Notion de chaine de mesure

1.1 Définitions

Mesure : C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. Exemple : 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes.

Mesurage : L'ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

Grandeur : Paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d'un produit ou de son transfert. Exemple : pression, température, niveau, débit.

Mesurande : C'est la grandeur physique objet du mesurage.

Grandeur d'influence : On appelle grandeur d'influence, toutes les grandeurs physiques autres que la grandeur à mesurer, qui peuvent de perturber la mesure.

1.2 Types de grandeurs physiques

Toutes les mesures sont applicables à un très grand nombre de grandeurs physiques, qui peuvent être :

- Mécaniques : longueur, vitesse, force, niveau, débit, pression, puissance, couple ...
- Electriques : tension, intensité, puissances ...
- Thermiques : température, chaleur ...
- Chimiques : PH, concentration ...
- Magnétiques : champ magnétique, flux, aimantation …
- Radiatives : lumière visible, rayons X, radioactivité ...

1.3 Domaines d'application

On effectue des mesures pour connaître la valeur instantanée et l'évolution de certaines grandeurs. Renseignements sur l'état et l'évolution d'un phénomène physique, chimique, industriel. La finalité de ces mesures peut être très variée. On retiendra notamment :

- **Mesures en laboratoire** : indispensable à tout organisme de recherche, à tout service d'étude, ceci afin de pouvoir élaborer des théories et les vérifier, de concevoir et tester des nouveaux matériaux, composants, produits.
- **Mesures de tests en production** : à toutes les étapes de la fabrication d'un produit, les divers éléments le constituant sont testés.
- **Contrôle de processus industriels** : beaucoup de processus de fabrication industriels sont régulés. La mesure des sorties des processus est nécessaire pour la régulation et la surveillance de ces processus. Le système de mesure est un élément important dans le système de contrôle-commande du processus.

1.4 Chaîne de mesure

La chaîne de mesure est l'ensemble des éléments nécessaires pour connaître la valeur ou l'évolution d'une grandeur physique. La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum trois étages :

- Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal.
- Un conditionneur de signaux dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou

d'utilisation; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal, un convertisseur A/N, un bloc de linéarisation de la caractéristique du capteur, un système de compensation des dérives thermiques du capteur.

- Une unité de visualisation et/ou d'utilisation qui permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter dans le cas d'une régulation, par exemple.

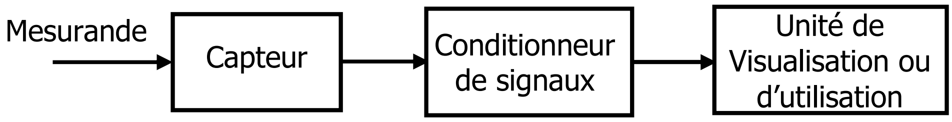

Figure 1.1 : Schéma de principe d'une chaîne de mesure.

1.5 Définition d'un capteur

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

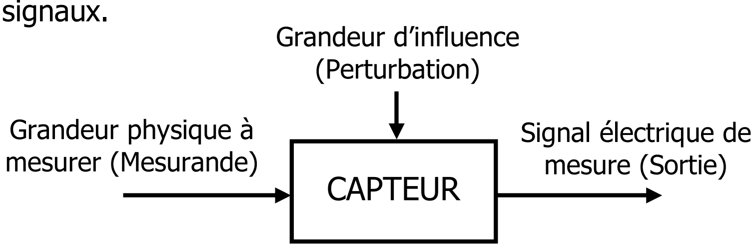

Figure 1.2 : Schéma simplifié d'un capteur

Idéalement, il faudrait que la réponse de l'élément de mesure ne dépende que du mesurande. Malheureusement, en pratique, les grandeurs d'influences viennent perturber le fonctionnement du capteur et entraînent souvent des erreurs de mesure. Généralement les capteurs industriels sont compensés où un dispositif interne au capteur limite l'influence des grandeurs perturbatrices.

1.5.1 Constitution interne d'un capteur

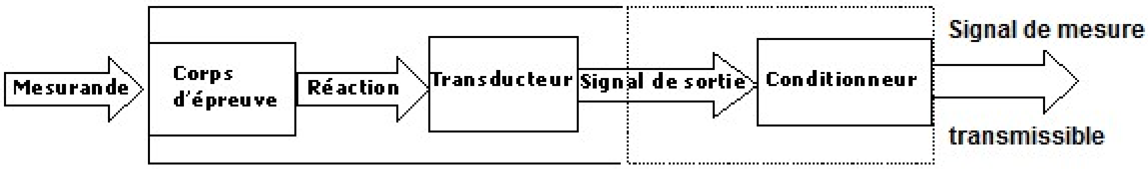

Figure 1.3 : Constitution interne d'un capteur

- **Corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer. Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique non électrique dite mesurande secondaire. Par exemple, le mercure d'un thermomètre est un corps d'épreuve, car il réagit à la température en changeant de volume. Malheureusement, le corps d'épreuve peut réagir aussi aux grandeurs d'influences. Le choix d'un bon corps d'épreuve est important.

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

- **Conditionneur** : mise en forme, amplification, linéarisation, filtrage, mise à niveau du signal de sortie pour sa transmission à distance. Il peut être incorporé ou non au capteur proprement dit.

1.5.2 Nature du signal de mesure

Selon le type de capteur, le signal électrique de mesure peut être de différentes natures : analogique, numérique ou logique.

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

- courant 0 – 20 mA , 4 – 20 mA.
- tension 0 – 10 V , 0 – 5 V.
- pression 20 – 100kPa.

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

signal de mesure logique : il ne compte que deux valeurs possibles, c'est un signal tout ou rien.

1.6 Classification des capteurs

1.6.1 Classification des capteurs en fonction de la grandeur de sortie

Type de capteur	Type de signal de sortie	Appellation	Exemple
Analogique	Bas niveau	Capteur	Capteur de température 10 mV/°C
	Haut niveau	Capteur-transmetteur	Capteur pression 4 – 20 mA
Numérique	Numérique absolu	Codeur absolu	Capteur de position angulaire
	Numérique incrémental	Codeur incrémental	Capteur de vitesse
Logique	Tout ou rien	Détecteur	Détecteur de niveau Thermostat

Tableau 1.1 : Classification des capteurs selon la nature du signal de mesure.

1.6.2 Classification des capteurs en fonction de la grandeur mesurée

- Capteurs de position
- Capteurs de vitesse
- Capteurs de température
- Capteurs de pression
- Capteurs de débit

1.6.3 Classification des capteurs selon leur principe de fonctionnement

1.6.3.1 Capteur passif

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

- Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge de contrainte liée à une structure déformable).

La mesure de l'impédance permet ensuite de déduire la valeur du mesurande. Cette mesure nécessite l'utilisation d'un circuit électrique alimenté.

1.6.3.2 Capteur actif

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement basé 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.
de des relations de cause à effet, entre l'anomalie et sa cause.

Caractéristiques Métrologique des capteurs

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

1 Etendue de mesure

C'est la plage de valeurs du mesurande pour lesquelles le capteur répond au spécifications du constructeur. En dehors de cette plage, la mesure est susceptible d'être très imprécise.

$EM = X_{\max} - X_{\min}$. L'unité généralement utilisée est l'unité du mesurande.

Exemple : Capteur de température, étendue de la mesure (0 °C, 100 °C).

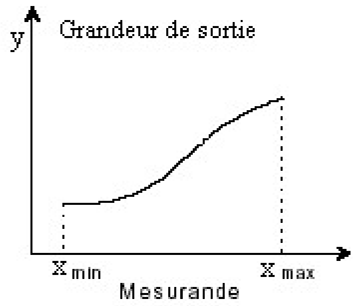

Figure 1 : Etendue de mesure.

2 Domaines d'utilisation

Chaque capteur présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurande, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber le capteur.

- **Domaine nominale d'emploi** : Domaine dans lequel le mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques du capteur. Il est définit par l'étendue de mesure.
- **Domaine de non détérioration** : Dépassement du domaine nominal d'emploi. Les caractéristiques du capteur sont modifiées après de manières réversibles.
- **Domaine de non destruction** : Dépassement du domaine de non détérioration. Les caractéristiques du capteur sont modifiés de manière irréversible. Un nouvel étalonnage est nécessaire.

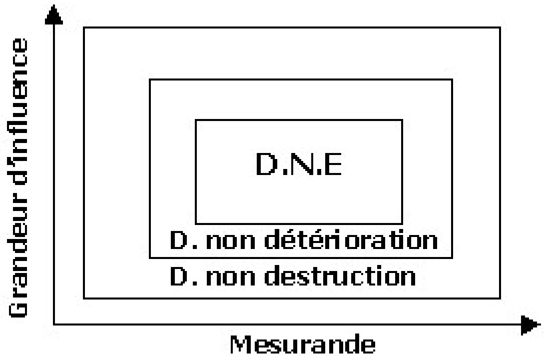

Figure 2 : Domaines de fonctionnement

3 Etalonnage

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Très souvent l'étalonnage n'est valable que pour une seule situation d'utilisation du capteur.

4 Sensibilité

La sensibilité représente le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante du signal d'entrée, pour une mesure donnée, i.e. $S = \frac{dy}{dx}$. C'est la pente de la tangente à la courbe de la réponse du capteur. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité est constante. Unité typique de la sensibilité = unité sortie/unité mesurande.

5 Résolution

Elle correspond à la plus petite variation du mesurande que le capteur est susceptible de déceler.

6 Finesse

Elle qualifie l'incidence de l'instrument de mesure sur le phénomène mesuré. Elle est grande lorsque l'appareil perturbe très peu la grandeur à mesurer.

7 Linéarité

Pour des raisons de facilités d'exploitation, on s'efforce d'utiliser le capteur en sorte qu'il établisse une relation linéaire entre les variations de la grandeur de sortie et celles du mesurande. Cette relation linéaire peut être obtenue par exemple par la méthode des moindres carrés. On définit à partir de cette relation linéaire l'écart de linéarité qui exprime en %, par rapport à l'étendue de mesure, l'écart maximal entre la courbe réelle et la relation approchant la courbe.

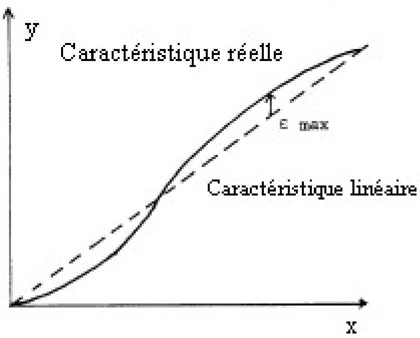

Figure 3 : Erreur de linéarité

Recherche de la meilleure droite

Considérons n couples de mesure $(x_i, y_i), i = 1,...,n$. Les x_i représentent les valeurs en entrée. Les y_i sont les valeurs en sortie du capteur. Supposons que la caractéristique linéaire à estimer est donnée par : $y = a\,x + b$. La somme des erreurs quadratiques pour tous les points de données est : $e = \sum_{i=1}^{n}(y_i - a\,x_i - b)^2$. Nous devons minimiser l'erreur e par rapport aux deux paramètres a et b. Les conditions requises sont : $\frac{\partial e}{\partial a} = 0$ et $\frac{\partial e}{\partial b} = 0$. Après calcul de ces dérivées, on obtient :

$$\sum_{i=1}^{n} x_i\,(y_i - a\,x_i - b) = 0 \quad et \quad \sum_{i=1}^{n}(y_i - a\,x_i - b) = 0$$

La résolution de ces deux équations donne

$$a = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\,y_i - \bar{X}\,\bar{Y}\right) \Big/ \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \bar{X}^2\right) \quad \text{et} \quad b = \bar{Y} - a\,\bar{X}$$

On peut donc calculer les valeurs théoriques de sortie à partir de la caractéristique linéaire. On peut ensuite calculer l'erreur entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques. Pour obtenir l'erreur de linéarité, il suffit de diviser la plus grande valeur de l'erreur par l'étendue de mesure en sortie du capteur et de ramener cette valeur en %.

8 Rapidité – Temps de réponse

La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande.

9 Précision

Elle définie l'écart que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. La précision fait appel à la notion de fidélité et de justesse, puisqu'un capteur juste et fidèle est un capteur précis.

Fédilité : elle définie la qualité d'un capteur à délivrer une mesure répétitive sans erreurs. L'erreur de fidélité correspond à l'écart type obtenu sur une série de mesures correspondant à un mesurande constant.

Justesse : c'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendamment de la notion de fidélité. Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle.

Rappel : soit n mesures effectuées sur un mesurande, on définit de ces n mesures:

- la valeur moyenne : $\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$
- l'écart type (indication de la dispersion de ces résultats) : $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{X}\right)^2}$

L'erreur de précision peut être représentée de trois façons :

- par l'erreur absolue e_a qui exprime l'erreur de précision dans le système de mesure du mesurande;
- par l'erreur relative e_r qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à la valeur mesurée x ($e_r = 100\frac{e_a}{x}$);
- par la classe de précision qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure ($CP = 100\frac{e_a}{E.M}$).

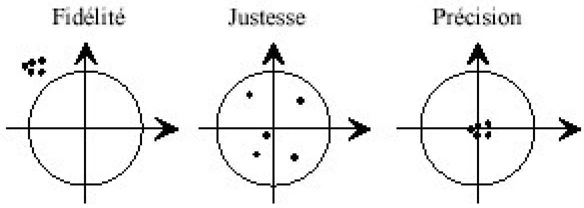

Figure 4 : Illustration des notions de fidélité, justesse et précision.

9.1 Erreurs d'une chaîne de mesure

La valeur d'un mesurande ne peut être évaluée que par la chaîne de mesurage. L'erreur de mesure est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle. Cette erreur de mesure est estimée à partir des erreurs engendrées par les imperfections inhérentes à la chaîne de mesurage. L'erreur de mesure est la somme de l'erreur systématique et de l'erreur aléatoire.

9.1.1 Erreurs systématiques

Des mesurages répetés, pour une même valeur du mesurande, peuvent entraîner un décalage constant entre la valeur réelle et la valeur mesurée. Ce décalage constant ou à variation prévisible est l'erreur systématique. Les erreurs systématiques ont généralement pour cause une connaissance erronée ou incomplète de l'installation de mesure ou une mauvaise utilisation; elles peuvent souvent être réduites ou annulées par une correction. Exemples d'erreurs systématiques courantes

- Valeur erronée de la température de référence d'un thermocouple, valeur inexacte de la tension d'alimentation d'un pont de Wheatstone.
- Décalage de la mesure d'une résistance ohmique due à la valeur ohmique des fils électriques introduits lors de ce mesurage.

- Erreur de rapidité par une mesure effectuée avant établissement du régime permanent du mesurande.

9.1.2 Erreurs aléatoires

Des mesurages répétés, pour une même valeur d'un mesurande, conduisent à des écarts entre la valeur réelle et la valeur mesurée. Ces écarts sont considérés comme des erreurs aléatoires car variant de façon imprévisible. Certaines des causes peuvent être connues mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de l'expérience sont inconnues. Quelques exemples d'erreurs aléatoires courantes

- Erreur de quantification.
- Bruit de fond produit par agitation thermique, ou inductions parasites dues aux rayonnements électromagnétiques.
- Erreurs dues à la variation de la célérité du son, liée à la température du milieu ambiant, pour une mesure de hauteur d'un capteur à ultrason.

1.8.3 Le calcul d'erreur

Soit la valeur de la mesure y qui est dépendante de plusieurs grandeurs $x_1,\ldots,x_n$. La fonction y peut être écrite comme suit :

$$y = f\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right)$$

Si chacun de ces paramètres est entaché d'une erreur $\left(\Delta x_i\right)$, la valeur de la mesure sera aussi entachée d'une erreur $\left(\Delta y\right)$ et on aura :

$$y \pm \Delta y = f\left(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \ldots, x_n \pm \Delta x_n\right)$$

En utilisant le développement en série de Taylor, on peut estimer l'incertitude maximale Δy par l'expression

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i$$

Cette approche surestime l'incertitude sur y. On obtient une estimation plus réaliste à partir de la racine de la somme des carrés

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

Conditionnement des capteurs

1 Introduction

Le conditionnement de la mesure consiste à rendre exploitable la mesure issue du capteur et à effectuer une adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure complète.

2 Amplificateur opérationnel idéal

A la base, l'ampli opérationnel est un amplificateur différentiel, donc muni de deux entrées, l'une dite non inverseuse (V_+) et l'autre inverseuse (V_-), et d'une sortie (V_s).

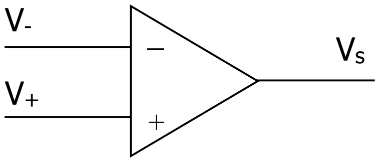

Figure 1 : Symbole d'un amplificateur opérationnel.

$V_s = A\,(V_+ - V_-)$ où A est le gain de l'amplificateur.

Pour un ampli opérationnel idéal, on a:
- Gain infini
- Impédance d'entrée infini
- Impédance de sortie nulle

Dans le calcul de circuits à base d'amplificateurs opérationnels idéals, on utilise les deux règles d'or suivantes:
- Aucun courant ne circule dans les entrées de l'Amplificateur opérationnel.
- Lorsqu'on a une contre-réaction de la sortie sur l'entrée inverseuse (-), on a :$V_+ = V_-$.

L'amplificateur opérationnel réel présente des défauts (tension de décalage, courant de polarisation, …) par rapport à l'idéalisation que constitue l'amplificateur opérationnel idéal. mais le modèle de ce dernier est suffisant pour étudier la plupart des montages simples sans faire des calculs laborieux et inutiles.En effet, les amplis réels sont suffisamment près des amplis parfaits pour qu'on fasse les approximations avec une erreur minime.

2.1 Montages de base à amplificateur opérationnel

- **Amplificateur suiveur**

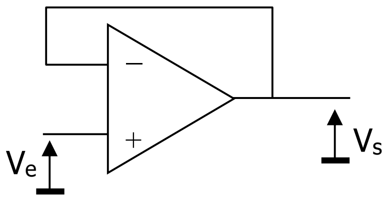

Figure 2 : Amplificateur suiveur
L'ampli op est parfait, alors : $V_- = V_+$, $V_+ = V_e$, $V_s = V_-$, d'où $V_s = V_e$
Ce montage est utilisé pour isoler les impédances de deux circuits.

- **Amplificateur inverseur**

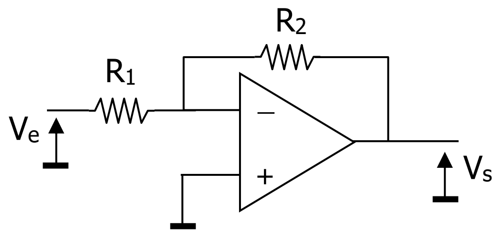

Figure 3 : Amplificateur inverseur

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e$$

- **Amplificateur non inverseur**

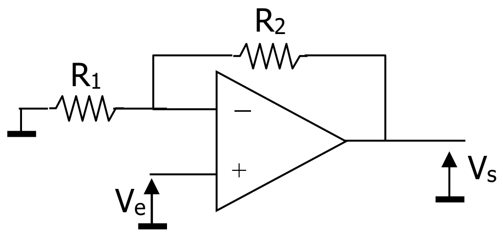

Figure 4 : Amplificateur non inverseur

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e$$

3 Conditionneurs de capteurs passifs

Ce type de capteurs donne une image du mesurande par l'intermédiaire d'une impédance. On associe donc toujours une source externe de tension ou de courant aux capteurs. On distingue les montages potentiométriques, les montages à pont et les montages oscillants.

3.1 Conditionneurs de capteurs résistifs

A. Montage potentiométrique

On utilise un simple pont diviseur alimenté par une source de tension continue E_s. L'impédance interne de la source (R_s) et l'impédance de l'appareil de mesure (R_d) doivent être prises en compte. Le capteur est modélisé par la résistance R_c. La variation de la résistance R_c est proportionnelle au mesurande.

En supposant R_s faible et R_d très grande par rapport à R_1+R_c , on obtient :

$$V_s = \frac{R_c}{R_1 + R_c} E_s$$

La relation qui lie la tension de sortie (V_s) au paramètre image du mesurande (R_c) n'est pas linéaire. La sensibilité du montage n'est donc pas constante. On peut néanmoins faire une étude en petites variations du mesurande . Ainsi si l'on se place aux petites variations,

$R_c = R_{co} + \Delta R_c$, $V_s = V_{so} + \Delta V_s$,et $\Delta R_c << R_{co} + R_1$

Alors on obtient :

$$\Delta V_s = \frac{R_1\, E_s}{\left(R_1 + R_{co}\right)^2}\Delta R_c$$

C'est une relation linéaire d'où on peut directement extraire la sensibilité du capteur $\Delta V_s/\Delta R_c$. Cette sensibilité est maximum pour $R_1 = R_{co}$ soit :

$$\Delta V_s = \frac{E_s}{4R_{co}}\Delta R_c$$

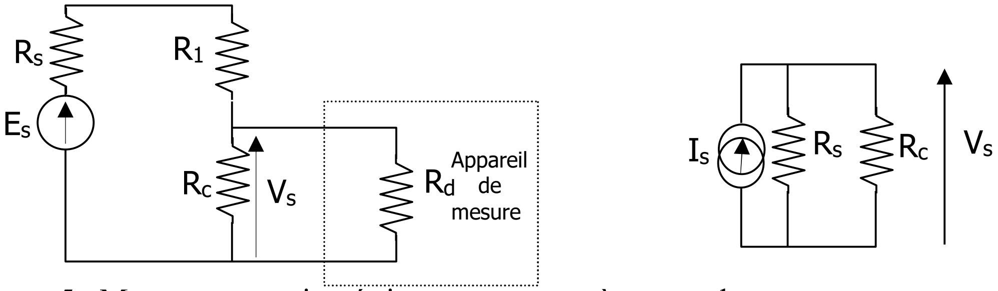

Figure 5 : Montage potentiométrique et montage à source de courant.

Remarque : cas d'une alimentation en courant

L'utilisation d'une source de courant I_s rend le montage directement linéaire si la résistance interne R_s de la source est très grande par rapport à R_C ainsi que la résistance d'entrée de l'appareil de mesure, c'est à dire : $\Delta V_s = I_s\, \Delta R_c$.

B. Montage en pont

L'utilisation d'un montage potentiométrique présente le défaut d'avoir en sortie la présence d'une tension continu, et ceci en l'absence de variations du mesurande. L'emploi d'un montage en pont présente l'avantage de s'affranchir de cette tension continue.

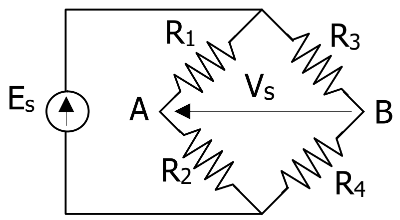

Figure 6 : Montage en pont

La tension de sortie du pont est donnée par : $V_s = V_A - V_B$, avec

$$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2}E_s \quad \text{et} \quad V_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4}E_s$$

Il vient alors : $V_s = \dfrac{R_2\, R_3 - R_1\, R_4}{\left(R_1 + R_2\right)\left(R_3 + R_4\right)}E_s$

La condition d'équilibre du pont (V_s=0) est donnée par : $R_2R_3 = R_1R_4$.

Suivant le nombre de capteurs utilisés dans le pont, on distingue plusieurs cas :

Cas 1 (montage en quart de pont) : on utilise une seule résistance variable (un seul capteur) avec le choix : $R_1=R_c(+)=R_{co}+\Delta R_c$, $R_2=R_3=R_4=R_{co}$.

$$V_s = -\frac{E_s}{4}\frac{\Delta R_c/R_{co}}{1+\Delta R_c/2R_{co}}$$

La tension V_s n'est pas proportionnelle à ΔR_c . Pour de très faibles variations de Rc, i.e., $\Delta R_c << R_{co}$, on peut linéariser la relation entre V_s et ΔR_c :

$$V_s = -\frac{E_S}{4}\frac{\Delta R_C}{R_{co}}$$

Cas 2 (montage en demi pont) : on utilise deux résistances variables (deux capteurs) avec le choix : $R_1=R_c(+)=R_{co}+\Delta R_c$, $R_2=R_c(-)=R_{co}-\Delta R_c$, $R_3=R_4=R_{co}$.

$$V_s = -\frac{E_S}{2}\frac{\Delta R_C}{R_{co}}$$

Cas 3 (montage en pont complet): on utilise quatre résistances variables (quatre capteurs) avec le choix : $R_1=R_4=R_c(+)=R_{co}+\Delta R_c$ $R_2=R_3=R_c(-)=R_{co}-\Delta R_c$,.

$$V_s = -E_S\frac{\Delta R_C}{R_{co}}$$

4 Amplificateur

Les capteurs sont caractérisés par des impédances de sorties non nulles, des tensions de sorties faibles et travaillent dans des milieux hostiles. Pour cela l'utilisation des amplificateurs est nécessaire afin d'améliorer le niveau du signal de sortie et minimiser les effets des perturbations externes. Suivant le signal amplifié, on distingue deux familles d'amplificateurs :

- Amplificateurs asymétriques : dans ce cas, le signal d'entrée à la même référence que l'amplificateur.
- Amplificateurs différentiels : dans ce cas, le signal d 'entrée à une référence différente que celle de l'amplificateur.

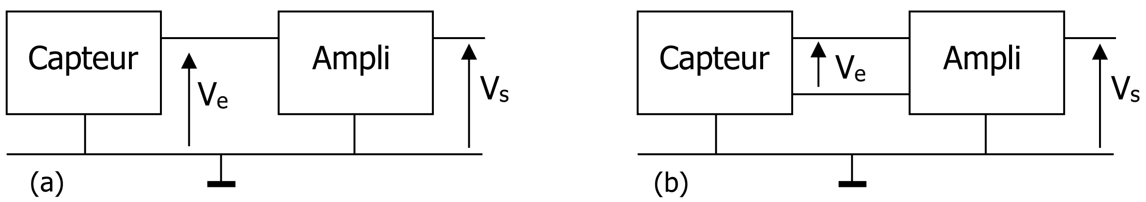

Figure 7 : (a) Amplificateur asymétrique, (b) Amplificateur différentiel.

4.1 Amplificateurs asymétriques

Ce sont des circuits associant un amplificateur opérationnel et des composants nécessaire à son bon fonctionnement. Parmi ces amplificateurs on cite : l'amplificateur suiveur, l'amplificateur inverseur, l'amplificateur non inverseur et l'amplificateur à gain programmable (le changement du gain de l'ampli est effectué à partir des commutateurs analogiques).

4.1.1 Amplificateur d'instrumentation

Les amplificateurs d'instrumentation se sont des amplificateurs différentiels de précision mais ne sont pas des amplificateurs opérationnels. Les amplificateurs d'instrumentation sont caractérisés par une haute impédance d'entrée, des courants de polarisation faibles, une haute réjection du mode commun, un gain réglable par l'utilisateur, une très grande précision, une conversion tension/courant en sortie disponible. La structure de l'amplificateur d'instrumentation peut être élborée à partir d'un ou de plusieurs amplificateurs opérationnels. Le montage différentiel à un ampli opérationnel est l'amplificateur d'instrumentation le plus simple mais il ne possède pas les performances requises pour des applications de précision. Les configurations les plus répandues de l'amplificateur d'instrumentation sont élaborées à partir de deux ou trois amplis opérationnels.

La sortie est donnée par : $V_s = A_2V_2 – A_1V_1$

On définit :

- Tension différentielle : $V_d = V_2 – V_1$
- Tension de mode commun : $V_{mc} = (V_2+V_1)/2$
- Gain différentiel : $A_d = (A_2 + A_1)/2$
- Gain de mode commun : $A_{mc} = A_2 – A_1$
- Taux de réjection de mode commun : $T_{rmc} = \left| A_d / A_{mc} \right|$ ou en décibels $T_{rmc} = 20\,Log_{10} \left| A_d / A_{mc} \right|$.

Il vient alors : $V_s = A_d\, V_d + A_{mc}\, V_{mc}$

Ou encore : $V_s = A_d \left(V_d + \dfrac{1}{T_{rmc}} V_{mc} \right)$

Cette expression met en évidence deux termes, l'un proportionnel à la tension différentielle (signal utile), et l'autre proportionnel à la tension de mode commun (signal perturbateur). L'influence de V_{mc} est d'autant plus faible que T_{rmc} est élevé. En pratique, un amplificateur différentiel est approprié à une mesure si : $V_{d_{\min}} \rangle\rangle \dfrac{1}{T_{rmc}} V_{mc_{\max}}$. Plus le T_{rmc} est grand, plus l'amplificateur est performant. Notons que la tension de mode commun dans un ampli différentiel ne doit pas dépasser la tension d'alimentation de l'ampli. Par exemple, il sera hors de question de faire rentrer un signal ayant une tension de mode commun de 20V sur un ampli difféeniel alimenté en ±15V.

A. Schéma à deux amplis opérationnels

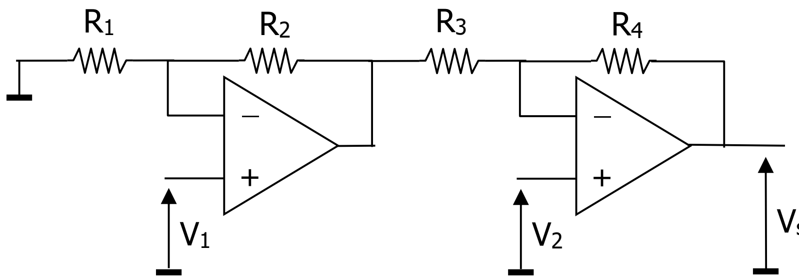

Figure 8 : Ampli d'instrumentation à deux amplis opérationnels.

Les amplis opérationnels sont supposés parfaits. On peut facilement calculer l'expression de la tension de sortie:

$$V_s = \frac{R_3 + R_4}{R_3} V_2 - \frac{R_4}{R_3} \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1$$

D'où on déduit les gains :

$$A_{mc} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 R_3} \text{ , et } A_d = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\left(2 + \frac{R_2}{R_1}\right)\right)$$

Le gain A_{mc} est nul si : $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$.

Dans ce cas, $A_d = 1 + \frac{R_1}{R_2}$

Le T_{rmc} de cet amplificateur en fonction de la tolérance e des résistances R_1 à R_4 est approximé par: $T_{rmc} \approx \frac{A_{dn}}{4e}$. Le résultat est légèrement différent de celui trouvé pour le montage différentiel simple, mais l'ordre de grandeur reste le même. Ce montage est encore plus défavorable dans le cas du gain unité : le T_{rmc} sera égal à 1/4e contre 1/2e dans le montage différentiel simple.

Ce montage possède une très grande impédance d'entrée (égale à l'impédance d'entrée de l'ampli opérationnel). Mais il n'apporte rien par rapport au montage simple pour ce qui est du mode commun et de la faculté d'ajustage : il faut apparier les composants de la même manière pour obtenir un bon T_{rmc}, et il faut changer deux composants pour ajuster le gain.

B. Schéma à trois amplis opérationnels

C'est le schéma le plus populaire d'amplificateurs d'instrumentation.

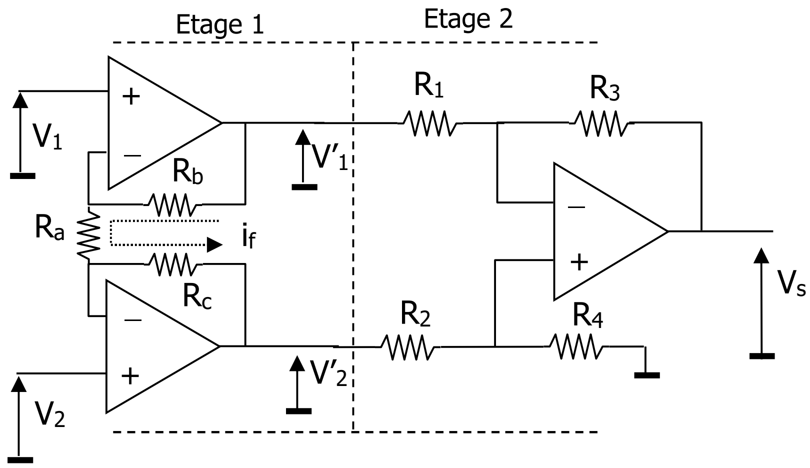

Figure 9 : Ampli d'instrumentation à trois amplis opérationnels.

La mise en équations du montage est très simple, on va encore utiliser le fait que les amplis op sont supposés parfaits. Le courant circulant dans les résistances R_a, R_b et R_c sera donc le même, ce qui permet d'écrire :

$$i_f = \frac{V_1 - V_2}{R_a}$$

$V_1' = V_1 + R_b\, i_f$

$V_2' = V_2 - R_c\, i_f$

Soit encore :

$$V_1' = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) V_1 - \frac{R_b}{R_a} V_2 \ ,$$

$$V_2' = \left(1 + \frac{R_c}{R_a}\right) V_2 - \frac{R_c}{R_a} V_1$$

Et on a :

$$V_s = \frac{R_4}{R_1} \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} V_2' - \frac{R_3}{R_1} V_1'$$

Enfin :

$$V_s = \left(\frac{(R_1 + R_3)(1 + R_c/R_a) R_4}{(R_2 + R_4) R_1} + \frac{R_3}{R_1} \frac{R_b}{R_a} \right) V_2 - \left(\frac{(R_1 + R_3)(R_c/R_a) R_4}{(R_2 + R_4) R_1} + \frac{R_3}{R_1} \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \right) V_1$$

En calculant le gain en mode commun, on trouve : $A_{mc} = \dfrac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_4)}$

Le gain A_{mc} est nul si : $R_3/R_1 = R_4/R_2$.

Avec cette condition, le gain A_d est donnée par : $A_d = \dfrac{R_3}{R_1}\left(1 + \dfrac{R_b + R_c}{R_a}\right)$

Ce résultat montre la possibilité de faire varier le gain A_d sans altérer le gain A_{mc}. En pratique, on prend $R_b=R_c$ et $R_1=R_2=R_3=R_4$ ce qui donne : $A_d = 1 + 2\dfrac{R_b}{R_a}$. On pet donc faire varier le gain différentiel en changeant la résistance R_a.

Le T_{rmc} de cet amplificateur en fonction de la tolérance e des résistances R_1 à R_4 est approximé par: $T_{rmc} \approx \dfrac{1}{2e}\left(1 + 2\dfrac{R_b}{R_a}\right)$. Ce résultat montre qu'on pourra augmenter le T_{rmc} en variant la résistance R_a sans modifier le gian de mode commun.

Ce montage possède une très grande impédance, un gain réglable par une seule résistance et permet d'avoir un T_{rmc} élevé.

4.1.2 Amplificateur d'isolement

Dans le cas de forte tension de mode commun, il est parfois préférable d'isoler galvaniquement la tension mesurée en sortie du capteur de la tension de sortie envoyé vers l'étage d'acquisition. L'isolation des deux parties permet d'ouvrir le circuit et d'éviter que les courants de mode commun ne circulent de part et d'autre du dispositif d'isolation. L'étage d'entrée est un amplificateur différentiel qui atténue la tension de mode commun. Cette atténuation est possible car les entrées sont à un volt l'une de l'autre et l'amplificateur est flottant et non référencé à la masse. Le couplage capacitif parasite entre les sections, qui peuvent réduire l'isolement, est minimisé par une conception et une configuration minutieuses.

Les méthodes pour isoler sont :

• utilisation d’un transformateur,

• utilisation d’un couplage optique,

• utilisation d’un amplificateur d’isolement.

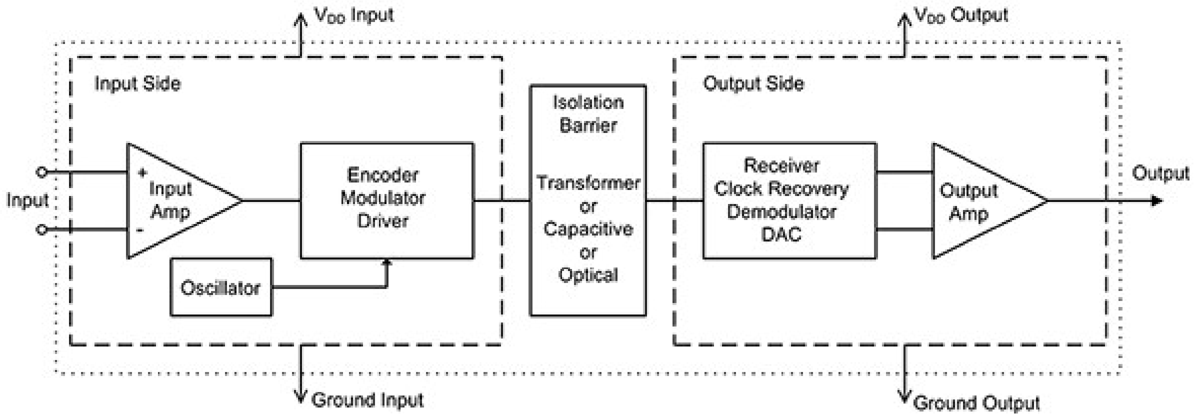

Figure 10 : amplificateur d’isolement générique illustrant les 3 méthodes d’isolation généralement utilisées .

Les caractéristiques de l'amplificateur d'isolement pour la différence de tension maximale entre les entrées appliquées et la ou les sorties sont généralement spécifiées pour les tensions CC et CA durables. La tension maximale appliquée aux transitoires est spécifiée séparément avec la synchronisation de la condition transitoire. Ces spécifications s'appliquent tant que la configuration physique maintient l'espacement recommandé entre les broches d'entrée et de sortie du dispositif, qui est soigneusement précisé dans la fiche technique.