévisibles. Parmi ces erreurs, on trouve les erreurs systématiques, les erreurs accidentelles et les erreurs aléatoires, comme représenté dans [8].

2.2.1 Erreurs systématiques

Les erreurs systématiques sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, elles sont généralement liées à l'appareil de mesure (mauvais étalonnage) et qui se reproduisent à l'identique d'une mesure à l'autre. Si elles sont identifiées, les erreurs systématiques peuvent être éliminées en effectuant la correction adaptée.

Il existe de nombreuses sources d'erreurs systématiques, comme par exemple :

- L'effet des grandeurs d'influence (température, pression,...);
- L'erreur de justesse des instruments (décalage du zéro par exemple, chronomètre mal calibré,...);
- La position de l'objet mesuré;
- La perturbation due à la présence des instruments d'observation.

Dans la pratique, différentes méthodes sont utilisées pour détecter et évaluer ces erreurs, comme par

Exemples

- Mesurer la même grandeur avec un instrument différent ;
- Mesurer la même grandeur avec des méthodes différentes ;
- Mesurer une grandeur étalon (contrôle de la justesse) ;
- Mesurer un même mesurande dans des laboratoires différents.

Par définition, l'erreur systématique est donnée par l'expression suivante:

$$E_{rs} = \langle m \rangle - M_{vrais} \quad (2.1)$$

2.2.2 Erreurs aléatoires ou erreur de répétabilité

Les erreurs aléatoires sont généralement liées à la maladresse du manipulateur et qui varient d'une mesure à l'autre de manière fortuite. Ces erreurs sont, non reproductibles, sont difficilement corrigibles. Ces erreurs obéissent à des lois statistiques et nécessitent de prendre en compte une valeur moyenne sur plusieurs mesures.

Ce type d'erreurs intervient lorsque l'expérimentateur effectue N mesures exactement dans les mêmes conditions du mesurande et ne trouve pas à chaque fois la même valeur.

Si on effectue N mesures dans des conditions de répétabilité, le meilleur estimateur de la valeur du mesurande est la valeur moyenne $\langle m \rangle$ des N mesures. Une mesure m_i parmi les N mesures est généralement différente de $\langle m \rangle$.

La différence $E_{rs} = m_i - \langle m \rangle$ est appelée erreur aléatoire ou erreur de répétabilité. L'erreur aléatoire Δ provient essentiellement des variations temporelles et spatiales non prévisibles des grandeurs d'influence. Il n'est pas possible de compenser l'erreur aléatoire d'un résultat de mesure, elle peut cependant être réduite en augmentant le nombre de mesures.

Exemples d'erreurs aléatoires

- Erreurs dues aux appareils de mesure (seuil de mesure, résolution...);
- Erreurs dues aux conditions extérieures (température, pression, ...);
- Erreurs de lecture;
- Parasites.

2.2.3 Erreurs accidentelles

Les erreurs accidentelles résultent d'une fausse manœuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil. Elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

2.3 Différents types d'erreurs classiques

Dans ce qui suit, on cite quelques erreurs les plus rencontrées lors d'une mesure avec une chaîne de mesure.

2.3.1 Erreur de zéro (offset)

L'erreur de zéro appelée aussi «dérive » est généralement due au vieillissement des composants d'un capteur et aux variations de température. Elle se traduit par un décalage de la grandeur de sortie d'une façon indépendante de la valeur de la grandeur mesurée.

Dans le cas de la température, la dérive se produit lors de la période d'échauffement du capteur, ce qui implique qu'il est préférable d'étalonner le capteur une fois cette période écoulée. Dans le cas du vieillissement, dérive est facilement corrigible par un étalonnage du capteur à intervalle régulier. Erreur de zéro = Valeur de x quand $X = 0$

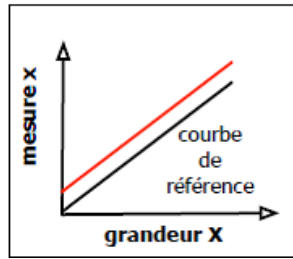


Figure 2.1 : Erreur de zéro (offset).

2.3.2 Erreur d'échelle (gain)

C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la valeur de la grandeur mesurée. Erreur de gain (dB) = $20 \log(\Delta x/\Delta X)$

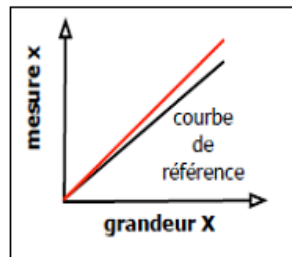


Figure 2.2 : Erreur d'échelle (gain) .

2.3.3 Erreur de linéarité

La caractéristique n'est pas une droite.

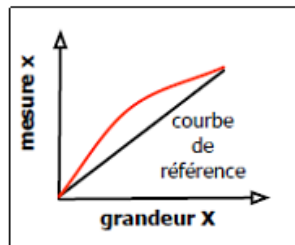


Figure 2.3 : Erreur de linéarité .

2.3.4 Erreur due au phénomène d'hystérésis

Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.

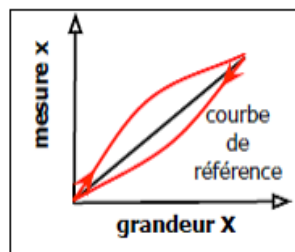


Figure 2.4 : Erreur due au phénomène d'hystérésis .

2.3.5 Erreur de mobilité

La caractéristique est en escalier. Cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.

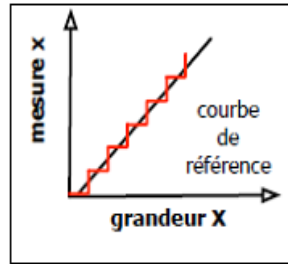


Figure 2.5: Erreur de mobilité .

2.4 Identification des sources d'erreurs

Pour évaluer les sources d'erreurs, nous pouvons utiliser comme outil le diagramme de cause-effet ou diagramme d'Ishikawa associé à la méthode des **5 M**. La méthode des « **5 M** » : Elle est basée sur cinq méthodes pour identifier les sources d'erreurs [3] :

2.4.1 Moyen

Matériel utilisé (appareils de mesure, instruments....) ainsi que les substances chimiques et les réactifs utilisés.

2.4.2 Méthode

Comprend toutes les étapes de l'analyse (prélèvement, pesée, mise en solution, dilution,.....).

2.4.3 Matière

Par exemple les produit biologique (plasma, urine,...), produit alimentaire (eau, lait,), Pouvant contenir des substances responsables d'interférences lors de la mesure.

2.4.4 Milieu

Conditions environnementales (température, pression, hygrométrie,.....).

2.4.5 Main d'œuvre

Opérateur (technicien, élève,) effectuant la mesure.

2.5 Erreurs totales d'un système de mesure

Un appareil de mesure est souvent constitué de plusieurs composants, chacun d'entre eux pouvant être sujet à des erreurs systématiques et aléatoires. On peut évaluer les erreurs de chaque composant et les combiner pour avoir l'erreur totale du système de mesure [3].

2.5.1 Erreur d'un produit

On considère une grandeur X qui s'obtient par la mesure de Y et Z tels que $X = Y.Z$, les nombres Y et Z étant positifs.

Si on suppose que la mesure de Y donne $y \mp dy$ et que la mesure de Z donne $z \mp dz$:

$$\frac{y-dy}{z+dz} < X < \frac{y+dy}{z-dz} \quad (2.2)$$

or :

$$\frac{y-dy}{z+dz} = \frac{(y-dy)(z-dz)}{(z+dz)(z-dz)} = \frac{yz \left(1 - \left(\frac{dy}{y} + \frac{dz}{z} - \frac{dy dz}{yz} \right) \right)}{z^2 - dz^2} \quad (2.2)$$

et

$$\frac{y+dy}{z-dz} = \frac{(y+dy)(z+dz)}{(z-dz)(z+dz)} = \frac{yz \left(1 + \left(\frac{dy}{y} + \frac{dz}{z} + \frac{dy dz}{yz} \right) \right)}{z^2 - dz^2} \quad (2.3)$$

En négligeant les erreurs d'ordre 2 par rapport aux autres termes, on obtient :

$$X = \frac{y}{z} \mp \frac{y}{z} \left(\frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} \right) \Rightarrow \frac{dx}{x} = \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} \quad (2.4)$$

Dans le cas d'un quotient, les erreurs relatives s'ajoutent.

2.5.2 Erreur d'une somme

On considère une grandeur X qui s'obtient par la mesure de Y et Z tels que $X = Y + Z$, les nombres Y et Z étant positifs.

Si on suppose que la mesure de Y donne $y \pm dy$ et que la mesure de Z donne $z \pm dz$:

$$(y - dy) + (z - dz) < X < (y + dy) + (z + dz) \quad (2.5)$$

on a donc : $X = y + z \mp (dy + dz) \Rightarrow dx = dy + dz$

Dans le cas d'une somme, les erreurs absolues s'ajoutent.

2.5.3 Erreur d'une différence

On considère une grandeur X qui s'obtient par la mesure de Y et Z tels que $X = Y - Z$, les nombres Y et Z étant positifs. Si on suppose que la mesure de Y donne $y \pm dy$ et que la mesure de Z donne $z \pm dz$:

$$X = y - z \mp (dy + dz) \Rightarrow dx = dy + dz \quad (2.6)$$

Dans le cas d'une différence, les erreurs absolues s'ajoutent.

2.6 Étalonnage du capteur

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 susceptibles de modifier la réponse du capteur [1].

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.

2.6.1 Étalonnage 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 de mesurandes statiques, c'est-à-dire à valeurs constantes :

- mesure de distances fixes à l'aide d'un capteur potentiométrique dont l'indication ne dépend pas de la température, grandeur d'influence ;
- mesure d'une force constante (pesage) au moyen de jauges compensées en température ;
- mesure d'une température stable à l'aide d'un thermocouple.

Dans ces conditions, l'étalonnage consiste à associer à des valeurs parfaitement déterminées du mesurande les valeurs correspondantes de la grandeur électrique de sortie ; l'étalonnage s'effectue par un seul type d'expériences et par l'une ou l'autre procédure décrite ci-après.

2.6.2 Étalonnage direct ou absolu

Les diverses valeurs du mesurande sont fournies soit par des étalons soit par des éléments de référence dont la valeur est connue avec une précision très supérieure, de l'ordre de cent fois, à celle recherchée pour le capteur :

- températures de points fixes primaires ou secondaires pour les capteurs de température ;
- cales-étalons, verniers de précision ou interféromètre laser pour les capteurs de déplacement ou de mouvement rectilignes .

2.6.3 Étalonnage 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. Le capteur de référence et le capteur à étalonner sont soumis dans les mêmes conditions, simultanément si possible, à l'action de mesurandes identiques dont le capteur de référence permet de connaître les valeurs figure 2.6.

Les valeurs associées du mesurande et de la grandeur électrique de sortie, qui sont en nombre limité, doivent cependant permettre d'établir sans ambiguïté et compte tenu de la précision des mesures, la relation entre mesurande et grandeur de sortie,

- sous forme graphique : c'est la courbe d'étalonnage ;
- sous forme algébrique : c'est l'équation caractéristique du capteur.

2.6.4 Étalonnage 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.

Dans le cas où le capteur est constitué de composants susceptibles de présenter de l'hystérésis, mécanique ou magnétique, la valeur de la grandeur de sortie dépend non seulement de la valeur actuelle du mesurande mais aussi de la suite de ses valeurs antérieures. L'obtention d'une courbe d'étalonnage parfaitement définie exige alors une procédure d'étalonnage dans laquelle le capteur se trouve soumis à une succession ordonnée et spécifiée de valeurs du mesurande.

La procédure généralement employée est la suivante :

remise à zéro du capteur : le mesurande et la grandeur de sortie ont les valeurs correspondant à l'origine de leurs variations, par exemple : $m = 0$, $s = 0$; relevé de la grandeur de sortie, d'abord pour une suite croissante de valeurs du mesurande puis, pour une suite de valeurs décroissant depuis la valeur maximale atteinte précédemment.

La vitesse de variation du mesurande ou, ce qui est équivalent, son spectre de fréquence, est un paramètre auquel tous les capteurs sont sensibles. En effet, tout capteur dans les conditions de son emploi est caractérisé par sa réponse en fréquence (voir le paragraphe 2.8.3) qui définit un domaine de fréquence à l'intérieur duquel sa réponse est optimale et le plus souvent indépendante de la fréquence ; en dehors de ce domaine qui est sa bande passante, les performances en général diminuent en fonction de la fréquence. Dans ces conditions il est nécessaire d'effectuer un double étalonnage qui détermine :

- ✓ d'une part, la réponse en fréquence du capteur, qui est obtenue en mesurant la grandeur de sortie en fonction de la fréquence du mesurande dont l'amplitude est maintenue constante ;
- ✓ d'autre part, la réponse en fonction de l'amplitude du mesurande, à des fréquences fixes choisies dans la bande passante.

Les propriétés physiques du support matériel du mesurande peuvent aussi être l'un des paramètres déterminants de la réponse du capteur :

la capacité d'un capteur capacitif de niveau dépend non seulement de la hauteur de liquide mais aussi de sa constante diélectrique ; la résistance d'une sonde thermométrique de surf ace est fonction de la température de surface et de la nature du matériau sous-jacent dont la dilatation exerce des contraintes sur la sonde ;

l'indication d'un capteur de proximité à courants de Foucault dépend non seulement de la distance de l'objet mais aussi de sa résistivité et de sa perméabilité magnétique. Dans ce cas, on est amené à effectuer un étalonnage distinct du capteur pour chaque matériau avec lequel il sera utilisé. Une procédure semblable doit être appliquée vis-à-vis des grandeurs d'influence. Si la température modifie la réponse du capteur, on effectue une série d'étalonnages, chacun étant réalisé à température constante et l'opération répétée pour diverses températures réparties dans la plage d'utilisation possible. On agit de même pour toute autre grandeur d'influence. À titre d'exemple, afin de mettre en évidence l'obligation qu'il y a d'effectuer des étalonnages multiples lorsque les paramètres de fonctionnement du capteur sont nombreux, on considère le cas du phototransistor. Il s'agit d'un capteur optique dont la grandeur de sortie, le courant collecteur le dépend :

- ✓ du flux de rayonnement incident Φ ainsi que de sa longueur d'onde λ de l'angle α entre le rayonnement incident et la normale à la surface éclairée ;
- ✓ de la tension collecteur-émetteur V_{ce} et de la résistance de charge R_m ; de la température. Pour chacun des paramètres indiqués, le constructeur fournit l'étalonnage correspondant, obtenu en relevant l'influence sur I_c du paramètre considéré.

À partir de ces courbes, l'utilisateur peut, dans les conditions expérimentales qui lui sont propres, déterminer par interpolation la réponse du capteur .

2.6.3 Validité d'un étalonnage : répétabilité et interchangeabilité

La confiance que l'on peut accorder aux résultats d'un étalonnage doit être évaluée lorsque ces derniers sont utilisés pour l'exploitation de données fournies :

- soit par le capteur ayant été étalonné ;
- soit par un capteur de même fabrication mais n'ayant pas fait l'objet d'un étalonnage individuel.

La répétabilité est la qualité du capteur qui assure l'utilisateur de l'identité de la grandeur de sortie, dans des limites spécifiées, chaque fois que ce même capteur est utilisé dans des conditions identiques : même mesurande et mêmes paramètres additionnels. L'erreur de répétabilité est déterminée en effectuant au moins deux étalonnages successifs ; elle trouve son origine principale dans les erreurs aléatoires faites lors de l'étalonnage.

L'interchangeabilité d'une série de capteurs d'un même type est la qualité de cette série qui garantit à l'utilisateur des résultats identiques, aux tolérances près, chaque fois qu'un quelconque capteur de cette série est utilisé dans des conditions identiques. L'interchangeabilité résulte :

- d'une part, de la rigueur des procédés de fabrication : choix des matériaux et assemblage ;
- d'autre part des contrôles en fin de fabrication qui permettent de trier les capteurs satisfaisant aux tolérances imposées.

2.7 Qualité d'une chaîne de mesure

a) **fidélité** : c'est la paramètre qui caractérise la fiable valeur des erreurs accidentelles. La fréquence des erreurs n'est pas due à l'appareillage en générale.

b) **Justesse** : c'est le paramètre qui caractérise la fiable valeur des erreurs systématiques.

c) **Précision** : c'est le paramètre qui caractérise le fait que chaque mesure soit très proche de la valeur réelle du mesurande .La précision est spécifiée numériquement comme l'intervalle autour de la valeur mesurée à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vrais.

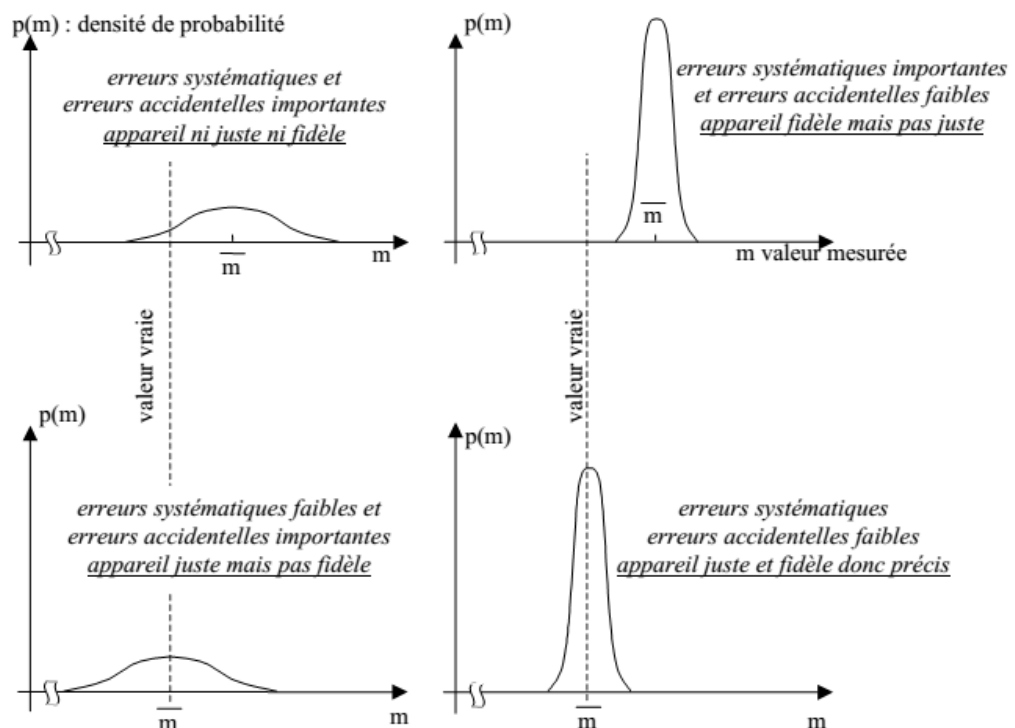


Figure 2.6 : Différents types de répartition des résultats de mesure.

L'exploitation convenable des mesures exige une limite max à l'incertitude de mesure δM . On peut définir l'erreur de précision $\delta M / (M_{max} - M_{min})$. La précision sera d'autant plus grand que ce rapport sera petit.

Fidélité + Justesse \Leftrightarrow Précision

Un étalonnage à posteriori de la chaîne de mesure permettra d'estimer l'incertitude réelle.

1. **Finesse d'un capteur** : c'est la propriété qui caractérise le degré d'influence du capteur sur le mesurande. Plus un capteur est fin, moins il perturbe le mesurande. L'idéal est donc une mesure sans contact (caméra IR, optique,...) lorsque c'est réalisable.
2. **La résolution** spécifie le nombre de valeurs distinctes qu'il est possible d'associer au mesurande.

Soit dM_{min} la variation minimale du mesurande donnant une variation mesurable dM_{min} de la valeur M mesurée, la résolution est définie par $(M_{max} - M_{min})/dM_{min}$. L'inverse est l'erreur de mobilité.

2.8 Sensibilité

2.8.1 Définition

C'est une spécification déterminante dans le choix d'un capteur. La sensibilité est définie par [8]:

$$S = \left(\frac{\Delta S}{\Delta m} \right)_{mi} \quad (2.7)$$

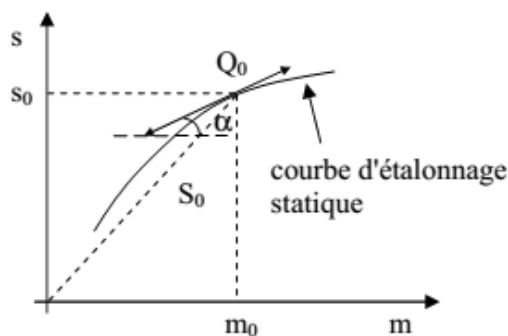


Figure 2.7 : Détermination de la sensibilité.

S peut dépendre de certains facteurs tels que la tension et la fréquence d'alimentation, de la température du milieu où se trouve le capteur, de la fréquence des variations du mesurande. Par exemple, la sensibilité sera donnée à 25°C ou pour une alimentation alternative à 50 Hz.

La température est un paramètre important, particulièrement pour les capteurs constitués d'éléments semi-conducteurs (Exemple : un phototransistor ou une jauge d'extensiométrie).

Dans ce cas, la sensibilité doit être spécifiée, d'une part à température donnée, souvent 25 °C, et d'autre part par son coefficient de variation thermique $\frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dT}$.

La fréquence du mesurande est un autre paramètre susceptible d'influer sur la sensibilité. Ceci amène à distinguer deux types de fonctionnement auxquels sont associées les sensibilités correspondantes :

- ❖ **le fonctionnement statique** où le mesurande a une valeur constante ou très lentement variable: un flux lumineux constant, une accélération constante.
- ❖ **le fonctionnement dynamique** où le mesurande varie rapidement : un flux lumineux modulé, une accélération liée aux variations d'une structure.

2.8.2 Sensibilité en régime statique

La sensibilité en régime statique au point de fonctionnement Q_0 peut s'écrire si le régime permanent est atteint et si la courbe $S = f(m)$ correspond à l'étalonnage statique:

$$S_{0 \text{ stat}} = \left(\frac{\Delta S}{\Delta m} \right)_{Q_0} = \tan(\alpha) \quad (2.8)$$

le rapport de transfert statique r_0 s'écrit $r_0 = \left(\frac{S_0}{m_0} \right)_{Q_0}$ il est égal à $S_{0 \text{ stat}}$ uniquement dans le cas où la courbe d'étalonnage $S = f(m)$ est une droite passant par l'origine.

2.8.3 Sensibilité en régime dynamique et réponse en fréquence

La sensibilité en régime dynamique peut être définie lorsque le mesurande m est une fonction périodique du temps; dans ces conditions la grandeur de sortie S a en régime permanent la même périodicité que le mesurande.

Soit le mesurande $m(t) = m_0 + m_1 \cos(\omega t)$ avec une m_0 constante à laquelle est superposé une variation sinusoidale d'amplitude m_1 et de pulsation ω .

La réponse du capteur est de la forme $S(t) = s_0 + s_1 \cos(\omega t + \psi)$ où :

- ✓ s_0 est la valeur constante correspondant à m_0 qui définit le " point de repos Q_0 " sur la courbe d'étalonnage statique.
- ✓ s_1 est l'amplitude de variation provoquée par la partie variable du mesurande et ψ est le déphasage entre les variations de la sortie et l'entrée.

La sensibilité est définie dans ce cas par:

$$S(f_n) = \left(\frac{S_n}{m_n} \right)_{Q_n, f_n} \quad (2.9)$$

avec : $f_n = n \cdot f_1$ où f_1 est la fréquence fondamentale.

S_n et m_n sont les amplitudes maximales relatives à la $n^{ième}$ composante fréquentielle du signal. Donc il existe autant de sensibilités que de fréquence significatives du spectre de m . La variation de la sensibilité en fonction de la fréquence a généralement pour origine l'inertie mécanique, thermique ou électrique de la tête de mesure qui l'empêche de délivrer un signal qui suive instantanément les variations du mesurande et ceci d'autant plus que la fréquence est élevée.

Cette inertie peut être inhérente au principe physique de base du capteur, mais elle est aussi très souvent due à la présence de **R, L, C**.

C'est pourquoi l'étude de la réponse en fréquence doit être menée en considérant l'ensemble formé par le capteur et les composants qui lui sont directement associés. L'équation, qui relie les variations de S à celles de m , est sous sa forme la plus générale une équation différentielle qui selon les cas est du premier ou du second ordre.

A. Système du premier ordre

Son comportement est régi par une équation différentielle du premier ordre de la forme :

$$A \frac{ds}{dt} + B \cdot s = m(t) \quad (2.10)$$

où A et B sont des constantes et $m(t)$ la valeur du mesurande à un instant t .

A.1 Réponse à un signal échelon

Lorsque le mesurande subit une variation brusque (échelon), l'établissement du régime permanent est précédé d'un régime transitoire qui doit être caractérisé afin de réaliser des mesures correctes. La réponse d'un système du 1er ordre à un signal échelon permet d'obtenir la constante de temps du système.

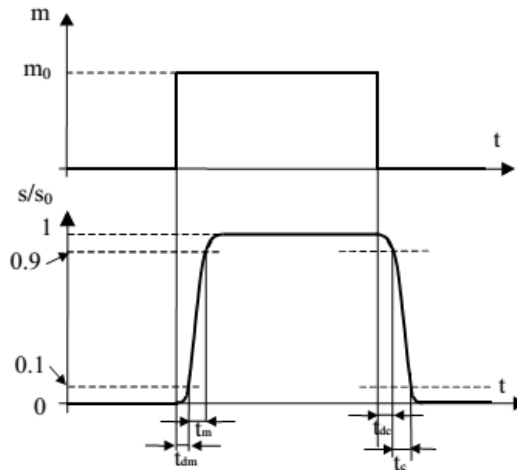


Figure 2.8: réponse à un signal échelon.

Pour un échelon du mesurande et en supposant que $s = 0$ à $t = 0$, la solution de l'équation différentielle précédente s'écrit:

$$s = s_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (2.11)$$

avec :

- $s_0 = \frac{m_0}{B}$ la sensibilité du système en régime permanent ,
- $\tau = \frac{A}{B}$ la constante de temps du système .

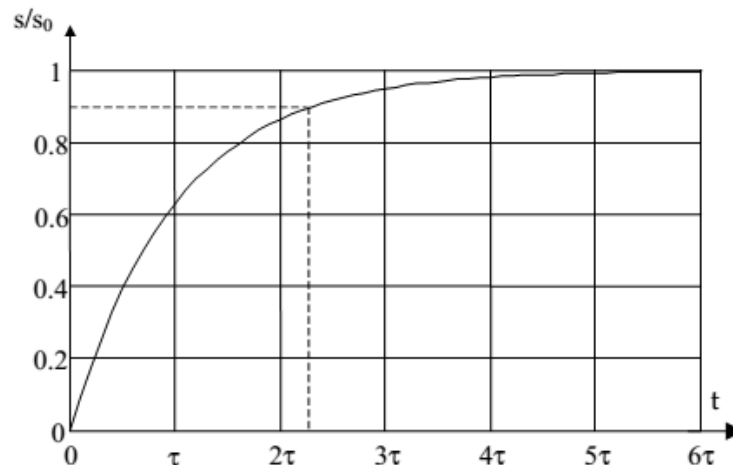


Figure 2.9 : réponse temporelle d'un système du 1^{er} ordre à un échelon du mesurande.

La grandeur utilisée pour caractériser la rapidité d'un système est le temps de réponse t_r , c'est l'intervalle de temps qui s'écoule après une variation brusque du mesurande (échelon) jusqu'à ce que la variation de sortie ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite $\varepsilon(\%)$ fixée conventionnellement. Un temps de réponse doit donc toujours être spécifié avec l'écart $\varepsilon(\%)$ auquel il correspond [1].

Le temps de réponse t_r du système peut être déterminé soit par la représentation graphique ci-dessus, soit à partir de son expression mathématique :

$$t_r(\varepsilon) = 2.3(2 - \log \varepsilon)\tau \quad (2.12)$$

L'expression du temps de réponse pour différentes valeurs de $\varepsilon(\%)$ est indiquée dans le tableau ci-dessous :

$\varepsilon(\%)$	$t_r(\varepsilon)$
10	2.3τ
5	3.0τ
2	3.9τ
1	4.6τ
0.1	6.9τ

A.2 Réponse à un signal sinusoïdal

La réponse d'un système à un signal sinusoïdal permet de caractériser la sensibilité en régime dynamique du système.

Pour un mesurande sinusoïdal $m(t) = m_1 \cos(\omega t)$ avec m_1 l'amplitude du signal et ω la pulsation (la période $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et la fréquence $f = \frac{1}{T}$), la réponse du capteur est de la forme

$$s(t) = s_1 \cos(\omega t + \psi) \quad (2.13)$$

L'équation différentielle $A \frac{ds}{dt} + B \cdot s = m(t)$ permet d'écrire la sensibilité en régime dynamique $S(f)$ et le déphasage ψ sous la forme :

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{B} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{F_c}\right)^2}} \quad \text{et} \quad \psi = -\text{Arc tan} \left(\frac{f}{F_c} \right), \quad \text{la fréquence de coupure } F_c = \frac{B}{2\pi A}$$

Lorsque la fréquence $F \rightarrow 0$, la sensibilité en régime dynamique tend vers la sensibilité en régime statique $S(0) = s = \frac{1}{B}$.

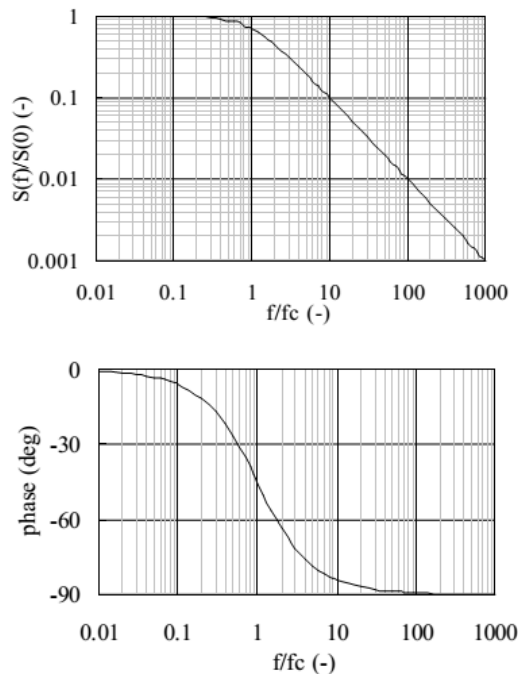


Figure 2.10 : sensibilité et phase d'un système du 1^{er} ordre.

B. Système du deuxième ordre

Son comportement est régi par une équation différentielle du deuxième ordre de la forme :

$$A \frac{d^2s}{dt^2} + B \frac{ds}{dt} + C.s = m(t) \quad (2.14)$$

où A , B et C sont des constantes.

Cette équation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{B}{A} \frac{ds}{dt} + \frac{C}{A} s = \frac{1}{A} m(t) \quad (2.15)$$

ou encore:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\omega_0\zeta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = K' m(t) \quad (2.16)$$

avec :

- $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{CA}}$ le coefficient d'amortissement du système
- $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{A}}$ la pulsation propre du système
- $F_c = \frac{\omega_0}{2\pi}$ la fréquence propre du système

B.1 Réponse à un signal échelon

Lorsqu'un échelon est appliqué au système, l'équation différentielle précédente s'écrit :

$$A \frac{d^2s}{dt^2} + B \frac{ds}{dt} + Cs = m_0 \quad (2.17)$$

Les conditions initiales du problème étant $s = 0$ et $\frac{ds}{dt} = 0$ à $t = 0$, la forme des solutions dépend de la valeur du coefficient d'amortissement ζ et du produit $\omega_0 t$.

La figure suivante montre la réponse temporelle d'un système du 2^{ème} ordre à un échelon, pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement ζ .

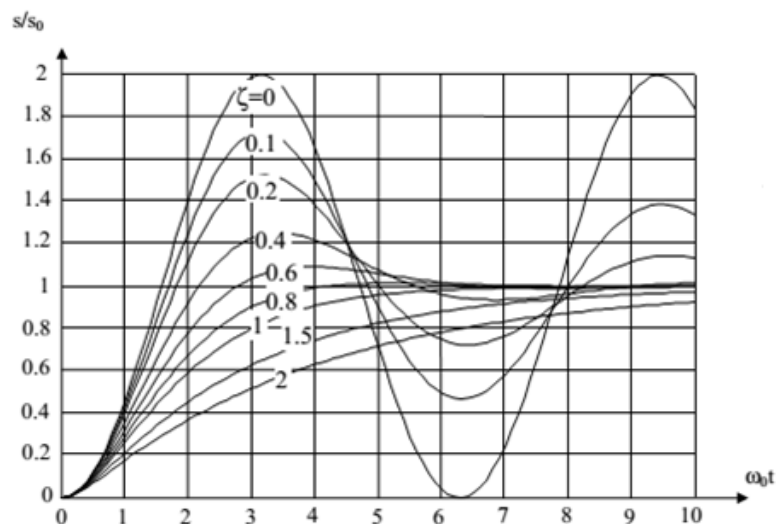


Figure 2.11 : réponse dans le temps d'un système du 2^{ème} ordre à un échelon du mesurande.

Si on cherche à minimiser le temps de réponse du capteur, qui est inversement proportionnel à ω_0 , la valeur optimale de ζ est comprise entre 0.6 et 0.8 (régime périodique transitoire amorti $\zeta < 1$).

B.2 Réponse à un signal sinusoïdal

Lorsque le mesurande est sinusoïdal, la sensibilité en fonction de la fréquence $S(f)$ est donnée par :

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = S(0) \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (2.18)$$

avec $S(0) = \frac{1}{c}$ la sensibilité en régime statique.

Le déphasage en fonction de la fréquence a pour expression :

$$\psi(f) = -\text{Arc tan} \left(\frac{2\zeta}{\frac{f_0}{f} \left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} \right) \quad (2.19)$$

La réponse en fréquence d'un système du 2^{ème} ordre, pour les différentes valeurs du coefficient d'amortissement ζ sont présentées sur les figures suivantes.

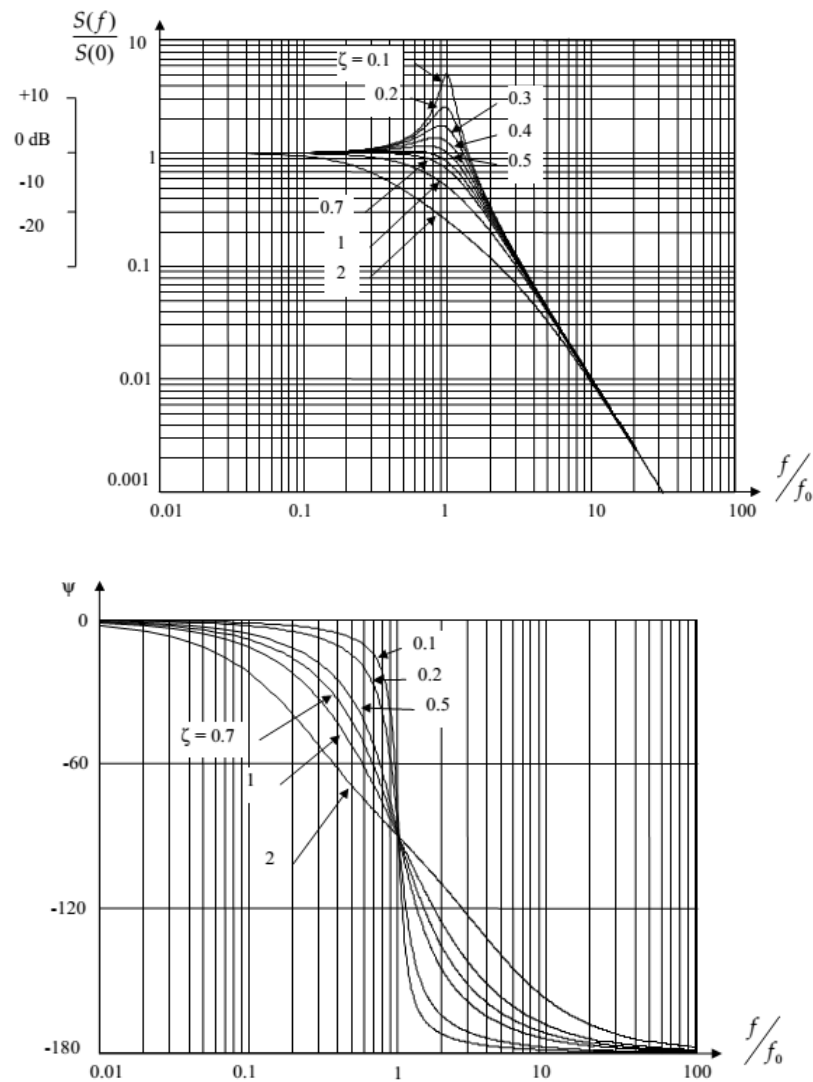


Figure 2.12: réponse en fréquence d'un système du 2^{ème} ordre.

La réponse en fréquence la plus uniforme a été obtenues pour $\zeta = 0.7$, et c'est pour des valeurs de ζ comprises entre 0.6 et 0.7 que le temps de transmission est le plus constant dans plage étendue de fréquence.

Un coefficient d'amortissement du capteur compris entre 0.6 et 0.7 afin d'assurer à la fois :

- une réponse en fréquence d'amplitude quasi-constante dans une bande
- relativement étendue.

- Une distorsion de phase réduite
- Un temps de réponse minimal

2.9 Linéarité

2.9.1 Conditions de linéarité

Un capteur est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande si sa sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande. Dans la plage de linéarité du capteur, le signal électrique tout au long de la chaîne est proportionnel à la variation du mesurande dès lors que les divers dispositifs associés au capteur (pont, amplificateurs) sont eux-mêmes linéaires ; il en résulte alors une plus grande simplicité dans le traitement du signal permettant d'accéder à la valeur numérique de la variation du mesurande. L'intérêt de la linéarité est tel que, lorsque le capteur n'est pas linéaire on se trouve amené à inclure dans la chaîne de mesure des dispositifs de correction dits de linéarisation dont le rôle est de rendre le signal proportionnel aux variations du mesurande [1].

En régime statique (voire le paragraphe 2.8.2), la linéarité est liée à l'existence d'une partie rectiligne sur la caractéristique statique et le fonctionnement du capteur demeure linéaire tant que les variations du mesurande sont limitées à cette zone. En régime dynamique (voire le paragraphe 2.8.3) la sensibilité, lorsque le mesurande varie à la fréquence f , a pour expression :

pour un système du premier ordre :

$$S(f) = S(0) \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (2.20)$$

pour un système du second ordre :

$$S(f) = S(0) \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (2.21)$$

La linéarité en régime dynamique implique donc :

- d'une part, la linéarité en régime statique : $S(0)$ indépendant de m ;
- d'autre part, que les paramètres déterminants de la réponse en fréquence f_c ou f_0 et ζ soient eux-mêmes indépendants de la valeur du mesurande dans la plage de valeurs où $S(0)$ est constant, ce qui est généralement le cas.

La première condition ne s'applique évidemment pas aux capteurs dont le fonctionnement n'est possible qu'en régime dynamique : microphone électrodynamique par exemple.

2.9.2 Régression linéaire

L'analyse de régression fournit une approche statistique qui permet de corrélérer des données expérimentales qui dépendent de plusieurs grandeurs mesurées.

Si on mesure une variable y qui décrit le comportement d'un processus et qui dépend de plusieurs variables $x_1, x_2 \dots x_n$ indépendantes ; la méthode des moindres carrés permet de relier par une droite des points dispersés :

$$Y_i = m x_i + b \text{ et } y_i = f(x_i) \quad (2.22)$$

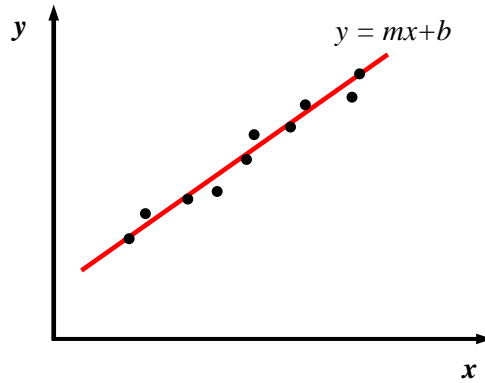


Figure 2.13 : régression linéaire.

Les paramètres m et b sont tels qu'ils minimisent l'écart entre le point et la droite :

$\Delta^2 = \sum (y_i - Y_i)^2$, en écrivant que $\frac{\partial \Delta^2}{\partial m} = 0$ et $\frac{\partial \Delta^2}{\partial b} = 0$ on obtient :

$$m = \frac{\sum x \sum y - n \sum xy}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \text{ et } b = \frac{\sum y - m \sum x}{n} = \frac{\sum x \sum xy - \sum x^2 \sum y}{(\sum x)^2 - \sum x^2} \quad (2.23)$$

La dispersion de y est une mesure de la corrélation : si la dispersion est faible l'analyse de régression est adaptée pour décrire la variation de y et si la dispersion est élevée l'analyse de régression n'est pas adaptée.

Le coefficient de corrélation $\rho^2 = 1 - \frac{n-1}{n-2} \frac{[y^2] - m[xy]}{[y^2]}$

avec :

$$[y^2] = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \text{ et } [xy] = \sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \quad (2.24)$$

Si $\rho^2 = 1$, x et y sont parfaitement corrélés ,

et si $\rho^2 = 0$, x et y ne sont pas corrélés.

Chapitre 3 **Circuit de Conditionnement d'un Capteur**

3.1 Introduction

Le signal électrique est l'un des éléments de base de chaque système électromécanique. Habituellement, le signal analogique est récupéré à la sortie des capteurs et possède en général.

Les caractéristiques suivantes:

- ✓ Amplitude faible, de l'ordre du millivolt;
- ✓ Bruits dus aux interférences électromagnétiques.

Ces problèmes peuvent être résolus et l'information désirée du signal peut être extraite en utilisant un traitement de signal approprié.

Le traitement du signal comprend :

- | | | |
|---------------------|------------------|-------------------|
| 1-Amplification ; | 4-Addition ; | 7-Filtrage ; |
| 2-Différentiation ; | 5-Soustraction ; | 8-Mise en forme ; |
| 3-Intégration ; | 6-Comparaison ; | 9-Numérisation. |

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 du signal électrique doit se ramener à une tension continue, seule grandeur matériellement prise en compte.

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.

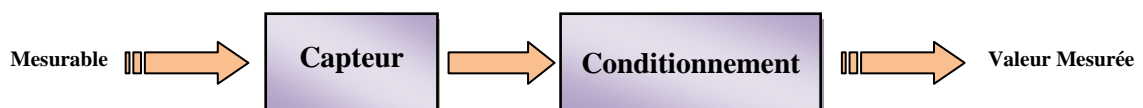


Figure 3.1: Schéma d'un système de mesure des grandeurs.

Les capteurs actifs : fournissent un signal électrique par définition même.

Les grandeurs usuelles sont :

- Tension généralement de quelques millivolts;
- Courant en μA ou mA ;
- Charge électrique.

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

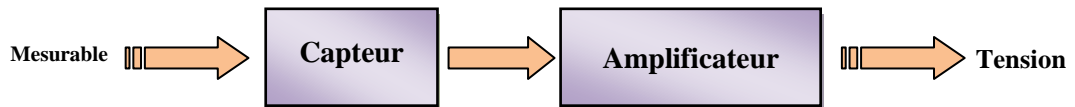


Figure 3.2: Schéma d'un capteur actif .

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...)

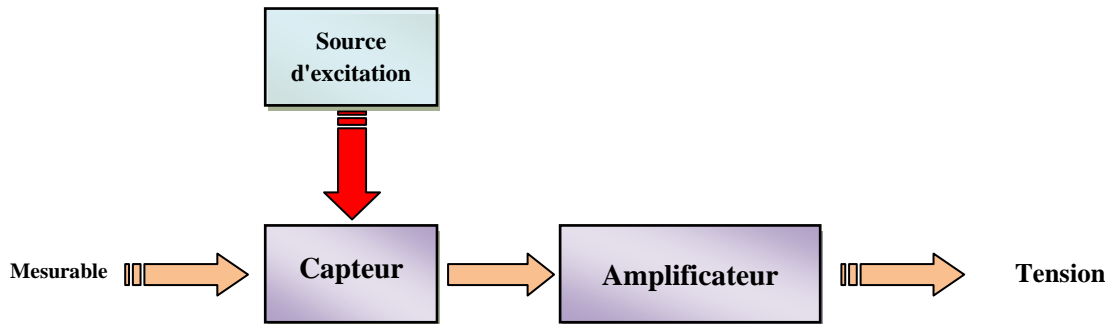


Figure 3.3: Schéma d'un capteur passif .

L'amplificateur opérationnel est la base du conditionneur.

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

3.2 Amplificateur opérationnel

3.2.1 Représentation symbolique

On a

$$V_s = A \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Avec :

A est le gain en tension

$$\varepsilon = V^+ - V^- \quad (3.2)$$

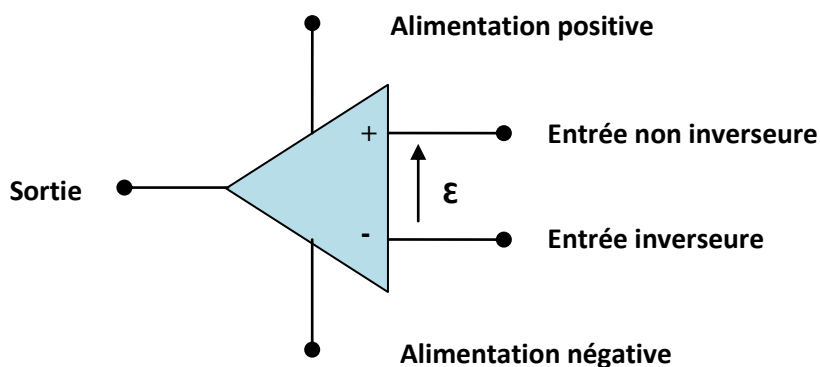


Figure 3.4: Schéma d'un Amplificateur opérationnel .

3.2.2 Fonction de transfert

Zone linéaire:

$$V_s = A(V^+ - V^-) = A \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

Zone de saturation:

$$V_s = +V_{cc} \text{ ou } V_s = -V_{cc} \quad (3.4)$$

Ampli-OP idéal : le gain A est infini

Ampli-OP réel : le gain A est très

grand de l'ordre de 10^5

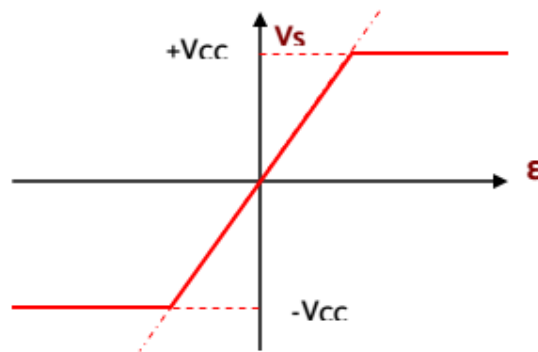


Figure 3.5: Caractéristique de transfert d'un amplificateur opérationnel.

3.2.3 Règles de simplification pour circuits avec Ampli-OP

✓ A la limite de saturation, on a:

$$V_s = \mp V_{cc} = A(V^+ - V^-) \rightarrow V^+ - V^- = \mp V_{cc}/A \quad (3.5)$$

AO idéal : $A = \text{l'infini}$ alors $V^+ - V^- = 0$ donc $V^+ = V^-$

AO idéal : $A = 10^5$ et $\mp V_{cc} = \pm 15V \rightarrow V^+ - V^- = \pm 0.15 \text{ mV}$

$$\rightarrow V^+ \approx V^-$$

$$V^+ - V^- \approx R_{in} \cdot i^+ \rightarrow i^+ = (V^+ - V^-)/R_{in} \quad (3.6)$$

AO idéal : $R_{in} = \text{l'infini}$ alors $i^+ = i^- = 0$

AO idéal : $R_{in} = 2M\Omega \rightarrow i^+ = i^- = 0.08 \cdot 10^{-8}$

$$\rightarrow i^+ \approx i^- \approx 0$$

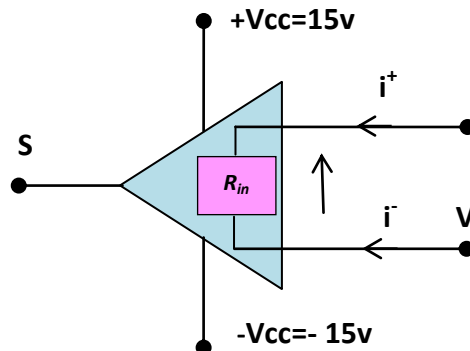


Figure 3.6: Schéma d'un simplification pour circuits avec Ampli-OP.

3.3 Amplification

3.3.1 Amplificateur inverseur

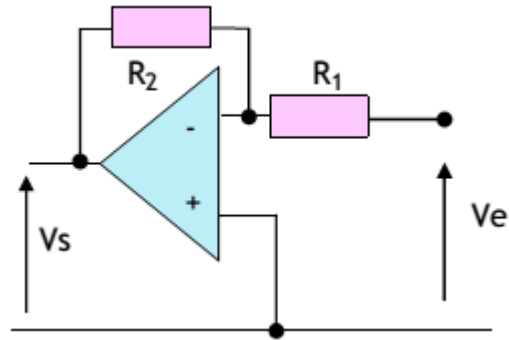


Figure 3.7: Schéma d'un Amplificateur inverseur.

$$V^+ = 0V \text{ et } V^- = \left(\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}\right) / \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad (3.7)$$

On a une réaction négative donc l'ampli opérationnel est en mode linéaire alors $V^+ = V^-$

$$\begin{aligned} \rightarrow 0 &= \left(\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}\right) / \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \\ \rightarrow 0 &= \left(\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}\right) \\ \rightarrow \frac{V_s}{R_2} &= -\frac{V_e}{R_1} \\ \rightarrow V_s &= -V_e \cdot \frac{R_2}{R_1} \\ \rightarrow AV &= -\frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

Exemple :

$$\begin{aligned} R_1 &= 1 \text{ K}\Omega \\ R_2 &= 100 \text{ K}\Omega \\ AV &= -\frac{R_2}{R_1} \\ AV &= -100 \end{aligned}$$

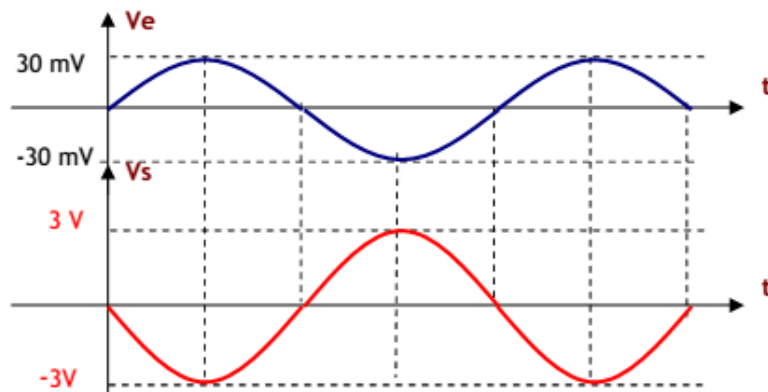


Figure 3.8: Caractéristique de transfert d'un Amplificateur inverseur.

3.3.2 Amplificateur non inverseur

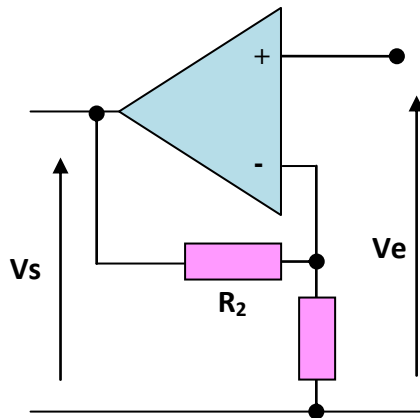


Figure 3.9: Schéma d'un Amplificateur non inverseur.

$$V^+ = V_e \text{ et } V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s \quad (3.8)$$

On a une réaction négative donc l'amplificateur opérationnel est en mode linéaire alors $V^+ = V^-$

$$\begin{aligned} \rightarrow V_e &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s \\ \rightarrow V_s &= V_e \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \\ \rightarrow V_s &= V_e \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \\ \rightarrow AV &= 1 + \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

Exemple :

$$\begin{aligned} R_1 &= 1K\Omega \\ R_2 &= 49K\Omega \\ AV &= 1 + \frac{R_2}{R_1} \\ AV &= 50 \end{aligned}$$

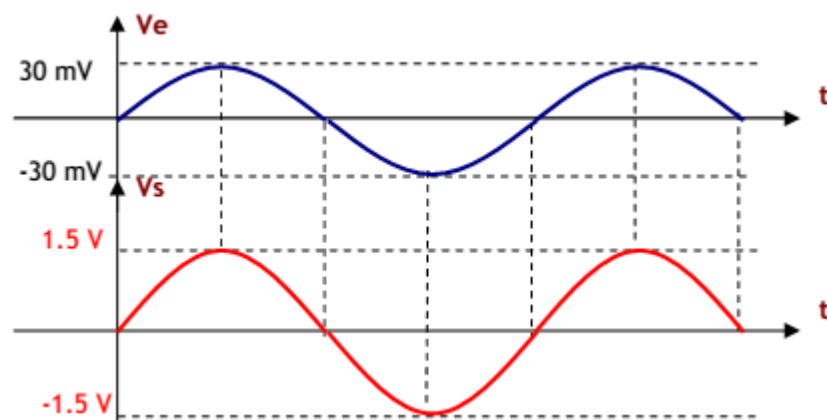


Figure 3.10: Caractéristique de transfert d'un Amplificateur non inverseur.

3.3.3 Suiveur

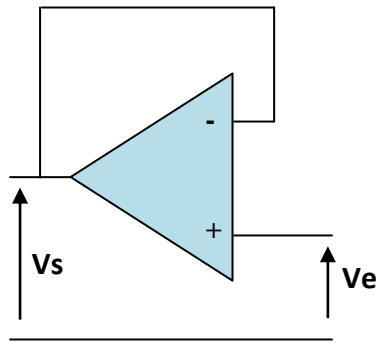


Figure 3.11: Schéma d'un Suiveur.

$$V^+ = V_e \text{ et } V^- = V_s \quad (3.9)$$

On a une réaction négative donc l'ampli opérationnel est en mode linéaire alors

$$V^+ = V^-$$

$$\rightarrow V_s = V_e$$

$$\rightarrow AV = 1$$

Exemple :

$$V_e = 2 \sin(2\pi \cdot t)$$

$$AV = 1$$

$$V_s = 2 \sin(2\pi \cdot t)$$

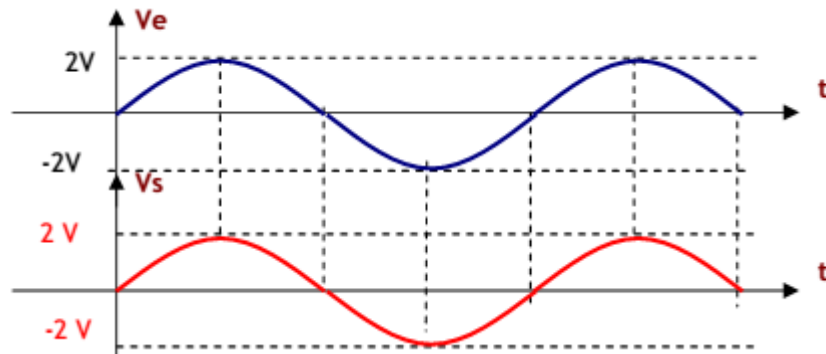


Figure 3.12: Caractéristique de transfert d'un Suiveur.

3.4 Montages opérationnels

3.4.1 Additionneur inverseur (mélangeur)

$$V^+ = 0V$$

$$V^- = \frac{\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_s}{R_2} + \frac{V_{e2}}{R_1}}{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

On a une réaction négative donc l'amplificateur opérationnel est en mode linéaire alors :

$$V^+ = V^-$$

$$\begin{aligned} \rightarrow 0 &= \frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_s}{R_2} + \frac{V_{e2}}{R_1} \\ &= \frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ \rightarrow 0 &= \frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_s}{R_2} + \frac{V_{e2}}{R_1} \\ \rightarrow 0 &= V_{e1} + V_{e2} + V_s \frac{R_1}{R_2} \\ \rightarrow V_s &= -(V_{e1} + V_{e2}) \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

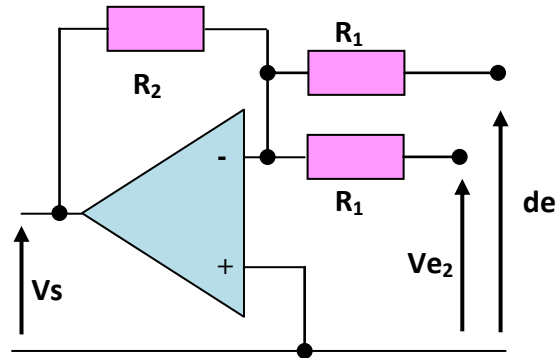


Figure 3.13: Schéma d'un Additionneur inverseur (mélangeur)

Exemple :

$$\begin{aligned} V_{e1} &= 2 \sin(2\pi \cdot t) \\ V_{e2} &= 3V \\ R_1 &= R_2 = 10k\Omega \\ V_s &= -(V_{e1} + V_{e2}) \\ V_s &= -(3 + 2 \sin(2\pi \cdot t)) \end{aligned}$$

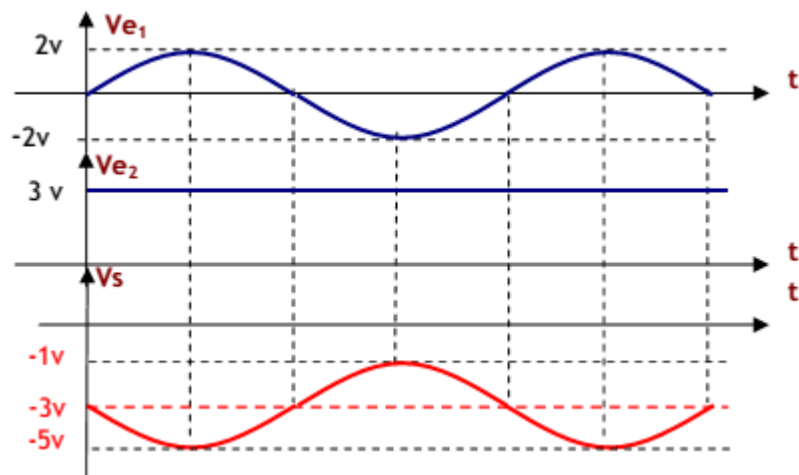


Figure 3.14: Caractéristique de transfert d'un Additionneur inverseur (mélangeur).

$$\begin{aligned} V^+ &= 0V \\ V^- &= \frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_s}{R_2} + \frac{V_{e2}}{R_1} \\ &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \end{aligned}$$

On a une réaction négative donc l'amplificateur opérationnel est en mode linéaire alors :

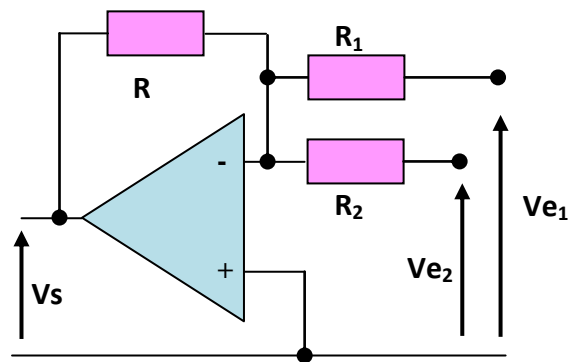


Figure 3.15: Schéma d'un Additionneur inverseur .

$$\begin{aligned}
 V^+ &= V^- \\
 \rightarrow 0 &= \frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_s}{R} + \frac{V_{e2}}{R_2} \\
 \rightarrow 0 &= \frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_s}{R} + \frac{V_{e2}}{R_1} \\
 \rightarrow 0 &= V_{e1} \frac{R}{R_1} + V_{e2} \frac{R}{R_2} + V_s \\
 \rightarrow V_s &= - \left(V_{e1} \frac{R}{R_1} + V_{e2} \frac{R}{R_2} \right)
 \end{aligned}$$

3.4.2 Soustracteur (différentiel)

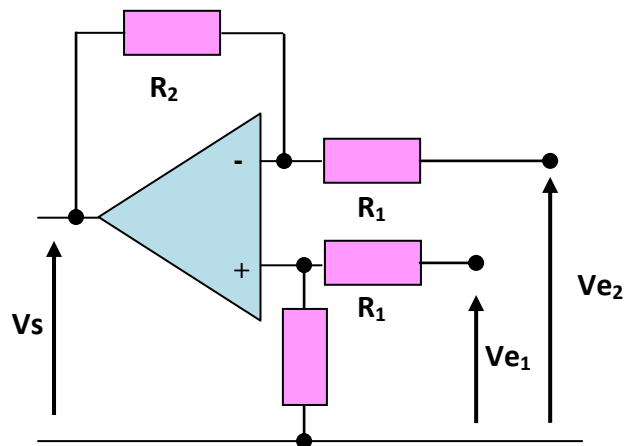


Figure 3.16: Schéma d'un Soustracteur (différentiel).

$$\begin{aligned}
 V^+ &= V_{e1} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \\
 V^- &= \frac{\frac{V_s}{R_2} + \frac{V_{e2}}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}
 \end{aligned}$$

On a une réaction négative donc l'amplificateur opérationnel est en mode linéaire, Alors:

$$\begin{aligned}
 V^+ &= V^- \\
 V_{e1} R_2 &= V_s R_1 + V_{e2} R_2 \\
 V_s R_1 &= V_{e1} R_2 - V_{e2} R_2 \\
 V_s R_1 &= (V_{e1} - V_{e2}) R_2 \\
 V_s &= (V_{e1} - V_{e2}) \frac{R_2}{R_1}
 \end{aligned}$$

Exemple :

$$\begin{aligned}
 V_{e1} &= 2 \sin(2\pi \cdot t) \\
 V_{e2} &= 3V \\
 R_1 &= R_2 = 10K\Omega \\
 V_s &= -(V_{e1} + V_{e2}) \\
 V_s &= 3 - 2 \sin(2\pi \cdot t)
 \end{aligned}$$

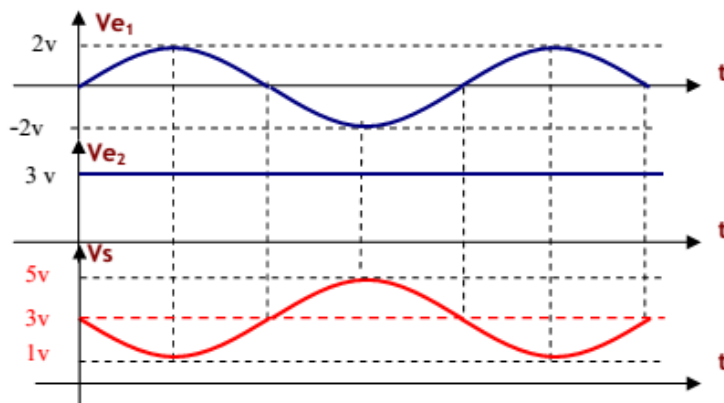


Figure 3.17: Caractéristique de transfert d'un Soustracteur (différentiel).

3.5 Autres montages

3.5.1 La conversion courant tension

L'entrée inverseuse de l'amplificateur est une masse virtuelle, la source de courant débite donc dans un court-circuit.

Ainsi la résistance de source n'intervient pas dans l'expression du gain.

$$V_s = -I_s R \tag{3.10}$$

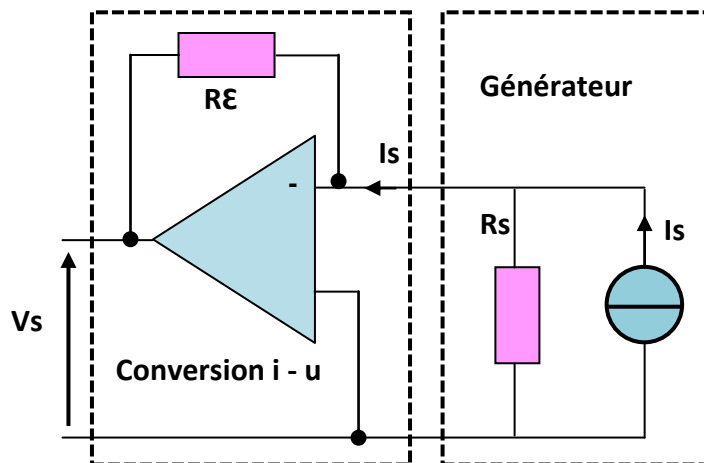


Figure 3.18: Montage de conversion courant tension.

3.5.2 Conversion tension courant

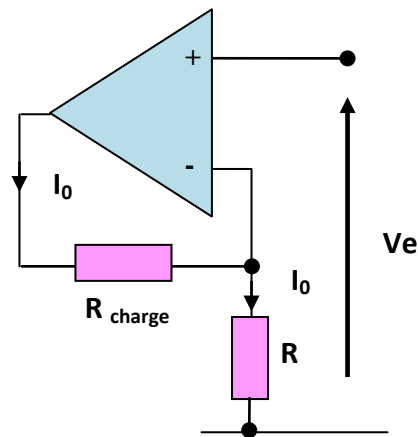


Figure 3.19: Schéma d'un Conversion tension courant.

Le courant de sortie est proportionnel à la tension d'entrée. Le courant dans R charge reste constant quelle que soit la valeur de la charge, jusqu'à la saturation de l'amplificateur opérationnel:

$$V^+ = V^- = V_e$$

$$I_0 = \frac{V_e}{R}$$

3.5.3 Amplificateur d'instrumentation

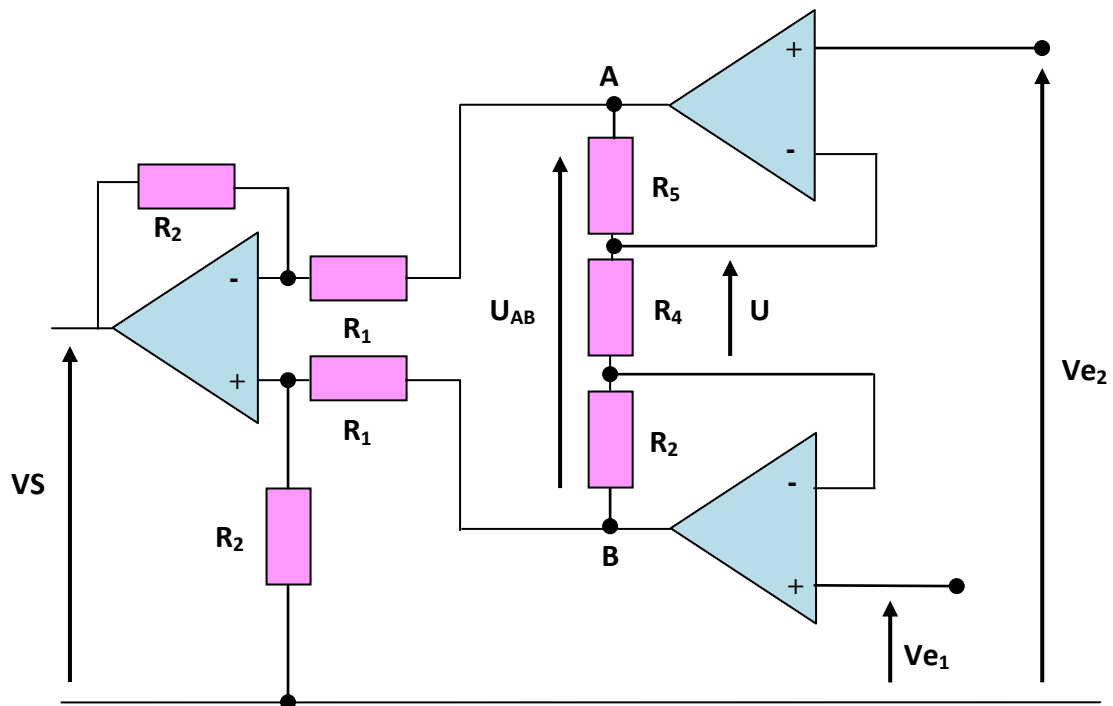


Figure 3.20: Montage d'un Amplificateur d'instrumentation.

On a une réaction négative donc tous les amplificateurs opérationnels travaillent en mode linéaire alors :

$$\begin{aligned}
 V^+ &= V^- \\
 U &= V_{e_1} - V_{e_2} \text{ et } U = \frac{U_{AB} R_4}{R_5 + R_4 + R_3} \\
 U_{AB} &= U \frac{(R_5 + R_4 + R_3)}{R_4} \\
 V_s &= -U_{AB} \frac{R_2}{R_1} \rightarrow V_s = -U(R_5 + R_4 + R_3) \frac{R_2}{R_4} R_1 \\
 V_s &= (V_{e_2} - V_{e_1})(R_5 + R_4 + R_3) \frac{R_2}{R_4} R_1
 \end{aligned}$$

3.6 Comparateur non inverseur

3.6.1 Fonctionnement

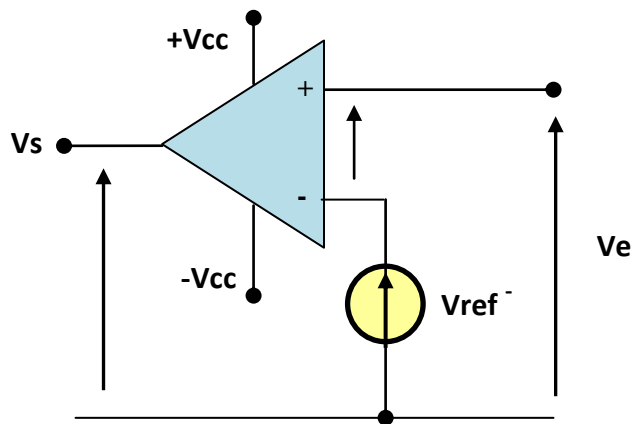


Figure 3.21: Schéma d'un Comparateur non inverseur.

- L'entrée inverseuse est prise comme référence.
- L'entrée non inverseuse est le signal d'entrée V_e

$$V_e > V_{e_{ref}} \rightarrow V^+ > V^- \text{ alors } \varepsilon > 0 \rightarrow V_s = +V_{cc}$$

$$V_e < V_{e_{ref}} \rightarrow V^+ < V^- \text{ alors } \varepsilon < 0 \rightarrow V_s = -V_{cc}$$

3.6.2 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e_{ref}} = 0$

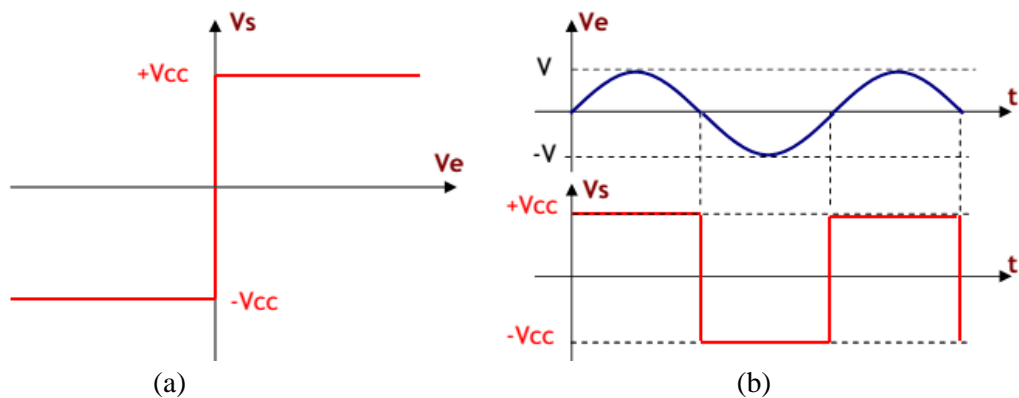


Figure 3.22: Caractéristique de (a) Fonction de transfert et (b) Chronogramme pour $V_e = V \sin(\omega t)$.

3.6.3 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e\text{ref}} \neq 0$

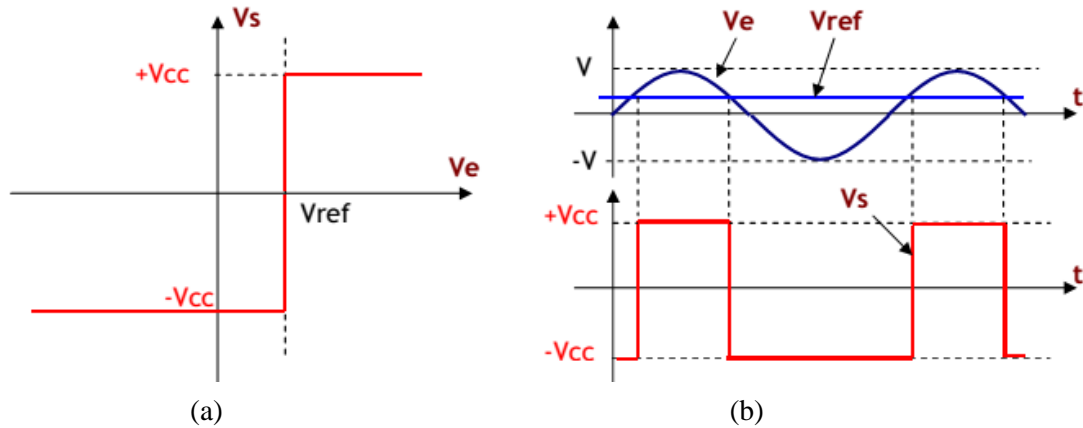


Figure 3.23: Caractéristique de (a) Fonction de transfert et (b) Chronogramme pour $V_e = V \sin(\omega t)$.

Remarque : La tension de référence permet de translater le point de basculement.

3.7 Comparateur inverseur

3.7.1 Fonctionnement

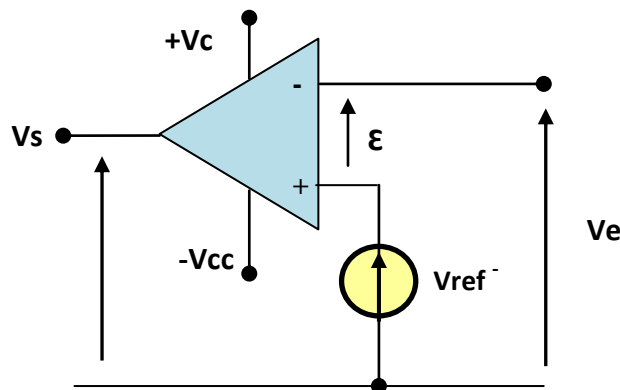


Figure 3.24: Schéma d'un Comparateur inverseur.

- L'entrée non inverseuse est prise comme référence.
- L'entrée inverseuse est le signal d'entrée V_e .

$$V_e > V_{e\text{ref}} \rightarrow V^+ < V^- \text{ alors } \epsilon < 0 \rightarrow V_s = -V_{cc} \quad (3.11)$$

$$V_e < V_{e\text{ref}} \rightarrow V^+ > V^- \text{ alors } \epsilon > 0 \rightarrow V_s = +V_{cc} \quad (3.12)$$

3.7.2 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e\text{ref}} = 0$

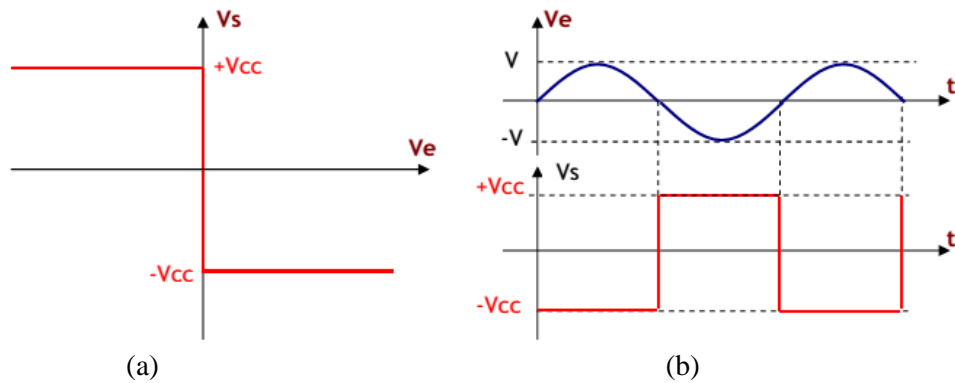


Figure 3.25: Caractéristique de (a) Fonction de transfert et (b) Chronogramme pour $V_e = V \sin(\omega t)$.

3.7.2 Chronogramme et fonction de transfert pour $V_{e\text{ref}} \neq 0$

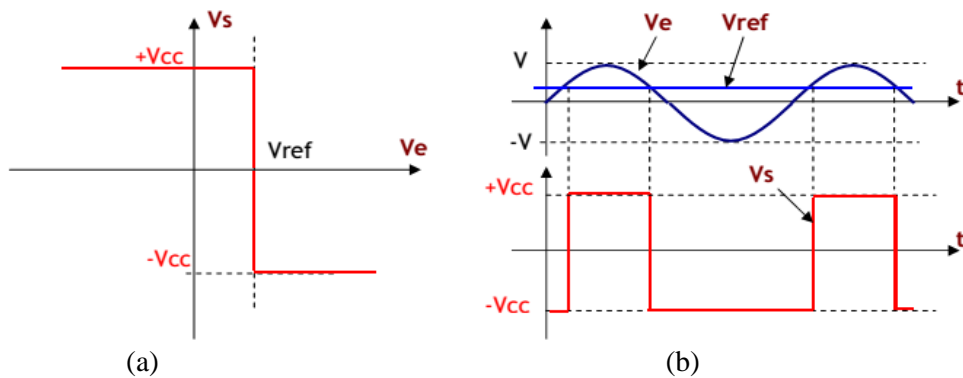


Figure 3.26: Caractéristique de (a) Fonction de transfert et (b) Chronogramme pour $V_e = V \sin(\omega t)$.

Remarque : La tension de référence permet de translater le point de basculement.

3.8 Conditionnement actif

2.8.1 Le capteur est une source de courant

L'étage de conditionnement est constitué par un convertisseur courant tension. Le courant de sortie du capteur est converti en courant par l'AOP de la figure 3.27. La tension en sortie du capteur étant faible (AOP parfait), il en résulte qu'aucun courant ne circule dans les éléments en parallèle du générateur de courant [3],[6].

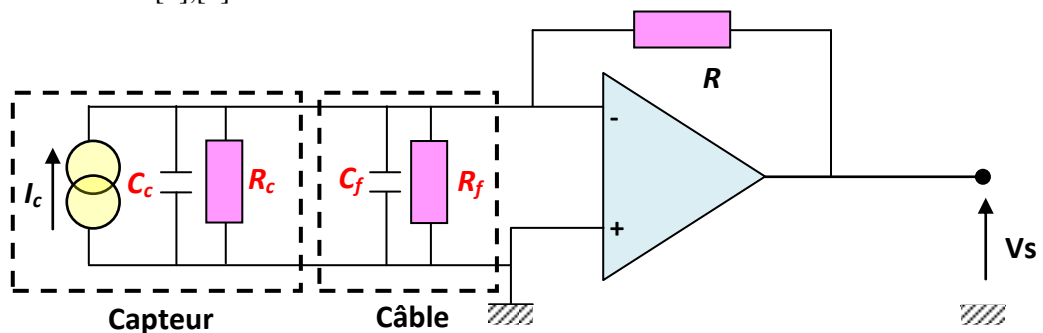


Figure 3.27: Conditionnement d'un capteur délivrant un courant.

3.8.2 Capteur est une source de charge

Comme dans le cas de l'étage de conditionnement à capteur équivalent à une source de courant, l'influence de l'impédance en parallèle du générateur de courant est rendue négligeable par un AOP imposant une tension quasi nulle sur son entrée. La résistance du montage de la figure 3.27 est remplacé par une capacité. Les charges délivrées par le capteur appariassent sous forme de courant i sont transférées dans la capacité C de la contre réaction de l'AOP. Le montage est dit convertisseur charge tension et son schéma de principe est représenté sur la figure 3.28 [3].

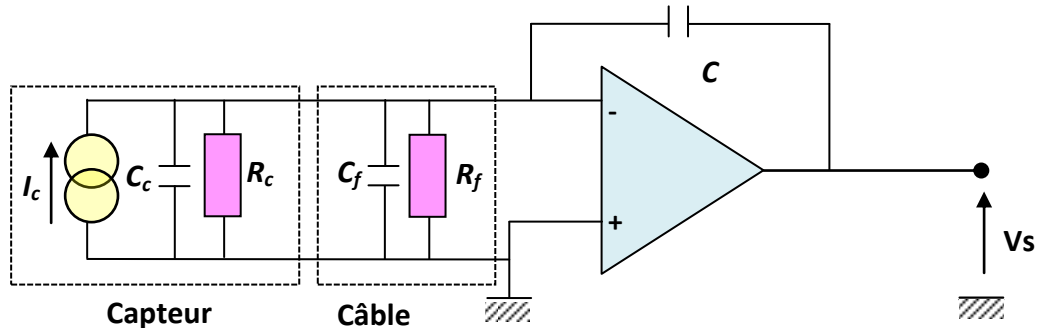


Figure 3.28 : Convertisseur charge tension.

Les charges q délivrées par le capteur sont traduites en tension.

$$i = C \frac{dV_s}{dt} \Rightarrow V_s = -\frac{i}{C} t = -\frac{q}{C} \quad (3.13)$$

3.9 Conditionneurs des capteurs passifs

Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association **Capteur + Conditionneur** qui détermine le signal électrique. De la constitution du conditionneur dépend un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sa **sensibilité**, sa **linéarité**, son insensibilité à certaines grandeurs d'influence [6].

Les types de conditionneurs les plus généralement utilisés sont:

- Le montage potentiométrique qui est l'association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non du même type. C'est un montage simple, dont l'inconvénient majeur est sa sensibilité aux parasites.
- Le pont d'impédances dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur et/ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance. C'est donc un double potentiomètre. Le caractère différentiel de la mesure permet de réduire de façon importante l'influence des parasites.
- Le circuit oscillant où est inclus l'impédance du capteur qui en fixe la fréquence.
- L'amplificateur opérationnel dont le gain sera déterminé par l'impédance du capteur.

3.9.1 Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs

a) Principaux types de conditionneurs

Les variations, de l'impédance Z_c d'un capteur passif, liées aux évolutions du mesurandé 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_c constituant alors le conditionnement du capteur.

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

- ✓ soit sur l'amplitude du signal de mesure $V_m = e_s \cdot f(Z_k, Z_c)$ ou $i_m = i_s \cdot f(Z_k, Z_c)$, c'est le cas des montages potentiométriques et des ponts.
- ✓ soit sur la fréquence du signal de mesure $F_m = g(Z_k, Z_c)$, il s'agit alors d'oscillateurs.

Lorsque avec ces conditionneurs, on utilise une source de tension e_s sinusoïdale, le signal de mesure résulte d'une modulation d'amplitude de la source e_s par les variations de Z_c . Pour retrouver l'information, il faut alors démoduler puis filtrer le signal de mesure. Pour que cela soit réalisable, il faut que la fréquence de la source soit supérieure à cinq fois la fréquence maximale des variations du mesurande.

A: Montage potentiométrique

Mesure des résistances : le capteur de résistance R_c en série avec une résistance R_1 est alimenté par une source de tension de résistance R_s . la tension V_m est mesurée aux bornes du capteur par un appareil de mesure de résistance d'entrée R_d .

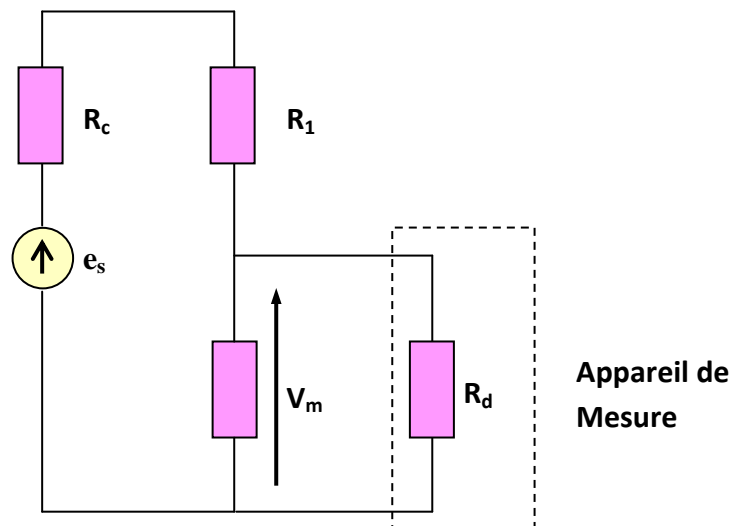


Figure 3.29: Montage potentiométrique.

La tension V_m s'écrit :

$$V_m = \frac{R_c R_d}{R_c(R_s + R_1) + R_c(R_s + R_1 + R_c)} e_s \quad (3.14)$$

La tension aux bornes du capteur est indépendante de l'appareil de mesure à condition que sa résistance d'entrée R_d soit grande devant celle du capteur R_c , dans ce cas :

$$V_m = \frac{R_c}{R_s + R_1 + R_c} e_s \quad \text{si} \quad R_d \gg R_c \quad (3.15)$$

Hormis le cas idéal où $R_s + R_1 \gg R_c$, la tension V_m n'est pas linéaire vis à vis de R_c : on va donc chercher à linéariser.

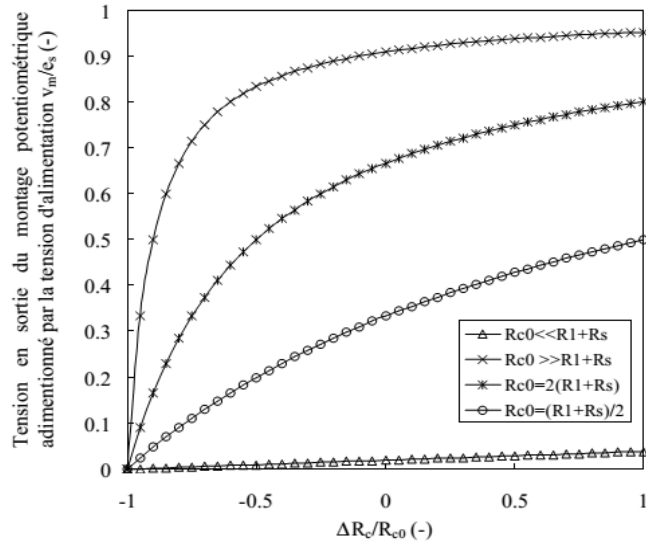


Figure 3.30 : Représentation du déséquilibre du pont en fonction de la variation relative de l'une de ses résistances (R_c).

A linéarisation de la mesure afin d'obtenir ΔV_m proportionnel à ΔR_c .

- **Solution n°1 : Fonctionnement en "petits signaux"**

Pour une variation de la mesure onde de $m_0 \rightarrow m_0 + \Delta m$, la résistance du capteur varie de $R_{c0} \rightarrow R_{c0} + \Delta R_c$ et la variation de la tension mesurée V_m peut elle aussi s'écrire sous la forme : $V_m \rightarrow V_{m0} + \Delta V_m$

$$V_m = e_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_{c0} + R_1 + R_s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{R_{c0} + R_1 + R_s}} \quad (3.16)$$

A condition que les variations du capteur soient négligeables devant les autres résistances du circuit, c'est à dire $\Delta R_c \ll R_{c0} + R_1 + R_s$, on peut alors considérer la variation de tension correspondant linéaire :

$$V_m = e_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_{c0} + R_1 + R_s} \quad (3.17)$$

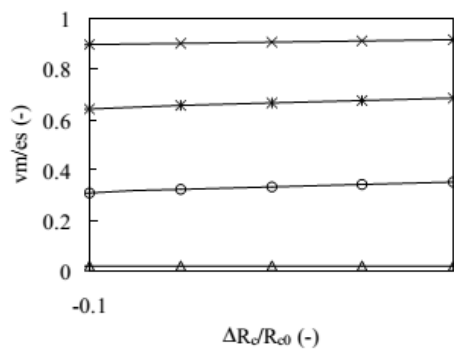


Figure 3.31 : Zoom représentation du déséquilibre du pont en fonction de la variation relative de l'une de ses résistances (R_c) et son agrandissement au voisinage de l'équilibre.

Avec $V_m = e_s \frac{(R_1+R_s)\Delta R_c}{(R_{c0}+R_1+R_s)^2}$ Dans ces conditions, la sensibilité du montage potentiométrique est Maximale si on choisit $R_{c0} = R_1 + R_s$ alors, $\Delta V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}}$.

- **Solution n°2 : Alimentation par une source de courant**

Le montage est alimenté par une source de courant, ayant une impédance interne très élevée

$$R_s \gg R_{c0} + R_1$$

Dans ce cas, la linéarisation est immédiate puisque:

$$\Delta V_m = i_s \cdot \Delta R_c \quad (3.18)$$

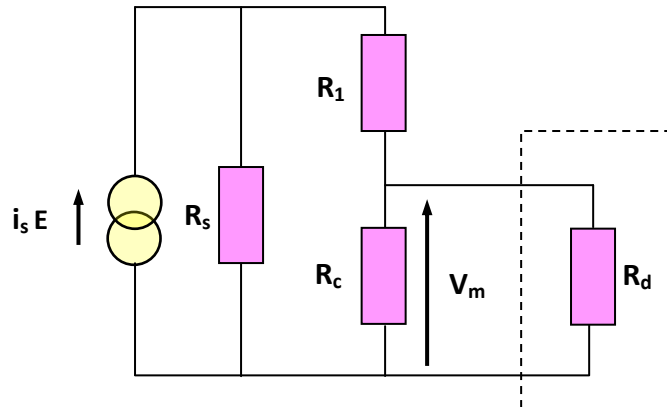


Figure 3.32 : Mesure de la tension aux bornes d'un capteur résistif dans un montage potentiométrique.

- **Solution n°3 : Montage Push Pull**

On remplace le capteur fixe R_1 par un second capteur, identique au premier mais dont variations sont de signe contraire $R_1 = R_{c0} - \Delta R_c$ Cette association de deux capteurs fonctionnant en opposition est dite **push-pull**. C'est le cas, par exemple de deux jauges d'extensomètre identiques subissant des déformations égales mais de signes contraires. On a alors :

$$\Delta R_c = -\Delta R_1 \quad (3.19)$$

$$V_m = V_{m0} + \Delta V_m = \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_{c0} + \Delta R_c + R_s + R_{c0} - \Delta R_c} e_s \quad (3.20)$$

soit:

$$\Delta V_m = \frac{\Delta R_c}{2R_{c0} + R_s} e_s \quad (3.21)$$

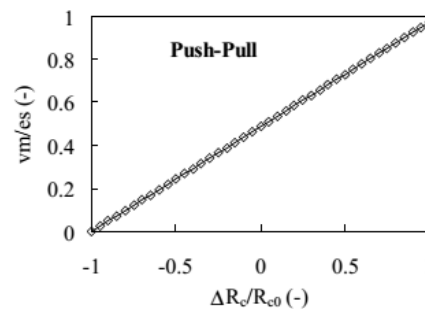


Figure 3.33 : Caractéristique d'un Montage Push Pull.

Avec ce montage, on a une sensibilité doublée par rapport à celle obtenue en fonctionnement en petits signaux (si $R_s \ll R_c$) et une variation de tension linéaire avec ΔR_c .

B: Compensation des grandeurs d'influence à l'aide d'un montage push-pull

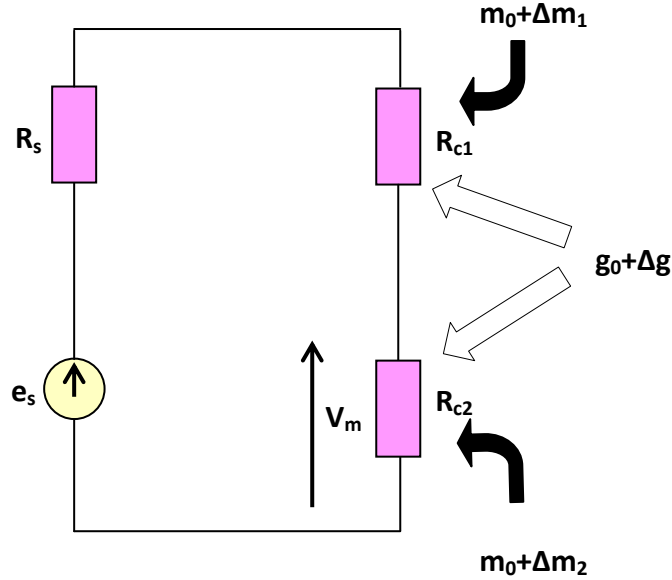


Figure 3.34 : Réalisation du montage potentiométrique pour fonctionnement en push-pull.

La situation initiale prise comme origine des variations correspond à :

$$m = m_0 \quad , \quad g = g_0 \quad (3.22)$$

$$R_{c1} = R_{c2} = R_{c0} \quad V_m = V_{m0} = \frac{e_s}{2} \quad (3.14)$$

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

$$R_{c1} = R_{c0} + \Delta R_{c1} \quad \Delta R_{c1} = S_g \Delta g + S \Delta m_1 \quad (3.23)$$

$$R_{c2} = R_{c0} + \Delta R_{c2} \quad \Delta R_{c2} = S_g \Delta g + S \Delta m_2 \quad (3.24)$$

avec : $S_g = \frac{\Delta R_c}{\Delta g}$ la sensibilité de chacun de ces capteurs à la grandeur d'influence et $S = \frac{\Delta R_s}{\Delta m}$ leur sensibilité au mesurande .

En supposant que l'impédance interne du générateur de tension $R_s \ll R_{c0}$, la variation de tension peut s'écrire $\Delta V_m = \frac{e_s}{4R_{c0}} \cdot \frac{\Delta R_{c2} - \Delta R_{c1}}{1 + \frac{\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2}}{2R_{c0}}}$. Ce qui nous amène à distinguer les deux cas suivants :

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

$$\Delta V_{m1} = 0 \Rightarrow \Delta R_{c1} = S_g \Delta g \quad \Rightarrow \quad \Delta V_m = \frac{e_s}{4R_{c0}} \cdot \frac{S \Delta m_2}{1 + \frac{S_g \Delta g}{R_{c0}}} \quad \text{si} \quad S \Delta m_2 \ll R_{c0}$$

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

$$\Delta V_m = \Delta V_{m2} = -\Delta V_{m1} \quad \Rightarrow \quad \Delta V_m = \frac{e_s}{2R_{c0}} \cdot \frac{S \Delta m}{1 + \frac{S_g \Delta g}{R_{c0}}}$$

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 de noter que la sensibilité du montage $S_a = \frac{\Delta V_m}{\Delta m}$ dépend elle de la grandeur d'influence par le terme $\frac{S_g \Delta g}{R_{c0}}$.

C: Elimination de la composante de la tension de mesure

Avec la méthode potentiométrique, la variation de tension ΔV_m qui porte l'information est superposée à une tension Δm_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 :

$V_{m0} = 4V$ et $\Delta V_m = 5mV$, il est très difficile de faire une lecture précise de ΔV_m sur le calibre 6 V du voltmètre.

- **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 :

$$V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{R_c - R_1}{R_c + R_1 + R_s} \tag{3.25}$$

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

$$V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{2R_{c0}}} \tag{3.26}$$

Lorsque le capteur varie $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$

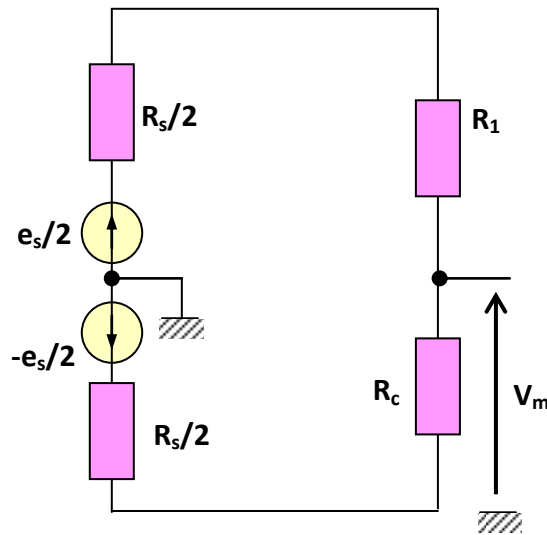


Figure 3.35 : Montage potentiométrique avec alimentation symétrique.

- **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 la plus à la fréquence la plus basse du phénomène étudié.

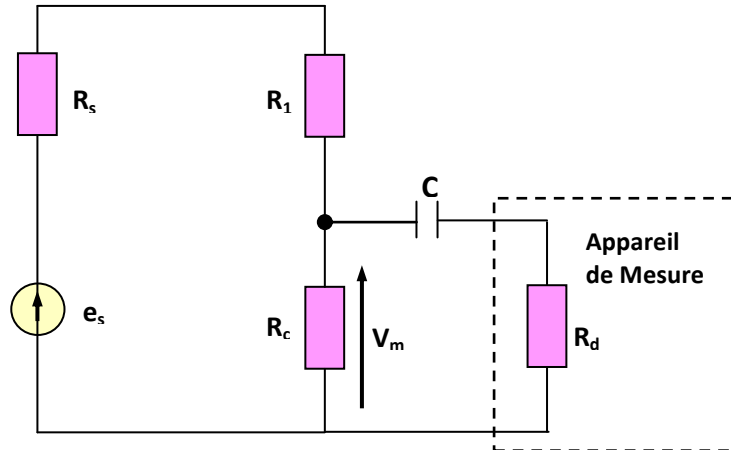


Figure 3.36 : Montage potentiométrique : élimination de la composante permanente.

Mesure des impédances complexes

Il s'agit dans ce cas, soit de capteurs inductifs (de position ou de déplacement), soit capteurs capacitifs (de niveau ou de proximité). Le capteur d'impédance $Z_c = R_c + jX_c$ est en série avec impédance $Z_1 = R_1 + jX_1$, l'ensemble étant alimenté par une source sinusoïdale d'impédance interne supposée négligeable. L'impédance du capteur varie de Z_{c0} à $Z_{c0} + \Delta Z_c$ lorsque le mesurande m varie.

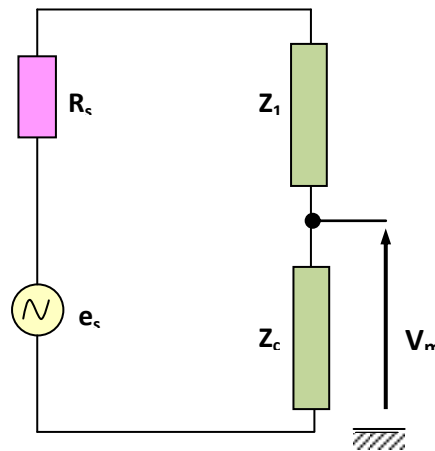


Figure 3.37 : Montages potentiométriques à 2 impédances de même type (schéma de principe).

Selon la nature de l'impédance Z_1 , il y a lieu distinguer 3 cas :

•Cas n°1 : $X_1 = 0$ Z_1 est une résistance fixe R_1 .

La tension aux bornes de Z_1 varie de ΔV_m pour une variation d'impédance ΔZ_c dont l'expression est :

$$\Delta V_m = e_s \cdot \frac{R_1}{(Z_{c0} + R_1)^2} \cdot \frac{Z_c}{1 + \frac{\Delta Z_c}{Z_{c0} + R_1}} . \text{ En choisissant } R_1 \gg |Z_{c0}| , \text{ l'expression de } \Delta V_m \text{ se simplifie en}$$

$\Delta V_m = e_s \cdot \frac{\Delta Z_c}{R_1}$. L'impédance Z_c est alimentée a constant $i = \frac{e_s}{R_1}$. Une solution de même type consiste à remplacer la source de tension e_s par une source de courant i_s ce que permet alors de supprimer la résistance R_1 . La variation de la tension de mesure est alors

$$\Delta V_m = i_s \cdot \Delta Z_c .$$

•Cas n°2 : X_1 et X_2 sont de même signe

L'intérêt, qu'il y a à utiliser deux impédances de même type. Réside dans les possibilités qu'offre le montage lorsqu'on les choisit identiques, afin par exemple de compenser les grandeurs d'influence et d'améliorer la linéarité du montage.

La tension de mesure a pour valeur:

$$V_m = e_s \cdot \frac{Z_{c0} + \Delta Z_c}{2Z_{c0} + \Delta Z_1 + \Delta Z_c} \quad (3.27)$$

et sa variation par rapport à sa valeur initiale, $V_m = \frac{e_s}{2}$ est $\Delta V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta Z_c - Z_1}{Z_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta Z_1 + \Delta Z_c}{2Z_{c0}}}$

- ❖ Si Z_1 n'a qu'un rôle de compensation de la grandeur d'influence : Alors $\Delta Z_1 = \Delta S_g \Delta g$ et l'expression de ΔV_m devient $\Delta V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{S \Delta m}{Z_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\Delta S_g \Delta g + S \Delta m}{2Z_{c0}}}$. Donc lorsque $S_g \Delta g$ et $S \Delta g \ll Z_{c0}$,

on a $\Delta V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{S \Delta m}{Z_{c0}}$ Au second ordre près.

- ❖ Si Z_1 est sensible au mesurande et disposé pour subir des variations opposées à celles de Z_c alors $\Delta Z_c = -S \Delta m + S_g \Delta g$ et ΔV_m devient $\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{S \Delta m}{Z_c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\Delta S_g \Delta g}{Z_c}}$ donc linéaire en fonction de Δm .

Lorsque $S_g \Delta g \ll Z_{c0}$, l'expression se simplifie encore $\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{S \Delta m}{Z_c}$

Ce type de montage potentiométrique est utilisable lorsque les deux impédances sont inductives, par exemple dans le cas de capteurs de position à noyau mobile ou de proximité à courant de Foucault. Par contre dans le cas d'impédances capacitives, le montage potentiométrique pose problème du fait de la présence de **capacités parasites** que chacune des armatures de chaque condensateur forment avec la masse. On constate en effet que les capacités C_{p2} et C_{p3} sont parallèle sur le capteur C_c et leurs variations sont indiscernable de celle du capteur. C'est pourquoi, plutôt qu'un montage potentiométrique, on préfère généralement utiliser un montage galvanométrique dans lequel la mesure porte sur un courant, mesuré à l'aide d'un appareil de très faible résistance d'entrée.

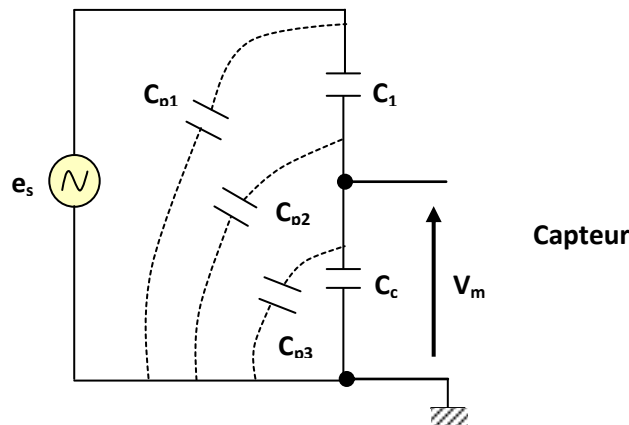


Figure 3.38 : Comparaison de l'influence des capacités parasites dans les montages potentiométrique et galvanométrique (montage potentiométrique).

• Cas n°3 : X_1 et X_c sont de signes contraires

Ci-contre, $Z_c = R_c + jX_c$ est l'impédance d'un capteur inductif et X_1

celle d'un condensateur variable. La tension mesurée aux bornes de C_1 s'écrit :

$$V_m = e_s \cdot \frac{-j}{C_1 \omega} \cdot \frac{1}{RC + j(L_c \omega - \frac{1}{C_1 \omega})} \quad (3.28)$$

Le condensateur variable C_1 est réglé afin d'obtenir pour V_m l'amplitude maximale

$$V_{m_{max}} = \frac{E_s}{R_c C_1 \omega}, \text{ on en déduit que } L_c = \frac{1}{C_1 \omega^2}.$$

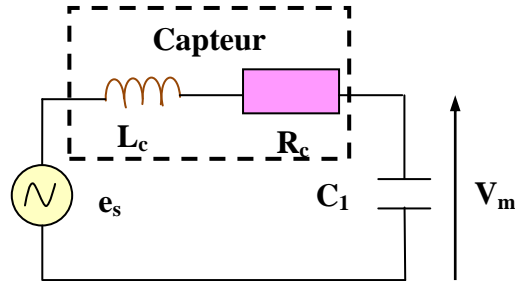


Figure 3.39: Circuits résonnants conditionneurs de capteurs inductifs (montage série élémentaire) .

b) Inconvénients du montage potentiométrique

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.

- *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 $e_s = e_{s0} + \Delta e_s$, alors la variation de tension mesurée a pour expression si l'hypothèse $\Delta R_c \ll R_{c0}$ est respectée :

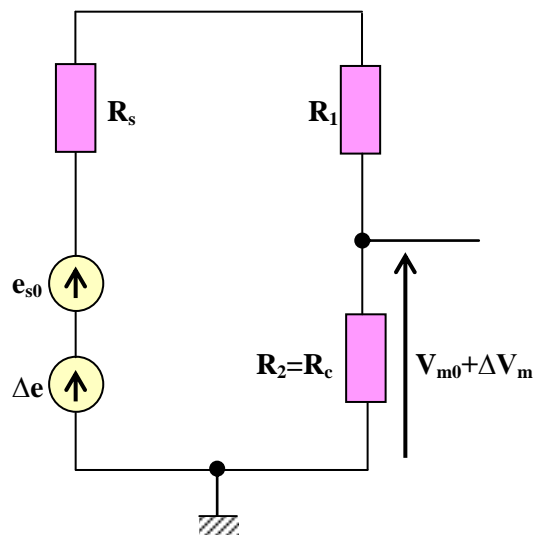


Figure 3.40 : Influence des dérives de la source ou des parasites dans le montage potentiométrique (alimentation dissymétrique).

$$\Delta V_m = e_{s0} \cdot \frac{(R_s + R_1) \cdot \Delta R_c}{(R_1 + R_s + R_{c0})^2} + \Delta e \cdot \frac{R_{c0}}{R_1 + R_s + R_{c0}} \quad (3.29)$$

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

- **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 :

$$\Delta V_m = \frac{e}{2} \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} + \frac{\Delta e_1 + \Delta e_2}{2} \quad (3.30)$$

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 .

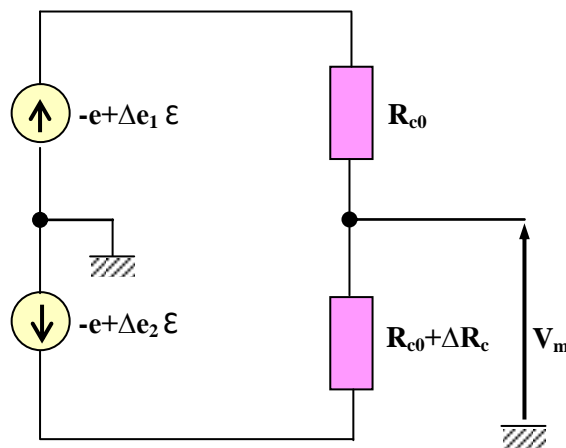


Figure 3.41 : Influence des dérives de la source ou des parasites dans le montage potentiométrique (alimentation symétrique).

3.10 Conditionneurs du signal

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 cette partie, on va donc aborder un certain nombre de dispositifs de traitement des conditionneurs du signal dont la fonction est en rapport direct avec la nature du signal et avec les conditions de mesure. On va s'intéresser :

- au type d'interface adéquate entre la source du signal et le reste de la chaîne de mesure selon que cette source est un générateur de tension, de courant ou de charge,
- à la linéarisation du signal,
- à l'amplification du signal en présence de tension de mode commun,
- à l'extraction de l'information relative au mesurande lorsque ses variations modulent le signal électrique.

3.10.1 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-vis de variations éventuelles de l'impédance interne, le générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée.

a) Adaptation d'impédance

Lorsque l'information correspondant au mesurande m est délivrée sous la forme d'une *f.e.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.

$$V_m = e_c(m) \cdot \frac{Z_i}{Z_i + Z_c} \quad \text{si } Z_i \gg Z_c \text{ alors } V_m = e_c(m) \quad (3.31)$$

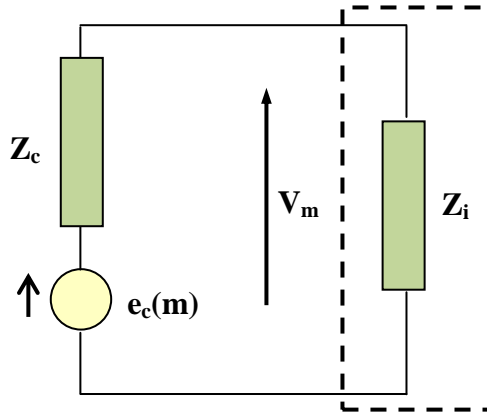


Figure 3.42 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension (schéma électrique équivalent).

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,

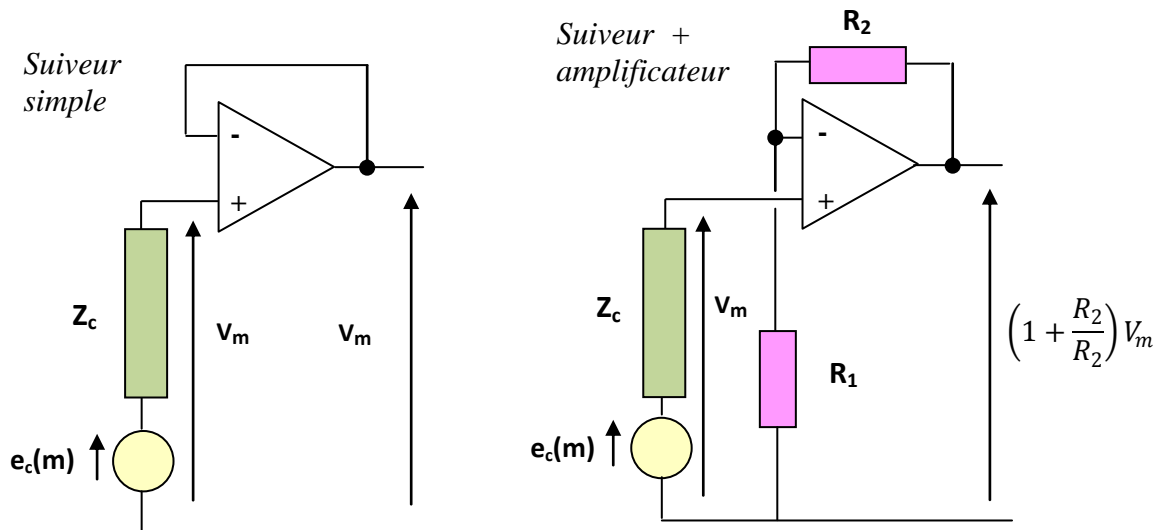


Figure 3.43 : Montage suiveur; montage non-inverseur .

- d'amplificateur différentiel, en général sous la forme d'ampli d'instrumentation ou d'ampli d'isolement qui seront abordés aux paragraphes 3.10.3.1 et 3.10.3.2.

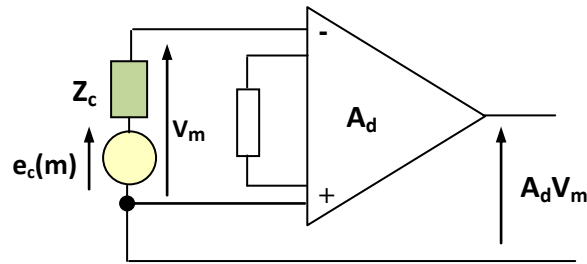


Figure 3.44 : Amplificateur d'instrumentation.

b) Conditionneur de capteur source de courant

Quand le capteur est électriquement équivalent à une source de courant $i_c(m)$ en parallèle avec une impédance interne Z_c , il faut que l'impédance d'entrée du dispositif de mesure Z_i soit négligeable devant celle du capteur Z_c .

$$i_m = i_c(m) \cdot \frac{Z_c}{Z_i + Z_c} \quad \text{si } Z_i \ll Z_c \text{ alors } i_m = i_c(m) \quad (3.32)$$

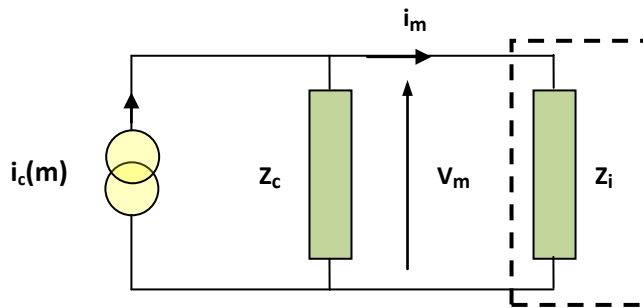


Figure 3.45 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de courant (schéma équivalent).

Cependant, la tension V_m aux bornes de Z_i risque dans ce cas d'être elle-même très faible. L'emploi d'un convertisseur courant/tension permet à la fois de réduire l'influence de Z_c et d'obtenir une tension V_m importante.

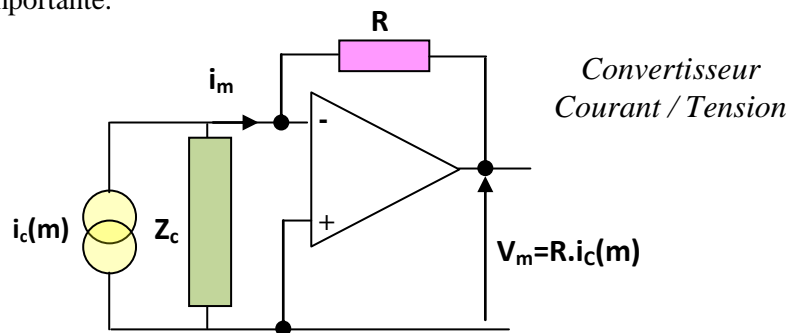


Figure 3.46 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de courant (convertisseur courant tension.)

c) Conditionneur de capteur source de charge

Dans le cas, enfin, où le capteur est un générateur de charge $q_c(m)$ d'impédance interne capacitive C_c , il est en général impossible de placer à ses bornes un circuit dont l'impédance d'entrée serait résistive. En effet, d'une part la décharge de la capacité risquerait d'être trop rapide pour permettre

l'exploitation du signal et d'autre part la tension recueillie qui dépend de l'ensemble des capacités parasites du montage serait sensible à leurs variations erratiques.

Le dispositif à utiliser dans ce cas est l'**amplificateur de charge** qui délivre une tension proportionnelle à la charge et indépendante de la capacité du capteur et des câbles de liaison.

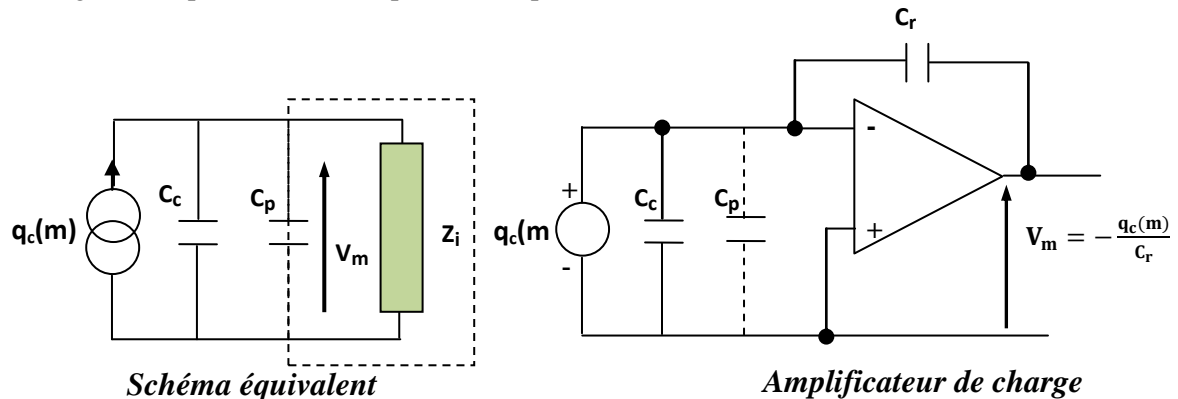


Figure 3.47: Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de charge .

3.10.2 Linéarisation

Il existe un certain nombre de procédés de linéarisation qui permettent de corriger les défauts de linéarité d'un capteur ou de son conditionneur, lorsque dans leur domaine d'emploi des écarts à la linéarité interdisent de considérer la sensibilité comme constante à la précision des mesures. Ces procédés peuvent être classés en deux groupes [6] :

- D'une part ceux qui interviennent sur la source même du signal électrique de façon à linéariser ce dernier dès son origine,
- D'autre part, ceux qui interviennent en aval de la source afin de corriger la non linéarité du signal qu'elle fournit par un traitement analogique ou numérique.

a) Linéarisation analogique à la source du signal

1°) Correction de la non linéarité du capteur

- **Pré-polarisation du capteur**

Lorsque la courbe d'étalonnage du capteur présente une plage où le fonctionnement est quasi linéaire, il peut être possible dans certains cas de décaler le point de fonctionnement dans la zone linéaire en appliquant au capteur un mesurande constant de valeur appropriée. Cette méthode n'est applicable que dans les cas où l'information recherchée est liée aux seules variations du mesurande et est indépendante de la valeur constante à laquelle elles sont superposées.

Exemple : un flux lumineux modulé $\Phi_1(t)$ reçu par un phototransistor peut être superposé à un flux constant Φ_0 , choisi pour être dans une zone linéaire.

- **Modification de l'impédance mesurée par adjonction de composants fixes**

La méthode consiste à placer en parallèle sur le capteur de résistance $R_c(m)$, une résistance R indépendante de m , afin que la résistance R_d du dipôle ainsi constitué ait une variation quasi linéaire dans une plage limitée autour d'une valeur donnée du mesurande. Cette méthode est très utilisée avec les thermistances.

- **Association de capteurs dont les non linéarités sont de sens contraire**

A titre d'illustration, on considère le cas de deux capteurs résistifs sensibles à un même mesurande m mais réalisés dans des matériaux différents et tels que leurs résistances aient respectivement pour expression

$$R_1(m) = R_{01}(1 + A_1m + B_1m^2) \quad R_2(m) = R_{01}(1 + A_2m - B_2m^2) \quad (3.33)$$

L'association en série de ces deux capteurs présentera une résistance variant linéairement en fonction de m :

$$R_1(m) = (R_{01} + R_{02}) \left(1 + \frac{R_{01}A_1 + R_{02}A_2}{R_{01} + R_{02}} \cdot m \right) \quad (3.34)$$

à condition que $\frac{R_{01}}{R_{02}} = \frac{B_2}{B_1}$

Cette méthode est très utilisée avec les sondes métalliques de température.

- **Fonctionnement en push-pull de capteur identiques**

Deux capteurs identiques, dont la linéarité est due à un terme quadratique, sont placés dans les branches contiguës d'un pont et soumis à des variations égales et opposées du mesurande. Le terme quadratique est éliminé de la tension de mesure qui est alors proportionnelle aux variations du mesurande.

2*) Correction de la linéarité du conditionneur de capteur passif

il y a non linéarité du conditionneur lorsque la tension de mesure n'est pas proportionnelle aux variations d'impédance du capteur. Ceci risque de se produire dans les montages potentiométriques et les ponts dès lors que la condition $\frac{\Delta Z_c}{Z_{c0}} \ll 1$ n'est pas satisfaite. On a vu que certaines méthodes push-pull et choix du rapport potentiométrique rendaient la linéarisation possible. A ces méthodes, on peut ajouter divers montages dans lesquels le conditionneur est associé un ampli opérationnel.

- **Linéarisation par réaction sur la tension de déséquilibre du pont**

Le capteur R_c est placé dans la boucle de réaction de l'amplificateur. A l'équilibre $R_1 + R_3 + R_4 + R_{c0}$ avec $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$, la tension de déséquilibre s'écrit $V_m = V_A - V_B$ où $V_B = \frac{e_s}{2}$ et $V_A = e_s \cdot \frac{R_c}{R_{c0} + R_c} + V_m \cdot \frac{R_{c0}}{R_{c0} + R_c}$ l'amplificateur est supposé idéal donc $V_A = V_B$, ce qui permet d'écrire:

$$V_m = -\frac{e_s}{2} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \quad (3.35)$$

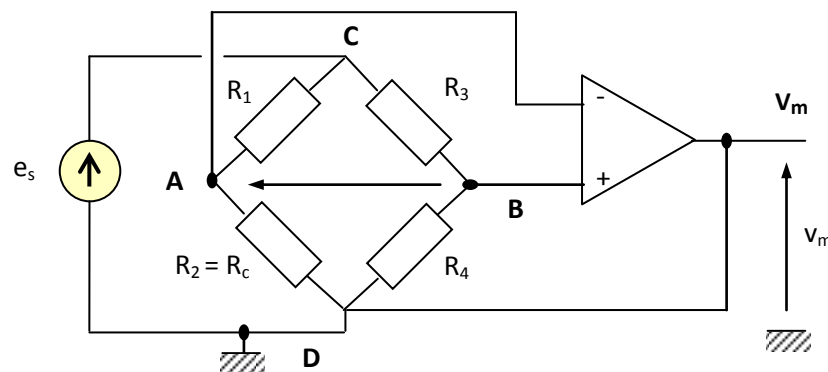


Figure 3.48 : Linéarisation du pont de Wheatstone par réaction sur la tension de déséquilibre.

Dans ce montage, le capteur doit être isolé de la masse. Cette condition n'est pas toujours réalisable.

- **Linéarisation par double réaction sur la tension de déséquilibre et sur la tension d'alimentation du pont**

Le pont est constitué comme dans le montage précédent la réaction négative effectuée par le biais du premier étage A_1 tend à annuler la tension à la sortie de cet étage.

V_m a pour valeur:

$$V_m = V_1 \cdot \frac{R_{c0} + 2R_f}{2R_{c0} + \Delta R_c} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \quad (3.36)$$

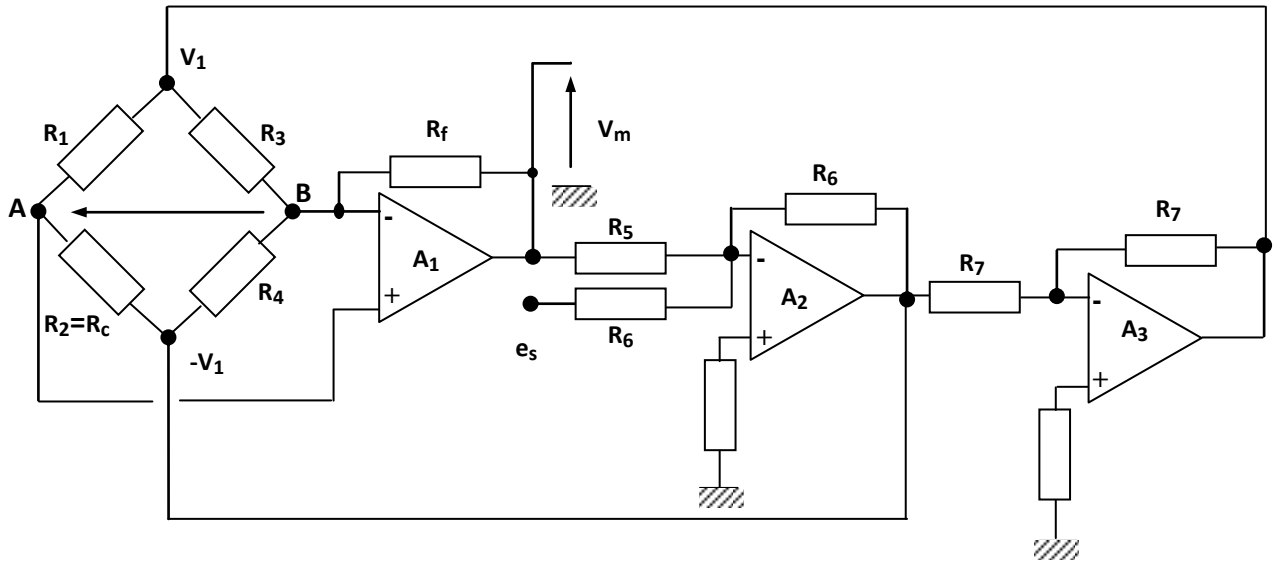


Figure 3.49 : Linéarisation du pont de Wheatstone par double réaction.

Les tensions d'alimentation $\mp V_1$ du pont sont fournies par le sommateur A_2 et l'inverseur A_3 et sont telles que $V_1 = e_s + \frac{R_6}{R_5} V_m$. Lorsqu'est satisfaite la condition $\frac{R_6}{R_5} = \frac{R_{c0}}{R_{c0} + 2R_f}$, la tension de mesure s'écrit:

$$V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \left(1 + \frac{2R_f}{R_{c0}}\right) + \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \quad (3.37)$$

- **Linéarisation analogique en aval de la source du signal**

a) correction de la non linéarité du conditionneur de capteur passif

Lorsqu'on utilise un capteur unique, par exemple résistif, avec pour conditionneur un pont de Wheatstone ou un montage potentiométrique à alimentation symétrique la tension délivrée n'est pas linéaire, elle a pour expression:

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R_c}{2R_{c0}}\right)} \quad (3.38)$$

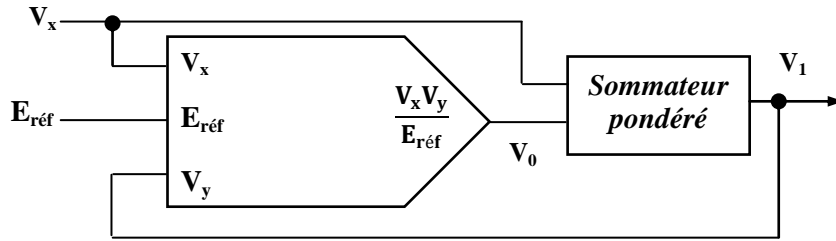


Figure 3.50 : Linéarisation du pont de Wheatstone par un multiplieur en aval.

La tension de sortie du multiplieur est $V_0 = \frac{V_x V_y}{E_{ref}} = \frac{V_m V_l}{E_{ref}}$.

les gains sur les deux voies d'entrée du sommateur étant a et b , on a en sortie une tension $V_l = a.V_m + b.V_0 = a.V_m + b.\frac{V_m V_l}{E_{ref}}$ d'où $V_l = \frac{a.V_m}{1 - \frac{b V_m}{E_{ref}}}$.

Donc :

$$V_l = \frac{a.e_s \Delta R_c}{4 R_{c0}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{2R_{c0} \left(1 - \frac{b e_s}{2E_{ref}}\right)}} \quad (3.39)$$

Par un choix approprié pour $b = \frac{2E_{ref}}{e_s}$, on élimine le terme responsable de la non linéarité, alors seulement $V_l = \frac{a.e_s \Delta R_c}{4 R_{c0}}$.

Un autre montage présente l'intérêt de fournir une tension linéarisée indépendante de la tension d'alimentation du pont e_s .

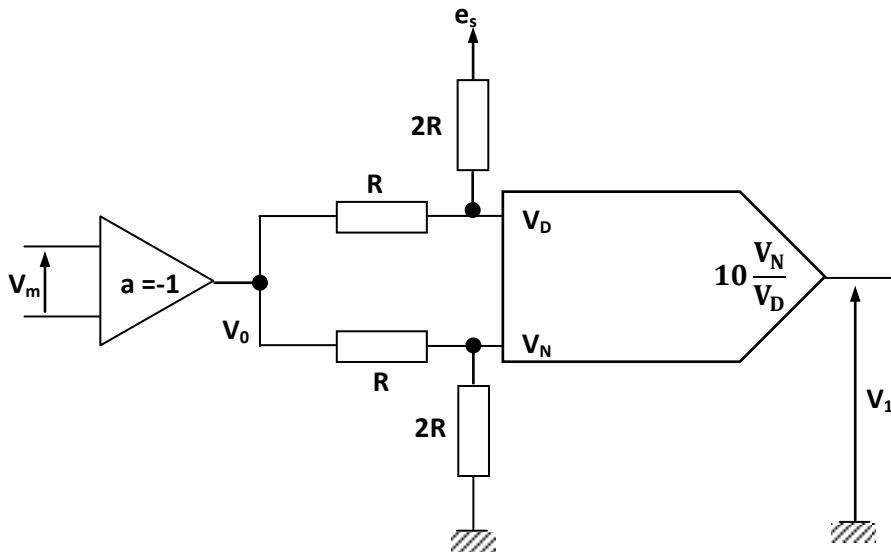


Figure 3.51 : Linéarisation du pont de Wheatstone par un diviseur en aval.

La tension de sortie de l'ampli d'instrumentation, monté en inverseur, est :

$V_0 = -V_m = -\frac{e_s \Delta R_c}{4 R_{c0}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{2R_{c0}}}$. si on considère les résistances d'entrée du diviseur grandes devant R , on

écrit alors $V_N = \frac{2}{3} V_0$ et $V_D = \frac{e_s + 2V_0}{3}$ et on en déduit $V_l = 10 \frac{V_N}{V_D} = -10 \frac{\Delta R_c}{R_c}$.

b) Méthode analogique générale de linéarisation d'un signal

On considère un capteur actif ou passif et son conditionneur, qui est à l'origine d'une tension V_m non linéaire avec le mesurande m . A partir de la courbe d'étalonnage, on établit l'équation reliant m à V_m , **par exemple** $m = a_0 + a_1V_m + a_2V_m^2 + \dots + a_nV_m^n$.

Pour des raisons évidentes de simplicité lors de la réalisation, on limite le nombre de termes au minimum compatible avec la précision recherchée. Le dispositif de linéarisation de V_m doit délivrer en sortie une tension V_l linéarisée et donc proportionnelle à m .

$$V_l = A.m = A.(a_0 + a_1V_m + a_2V_m^2 + \dots + a_nV_m^n) \tag{3.40}$$

qu'on écrira :

$$V_l = A_0 + A_1V_m + A_2V_m^2 + \dots + A_nV_m^n \tag{3.41}$$

Avec

$$A_k = Aa_k \tag{3.42}$$

Il en résulte qu'en général, la linéarisation analogique est réalisable par une association de multiplieurs fournissant les termes V_m^k et d'additionneurs pondérés.

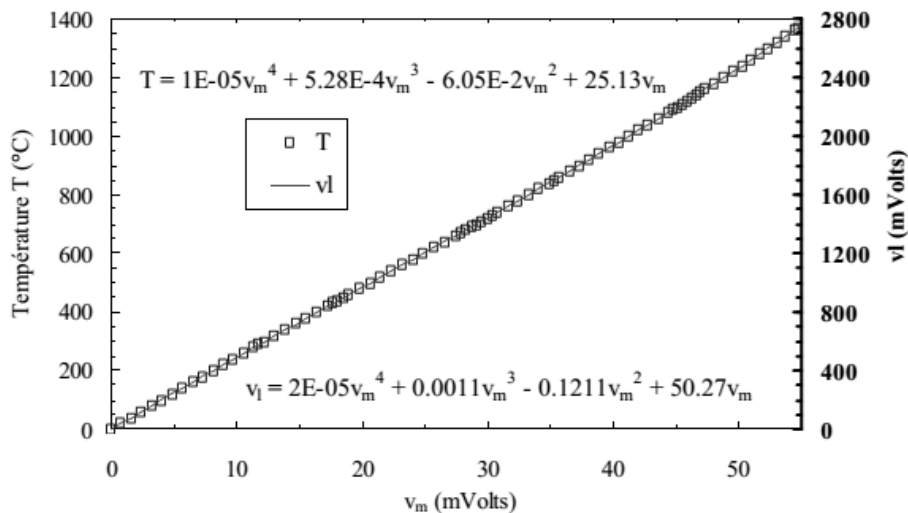


Figure 3.52 : Linéarisation d'un thermocouple type K.

Si la courbe d'étalonnage donnant $m = f(V_m)$ suit une loi logarithmique, exponentielle, en $\frac{1}{x}$, plusieurs circuits analogiques réalisant ces fonctions permettent d'arriver à la linéarisation! Sinon, il y a la linéarisation numérique.

- **Linéarisation numérique**

Le programme à réaliser doit établir la correspondance entre les valeurs numériques de la tension de mesure V_m délivrée par un convertisseur numérique/analogique, et la valeur du mesurande $m = f(V_m)$.

Deux méthodes permettent d'établir cette correspondance :

- ✓ le calcul de m à partir de la relation $m = f(V_m)$,

- ✓ la tabulation d'un ensemble de valeurs de m et de V_m avec éventuellement une interpolation linéaire.

3.10.3 Amplification du signal et réduction de la tension de mode commun

1°) Tension de mode commun : Définition et origines

Dans un circuit où la tension de mesure V_m est la tension différentielle entre deux conducteurs V_A et V_B , la tension de mode commun V_{MC} représente la valeur de tension commune à V_A et V_B et qui n'est support d'aucune information ; en posant V_{MC} on peut écrire que $V_A = V_{MC} + \frac{V_m}{2}$ et $V_B = V_{MC} - \frac{V_m}{2}$.

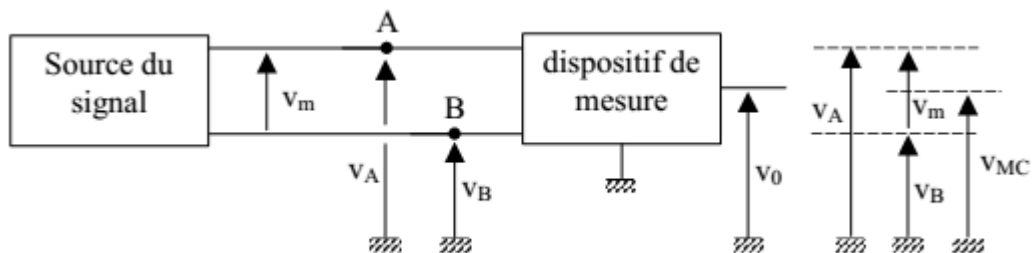


Figure 3.53 : Définition générale des tensions différentielle et de mode commun.

La tension de mode commun V_{MC} peut être très supérieure au signal V_m et dans certains cas l'expérimentateur ne la connaît pas avec précision. Un des problèmes les plus importants en instrumentation est l'élimination ou la réjection du mode commun afin d'obtenir et de traiter un signal proportionnel à V_m et donc indépendant de V_{MC} .

a) Tension de mode commun due à l'alimentation

Le cas se présente lorsque V_A et V_B dépendent de la tension d'alimentation. Pour un pont de Wheatstone, avec 3 résistances fixes R_{c0} et un capteur $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$, on a lorsque $\Delta R_c \ll R_{c0}$:

$$V_A = \frac{e_s}{2} + \frac{e_s \Delta R_c}{4R_{c0}} \quad \text{et} \quad V_B = \frac{e_s}{2} \quad (3.43)$$

si par exemple :

$e_s = 20V$ et $\frac{\Delta R_c}{R_{c0}} = 10^{-2}$ alors $V_{MC} = 10,025V \approx 10V$ et $V_m = 50mV$

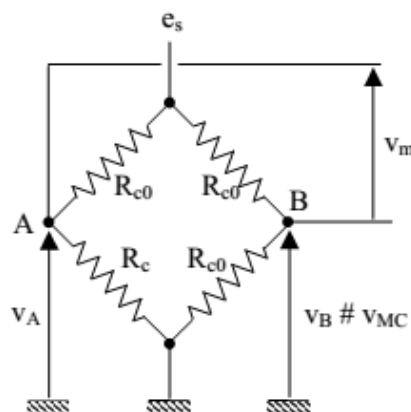


Figure 3.54 : Tensions différentielle et de mode commun dans le cas du pont de Wheatstone.

b) Tension de mode commun de masse

Entre deux points éloignés de mise à la masse existent en général :

- Une impédance de masse Z_m de l'ordre de l'Ohm,
- Une *f.e.m.* de masse e_M qui a pour origines principales les inductions électromagnétiques (50 Hz) et la circulation de courants de retour des diverses installations. les distances entre points de mise à la masse pouvant atteindre des centaines de mètres la *f.e.m.* de masse e_M peut être supérieure à plusieurs dizaines de volts.

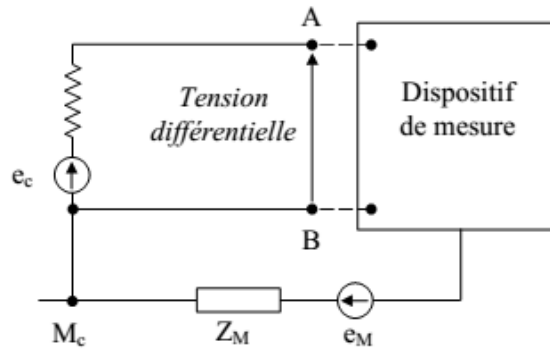


Figure 3.55: Schéma électrique équivalent du circuit de mesure en présence d'une *f.e.m.* de masse.

Aux deux extrémités A et B de la liaison, on a en circuit ouvert par rapport à la masse les potentiels $V_B = e_M$ et $V_A = e_M + e_c$, habituellement on peut supposer que $e_c \ll e_M$ donc $V_{MC} = e_M$ et $V_m = e_c$.

2*) Amplificateur différentiel et taux de réjection de mode commun (Par exemple : Burr Brown OPA27)

Lorsque le signal apparaît comme tension différentielle aux extrémités d'une liaison, son traitement par un ampli différentiel s'impose [3].

Un ampli différentiel peut être considéré comme constitué de deux voies de gain $-A_1$ et A_2 , et d'un sommateur dont la sortie est celle de l'ampli différentiel.

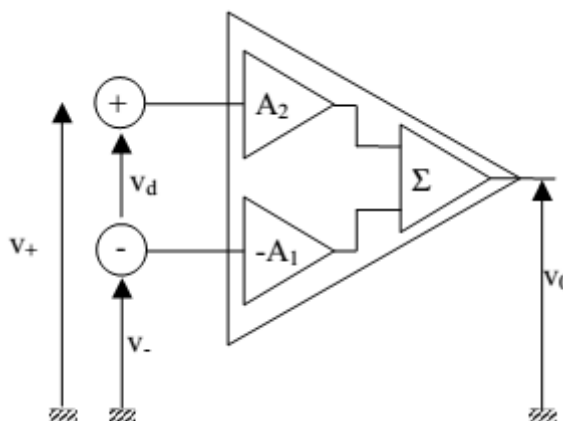


Figure 3.56 : Structure de l'amplificateur différentiel.

La tension de sortie V_0 de l'amplificateur différentiel a pour expression $V_0 = A_2V_+ - A_1V_-$.

Soit $V_{MC} = \frac{V_+ + V_-}{2}$ et $V_d = V_+ - V_-$

$$V_0 = \frac{A_1 + A_2}{2} V_d + (A_2 - A_1) V_{MC} \quad (3.44)$$

Le gain différentiel est $A_d = \frac{A_1 + A_2}{2}$ et le gain de mode commun s'écrit $A_{MC} = A_2 - A_1$. La tension de sortie de l'ampli différentiel dépend d'autant moins de la tension de mode commun que les gains A_1 et A_2 des deux voies sont, au signe près, plus voisins.

La tension de sortie peut être écrite sous la forme $V_0 = A_d \left(V_d + \frac{A_{MC}}{A_d} V_{MC} \right)$ ou en posant $\tau_r = \frac{A_d}{A_{MC}}$, Le taux de réjection du mode commun, $V_0 = A_d \left(V_d + \frac{1}{\tau_r} V_{MC} \right)$.

La réduction de l'influence de la tension de mode commun sur la sortie et d'autant mieux assurée que le taux de réjection de mode commun τ_r est grand.

Remarque: les fabricants d'amplificateurs différentiels expriment le taux de réjection τ_r ou CMRR (common mode rejection ratio) en décibels par la notation CMR (common mode rejection) où $CMR = 20 \log(CMRR \text{ ou } \tau_r)$.

3*) Amplificateur d'instrumentation

C'est un module amplificateur différentiel adapté au traitement de signaux en présence de tensions de mode commun relativement importantes.

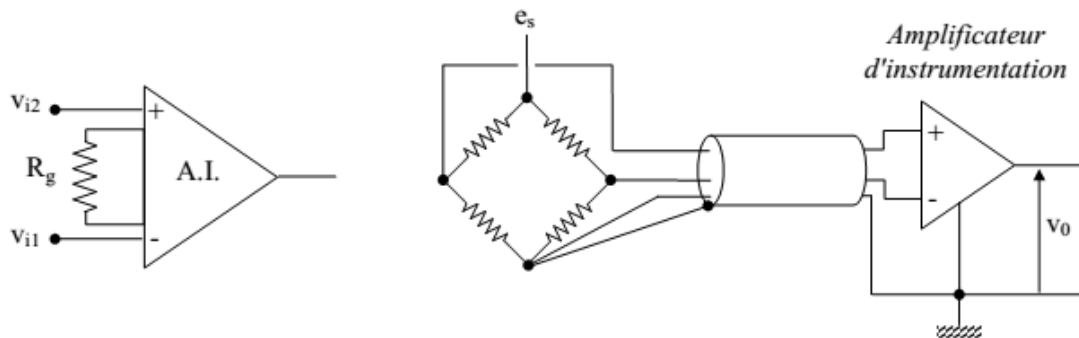


Figure 3.57 : Liaison d'un pont de Wheatstone à un amplificateur d'instrumentation.

Il en résulte que la tension de mode commun applicable à ces entrées se trouve limitée à des valeurs qui doivent être légèrement inférieures aux tensions d'alimentation de l'amplificateur.

Les caractéristiques général et intéressantes des amplificateur d'instrumentation sont :

- **Un gain différentiel réglable de 1 à 10^4** grâce à la résistance R_g jusqu'à quelques centaines de Hz, il décroît ensuite avec la fréquence,
- **Des impédances d'entrée très élevées $10^4 \Omega$** en parallèle avec quelques pF permettant de réduire l'influence de la résistance de source et d'un déséquilibre des résistances vues des entrées inverseur.
- **Une impédance de sortie très faible 0.1Ω** réduisant l'influence de la charge sur le gain,
- **Des courants de polarisation des entrées très faibles** de quelques pA à nA selon le type d'ampli afin de minimiser les variations des tensions d'entrée causées par des variations de résistances de source et de liaison.
- **Une grande stabilité thermique des performances** $0,0015\% / ^\circ C$ pour le gain différentiel par exemple afin d'éviter des dérives de la sortie indiscernables du signal.

- **Un taux de réjection de mode commun τ_r élevé** par exemple $> 10^5$ soit > 100 dB en continu ou à 50 Hz qui décroît aux hautes fréquences. La tension en sortie est donc la même que pour un ampli différentiel:

$$V_0 = A_d \left(V_d + \frac{1}{\tau_r} V_{MC} \right) \quad (3.45)$$

Dans les ensembles d'acquisition de données utilisant plusieurs capteurs, on peut associer à chacun un amplificateur d'instrumentation dont le gain est fixé en fonction du niveau moyen du signal délivré et qui est localisé à proximité du capteur. Ceci permet la transmission d'un signal de haut niveau et réduit ainsi l'influence des parasites qui se superposent au signal au cours de la transmission et évitent d'effectuer le multiplexage à bas niveau.

Une autre solution consiste à utiliser un ampli d'instrumentation à gain programmable. Ce dernier placé après le multiplexeur a un gain réglable par commutation de résistances afin d'être adapté au niveau du signal fourni par chaque capteur.

4°) Amplificateur d'isolement

Lorsque les tensions de mode commun dépassent ou risquent de dépasser 70% des tensions d'alimentation, l'amplificateur d'instrumentation n'est plus utilisable : c'est l'amplificateur d'isolement qui dans ce cas est susceptible d'apporter une solution [3].

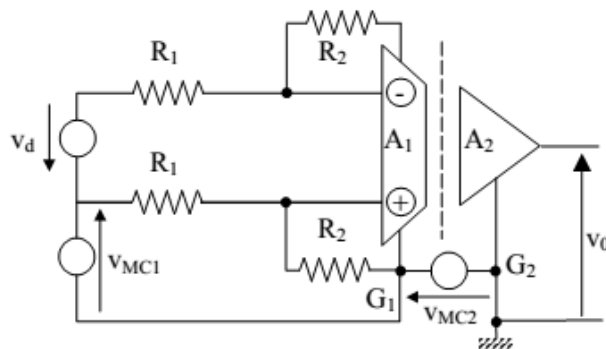


Figure 3.58: Schéma de principe d'un ampli d'isolement dont l'étage d'entrée est un ampli opérationnel en montage différentiel de gain $A_d = R_2/R_1$.

L'ampli d'isolement est constitué d' :

- Un étage A_1 dont l'entrée est un ampli opérationnel ou d'instrumentation, alimenté par une source flottante et dont le point commun G_1 (garde) est relié à la masse de la source du signal,
- Un étage A_2 dont le point commun G_2 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 A_1 et A_2 tout en permettant le transfert du signal entre ces étages par couplage électromagnétique ou optoélectronique.

La tension de mode commun V_{MC1} par rapport au point commun G_1 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 τ_{r1} est plus élevé. La tension de mode commun V_{MC2} par rapport au point commun G_2 encore appelée tension d'isolement ; elle peut atteindre plusieurs milliers de volts et est d'autant plus atténuée en sortie que τ_{r2} est élevé.

La tension V_0 est de la forme :

$$V_0 = A_d V_d \left(1 + \frac{1}{\tau_{r2}} \frac{V_{MC1}}{V_d} \right) + \frac{1}{\tau_{r2}} V_{MC2} \quad (3.46)$$

avec pour ordre de grandeur $\tau_{r2} \cong 100dB$ et $\tau_{r2} \cong 160dB$.

L'amplificateur d'isolement trouve ses application :

- quand le signal 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.

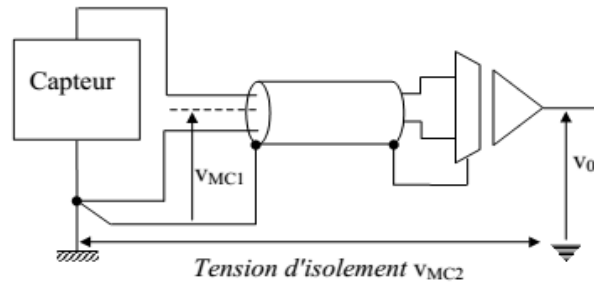


Figure 3.59 : Exemples d'utilisation de l'amplificateur d' isolement.

3.10.4 Détection de l'information

Les conditionneurs de capteurs passifs délivrent dans un certain nombre de cas notamment une alimentation sinusoïdale une tension de mesure V_m qui est modulée par les variations ΔV_m du mesurande. On va voir succinctement mes méthodes, qui permettent d'extraire de cette tension modulée, l'information liée au mesurande.

a) Tension de mesure modulée en amplitude avec conservation de la porteuse :

Dans ce cas, l'évolution dans le temps de la valeur de crête de la tension de mesure reproduit exactement les variations de ΔV_m mesurande. Ainsi par exemple lorsque la tension de la source d'alimentation est sinusoïdale de pulsation on a une tension de mesure qui a pour expression:

$$V_m(t) = \frac{E_s}{2} (1 + k \cdot \Delta m(t)) \cos(\omega_s t) \quad (3.47)$$

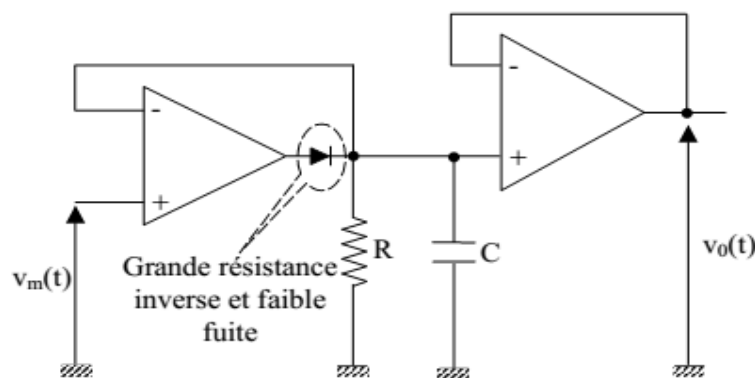


Figure 3.60: Montage d'un détecteur de crête .

Un détecteur de crête, dont les éléments de base sont une diode et un ensemble RC , délivre une tension $V_0(t)$ qui a pour expression :

$$V_0(t) = \eta \cdot \frac{E_s}{2} \cdot (1 + k \cdot \Delta m(t)) \quad (3.48)$$

où η est le rendement de détection ($0 \leq \eta \leq 1$).

Une valeur de η proche de l'unité est obtenue lorsque la fréquence de coupure f_c de l'ensemble RC est telle que la fréquence de la porteuse f_s soit dans la bande atténuée alors que le spectre du signal f_m est compris dans la bande passante $f_m \ll f_c \leq f_s$.

La composante continue de la détectée $\eta \frac{E_s}{2}$ peut être éliminée soit par filtrage passe haut soit à l'aide d'un montage soustracteur si sa valeur a été déterminée par une mesure préalable à $\Delta m = 0$.

Explication en image en cas d'une modulation d'amplitude avec conservation de la porteuse :

La variation dans le temps du mesurande $\Delta m(t)$

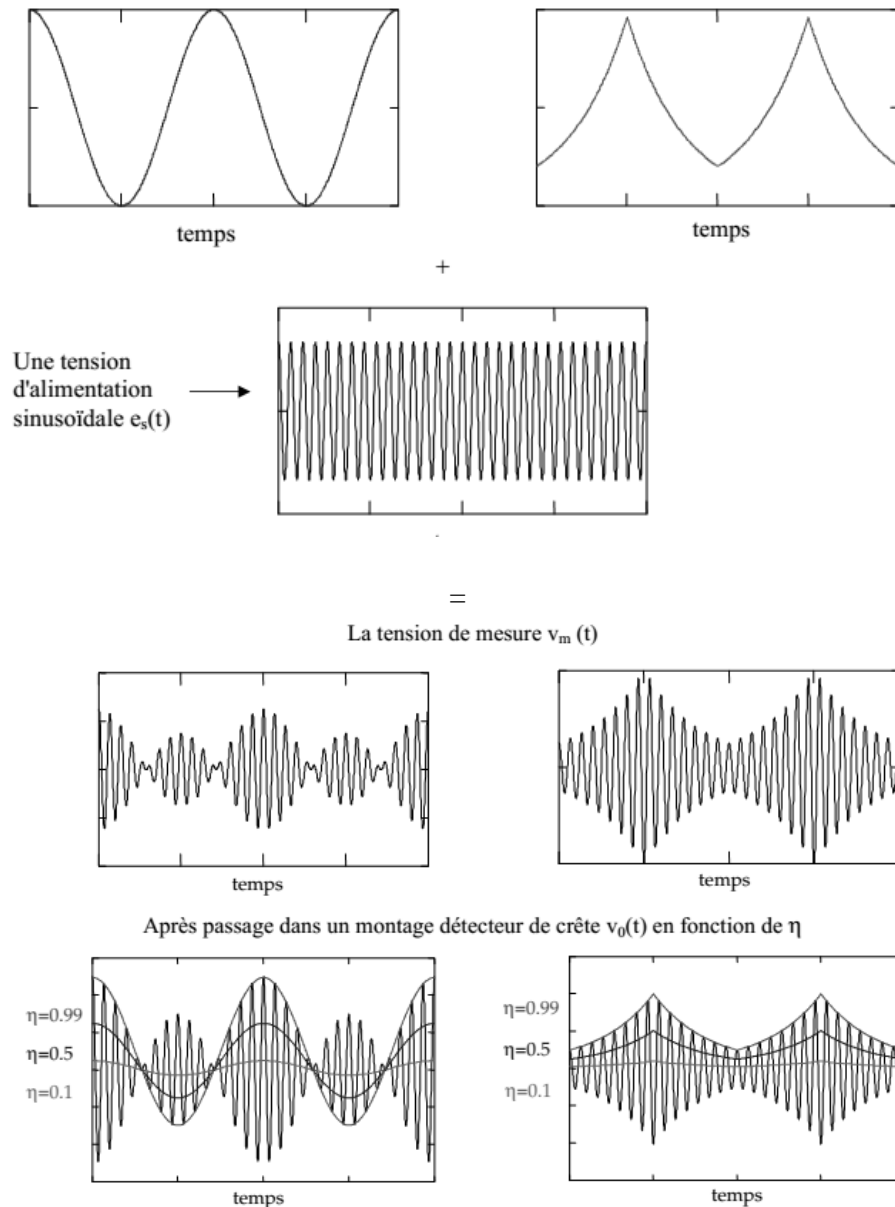


Figure 3.61 : Modulation d'amplitude avec conservation de la porteuse.

$$\text{Si } F_m \ll F_c = \frac{1}{2\pi RC} \ll F_s$$

Chapitre 4

Mesure de Température

4.1 Introduction

La température est une grandeur différente des autres grandeurs physiques (longueur, masse, ...) qui sont des grandeurs extensives qu'on peut définir numériquement par rapport à une grandeur de même nature prise comme référence. La température est une grandeur intensive, multiplier ou diviser une température n'a pas, a priori, de signification physique évidente.

La température est une grandeur abstraite, elle définie est définie en termes de changement de comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à un changement de température. Du nombre important de propriétés de la matière et de phénomènes physiques sensibles à la température, résulte une grande diversité de méthodes de mesure de la température.

Dans ce chapitre, c'est la dilatation des corps sous l'effet de l'augmentation de la température qui sera l'image de la grandeur thermométrique. La dilatation étant un phénomène réversible, elle fournit un mode pratique de mesure des températures. Ce phénomène se retrouve de manière analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides.

4.2 Le Thermomètre a dilatation de liquide

4.2.1 Description

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (l'ordre de grandeur est de 0.2 mm) se terminant par une ampoule de sécurité. Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate de manière plus ou moins importante. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe [5].



Figure 4.1: Thermomètre à dilatation de liquide.

4.2.2 Loi de variation

La loi de variation du volume du liquide en fonction de la température s'écrit :

$$V = V_0(1 + aT) \quad (4.1)$$

4.2.3 Liquides thermométriques

Le liquide le plus utilisé est le mercure mais d'autres liquides sont quelque fois employés [5]:

Liquide	Domaine d'emploi (°C)	a (°C ⁻¹)
pentane	-200 à +20	-
Alcool éthylique	-110 à + 100	1.17
Toluène	- 90 à + 100	1.03
Mercure	- 38 à + 650	0.182

L'espace libre au dessus du liquide peut être vide mais pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et pour permettre la mesure des hautes températures, l'espace libre est rempli d'un gaz neutre (azote ou argon) et mis sous une pression fonction de la température à mesurer. Par exemple, pour un thermomètre à mercure prévu pour mesurer une température de 600°C, la pression de l'azote est de 20 bars. La chambre d'expansion évite les trop fortes variations de pression.

4.2.4 Nature de l'enveloppe

Le matériau constituant l'enveloppe du thermomètre dépend de la température à mesurer :

- jusqu'à 450°C : verre d'Iena
- jusqu'à 630°C : verre Supremax
- jusqu'à 1000°C : silice pure fondue

4.2.5 Colonne émergente

Il faut corriger la mesure de la température s'il n'est pas possible d'immerger complètement le thermomètre. Comme le montre la figure suivante, dans les cas (a) et (c) la colonne de liquide thermométrique est totalement immergée dans l'enceinte dont on mesure la température. La dilatation du liquide se fait donc pleinement.

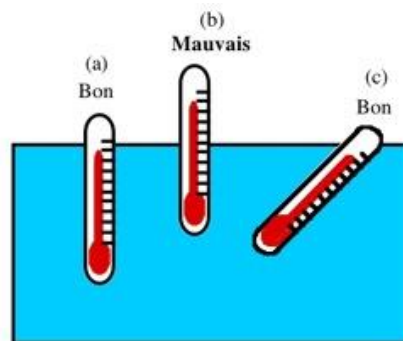


Figure 4.2: Mesure de température dans d'un bain.

Par contre, dans le cas (b), la colonne de liquide est immergée jusqu'à la graduation n , dans l'enceinte de température inconnue x et la partie de la colonne située entre les graduations n et h est en contact avec la température ambiante.

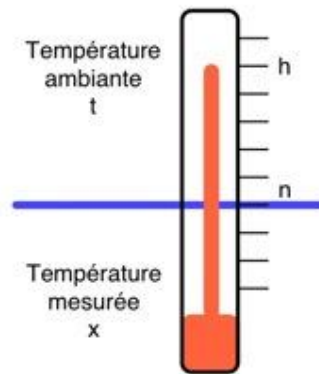


Figure 4.3: Colonne émergente.

Si on note v le volume correspondant à une graduation, le volume V à la température ambiante T a pour expression :

$$V = (h - n)v \quad (4.2)$$

La correction à apporter est donc :

$$dh = \frac{dV}{v} = a(h - n)(x - T) \quad (4.3)$$

En réalité, la partie émergée n'est pas tout à fait à la température ambiante, dans la pratique on prend les 7/10 de la correction calculée. Cette correction n'étant pas très précise, il faut, dans la mesure du possible, positionner au mieux le thermomètre (selon les configurations a et c).

Ces thermomètres sont très simples à utiliser, ils peuvent être également précis mais ils présentent deux inconvénients, leur temps de réponse est élevé et ils sont à lecture directe, ce qui nécessite la présence d'un opérateur pour réaliser les mesures. Ils ne sont pas adaptés à l'enregistrement et à l'acquisition de données et ne peuvent pas être utilisés pour des mesures sur une longue période de temps ou pour de la régulation. Ce dernier inconvénient est commun à tous les thermomètres à dilatation.

4.3 Thermomètre à dilatation de gaz

4.3.1 Principe

L'équation d'un gaz parfait s'écrit :

$$PV = nRT \quad (4.4)$$

Si on enferme une certaine quantité de gaz dans une enveloppe de volume constant V , la pression développée par le gaz est proportionnelle à la température, c'est le principe sur lequel repose le thermomètre à dilatation de gaz [5].

4.3.2 Description

De manière schématisée, un thermomètre à gaz est composé d'une sonde A qui représente l'enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube de

raccordement de faible section à l'extrémité B fixe d'un tube de Bourdon, appelé également spirale de mesure. La longueur du tube de raccordement ne doit pas dépasser 100 m.

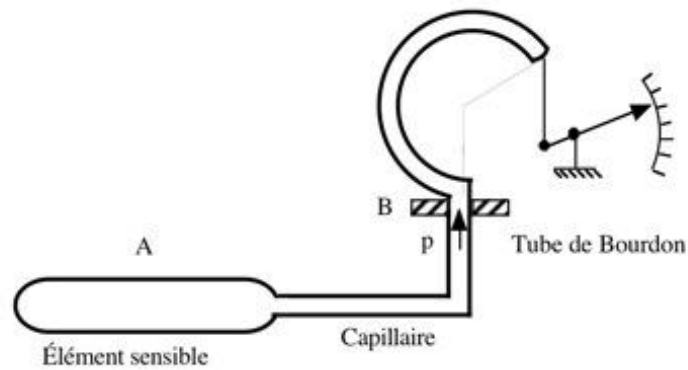


Figure 4.4 : Gaz employés dans les thermomètres Gaz.

Sous l'effet de la variation de la température du milieu dans lequel est placée la sonde, la pression du gaz varie, ce qui modifie l'extrémité libre du tube de Bourdon. Cette variation de pression se traduit par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplace devant un cadran portant des graduations thermométriques. Les gaz les plus employés sont l'hélium, l'hydrogène, l'azote et le gaz carbonique [5].

L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, qui est de l'ordre de 1% en mesures industrielles. Ils sont très adaptés pour mesurer les très basses températures (jusqu'à -268°C pour l'hélium et -240°C pour l'hydrogène). Certains de ces thermomètres sont de véritables instruments de précision auxquels on a recours pour les déterminations des températures de référence, tels que le thermomètre à hydrogène.

Leur principal inconvénient est que la dimension de la sonde est d'assez grande dimension.

4.4 Thermomètre à tension de vapeur

4.4.1 Principe

On appelle tension de vapeur d'un liquide pur, la pression sous laquelle ce liquide est en équilibre avec sa vapeur saturante. Pour un liquide donné, la tension de vapeur n'est fonction que de la température. La mesure de la tension de vapeur d'un liquide permet donc de connaître sa température, la mesure thermométrique se fait donc par l'intermédiaire d'une mesure de pression.

La réalisation la plus simple est celle du thermomètre à simple remplissage présenté sur la figure ci-dessous. L'élément sensible est une sonde analogue à celle du thermomètre à gaz mais le tube de raccordement est plongé dans la sonde. La sonde, le tube de raccordement et l'élément de mesure sont remplis de liquide vaporisable.

Lorsque la sonde est placée dans une enceinte chaude, une partie du liquide se vaporise. Un équilibre liquide/vapeur, fonction de la température, s'établit. En même temps, la pression augmente pour se fixer à la valeur de la tension de vapeur du liquide. Cette pression est transmise par le liquide à un manomètre de mesure.

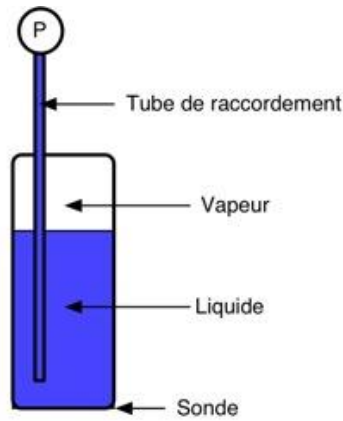


Figure 4.5: Thermomètre à simple remplissage.

La vaporisation se faisant toujours au point le plus chaud du système fermé, les capteurs à simple remplissage ne sont utilisables que si la sonde est à une température supérieure à la température ambiante, sinon la vaporisation se ferait dans le capteur de pression. Pour pallier cet inconvénient et effectuer des mesures de températures inférieures et supérieures à la température ambiante, on utilise une sonde à double remplissage (voir figure suivante). Le liquide vaporisable est placé dans la zone médiane de la sonde et c'est un liquide non évaporable, appelé liquide transmetteur, qui est placé dans le fond de la sonde et dans l'ensemble capillaire-capteur de pression.

Ce liquide, qui transmet au manomètre la pression de la vapeur est soit de l'huile, soit de la glycérine.

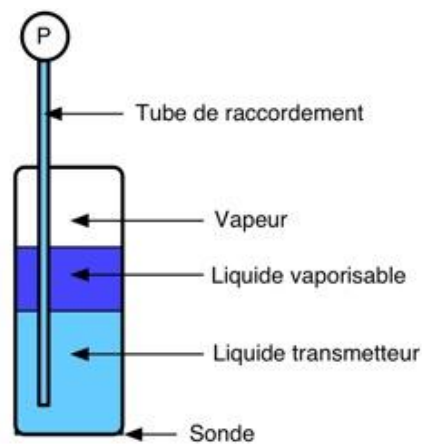


Figure 4.6 : Thermomètre à double remplissage.

L'avantage de ces thermomètres est qu'ils sont très sensibles, l'inconvénient est que la position de la sonde par rapport au capteur peut influencer la mesure.

4.4.2 Liquides de remplissage et domaines d'utilisation

Ils sont rassemblés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Liquides de remplissage et domaine d'utilisation liquide

Liquide	Domaine d'utilisation	
	Température (°C)	Pression (bars)
Ammoniac	-20 à +60	2 à 25
Propane	0 à 100	5 à 45
Butane	+20 à +140	2 à 30
Chlorure d'éthyle	+30 à +180	2 à 50
Alcool méthylique	+60 à +220	1 à 53
Benzène	+80 à +280	1 à 43

4.5 Le Thermomètre a dilatation de solide

4.5.1 Principe

Lorsqu'une tige métallique est soumise à une variation de température, sa longueur varie. Cette loi de variation s'écrit sous la forme :

$$L = L_0(1 + \alpha T) \quad (4.5)$$

La dilatation linéaire du métal peut donc servir de grandeur thermométrique, c'est le principe sur lequel reposent les thermomètres à dilatation de solide.

Les métaux les plus utilisés sont le platine ($\alpha = 9.10^{-6} \text{°C}^{-1}$), le Zinc ($\alpha = 30.10^{-6} \text{°C}^{-1}$) et l'Invar qui est un alliage de Fer et de Nickel ($\alpha = 2.10^{-6} \text{°C}^{-1}$).

4.5.2 Le bilame (bi-metallic-strip thermometer)

Le thermomètre bilame est constitué de deux bandes de métaux dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudés à plat sur toute leur surface. La soudure des deux constituants doit être réalisée de manière à ce que le contact soit parfait et que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames.

Lorsque le bilame est soumis à une variation de température, les dilatations des deux lames provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble.

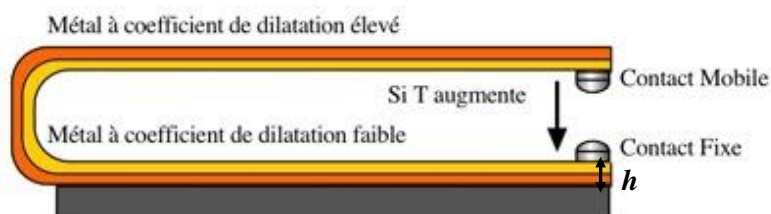


Figure 4.7: Bilame.

Si on note h_1 l'épaisseur de la lame de coefficient de dilatation élevé α_1 , et h_2 l'épaisseur de la lame de coefficient de dilatation faible α_2 , le rayon de courbure du bilame d'épaisseur $h(h = h_1 + h_2)$ a pour expression :

$$\rho = \frac{h \left(3(1+r_h)^2 + (1+r_h r_e) \left(r_e^2 - \frac{1}{r_h r_e} \right) \right)}{6(\alpha_1 - \alpha_2)(1+r_h)\Delta T} \quad (4.6)$$

Avec :

$r_h = \frac{h_2}{h_1}$ le rapport des épaisseurs

$r_e = \frac{E_2}{E_1}$ le rapport des modules d'élasticité

La sensibilité des bilames est améliorée en minimisant l'épaisseur h et en augmentant l'écart entre α_1 et α_2 , ce qui revient à prendre des métaux dont les coefficients de dilatation sont les plus différents possibles.

Les bilames sont très utilisés comme thermostats : lorsque la température souhaitée est atteinte, le contact fixe touche le contact mobile qui joue alors le rôle d'un interrupteur de courant. C'est le cas, par exemple, du thermostat du fer à repasser.

4.5.3 Pyromètre linéaire

La sonde est formée d'une gaine de silice dans laquelle est placé un barreau métallique dilatable. Une tige en élinvar (Ferronickel dérivé de l'invar auquel on a ajouté du chrome pour assurer un module d'élasticité constant) transmet la dilatation du barreau à un système amplificateur permettant la lecture (ou la transmission).

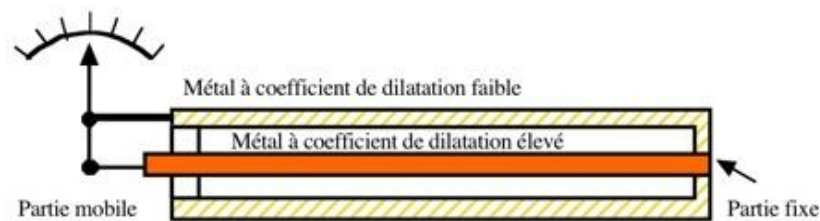


Figure 4.8: Pyromètre linéaire.

4.6 Thermomètres électriques

Les thermomètres électriques présentent l'avantage d'une grande souplesse d'emploi et d'exploitation (le signal électrique délivré est transmissible et enregistrable), tout en étant suffisamment précis, aussi bien pour des utilisations industrielles qu'en laboratoire [2].

Leur fonctionnement est basé sur la variation de la résistance d'un métal ou d'un semi-conducteur en fonction de la température. Les lois de variation étant très régulières, il est possible de les utiliser pour déterminer les températures par des mesures de résistance. Cependant, ces lois étant très différentes selon qu'il s'agisse d'un métal ou d'un semi-conducteur, deux types de capteurs ont été distingués selon les appellations respectives de thermomètre à résistance (*Resistance Temperature Detector RTD*) d'une part, et de thermistance (Thermistor) d'autre part.

4.6.1 Thermomètres à résistance

1°) Principe

La résistance électrique d'un conducteur métallique augmente avec la température. Cette variation étant parfaitement réversible, on peut établir une relation $R = f(T)$ entre la résistance R et la température $T(^{\circ}\text{C})$ sous la forme :

$$R = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3) \quad (4.7)$$

Les coefficients a , b et c de la loi de variation de R ayant été préalablement déterminés par un ensemble de mesures à températures connues, la mesure de R permet de déduire la température. Pour de petites variations ΔT autour de la température T , la loi de variation de la température peut être linéarisée : En écrivant :

$$\frac{dR}{dT} = \frac{R(T+\Delta T) - R(T)}{\Delta T} \quad (4.8)$$

on obtient

$$R(T + \Delta T) = R(T)(1 + \alpha_R \Delta T) \quad (4.9)$$

avec $\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dT}$ la sensibilité thermique du capteur à la température T .

2*) Critères de choix du métal

Selon le domaine d'application et les qualités particulières recherchées, les résistances sont réalisées en platine, en nickel, et plus rarement en cuivre ou en tungstène :

- Le platine peut être obtenu avec une très grande pureté (99.999%), ce qui lui confère des propriétés mécaniques et électriques très stables.
- Le nickel possède une sensibilité thermique élevée mais ses propriétés électriques et mécaniques beaucoup moins stables limitent son utilisation à des températures inférieures à 250°C.
- L'avantage du cuivre est la linéarité de la loi de variation de la résistance, mais il ne peut pas être employé au delà de 180°C pour des raisons de stabilité.
- La sensibilité thermique du tungstène est supérieure à celle du platine au dessus de 100K et il est utilisable à des températures plus élevées que le platine avec une linéarité supérieure, mais sa stabilité est inférieure à celle du platine [2].

Tableau 4.2 : Critères de choix du métal.

Métal	Résistivité à 0°C ($\mu\Omega.cm$)	Point de fusion (°C)	Domaine d'application
Cuivre	7	1083	-190 à + 150°C
Nickel	6.38	1453	-60 à +180°C
Platine	9.81	1769	-250 à +1100°C
Tungstène	1.72	3380	-269 à +27°C

Le matériau le plus utilisé est le platine, qui est généralement encapsulé avec de la céramique et placé dans une gaine d'acier étanche. La résistance est de 100 Ω à 0°C, ces thermomètres sont donc généralement appelés des sondes Pt 100.

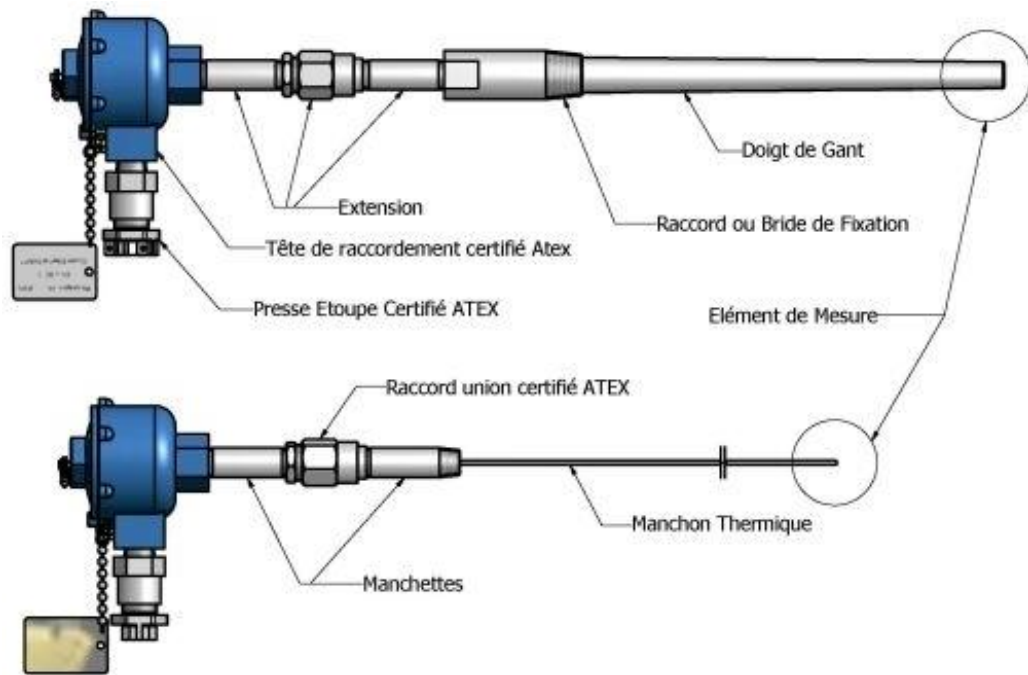


Figure 4.9: Canne pyrométrique.

4.6.2 Thermistances

A. Principe

Les thermistances sont des capteurs de température dont la sensibilité thermique est très élevée, de l'ordre de 10 fois celle des capteurs à résistance. Leurs coefficients de température sont généralement négatifs et dépendent fortement de la température. Elles sont constituées à partir de mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs tels que les oxydes de Nickel, de Cobalt ou de Manganèse. Contrairement aux métaux, la résistance des semi-conducteurs diminue lorsque la température augmente [1].

Les thermistances sont disponibles sous des formes variées : disques, petits cylindres, anneaux, perles, l'élément sensible pouvant être ou non protégé par enrobage ou en capsulage. Les valeurs élevées de la résistivité des matériaux employés permettent d'obtenir des résistances de valeurs appropriées avec de faibles quantités de matière et donc des dimensions réduites (de l'ordre du mm). Il en résulte un faible encombrement permettant la mesure quasi-ponctuelle de la température.



Figure 4.10: Thermistances.

B. Relation résistance-température

La résistance d'une thermistance en fonction de la température s'écrit :

$$R(T) = R_0 \exp\left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (4.10)$$

La sensibilité thermique a pour expression : $\alpha_R = \frac{\beta}{T^2}$

Les figures suivantes présentent la variation en fonction de la température de la résistance et de la sensibilité thermique d'une thermistance, sur une échelle semi logarithmique. Elles montrent que la résistance et la sensibilité thermique varient de manière inversement proportionnelle à la température. La sensibilité des thermistances est très importante pour les basses températures et elles sont particulièrement adaptées à la détection et la mesure des très faibles variations de température (de 10^{-4} à 10^{-3} K).

Elles peuvent être utilisées sans problèmes majeurs de stabilité jusqu'à environ 200°C , au delà il faut utiliser des matériaux spéciaux tel que le carbure de silice. Les variations de la résistance en fonction de la température étant très importantes, on utilise une thermistance donnée pour un intervalle de mesure de 50 à 100°C . Lorsque l'intervalle de mesure est plus étendu, il faut utiliser successivement des thermistances différentes dont les résistances sont convenablement choisies [1].

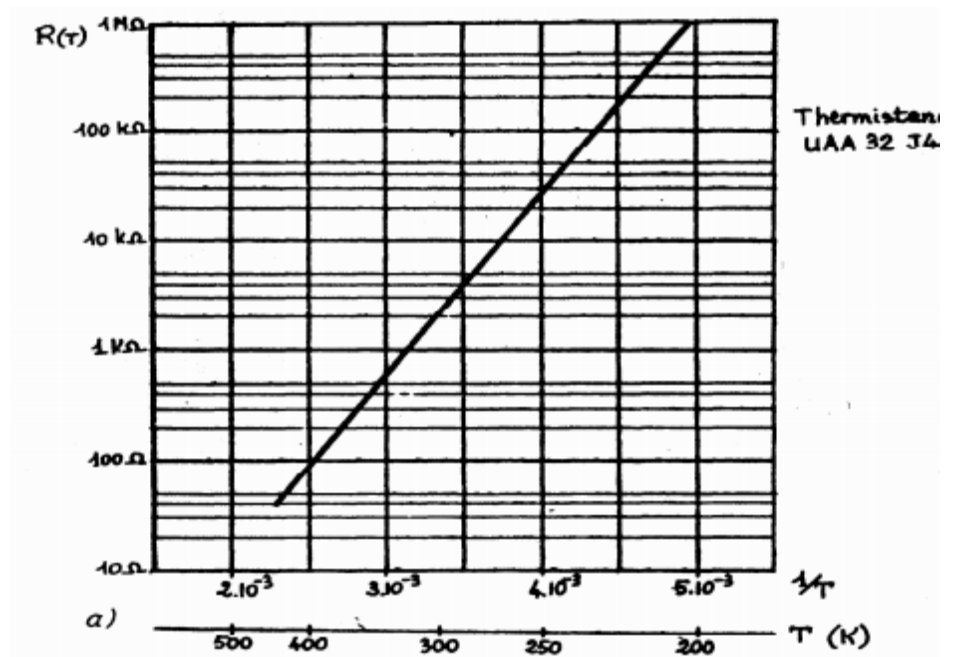


Figure 4.11: Relation résistance-température.



Figure 4.12: Relation sensibilité thermique-température .

C. Montage de mesure

La mesure de la température se ramène donc à une mesure de résistance. La méthode la plus simple figure 4.13, consiste à alimenter la résistance avec un courant I et de mesurer la tension aux bornes de la résistance (on rappelle : $U = R * I$).

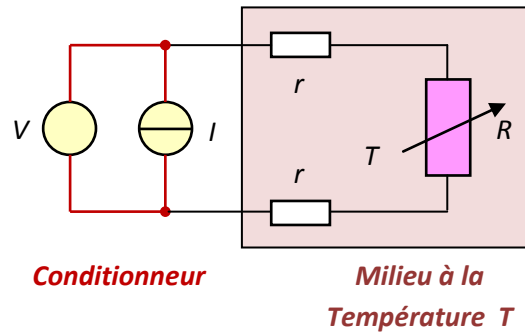


Figure 4.13: Montage deux fils avec source de courant.

Mais, dans ce montage, la tension V dépend aussi des résistances de ligne r . Pour éviter cela, on ajoute deux fils aux bornes de la résistance, on utilise alors une résistance avec quatre fils figure 4.14.

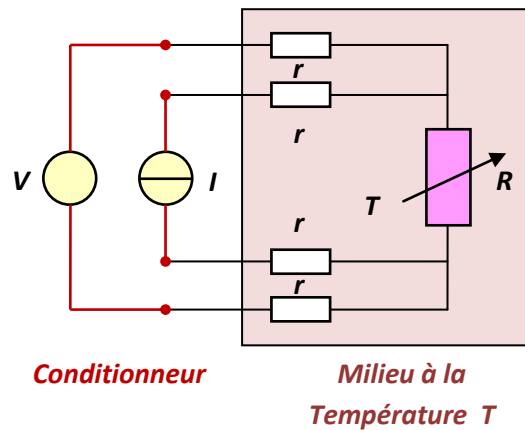


Figure 4.14: Montage quatre fils avec source de courant.

Ces deux montages ne permettent pas de supprimer simplement la composante continue $R(0^\circ\text{C})$ de la résistance de mesure R . On préfère généralement utiliser un montage utilisant un pont de Wheatstone figure. 4.15.

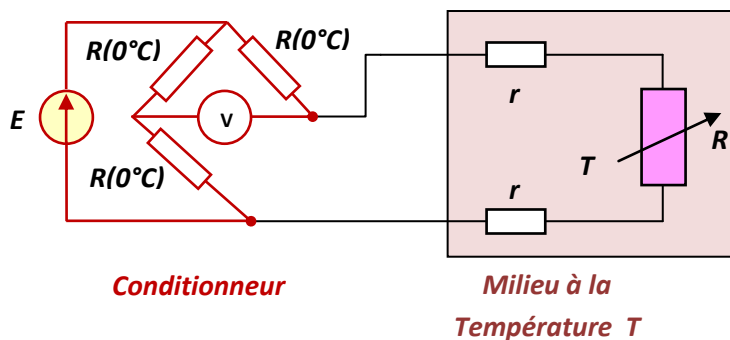


Figure 4.15: Montage avec pont Wheatstone.

Si on néglige les résistances r et si on note $R(T) = R(0^\circ\text{C}) + \alpha T$ on démontre :

$$V = \frac{\alpha T}{2R_0 + \alpha T} \cdot \frac{E}{2} \quad (4.11)$$

Pour diminuer l'influence des résistances de ligne, on utilise un montage trois fils (fig.16), ou mieux un montage quatre fils figure 4.17.

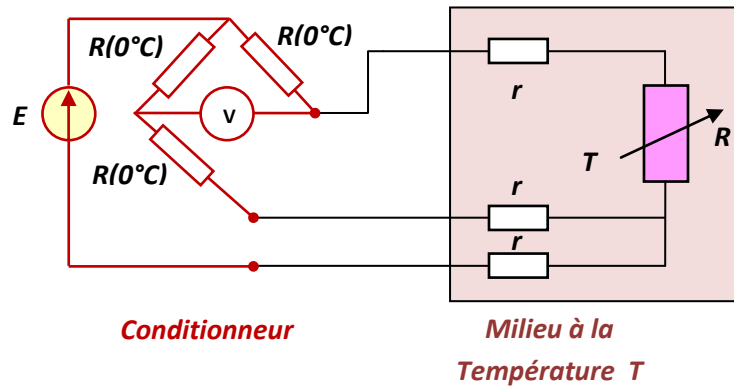


Figure 4.16: Montage trois fils.

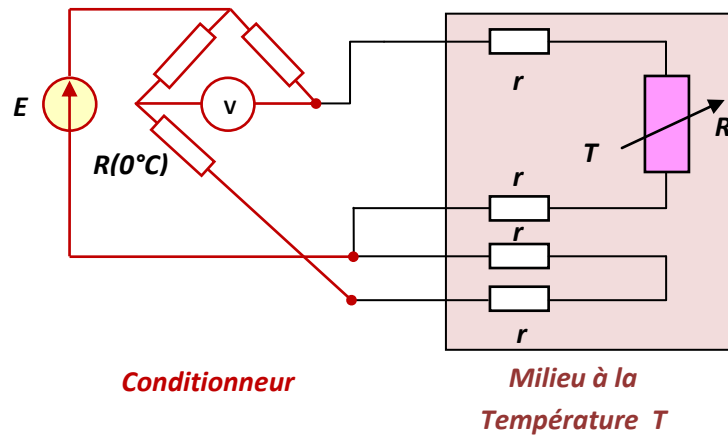


Figure 4.17: Montage quatre fils.

On trouve donc, d'après la norme CEI 751 les schémas de connections du tableau .

2file	3file	4file	4 fils - Boucle aveugle

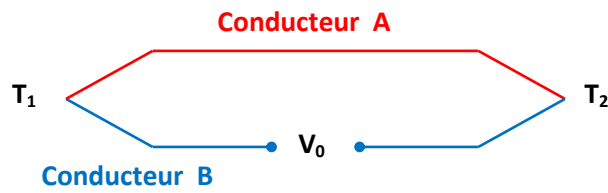
Figure 4.18: Schémas de connections d'après la norme CEI 751.

4.6.3 Les Thermocouples

A. Principe

Un thermocouple constitué de deux conducteurs **A** et **B** de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 délivre une *f.e.m* V_0 qui dépend d'une part de la nature de *A* et *B*, et

d'autre part des températures des deux jonctions. En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ($T_1 = T_{ref}$), tandis que l'autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température T_1 est également appelée soudure froide et celle à la température T_2 soudure chaude [5].



B. Effets thermoélectriques

Le fonctionnement des thermocouples est basé sur plusieurs phénomènes thermoélectriques.

1°) Effet Peltier

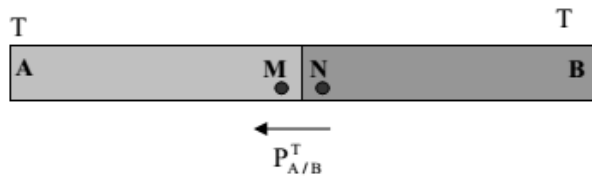


Figure 4.19: Effet Peltier.

A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température T , s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température, c'est la *f.e.m* de Peltier :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T \quad (4.12)$$

Loi de Volta : dans un circuit isotherme constitué de conducteurs différents, la somme des *f.e.m* de Peltier est nulle. On a donc :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T \quad (4.13)$$

2°) Effet Thomson

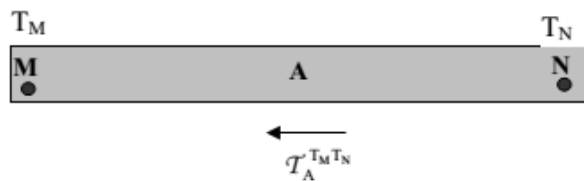


Figure 4.20: Effet Thomson.

Entre deux points M et N de températures différentes T_M et T_N qui se trouvent à l'intérieur d'un conducteur A homogène, s'établit une force électromotrice, qui ne dépend que la nature du conducteur et des températures T_M et T_N , c'est la *f.e.m* de Thomson :

$$\mathcal{J}_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT \quad (4.14)$$

avec h_A le coefficient de Thomson du conducteur qui dépend de la température.

3*) Effet Seebeck

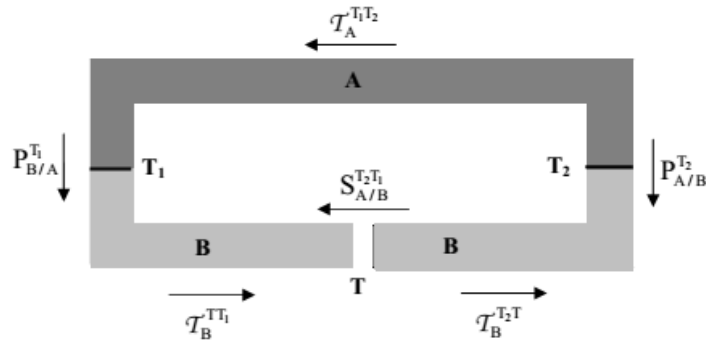


Figure 4.21: Effet Seebeck.

On considère le circuit électrique fermé ci-dessus, constitué des deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2 . ce circuit constitue un couple thermoélectrique et est le siège d'une *f. e. m* dite de Seebeck $S_{A/B}^{T_1, T_2}$ qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent :

$$S_{A/B}^{T_1, T_2} = \mathcal{J}_B^{T_2 T} + P_{A/B}^{T_2} + \mathcal{J}_A^{T_1 T_2} + P_{B/A}^{T_1} + \mathcal{J}_B^{T T_2} \quad (4.15)$$

ou encore :

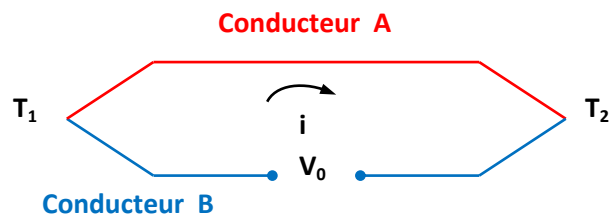
$$S_{A/B}^{T_1, T_2} = (\mathcal{J}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{B/A}^{T_1}) \quad (4.16)$$

Si par convention on choisit pour l'une des températures, T_1 par exemple, une valeur de référence déterminée (généralement 0°C), la *f. e. m* ne dépend que de la température T_1 , pour un couple de conducteurs A et B donnés.

C. Principes pratiques d'utilisation des thermocouples

L'utilisation pratique des thermocouples repose sur les six principes suivants :

a) *Un thermocouple doit contenir au moins 2 matériaux et 2 jonctions*



La différence de potentiel V_0 est une fonction non linéaire de la différence de températures $(T_1 - T_2)$ des deux jonctions :

$$V_0 = e_{B/A} T_1 + e_{A/B} T_2 \quad (6.17)$$

avec :

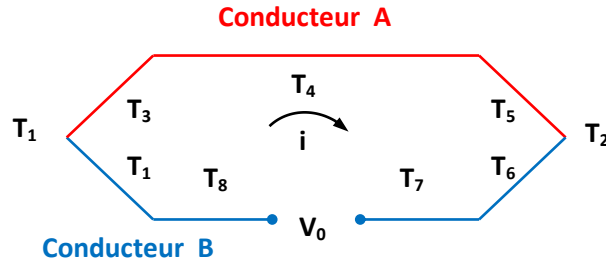
- $e_{B/A}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de B vers A
- $e_{A/B}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de A vers B

Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A}(T_1 - T_2) \quad (4.18)$$

Attention : Cette relation n'est pas linéaire, $e_{B/A}$ dépend de la température.

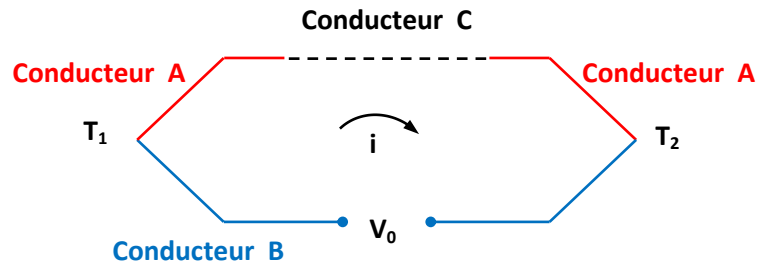
- b) V_0 dépend uniquement de la nature des conducteurs A et B et de la différence de température ($T_1 - T_2$) des jonctions.



$$V_0 = f(T_1 - T_2) \quad (4.19)$$

- c) **Loi des métaux intermédiaires**

Quand on introduit un 3^{ème} conducteur dans le circuit comprenant le couple A/B, la f.e.m dont le circuit est le siège ne change pas à condition que les extrémités du conducteur ajouté soient à la même température.



En effet :

$$V_0 = e_{B/A}T_1 + e_{A/C}T_i + e_{C/A}T_j + e_{A/B}T_2 \quad (4.20)$$

Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$ et $e_{A/C} = -e_{C/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A}(T_1 - T_2) + e_{A/C}(T_i - T_j) \quad (4.21)$$

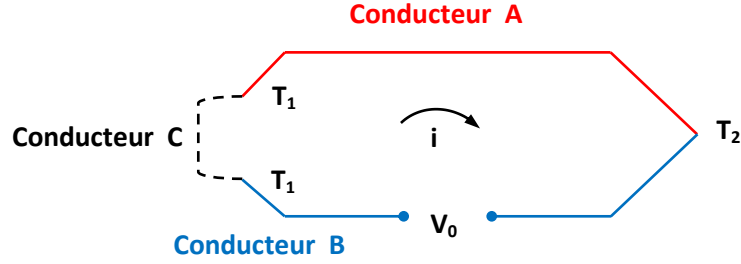
Les effets du conducteur introduit dans le circuit sont donc éliminés si $T_i = T_j$.

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la même température.

- d) **L'insertion d'un conducteur dans une jonction n'affecte pas V_0 si ses deux extrémités sont maintenues à la température de la jonction**

En effet :

$$V_0 = e_{B/C}T_1 + e_{C/A}T_1 + e_{A/B}T_2, \text{ et compte tenu du fait que } \begin{cases} e_{C/A} = e_{C/B} + e_{B/A} \\ e_{B/A} = e_{B/C} + e_{C/A} \end{cases}$$



on obtient :

$$V_0 = e_{B/A}(T_1 - T_2) \quad (4.22)$$

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la température de la jonction.

e) Loi des températures successives

Lorsque la température de référence T_1 d'un thermocouple prend une nouvelle valeur T_1' , la *f. e. m* de Seebeck du couple A/B passe de la valeur $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ à $S_{A/B}^{T_2 T_1'}$

$$S_{A/B}^{T_2 T_1'} = (\mathcal{J}_B^{T_2 T_1'} - \mathcal{J}_A^{T_2 T_1'}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1'}) \quad (4.23)$$

que l'on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1'} = (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{J}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_A^{T_2 T_1}) - (P_{A/B}^{T_1'} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{J}_B^{T_1' T_1} - \mathcal{J}_A^{T_1' T_1}) \quad (4.24)$$

soit : $S_{A/B}^{T_2 T_1'} = S_{A/B}^{T_2 T_1} - S_{A/B}^{T_1' T_1}$, ou encore :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1'} + S_{A/B}^{T_1' T_1} \quad (4.25)$$

Cette relation est utilisée en particulier lorsque la mesure a été faite avec une température de référence T_1' ayant fourni la *f. e. m* $S_{A/B}^{T_2 T_1'}$ et que l'on souhaite connaître la valeur de $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ pour $T_1 = 0^\circ\text{C}$, afin d'en déduire la température à mesurer T_2 à partir de la table du thermocouple utilisé.

f) Loi des métaux successifs

Si on considère un premier thermocouple formé des conducteurs A et B , et un deuxième thermocouple formé des conducteurs B et C , les températures des jonctions étant T_1 et T_2 pour les deux conducteurs, nous pouvons en déduire la *f. e. m* du thermocouple constitué des matériaux A et C :

Pour le thermocouple A/B :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = (\mathcal{J}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) \quad (4.26)$$

Pour le thermocouple B/C :

$$S_{B/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{J}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_B^{T_2 T_1}) + (P_{B/C}^{T_2} - P_{B/C}^{T_1}) \quad (4.27)$$

Pour le thermocouple A/C :

$$S_{A/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{J}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/C}^{T_2} - P_{A/C}^{T_1}) = (\mathcal{J}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_A^{T_2 T_1} + \mathcal{J}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_B^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} + P_{B/C}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1} - P_{B/C}^{T_1}) \quad (4.28)$$

ce qui nous donne :

$$S_{A/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{J}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{J}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{J}_B^{T_2 T_1}) + (P_{B/C}^{T_2} - P_{B/C}^{T_1}) \quad (4.29)$$

ou encore :

$$S_{A/C}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1} + S_{B/C}^{T_2 T_1} \quad (4.30)$$

Sur le plan pratique, si B est un métal de référence (Pb ou Pt) pour lequel il existe différentes tables de thermocouples correspondant à son association avec divers autres conducteurs. La connaissance à partir de ces tables des $f.e.m$ de Seebeck délivrées pour son association avec des conducteurs A et C nous permettra d'en déduire la $f.e.m$ délivrée par le thermocouple A/C dont la table de thermocouple peut ne pas être disponible.

D. Sensibilité thermique d'un thermocouple

La $f.e.m$ délivrée par un thermocouple est, sur de grands intervalles de température, une fonction non linéaire de cette dernière. A titre d'exemple, la figure ci-dessous présente la variation de la $f.e.m$ en fonction de la température, pour différents types de thermocouples d'un usage courant. On considère cependant que cette variation est linéaire sur un intervalle restreint de température, dont la taille dépend de la précision recherchée [1],[8].

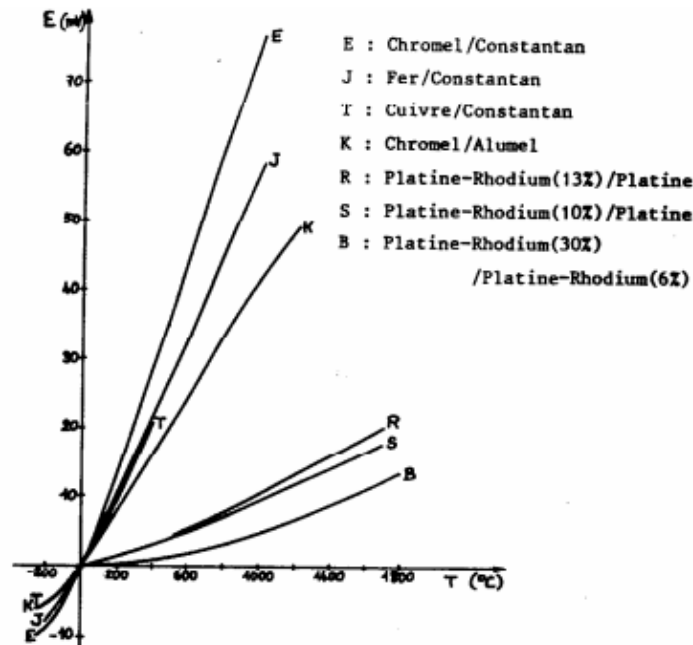


Figure 4.22 : $f.e.m$ en fonction de la température de thermocouples.

La relation qui lie la $f.e.m$ E (en μV) d'un thermocouple à la température T (en $^{\circ}C$) par une équation polynomiale de la forme :

$$E = \sum_{i=1}^n a_i T^i \quad (4.31)$$

avec :

- n l'ordre maximal du polynôme(généralement inférieur à 9)
- a_i des coefficients propres au thermocouple considéré.

Par exemple, pour le thermocouple type B (Platine-30% Rhodium / Platine-6% Rhodium), $n = 8$ et les coefficients a_i sont les suivants :

$a_i = 0$	$a_i = -2.4674601620 \cdot 10^{-1}$	$a_i = 5.9102111169 \cdot 10^{-3}$
$a_i = -1.4307123430 \cdot 10^{-6}$	$a_i = 2.1509149750 \cdot 10^{-9}$	$a_i = -3.175800720 \cdot 10^{-12}$
$a_i = 2.4010367459 \cdot 10^{-15}$	$a_i = -9.0928148159 \cdot 10^{-19}$	$a_i = 1.3299505137 \cdot 10^{-22}$

La sensibilité thermique S (en $\mu V/^\circ C$) d'un thermocouple, appelée également pouvoir thermoélectrique, est définie à une température T (pour $T_{ref} = 0^\circ C$) par :

$$S(T) = \frac{dS_{A/B}^{T, 0^\circ C}}{dT} \quad (4.32)$$

La figure ci-dessous présente la variation de la sensibilité thermique en fonction de la température, pour les différents thermocouples précédents [8].

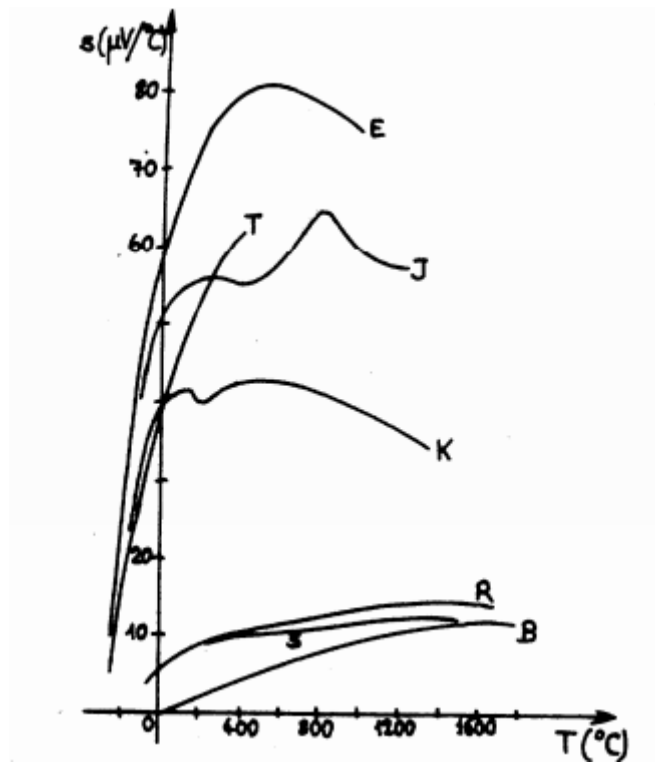


Figure 4.23 : Variation de la sensibilité thermique en fonction de la température.

Par exemple, pour le thermocouple type J (Fer/Constantan) $S(0^\circ C) = 52.9 \mu V/^\circ C$ et $S(700^\circ C) = 63.8 \mu V/^\circ C$, tandis que pour le thermocouple type S (Platine-10%Rhodium / Platine) $S(0^\circ C) = 6.4 \mu V/^\circ C$ et $S(700^\circ C) = 11.3 \mu V/^\circ C$.

L'ordre de grandeur des sensibilités des thermocouples est très inférieur à celui des capteurs de température utilisant des résistances.

E. Température de référence d'un thermocouple

La mesure de la température à l'aide d'un thermocouple nécessite que la température de la jonction de référence soit parfaitement connue, en effet toute incertitude sur la valeur de T_{ref} entraîne une incertitude sur la température mesurée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour maintenir cette température constante à 0°C

a) Le bain d'eau et de glace

La jonction de référence est plongée dans un bain constitué d'un mélange eau - glace à pression atmosphérique normale, à l'intérieur d'une enceinte adiabatique. L'eau et la glace doivent être très pures et la glace finement pilée. Cette dernière doit être renouvelée fréquemment pour maintenir une température de référence constante. La température de 0°C est obtenue avec une précision de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

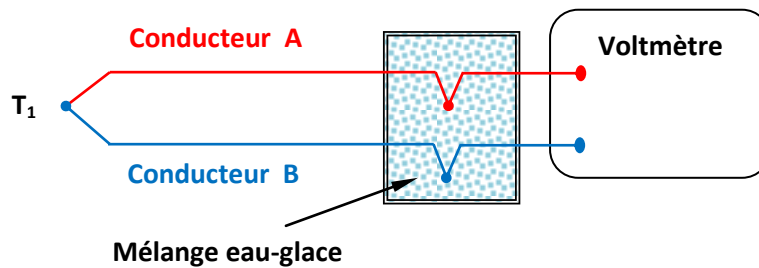


Figure 4.24 : Le bain d'eau et de glace.

b) La méthode du pont électrique

Il est possible de maintenir la température de référence à 0°C par l'intermédiaire de circuits électriques, appelés circuits de correction de la soudure froide.

Si on connaît la température ambiante T_a à l'instant de la mesure, et T_c étant la température à mesurer, on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_c, 0^{\circ}\text{C}} = S_{A/B}^{T_c, T_a} + S_{A/B}^{T_a, 0^{\circ}\text{C}} \quad (4.33)$$

Le circuit de correction de la soudure froide est tel qu'il délivre automatiquement une tension $V(T_a)$ qui est égale à $S_{A/B}^{T_a, 0^{\circ}\text{C}}$. Cette *f. e. m.*, ajoutée à la *f. e. m.* $S_{A/B}^{T_c, T_a}$ du thermocouple A/B, permet de mesurer la *f. e. m.* $S_{A/B}^{T_a, 0^{\circ}\text{C}}$ aux bornes du circuit de mesure.

La tension $V(T_a)$ est déterminée à partir de la résistance $R(T_a)$ d'un capteur de température à résistance maintenu à température ambiante, le dispositif utilisé est le pont de Wheatstone. Le montage de principe est présenté sur la figure ci-dessous.

Le pont de Wheatstone permet la correction de la soudure froide pour des variations de la température ambiante autour de 0°C . Les résistances R_0 , R_0' et R_0'' ne dépendent pas de la température alors que la résistance $R(T_a)$ du capteur en est une fonction linéaire, dont le coefficient est sa sensibilité thermique α_R .

Le pont est équilibré à 0°C , à la température T_a sa tension de déséquilibre a pour expression :

$$V(T_a) = E \frac{R_0(R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R T_a \quad (4.34)$$

Les valeurs numériques des composants du pont sont choisies de manière à assurer :

$$E \frac{R_0(R'_0 - R''_0)}{(R_0 + R'_0)^2} \alpha_R T_a = S_{A/B}^{T_a, 0^\circ C} \quad (4.35)$$

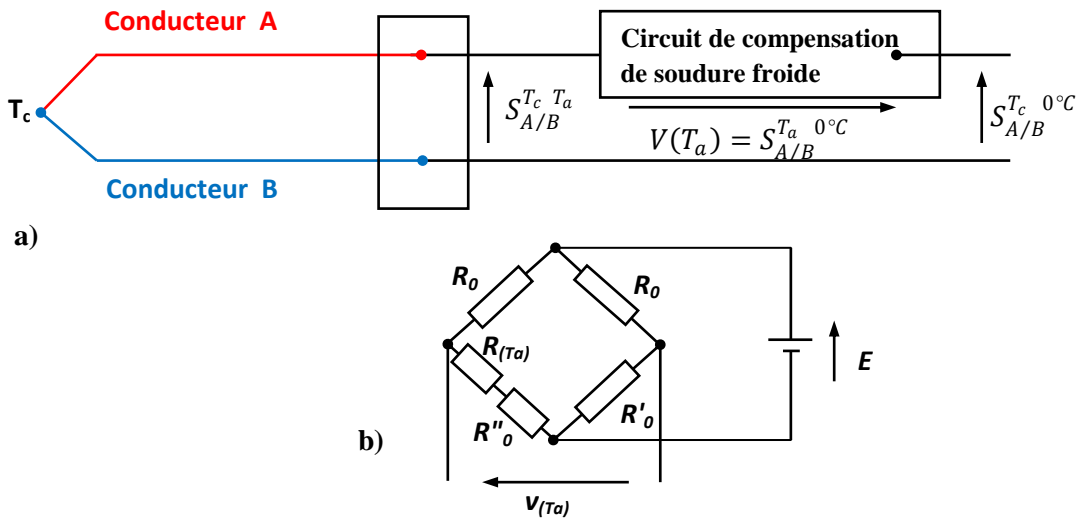


Figure 4.25 : Compensation de soudure froide : a) montage de principe ; b) pont de Wheatstone utilisé en circuit de compensation de soudure froide.

En supposant que la sensibilité du thermocouple est constante dans la plage de variation de T_a on obtient :

$$S = E \frac{R_0(R'_0 - R''_0)}{(R_0 + R'_0)^2} \alpha_R \quad (4.36)$$

c) La méthode du double four

Cette méthode utilise deux fours à des températures différentes pour simuler la température de référence de $0^\circ C$.

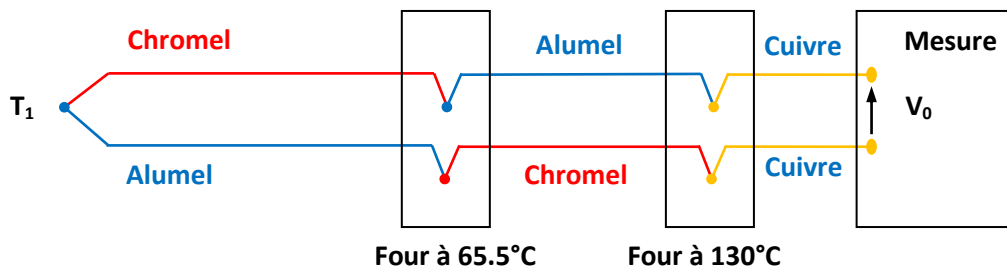


Figure 4.26 : La méthode du double four.

On a :

$$\begin{aligned} V_0 &= e_{\text{Cuivre} / \text{Alumel}} \cdot 130 + e_{\text{Alumel} / \text{Chromel}} \cdot 65.5 + e_{\text{Chromel} / \text{Alumel}} \cdot T_1 + e_{\text{Alumel} / \text{Chromel}} \cdot 65.5 \\ &\quad + e_{\text{Chromel} / \text{Cuivre}} \cdot 130 \\ V_0 &= e_{\text{Cuivre} / \text{Alumel}} \cdot 130 + 2e_{\text{Alumel} / \text{Chromel}} \cdot 65.5 + e_{\text{Chromel} / \text{Alumel}} \cdot T_1 \\ V_0 &= e_{\text{Chromel} / \text{Alumel}} (T_1 - 0^\circ C) \end{aligned}$$

On se ramène ainsi à un couple Chromel/Alumel dont la jonction froide est à $0^\circ C$.

F. Principaux types de thermocouples et limites d'emploi

Le tableau suivant présente, pour différents types de thermocouples, les températures d'utilisation ainsi que la précision, pour les diamètres indiqués. Des tables donnant la *f.e.m* de ces thermocouples en fonction de la température [5].

Thermocouples	Gamme de Températures (°C)	<i>f.e.m</i> (mV)	Précision
Cuivre / Constantan Type T (diamètre 1.63 mm)	-270 à 370	-6.258 à 19.027	± 2% de -100°C à -40°C ± 0.8% de -40°C à 100°C ± 0.75% de 100°C à 350°C
Fer / Constantan Type J (diamètre 3.25 mm)	-210 à 800	-8.096 à 45.498	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75 % de 400°C à 800°C
Chromel / Alumel Type k (diamètre 3.25 mm)	-270 à 1250	-5.354 à 50.633	± 3 % de 0 °C à 400 °C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Chromel/ Constantan Type E (diamètre 3.25 mm)	-270 à 870	-9.835 à 66.473	± 3°C de 0°C à 400 °C ± 0.75% de 400 à 1250°C
Platine-Rhodium (10%) / Platine Type S (diamètre 0.5 1 mm)	-50 à 1500	-0.236 à 15.576	± 2.5°C de 0°C à 600°C ± 0.4% de 600°C à 1600°C
Platine-Rhodium (13%) / Platine Type R (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500	-0.226 à 17.445	± 1.4°C de 0°C à 538 °C ± 0.25% de 538°C à 1500°C
Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%) Type B (diamètre 0.51 mm)	0 à 2760	0 à 12.426	± 0.5% de 870°C à 1500 °C

G. Comparaison thermocouple et thermomètres électriques

Le tableau suivant récapitule les principaux avantages et inconvénients des thermocouples, des capteurs de température à résistance et des thermistances [5].

	Thermocouple	RTD	Thermistances
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simple ▪ Robuste ▪ Peu couteux ▪ Mesures ponctuelles ▪ Rapide ▪ Gamme de températures large 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très stable ▪ Très précis ▪ Meilleur linéarité que le thermocouple 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très sensible ▪ fiable encombrement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Non linéaire ▪ Stabilité fiable ▪ Sensibilité fiable ▪ Nécessite une température de référence 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Couteux ▪ Lent sensibilité fiable ▪ Erreur par auto-échauffement (effet Joule) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Non linéaire ▪ Gamme réduite de températures ▪ Stabilité fiable ▪ Fragile ▪ Auto-échauffement

Chapitre 5 **Mesure de Pressions**

5.1 Introduction

La pression tout comme la température, la vitesse ou le débit, intervient, en tant que variable, dans les phénomènes liés aux fluides liquides ou gazeux et aux solides qui exercent ou subissent des pressions. Si on considère les applications industrielles, où se posent, surtout, les problèmes de mesure, dont la mesure de pression, on constate déjà qu'à lui seul le domaine énergétique absorbe une grande partie des instruments de mesure de pression. C'est évident car les installations hydrauliques, thermiques, nucléaires, etc. fournissent l'énergie mécaniques ou électrique, nécessitent la surveillance permanente des pressions à ne pas dépasser, ce dépassement pouvant entraîner la détérioration d'enceintes et canalisations sans parler du risque d'éclatement des parois et d'accidents graves pouvant en découler, comme il peut diminuer le rendement d'une réaction chimique se produisant dans un réacteur, ce qui influe sur la production de l'usine, d'où l'intérêt de la mesure de la pression.

5.2 Expression de la pression

5.2.1 Pression dans un fluide

Un corps liquide ou gazeux enfermé dans un récipient, qu'il remplit entièrement, exerce sur toutes les parois de celui-ci une force dite de pression. Celle-ci dépend de la nature du fluide, du volume qu'il occupe et de la température.



Figure 5.1: Schéma d'un récipient.

Si on considère un point M au centre d'un élément de surface dS , placée au sein du fluide (liquide ou gaz). Sur un coté de cet élément de surface, les molécules exercent au point M une force de direction quelconque, mais elle peut être toujours décomposée en [8] :

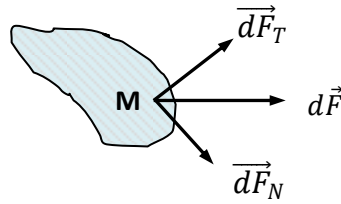


Figure 5.2: Pression dans un fluide.

- Une composante tangentielle $d\vec{F}_T$
- Une composante normale $d\vec{F}_N$

Par définition la pression P qui s'exerce sur l'élément de surface dS est égale au quotient du module $d\vec{F}_N$ par l'aire dS .

$$P = \frac{dF_N}{dS} \quad (5.1)$$

Ce quotient est indépendant de l'orientation de la surface élémentaire dS et ne dépend que de sa position dans le fluide.

5.2.2 Pression exercée par un solide

Un corps solide repose sur une surface d'appui S , exerce sur cette surface un effort égale à son poids F et la pression correspondante est égale à :

$$P = \frac{F}{S} \quad (5.2)$$

5.2.3 Différentes unités de pression

0	100 000	pascal
0	1	bar
0	10,194	m d'eau
0	751,9	mm de Hg (Torr)
0	14,5	psi
0	1 000 000	barye
0	1,02	kgf/cm ²

Figure 5.3: Unités de pression.

5.2.4 Echelles de pression

Quelques précisions sont nécessaires, avant d'aborder la détection et la mesure de la pression. Puisque la mesure de la pression dépend de conditions environnementales, l'altitude et de la pression atmosphérique par exemple, il faut distinguer la pression relative et la pression absolue. La pression relative, ou pression manométrique, est la mesure la plus fréquente,

Exemple : la pression des pneus est donnée en pression relative. Ainsi, un manomètre indiquera une pression de zéro si on mesure la pression dans un contenant ouvert. Autrement dit, le manomètre mesure une pression par rapport à la pression de l'air. La pression manométrique est indiquée par « (m) » après l'unité de pression,

Exemple : $kPa (m)$. Pour mesurer une la pression absolue il faut tenir compte de la contribution de la pression atmosphérique. On le dénote en écrivant « (a) » après l'unité de pression,

Exemple : $kPa (a)$. Donc, un manomètre absolu indiquera la pression atmosphérique et non zéro si l'on mesure la pression dans un contenant ouvert.

$$\text{Pression absolue} = \text{pression relative} + \text{pression atmosphérique}$$

La figure 5.4 montre la relation entre pressions absolue et pression relative. Notez que le point fondamental de l'échelle manométrique est $0 kPa (m)$, soit $101,3 kPa (a)$, la pression atmosphérique normale.

Dans une centrale, on mesure surtout des pressions relatives. On mesure la pression absolue si la pression est inférieure à la pression atmosphérique,

Exemple : le condensateur et l'enceinte de confinement sous vide.

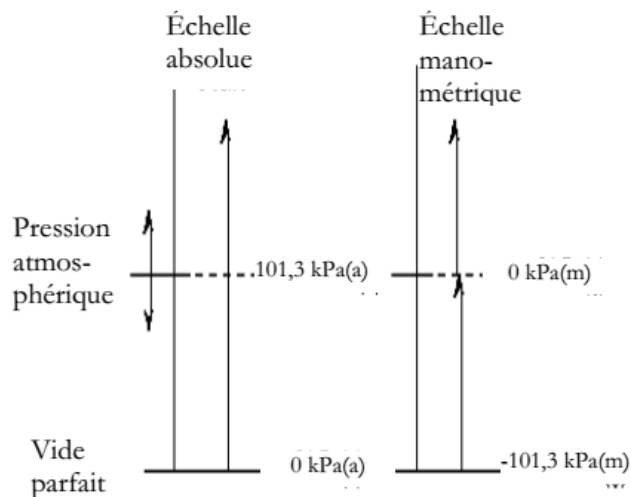


Figure 5.4: Relation entre la pression absolue et la pression manométrique.

5.3 Différentes sortes de pressions

5.3.1 Vide

Le vide est une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le vide parfait correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

5.3.2 Pression atmosphérique ou barométrique

C'est la pression ressentie en chaque point de la surface terrestre. Elle est due au poids des couches d'air environnant le globe.

La pression atmosphérique varie avec :

- La température;

- La latitude (position % à la terre);
- L'altitude (position % à la mer).

La pression moyenne au niveau de la mer, à 0° C, est de 1,013 bars. Soit 760 mm Hg.

5.3.3 Pression absolue

C'est une pression, positive, mesurée par rapport au vide absolu, par exemple la pression atmosphérique est une pression absolue.

5.3.4 Pression relative ou effective

C'est une pression, positive ou négative, exprimée par rapport à la pression atmosphérique.

C'est l'écart entre la pression réelle absolue et la pression atmosphérique $P_r = P_{abs} - P_{atm}$.

- Si elle est négative, elle est appelée dépression.
- Si elle est positive, elle est appelée surpression.

On dit qu'un appareil est en pression lorsque la pression enregistrée est supérieure à la pression atmosphérique.

Exemples :

- Pression de refoulement d'un ventilateur ;
- Pression d'une chambre à air de pneu ;
- L'eau est refoulée dans le tube en U , vers la branche qui est placée à l'air libre.

On dit qu'un appareil est en dépression lorsque la pression enregistrée est inférieure à la pression atmosphérique.

Exemples:

- Dépression d'un ventilateur à l'aspiration ;
- Dépression à l'aspiration d'une cheminée ;
- L'eau est aspirée dans le tube en U , vers la branche qui est reliée à l'appareil.

Les mots pression et dépression doivent être complétées par :

- ✓ Statique ;
- ✓ Dynamique ;
- ✓ Totale.

5.3.5 Pression différentielle

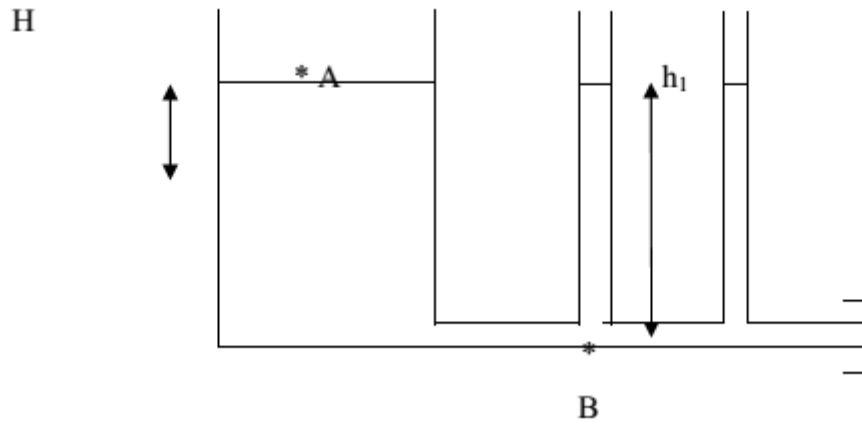
C'est la différence entre deux pressions :

$$\Delta P = P_A - P_B \quad (5.3)$$

5.3.6 Pressions statique, dynamique et totale

Pression statique

A l'intérieur d'un récipient contenant un fluide en repos se crée une pression due au poids de la masse du fluide sur la surface considérée.



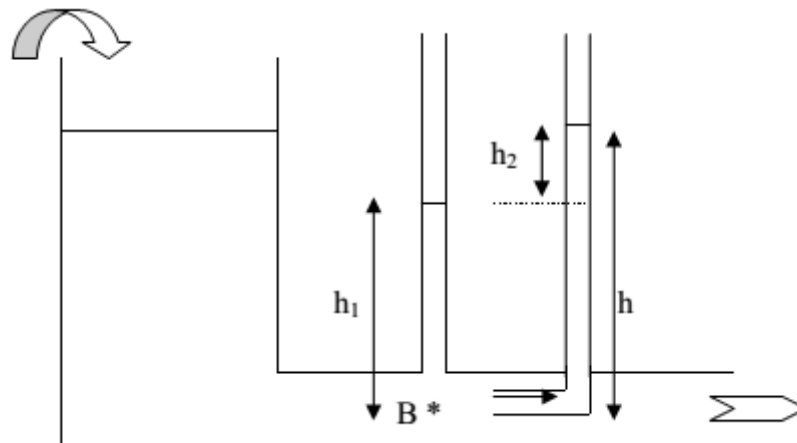
$$P_{s,A} = \rho \cdot g \cdot H \quad (5.4)$$

Avec :

$P_{s,A}$: Pression statique ou hydrostatique au point A exprimée en (Pa) ;

Pression hydrodynamique (ou dynamique)

Si le fluide est en mouvement il craie une pression supplémentaire P_d , dite pression dynamique ou hydrodynamique .



$$P_{d,B} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \quad (5.5)$$

Avec :

$P_{d,B}$: Pression dynamique ou hydrodynamique au point B exprimée en (Pa)

$$P_{s,B} = \rho g h_1 \quad (5.6)$$

$$P_{d,B} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 = \rho g h_2 \quad (5.7)$$

$$P_{t,B} = P_{s,B} + P_{d,B} = \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho V_B^2 = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g h \quad (5.8)$$

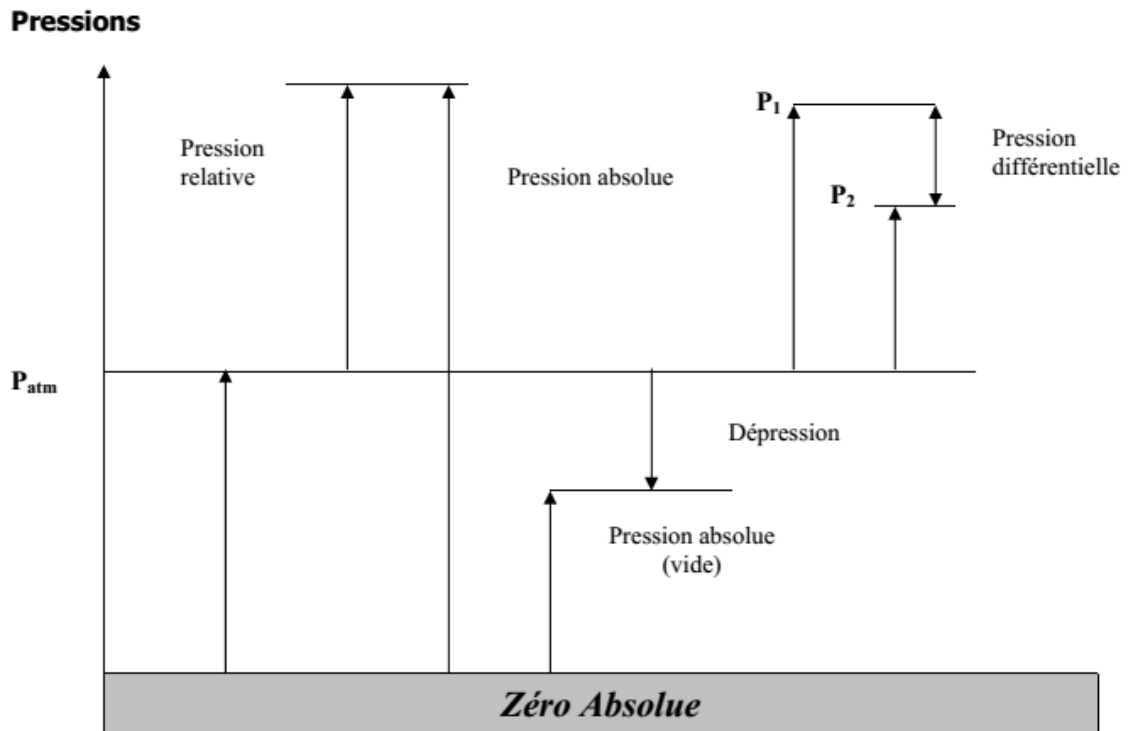


Figure 5.5: Les différentes pressions.

5.4 Capteurs de pression (ou manomètres de pression)

5.4.1 Principe

Un manomètre ou capteur de pression est un instrument destiné à mesurer la pression des fluides (liquide ou gaz).

Les mesures de pression sont effectuées suivant différents principes à savoir [8] :

- Application d'une masse connue en réaction à l'effet d'une pression sur une section connue (balances manométriques).
- Modification du niveau d'un liquide sous l'effet de la pression (manomètre à liquide).
- Détection de la déformation d'un élément sensible sous l'effet de la pression : on cite par exemples :
 - ✓ Tube de bourdon.
 - ✓ Capteurs de pression à jauges métalliques,
 - ✓ Capteurs de pression à jauges piézo-résistives,
 - ✓ Capteurs de pression par variation d'inductances,
 - ✓ Capteurs de pression piézo-électriques.

5.4.2 Modes de détermination de la pression

On peut concevoir ou réaliser des appareils pour mesurer :

- ❖ **La pression différentielle** : chacune des deux prises de pression est reliée à un côté de l'organe sensible de l'appareil de mesure.
- ❖ **La pression absolue** : l'un des côtés de l'appareil est relié à la prise de pression l'autre est branché au vide intégral.

- ❖ Il existe également des appareils qui mesurent la pression au-dessus et en dessous de la pression atmosphérique (**pression relative**), ces appareils sont appelés manovacuomètres.

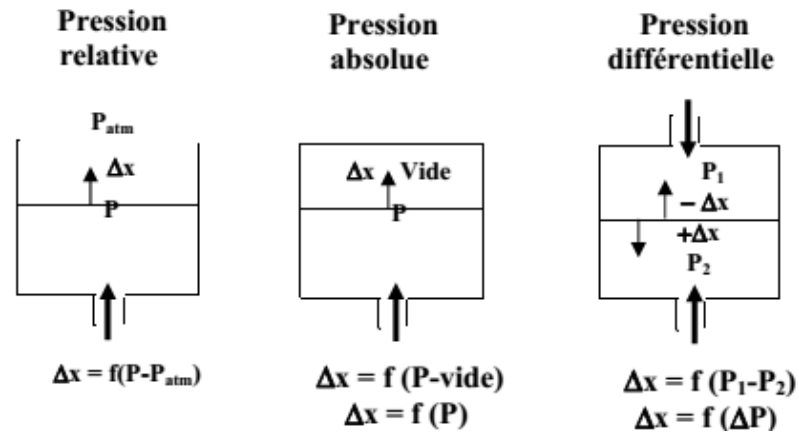
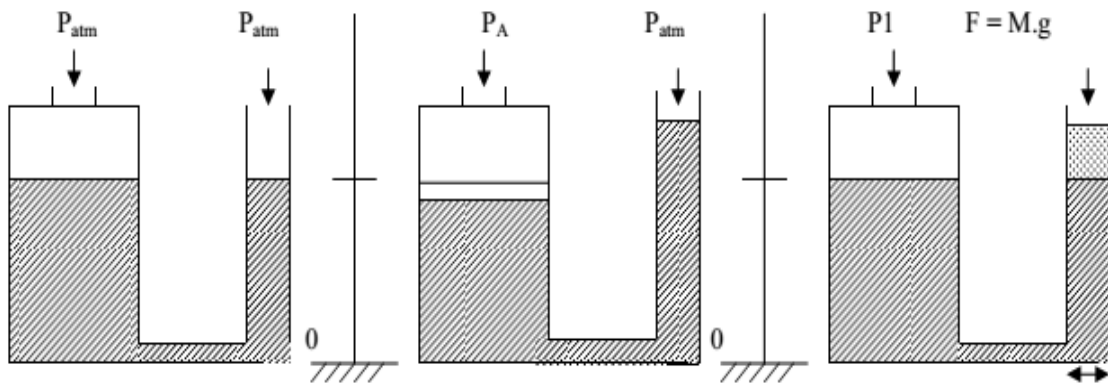


Figure 5.6: Les modes de détermination de la pression.

5.4.3 Classification des capteurs (manomètres)

a) Balance manométrique

Dans le capteur de pression à équilibre de force ou balance manométrique, le système contrebalance les effets des forces de pression pour rester dans une position d'équilibre.



$$P_A = \frac{F}{S} = \frac{M.g}{S} \quad (5.9)$$

b) Capteurs hydrostatiques ou Manomètres à liquide

C'est le plus simple de tous les manomètres. Son principe repose sur l'application de la relation $P_A - P_B = \rho g(Z_B - Z_A)$ et la mesure consiste à déterminer la hauteur $h = Z_B - Z_A$,

Les manomètres couvrent un domaine de 10 à 10^5 Pa pour la mesure de pression de gaz uniquement.

5.4.4 Pression pour les fluides (liquide et gaz)

Pression hydrostatique :

A l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée. Pour chacun des quatre récipients représentés sur la figure 5.7, la pression au fond de ceux-ci est identique est égal a :

$$P_{pa} = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.10)$$

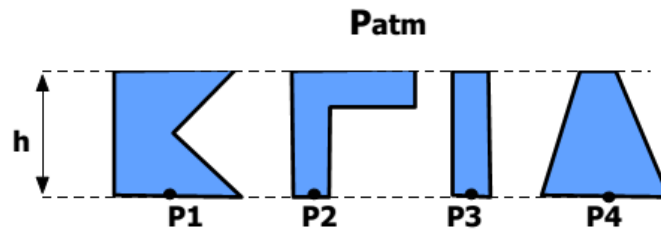


Figure 5.7: Pression hydrostatique.

Pression due à des forces extérieures : Un fluide se déplaçant à une vitesse V crée une pression supplémentaire P :

$$P_{pa} = 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \quad (5.11)$$

Pression totale - charge : C'est la somme de la pression hydrostatique, de la pression due aux forces extérieures et de la pression hydrodynamique. Celle-ci a la même valeur en tous points pour un fluide en mouvement horizontal (incompressible de viscosité négligeable), c'est le théorème de Bernouilli.

5.5 Manomètres hydrostatiques

5.5.1 Fonction remplie



Figure 5.8: Manomètre hydrostatique.

Comme le montre l'équation (5.12) :

$$h = \frac{P_{pa}}{\rho \cdot g} \quad (5.12)$$

La hauteur du liquide fournit une mesure de la pression. La sensibilité de l'appareil est d'autant plus importante que la masse volumique du liquide est faible.

5.5.2 Manomètre à tube en U

La différence d'altitude h du liquide manométrique, entre les deux cotés d'un même tube en U, donne une mesure de la différence de pression P entre les deux extrémités du tube. Ce manomètre offre une sensibilité sur sa partie droite :

$$m = \frac{da}{dP} = \frac{dh}{2.dP} = \frac{1}{2\rho g} \quad (5.13)$$

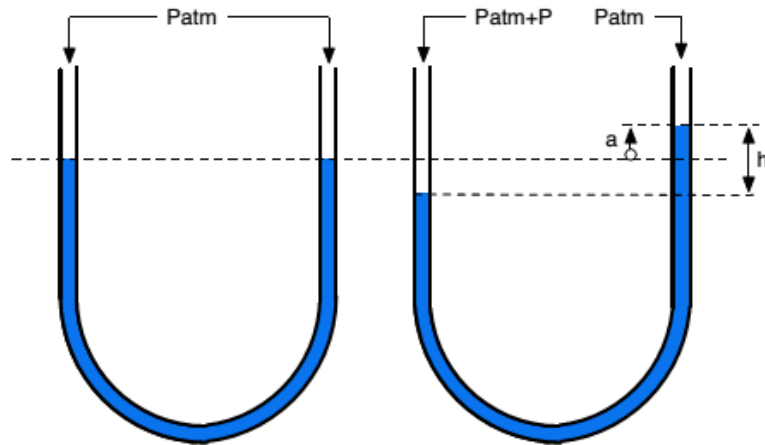


Figure 5.9: Tube en U.

On peut augmenter la sensibilité en utilisant un tube en U de sections inégales figure 5.10. Dans ce cas :

$$m = \frac{da}{dP} = \frac{S1.dh}{(S1+S2)dP} = \frac{S1}{(S1+S2)\rho g} \quad (5.14)$$

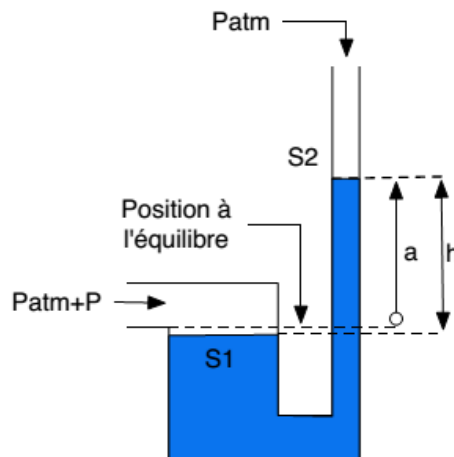
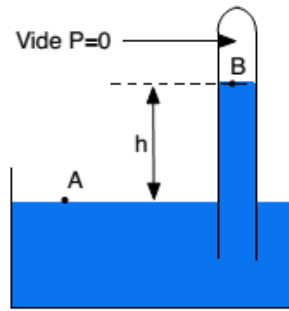


Figure 5.10: Tube en U de sections inégales.

5.5.3 Mesure de la pression atmosphérique

Baromètre de Torricelli : est un tube en verre d'environ 90 cm de longueur, rempli de mercure, clos à une extrémité :

La hauteur h fournie une mesure de la pression atmosphérique. Pour une pression atmosphérique de 1013 mbars , $h = 0,7993 m$.

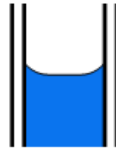


5.5.4 Problème de la capillarité

Dans les tubes en U de faible section ($< 5 \text{ mm}$), contenant un liquide manométrique, il existe d'une part, des forces de cohésion entre les molécules du liquide, et d'autre part, des forces d'adhésion entre les molécules du liquide et celle du tube.

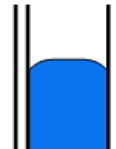
Premier cas : les forces d'adhésion sont supérieures aux forces de cohésion, on dit que le liquide mouille les parois du tube.

Exemple : eau + verre, le ménisque ainsi formé est concave.



Deuxième cas : les forces de cohésion sont supérieures aux forces d'adhésion, le liquide ne mouille pas les parois du tube.

Exemple : mercure + verre, le ménisque formé est convexe.



Loi de Jurin : L'ascension et la dépression capillaire sont :

- proportionnelles à la tension superficielle du liquide ;
- inversement proportionnelles à la masse volumique de ce liquide ;
- inversement proportionnelles au diamètre du tube capillaire utilisé.

5.5.5 Avantages et inconvénient des manomètres à tubes

Les manomètres à colonne de liquide couvrent un domaine de 0 à $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ pour la mesure de pression de gaz uniquement.

Avantages :

- bonne précision, on peut dépasser $0,1 \%$;
- bonne stabilité ;
- construction simple et peu coûteuse.

Inconvénients :

- encombrant et fragile ;
- ils sont sensibles à la température et aux vibrations ;
- les tubes doivent être parfaitement calibrés ;

- les liquides visqueux, malpropres, les tubes gras, sont des causes d'erreurs ;
- ces appareils ne traduisent pas la pression mesurée en un signal analogique exploitable en régulation industrielle.

5.5.6 Domaine d'emploi

- mesure des pressions absolues, relatives ou différentielles jusqu'à deux bars ;
- pratiquement la colonne de liquide ne peut dépasser deux mètres ;
- réservé plutôt pour des usages en laboratoire ou comme appareils étalons.

5.6 Manomètres à déformation de solide

5.6.1 Manomètre à tube de Bourdon

5.6.2 Fonctionnement

Le tube de Bourdon est brasé, soudé ou vissé avec le support de tube qui forme généralement une pièce complète avec le raccord. Par l'intermédiaire d'un trou dans le raccord, le fluide à mesurer passe à l'intérieur du tube [1].

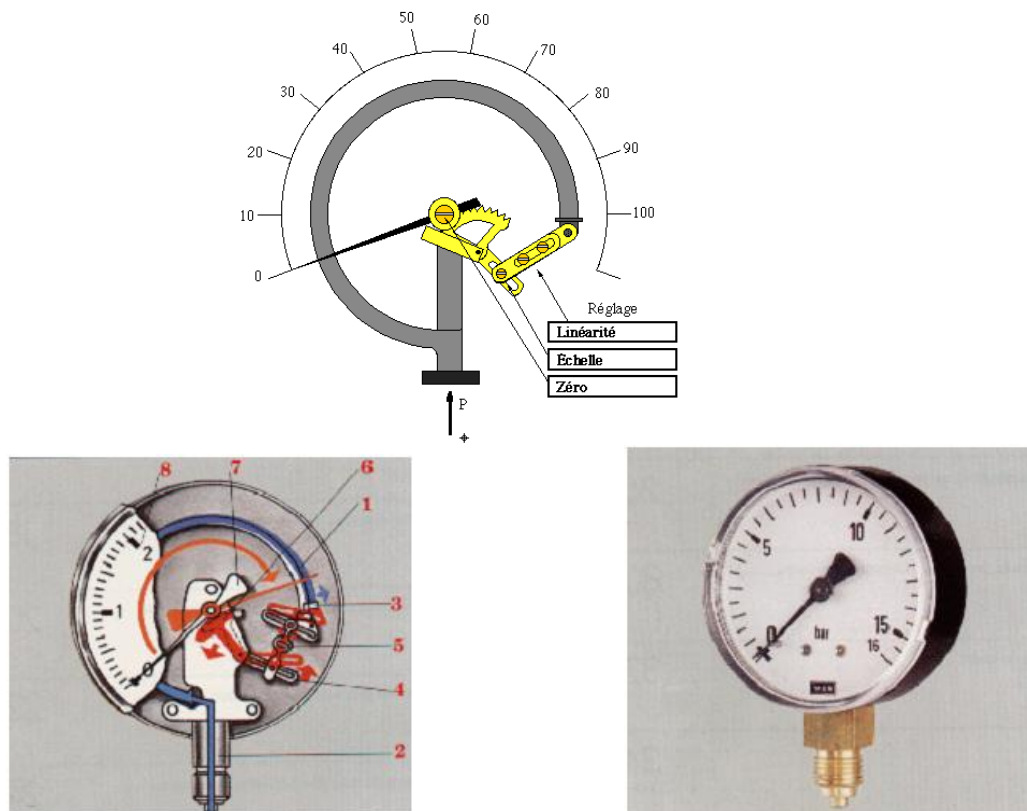


Figure 5.11: Manomètre à tube de Bourdon

Où :

1. Organe moteur, tube de Bourdon. 2. Support de tube. 3. Capuchon du tube.
4. Secteur denté. 5. Bielle. 6. Engrenage. 7. Aiguille. 8. Cadran.

La partie mobile finale du tube se déplace lors de changement de pression (effet Bourdon). Ce déplacement qui est proportionnel à la pression à mesurer, est transmis par l'intermédiaire du

mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier.

5.6.3 Utilisation

Les manomètres à tube de Bourdon sont utilisés pour la mesure de pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides, à condition que ceux-ci ne soient ni hautement visqueux ni cristallisant. Les étendues de mesure s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0... 0,6 bar à 0... 4000 bars. La forme du tube dépend de l'étendue de mesure. Pour les étendues jusqu'à 0... 40 bars inclus on utilise normalement la forme en arc et à partir de 0... 60 bars la forme hélicoïdale. Les appareils sont fabriqués avec le raccordement vertical ou arrière [8]. Il est conseillé de ne les utiliser qu'entre le premier quart et le dernier quart de l'échelle à cause de l'hystérésis. Il convient également de les protéger contre les risques de surpression ou de dépassement d'échelle. Le tube de Bourdon ne permet pas de mesurer les phénomènes rapides et évolutifs de pression. L'incertitude de mesure varie de 0,02 à 0,2 % pour le domaine de mesure de 0 à $3 \cdot 10^8$ Pa.

5.6.4 Avantages et inconvénients

Avantages :

- précision,
- domaine d'emploi.

Inconvénients :

- prix,
- complexité.

5.7 Manomètre à membrane

5.7.1 Fonctionnement

La membrane est tendue entre deux brides. Par un trou dans le raccord, le fluide à mesurer arrive dans la chambre de pression en dessous de la membrane. La membrane se déplace sous l'effet de la pression [1].

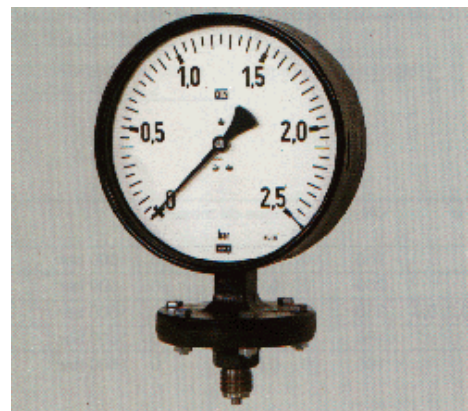
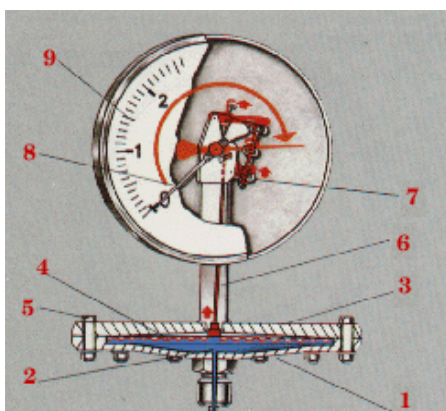


Figure 5.12: Manomètre à membrane.

Où :

1. Bride inférieure
2. Chambre de pression
3. Bride supérieure
4. Organe moteur, la membrane
5. Vis Bielle
6. Engrenage
7. Aiguille
8. Cadran

Le déplacement de la membrane est proportionnel à la pression mesurée et est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier. En cas de risque de corrosion due à des fluides agressifs, on peut protéger toutes les parties en contact avec le fluide par enduction de plastique ou par un film de protection.

5.7.2 Utilisation

Les manomètres à membrane sont utilisés principalement pour la mesure de faibles pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0...16 mbars à 0... 40 bars. Les membranes de ces manomètres sont très minces et ondulées. De par leur forme, ils sont moins sensibles aux vibrations que les manomètres à tube et sont plus faciles à protéger contre les surcharges et les fluides agressifs [8]. Pour l'utilisation avec des fluides hautement visqueux ou cristallisants il est possible de les équiper de brides ouvertes. Les appareils sont fabriqués avec un montage de membrane horizontale (à angle droit par rapport au cadran) ou vertical (parallèle par rapport au cadran). Etant donné qu'il n'y a pas de différence fondamentale de fonctionnement, la description suivante concerne l'exécution la plus courante, avec la membrane horizontale.

5.8 Manomètre de pression absolu

5.8.1 Fonctionnement

Le principe de mesure de la pression absolue est indépendant de la forme de l'organe moteur. La pression du fluide à mesurer est mesurée par rapport à une pression de référence qui doit être égale à la pression absolue (vide absolu) [1]. C'est à dire le côté de l'organe moteur qui n'est pas en contact avec le fluide à mesurer doit se trouver à cette pression de référence. Selon la forme de l'organe moteur, on l'atteint en évacuant et étanchéifiant soit une chambre de référence soit le boîtier enrobant le système. La transmission du mouvement de l'organe moteur s'effectue comme pour les manomètres pour pression relative.

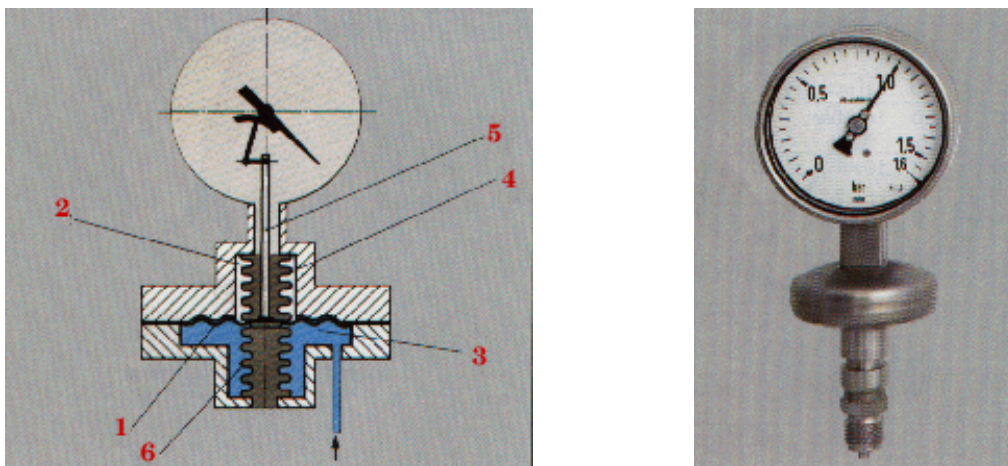


Figure 5.13: Manomètre de pression absolu.

Où :

- 1. Organe moteur
- 2. Chambre de référence
- 3. Chambre de mesure
- 4. Soufflet métallique
- 5. Biellette.

5.8.2 Utilisation

Les manomètres pour pression absolue sont utilisés pour la mesure de pression sans subir les variations de la pression atmosphérique environnante. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0...10 mbar à 0...100 bar absolue [8].

5.9 Manomètre à capsule

5.9.1 Fonctionnement

La capsule est montée sur le raccord soit directement soit par l'intermédiaire d'un tube métallique. Par un trou dans le raccord le fluide à mesurer passe à l'intérieur de la capsule. Sous l'effet de la pression les demi-parties de la capsule se bombent [2]. Ce déplacement proportionnel à la pression mesurée est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier.

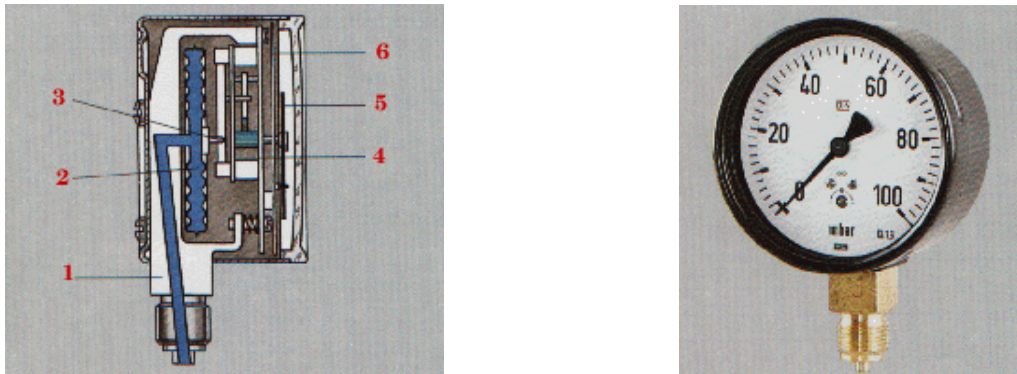


Figure 5.14 : Manomètre à capsule.

Où :

1. Support de l'organe moteur, 2. Organe moteur (la capsule), 3. Bielle, 4. Mouvement
5. Aiguille, 6. Cadran

5.9.2 Utilisation

Les manomètres à capsule sont utilisés pour la mesure de faibles et très faibles pressions positives ou négatives, spécialement pour des fluides gazeux. Il y a certaines restrictions pour la mesure de liquides. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0... 2,5 mbar à 0... 600 mbar. Les organes moteur à capsule sont une forme spéciale de membrane. Ils comportent deux membranes ondulées concentriquement, assemblées de façon étanche en une capsule. Pour les étendues de mesure très basses il est possible d'assembler plusieurs capsules pour en faire un genre de soufflet. Pour les appareils type de profil on utilise un soufflet conventionnel. Les appareils sont fabriqués soit avec la capsule montée verticalement (parallèle au cadran), soit horizontalement (perpendiculaire au cadran). Le raccordement se fait en dessous ou à l'arrière [8].

5.10 Manomètres pour pression différentielle

5.10.1 Fonctionnement

Une capsule montée dans un boîtier étanche résistant à la pression, est soumise, de l'intérieur et de l'extérieur, à une pression. La différence de pression entre les deux parties provoque un mouvement de

la capsule. Ce déplacement proportionnel à la différence de pression mesurée est transmis, par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille sur le cadran en tant que valeur de pression différentielle. Les deux pressions individuelles ne sont pas affichées [2].

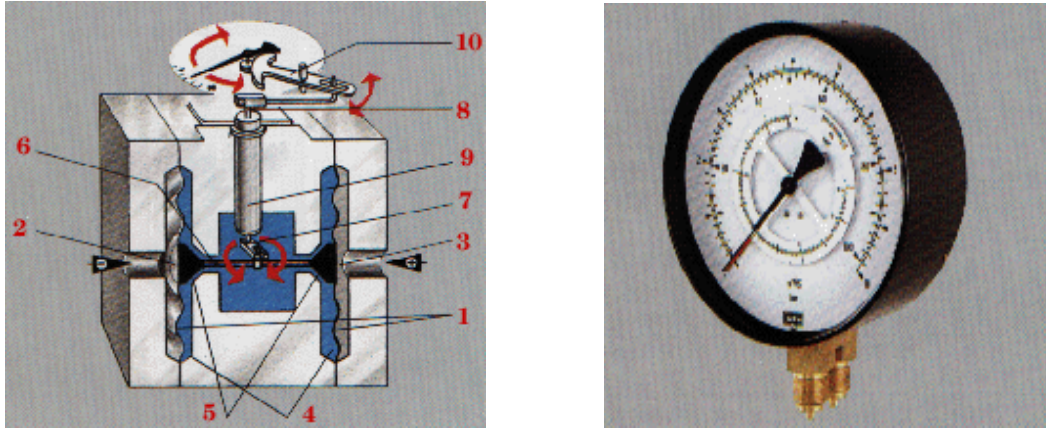


Figure 5.15: Manomètres pour pression différentielle.

Où :

- 1. Organe moteur, la membrane
- 2. Chambre de mesure (-)
- 3. Chambre de mesure (+)
- 4. Chambre de mesure
- 5. Soupape double
- 6. Bielle
- 7. Levier de transmission
- 8. Axe d'entraînement
- 9. Tube de torsion
- 10. Mouvement.

5.10.2 Utilisation

Les manomètres pour pression différentielle sont utilisés pour mesurer la différence de pression de deux pressions individuelles. Ils sont construits avec toutes les formes d'organe moteur tels qu'ils sont utilisés dans les manomètres pour pression relative. Les plus courants sont les tubes de Bourdon, les membranes et les capsules [8].

5.11 Capteurs électriques

Ils sont particulièrement bien adaptés aux techniques modernes de régulation, traitement informatique des données, etc. Les variations de pression peuvent se traduire par des variations de différence de potentiel, de capacité, d'induction, de résistance, etc. Mais sont généralement transformées pour obtenir en sortie du capteur, un courant électrique d'intensité variant avec la pression, généralement de 4 à 20 mA.

Phénomène	Désignation du capteur
Variation de résistance	Capteur à jauge de contrainte
Variation de tension	Capteur potentiométrique
Variation capacité d'un condensateur	Capteur à variation capacité
Variation d'induction	Capteur à variation d'induction
Création des charges électrique dans un cristal	Capteur à cristal piézoélectrique

5.12 Procédés de conversion

5.12.1 Variation de résistance

Rappel de physique : La résistance d'un conducteur s'écrit ;

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (5.15)$$

a) Principe de fonctionnement

La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et le mouvement mécanique à mesurer est accouplé à un curseur qui se déplace sur celle-ci. Ainsi, la résistance entre un point fixe et la partie mobile du potentiomètre est fonction de la position à mesurer.

L'élément sensible est constitué d'un support sur lequel est déposée une piste résistive qui incorpore un liant plastique et du carbone (cas des capteurs à piste résistive) ou un bobinage résistif (cas des capteurs à fil résistif).

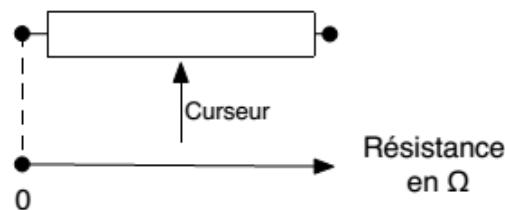


Figure 5.16: Variation de résistance.

L'élément sensible ainsi obtenu peut être rapporté :

- soit à l'intérieur d'une jupe cylindrique pour constituer un potentiomètre rotatif ;
- soit fixé sur un support plat pour réaliser un capteur de déplacement rectiligne.

b) Avantages et inconvénients

Avantages :

- signal de sortie élevé ;
- utilisable sans conditionneur ;
- possibilité d'adapter à une variation non linéaire.

Inconvénients

- durée de vie ;
- sensibilité aux vibrations.

5.12.2 Variation de capacité

Rappel de physique : Un condensateur est composé de deux conducteurs séparés par un isolant. La capacité d'un condensateur s'écrit :

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{e} \quad (5.16)$$

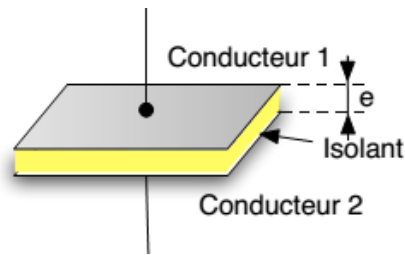


Figure 5.17: Condensateur.

Principe de fonctionnement : la variation de distance entre les armatures: le condensateur est destiné à la traduction de déplacements rectilignes ; il est inséré dans un montage en pont. Pour $dl = 0$, le pont est équilibré : $V_s = 0$. Pour un déplacement dl de l'armature mobile, la tension de sortie V_s est proportionnelle à dl .

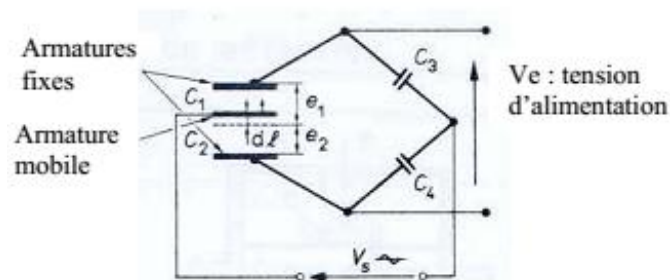


Figure 5.18: Capteur à variation de capacité.

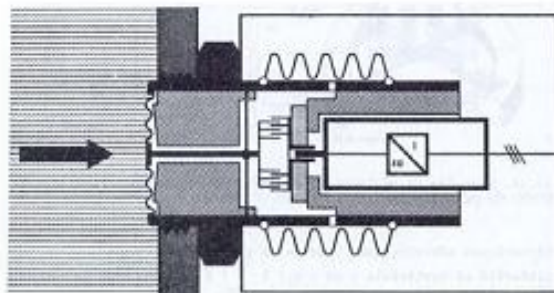


Figure 5.19: Exemple de capteur de pression par variation de distance entre les armatures.

a) Principe de fonctionnement

La différence de pression entraîne la variation de l'épaisseur entre les conducteurs, d'où une variation de la capacité de la cellule figure 5.20. Cas des capteurs de pression différentielles : Les pressions P_1 et P_2 sont transmises par l'intermédiaire d'une huile de silicone à la membrane déformable, ce qui entraîne une variation de la capacité entre les armatures et la membrane déformable figure 5.21.

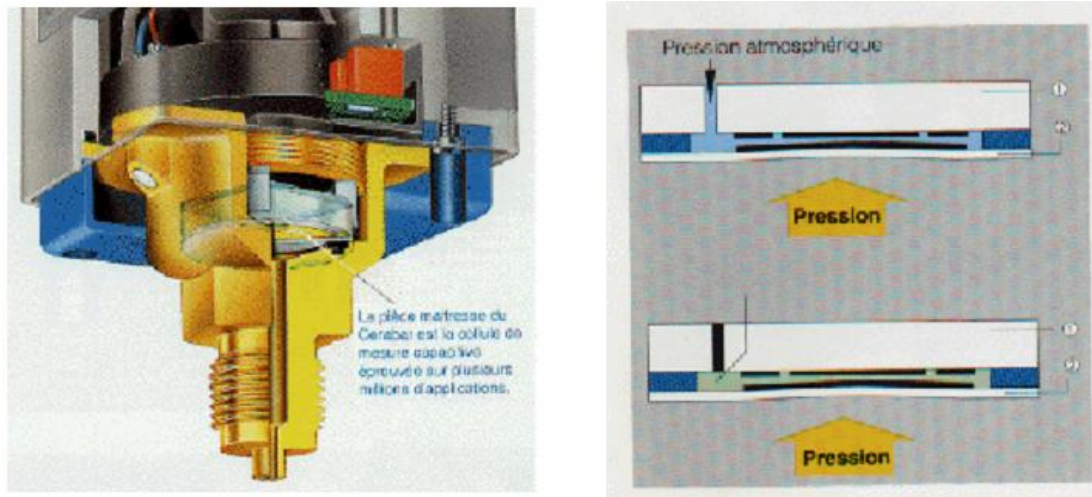


Figure 5.20: Cellule de mesure d'un capteur de pression capacitif.

b) *Avantages et inconvénients*

Avantages

- faible masse ;
- peu sensible aux accélérations.

Inconvénients

- sensibilité à la température (sauf montage différentiel) ;
- sortie haute impédance.

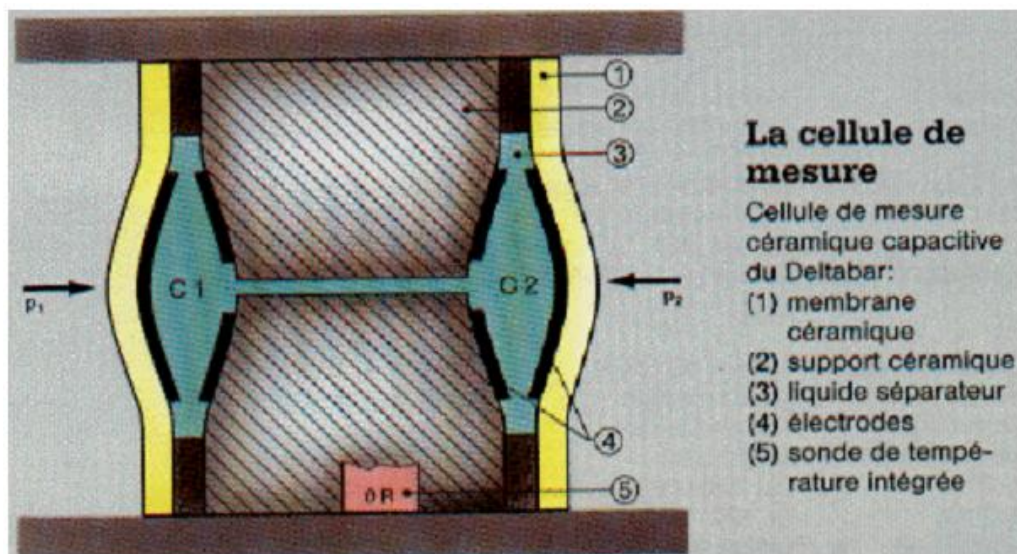


Figure 5.21: Capteur de pression différentielle - Vue en coupe.

5.12.3 *Variation d'inductance*

Rappel de physique : Un bobinage de fils conducteurs, parcouru par un courant électrique, crée un champs magnétique B . On peut canaliser les lignes de champs en ajoutant un circuit magnétique figure 5.22. Dans ce dernier cas, on peut écrire :

$$N \cdot I = R \cdot \Phi \quad (5.16)$$

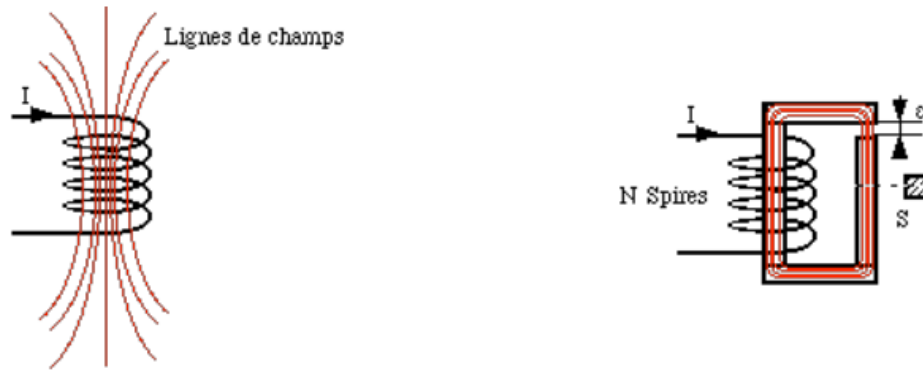


Figure 5.22: Lignes de champs magnétique.

Principes de fonctionnement : Un noyau magnétique se déplace à l'intérieur d'une bobine. Ce déplacement entraîne une variation de l'inductance de la bobine.

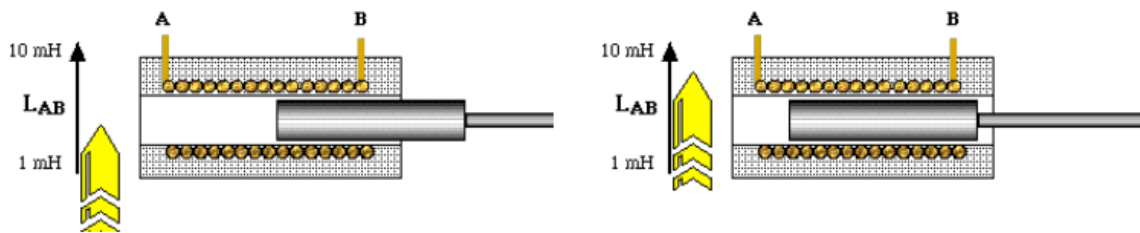


Figure 5.23: Capteur inductif.

Dans les capteurs de pression à variation d'inductance on utilise, essentiellement, la variation de la réluctance d'un circuit magnétique, par modification, suivant le cas d'un ou de plusieurs entrefers.

Les capteurs à réluctance variable utilisent généralement des circuits symétriques. La figure 6 a montre l'association d'un tube de Bourbon vrillé avec un circuit magnétique. L'armature de ce circuit, étant lié à l'extrémité libre du tube, tourne autour de son point de fixation lorsqu'on applique une pression. Cette rotation entraîne une variation différentielle des entrefers $+\Delta e$ et $-\Delta e$ (de 0,05 mm à 0,1 mm par exemple) [5]. La variation des inductances L_1 et L_2 qui en résulte peut être convertie en signal de mesure au moyen d'un montage en pont associant ces inductances avec deux inductances ou deux résistances fixes ou simplement avec deux demi-secondaires d'un transformateur d'entrée d'un équipement à courant porteur.

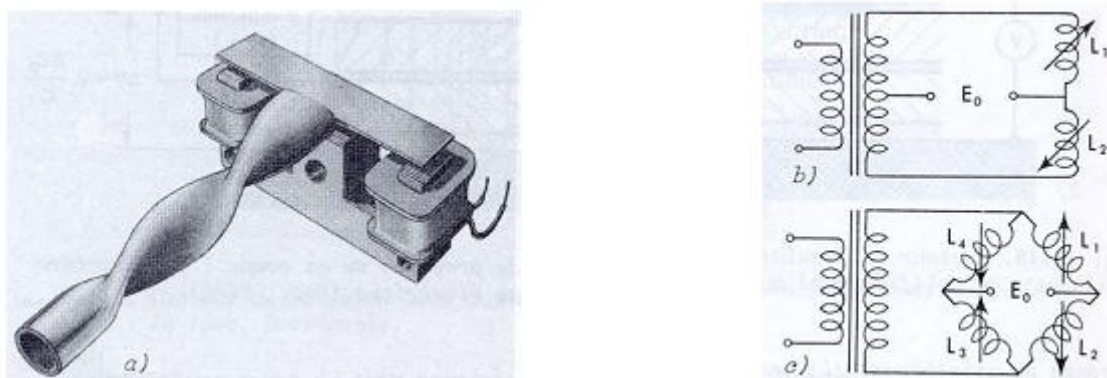
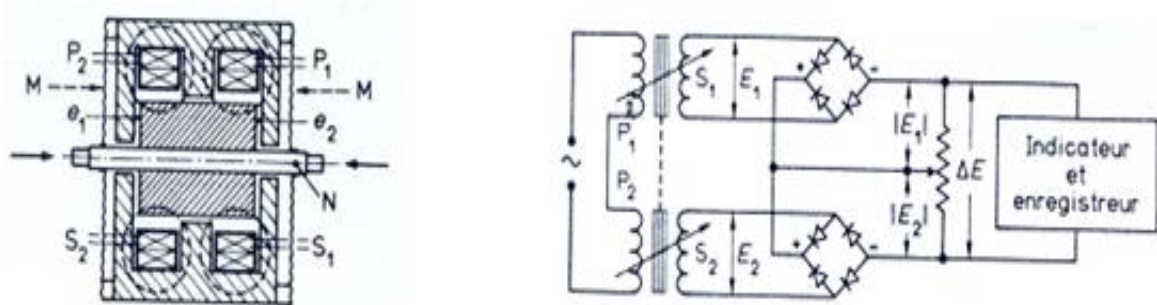


Figure 5.24: Capteur de pression à conversion par variation de réluctance :
a) constitution ; b) montage de mesure en demi-pont ; c) montage en pont complet par association de deux circuits magnétiques fonctionnant en push-pull.

On trouve également des capteurs à variation de mutuelle induction. Dans ce montage, on fait en général varier le couplage entre deux enroulements secondaires S_1, S_2 et deux enroulements primaires en série P_1 et P_2 parcourus par un courant alternatif. Cette variation de couplage est effectuée en différentiel.



a)
 e_1, e_2 : Entrefers variables
 M : Membrane de guidage
 N :Noyau central
 P_1, P_2 :Primaires reliés en série
 S_1, S_2 :Secondaires

b)
 P_1, P_2 : Enroulements primaires reliés en série
 S_1, S_2 : Enroulements secondaires
 E_1, E_2 : Tensions induites aux bornes des secondaires
 $\Delta E = E_1, E_2$: Tension après redressement

Figure 5.25: Capteur par variation de mutuelle induction :

a) constitution ; b) circuit de mesure.

Le déplacement axial du noyau central N , obtenu au moyen de deux membranes de guidage M , fait varier en sens inverses les entrefers e_1 et e_2 . La réluctance du circuit correspondant variant corrélativement, le couplage entre primaire et secondaire se trouve modifié. Les $f.e.m$ induites varient en sens inverse et proportionnellement au déplacement. Ces $f.e.m$, après redressement, sont opposées dans le circuit de mesure comportant un galvanomètre indicateur ou enregistreur.

a) Avantages et inconvénients

Avantages :

- faible hystérésis ;
- très bonne résolution ;
- signal de sortie élevé.

Inconvénients :

- sensible aux chocs et aux vibrations.

5.12.4 Jauges d'extensiométrie

Des jauges de contraintes sont collées sur le corps d'épreuve. Elles sont montées sur un pont de Wheatstone, par deux, ce qui permet une compensation des grandeurs d'influences.

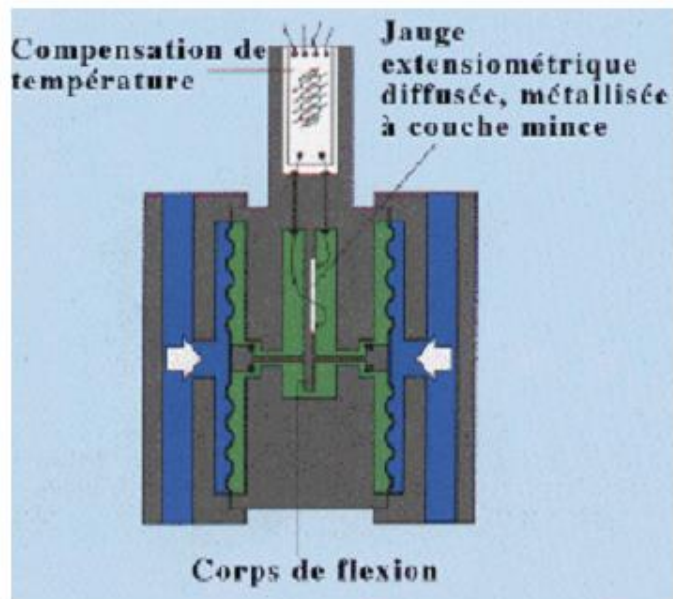


Figure 5.26: Capteur de pression avec jauge extensiométrique.

a) Avantages et inconvénients

Avantages :

- précision ;
- peut sensible aux vibration .

Inconvénients :

- faible du signal de sortie ;
- Fluage des colles.

5.12.5 Conversion par effet piézo-électrique

Les structures piézo-électriques utilisées comme corps d'épreuve assurent directement la transformation de la contrainte, produite par l'application d'une force F , en un charge électrique Q . Des structures piézo-électriques tubulaires ont été développées sous forme de câble coaxial blindé. Elles permettent la mesure de faibles variations de pressions en milieu haute pression ou pour le contrôle de trafic figure 5.27.

a) Avantages et inconvénients

Avantages :

- excellente réponse en fréquence ;
- miniaturisation.

Inconvénients :

- sensibilité à la température ;
- nécessite un câble de liaison de faible bruit.

5.13 Capteurs à balance de forces ou équilibre de forces

5.13.1 Présentation

Dans les capteurs de pression à équilibre de force, comme dans une balance, le système contrebalance les effets des forces de pression pour rester dans une position d'équilibre figure 5.28. L'intensité de la réaction du système est proportionnelle aux effets des forces de pression. Dans le cas de la balance, la masse M à l'équilibre est égal à la masse à déterminer. On peut schématiser le fonctionnement des balances à équilibre de force par le schéma blocs suivant. Le capteur, ainsi que le système peuvent ne pas être linéaire. En effet, à l'équilibre la position est identique quelle que soit la valeur des forces de pression (l'erreur étant négligeable)[2]. On peut donc écrire :

$$M = \frac{F}{A} \quad (5.17)$$

5.13.2 Capteurs à jauges de contrainte (capteurs piézoésistifs)

Ces capteurs encore appelés capteurs à jauge d'extensiométrie sont constitués d'un ruban métallique extrêmement fin, de quelques mm² de surface, collé ou directement déposé sur la pièce qui subit la déformation.

La jauge est donc soumise à des variations de longueur qui se traduisent par des variations de sa résistance électrique, proportionnelles aux variations de pression. Si on place la jauge dans un pont de Wheatstone, la variation de résistance engendre alors un signal électrique en fonction de la pression à mesurer.

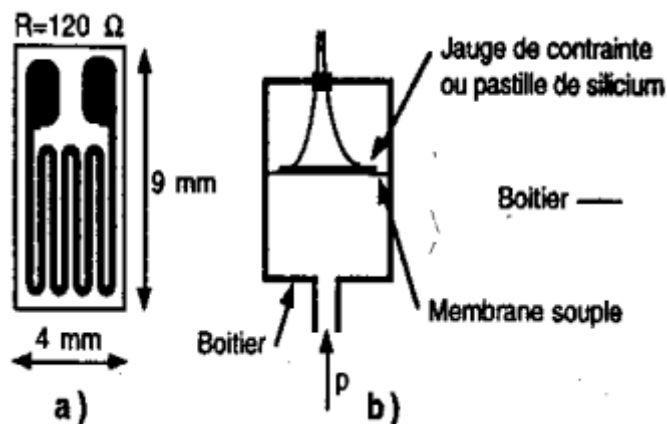


Figure 5.27: Capteurs à jauges de contrainte (capteurs piézoésistifs).

5.13.3 Capteur potentiométrique

Le curseur d'un potentiomètre est lié à une membrane, un tube de bourdon ou une capsule de manière à ce que la déformation de ce corps d'épreuve entraîne un déplacement X du curseur. Pour un potentiomètre de résistance totale R alimenté par une fém. E , la tension entre le curseur et l'une de ses extrémités est :

$V = E \cdot \frac{R(X)}{R}$, $R(X)$ étant la résistance entre le curseur et l'une des extrémités du potentiomètre. s'il y a proportionnalité entre :

- ✓ La pression P à mesurer et la déformation du corps d'épreuve.
- ✓ La déformation du corps d'épreuve et le déplacement (X) du curseur.

✓ Le déplacement X du curseur et $R(X)$.

On a alors $V = k E P$

k étant une constante, et la mesure de V permet alors de déterminer la pression P .

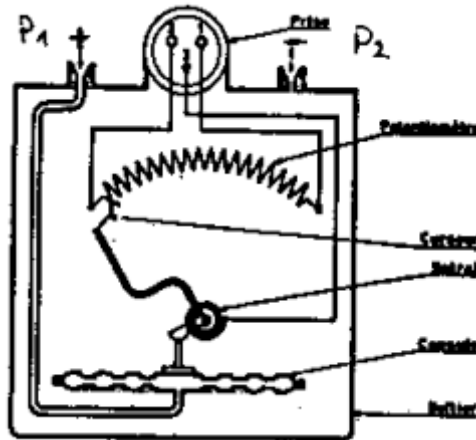


Figure 5.28: Capteur potentiométrique.

5.13.4 Capteur à variation de capacité

Ce type de capteur comporte, dans un boîtier, une électrode plane solidaire de la face soumise à la déformation. Sous l'action de la pression, l'électrode se déplace perpendiculairement à sa surface, faisant ainsi varier l'intervalle qui la sépare d'une deuxième électrode, parallèle à la première, fixée au boîtier du capteur. Chacune des électrodes constitue les armatures d'un condensateur dont la capacité varie avec la pression. On place ce condensateur soit dans un pont de Wheatstone en alternatif, soit dans un circuit oscillant pour convertir la pression en une grandeur électrique. Avec ce type de capteur, la précision de mesure est de l'ordre de 0,5% de l'étendue de mesure.

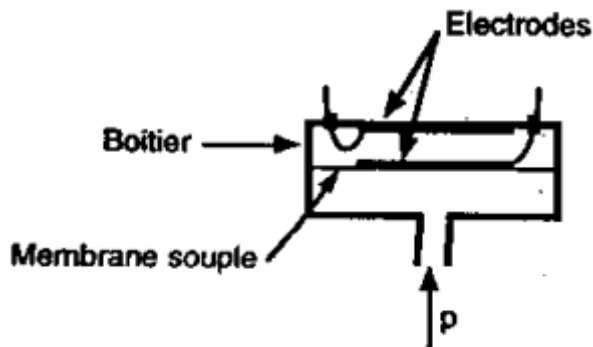


Figure 5.29: Capteur à variation de capacité.

5.13.5 Capteur à variation d'induction

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique fixe, il est le siège d'une fém. (d'un courant induit) proportionnellement à sa vitesse.

De même lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction (champ magnétique) variable (aimant par exemple) le courant induit, dont il est le siège, est proportionnel à la vitesse de variation de ce flux. Si un noyau magnétique N solidaire à un élément sensible d'un capteur de pression (membrane, capsule ou soufflet) subit un déplacement sous l'effet de la déformation de ce dernier. On observera des variations de courant induit liées à la position de N vis à vis des bobines donc à la pression [2].

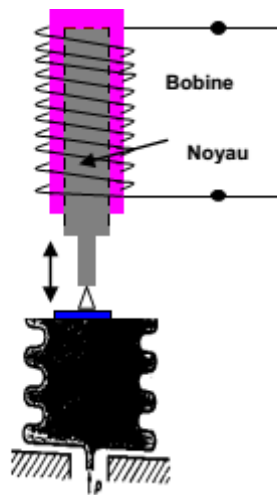


Figure 5.30: Capteur à variation d'induction.

5.13.6 Capteur à cristal piézoélectrique

Les forces de pression qui agissent sur un cristal piézoélectrique font apparaître des charges électriques qui donnent naissance à une différence de potentiel proportionnelle à la pression à mesurer. Ce capteur convient essentiellement à la mesure des variations rapides de pression.



Figure 5.31: Capteur à cristal piézoélectrique.

Les structures piézo-électriques utilisées comme corps d'épreuve assurent directement la transformation de la contrainte, produite par l'application d'une force F , en une charge électrique Q .

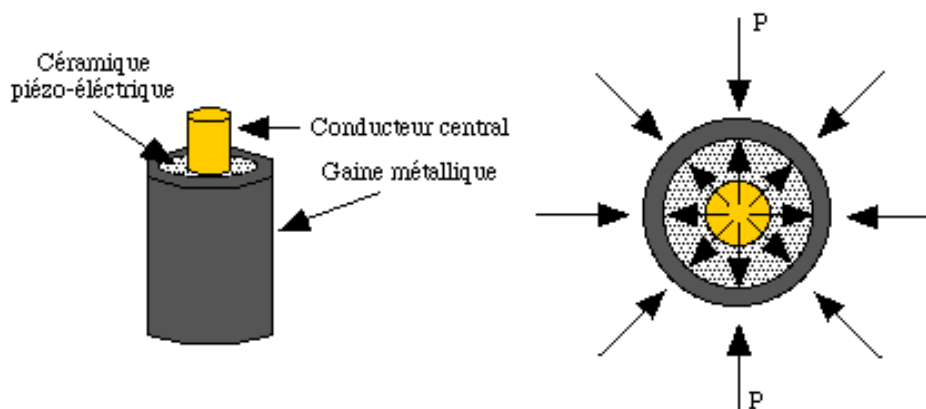


Figure 5.32: Capteur piézo-électrique.

Des structures piézo-électriques tubulaires ont été développées sous forme de câble coaxial blindé. Elles permettent la mesure de faibles variations de pressions en milieu haute pression ou pour le contrôle de trafic.

a) Avantages et inconvénients

Avantages :

- Excellente réponse en fréquence ;
- Miniaturisation.

Inconvénients :

- Sensibilité à la température ;
- Nécessite un câble de liaison de faible bruit.

Chapitre 6 **Mesure de Niveaux et Débits**

6.1 Introduction

La mesure du niveau d'un fluide, notamment l'eau demeure une part très importante des mesures physiques du domaine de l'eau. C'est un domaine où les mesures in situ restent primordiales dans le renseignement sur le niveau de l'eau dans le temps et l'espace et qui restent irremplaçable pour longtemps. Un modèle numérique n'est pas réaliste sur le plan économique. En effet, la description très fine de la géométrie du fond du lit et des berges et réactualisation fréquente de cette information nécessite d'énormes moyens.

L'information sur le niveau d'eau dans cours d'eau est utilisée principalement pour trois applications :

- l'annonce et la prédiction des crues.
- la mesure du débit du cours d'eau
- la gestion d'aménagements hydrauliques.

Il existe deux catégories de système de mesure du niveau d'eau [1] :

Les échelles limnimétriques

qui permettent d'effectuer une lecture de la mesure du niveau, sans enregistrement.

Les limnigraphes ou limnimètres

qui permettent, quel que soit leur principe de mesure, d'enregistrer le niveau d'eau. Dans certains cas, cet enregistrement est ponctuel limnigraphes à maximum ; pour la plupart des limnigraphes, cet enregistrement s'effectue dans le temps.

Les limnigraphes sont dotés d'une échelle limnimétrique, située à proximité.

6.2 Echelles Limnimétriques

Il existe trois échelles limnimétriques :

- ✓ échelles verticales ;
- ✓ échelles en gradins ;
- ✓ échelles obliques ou échelles de talus.

a) Echelles verticales

Caractérisés par une graduation perforée indéformable. Elles sont fixées à une surface verticale (digue, batardeau) ou montées dans un puits. Les niches aménagées dans les murs des digues ne sont pas propices du faite que la lecture du niveau d'eau y est souvent difficile en raison de l'accumulation de débris flottant à la surface ou présence de tourbillons, notamment en période de crue .Les échelles sont constituées de lattes longues de 100, 80,60, 40 ou 20 cm. On y fixe tous les mètres ou tous les 50cm des

plaques qui facilitent la lecture. Ces échelles sont destinées pour les spécialistes, permettant une lecture très précise figure 6.1.



Figure 6.1 : Echelle verticale mesure le niveau de barrage.

b) *Echelles en gradins*

Employées en cas de difficulté de mesurer les niveaux extrêmes avec l'emploi d'une seule échelle (variation très importante ou berges en pente faible). L'utilisation de plusieurs lattes à des hauteurs différentes, couvrant la gamme des niveaux paraît comme solution de mesure du niveau d'eau.

c) *Eéchelles inclinées*

Les échelles inclinées peuvent être soit à inclinaison standard (pente de 1 :1 ou 2 :3), soit à inclinaison quelconque et sont alors encastrables. Les échelles inclinées standards sont fixées sur une rampe en béton qui doit avoir exactement la pente voulue . Les graduations sont espacées de 50cm entre le haut et le bas. Les échelles d'inclinaison quelconques encastrables sont constituées d'un rail fixe et d'une échelle mobile encastrable.



Figure 6.2 : Echelle inclinées.

L'incertitude sur la mesure, pour les différentes types d'échelles et pour des conditions d'eau calme, est de :

- 2 cm pour une échelle verticale placée directement dans le cours d'eau.
- 5 cm pour une échelle inclinée placée directement dans le cours d'eau.
- 1 cm pour une échelle verticale placée dans un puits.

6.3 Méthodes hydrostatiques

6.3.1 Rappel de physique

Pour un liquide homogène donné, la pression relative en fond de réservoir est proportionnelle au niveau de celui-ci. La mesure de cette pression nous informe directement sur le niveau de liquide, mais dépend de la masse volumique du liquide. Dans la figure 6.3 on a la relation suivante [2]:

$$P(Pa) = \rho(kg/m^3) \cdot g(m/s^{-2})L(m) \quad (6.1)$$



Figure 6.3 : Mesure de niveau.

6.3.2 Flotteur

Le flotteur se maintient à la surface du liquide. Il est solidaire d'un capteur de position qui délivre un signalé électrique correspondant au niveau. Sa position est peu dépendante de la masse volumique de liquide.

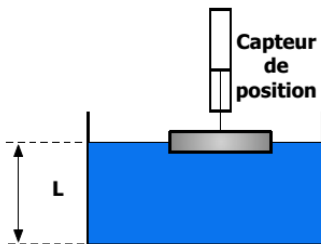


Figure 6.4 : Principe mesure de niveau par flotteur.



Figure 6.5 : Flotteur industriel.

6.3.3 Plongeur

Le plongeur est un cylindre immergé figure 6.6 et figure 6.7 dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Il est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force F (le poids apparent), fonction de la hauteur L du liquide :

$$F = P - \rho g s L \quad (6.2)$$

Avec P le poids du plongeur, s sa section et $\rho g s L$ la poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur (ρ : masse volumique du liquide, g : accélération de la pesanteur).

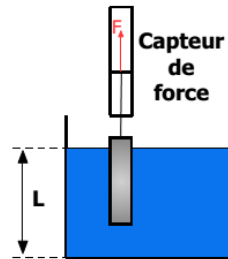


Figure 6.6 : Principe mesure de niveau par plongeur.



Figure 6.7 : Plongeur.

6.4 Méthodes électriques de mesures de niveau

Ce sont des méthodes employant des capteurs spécifiques, c'est à dire traduisant directement le niveau en signal électrique. Leur intérêt réside dans la simplicité des dispositifs et la facilité de leur mise en œuvre, Comme représenté dans [2].

6.4.1 Sondes Conductives

1°) Présentation

La sonde est formée de deux électrodes cylindriques, le rôle de l'une d'elles pouvant être assuré par le réservoir lorsqu'il est métallique figure 6.8. La sonde est alimentée par une faible tension (10 V) alternative afin d'éviter la polarisation des électrodes. En mesure continue, la sonde est placée verticalement et sa longueur s'étend sur toute la plage de variation de niveau. Le courant électrique qui circule est d'amplitude proportionnelle à la longueur d'électrode immergée, mais sa valeur dépend de la conductivité du liquide.

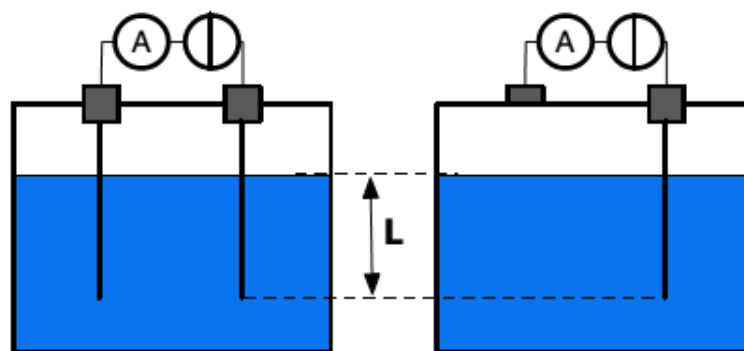


Figure 6.8 : Principe mesure de niveau par capteur de conductimétrique.



Figure 6.9 : Capteur de niveau électrique.

2*) Détection

En détection, on peut, par exemple, placer une sonde courte horizontalement au niveau seuil. Un courant électrique d'amplitude constante apparaît dès que le liquide atteint la sonde figure 6.10.

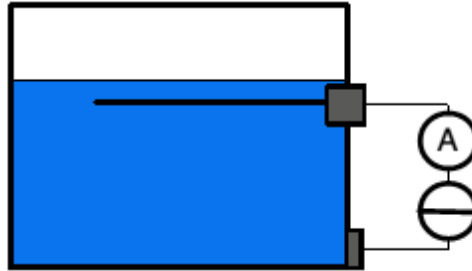


Figure 6.10 : Détection de niveau électrique.

3*) Domaine d'utilisation

Il est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs (conductance minimale de l'ordre de 50 S), non corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante (huile par exemple). La pression est comprise entre le vide et 160 bar et une température comprise entre -200°C et 250°C.

6.4.2 Sondes capacitives

Lorsque le liquide est isolant, un condensateur est réalisé soit par deux électrodes cylindriques, soit par une électrode et la paroi du réservoir si celui-ci est métallique. Le diélectrique est le liquide dans la partie immergée, l'air en dehors. L'implantation des électrodes pour mesure en continu ou en détection s'effectue comme pour le capteur conductimétrique. La mesure ou la détection de niveau se ramène à la mise en variation de capacité qui est d'autant plus importante que la constante diélectrique ϵ_r du liquide est supérieure à celle de l'air ; on prend généralement comme condition d'emploi de la méthode $\epsilon_r > 2$.

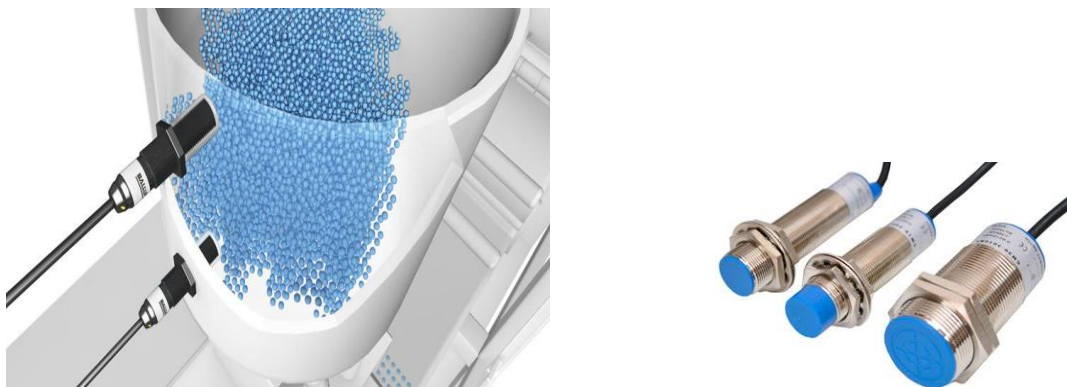


Figure 6.11 : Capteur de niveau capacitif.

Dans le cas d'un liquide conducteur, on utilise une seule électrode recouverte d'un isolant qui constitue le diélectrique du condensateur dont l'autre est formée par le contact du liquide conducteur.

6.4.3 Méthodes de Mesures fondées sur le principe de rayonnement

1°) Principe

En mesure continue, on utilise un transducteur fonctionnant successivement en émetteur et en récepteur.

Ce transducteur figure 6.12 et figure 6.13 placé au sommet du réservoir émet, dans un cône de faible ouverture, des trains d'onde acoustiques qui après réflexion sur la surface du liquide retournent vers le transducteur qui les convertit en signal électrique. L'intervalle de temps Δt séparant l'émission de la réception du train d'ondes réfléchi est proportionnel à la distance du transducteur à la surface du liquide : il est donc fonction du niveau. Δt est inversement proportionnel à la célérité du son qui dépend de la température : celle-ci doit donc être mesurée afin que puisse être effectuée la correction nécessaire. Le transducteur est une céramique piézo-électrique pour les ondes ultrasonores (40 kHz par exemple), il est de type électrodynamique pour les infrasonores (10 kHz par exemple).

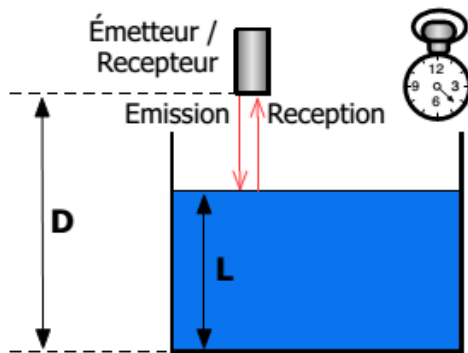


Figure 6.12 : Principe de mesure par ondes.



Figure 6.13 : Capteur de niveau acoustique.

Les ondes infrasonores qui sont moins atténuées par la propagation trouvent application pour la mesure de distances importantes (de 10 à 30 m) alors que les ondes ultrasonores procurent aux distances plus courtes une meilleure précision.

6.4.4 Mesures par radars

Le principe de fonctionnement est le même que celui des ondes acoustiques, celle-ci sont remplacée par des ondes électromagnétiques.

La vitesse des ondes électromagnétique est indépendante de :

- la composition du gaz ;
- la température ;
- la pression ;
- la densité ;
- les turbulations.

6.4.5 Absorption de rayonnement gamma

1°) Principe

La source et le détecteur sont placés à l'extérieur, de part et d'autre du réservoir ; cette disposition est particulièrement adaptée au cas de liquides très corrosifs ou sous haute pression ou à haute

température. La source est un émetteur gamma. Le détecteur est soit une chambre d'ionisation soit un ou plusieurs tubes Geiger-Muller. La Mesure est fiable et sans contact, indépendante des conditions de processe variables comme la pression, la température, la viscosité, la corrosivité, ou des éléments internes (par exemple les pales d'agitateur).



Figure 6.14 : Source.



Figure 6.15 : Récepteur.

Le blindage de la source est réalisé de façon qu'il y ait émission d'un faisceau avec un angle d'ouverture qui balaie la hauteur totale du réservoir d'une part et du détecteur d'autre part figure 6.15. La montée du liquide dans le réservoir réduit progressivement l'intensité de dose reçue par le détecteur dont le courant de sortie décroît donc de façon continue, à mesure qu'augmente le niveau. Pour les grands réservoirs ou relativement étroits, la source d'émission peut être montée à une plus grande distance du réservoir. Dans ce cas, des mesures de sécurité supplémentaire sont nécessaires. Pour des étendue de mesure importante figure 6.16, plusieurs récepteurs peuvent être utilisés. L'emploi de deux sources peut être dicté non seulement pour des grande étendue de mesure, mais encore par l'exactitude de la mesure.

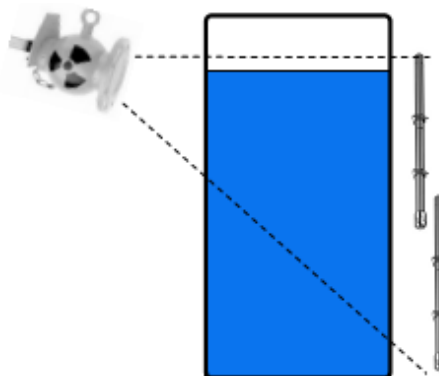


Figure 6.16 : Principe de montage pour une mesure avec deux récepteurs.

2*) Détection

En détection de niveau, la source et le détecteur sont placés en regard, au niveau du seuil à signaler. La source convenablement colmatée émet vers le détecteur un faisceau étroit et de faible divergence, le détecteur est monté horizontalement. Selon que le niveau du liquide est supérieur ou inférieur au seuil, le faisceau est ou non atténué par le liquide, ce qui se traduit en un signal électrique binaire par le détecteur.

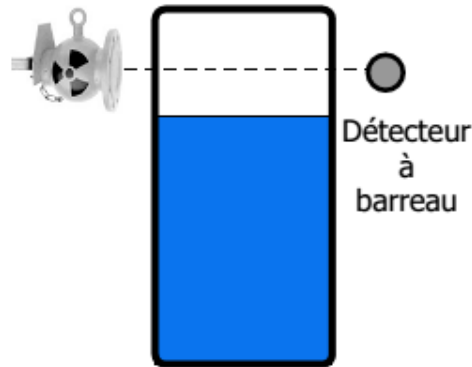


Figure 6.17 : Montage de détection de niveau.

3*) Mesure de densité

On pourra utiliser cette technique pour mesurer la densité du fluide. Le récepteur sera monté en parallèle avec la canalisation transportant le fluide figure 6.18.

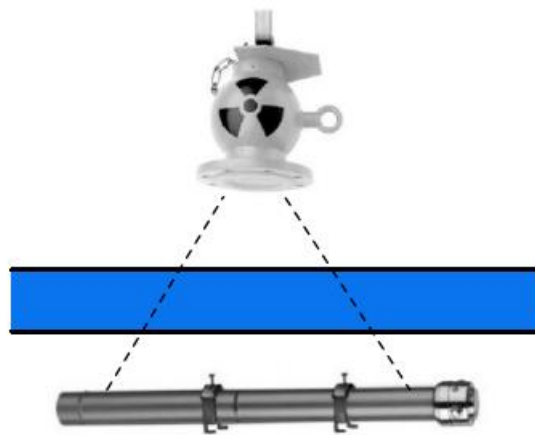


Figure 6.18 : Mesure de densité.

6.5 Mesure de débit

6.5.1 Débit

Le débit, c'est la quantité de fluide qui s'écoule ou qui est fournie par unité de temps.

Exemple : le débit d'un cours d'eau, d'une pompe, d'une vanne [2].

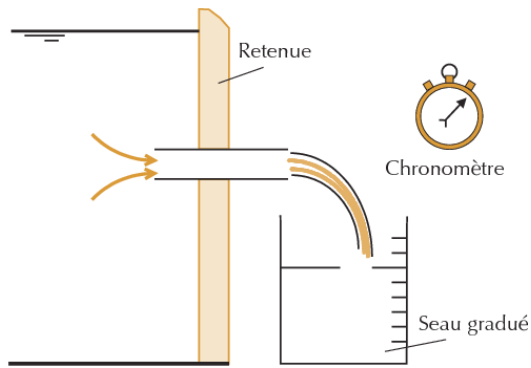


Figure 6.19 : Schéma de principe d'une mesure de débit par empotement.

Il existe deux types de débits, le débit massique Q_m (kg/s) et le débit volumique Q_v (m^3/s). Ils sont reliés par :

$$Q_m(kg/s) = \rho(kg/m^3)Q_v(m^3/s) \quad (6.3)$$

6.5.2 Régime laminaire et régime turbulent

La viscosité est la résistance d'un fluide à son écoulement uniforme et sans turbulence. En fonction de la viscosité du fluide, la répartition de la vitesse du fluide n'est pas la même sur toute la surface.



Figure 6.20 : Influence de la viscosité sur la vitesse du fluide.

Le régime laminaire d'un fluide s'effectue par glissement des couches de fluide les unes sur les autres sans échange de particules entre elles, par opposition au régime turbulent.



Figure 6.21 : Ecoulement laminaire ou turbulent.

Dans le cas d'un écoulement incompressible et isotherme, le nombre de Reynolds suffit pour déterminer le type d'écoulement :

$$R_e = \frac{V(m/s) Q(m)}{v(m^2/s)} \quad (6.4)$$

La viscosité cinématique est égale à la viscosité dynamique divisée par la masse volumique.

$$V = \frac{\mu}{\rho} \quad (6.7)$$

Un écoulement est turbulent pour $R_e > 2\,300$. Dans le cas contraire, l'écoulement est laminaire.

6.5.3 Vitesse

Dans le cas d'un écoulement laminaire, on peut déterminer le débit d'un fluide à partir de sa vitesse:

$$Q(m^3/s) = V(m/s) S(m^2) \quad (6.8)$$

6.6 Débitmètres volumiques

Pour un écoulement laminaire figure 6.20, la connaissance de la vitesse du fluide et de la section de la canalisation suffit pour déterminer le débit du fluide figure 6.21. Lors de la mise en place de ces capteurs, on s'attachera à les placer dans des parties droites de la canalisation et à une distance respectable (en général plusieurs fois le diamètre de la canalisation) de dispositif générant des pertes de charges importantes (coude, restriction, vannes, etc...).

6.6.1 Débitmètre à tube de Pitot

Dans un tube de Pitot comme montre dans la figure 6.22, la mesure des pressions statique et totale permet de connaître la vitesse du fluide.

$$V(m/s) = \sqrt{\frac{2P_{total} (Pa) - P_{statique} (Pa)}{\rho(kg/m^3)}} \quad (6.9)$$

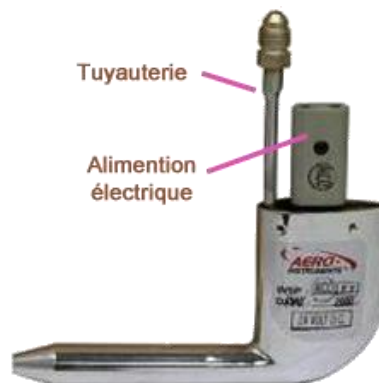
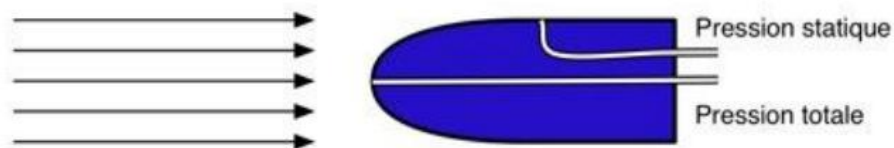


Figure 6.22 : Tube de Pitot.

$$P_{total} (Pa) - P_{statique} (Pa) = P_{dynamique} (Pa) \quad (6.10)$$

6.6.2 Débitmètres à organe déprimogène

Un resserrement de la conduite ou un changement de direction créent entre amont et aval une différence de pression ΔP liée au débit par une relation de la forme :

$$Q(m^3/s) = k(m^2) \sqrt{\frac{\Delta P(Pa)}{\rho(kg/m^3)}} \quad (6.11)$$

Avec ρ : est la masse volumique du fluide et k une constante fonction de l'organe. Cette équation est vérifiée dans une certaine gamme du nombre de Reynolds. Les principaux organes déprimogènes sont représentés sur la figure 6.23 :

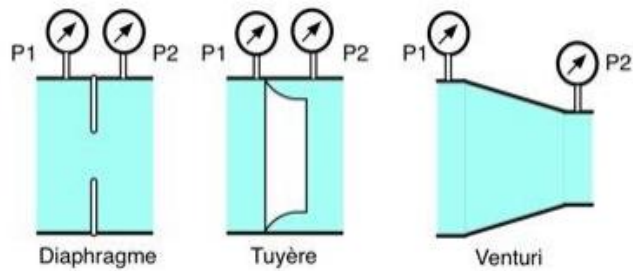


Figure 6.23 : Les différents organes déprimogènes.

Le diaphragme est l'organe déprimogène le plus utilisé.

6.6.3 Caractéristiques métrologiques

Ces dispositifs permettent des mesures dans une très large gamme de mesure ; d'une fraction de m^3/h à $10^5 m^3/h$. Les mesures sont approximativement de classe 1. Ces dispositifs entraînent des pertes de charges non négligeables, elles sont fonction du $\beta = d/D$, le rapport entre le petit et le grand diamètre de l'organe utilisé figure 6.24 [2].

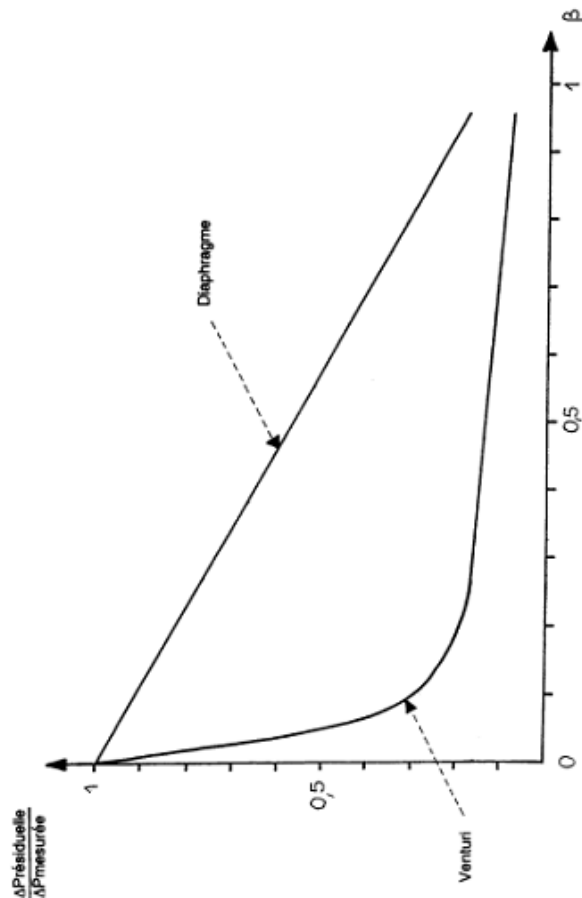


Figure 6.24 : Pertes de charge d'un diaphragme et d'un venturi.

6.6.4 Montage du transmetteur de pression différentielle

Pour mesurer le débit à l'aide d'un organe déprimogène, on utilise un transmetteur de pression différentielle (voir montage figure 6.25). En réglant le transmetteur de pression conformément au Tableau 1[1].

Tableau 6.1 : exemple de réglage d'un transmetteur de pression intelligent.

Unité physique primaire	kPa
Valeur basse étendue de mesure en unité physique primaire	0
Valeur haute étendue de mesure en unité physique primaire	50
Unité physique secondaire	m ³ /h
Valeur basse étendue de mesure en unité physique primaire	0
Valeur haute étendue de mesure en unité physique primaire	20
Type de sortie	Directe
Fonction de sortie	racine

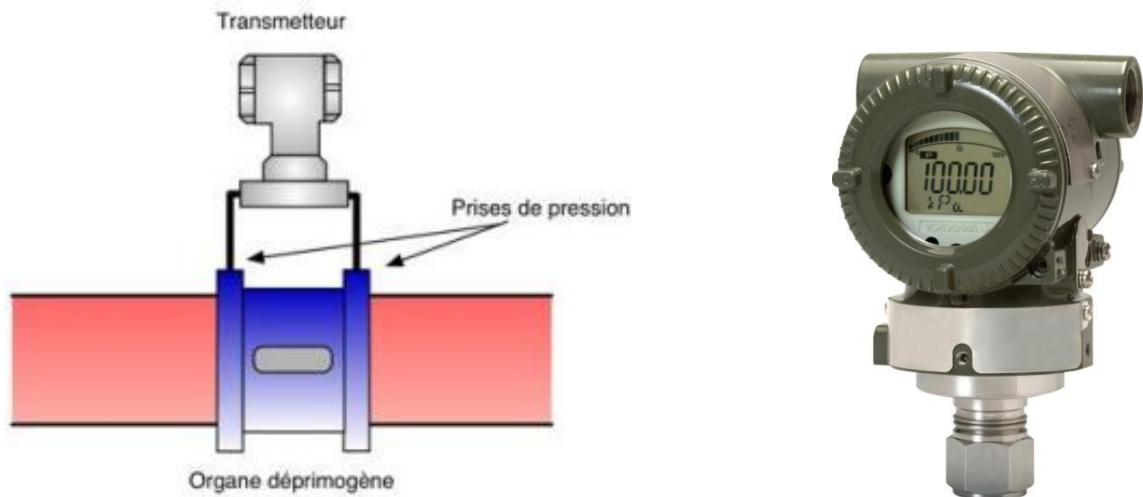


Figure 6.25 : Montage du transmetteur de pression différentielle.

En réglant le transmetteur de pression, on réalise alors les relations entre les grandeurs physiques représentées sur la figure.

Pression	0	√	50	kPa
Débit	0		20	m ³ /h
Sortie	0		100	%

Figure 6.26 : Relation entre les grandeurs physiques d'une mesure de débit par organe déprimogène.

6.6.5 Débitmètre à Ludion

Un flotteur tiens en équilibre dans une canalisation conique est représenté sur la figure 6.27. Quand le flotteur est en équilibre on peut écrire (équation d'équilibre) :

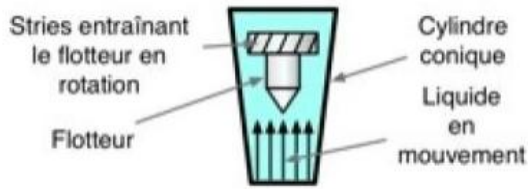


Figure 6.27 : Débitmètre à ludion.

$$Mg = \rho Vg + \rho \frac{S Cx U^2}{2} \Rightarrow U = \sqrt{\frac{2g}{\rho S Cx} (M - \rho V)} \quad (6.12)$$

Le diamètre du conduit varie linéairement en fonction de la hauteur z : $D = D_0 + az$ Le débit Q vérifie :

$$Q = \frac{\pi}{4} ((D_0 + az)^2 - D_0^2) U \quad (6.13)$$

Si $S = \frac{D_0^2}{4}$ et $az \ll D_0$, on a

$$Q = az \sqrt{\frac{2g\pi(M - \rho V)}{\rho Cx}} \quad (6.14)$$

Caractéristiques métrologiques

La gamme de mesure va :

- ✓ de 0,5 litre/h à 200 000 litres/h pour les gaz ;
- ✓ de 0,2 litre/h à 20 000 litres/h pour les liquides.

La précision est de 3 à 10% de l'étendue de la mesure. La température du fluide peut approcher 400 °C sous 25 bars. Le rotamètre introduit des pertes de charge.

6.6.6 Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine

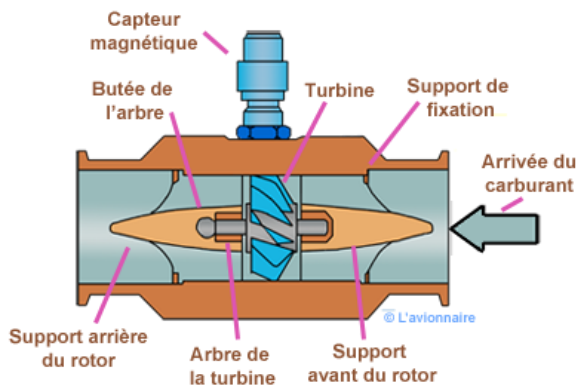


Figure 6.28 : Débitmètre à turbine.

Ce type d'anémomètre, désigné aussi comme moulinet, comprend un corps d'épreuve formé d'un ensemble de coupelle ou d'une hélice qui est mise en rotation par le fluide en mouvement comme illustre dans la figure 6.28. La vitesse de rotation est mesurée par un dispositif tachymétrique [4].

a) Montage de Mesure

On utilise les capteurs classiques de vitesse de rotation :

- ✓ La dynamo-tachymétrique ;
- ✓ Le capteur optique ;
- ✓ Le capteur inductif.

Dynamo-tachymétrique

C'est une machine à courant continu qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation de son rotor. L'inconvénient de ce type de mesure est que la dynamo-tachymétrique diminue la sensibilité de notre capteur.

Capteur optique et le capteur inductif

On transforme la vitesse de rotation en une suite d'impulsions électriques dont la fréquence est proportionnelle à cette vitesse. On utilise un procédé optique ou inductif.

b) Domaine d'utilisation

Des précisions de l'ordre de 1 % peuvent être atteintes. Cependant, la réponse peut être faussée par de fortes turbulences et par des variations de vitesses importantes. Leur domaine d'utilisation est de 0,1 à 30 m/s pour les gaz et de 0,05 à 10 m/s pour les liquides.

6.6.7 Débitmètre à palette

Une palette est soumise à la force hydrodynamique de l'écoulement, à son poids, et éventuellement à l'action d'un ressort de rappel figure 6.29. La position d'équilibre est mesurée à l'aide d'un montage potentiométrique. L'intérêt de ce type de débitmètre est sa simplicité. Il entraîne des pertes de charges.

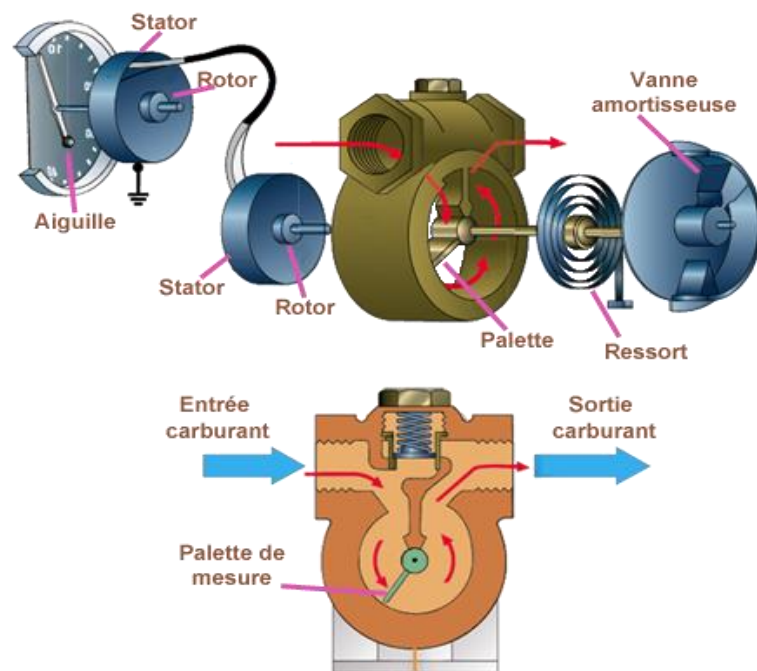


Figure 6.29 : Débitmètre à palette.

6.7 Définition de l'effet Doppler

Lorsque deux observateurs sont à égale distance d'une source sonore immobile, ils perçoivent tous deux le même son. Mais, lorsque la source sonore se déplace vers l'un des observateurs et s'éloigne de l'autre, ils perçoivent chacun un son différent. L'effet Doppler est un changement de fréquence d'une source d'ondes lorsqu'il y a déplacement relatif de la source ou de l'observateur. La fréquence perçue par l'observateur est différente de la fréquence émise : elle augmente si la source ou l'observateur se rapproche, elle diminue en cas contraire [7].



la source S est immobile.

la source S se déplace vers la droite.

Figure 6.30 : L'effet Doppler.

Exemple :

Premier cas:

- ✓ L'émetteur et le récepteur sont fixes ;
- ✓ L'émetteur émet une onde de période T_e qui se déplace à la vitesse c .

A $t = 0$ s : émission du bip 1

A $t = T_e$: émission du bip 2

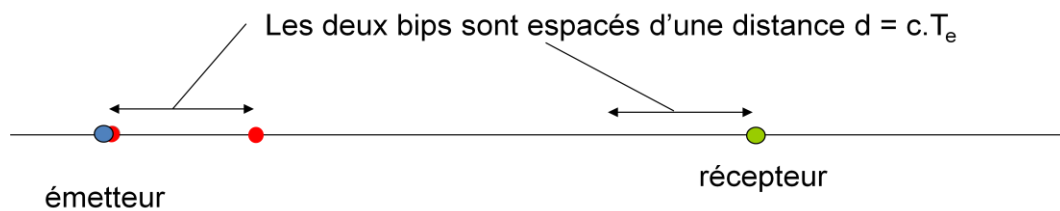


Figure 6.31 : L'effet Doppler Premier cas.

Le récepteur reçoit le bip 2 avec un retard de T_e après la réception du bip 1.

Conclusion : l'onde perçue par le récepteur à la même période donc la même fréquence que celle envoyée par l'émetteur.

Deuxième cas:

- L'émetteur se déplace à la vitesse V_e vers le récepteur fixe ($V_e < c$)

A $t = 0$ s : émission du bip 1

A $t = T_e$: émission du bip 2

b) Repérage d'obstacle

La première utilisation des ultrasons fut le repérage de bâtiments sous-marins ennemis. Le principe de cette méthode est simple : les ultrasons se réfléchissent sur un obstacle et reviennent à leur point de départ en produisant un écho : connaissant le temps séparant l'émission de l'onde et la réception de l'écho et la vitesse de l'ultrason dans l'eau de mer (environ 1 500 m/s), il est facile d'en déduire la distance séparant l'émetteur de l'obstacle. Cette méthode n'est plus seulement militaire et a été adaptée à tous types de repérages d'obstacles Comme mentionné dans [8].

c) Utilisation industrielle

En métallurgie, les ultrasons sont utilisés pour le dégazage des métaux, la détection de défauts, pour l'usinage, et la soudure de certains matériaux. Un foret solidaire de la partie mobile d'un générateur d'ultrasons peut être utilisé pour le perçage, en effectuant des mouvements de va-et-vient à la fréquence des ultrasons. Une précision de quelques micromètres est obtenue, et ce même dans des matières extrêmement dures. Les ultrasons sont également employés pour la stérilisation de certains liquides, notamment du lait, l'homogénéisation ou le prétraitement de boues d'épuration ou de résidus industriels, la prospection de gisements minéraux, la déflagration d'explosifs commandée à distance, le nettoyage de certains corps, tels que les fûts de bois utilisé pour la fabrication du vin, ou encore la soudure de matières plastiques.

De nombreuses industries comme l'industrie pharmaceutique, automobile ou horlogère ont également recours aux ultrasons à des fins de nettoyage : différents objets peuvent ainsi être plongés dans des bains à ultrasons afin d'être débarrassés des impuretés qui s'y seraient logées ou accumulées.

d) Utilisation des ultrasons en médecine

Les ultrasons sont utilisés dans le diagnostic et le traitement de différentes affections. Dans un but diagnostique, les ultrasons sont employés par l'échographie, qui explore les organes internes mous ou remplis de liquide par la réflexion et l'analyse d'un faisceau d'ultrasons, et par le Doppler ; cette dernière technique étudie la vitesse de la circulation artérielle et veineuse au moyen d'une sonde émettrice d'ultrasons qui se réfléchissent sur les globules rouges puis sont recueillis par un récepteur situé sur la même sonde. Dans un but thérapeutique, les ultrasons sont exploités dans le traitement symptomatique d'infections des tissus mous (muscles, ligaments, tendons). Cette technique, appelée ultrason thérapie, fait appel à des ondes de haute fréquence permettant de réduire l'inflammation en améliorant la circulation locale. Les ultrasons sont également utilisés pour fragmenter des calculs, surtout urinaires, par voie externe, avec une technique appelée lithotripsie.

6.8.2 Effet Doppler ultrasonore

Il existe deux techniques utilisées Doppler dans l'ultrasonore. L'effet Doppler continue et pulsé.

a) Effet Doppler continue

Les systèmes doppler à émission continue sont les premiers appareils ultrasonores dans l'effet doppler. Doppler n'est apparu que dans les années 1960 que SAMUTURA trouva une application médicale de l'effet Doppler. Il envoie un faisceau ultrasonore continu sur une cavité ventriculaire gauche et recueille le faisceau réfléchi. Ce sont des méthodes qui consistent à diriger des ondes ultrasoniques de façon continue vers un obstacle avec un angle qui ne doit jamais être égal à 90°, ils utilisent deux capteurs ultrasoniques hémisphériques dans la même sonde, le premier considéré comme un émetteur émis les ondes ultrasonores et l'autre reçoit les ondes. Cela signifie aussi qu'il n'y a pas moyen de trouver de

quelle profondeur proviennent les échos. Le signal reçu par le récepteur peut être vu comme une onde porteuse modulée en fréquence et en amplitude par les échos provenant de l'obstacle. Une manière d'extraire l'information Doppler consiste à comparer le signal reçu au signal émis, signal qui prend la valeur de référence. La différence de fréquence entre ces deux signaux engendre alors un battement à la fréquence Doppler, comme mentionné dans [8].

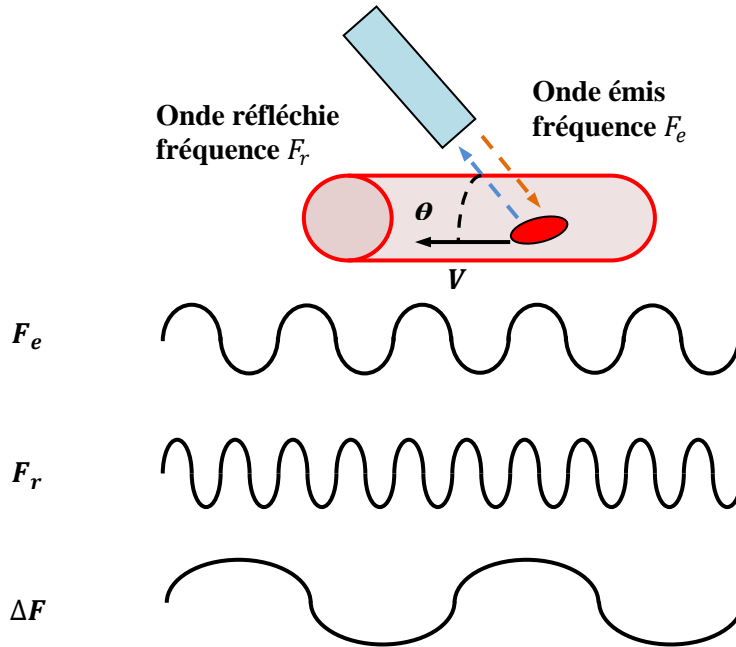


Figure 6.33 : Principe Doppler continu.

La formule qui donne la relation entre la fréquence d'émission d'un appareil Doppler, la fréquence Doppler et la vitesse de l'objet mobile.

$$\Delta F = \frac{2 F_e V \cos \alpha}{c} \quad (6.18)$$

$\Delta F > 0$: si le déplacement se fait vers le transducteur d'émission.

$\Delta F < 0$: dans le cas contraire.

Les avantages du Doppler continu sont sa grande sensibilité pour détecter des flux lents et sa faible puissance acoustique. Il a cependant des limites : l'absence de résolution spatiale puisque, le signal reçu est indépendant de la profondeur et les fréquences Doppler détectées proviennent de l'ensemble des cibles rencontrées sur le faisceau.

b) Effet Doppler pulsé

L'effet Doppler pulsé permet de déterminer la distance des cibles responsables des échos Doppler pour mesurer leur vitesse. On utilise un seul transducteur pour l'émission et la réception, le temps aller-retour de l'impulsion d'ultrasons permet de connaître la profondeur de la cible. Dans le mode pulsé, l'émission du signal est discontinue et inversement proportionnel à la distance, le nombre de signaux émis par seconde est la *PRF* est appelé : Pulse Répétition Frequency.

Il fonctionne comme ça :

Un transducteur incliné en direction de l'axe du vaisseau est excité périodiquement à la fréquence de récurrence PRF par des ondes ultrasonores de période T .

$$PRF = \frac{c_0}{2d_{max}} \quad (6.19)$$

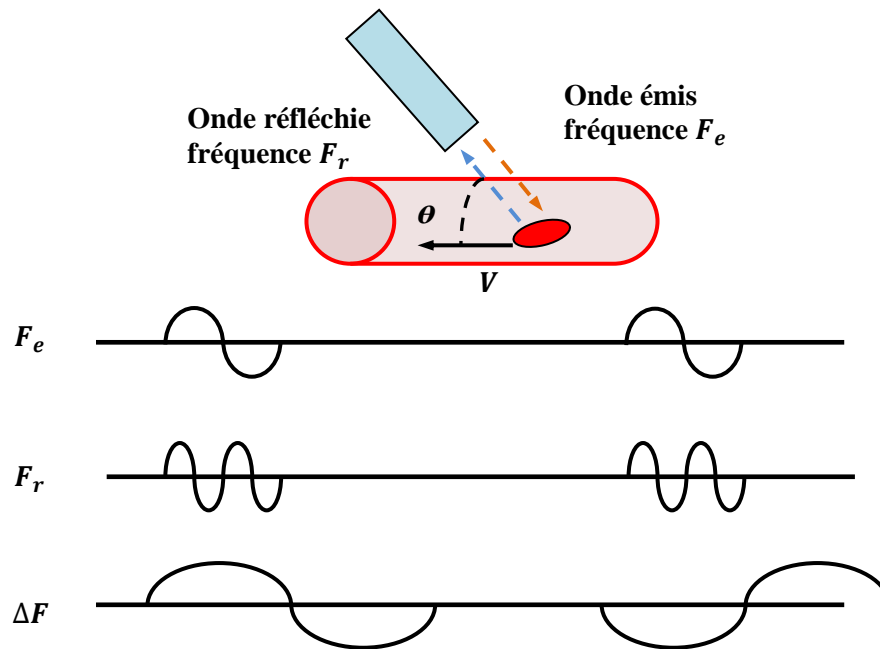


Figure 6.34 : Principe du Doppler pulsé.

La fréquence de répétition des tirs ou PRF avec la fréquence de transduction permet de déterminer la vitesse maximale avec un appareil à émission pulsée. Pour mesurer la vitesse, la fréquence fournie par l'émetteur soit très stable par le temps et le transducteur soit fixe. Si le transducteur est mobile sa fréquence est interprétée par le système comme une fréquence Doppler.

c) Caractéristiques métrologiques

L'intérêt de ce dispositif est que l'ensemble du dispositif est à l'extérieur de la canalisation. Il est donc insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge. Il permet des mesures de débit compris entre 0,1 m³/h et 105 m³/h, selon le diamètre de la conduite qui peut être compris entre quelques millimètres et plusieurs mètres. Ce débitmètre est utilisé par exemple pour mesurer les débits des hydrocarbures. Il existe des systèmes semblables utilisant l'effet Doppler à partir d'une source lumineuse (laser) dans les gaz.

d) Principe de l'écho-Doppler

Lorsqu'un faisceau ultrasonore, émis par une source, traverse des tissus biologiques, il rencontre un certain nombre de cibles, ou interfaces fixes. La fréquence réfléchiée par ces cibles fixes est identique à la fréquence émise: on dit qu'il n'y a pas de différence entre la fréquence d'émission et la fréquence de réception. Si la cible se déplace, comme les globules rouges du sang circulant, il se produit une modification de la fréquence du faisceau réfléchi. Cette différence (ΔF) entre la fréquence d'émission (F_e) et la fréquence de réception (F_r) s'appelle la fréquence Doppler, elle permet de calculer la vitesse et la direction des globules rouges et de déceler le mouvement des hématies dans un vaisseau. La fréquence Doppler s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta F = F_r - F_e = \frac{2F_e v \cos \theta}{c} \quad (6.20)$$

Où : ΔF est exprimée en hertz (Hz), la différence de fréquence ΔF est positive si la cible se rapproche de la source et négative si elle s'en éloigne. En exploration vasculaire, la valeur de ΔF se situe entre 50 Hz et 20 KHz ce qui, par chance, correspond à une gamme de fréquences perceptible par l'oreille humaine.

F_e est en général comprise entre 2 et 10 MHz. Le choix de la fréquence d'émission résulte d'un compromis entre l'atténuation de l'onde ultrasonore (fonction de la fréquence et de la profondeur de l'examen) et le pouvoir de rétrodiffusion des organes qui croît avec la fréquence. L'angle θ est un paramètre capital. En effet,

- ✓ Pour un angle de 90° , $\cos(\theta) = 0$, ΔF est nulle, entre le vaisseau et le faisceau ultrasonore, on n'obtient aucun signal Doppler.
- ✓ Pour un angle de 0° , $\cos(\theta) = 1$, ΔF est maximale, le faisceau ultrasonore est parfaitement dans l'axe du vaisseau, l'effet Doppler est maximal.

Le calcul de la vitesse circulaire nécessite donc la connaissance de l'angle Doppler. Pour calculer cette vitesse, la formule devient :

$$V = \frac{c \cdot \Delta F}{2 F_e \cos \theta_r} \quad (6.21)$$

e) Modes d'utilisation du Doppler

L'effet Doppler peut être utilisé en pratique clinique sous deux modes: le mode continu et le mode pulsé. Le Doppler bidimensionnel ou Doppler couleur repose sur le principe du Doppler pulsé mais le traitement du signal y est différent Comme mentionné dans [8].

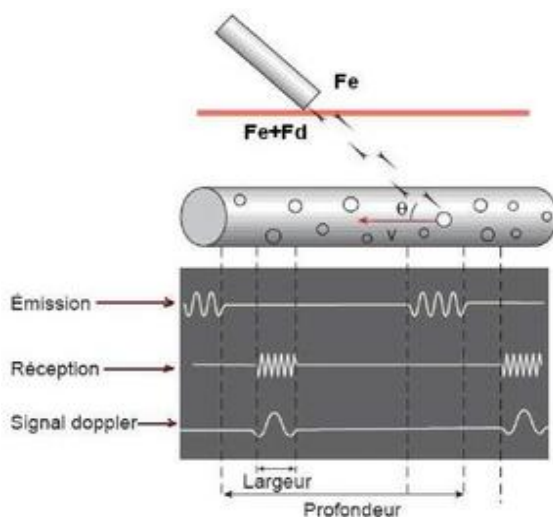


Figure 6.35 : Schéma d'un doppler pulsé.

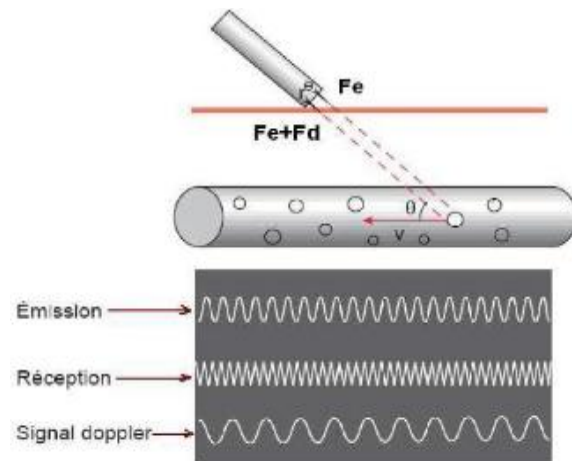


Figure 6.36 : Courbes de vitesse obtenues sur un doppler continu.

Emission spectrale du signal F_e est discontinue et inversement proportionnelle à la profondeur. Le nombre de signaux émis par seconde est PRF.

Emission : F_e ce signal est émis à une fréquence appeler PRF.

Réception : $F_e + \Delta F$.

Doppler continu : la sonde émet des ultrasons en permanence et les fréquences réfléchies par les globules rouges sont analysées continuellement, la sonde à deux cristaux piézoélectrique, l'un émetteur, l'autre récepteur. On recueille ainsi un spectre de vitesses correspondant à toutes les zones traversées par le faisceau. Il permet d'enregistrer des flux de très haute vélocité, sans limitation de vitesse mesurable, il permet ainsi d'analyser la vitesse maximale avec une grande précision. Le Doppler continu est très sensible pour détecter les flux lents. Son inconvénient est une moins bonne localisation du flux analysé.

Doppler pulsé : constitué d'une sonde à cristal unique qui, alternativement, émet un faisceau ultrasonore et reçoit le faisceau réfléchi. Le délai entre deux impulsions détermine la fréquence de répétition PRF (Pulse Repetition Frequency) :

La PRF détermine la profondeur du champ d'exploration, car il faut attendre le retour de tous les échos avant d'émettre une nouvelle impulsion. Les échos venant des zones les plus profondes fixent ainsi l'intervalle de temps à respecter avant un nouveau tir. La PRF détermine également la sensibilité aux flux. Une PRF basse est nécessaire pour explorer en profondeur et détecter des flux lents. Une PRF élevée est nécessaire pour bien analyser les flux rapides (évitant l'aliasing sur lequel nous reviendrons). On peut augmenter la PRF également si on analyse les régions superficielles.

Entre deux impulsions, le signal réfléchi est analysé pendant une durée très courte appelée «fenêtre d'écoute». Le délai entre la fin de l'impulsion et le début de la fenêtre d'écoute (P) permet de déterminer la profondeur du volume d'échantillonnage.

L'intérêt du Doppler pulsé par rapport au Doppler continu est de pouvoir bénéficier de la résolution spatiale et de focaliser l'examen sur un vaisseau à analyser. Ceci nécessite de coupler l'analyse Doppler à l'étude échographique. Les systèmes duplex combinent l'image échographique et le signal Doppler. Les fréquences d'émission sont un peu différentes, la fréquence d'émission pour le Doppler étant plus basse que la fréquence de la sonde pour le mode B (par exemple : 3,5 MHz sonde échographique, 3 MHz pour la sonde Doppler).

Les limites du Doppler pulsé sont : sa plus faible sensibilité pour détecter les flux très lents.

Doppler couleur : Une grande évolution technologique est ensuite apparue avec l'intégration, dans le même équipement, d'une imagerie échographique rapide et d'une détection de l'information Doppler en tous points de l'image échographique. Il pourrait être assimilé à un système Doppler multiporte multiligne, et pour différencier l'image échographique en noir et blanc du signal Doppler, celui-ci a donc été coloré par convention. Il colore en rouge les flux qui se rapprochent de la sonde et en bleu les flux qui s'éloignent de la sonde. Plus les flux sont rapides, plus la couleur se rapproche du blanc.

Le Doppler couleur doit faire face à deux contraintes particulières :

- ✓ analyser en temps réel un très grand nombre de paramètres et
- ✓ obtenir très rapidement l'analyse spectrale du signal.

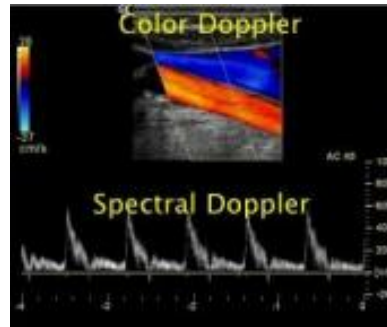


Figure 6.33 : Doppler couleur.

f) Diagnostic par échographie Doppler

L'échographie Doppler est utilisée dans le diagnostic des atteintes des vaisseaux et du cœur.

- ✓ **Cœur** : cardiopathies congénitales, valvulopathies, péricardites ;
- ✓ **artères** : sténoses, thromboses (athérosclérose), anévrismes, claudication intermittente, ischémie aiguë ;
- ✓ **veines** : thromboses veineuses profondes, varices.

L'échographie Doppler est souvent un examen de première intention. En effet, il est relativement peu coûteux et il possède une grande sensibilité, en particulier pour le diagnostic des thromboses veineuses profondes.

Cependant il est parfois nécessaire d'effectuer des examens plus approfondis pour préciser le diagnostic comme des angiographies.

Chapitre 7 Mesure de déplacements et de vitesse

7.1 Capteurs de déplacement

7.1.1 Introduction

Les capteurs de déplacement et position sont d'un emploi très général, d'une part, parce que le contrôle des positions et déplacements est un élément important pour le fonctionnement correct des machines et d'autre part, parce qu'un certain nombre de grandeurs physiques sont mesurables par les déplacements qu'elles imposent à des corps : forces, pressions, accélération.

Les informations, acquises par les capteurs et délivrées sous forme analogique, doivent très fréquemment être traitées par des calculateurs digitaux qui en assurent l'exploitation rapide et précise. Ceci est rendu possible par l'utilisation de convertisseurs analogique-numérique qui, recevant le signal du capteur, délivrent au calculateur l'information digitalisée. Dans le cas des déplacements, il est cependant possible de concevoir des capteurs qui assurent de façon immédiate la traduction d'une position linéaire ou angulaire, en un mot binaire qui la définit [4].

7.1.2 Codeurs optique

Les codeurs sont des capteurs rotatifs, placés sur l'axe d'une pièce tournante qui restituent un code numérique en fonction de la position. Essentiellement deux types de codeurs sont disponibles.

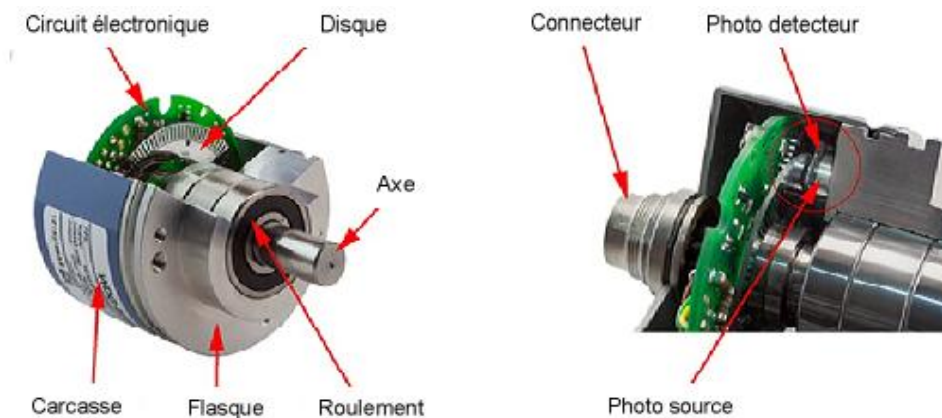


Figure 7.1 : Les composants d'un encodeur industriel.

7.1.3 Codeurs absolus

Le disque d'un codeur absolu comporte n pistes concentriques divisées en segments égaux alternativement opaques et transparents. A chaque piste est associé un couple émetteur-récepteur.

La piste intérieure est composée d'une moitié opaque et d'une moitié transparente. La lecture de cette piste donne le bit le plus fort et détermine dans quel demi-tour on se trouve.



Figure 7.2 : Le codeur numérique (codeur absolu).

La piste suivante est divisée en quatre quarts alternativement opaques et transparents. La lecture de cette piste, combinée avec celle de la piste précédente, permet de déterminer dans quel quart de tour on se situe.

Les pistes suivantes permettent de déterminer dans quel huitième de tour, seizième de tour, etc... , on se situe. Au bout d'un tour complet, le codeur délivre les mêmes valeurs. Le codeur absolu multi tours, outre la position numérique dans un tour, délivre le nombre de tours effectués.

Exemple d'utilisation : robotique .

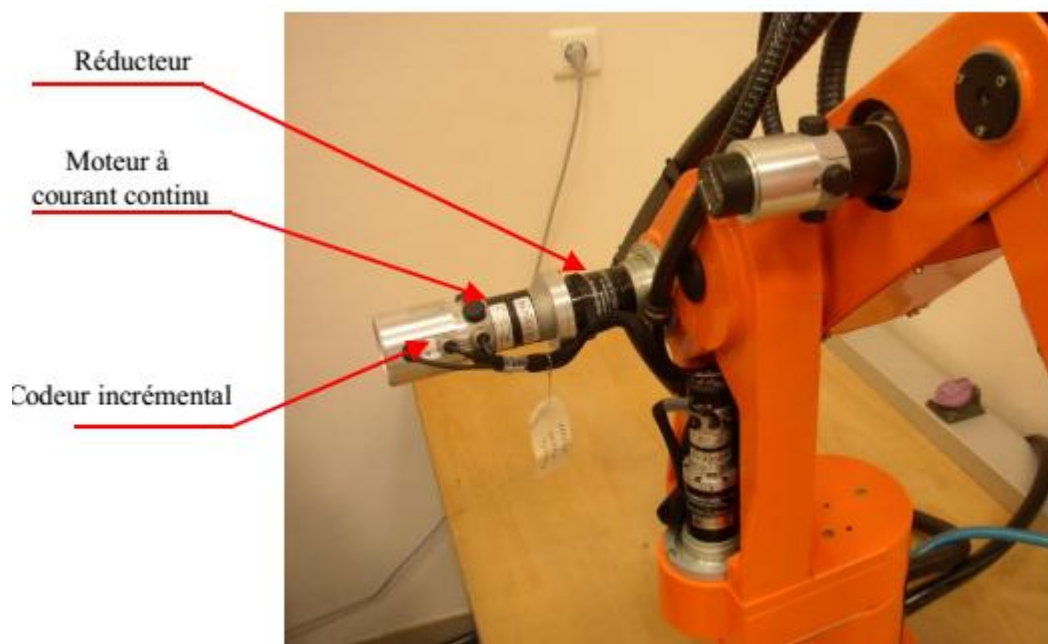


Figure 7.3 : Bras manipulateur.

Grâce à un circuit perforé associé à des capteurs optiques, il restitue, en parallèle ou en série, un code numérique qui spécifie l'angle de rotation de l'axe. Le nombre de bits détermine la précision de la mesure.

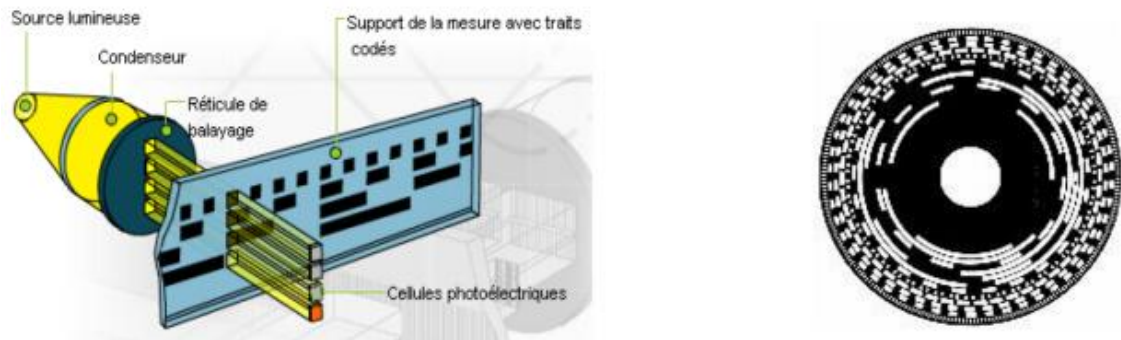


Figure 7.4 : Principe de fonctionnement d'un codeur absolu (linéaire ou relatif).

Exemple : codeur 10bits donne 1024 positions soit une précision de $360/1024=0,35^\circ$

a) Codages utilisés

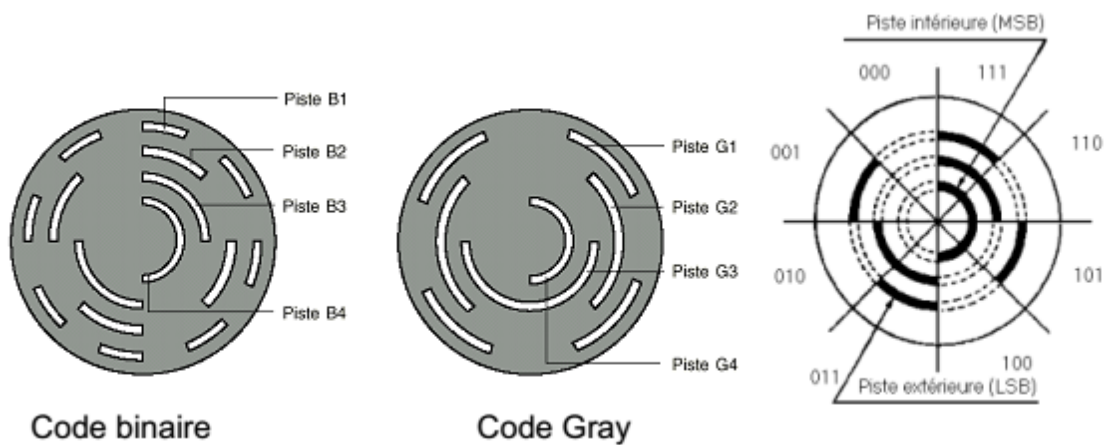
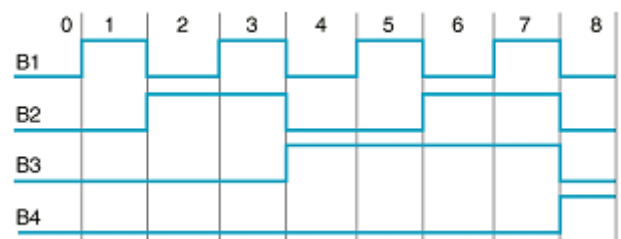


Figure 7.5 : Les principaux codes utilisés en automatisme.

Le code binaire est directement exploitable pour effectuer des calculs mais il présente l'inconvénient d'avoir plusieurs bits qui changent d'état entre deux positions.

Exemple :

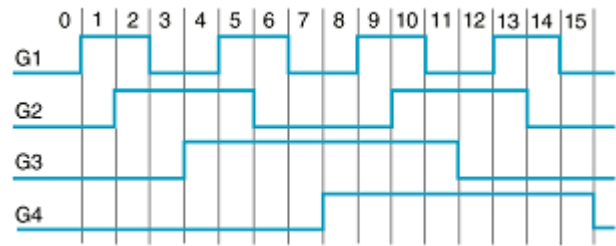
	3	→	4
B1	1	→	0
B2	1	→	0
B3	0	→	1
B4	0	→	0



Le code Gray présente l'avantage de ne changer qu'un seul bit entre deux nombres **consécutifs**

Exemple :

	3	→	4
G1	0	→	0
G2	1	→	1
G3	0	→	1
G4	0	→	0



La représentation ci-dessous montre les 24 premières valeurs décimales correspondant à la lecture des cinq premières pistes

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2^0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
2^2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
2^4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
2^8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
2^{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Un codeur absolu délivre en permanence un code qui est l'image de la position réelle du mobile à contrôler.

Dès la première mise sous tension ou dès le retour de tension après une coupure, le codeur délivre une information directement exploitable [1].

b) Codeur incrémental

Un disque imprimé solidaire de l'axe est associé à une détection optique qui délivre en générale 5 ou 6 signaux .le comptage des impulsions donne au déplacement une valeur relative .la combinaison des voies A et B permet de discriminer le sens de rotation.

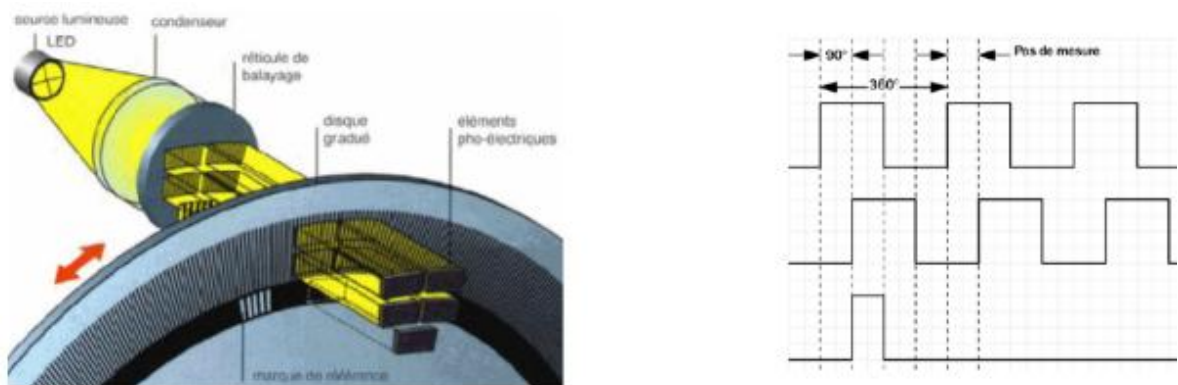


Figure 7.6 : Principe de fonctionnement d'un codeur incrémental de position angulaire .

Le même fonctionnement est possible pour un capteur linéaire (on n'a alors plus un disque, mais une règle).

Exemple

Les asservissements numériques, sont abondants dans le domaine industriel. On s'intéresse dans cette étude à l'asservissement de position. La structure du système est donnée à la figure ci-dessous. Sa description est comme suit :

- Un curseur se déplace linéairement grâce à un système vis-écrou ;
- Le système vis-écrou est entraîné en rotation par un moteur à courant continu ;
- La position du curseur est captée par un codeur incrémental solidaire à l'axe du moteur;
- La commande permet de comparer la position captée et la position de consigne ; si les deux positions sont égales, on arrête le moteur.

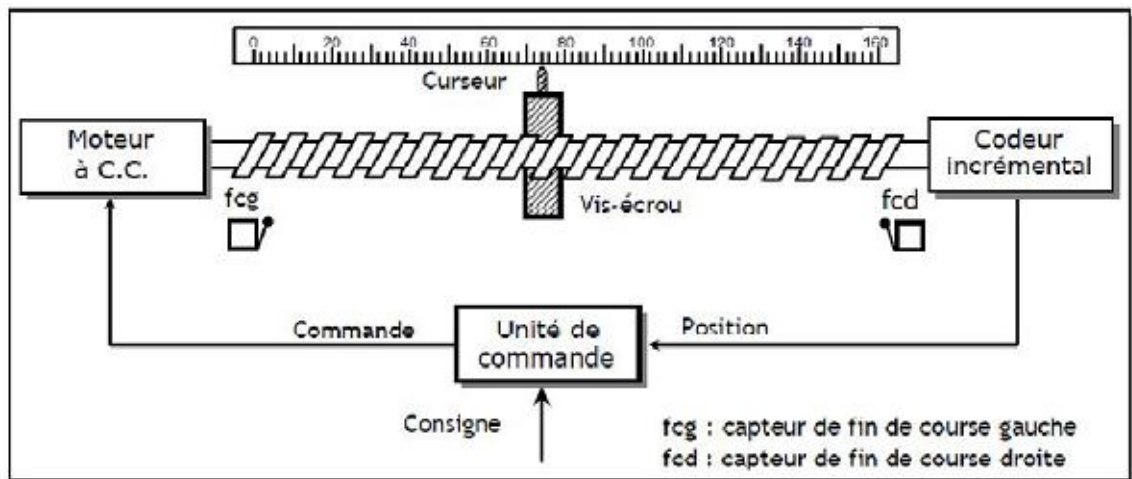


Figure 7.7 : Application d'un codeur.

c) Capteur de déplacement à LVDT

Linear Variable Differential Transformator. Ce capteur est un transformateur qui délivre une tension proportionnelle au déplacement d'un noyau ferromagnétique prolongé d'une tige amagnétique dont l'extrémité est en contact avec l'objet en mouvement [9].

Le bobinage primaire est alimenté par une tension sinusoïdale dont l'amplitude et la fréquence sont stabilisées. Deux bobinages secondaires identiques lui sont couplés, et l'amplitude des tensions induites V_1 et V_2 varie en fonction de la position du noyau. C'est la différence $V_{out} = V_1 - V_2$ qui est captée. Elle s'annule pour la position centrale du noyau. Quand le noyau s'éloigne vers une extrémité, l'amplitude de V_{out} croît. Au passage par zéro, V_{out} subit une discontinuité de phase de 180° , sa détection est utilisée pour caractériser algébriquement le déplacement.

Le noyau et les bobinages, enrobés de résine époxy, n'ont pas de contact physique entre eux. La quasi-absence de frottement confère à ce capteur une durée de vie pratiquement illimitée.

Le transformateur peut être rendu étanche et résistant à la corrosion chimique, supporter des pressions élevées (200 bars) ainsi que des températures extrêmes (-200°C , 600°C).

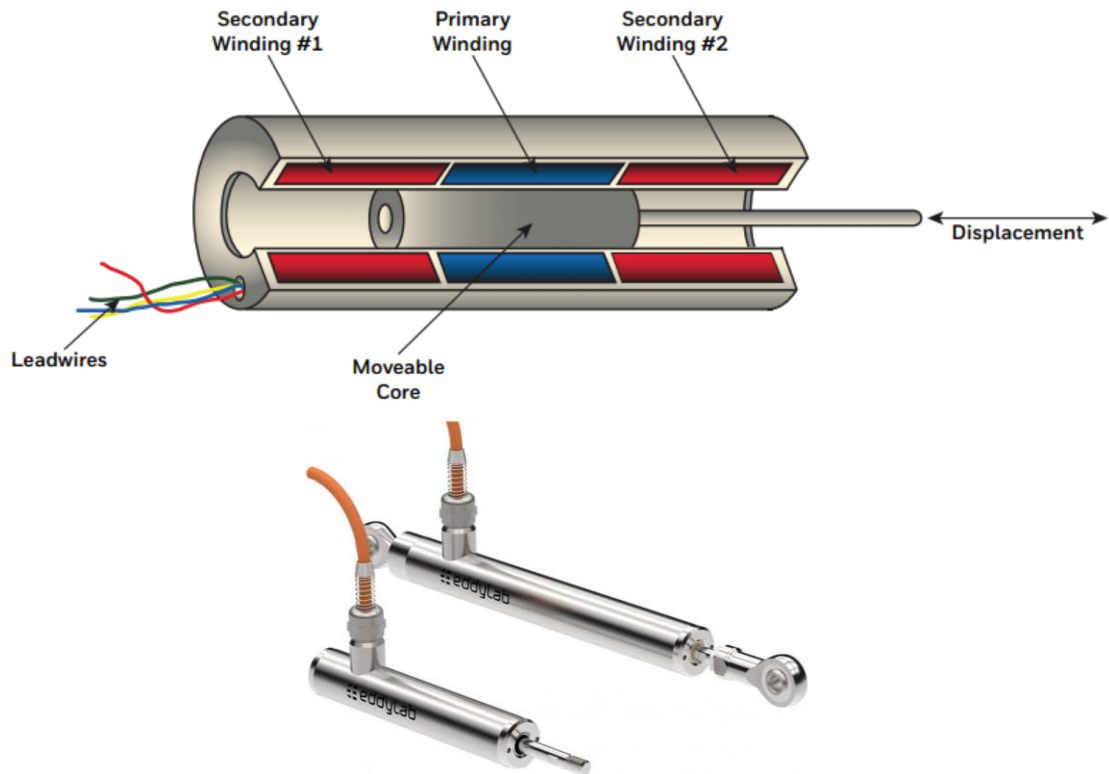


Figure 7.8 : Compositions d'un capteur LVDT.

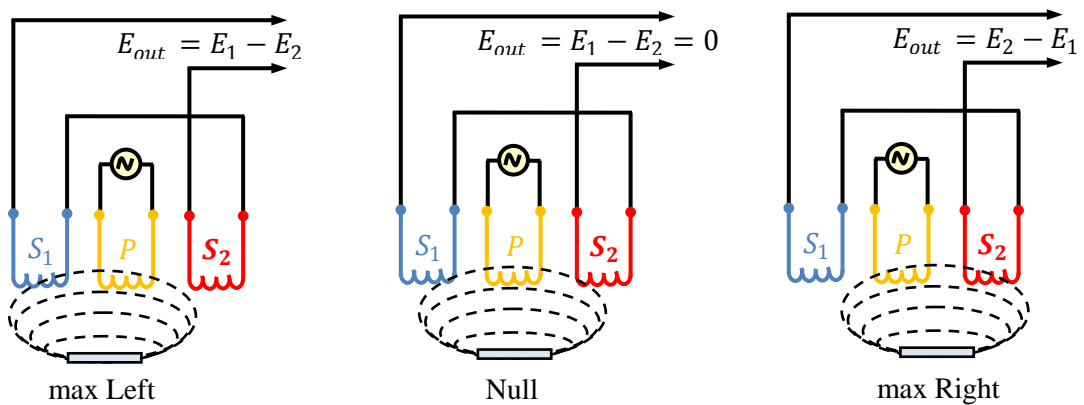


Figure 7.9 : Principe capteur inductif LVDT.

L'enroulement primaire est alimenté par une tension sinusoïdale $e_1 = E_1 \cos \omega t$ et les enroulements secondaires sont reliés en opposition de façon à ce que les forces électromotrices qui y sont induites se soustraient.

Exemple : mesure du déplacement de la membrane de pompe.



Figure 7.10 : Montage de bicompression avec un capteurs LVDT.

Avantages

- Étendues de mesure: de mesure: ± 1 à ± 1000 mm
- Ils sont très linéaires (jusqu'à 0.05%);
- Ils ont une excellente résolution (0.1 μm);
- ils sont fiables et robustes.

Inconvénients

- Ils sont sensibles aux champs magnétiques;
- Les LVDT exigent une électronique de conditionnement pour convertir le signal.

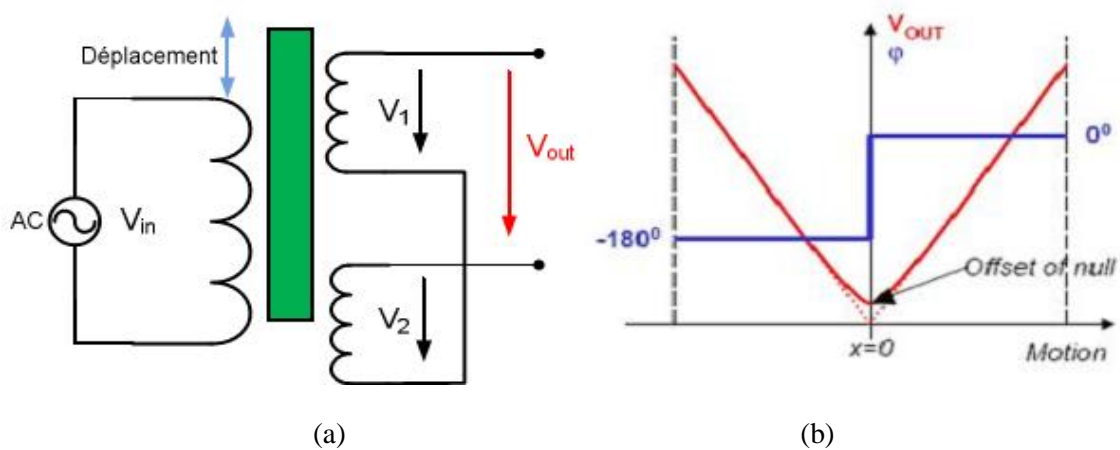


Figure 7.11 : Capteur inductif LVDT. (a) Schéma simplifier. (b) La réponse du capteur.

d) Resolver

Le resolver possède un seul enroulement parcouru par un courant alternatif dont la fréquence est située entre quelques centaines hertz et plusieurs dizaines de kilohertz selon le type de construction. Le stator possède deux enroulements, dont les axes sont décalés de 90° . La tension induite par couplage dans ces enroulements dépend de la position angulaire relative [9].

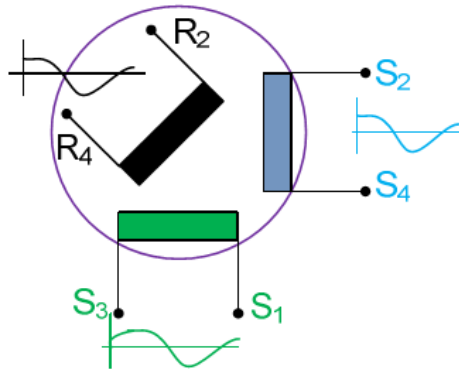


Figure 7.12 : Principe d'un capteur Resolver a position.

A l'enroulement rotorique est appliquée la tension

$$u_{ref} = U_{ref} \sin(\omega_r t) \quad (7.1)$$

Selon la position angulaire relative rotor–stator, le couplage entre l'enroulement rotorique les deux enroulements statoriques varie. Les tensions U_{sin} et U_{cos} obtenues aux bornes des enroulements statoriques sont :

$$U_{sin} = U_{ref} \sin \omega_r t \cdot \sin \theta \quad (7.2)$$

$$U_{cos} = U_{ref} \cos \omega_r t \cdot \cos \theta \quad (7.3)$$

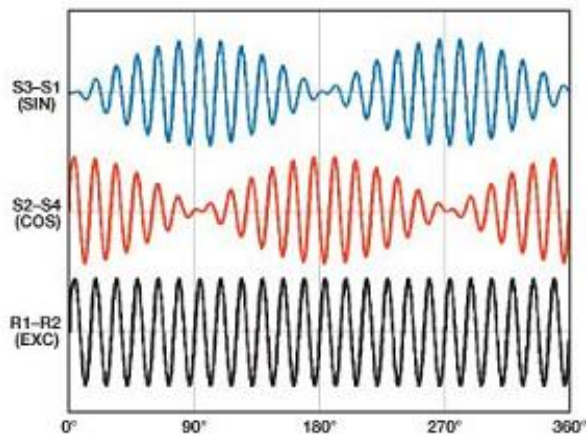


Figure 7.13 : Réponse d'un capteur Resolver a position.

Dans le cas du resolver sans collecteur, le transformateur rotatif d'alimentation du circuit d'excitation placé au rotor.

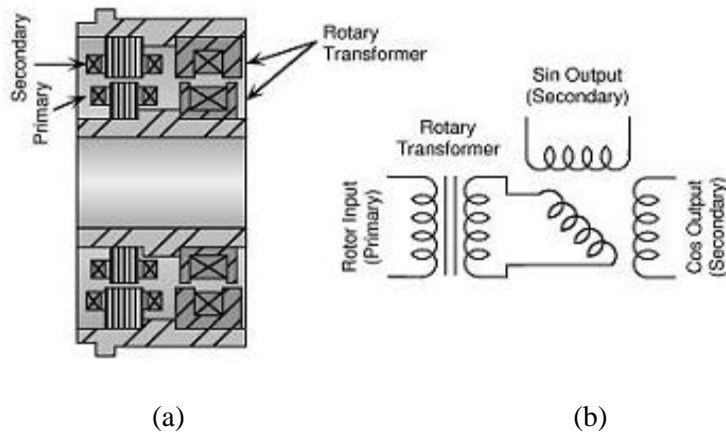


Figure 7.14 : Resolver a position sans contacts. (a) Principe d'un capteur. (b) Schéma interne.



Figure 7.15 : Resolver industriel.

7.2 Capteurs de vitesse

Notion de vitesse :

Vitesse moyenne : la distance parcourue divisée par le temps mis pour faire cette distance.

$$V = \frac{d}{t} \quad (7.4)$$

Vitesse instantanée : vitesse moyenne mais sur un temps infiniment.

Le type de déplacement est soit rectiligne, soit angulaire ; la sortie est analogique ou numérique. Les capteurs de vitesse portent également le nom plus industriel de tachymètres.

7.2.1 Génératrice tachymétrique

La force électromotrice E induite dans une machine à courant continu est proportionnelle à la vitesse de rotation.

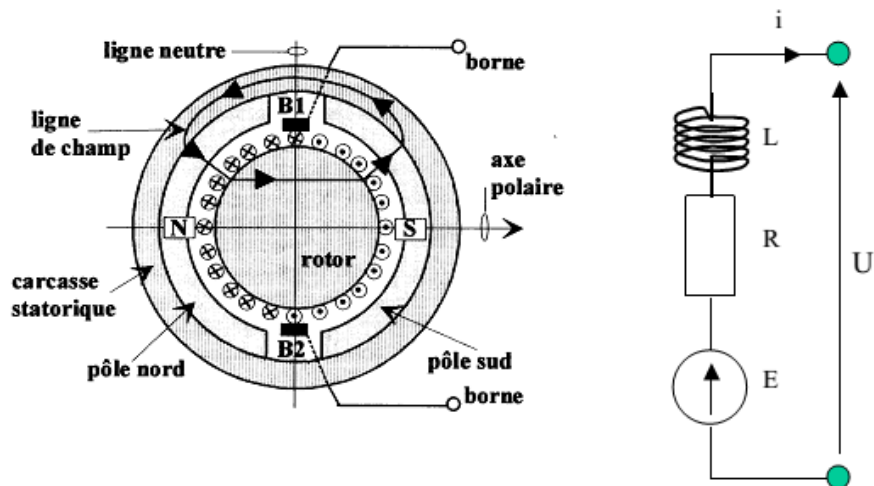


Figure 7.16 : Génératrice tachymétrique.

Pour un flux réglé constant par l'usage d'aimants permanents, à haute stabilité thermique, la tension recueillie entre les deux balais de la machine, fonctionnant en génératrice est directement proportionnelle à la vitesse de rotation.

$$U = E - Ri - L \frac{di}{dt} \quad (7.5)$$

Ces machines, de petite taille, sont de conception soignée souvent avec un rotor sans fer associé à un système balai collecteur en graphite-cuivre. Le circuit magnétique est constitué par un aimant en deux parties, creux, traversé par l'axe rotorique, associé à un tube ferromagnétique permettant la fermeture des lignes de champ dans la machine.

Utilisation d'une mesure de la vitesse du câble support d'un télésiège.



Figure 7.17 : Capteur de vitesse du vent Anémomètre.

7.2.2 Capteur tachymétrique à impulsions ou codeurs magnétiques

Ces appareils comportent :

- Un codeur incrémental, optique ou magnétique, délivrant deux trains de signaux rectangulaires en quadrature

- Une unité de conversion fréquence tension fournissant une tension continue algébrique de valeur absolue proportionnelle à la fréquence des signaux, le signe de la tension définissant le sens de rotation.

7.2.3 Capteur utilisant la réductance variable

La réductance des circuits magnétique suivants varie en fonction de x ou ϑ .

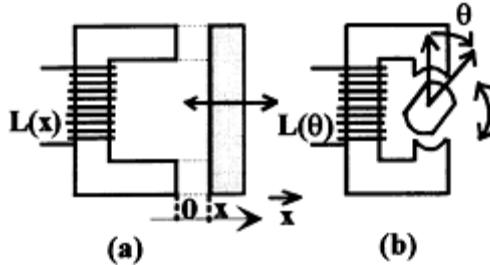


Figure 7.18 : Capteur utilisant la réductance variable.

On montre que la réductance dans le cas a s'exprime par:

$$R = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{l}{\mu_f} + 2x \right] \quad (7.6)$$

L'inductance de ce circuit vaut donc

$$L(x) = \frac{n^2 \mu_0 S}{\frac{l}{\mu_f} + 2x} \quad (7.7)$$

Exemple : capteur pour système de freinage ABS.

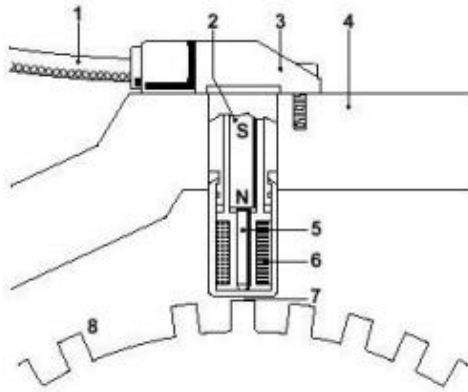


Figure 7.19 : Capteurs vitesse Roue - ABS.

Où :

- 1: câble blindé; 2: aimant permanent; 3: corps du capteur; 4: support; 5: noyau en fer doux; 6: bobine; 7: entrefer; 8: roue dentée munie de marque de référence.

7.2.4 Capteurs actifs magnéto-résistifs (807)

Ils se composent :

- ✓ d'un élément magnéto-résistif,
- ✓ d'une partie électronique intégrée.

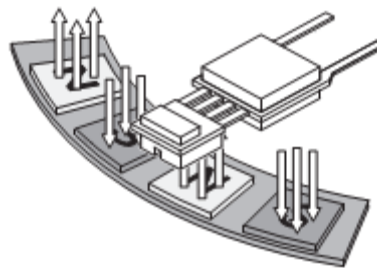
L'élément magnéto-résistif (semi-conducteur) est revêtu de fines couches de Permalloy séparées par des couches de silicium qui modifient leur résistance ohmique en fonction de la direction et de l'intensité d'un champ magnétique. L'élément magnéto-résistif est monté dans un pont de Wheaston aux bornes duquel on mesure la variation de tension au passage des champs magnétiques [10].

- **Permalloy** : alliage nickel-fer à grande réactivité magnétique.
- **Pont de Wheaston (montage de résistances)** : technique de mesure de résistance par comparaison avec un circuit résistif connu.

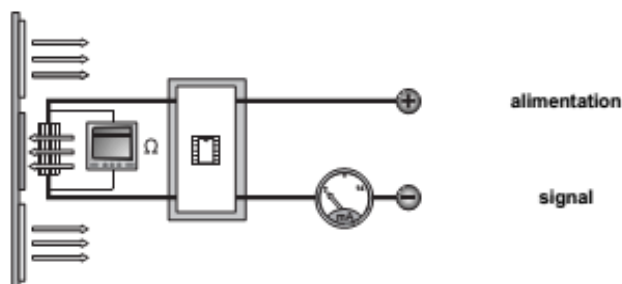
La variation de la résistance entraîne la variation de la chute de tension de l'élément. Cette chute de tension pilote la partie électronique intégrée placée en aval. La partie électronique intégrée génère un courant de 7 mA ou de 14 mA. Ces différents niveaux d'intensité de courant créent une tension en créneaux dans la résistance (115 ohms) du calculateur ABS ou ESP. La tension analysée par le calculateur varie proportionnellement au courant de signal de la commande intégrée entre 0,8 V (partie basse du signal) et 1,6 V (partie haute du signal).

a) *Fonctionnement*

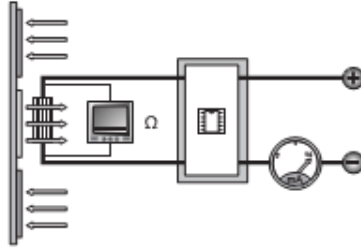
Les lignes de champ magnétique placées à la verticale de l'élément de mesure magnéto-résistif se dirigent ou s'éloignent de la piste magnétique en fonction de la polarité. L'entrefer capteur/cible étant réduit, les lignes de champ magnétique traversent l'élément magnéto-résistif et font varier sa résistance.



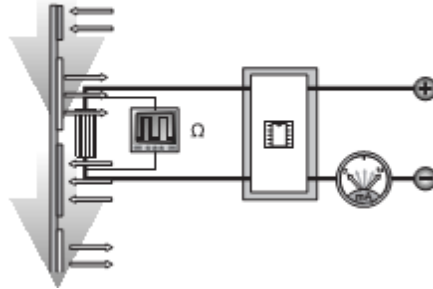
Après une série de traitements et de réglages du signal au travers de l'électronique du capteur, les variations de résistances sont converties en signaux de courant par deux amplificateurs de courant de 7 mA chacun [10].



Si la résistance de l'élément magnéto-résistif augmente (passage des lignes de champ au travers de l'élément sensible), le courant est au minimum (7 mA).



Si la résistance de l'élément magnéto-résistif diminue (lignes de champ inversées), le courant est au maximum (14 mA).



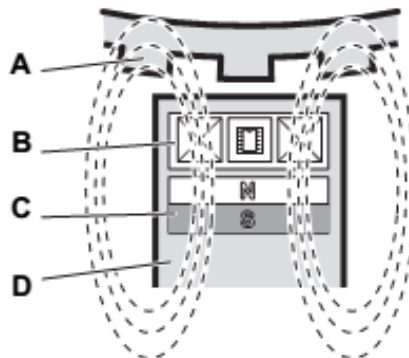
Etant donné la conception de la piste de lecture (alternance de pôles nord et sud), on relève un signal de forme rectangulaire évoluant entre 7 et 14 mA dont la fréquence représente la vitesse de rotation de la roue.

7.2.5 Capteurs actifs à effet Hall ou magnéto-résistifs à aimant intégré (Prévision sur 206 et Partner)

Ce sont des capteurs actifs à effet Hall ou magnéto-résistifs dans lesquels on a intégré un aimant permanent. Le but de ce système étant de conserver une cible métallique intégrée à la transmission évolution 206) afin d'éviter la conception de nouveaux pivots pour supporter les capteurs actifs classiques.

Le principe consiste à placer un aimant dans le capteur, derrière un élément sensible au lieu de le placer sur la cible du roulement de roue. L'alternance des dents et des creux de la cible métallique fait varier le champ magnétique à l'intérieur du capteur. Cette variation de champ magnétique est mesurée par un élément sensible (effet Hall ou magnéto-résistif), traitée et transformée en courant par deux amplificateurs de 7 mA montés en parallèle (même principe que les capteurs actifs classiques) [10].

Principe du capteur

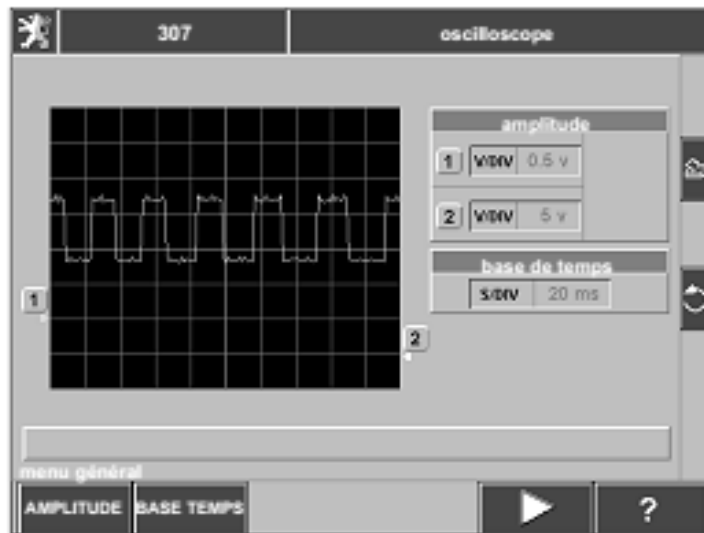


A: cible métallique; B: élément sensible; C: aimant permanent ; D: capteur à aimant intégré.

7.2.6 Contrôle des capteurs actifs

Le signal de ces capteurs peut se contrôler à l'oscilloscope en le plaçant en parallèle sur le fil de retour du signal (voie 2 du connecteur). Le capteur doit être alimenté par le calculateur et il faut faire tourner la cible afin de faire défiler les pôles magnétiques. La tension relevée dépend de la valeur de la résistance de charge placée dans le calculateur ABS ou ESP .

Relevé du signal à l'oscilloscope (en tournant la roue à la main) [10].

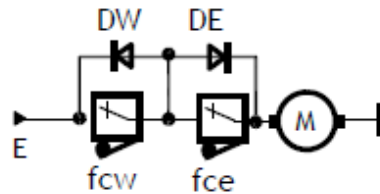


Le signal relevé est compris entre 0,8 et 1,6 V (amplitude 0,5 V/DIV).

Exercices

Exercice 1

Le montage ci-dessous permet de protéger un moteur à courant continu, fonctionnant avec 2 sens. La tension E est soit positive, soit négative, suivant la commande qui n'est pas représentée ici, ainsi que le système à came qui permet d'actionner les "fins de course" (fcw et fce).



- Analyser le fonctionnement d'un tel montage.

Exercice 2

On considère le montage en demi-pont de la figure 1 où R_1 et R_2 représentent les deux résistances variables d'un potentiomètre rotatif de résistance totale $2R_0$ et de course angulaire totale n (voir figure 2). Les résistances R de l'autre branche potentiométrique sont fixes.

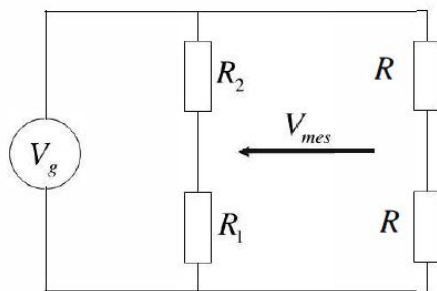


Figure 1. Conditionnement en pont

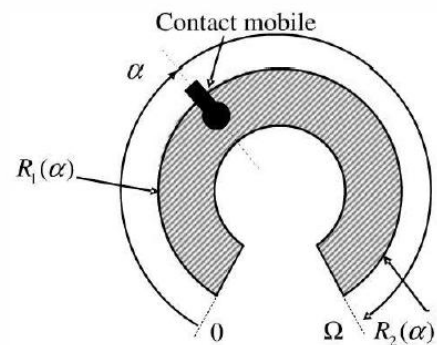


Figure 2. Potentiomètre rotatif

1. Donner l'expression de la tension de mesure V_{mes} en fonction de R_1 , R_2 et V_g .
2. Le pont est équilibré pour une valeur α_0 de la position angulaire. A priori quelle valeur doit-on choisir pour α_0 ? En déduire les valeurs $R_1(\alpha_0)$ et $R_2(\alpha_0)$.

Exercice 3

Un capteur de déplacement rectiligne est constitué d'un potentiomètre linéaire schématisé sur la figure 1. 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 .

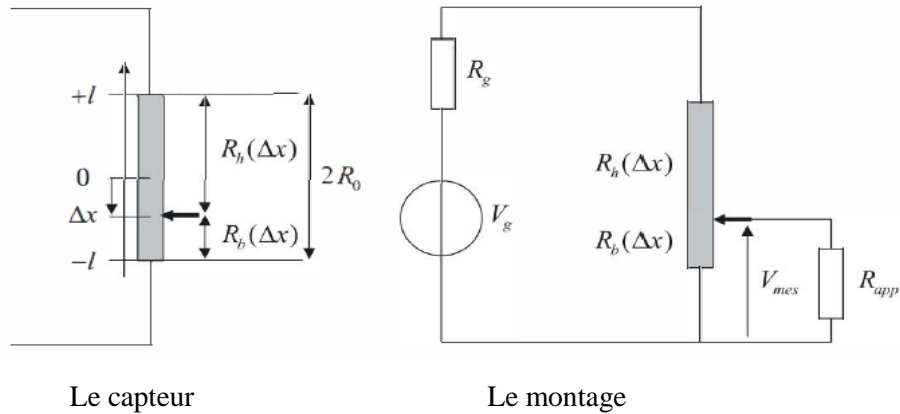


Figure 1: Potentiomètre linéaire en capteur push-pull

1. La course utile du potentiomètre est $2l = 10$ cm et sa résistance totale est $2R_0$.

En déduire l'expression des résistances $R_b(x)$ et $R_h(x)$ du potentiomètre (voir figure 2) pour un déplacement Δx du curseur par rapport à la position milieu.

2. Le potentiomètre est monté suivant le schéma de la figure 2. 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 $R_h(\Delta x)$, $R_b(\Delta x)$, R_g , R_{app} et V_g .

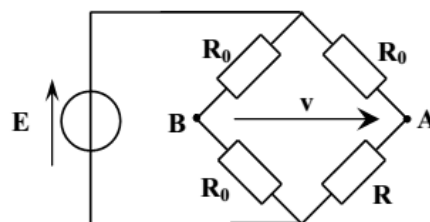
3. Que devient cette expression pour $R_{app} \gg R_0$?

4. En déduire la sensibilité S_{mes} de la mesure.

Exercice 4

On désire réaliser le circuit électronique ci-dessous qui mesure la différence de pression atmosphérique par rapport à 1013 mb (pression moyenne) avec une sensibilité de 1mV/mb (tableau ci-dessous) :

Pression (mb)	Tension v(mV)
900	-113
1013	0
1100	87



E est une source de tension fixe;

v est la tension à en sortie du pont (image de la pression);

R_0 sont des résistances ajustables réglées à l'identique;

R est le capteur résistif linéaire de caractéristiques définies ci-dessous:

Pression (mb)	Résistance R (Ω)
0	1000
4000	3000

1. Donner l'expression de la tension v en fonction de E ; R_0 et .
2. Montrer qu'à l'équilibre du pont (lorsque $v = 0$ V), on a : $R_0 = R$.
3. En utilisant le tableau caractérisant le capteur résistif, exprimer R en fonction de P .

Déterminer alors la valeur des résistances réglables R_0 .

4. Exprimer v en fonction de E et P . La relation " v fonction de E et P "est-elle linéaire?
5. En prenant $E = 12V$, calculer les valeurs respectives de v pour $P = 900mb$ et $P = 1100mb$.

Calculer les erreurs relatives pour les deux valeurs de v calculées plus haut.

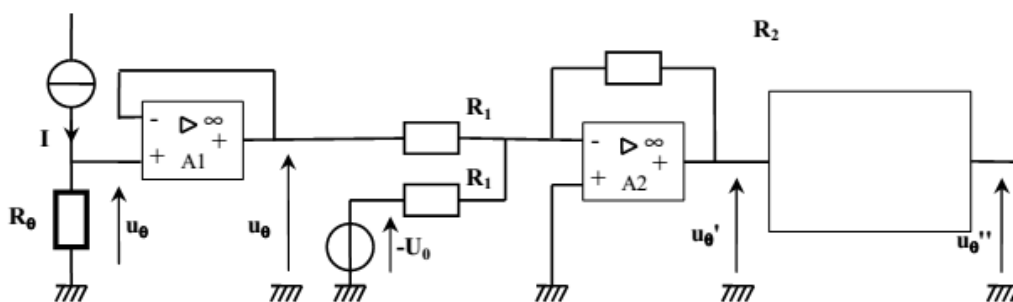
Exercice 5

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

R_0 (résistance à $0^\circ C$) $\rightarrow R_0 = 100 \Omega$.

a (coefficient de température) $\rightarrow a = 3.85 \cdot 10^{-3} C^{-1}$.

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



on donne $I = 10,0 mA$.

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

Exprimer U_0 en fonction de I et R_0 . Calculer U_0 .

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) .

Montrer que la tension u'_θ s'écrit sous la forme : $u'_\theta = -b\theta$.

Exprimer ben 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 : $u''_\theta = b\theta$.

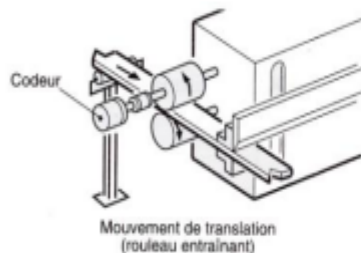
Représenter un montage à amplificateur opérationnel assurant cette fonction et qui complète le conditionneur.

Exercice 6

1. On souhaite mesurer la fréquence de rotation d'un moteur asynchrone et connaître son sens de rotation.
2. Quel type de capteur doit-on choisir ?
3. Quel type d'information délivre t-il (analogique, logique, numérique) ?
4. On souhaite connaître la position exacte du bras d'un robot lors de son déplacement.
5. Quel type de capteur doit-on choisir ?
6. Quel type d'information délivre t-il (analogique, logique, numérique) ?
7. Un codeur absolu possède 4 bits. Combien il y a t-il de combinaisons possibles ?
8. Une machine spéciale permet de découper des profilés en aluminium de longueurs variables pour fabriquer des cadres de dormants de fenêtre.

La barre est amenée vers la scie qui permet le découpage du profilé grâce à deux rouleaux qui entraînent cette barre.

Un codeur incrémental est fixé sur le même axe d'un des rouleaux. Il permet ainsi de comptabiliser le nombre de tours effectués par le rouleau pour en déduire la longueur du déplacement linéaire de la barre.



Diamètre des rouleaux 75 mm.

Précision de la longueur de coupe : 0,5 mm.

1. Quelle est la longueur du déplacement de la barre à chaque tour de rouleau ?
2. On souhaite découper des barres de 450 mm. Quel sera alors le nombre de tours effectués par le rouleau d'entraînement donc par le codeur ?
3. Le nombre de points par tour d'un codeur incrémental se nomme la « résolution » du codeur. Quel doit-être la résolution du codeur si l'on souhaite respecter la précision de coupe imposée dans le cahier des charges.

$$\text{Résolution} = \frac{1}{\text{précision (mm)}} \times \text{distance parcourue à chaque tour de rouleau}$$

Exercice 7

Soit un montage potentiométrique, une résistance électrique R_c en série avec R_1 est alimenté par une source de tension égale 15V. la tension est mesurée aux bornes du R_c par un appareil de mesure de résistance R_d .

1. Donner l'expression de la tension V_m , sachant que:

$$V_m = V_m + \Delta V_m \text{ et } R_c = R_{c0} + \Delta R_c \text{ et } R_1 = R_s = R_{c0}$$

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_c .

2. Donner l'expression de la tension mesurée V_m
3. Donner la nouvelle expression de V_m pour les faibles variations.

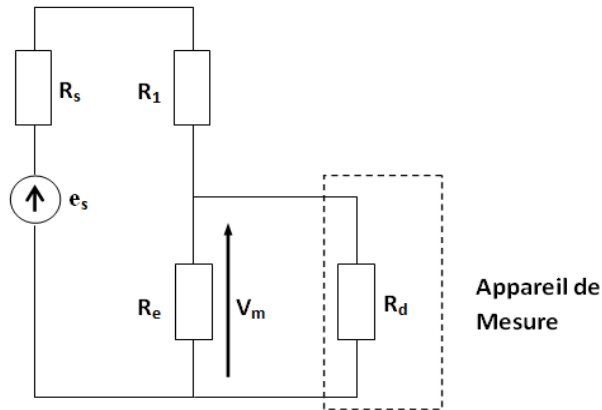


Figure 1.

Exercice 8

Soit un montage potentiométrique (alimentation symétrique (voir figure 1)).

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

$$R_1 = R_3 = R_4 = R_{c0}, \text{ et d'un capteur } R_2 \text{ dont la résistance est } R_2 = R_{c0} + \Delta R_c .$$

2. Donner l'expression de la tension V_m .

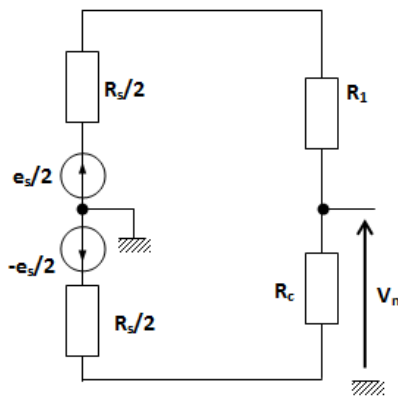


Figure 1.

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 ($e_s = e_{s0} + \Delta e_s$), voir fig. ci-dessous (alimentation dissymétrique), alors donner la variation de tension mesurée si hypothèse $\Delta R_c \ll R_{c0}$ est respectée.

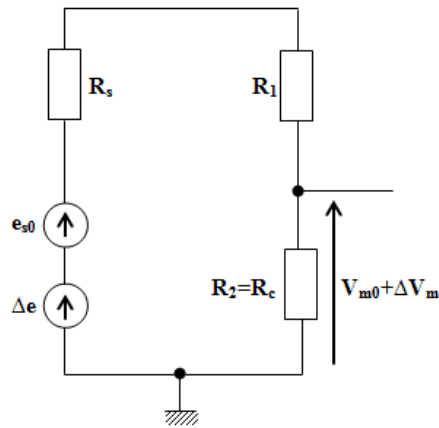


Figure 2.

Dans le montage symétrique voir figure 2, 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 $\Delta e_1 = -\Delta e_2$.

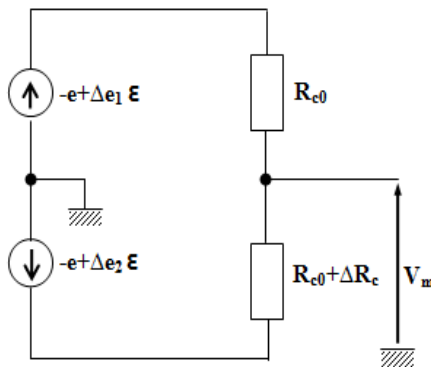
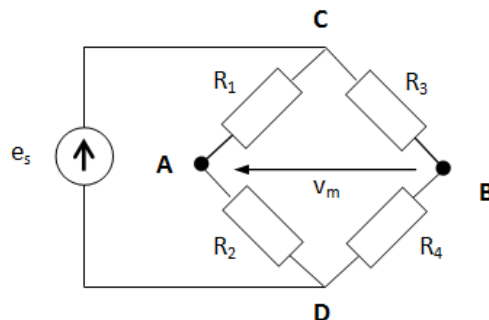


Figure 3.

Exercice 9

Un montage de conditionneur est constitué au moyen de deux capteurs de pression et deux résistances fixes déposée sur un diaphragme et formant un pont de Wheatstone, les capteurs sont identiques dont les variations de signe contraire.



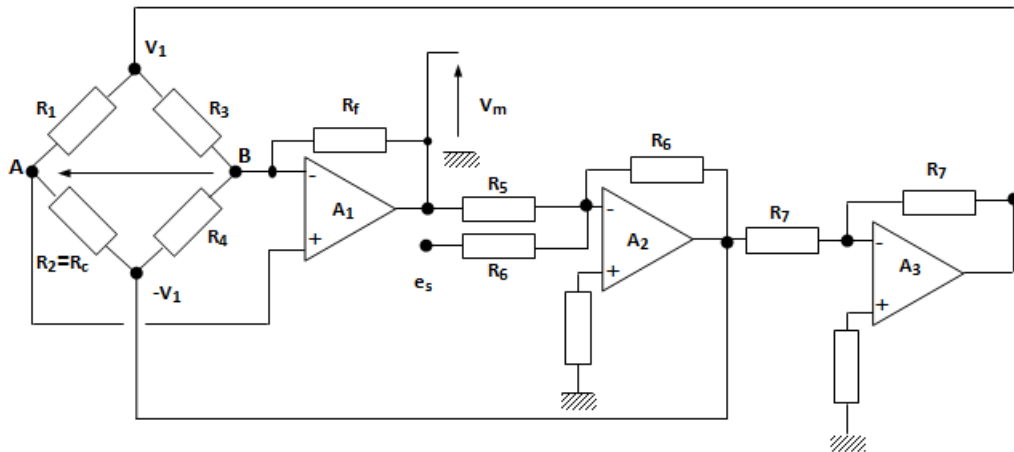
1. Ecrire la relation de la tension de sortie V_m .

On remplace les résistances fixes par des capteurs, ces capteurs sont placés deux à deux en deux points du diaphragme dont les déformations sont égales et opposées en sorte que le pont fonctionne en push pull.

- Donner la nouvelle relation de V_m .
- Quel est l'avantage et l'inconvénient de montage push pull.

Exercice 10

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



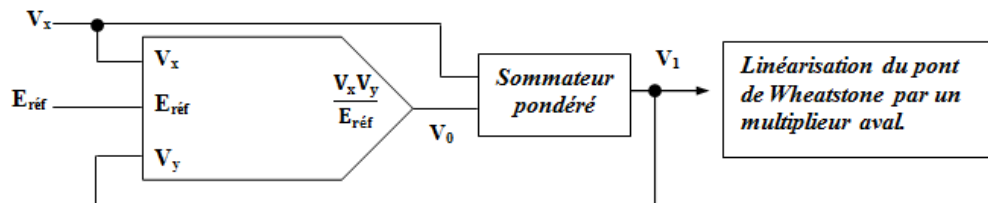
- Donner les relations de V_m et V_1 pour la satisfait la condition $\frac{R_6}{R_5} = \frac{R_{c0}}{\Delta R_c + 2R_f}$

Exercice 11

Lorsqu'on utilise un capteur unique, par exemple résistif, avec pour conditionneur un pont de Wheatstone ou un montage potentiométrique à alimentation symétrique la tension délivré n'est pas linéaire, elle a pour expression :

$$V_m = \frac{e_s \Delta R_c}{4 R_{c0}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{\Delta R_{c0}}}$$

Le montage ci-dessous montre la linéarisation du pont de Wheatstone par un multiplieur aval.

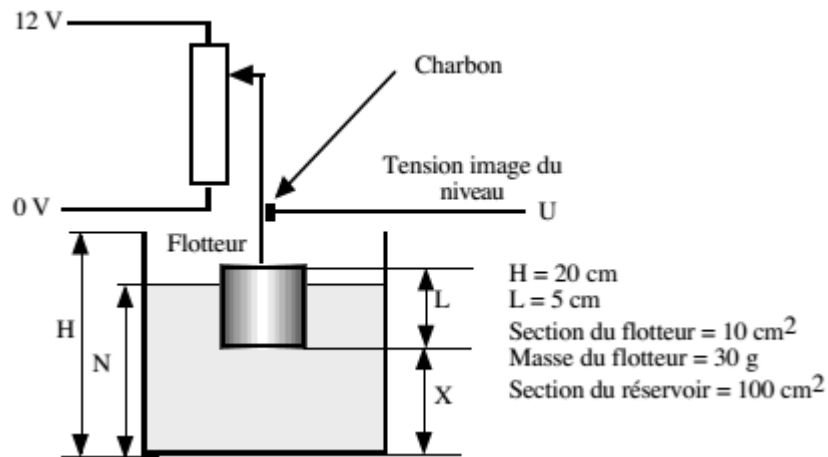


- Donner l'expression de la tension de sortie du multiplieur V_0 en fonction de V_m .
- Donner l'expression de la tension de sortie, V_1 pour $b = \frac{2.E_{ref}}{e_s}$ avec $V_1 = a.V_m + b.V_0$.

Exercice 12

- Représenter la grandeur X en fonction du niveau N , pour N compris entre 0 et H .

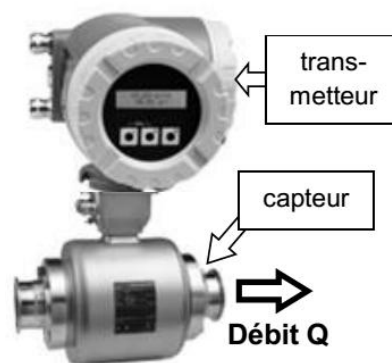
La densité du liquide est 1,4.



- b) Représenter X en fonction du volume V du liquide.
- c) U varie de 0 à 12 v, pour X compris entre 0 et X_{max} . Quelle est la sensibilité du capteur en V/cm .
- d) Quelle est la sensibilité du capteur en V/l .

Exercice 13 : Débitmètre

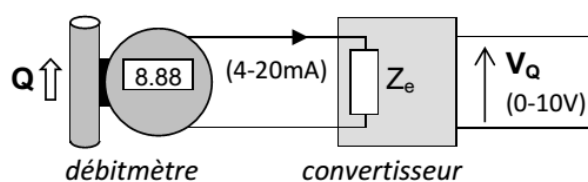
La mesure du débit d'une station de pompage est confiée à un débitmètre électro-magnétique Promag 50H Endress + Hauser (voir figure 1).



Le capteur est inséré le long de la conduite PVC de refoulement, son orifice est de section égale à celle de la conduite, à savoir qu'il a un diamètre intérieur $D = 50 \text{ mm}$. Le débit est prévu fluctuer entre 4 et $10 \text{ m}^3/\text{h}$. On souhaite dans le pire des cas une précision supérieure à 1%.

Le débitmètre renvoie l'information "débit Q " sur une sortie 4 - 20 mA.

Cette information sera ensuite récupérée par une entrée analogique de l'automate après conversion en une tension V_Q comprise entre 0 et 10V, conformément à la figure 2.



Le convertisseur 4 - 20 mA a une impédance d'entrée $Z_e = 500 \Omega$.

1. Déterminer la plage de débit mesurable par l'appareil et justifier son choix.
2. Calculer la tension maximale fournie par la sortie 4 - 20 mA du débitmètre. Cette valeur est-elle compatible avec les spécifications du constructeur du débitmètre ?
3. Calculer le facteur K_D tel que $\frac{dV_Q}{dQ}$, sachant que le débitmètre peut renvoyer une valeur de Q au maximum égale à $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Préciser son unité.
4. Donner la précision et la précision relative du capteur en m^3/h . Conclusions.

Exercice 14 : Boucle de courant 4-20 mA

B.1.Problématique

La mesure d'une tension issue d'un capteur n'est pas suffisamment fiable sur de longues distance, du fait de la chute de tension causée par la résistance des fils électriques.

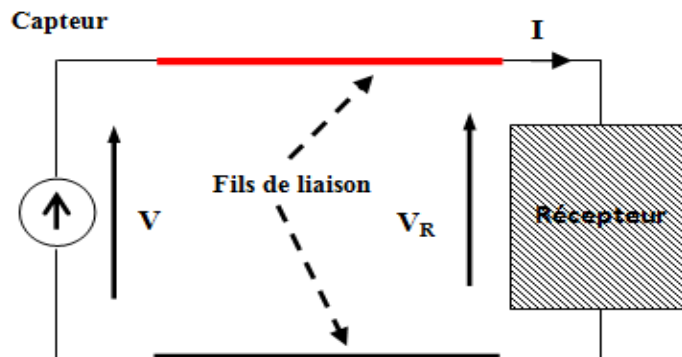
La boucle de courant 4-20 mA est un moyen permettant de transmettre sur une grande distance un signal analogique sans perte ou modification de ce signal.

L'étude d'un capteur va nous permettre de mettre en évidence de phénomène.

B.2.Transmission sans boucle de courant

On considère un capteur délivrant une tension V comprise entre 0 et 5V, connecté à un récepteur consommant un courant $I=100 \text{ mA}$. Ce récepteur est distant de $l=100\text{m}$ du capteur.

Les fils de liaison possèdent une résistance linéique égale à $\rho L=1.10^{-3}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$.

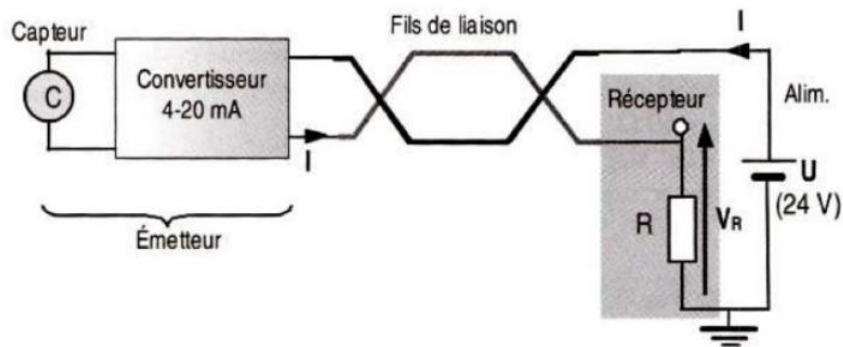


1. Faire un schéma équivalent puis exprimer et calculer numériquement la tension V_R aux bornes du récepteur lorsque le capteur délivre la tension maximale (5 V).
2. Reprendre la même question pour une liaison de longueur double et conclure sur l'influence des fils de liaison.

On souhaite une précision du capteur de 1%, l'exigence est-elle satisfaite dans les 2 cas ?

B.3.Transmission avec boucle de courant

La boucle 4-20 mA comprend un émetteur, l'alimentation de la boucle, les fils de la boucle et le récepteur.



L'émetteur est composé d'un capteur qui va mesurer une grandeur physique et d'un convertisseur qui transforme la valeur mesurée par le capteur en un courant compris dans l'intervalle 4-20 mA.

Un courant de 4 mA circule pour la première valeur de l'échelle de mesure du capteur, et de 20 mA pour la dernière mesure du capteur. Par exemple, si on utilise un capteur qui doit mesurer une température de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 mA correspondra à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 20 mA à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lorsqu'on lit 0 mA, cela signifie que la boucle ne fonctionne plus ou qu'il y a une rupture dans les liaisons.

3. Exprimer la tension V_R lorsque la boucle de courant est parcourue par le courant I .

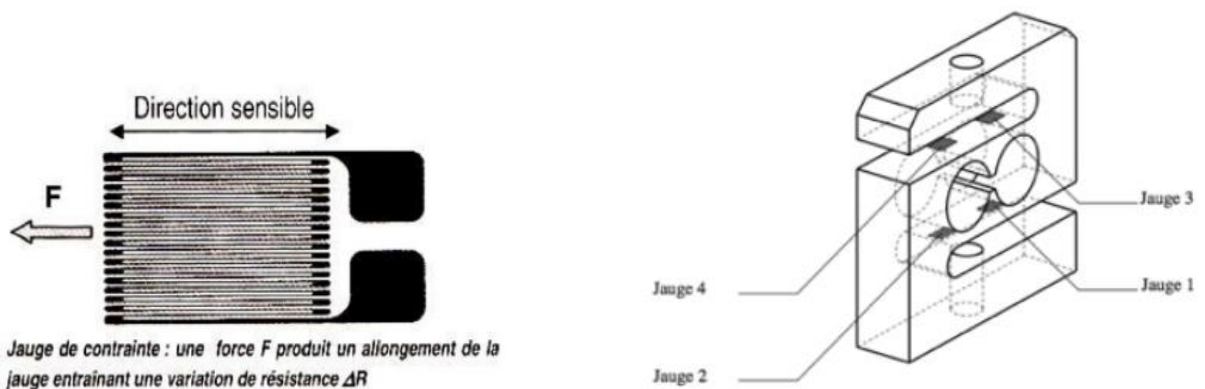
Quelle est l'influence des résistances de la boucle sur cette tension ?

4. Sachant que $R = 250\ \Omega$, calculer numériquement les valeurs maximale et minimale $V_{R\ min}$ et $V_{R\ max}$, correspondant à la première et à la dernière valeur de l'échelle du capteur.

5. Déterminer la valeur de V_R lorsque la température mesurée par le capteur est de 36°C .

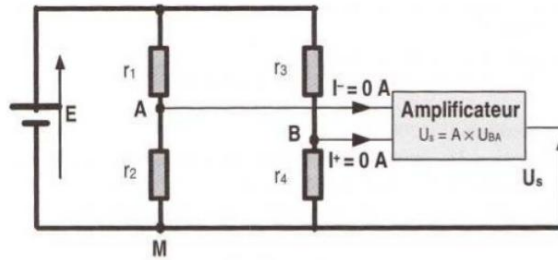
Exercice 15 : Capteur de force

Un capteur de force est constitué de 4 jauges de contrainte collées sur une pièce métallique appelée corps d'épreuve.



Les jauges de contrainte sont des conducteurs ohmiques dont la résistance varie sous l'effet de la déformation qui apparaît lorsque le corps d'épreuve est soumis à la force F que l'on désire mesurer.

Afin d'augmenter la sensibilité du dispositif, les jauges sont montées en pont, appelé pont de Wheatstone (montage page suivante).



En l'absence de forces, les 4 résistances sont identiques, de valeur nominale R_0 .

En présence de forces, 2 jauges sont en extension et voient leur résistance augmenter :

$r_1 = r_4 = R_0 + \Delta R$. Les deux autres, en compression, voient leur résistance diminuer :

$$r_2 = r_3 = R_0 - \Delta R$$

La variation de résistance ΔR vérifie la relation $\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot F$

1. Exprimer U_{AM} en fonction de R_0 , ΔR
2. Exprimer U_{BM} en fonction de R_0 , ΔR
3. En déduire U_{BA} en fonction de R_0 , ΔR
4. Montrer que la tension U_s est proportionnelle à la force F
5. Lorsque l'on soumet le corps d'épreuve à une force $F_0 = 1000 \text{ N}$, on mesure $U_{s0} = 440 \text{ mV}$.

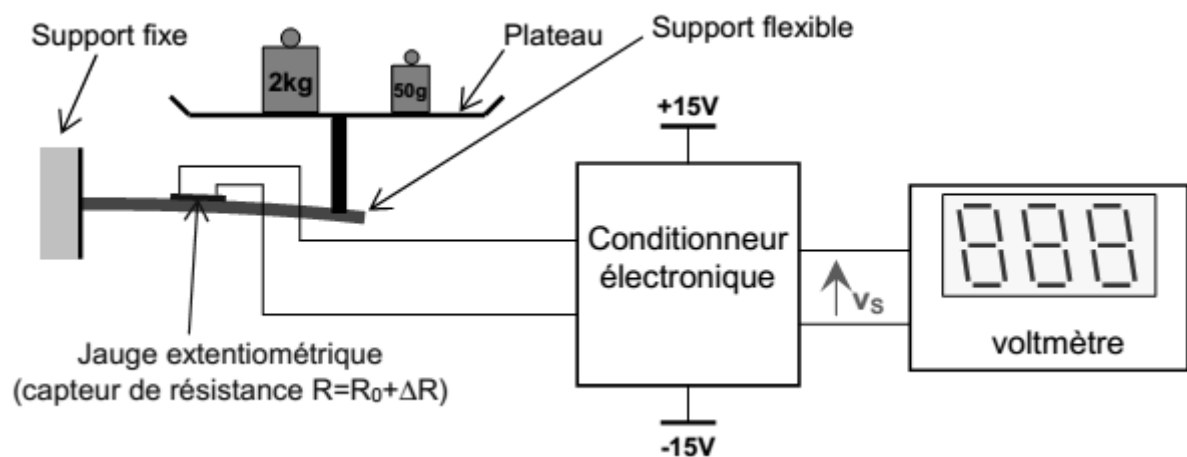
Exprimer k puis calculer sa valeur numérique (on précisera également son unité).

Calculer ΔR .

On donne : $E = 10\text{V}$, $A = 100$, $R_0 = 350 \Omega$

Exercice 16 : Capteur de force

La mesure de poids repose sur le principe de déformation d'une jauge de contrainte collée sur le support flexible de pesage (schéma ci-dessous):

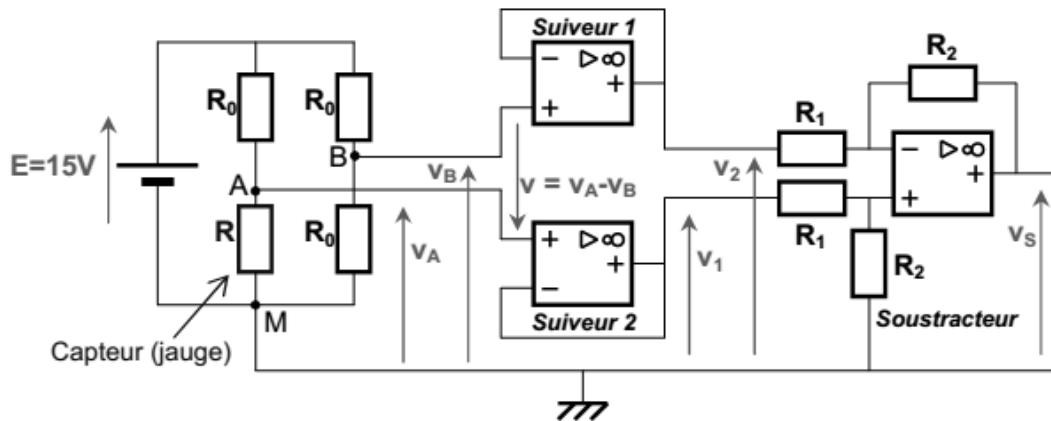


La jauge est une résistance R qui varie avec la déformation due à la masse m sur le plateau :

$$R = R_0 + \Delta R \quad \text{avec } R_0 = 360\Omega \quad \text{et } \frac{\Delta R}{R_0} = K \cdot m \quad \text{avec } K = 4 \cdot 10^{-3} \text{kg}^{-1}$$

1- Etude du conditionneur

Le schéma général du conditionneur est représenté ci-dessous:



Les amplificateurs différentiels intégrés (ADI) sont supposés parfaits :

⇒ pas de courants d'entrée : $i^+ = i^- = 0 \text{ A}$

⇒ tension différentielle d'entrée $\varepsilon = v^+ = v^- = 0 \text{ V}$ (ce qui donne : $v^+ = v^-$)

⇒ tension maximale et minimale en sortie : +15V ou -15V.

1- Etude du pont de jauge

- Exprimer la tension v_A en fonction de E , R_0 et ΔR .
- Exprimer la tension v_B en fonction de E .
- En déduire que v peut se mettre sous la forme: $v = E \frac{\Delta R}{4R_0 + 2\Delta R}$.
- Montrer que l'on peut simplifier l'expression de v pour obtenir : $v = \frac{E}{4} \frac{K.m}{1 + \frac{K.m}{2}}$
- Calculer la valeur de la tension v pour $m = 10 \text{ kg}$.

On admet qu'avec une masse $< 15 \text{ kg}$, on a le produit $K.m \ll 1$ (petit devant 1);

- simplifier alors l'expression de v pour le rendre linéaire.

2- Etude des montages suiveurs

- Montrer que $v_1 - v_2 = v$.
- Expliquer le rôle de ces étages.

3- Etude du montage soustracteur

- Exprimer v^+ en fonction de R_1 , R_1 et v_1 .
- Exprimer v^- en fonction de v_2 , v_s , R_1 et R_2 .
- En déduire $v_s = \frac{R_1}{R_1} (v_1 - v_2)$.

On donne $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$.

- Calculer la valeur de R_1 pour obtenir $v_s = 10 \text{ V}$ lorsque $m = 10 \text{ kg}$.
- Justifier l'intérêt de ce choix.

2- Mise au point de l'ensemble

- Calculer la puissance dissipée au repos ($m = 0$) par l'ensemble du pont de jauge.
- Tracer la caractéristique $v_s = f(m)$. En déduire la masse maximale mesurable.

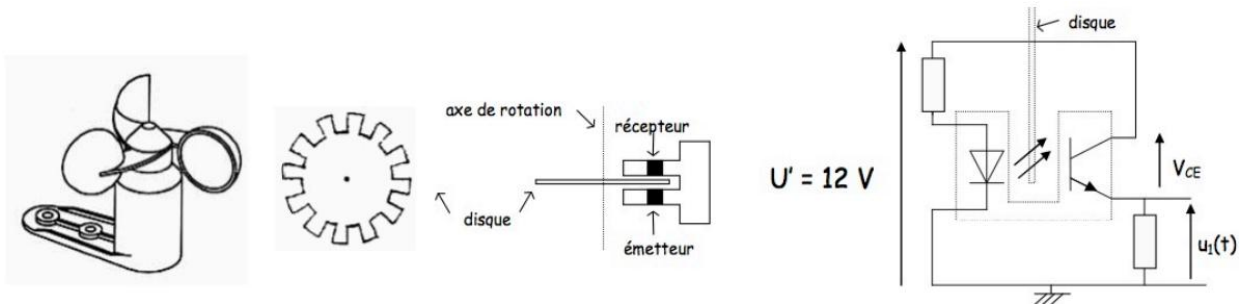
- On désire augmenter la sensibilité de la balance en utilisant une deuxième jauge identique à la première.
- Où faudrait-il placer cette jauge sur le support flexible ?
- A la place de quelle résistance R_0 du pont faudrait-il connecter cette jauge ?

Exercice 17 : Anémomètre

D.1. Problématique

Un store automatique a besoin de mesurer la vitesse du vent afin de se replier automatiquement dès que le vent dépasse une certaine valeur afin d'éviter l'arrachement. L'anémomètre utilisé est composé d'une étoile à 3 branches à godets et d'un photo - détecteur à occultation.

On souhaite pouvoir mesurer des vitesses allant de 1 à 20 m/s, et relier le capteur à une entrée analogique du contrôleur qui va traiter les informations.

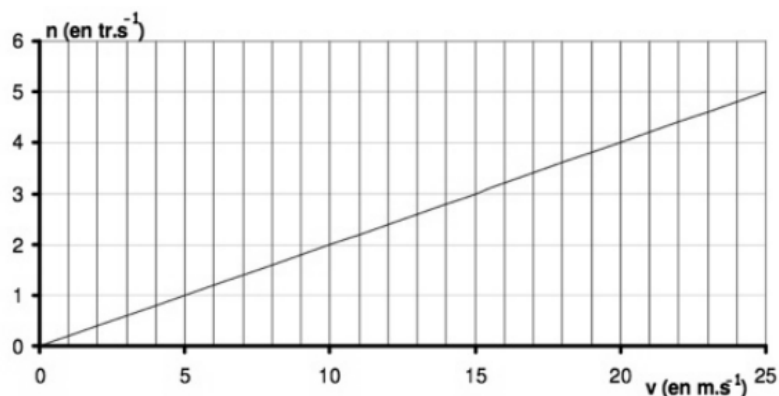


L'axe de rotation de l'étoile est solidaire d'un disque à 12 encoches placé entre un émetteur à infrarouge à DEL et un récepteur. Le phototransistor fonctionne en régime de commutation et on prendra $V_{CE\text{ saturation}} = 0$

D.2. Génération du signal

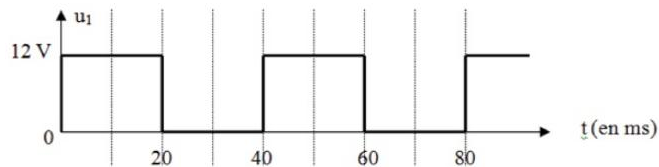
1. Quelles sont les deux valeurs possibles de la tension u_1 ? Justifier votre réponse en précisant l'état du transistor dans chacun des cas.
2. Quelle est la valeur de u_1 lorsque le faisceau infrarouge est occulté ?

Le constructeur de l'anémomètre donne la vitesse de rotation n du disque en fonction de la vitesse du vent v :



3. L'équation qui relie v (m.s⁻¹) à n (tr.s⁻¹) est $n = kv$. Calculer k et préciser son unité.

La tension $u_1(t)$ est représentée ci-dessous en fonction du temps sur 2 périodes :



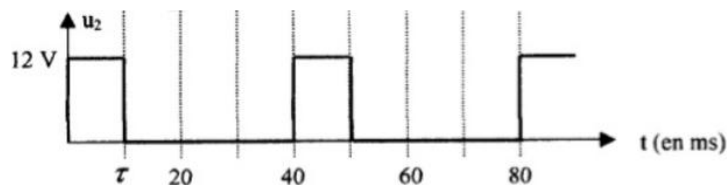
4. Donner la valeur de la période T du signal $u_1(t)$. Donner la relation entre la vitesse de rotation n et la période T .

5. Montrer que la vitesse du vent peut s'écrire sous la forme $v = \frac{1}{12 k T}$

6. En déduire la vitesse du vent.

D.3. Conversion fréquence - tension

On applique la tension $u_1(t)$ à un monostable. Il s'agit d'un composant qui, lorsqu'il reçoit une impulsion, donne en sortie un signal à l'état haut $u_2(t)$ pendant une durée fixe τ , puis le signal de sortie repasse à 0 jusqu'à la nouvelle impulsion.



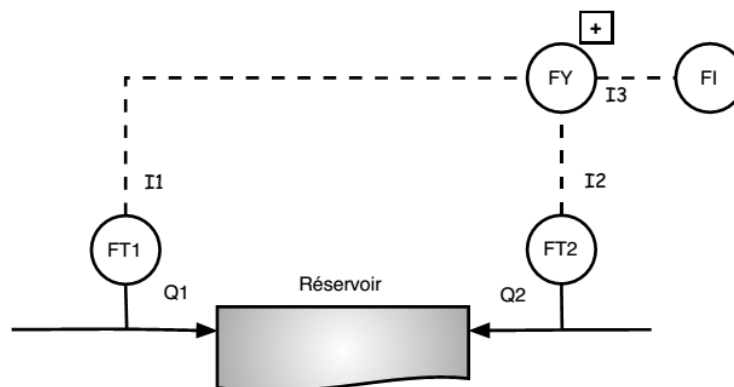
7. Avec le montage monostable présent ($\tau = 10 \text{ ms}$), donner la vitesse maximale du vent qui peut alors être mesurée.

8. Donner l'expression de $(u_2(t))$ en fonction de la période de u_1 . En déduire l'expression de $(u_2(t))$ en fonction de la vitesse du vent.

9. Quel montage devrait-on placer derrière le monostable afin de pouvoir exploiter le signal sur l'entrée analogique du microcontrôleur ?

Vous en donnerez les caractéristiques.

Exercice 18 : Mesures de débits dans un réservoir



- FT1 : Transmetteur de débit ; étendue de mesure 0 - 5 l/min ; sortie 4-20 mA

- FT2 : Transmetteur de débit ; étendue de mesure 0 - 5 bbi/h ; sortie 4-20 mA

1. Calculer l'étendue de mesure de FT1 en l/h. Même question pour FT2.

2. Représenter graphiquement la relation entre le courant I_1 du transmetteur FT1 et le débit Q_1 .

3. Même question pour le courant I2 du transmetteur FT2 et le débit Q2.

4. Quelle est la valeur du débit Q1 si I1 = 10 mA ?

5. Quelle est la valeur de I1 si Q1 = 100 l/h ?

FY est un calculateur qui mesure le débit total Q1 + Q2. Son étendue de mesure est de 0 - 1200 l/h. Sa sortie I3 au standard 4-20 mA, est calculée à l'aide de I1 et I2.

6. Représenter graphiquement la relation entre le courant I3 et le débit Q1+Q2.

7. Exprimer Q1 en fonction de I1, Q2 en fonction de I2, Q1+Q2 en fonction de I3.

8. En déduire I3 en fonction de I2 et I1.

Exercice 19 : Transmetteur de pression différentielle

On utilise un transmetteur de pression différentielle qui a les caractéristiques suivantes :

- étendu de mesure maximale (IMN) : 90 kPa ;
- étendu de mesure réglée (IMR) : 60 kPa ;
- sortie analogique standard 4-20 mA.

9. Quelle est la sensibilité de ce transmetteur en mA/kPa ?

La précision intrinsèque (en % de IMR) du transmetteur est donnée par la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\mp 0.20\% \text{ ou } \mp \frac{0.016\% \cdot IMN}{IMR}$$

10. Donner la valeur en % de la précision intrinsèque du transmetteur.

11. Quelle est la valeur de l'erreur absolue en kPa pour une pression mesurée de 10 kPa.

Exercice 20 : Etalonnage

On effectue l'étalonnage d'un capteur de pression. On obtient les résultats suivants :

Pression réelle (en bar)	1	6
Mesure	1.02	6.04

1. Quelle est la valeur de l'erreur de gain en db ?

2. Quelle est la valeur de l'erreur de zéro en mb ?

3. Quelle est la mesure de pression fournie par le capteur si la pression mesurée est de 4 bars ?

4. Quelle est la valeur vraie de la pression si le capteur fournie une mesure de 4 bars ?

Exercice 21 : Capteur de température

Pour mesurer la température d'un liquide autour de 50°C, on utilise un capteur de température à CTN.

On donne la valeur de sa résistance R du capteur en fonction de sa température T :

$$\ln(R) = \ln(R_{25}) + B \left(\frac{1}{273+T} - \frac{1}{298} \right) \quad (1)$$

avec R₂₅ sa résistance à 25°C, T sa température en °C et B une constante en °K. L'élément CTN NTH2007A a les caractéristiques suivantes :

- R₂₅ = 10kΩ ± 5% ;

- $B = 4100 K \pm 5\%$;

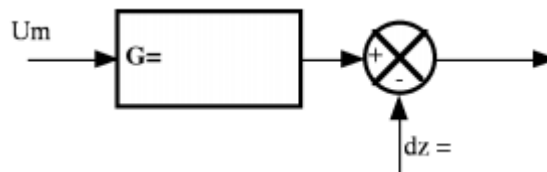
a) Quelles sont les valeurs maximale et minimale que peut prendre B ?

b) Quelle est la valeur de la résistance de la CTN à 45°C et 55°C ?

Le conditionneur utilise un montage à amplis opérationnels qui fournit une tension U_m proportionnelle R_{ctn} :

$$U_m = (\text{en V}) = \frac{R_{ctn} (\text{en } \Omega)}{1000} \quad (2)$$

c) Compléter le schéma suivant de manière à obtenir une tension de 0 V pour une température de 45°C et une tension de 10 V pour une température de 55°C .



Références

- [1] GEORGES ASCH ET COLL, Les Capteurs en Instrumentation Industrielle ,7^e Édition, Paris, Dunod, 2010.
- [2] M. GROUT ET S. PATRICK , Instrumentation Industrielle Spécification et Installation des Capteurs et Vannes de Régulation 4^e Édition, Paris, Dunod, 2015.
- [3] L. BERGOUGNOUX, Conditionnement Électronique de Capteurs , Cours 2^{ème} Année SIIC ,Polytech Marseille , Département Mécanique Énergétique, 2006 .
- [4] F. BAUDOIN ET M. LAVABRE, Capteurs : Principes et Utilisations, Edition Casteilla, 2007.
- [5] A. BSATA, Instrument et Automation dans le Contrôle des Procédés, 2^e Édition, Les Éditions Le Griffon D'argile, Canada, 1994.
- [6] P. POULICHET , Cours sur L'électronique de Conditionnement du Capteur, Groupe ESIEE Paris, 2006.
- [7] K. BENLADGHEM , Effet Doppler en Mode Continu. Application à la Mesure de la Portée d'un Mobile, Mémoire de Master Spécialité : Instrumentation Electronique, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen Faculté de Technologie, 2017.
- [8] GEORGES ASCH ET COLL , Acquisition de Données du Capteur à L'ordinateur 3^e Édition Paris, Dunod , 2011.
- [9] BENDIB MOHAMED ELHADI, Cours Métrologie et Instrumentations, Département de Génie Electrique Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique ,Oran,2019.
- [10] E.T.A.I - Revue Technique Automobile 411 - PEUGEOT 307 PHASE 1 - 2001 à 2005 Broché – 22 décembre 2004
- [11] P. DASSONVALLE , Les Capteurs 62 Exercices et Problèmes Corrigés, 2^e Édition , Paris Dunod, 2013.

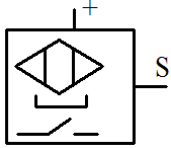
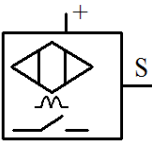
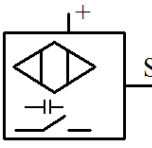
Annexes

Schématisme normalisée des détecteurs

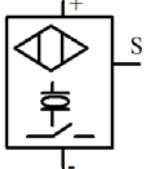
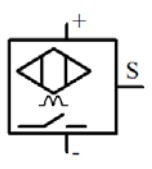
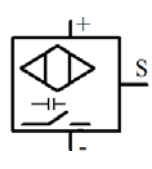
de proximité électronique

(Capteurs 2 fils ou 3 fils)

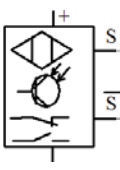
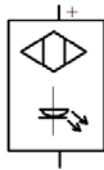
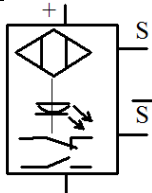
Technologie 2 fils PNP

Magnétique	Inductif	Capacitif
		
+ : alimentation détecteur S : signal de compte rendu		

Technologie 3 fils PNP

Ultrason	Inductif	Capacitif
		
+/- : alimentation détecteur S : signal de compte rendu		

Schématisme normalisée des détecteurs optiques

Barrage		Système reflex
Emetteur	Récepteur	
		
+/- : alimentation détecteur S : signal de compte rendu		

Symboles normalisés pour schémas

Symboles normalisés pour schémas électriques NF EN 60617

Nature du courant et de la tension		Conducteurs, repérage, bornes et connexions			
Courant continu		Trois conducteurs		Mise à la terre ou terre (symbole général)	
Courant alternatif		Conducteur sous écran		Conducteur, terre de protection	
Alternatif triphasé, neutre, 50 Hz, 400 V	3/N \sim 50 Hz 400	Trois conducteurs dans un même câble		Barette à bornes, bornier	
Courant redressé avec composante alternative		Liaison flexible		Borne ou dérivation (cercle noir)	
Polarité négative Polarité positive	- +	Paire coaxiale		Masse, châssis	
Conducteur neutre Conducteur médian	N M	Faisceau de trois conducteurs		Équipotentialité	

Dispositifs de connexion

Prise femelle		Barrette de connexion		Dérivation, liaison en T	
Fiche mâle		Connecteur mâle mâle avec prise de dérivation		Double dérivation, double liaison en T	
Fiche et prise associée		Fiche et prise coaxiale		Ensemble de connecteurs accouplés	

Résistances - Condensateurs et inductances

Résistance (général)		Condensateur (général)		Impédance	
Résistance variable ou réglable		Condensateur variable		Thermistance	
Élément chauffant		Condensateur de traversée		Inductance, bobine	
Résistance variable à contact mobile		Inductance à noyau magnétique		Inductance variable par contact mobile et par échelons	

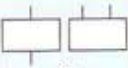
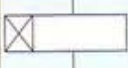

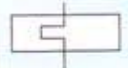
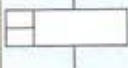
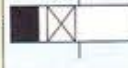



Semiconducteurs









Diode à semiconducteur symbole général		Diode à capacité variable		Diode tunnel, diode Esaki	
Diode électroluminescente		Diode symétrique Diac		Diode unitunnel	
Diode utilisant l'effet de la température		Diode à effet de claquage dans un seul sens, Zener		Diode à effet de claquage dans les deux sens	
Détecteur à semiconducteur		Diode Schottky		Photodiode	






Thyristor diode bloqué en inverse		Thyristor diode passant en inverse		Thyristor triode type non spécifié	
Thyristor triode bloqué en inverse, gâchette P		Thyristor triode passant en inverse, gâchette P		Thyristor tétrode bloqué en inverse	
Thyristor triode bloqué en inverse, gâchette N		Thyristor triode passant en inverse, gâchette N		Thyristor triode symétrique TRIAC	
Transistor PNP		Transistor avalanche NPN		Transistor NPN avec collecteur à l'enveloppe	
Transistor NPN avec base polarisée transversalement		Transistor à effet de champ type P ou N		Transistor à jonction unique base P ou N	
Transistor PNIP avec connexion à la région intrinsèque		Transistor PNIN avec connexion à la région intrinsèque		Amplificateur à circuit intégré linéaire (ACIL)	
Phototransistor PNP		Photorésistance		Coupleur optique Photocoupleur isolateur optique	
Cellule photovoltaïque		Magnétorésistance type linéaire		Générateur Hall avec 4 connexions	









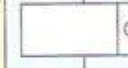


Contacts - Commutateurs - Interrupteurs					
Contact à fermeture		Contact à ouverture retardé à la fermeture		Contact à fermeture retardé à la fermeture	
Contact à ouverture		Contact à ouverture à retour automatique		Contact à fermeture à retour automatique	
Contact à ouverture tardive		Contact à ouverture anticipée		Contact à fermeture à position maintenue	
Contact à fermeture tardive		Contact à fermeture anticipée		Contact à 2 directions et position médiane de coupure	
Contact à 2 directions côté 1 : retour automatique côté 2 : position maintenue		Contact à fermeture à commande manuelle (symbole général)		Bouton-poussoir à fermeture et à retour automatique	
Tirette à fermeture à retour automatique		Bouton rotatif à fermeture sans retour automatique		Interrupteur de position « 0 » : contact à l'ouverture	
Interrupteur à fermeture fonctionnant sous l'effet de la température		Interrupteur statique (symbole général)		Interrupteur de position « P » : contact à la fermeture	
Contacteur statique (à semiconducteur)		Interrupteur agissant par effet thermique exemple : bilame		Interrupteur agissant par effet thermique contact d'un relais thermique	















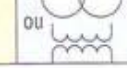
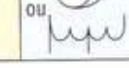
Appareils mécaniques de connexion-Fusibles							
Contacteur		Disjoncteur		Discontacteur automatique par relais		Fusible (symbole général)	
Sectionneur		Rupteur		Interrupteur sectionneur		Fusible interrupteur	

Relais électromécanique - Capteurs					
Organes de commande d'un relais (symbole général)		Mise au travail retardé		Mise au repos retardé	
Relais thermique		À mise au travail et mise au repos rapides		À mise au travail et mise au repos retardées	
Capteur sensible à une proximité		Capteur sensible à l'effleurement		Dispositif sensible à une proximité (symbole fonctionnel)	

Dispositifs généraux de commande							
Actionneur manuel «cas général»		Par pédale		Par levier		Par clef	
Par poussoir		Poussoir de sécurité		Électromagnétique		Par moteur électrique	

Signalisation							
Lampe		Ne : néon Xe : xénon I : iode Hg : mercure	ARC : arc Na : vapeur de sodium UV : ultraviolet IR : infrarouge	IN : incandescence EL : électroluminescence FL : fluorescence LED : diode électroluminescente	RD : rouge BU:bleu YE : jaune GN : vert WH : blanc	Type de lampe	
Clignotant		Sonnerie		Horloge (symbole général)		Convertisseur de signal	

Appareils de mesure (cercles pour indicateurs, carrés pour enregistreurs, rectangle pour compteurs)							
Ampèremètre		Voltmètre		Wattmètre		Enregistreur Wattmètre	
Oscilloscope		Multimètre		Ampèreheuremètre		Wattheuremètre	
Compteur d'impulsions électriques		Affichage numérique (symbole général)		Thermocouple			

Machines électriques - Transformateurs - Convertisseurs - Démarreurs							
Redresseur		Onduleur		Démarreur (symbole général)		Générateur (symbole général)	
Machine (symbole général)		* = C, G, GS... avec C = commutatrice G = génératrice M = moteur GS = générateur synchrone MG = moteur ou génératrice MS = moteur synchrone			Élément de pile ou d'accumulateur		
Moteur linéaire		Moteur pas à pas		Moteur série monophasé		Moteur asynchrone triphasé à rotor à court-circuit	
Moteur asynchrone triphasé à rotor à bagues		Moteur à courant continu à excitation série		Moteur à courant continu à excitation en dérivation (shunt)			
Alternateur synchrone triphasé à aimant permanent		Transformateurs à deux enroulements		Autotransformateur			

Principaux symboles hydrauliques et pneumatiques NF ISO 1219-1, NF E 04-057					
Conduites - Raccordements - Réservoirs - Accumulateurs - Sources d'énergie - Clapets					
Conduite de travail alimentation retour		Raccord rapide sans clapet		Source de pression hydraulique	
Conduite de pilotage		Raccord rapide avec clapet		Source de pression pneumatique	
Conduite d'évacuation des fuites		Raccords rapides accouplés		Réservoir à l'air : - conduite débouchant au-dessus du fluide	
Conduite flexible		Raccord rotatif à une voie		- conduite débouchant au-dessous du fluide	
Ligne électrique		Raccord rotatif à trois passages		- à conduite en charge	
Raccordement de conduites		Purge d'air continue		Réservoir sous pression	
Croisement de conduites		Purge d'air temporaire		Accumulateur (position verticale seulement)	
Orifice ou voie fermée		Évacuation d'air non connectable		Accumulateur hydro-pneumatique	
Silencieux (air)		Évacuation d'air connectable		Clapet de non retour piloté à l'ouverture	
Clapet de non retour sans ressort		Clapet de non retour avec ressort		Clapet de non retour à étrang- lement réglable	

Appareils de conditionnement - Limiteurs de pression - Échangeurs de chaleur - Réducteurs de débits - Sélecteurs					
Filtre, crépine		Purgeur à commande manuelle		Purgeur à commande automatique	
Déshydrateur		Lubrificateur		Limiteur de pression (soupape de sureté)	
Filtre avec séparateur		Robinet vanne		Réducteur de pression détendeur	
Régulateur de température		Refroidisseur ou réfrigérant		Groupe de conditionnement d'air	
Réchauffeur		Sélecteur de circuit		Soupape d'échappement rapide	
Réducteur de débit non réglable		Réducteur de débit réglable		Diviseur de débit	

Appareils complémentaires					
Indicateur de pression		Manomètre		Thermomètre	
Indicateur de niveau		Manomètre différentiel		Débitmètre	

Distributeurs (voir principe et autres cas pages 497 et 499)					
2/2 normalement fermé		3/2 normalement fermé		Distributeur 4/2	
2/2 normalement ouvert		3/2 normalement ouvert		Distributeur 5/2	

Modes de commandes					
Commande musculaire	Commande mécanique	Commande électrique	Commande directe par pression		
- Manuelle générale	- Poussoir ou palpeur	- Électro-aimant à un enrouleur	- Augmentation de pression d'huile		
Bouton - poussoir	- Ressort	- Électro-aimant à deux enrouleurs	- Augmentation de pression d'air		
- Levier	- Galet	- Moteur électrique	- Diminution de pression d'huile		
- Pédale	- Galet escamotable	- Combinaison électro-aimant et pression d'air	- Diminution de pression d'air		
Dispositif de verrouillage (* symbole à insérer)	Basculeur (détente brusque)	Encliquetage (maintien en position)			

Vérins - Multiplicateurs et échangeurs de pression (voir aussi page 490)					
Vérin simple effet rappel par force non définie (hydraulique)	Vérin simple effet rappel par ressort (pneumatique)	Vérin télescopique simple effet (hydraulique)			
Vérin double effet simple tige (pneumatique)	Vérin double effet à double tige traversante (pneumatique)	Vérin différentiel (hydraulique)			
Vérin avec amortissement fixe d'un côté (pneumatique)	Vérin avec amortissement fixe des deux côtés (pneumatique)	Vérin avec amortissement réglable des deux côtés			
Multiplicateur de pression à une nature de fluide	Multiplicateur de pression à deux natures de fluide	Échangeur de de pression air huile			

Pompes - Moteurs - Compresseurs					
Pompe hydraulique à cylindrée fixe	Moteur hydraulique à cylindrée fixe	Moteur hydraulique à cylindrée réglable à un seul sens de flux			
- à un seul sens de flux	- à un seul sens de flux et un sens de rotation	Pompe moteur à cylindrée variable et deux sens de flux			
- à deux sens de flux	- à deux sens de flux et deux sens de rotation	Moteur hydraulique oscillant			
Compresseur à cylindrée fixe, un seul sens de flux	Moteur pneumatique à cylindrée variable et deux sens de flux				

Principaux symboles pour systèmes mécaniques							
Accouplements mécaniques NF EN ISO 3952-3							
Accouplement (symbole général)		Accouplement rigide		Accouplement élastique		Accouplement compensateur de dilatation	
Limiteur de couple		Embrayage (symbole général)		Accouplement de protection à rupture		Embrayage à denture	
Embrayage à friction à un sens de marche		X = M (mécanique) X = E (électromagnétique) X = P (pneumatique) X = H (hydraulique)		Embrayage centrifuge à friction		Embrayage à deux sens de marche	
Coupleur hydraulique		Coupleur électrique		Roue libre (général)		Frein	

Mécanismes à friction (↓ = effort presseur et ↔ = mouvement de réglage)			
À roues cylindriques	Réglable à plateau	À roues coniques	Réglable à roues coniques

Engrenages NF EN ISO 3952-2				
Roue cylindrique	Roue conique	Roue creuse	Secteur denté	Système roue-crémaillère

Engrenage cylindrique extérieur	Engrenage cylindrique intérieur	Engrenage conique	Système roue et vis sans fin

Transmission par poulies courroies		Transmission par roues et chaîne															
<p>type de la courroie (facultatif)</p> <table border="1"> <tr> <td>plate</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ronde</td> <td></td> </tr> <tr> <td>trapézoïdale</td> <td></td> </tr> <tr> <td>crantée</td> <td></td> </tr> </table> <p>NF EN 3952-4</p>		plate		ronde		trapézoïdale		crantée		<p>type de la chaîne (facultatif)</p> <table border="1"> <tr> <td>maillons</td> <td></td> </tr> <tr> <td>rouleaux</td> <td></td> </tr> <tr> <td>dents</td> <td></td> </tr> </table> <p>roue pignon</p> <p>NF EN 3952-4</p>		maillons		rouleaux		dents	
plate																	
ronde																	
trapézoïdale																	
crantée																	
maillons																	
rouleaux																	
dents																	