

COURS

I. Présentation du cours	5
I- GENERALITES.....	7
1- Le système de mesure	7
- Définition générale.....	7
2- Capteurs actifs vs capteurs passifs	8
- Capteurs actifs.....	8
- Les capteurs passifs	9
3- Montages utilisés avec les capteurs passifs	10
II- - CAPTEURS DE TEMPERATURE.....	12
1- Introduction:	12
2- Echelles de température.....	12
3- Thermométrie par résistance (RTD).....	12
Typologies de branchement RTD (PT100).....	13
4- Thermistances.....	15
4-1 Relation thermistances -température.....	15
5. Thermométrie par diode et transistor:	17
6. Thermocouples.....	18
Limites de température de fonctionnement du thermocouple.....	20
7. Mise en œuvre du thermocouple et sa protection	20
8. Montage de mesure	22
III - CAPTEURS OPTIQUES	24
1- La lumière et propriétés fondamentales	24
2- Photométrie	24
3- - Caractéristique métrologique propres aux capteurs optiques	24
4- Cellule photoconductrice (LDR).....	24
- Caractéristiques des cellules photorésistances	25
- Application des cellules photorésistances	26
5- Les photodiodes	27
- Mode de fonctionnement.....	27
Caractéristiques de la photodiode	27
6- Les phototransistors	27
7- Les capteurs CCD	28

8- Exemple de capteurs photoélectriques dans l'industrie	29
IV- LES CAPTEURS DE POSITION	31
1- Introduction	31
2- Potentiomètre résistive	31
3- Capteurs de position capacitifs.....	33
Variation des paramètres géométrique.....	33
Capteur capacitif de proximité.....	34
Méthodes de mesure des variations de capacité.....	34
4- Capteurs de position inductifs.....	35
Capteur inductif à noyau plongeur.....	36
Capteur de déplacement à LVDT.....	37
Resolver.....	38
5- Capteurs digitaux.....	39
Les codeurs.....	40
V- LA SONDE DE HALL (MESURE DE COURANT).....	42
1. Mesure de Courant	42
2. Shunt de Mesure	42
3. Transformateur de Courant	43
4. Transducteur de Courant. (Bobine de Rogowski)	43
5. Transducteurs de Courant d'Effet Hall	45
Pinces ampérométriques pour courant alternatif et continu.....	46
Les transducteurs à effet Hall en boucle ouverte.....	46
Les transducteurs à effet Hall en boucle fermée.....	47
6. Capteurs de Courant Fluxgate	48
VI- LES CAPTEURS DE VITESSE DE ROTATION	49
1. Introduction	49
2. Tachymètre électromagnétique à vitesse angulaire.....	49
3. Réaction d'induit	50
4. Génératrices tachymétriques à courant alternatif.....	50
Génératrice synchrone	50
4.2. Génératrice tachymétrique asynchrone	50
4.3 Tachymètres électromagnétiques de vitesse linéaire.....	51
5. Tachymètres de vitesse angulaire à impulsions	52
Capteurs à réluctance variable	52

Tachymètre Optique	52
VII- CAPTEURS DE DEFORMATION, FORCE ET PRESSION	53
1. Introduction.....	53
1 Capteurs piézoélectriques	53
Déffinitions	53
2 Capteurs à mag nétostriction	53
Capteur à variation de perméabilité	53
Capteur à variation d'inductance.....	54
Capteur à variation de couplage.....	54
3. Capteurs à jauges d'extensométrie	55
4. Capteurs de force par mesure de déplacement	56
5. Capteurs de couple.....	56
Liaisons sans contact	56
Liaisons sans contact (magnetisation de l'arbre)	57
Couplemetre a transformateur differentiel	58
Couplemetre a jauges.....	58
Couplemetre optique	59
6. Capteurs de pression	60
Définition de la pression	60
Conversion par variation de capacité	60
Conversion par effet piézoélectrique	60
IX- CHAINE D'ACQUISITION DE DONNEES.....	63
1- Introduction	63
2. Principe de la liaison série asynchrone.....	64
2.1- Format.....	64
2.2- Fonctionnement	65
4. Norme RS232	69
Liaison possible	69
Références	72

I. Présentation du cours

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs...), on a besoin de contrôler des paramètres physiques (température, force, position, 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.

Ce cours permet de vous comprendre et maîtriser le fonctionnement des capteurs et ces instruments.

Le cours est scindé en un ensemble d'unités d'apprentissage qui vous permettent d'acquérir des compétences en matière d'analyse des capteurs et ces instruments à la liaison avec les cours de électronique numérique, électronique analogique, et électromagnétique appliquée. Il vous permet également l'acquisition des connaissances software et hardware indispensables pour l'analyse des capteurs en respectant les spécifications imposées par le constructeur tel que la sensibilité, l'erreur de mesure, type d'alimentation.

II. Visées d'apprentissage

La compétence visée par ce cours, dans son ensemble, est « *d'être capable de concevoir et d'analyser les capteurs, analyser les courants et les tensions de ces instruments* ».

C'est une performance complexe, que vous allez construire progressivement en maîtrisant des savoirs, en mettant en œuvre des savoir-faire et en le faisant avec un savoir-être de professionnel

Le cours de métrologie et instrumentation vise à :

- ✓ En termes de connaissances, à vous apprendre le principe de fonctionnement permet de différencier avec d'autre type des capteurs.
- ✓ En termes de savoir-faire,
 - A vous entraîner à l'analyse des circuits électroniques pour l'identification les paramètres des capteurs et ces instruments.
 - A vous orienter vers la phase de l'utilisation les méthodes de votre cours en vous adaptant à l'utilisation du matériel software et hardware.
- ✓ En termes de savoir-être,
 - A vous sensibiliser au respect les conductions de sécurité.
 - A vous aider de concevoir des systèmes contient les capteurs.

I- GENERALITES

1- Le système de mesure

1.1 - Définition générale

Un système de mesure comprend un ensemble d'éléments, tel que montrée dans le schéma suivante. La grandeur physique à mesurer (appelée *mesurande*) est une valeur analogique qui n'est généralement pas exploitable directement.

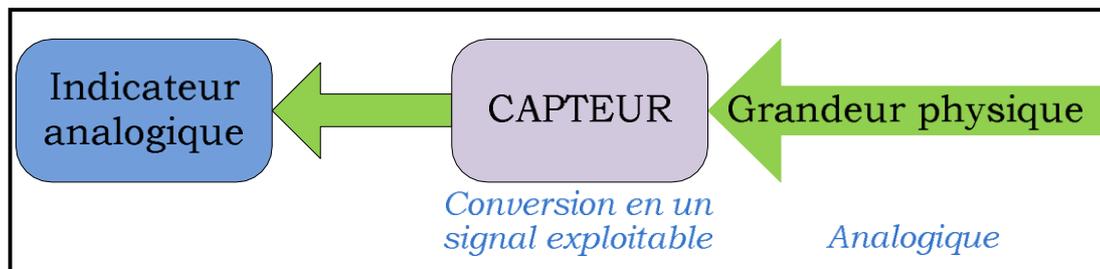


Fig.1.1. Schéma d'un système de mesure analogique

Cette grandeur physique peut-être une force, une température, ou toute autre grandeur doit être mesurée. Elle doit être convertie en une autre valeur analogique par l'élément de mesure (appelé capteur). Ce signal analogique a la sortie (appelé aussi réponse) du capteur est un signal directement exploitable pour les indicateurs analogiques (affichage a aiguille). Le signal de sortie peut être de nature électrique. Ce signal doit toutefois être converti en un signal numérique si on désire utiliser un affichage numérique. La conversion se fait par l'intermédiaire d'un circuit convertisseur analogique-numérique.

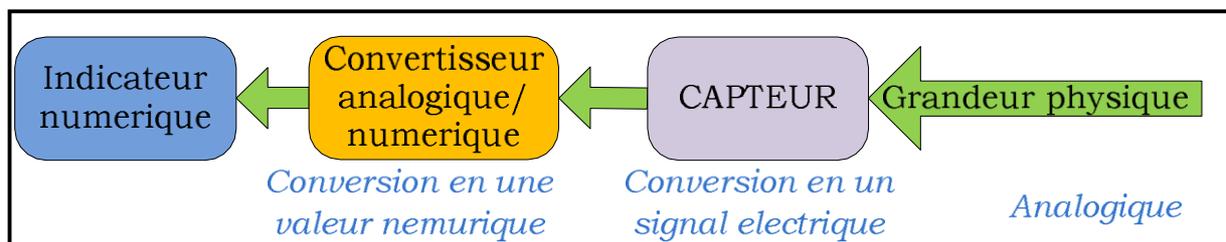


Fig.1.2. Schéma d'un système de mesure numérique

1.2 - L'élément de mesure

Un élément de mesure, désigné généralement sous le nom de capteur, sert à transformer une grandeur physique à mesurer (mesurande) en un signal de mesure (réponse). Cette transformation se fait par l'utilisation de divers principes de la physique. Idéalement, il faudrait que la réponse de l'élément de mesure ne dépende que du mesurande. Malheureusement, en pratique, les grandeurs d'influence viennent perturber le fonctionnement du capteur et entraînent souvent des erreurs de mesure. Les principales grandeurs d'influence sont: la température, les vibrations, les chocs, le temps (vieillessement), l'humidité, la corrosion, etc...

Il faut faire en sorte de réduire le plus possible les effets des grandeurs d'influence sur la mesure en stabilisant et/ou en compensant ces grandeurs ou leurs effets. Le schéma suivant montre la constitution interne d'un capteur, de l'élément de mesure. Dans le capteur, on retrouve un premier élément appelé corps d'épreuve. Cet élément mécanique réagit électivement a la grandeur physique à mesurer. 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 aussi réagir aux grandeurs

d'influence. Le choix d'un bon corps d'épreuve est important. La réaction d'un corps d'épreuve peut-être sous forme électrique ou non. Dans la plupart des cas, il faut convertir la réaction du corps d'épreuve en un signal électrique via l'élément de transduction.

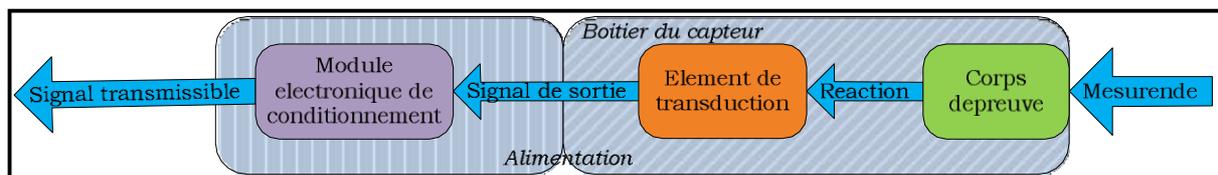


Fig.1.3. Système de mesure numérique.

L'élément de transduction est important, car c'est lui qui assure qu'en bout de ligne le signal de sortie soit de nature électrique. L'élément de transduction peut générer l'un des types de signaux suivants: une tension électrique, un courant électrique, des charges électriques ou finalement des variations d'impédance.

Le signal de sortie du capteur peut être directement exploitable ou non. S'il n'est pas directement exploitable, il faut alors recourir à un élément nommé module électronique de conditionnement.

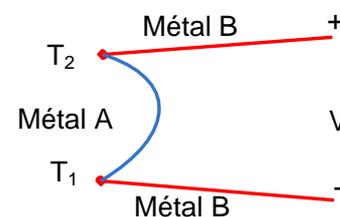
2- Capteurs actifs vs capteurs passifs

2.1 - Capteurs actifs

Les capteurs actifs sont des capteurs qui fonctionnent en générateur. Le corps d'épreuve ou l'élément de transduction utilise un principe physique qui assure la conversion en énergie électrique l'énergie propre au mesurande.

➤ Effet Seebeck

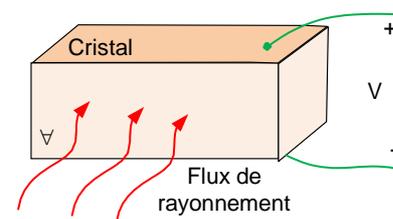
L'effet Seebeck est un phénomène qui se produit lorsque les températures des deux jonctions entre deux métaux différents ne sont pas égales. Ce phénomène se traduit par l'apparition d'une tension électrique qui est proportionnelle à la différence de température entre deux jonctions : $V \propto T_2 - T_1$



➤ Pyroélectricité

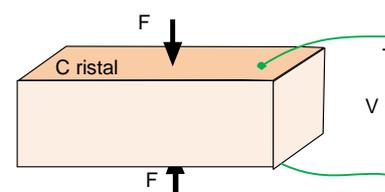
Le phénomène de pyroélectricité se produit dans certains cristaux dit "pyroélectriques". Le cristal pyroélectrique réagit au rayonnement thermique en changeant sa polarisation. La relation entre la tension V et le rayonnement Φ est exprimée par :

$$V \propto \Phi$$



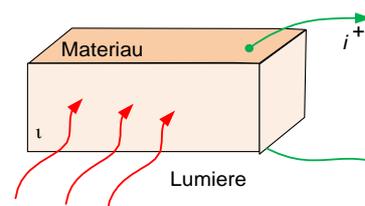
➤ Piézoélectricité

Le phénomène de piézoélectricité est très similaire à celui de pyroélectricité, sauf que cette fois, le cristal (dit "piézoélectrique") réagit à des contraintes changeant sa polarisation. Le quartz est un de ces cristaux piézoélectriques. Pour faire apparaître une contrainte dans le cristal, il suffit de lui appliquer une force F. Une tension V est générée due aux contraintes exercées par la force F: $V \propto F$



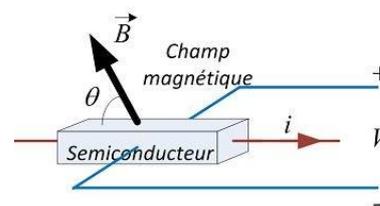
➤ Photoélectricité

La photoélectricité ou effet photoélectrique est un phénomène causé par les effets d'un rayonnement électromagnétique sur un matériau. Lorsqu'un métal est frappé par un rayonnement dont les photons ont un niveau d'énergie suffisamment élevé, cela entraîne l'émission d'électrons excités hors du métal. Il en résulte un déplacement d'électrons, donc un courant i dont l'intensité dépend du rayonnement Φ : $i \propto \Phi$



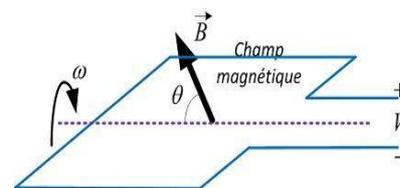
➤ Effet Hall

L'effet Hall, se produisant lorsqu'un conducteur ou un semi-conducteur traversé par un courant d'intensité i est soumis à un champ magnétique B . Dans cette situation, une différence de potentiel électrique V apparaît entre les deux faces perpendiculaires à la direction du courant et du champ magnétique. La tension V est proportionnelle au produit vectoriel du courant et du champ magnétique $V = K|\vec{i} \times \vec{B}| = KiB \sin(\theta)$



➤ Effet inductif

L'effet inductif est utilisé dans la mesure de vitesse angulaire. Le principe est le même que celui utilisé pour les génératrices. On fait tourner un cadre métallique à une vitesse angulaire ω dans un champ magnétique fixe B . Une force électromotrice générée V est: $V \propto B\omega$



2.2 - Les capteurs passifs

Les capteurs passifs utilisent les variations d'impédance. L'impédance présente dans l'élément de transduction réagit aux variations du mesurande aux travers des effets du mesurande sur le corps d'épreuve.

L'impédance peut être résistive, capacitive ou inductive.

➤ Changement de résistivité

La conductivité est une propriété indiquant avec quelle facilité les électrons peuvent se déplacer dans un matériau. L'inverse de la conductivité, c'est la résistivité.

La résistivité est donc dépendante de la température et on peut donc utiliser cette propriété pour mesurer la température. La relation entre la résistivité ρ et la température T est:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2 + \dots)$$

Avec ρ_0 la résistivité à une température de référence; ΔT la différence entre la température actuelle et celle de référence et α_i les coefficients de température.

La résistance d'un conducteur ou d'un semi-conducteur, dépend aussi de la géométrie. Donc, pour un fil cylindrique de longueur l et de section S , la résistance est :

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Si cette géométrie est modifiée, cela entraînera des changements aux valeurs des variables l et S , ce qui fera varier la valeur de la résistance R . Cela est utilisé dans les jauges de contraintes qui sont des résistances utilisées pour mesurer les forces.

➤ Changement de capacitance

La capacitance C est définie comme le rapport entre la quantité Q de charges électriques stockées sur deux plaques métalliques et le potentiel électrique V entre ces plaques provoqué par ces charges électriques :

$$C = \frac{Q}{V}$$

La capacitance dépend de la géométrie des plaques et du milieu séparant ces deux plaques. Par exemple, la capacitance de deux plaques rectangulaire parallèles de surface A distancées d d'une distance d est :

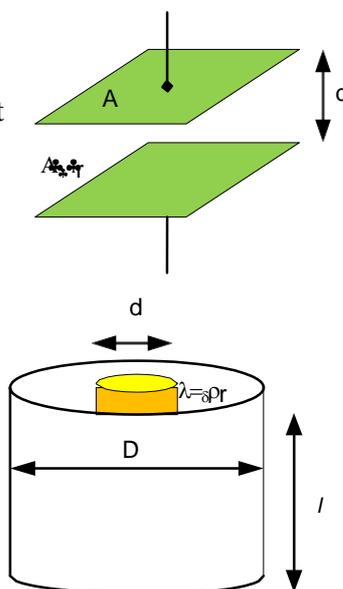
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

ϵ_r la constante diélectrique relative du matériau soumis au potentiel électrique présent entre les deux plaques.

La capacitance d'un condensateur cylindrique est :

$$C = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r \frac{l}{\ln \frac{D}{d}}$$

Avec d et D les diamètres respectifs des électrodes internes et externes et l la longueur du cylindre.



➤ Changement d'inductance

L'inductance L est une mesure du rapport entre le flux Φ du champ magnétique généré par un fil conducteur traversé par un courant d'intensité I :

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

L'inductance d'une bobine de N spires enroulées autour d'un noyau magnétique est:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$$

Avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ la perméabilité magnétique du vide, μ_r la perméabilité magnétique relative du noyau, S la surface du noyau et l la longueur du circuit magnétique.

L'inductance peut être changée par les variations de la perméabilité relative μ_r qui est fonction des contraintes mécaniques présentés dans un matériau ferromagnétique soumis à une force.

L'inductance peut aussi être changée en modifiant la réluctance du circuit magnétique ou en changeant le nombre de tours de la bobine.

3- Montages utilisés avec les capteurs passifs

Il est nécessaire d'avoir un circuit électrique/électronique pour détecter les variations d'impédance d'un capteur passif. On doit insérer celle-ci dans un circuit qui peut être :

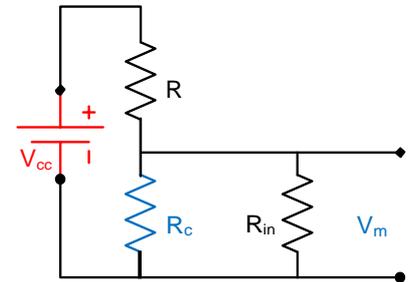
- ✚ Montage potentiométrique ;
- ✚ Montage dans un pont de Wheatstone ;
- ✚ Montage dans un circuit oscillant (ne sera pas couvert ici) ;
- ✚ Montage dans un amplificateur.

Capteurs chaîne de mesures

➤ Montage potentiométrique

Dans un montage potentiométrique, la tension mesurée V_m est (si $R_{in} \gg R_c$): $V_m = V_{cc} \frac{R_c}{R + R_c}$

Avec V_{cc} la tension appliquée au potentiomètre; R la résistance en série avec la résistance du capteur R_c pour obtenir un diviseur de tension et R_{in} l'impédance d'entrée du module électronique de conditionnement (généralement beaucoup plus grand que la résistance du capteur R_c).

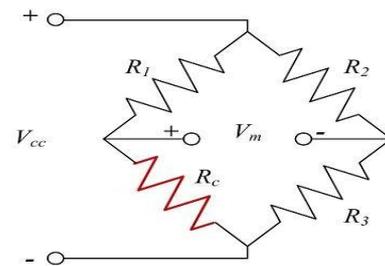


Montage dans un pont de Wheatstone

Dans ce montage en pont, la tension de mesure V_m est $V_m = V_{cc} \left(\frac{R_c}{R_1 + R_c} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)$

Elle dépend de la tension d'alimentation du pont V_{cc} ; des résistances R_1 , R_2 et R_3 et de la résistance R_c de l'élément de transduction du capteur. Si les trois résistances R_1 , R_2 et R_3 sont posées égales à R , on peut écrire :

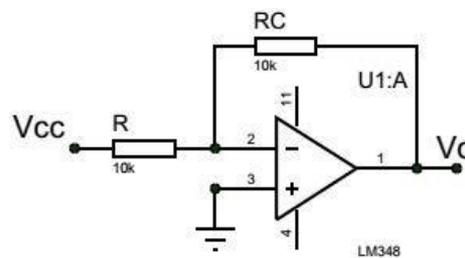
$$V_m = V_{cc} \left(\frac{R_c}{R + R_c} - \frac{R}{R + R} \right) = V_{cc} \left(\frac{R_c - R}{2(R + R_c)} \right)$$



➤ Montage dans un amplificateur

Dans le montage dans un amplificateur, la tension en sortie de l'amplificateur V_o est : $V_o = -V_{cc} \frac{R_c}{R}$

Et dépend ainsi de la tension d'entrée V_{cc} ; de la résistance R et de la résistance R_c de l'élément de transduction du capteur.



II - CAPTEURS DE TEMPERATURE

1 - Introduction:

De toutes les grandeurs physiques, la température est certainement l'une de celles dont la mesure est la plus fréquente. La température détermine en effet de façon décisive les propriétés de la matière, que ce soit de façon continue, pression ou volume d'un gaz par exemple, ou de façon discontinue, changements de phase ou points de Curie magnétiques et ferroélectriques. C'est pourquoi, en recherche comme dans l'industrie, la mesure précise et le contrôle très strict des températures sont indispensables.

On se trouve ainsi préalablement amené à rechercher sur quelles bases physiques établir un système d'évaluation des températures: c'est le problème des échelles 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

- ✚ Méthodes optiques basées sur la répartition spectrale du rayonnement émis ou l'élargissement de raies spectrales par l'effet Doppler dû à l'agitation thermique,...
- ✚ Méthodes mécaniques fondées sur la dilatation d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz à pression constante, sur la pression d'une vapeur saturante ou sur la célérité du son,...
- ✚ Méthodes électriques reposant sur la variation thermique de la valeur d'une résistance ou de son bruit de fond, sur l'effet Seebeck ou sur la sensibilité thermique de la fréquence d'oscillation d'un quartz,...

2 - Echelles de température

- ✚ **Kelvin**: défini à partir du point triple de l'eau, qui vaut 273,16 K « Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau » 0 K est le zéro absolu (aucune agitation thermique)
- ✚ **Celsius** : $T\text{ }^{\circ}\text{C} = T\text{K} - 273,15$, le zéro absolu vaut donc $-273,15^{\circ}\text{C}$.
- ✚ **Fahrenheit** : L'échelle fahrenheit attribue une plage de 180 °F entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition (solidification de l'eau à 32°F et point d'ébullition à 212°F).

$$T\text{ }^{\circ}\text{F} = 9/5 T\text{ }^{\circ}\text{C} + 32 \text{ ou } T\text{ }^{\circ}\text{C} = 5/9(T\text{ }^{\circ}\text{F} - 32)$$

3 - Thermométrie par résistance (RTD)

D'une façon générale la valeur d'une résistance dépend de sa température T :

$$R(T) = R_0 F(T - T_0) \quad (2.1)$$

R_0 étant à la température T_0 et la fonction F une caractéristique du matériau, égale à 1 pour $T = T_0$

$$\checkmark \text{ Pour les métaux } \quad R(T) = R_0 (1 + AT + BT^2 + CT^3) \quad (2.2)$$

T étant exprimé en $^{\circ}\text{C}$. $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

- ✓ Pour les thermistances, mélanges d'oxyde semi-conducteurs

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

Les coefficients de la loi de variation de R ayant été préalablement précisés par un ensemble de mesures à température connues, la détermination de la valeur de R permet d'en déduire de sa température.

Pour de petites variations de ΔT de température autour d'une valeur T, la loi générale de variation de résistance peut être linearisée :

$$R(T + \Delta T) = R_0 (1 + \alpha_R \cdot \Delta T) \text{ Ou } \alpha_R = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT}$$

α_R Est le coefficient de température de la résistance ou sensibilité thermique a la température T, α_R dépend évidemment de la température et du matériau.

Par exemple a 0°C et pour le platine $\alpha_R = 5, 2 \cdot 10^{-2} / ^\circ\text{C}$

Si l'on mesure la température au voisinage de 0°C à l'aide d'un pont de Wheatstone dont l'une des branches est constituée par la résistance thermométrique et les trois autres branches sont formées par trois résistances fixes et égales à R_0 résistance thermométrique à 0°C , la tension de déséquilibre est :

$$V_m = \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{E_s}{4} \cdot \alpha_R \Delta T$$

Pour $E_s=2\text{V}$ et $\Delta T=1^\circ\text{C}$, $V_m=1.9\text{mV}$ pour la résistance de platine.

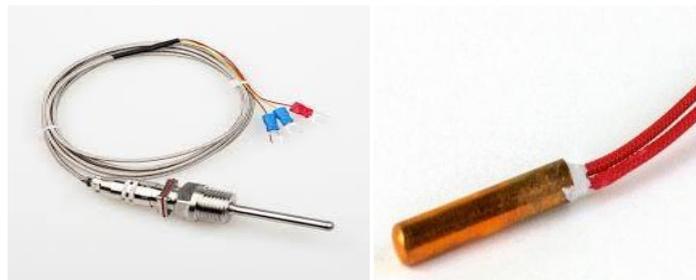


Fig.2.2 Modèle réel des capteurs de température PT100

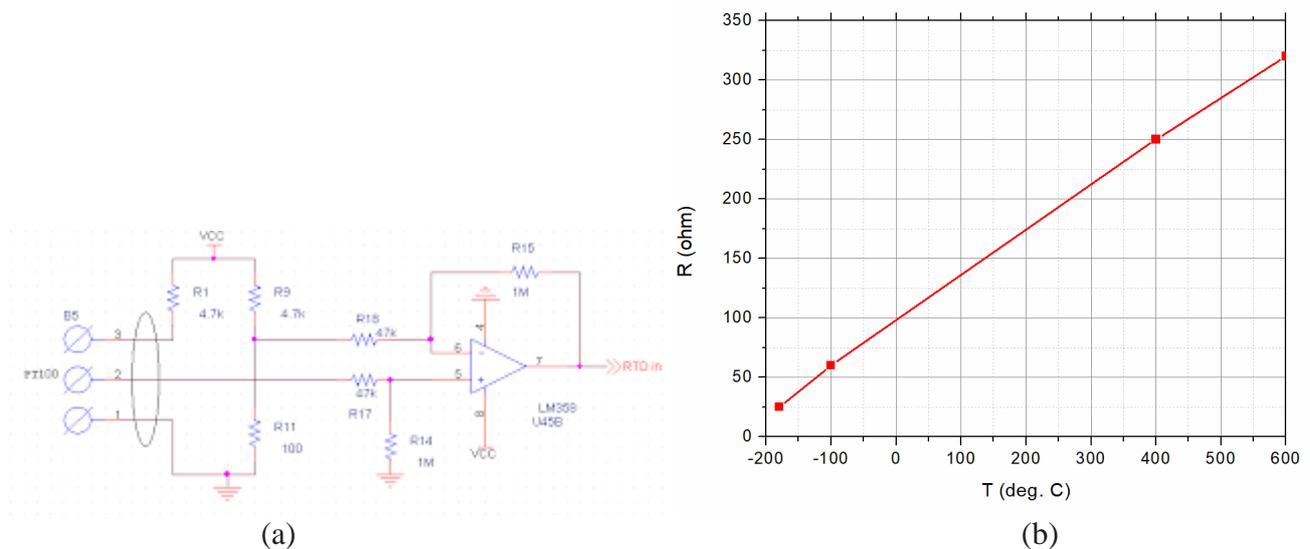


Fig.2.3 Capteurs de température PT100, (a) Circuit de conditionnement (b) Caractéristique $R=f(T)$

3.1. Typologies de branchement RTD (PT 100)

Les thermomètres à résistance peuvent comporter deux, trois ou quatre fils de branchement.

Dans le branchement à deux fils, la mesure et l'alimentation de la RTD sont obtenues par le biais d'un seul conducteur.

Dans le branchement à trois fils, le troisième conducteur, utilisé pour la mesure, compense la chute de tension relative au conducteur.

Dans le branchement à quatre fils, la chute de tension est compensée dans les deux paires de conducteurs.

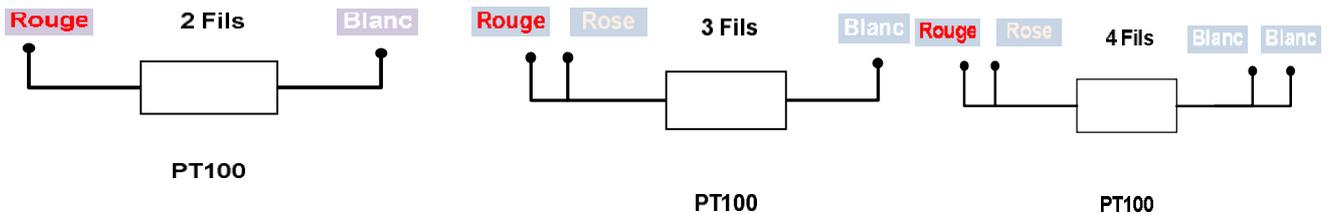
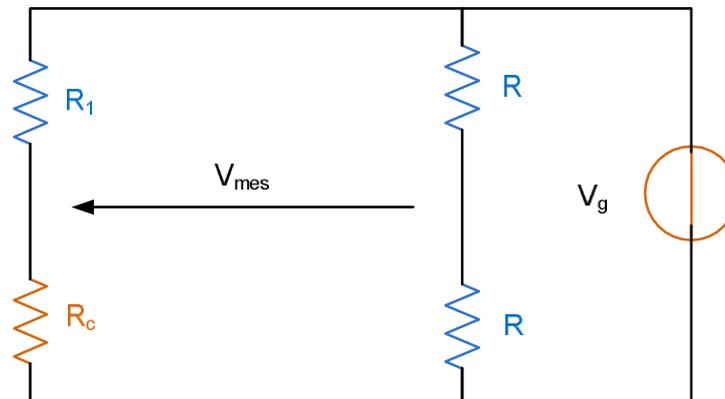


Fig.2.1 Différents configuration des capteurs de température PT100

Le PT100 est un standard dans la mesure de température : 100Ω à 0°C et 138.5Ω à 100°C

Exemple .1

On considère une résistance thermométrique PT100 de résistance $R_c = R_0(1 + \alpha T)$ où T représente la température en $^\circ\text{C}$, $R_0=100\Omega$ la résistance à 0°C et $\alpha=3,85.10^{-3}\text{C}^{-1}$ le coefficient de température. Cette résistance est placée dans un pont de Wheatstone. Le pont est alimenté par une source de tension de force électromotrice V_g et de résistance interne négligeable.



1) On se limite à l'étendue de mesure [0°C ; 100°C] et on équilibre le pont pour la valeur $T_0=50^\circ\text{C}$ de la température pour laquelle on pose $R_c(T_0)=R_{C0}$. L'impédance des fils de liaison liant le capteur au reste du montage est totalement négligeable (le capteur est physiquement proche du pont).

Déterminer la valeur de R_1 qui permet d'équilibrer le pont.

2) On limite le courant I dans la PT100 à moins de 5 mA afin de pouvoir négliger l'auto échauffement. Fixer la valeur maximale de la tension d'alimentation permettant cette limitation du courant.

3) Établir l'expression de la tension différentielle de mesure pour une valeur quelconque de la température pour laquelle on posera :

$$R_c(T)=R_c(T_0+\Delta T)=R_{C0}+\Delta R_c$$

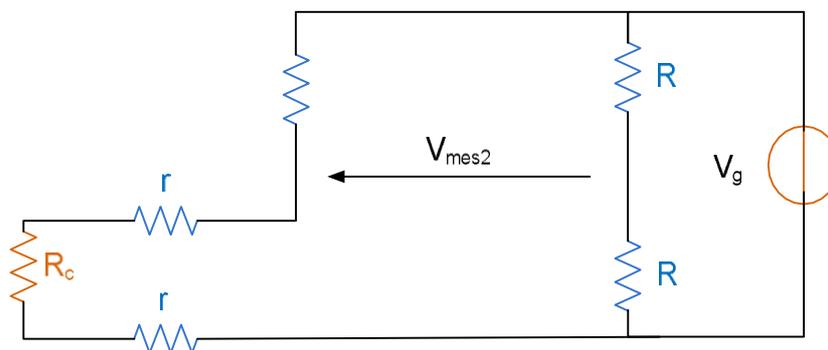
$$V_{\text{mes}}(T)=V_{\text{mes}}(T_0+\Delta T)=V_{\text{mes},0}+\Delta V_{\text{mes}}$$

En déduire une approximation au premier ordre en $\Delta R_c/R_{C0}$ de la sensibilité de la mesure

$$S_{\text{mes}}=\Delta V_{\text{mes}}/\Delta T.$$

4) Le capteur est maintenant mis en service mais à grande distance de l'électronique constituée par le

pont, de son alimentation et du système de mesure de la tension différentielle. La résistance des fils de liaison du capteur à son électronique n'est plus négligeable. Celle-ci est modélisée par deux résistances supplémentaires r .



Calculer la tension de déséquilibre $V_{mes,2r}$ du pont dans ce cas puis l'erreur δV_{2r} , entraînée par les fils de liaison.

Calculer la valeur maximale de r pour que l'erreur introduite sur la mesure d'une température reste inférieure à $\delta T = 0,2^\circ\text{C}$. On suppose que le fil de liaison est un fil de cuivre de diamètre $d = 0,5\text{mm}$ et de résistivité $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$. Calculer la longueur des fils de liaison qui correspondent à cette résistance.

4 - Thermistances

La propriété primordiale de ce type de résistance est une sensibilité thermique très supérieure, de l'ordre de 10 fois, à celle des résistances métalliques; en outre leur coefficient de température est généralement négatif et dépend fortement de T .

Elles sont constituées à partir de mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs poly-cristallins tels que MgO , MgAl_2O_4 , Fe_2O_4 , NiO , ZnTiO_4

Les oxydes en poudre sont agglomérés, mis en forme par compression et aurais par frittage à des températures de l'ordre de 1000°C sous atmosphère contrôlée. Les fils métalliques de liaison sont soudés en deux points de la surface semi-conductrice préalablement métallisée. Les thermistances sont disponibles sous des formes variées : disques, cylindres, anneaux, perles, l'élément sensible pouvant être ou non protégé par enrobage ou encapsulage. 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 sous dimensions réduites (de l'ordre du mm) ; il en résulte :

- Un faible encombrement permettant la mesure quasi ponctuelle de la température,
- Une capacité calorifique réduite rendant possible des vitesses de réponse élevées.

La stabilité d'une thermistance dépend de sa réalisation et des conditions d'emploi. L'enrobage de la résistance la protège vis-à-vis de l'altération chimique et accroît sa stabilité. Les chocs thermiques doivent être évités car ils peuvent provoquer une fissuration du matériau. Le domaine d'emploi des thermistances, selon leur type, est compris entre quelques degrés absolus et environ 300°C ; elles peuvent être utilisées au delà de cette limite mais avec un risque non négligeable d'évolution appréciable de leur résistance. A moins d'effectuer une sélection par tri, l'interchangeabilité de thermistances d'un même type est médiocre, les tolérances habituelles étant de $\pm 10\%$ de la valeur nominale.

1 Relation thermistances -température

L'expression de la résistance d'une thermistance se peut écrit comme suit:

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

R_0 étant la résistance a la température absolue T_0 .

La sensibilité thermique déduite de la formule précédente s'écrit :

$$\alpha_R = -\frac{\beta}{T^2}$$

La valeur de β comprise généralement entre 3000 et 5000K

Exemples

Thermistance CTP disque $R=0.9$ à 19000Ω a 25°C tension maxi de 30V a 265V

Thermistance CTP miniature $R=1000\Omega$ a 25°C température de -55°C a $+220^\circ\text{C}$

Thermistance CTN miniature $R=2$ à 100Ω température de -40°C a $+150^\circ\text{C}$

Thermistance CTN disque $R=100$ à $470\text{k}\Omega$ température de -55°C a $+125^\circ\text{C}$

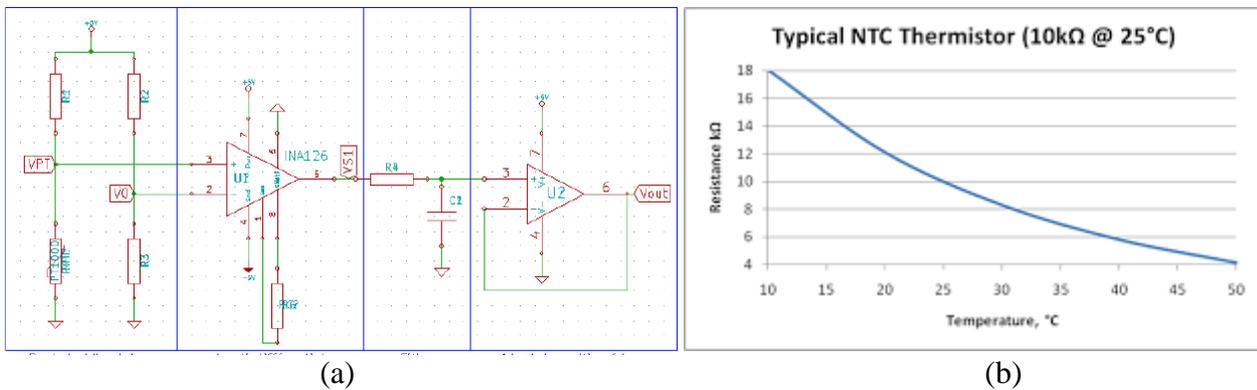


Fig.2.4 Capteurs de température CTN, (a) Circuit de conditionnement (b) Caractéristique $R=f(T)$

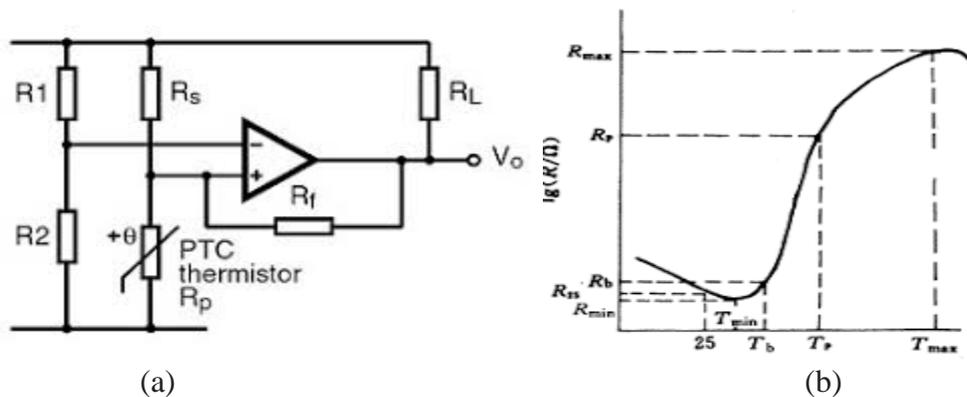


Fig.2.5 Capteurs de température CTP, (a) Circuit de conditionnement (b) Caractéristique $R=f(T)$



Fig.2.6 Modèle pratique des capteurs de température CTN et CTP.

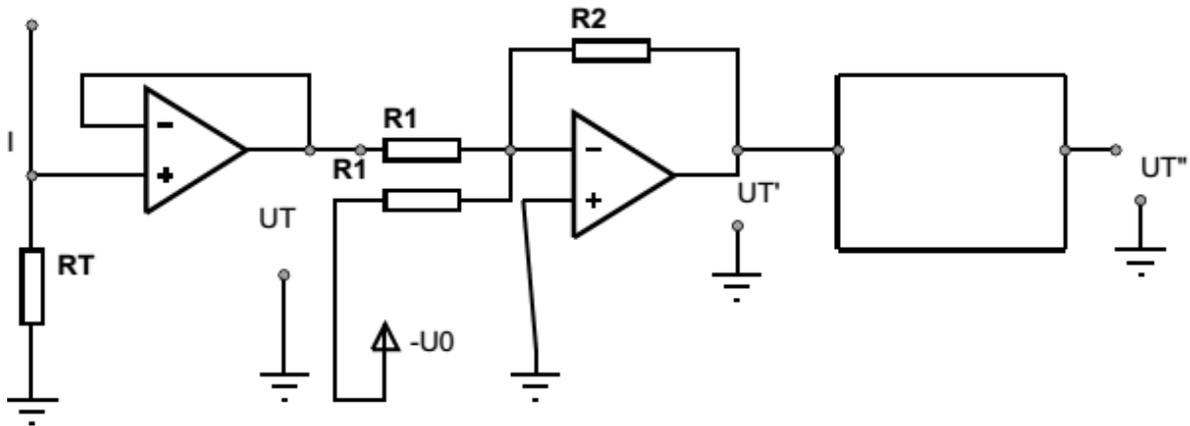
Exemple 2

Un capteur de température possède une résistance R_0 qui varie avec la température T suivant la loi :

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \text{ avec :}$$

- R_0 (résistance à 0°C) $R_0 = 100\Omega$.
- α (coefficient de température) $\alpha = 3,85.10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

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



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

1- Montrer que la tension U_T aux bornes de R_T s'écrit sous la forme : $U_T = U_0(1 + \alpha T)$.

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- .

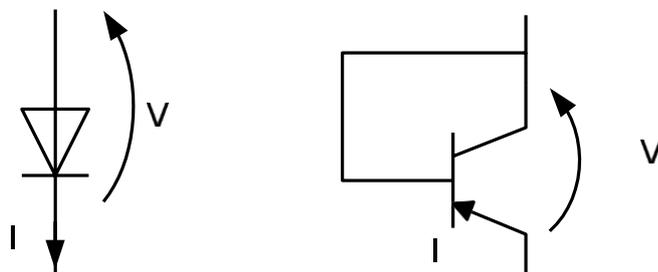
Montrer que la tension U_T s'écrit sous la forme : $U_T' = -bT$.

Exprimer b en fonction de α , U_0 , R_2 , et R_1 .

4- On souhaite inverser la tension U_T' pour obtenir la tension U_T'' qui s'écrit : $U_T'' = bT$.

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

5. Thermométrie par diode et transistor:



La partie courbe de la caractéristique tension\intensité d'une diode silicium ou d'un transistor monté en diode polarisé en direct est la suivante

$$I_D = I_s \left[e^{(eV/kT)} - 1 \right] \approx I_s \cdot e^{(eV/kT)}$$

$$V = \ln \left(\frac{I_D}{I_s} \right) \cdot \frac{k}{e} T$$

Capteurs chaine de mesures

V n'est pas linéaire en fonction de T car I_s varie avec T

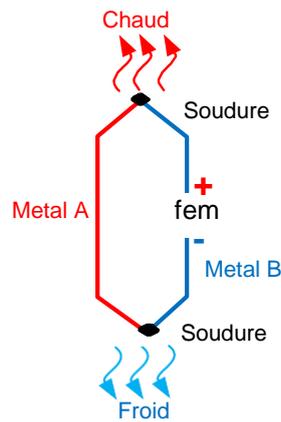


Fig.2.10. Principe de fonctionnement d'un thermocouple.

Tout simplement, un thermocouple ne mesure pas la température absolue, mais la température différentielle entre le

- T_1 : Point de mesure (jonction chaude)
- T_2 : Point froid (jonction froide).

❖ **Effet Seebeck**

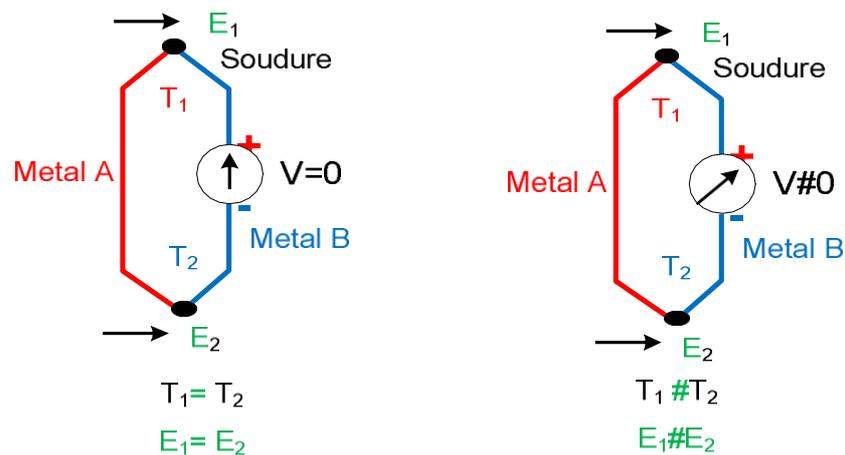


Fig.2.11. le fonctionnement de l'effet Seebeck.

V ne dépend que des matériaux en présence et non de la nature des jonctions. La variation de la tension en fonction de la température est donnée par la formule suivante

$$dV = \alpha dT \Rightarrow V = \int_{T_1}^{T_2} \alpha dT \quad (2.7)$$

Avec α coefficient relatif de Seebeck

$$dV = (\alpha_A - \alpha_B) dT = dV_A - dV_B \quad (2.8)$$

Avec α_A et α_B coefficients absolus de Seebeck

Elément	α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Fe	13.4
Cu	0.0
Ni	-20.4
Bi	-72.8
p-Si	10 a 1000
n-Si	-100 a -1000

Comme la tension est souvent mesurée à température ambiante, la valeur de tension qui est affichée serait trop basse par rapport à la valeur de tension de la température ambiante. Pour obtenir la valeur pour la température absolue du point de mesure, on utilise ce qu'on appelle la "compensation de jonction froide".

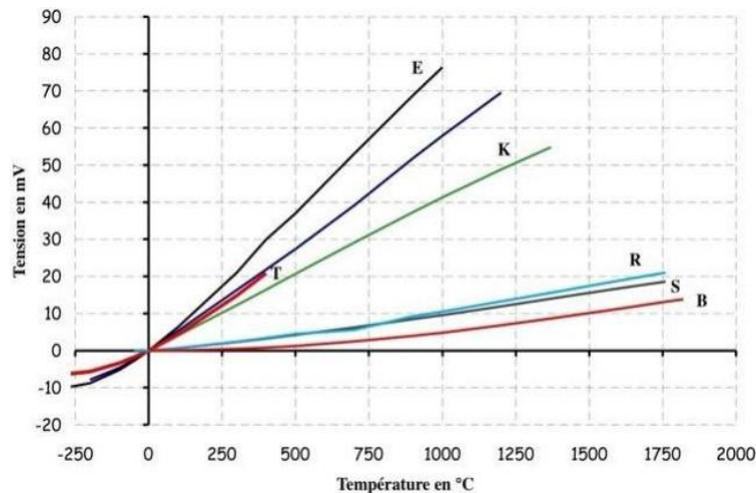


Fig.2.12. Courbes de tension thermo-électrique (CEI 60584-2)

Sur les instruments courants avec entrée thermocouple (transmetteurs, instruments de mesure portables ou dispositifs installés dans le panneau électrique, etc.), une compensation de jonction froide électronique est incluse dans les circuits de l'instrument.

Symbole	Type de thermocouple	Plage d'utilisation °C
T	Cuivre-Constantan	-200 a +390
J	Fer-Constantan	-200 a +760
E	Chromel-Constantan	-200 a 990
K	Chromel-Alumel	-200 a +1270
S	Platine 10%	0 a +1450
R	Platine 13%	0 a +1760
B	Platine 30%	0 a +1820

6.1. Limites de température de fonctionnement du thermocouple

Pour ponter la distance entre le thermocouple et l'instrumentation, il faut utiliser des câbles de raccordement spéciaux avec les thermocouples.

On opère ici une distinction entre **câbles de thermocouple** (le matériau du câble correspond au matériau d'origine du thermocouple) et ce qu'on appelle les **câbles de compensation**.

7. Mise en œuvre du thermocouple et sa protection

La construction mécanique des sondes utilisées dans les industries est identique qu'il s'agisse d'une thermo résistance ou d'un thermocouple. Elle comprend les éléments suivants :

- Insert de mesure avec borer céramique ou transmetteur de tête
- Raccord process
- Tube d'extension/Tige du doigt de gant
- Tête de raccordement avec entrée de câble

Il faut éviter que se créent lors de son montage ou de son utilisation des inhomogénéités dans sa structure qui risquent, en modifiant localement les propriétés thermoélectriques de former des couples parasites ; ces inhomogénéités ont trois causes principales :

- Les contraintes mécaniques dues à des pliures ou à la tension du fil: elles peuvent en général être supprimées par recuit ;
- Les contaminations chimiques: les fils doivent être protégés vis-à-vis de tout agent susceptible de réagir avec eux; en particulier, lors de leur manipulation une propreté extrême est requise ;
- Les rayonnements nucléaires provoquant des transmutations dans certains alliages de thermocouples.
- La partie soudée du thermocouple doit être d'un volume aussi réduit que possible pour éviter entre ses divers points des différences de température qui donneraient naissance à des f.é.m. parasites, conséquence des modifications chimiques des métaux au niveau de la soudure.

L'une des trois techniques suivantes est habituellement utilisée :

- Le brasage à l'étain lorsque la température d'utilisation n'est pas trop élevée (couple de type T) ;
- Le soudage autogène au chalumeau oxyacétylénique est la technique la plus courante ;
- Le soudage à l'arc électrique.

Les fils peuvent être torsadés sur une faible longueur au voisinage de la soudure afin d'accroître sa protection mécanique mais aux dépens de la précision de sa localisation et de la vitesse de réponse. Afin d'éviter tout contact en dehors des jonctions de mesure les fils sont placés à l'intérieur d'isolateurs en céramique. Ceux-ci doivent être chimiquement inertes et avoir une grande résistante électrique d'isolement à température élevée.

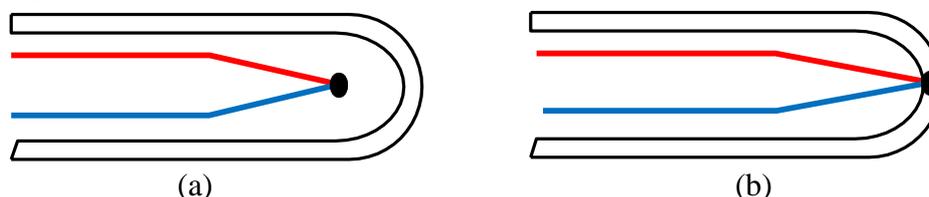


Fig.2.13. Thermocouple et la gaine enveloppé. (a) Soudure isolée (b) Soudure non isolée

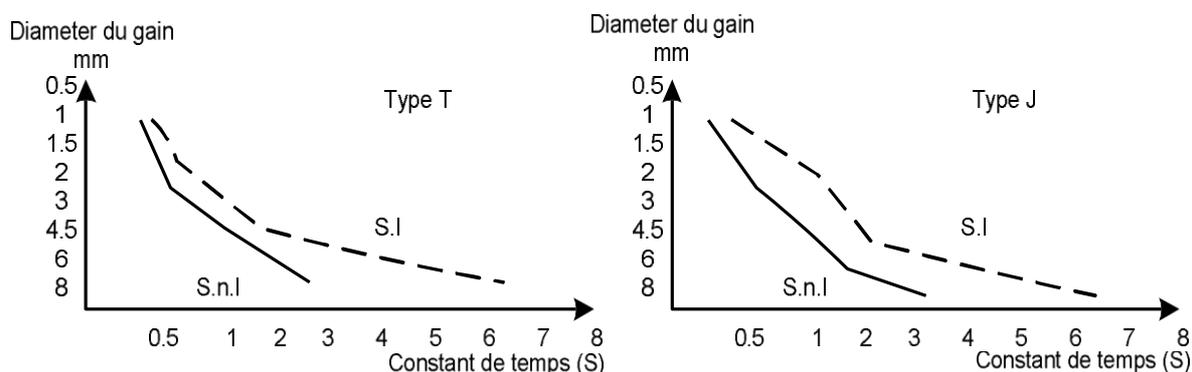


Fig.2.14 Constante de temps thermique de couples en fonction du diamètre de leur gain en acier selon que la soudure est ou non isolée de la gaine (Doc. Pyro-Contrôle).

La fragilité de l'ensemble isolateur-thermocouple requiert le plus souvent une protection supplémentaire qui est assurée par une enveloppe ou gaine qui doit être étanche aux gaz et insensible aux chocs thermiques. Elle est réalisée généralement en céramique ou en acier; dans ce dernier cas la

soudure du couple peut être isolée ou bien en contact avec la gaine ce qui améliore la vitesse de réponse mais ris que d'introduire une tension de mode commun qui peut être gênante.

8. Montage de mesure

Le montage généralement utilisé est schématisé comme suit.

A condition que soient deux à deux à la même température :

- Les jonctions de référence du thermocouple (A/M_1 et B/M_1)
- Les jonctions des métaux intermédiaires faisant partie de l'ensemble liaison et de mesure (M_1/M_2 ; M_2/M_3),

Le circuit n'est le siège que de la f.é.m. de Seebeck du thermocouple.

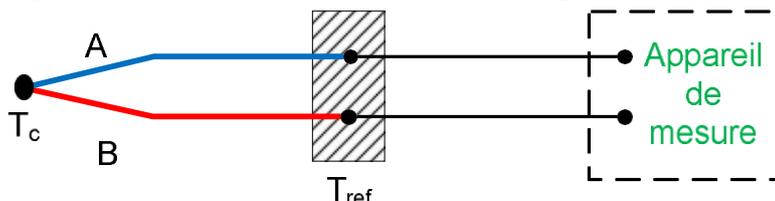


Fig.2.15 Schéma de principe de la liaison d'un thermocouple à un appareil de mesure

❖ Câbles de compensation

On peut être amené à utiliser une longueur de fils de couple aussi courte que possible; c'est le cas

- Pour des raisons d'économie, lorsqu'on emploie un couple coûteux
- Pour éviter la fragilité de l'installation lorsque les conditions de mesure imposent un fil de couple très fin.

On intercale alors entre le couple A/B et l'appareillage de mesure des fils A' et B' qui ne doivent en aucun cas modifier la f.é.m. que délivrerait seul le couple A/B.

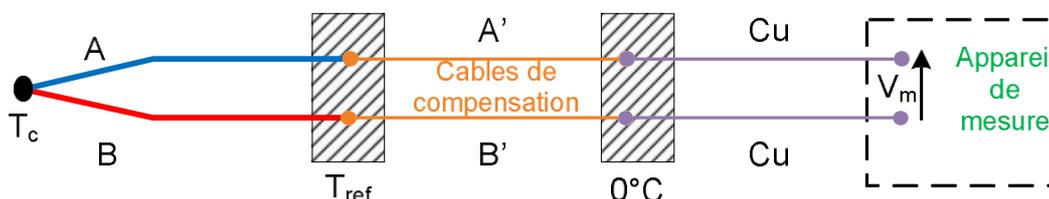


Fig.2.16 Schéma de montage des câbles de compensation

Quand c'est la fragilité du couple qui est en cause il suffit de raccorder les fils de couple avec des fils de même nature mais de diamètre supérieur: la température des jonctions du thermocouple avec les fils introduits importe alors peu.

Lorsque c'est le prix du couple qui est en cause, on peut assurer la liaison par des fils de nature différente de celle du couple mais de caractéristiques bien déterminées: ce sont les câbles de compensation.

❖ groupement des ensembles thermocouples

Lorsqu'il s'agit de raccorder à l'installation de mesure un nombre important de thermocouples de même type, l'utilisation de câbles de compensation pour chacun d'eux peut s'avérer onéreuse. On procède alors au déplacement de soudure froide : chacun des thermocouples est raccordé à l'intérieur du boîtier de soudure froide, à la température T_2 , à deux fils de cuivre qui le relient à l'installation de mesure.

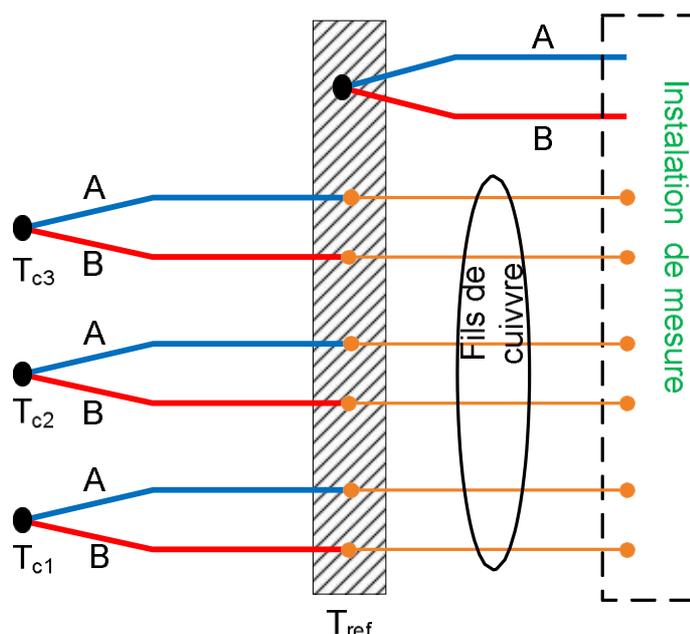


Fig.2.17 Installation de mesure a plusieurs capteurs avec déplacement de soudure froide.

Exemple

On désire amplifier et adapter la tension V_e fournie par un capteur de température. Pour cela, on utilise le montage amplificateur différentiateur suivant :

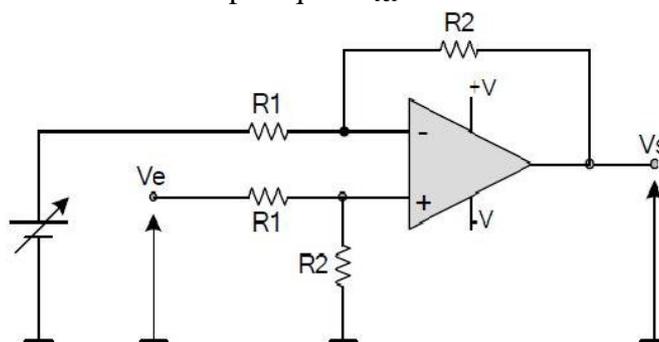
AOP est considéré idéal

$$V_{ref}=2.73V$$

$$V=12V$$

$$T(^{\circ}C)=T(^{\circ}K)-273^{\circ}K$$

1. Exprimez la tension V_s en fonction de R_1 , R_2 , V_{ref} et V_e ?
2. Sachant que le capteur de température fournit une tension de 10mV pour $1^{\circ}K$, calculer le rapport R_2/R_1 pour qu'à la sortie de l'amplificateur, $V_s=20mV$ pour $1^{\circ}C$?
3. Pourquoi utilise-t-on un différentiateur et pourquoi $V_{ref}=2.73V$?



III - CAPTEURS OPTIQUES

1 - La lumière et propriétés fondamentales

Les capteurs optiques permettent la traduction en signaux électriques de l'information portée par de la lumière visible ou des rayonnements de longueurs d'onde voisins : infrarouge et ultraviolet. La lumière présente à la fois un aspect ondulatoire et un aspect corpusculaire. Considérée sous son aspect ondulatoire, la lumière apparaît constituée d'ondes électromagnétiques émises lors de transitions électroniques entre niveau d'énergie des atomes de la source. Ces ondes se propagent dans le vide à la vitesse: $c=299792\text{km/s}$ et dans la matière à une vitesse réduite $=c/n$, où n est l'indice de réfraction du milieu.

2 - Photométrie

- ✓ Les grandeurs relatives aux rayonnements lumineux peuvent être évaluées: abstraction faite de toute impression sensorielle, en considérant uniquement leur contenu énergétique et sa répartition dans l'espace et le temps, par les unités ordinaires de la physique (joule, watt) : c'est la photométrie énergétique ou radiométrie.
- ✓ En tenant compte de l'impression visuelle produite afin que celle-ci pondère la définition purement énergétique : il s'agit alors de photométrie visuelle qui ne concerne dès lors que le spectre visible.

3 - Caractéristique métrologique propres aux capteurs optiques

➤ **Courant d'obscurité** : C'est le courant permanent délivré par le dispositif photosensible placé dans l'obscurité et polarisé dans des conditions définies.

➤ **Sensibilité** :

Le flux du signal optique reçu par le capteur crée un courant d'origine photoélectrique I_p qui, s'ajoutant au courant d'obscurité I_0 , détermine le courant I traversant le capteur :

$$I = I_0 + I_p$$

C'est à partir du courant I_p qu'est caractérisée la réponse du capteur au rayonnement reçu : elle dépend : d'une part de la constitution du capteur, d'autre part de la nature du rayonnement :

La sensibilité du capteur qui est par définition le rapport de la variation de la grandeur de sortie, ΔI , à la variation du mesurande, $\Delta \Phi$, qui lui a donné naissance, a pour expression dans ce cas :

$$S = \frac{\Delta I_p}{\Delta \Phi}$$

Selon l'unité de mesure du flux, la sensibilité est exprimée en A/W, A/lumen ou aussi en A/lux lorsque le flux est spécifié par l'éclairement visuel qu'il produit.

➤ **Défectivité** :

Il s'agit de caractériser le capteur par rapport à son bruit de fond et de modifier son aptitude à détecter des signaux faibles qui est la déflectivité.

$$D = \frac{S}{I_p}$$

4 - Cellule photoconductrice (LDR)

Les photorésistances ou LDR sont des capteurs optiques de faible coût dont la résistance diminue lorsqu'elles sont éclairées. La résistance peut passer de quelque $10\text{M}\Omega$ dans l'obscurité à quelque 100Ω

en pleine lumière. Ces capteurs présentent une très bonne sensibilité mais une mauvaise bande passante. Ce type de capteur sur porte un courant important et contrairement aux photodiodes et phototransistors, les photorésistances sont non-polarisées. Les LDR sont très utilisées dans les systèmes où on désire, à partir d'un seuil, déclencher une action, par exemple la commande d'un relais, directement par le courant traversant le capteur. Ce procédé simplifie grandement l'électronique. C'est le cas par exemple des systèmes d'éclairage à détection crépusculaire où l'arrivée de l'obscurité, augmentant la résistance de la LDR en diminue le courant, refermant un relais jusqu'ici ouvert et permettant l'allumage du système d'éclairage.

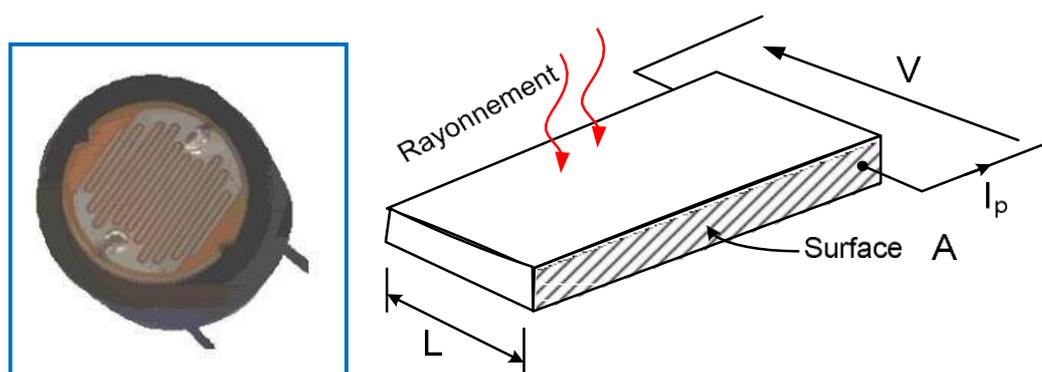


Fig.3.1 Schéma de principe d'une cellule photoconductrice.

Ces composants sont réalisés essentiellement à partir de sulfure, tellure ou sélénure de cadmium ou de plomb. Leurs réponses spectrales peuvent être relativement étroites et permettent de couvrir le domaine du proche ultraviolet à l'extrémité rouge du spectre visible (de 30 à 750 nm).

- Caractéristiques des cellules photorésistances

- **Resistance** la valeur de la résistance d'obscurité R_{co} dépend de la forme géométrique, des dimensions, de la température et la nature physicochimique du dépôt photoconducteur.

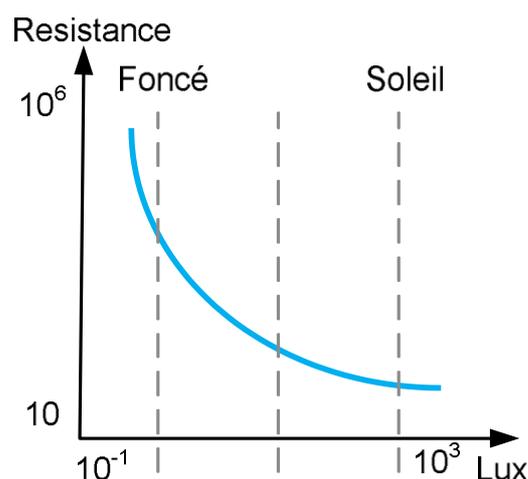


Fig.3.2 Variation de la résistance d'une LDR en fonction de son éclairement

Les propriétés de la cellule peuvent être convenablement traduites par un schéma électrique équivalent où la résistance d'obscurité est placée en parallèle sur une résistance R_{cp} qui est déterminée par l'effet photoélectrique du flux incident et qui est de la forme.

$$R_{cp} = \alpha \Phi^{-\beta} \quad (3.1)$$

a dépendent en particulier du matériau, de la température et du spectre du rayonnement incident

□ ayant généralement des valeurs compris entre 0.5 et 1

➤ **Puissance dissipée** la puissance maximale dissipée est de l'ordre du mW par mm² de surface LDR

➤ **Sensibilité** D'après la formule précédente le courant du LDR est écrit comme suivant

$$I = \frac{V}{a} \Phi^\gamma \quad (3.2)$$

La sensibilité est

$$\frac{\Delta I}{\Delta \Phi} = \gamma \frac{V}{a} \Phi^{\gamma-1} \quad (3.3)$$

Temps de repense Le temps de repense de la résistance permet de spécifier la rapidité avec laquelle la résistance de la cellule prend sa nouvelle valeur lorsqu'il est soumise à un brusque changement de flux, c'est le temps nécessaire pour que la variation de résistance, consécutive à l'application d'un échelon de flux, atteigne un pourcentage spécifique (63%).

➤ **Détectivité**

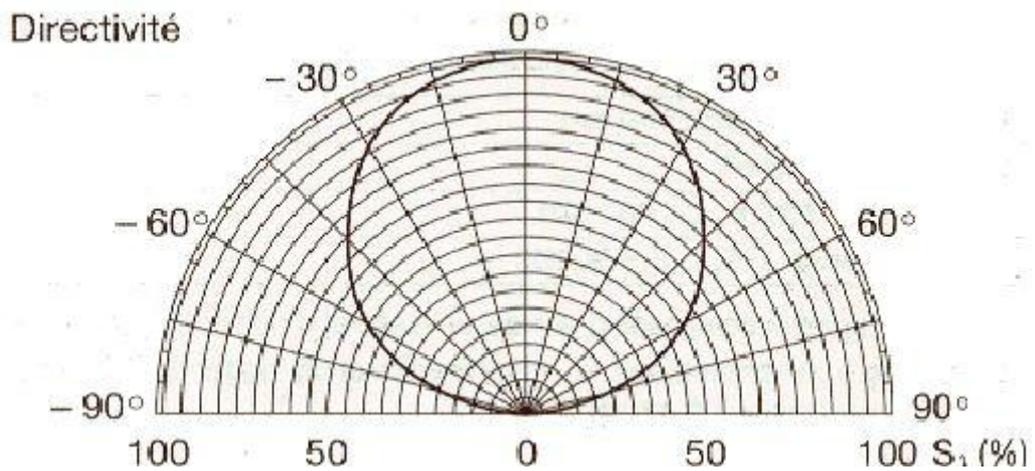


Fig.3.3 Variation de la résistance d'une LDR en fonction de sa direction

- Application des cellules photorésistances

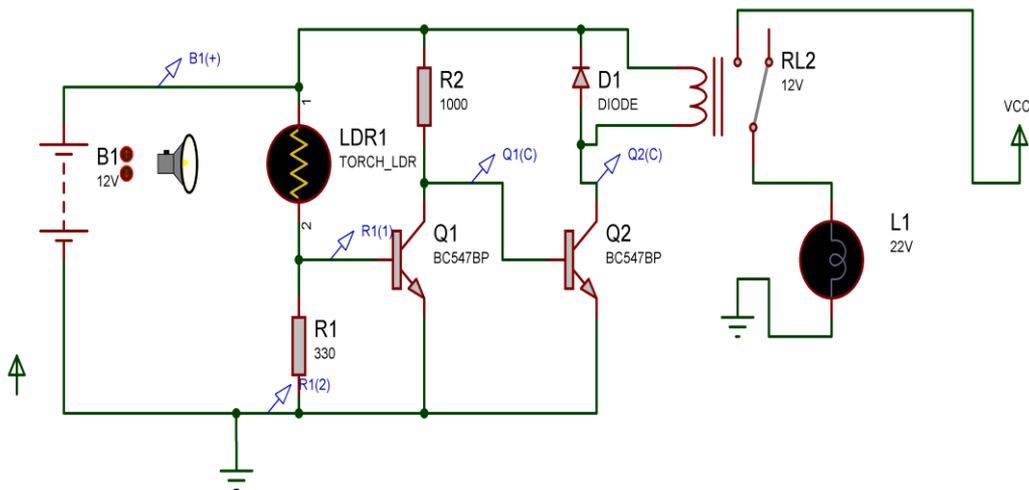


Fig.3.4 Application d'une LDR

5 - Les photodiodes

Les photodiodes sont des diodes au silicium qui exploitent l'effet photoélectrique. Sous éclairage, les photons libèrent des paires électrons trous. Sa polarisation en inverse produit un courant (I_R) qui augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse.

- Mode de fonctionnement

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

La jonction se comporte alors comme une source de courant: c'est une cellule photovoltaïque, ou générateur solaire, qui peut être utilisé comme capteur pour la mesure de l'intensité lumineuse

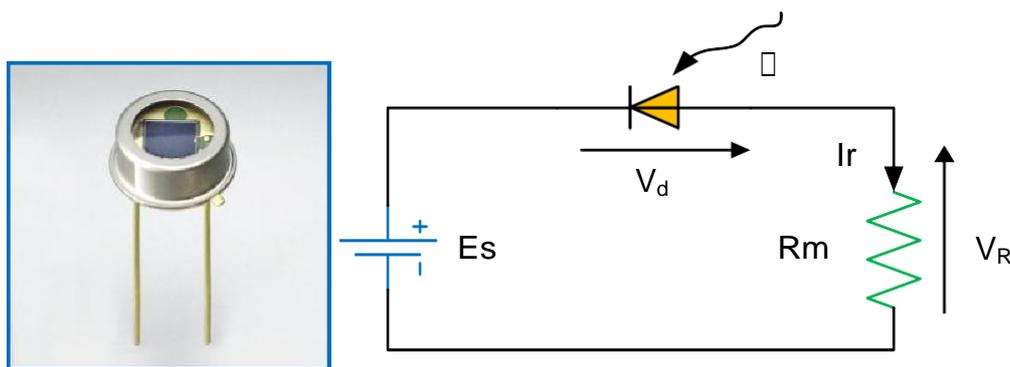


Fig.3.5 Modèle d'une photodiode

Caractéristiques de la photodiode

- **La directivité** : Elle exprime la capacité d'une photodiode (mais aussi d'un phototransistor, d'un phototriac, etc...) à détecter un faisceau lumineux présentant un angle par rapport à la normale de la surface.
- **Le courant d'obscurité** : En l'absence complète de lumière, la photodiode génère un courant appelé *courant d'obscurité*.
- **Le temps de réponse** : Ces capteurs disposent d'une très bonne répétabilité.

Les photodiodes sont beaucoup utilisées en raison de leur grande stabilité, de leur faible encombrement, de leur coût réduit. Elles ont été par ailleurs utilisées pour développer des phototransistors.

6 - Les phototransistors

Le faible courant électrique transmis par les photodiodes a poussé les constructeurs de semi-conducteurs à rajouter à ce composant un transistor donnant ainsi naissance au phototransistor. Les caractéristiques sont sensiblement les mêmes que celle des photodiodes. Mais on remarque un courant beaucoup plus important.

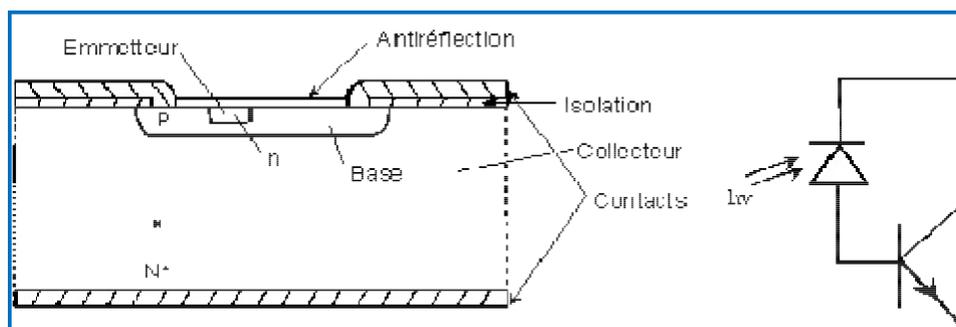


Fig.3.6 Modèle d'un phototransistor

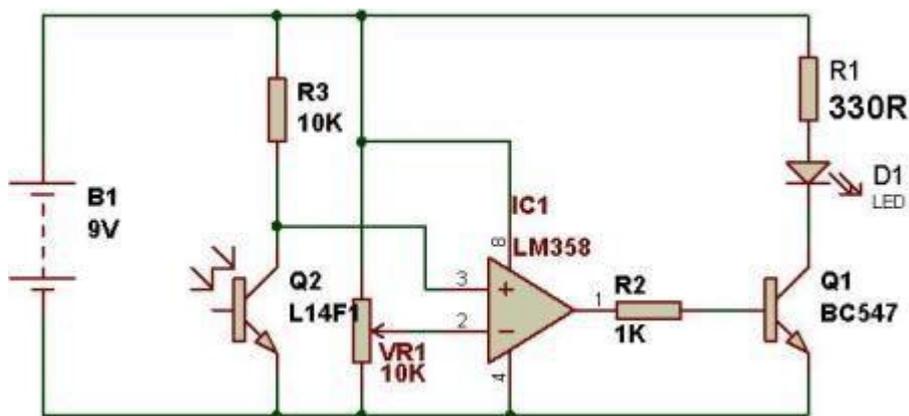


Fig.3.7 Application pratique d'un phototransistor

7 - Les capteurs CCD

Un capteur CCD est un circuit intégré optoélectronique dont la fonction est de capter une image. Afin de récupérer cette dernière, le capteur est composé d'une matrice de capteurs optoélectronique dont chaque point de mesure est appelé pixel.

Pour reconstituer l'image, il faut scruter les pixels du capteur les uns après les autres puis les transférer vers un fil de sortie. Dans le cas d'une image couleur, chaque pixel est défini par l'intensité lumineuse du rouge du vert et du bleu. Il faut donc pour un même pixel trois capteurs photo électriques.

La structure logique permettant le balayage des pixels en ligne et en colonne est intégré également dans le circuit.

Ce type des capteurs sont mis en œuvre dans les scanners, les caméras, les appareils photos numériques, etc...

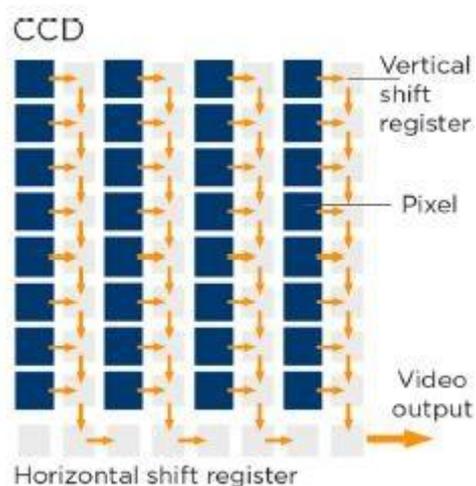
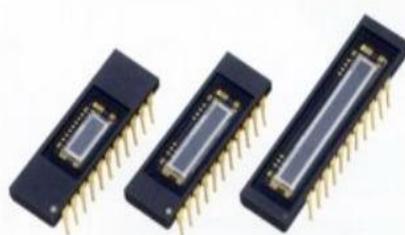
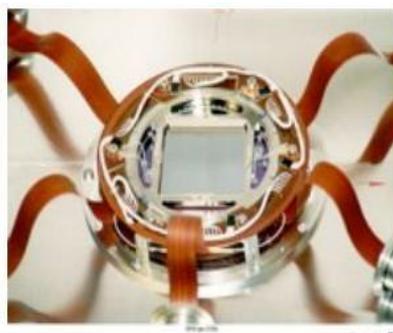


Fig.3.8 Principe de capteur CCD



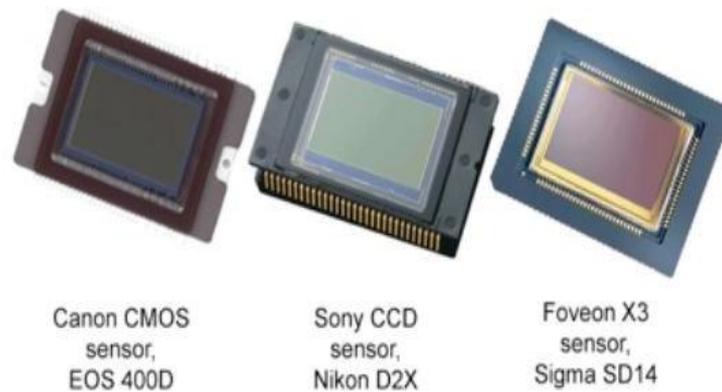


Fig.3.9 Modèle commerciale des capteurs CCD.

8 - Exemple de capteurs photoélectriques dans l'industrie

Ces détecteurs sont utilisés dans les domaines industriels et tertiaires les plus divers comme :

- La détection d'objets et de produits dans la manutention et le convoyage;
- La détection de pièces machine dans les secteurs de la robotique et du bâtiment ;
- La détection de personnes, de véhicules ou d'animaux, etc.

Pour réaliser la détection d'objets dans les différentes applications, 3 techniques de montages sont possibles:



Fig.3.10 Modèle industriel des capteurs photoélectrique

- **Système barrage** (figure 3.11 a) caractérisé par :

L'émetteur et le récepteur sont situés dans deux boîtiers séparés ;
La portée la plus longue pour ce type de capteur (jusqu'à 30 m) ;
Le faisceau est émis en infrarouge ;
La détection des objets opaques ou réfléchissant quelque soit le matériau ;
L'alignement entre émetteur et récepteur doit être réalisé avec soin.

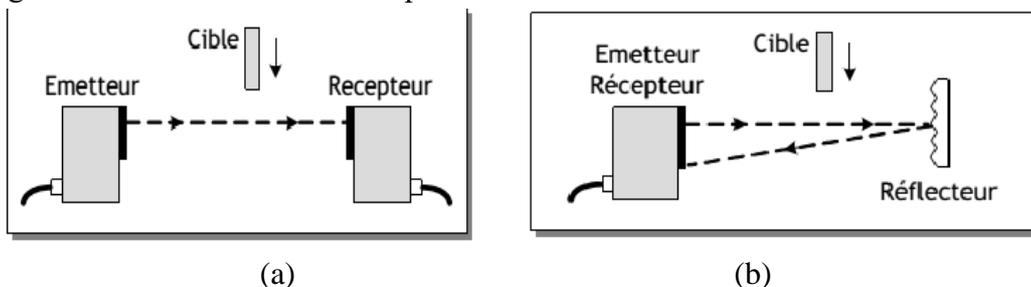


Fig.3.11 Montage type. (a) Barrage. (b) Reflex

- **Système reflex** (figure 3.11b) caractérisé par :

L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier ;

Utilisation d'un réflecteur qui renvoie le faisceau lumineux en cas d'absence de cible ;

La portée peut atteindre jusqu'à 15 m ;

Le faisceau est émis en infrarouge ;

La détection des objets opaques et non réfléchissant quelque soit le matériau ;

- **Système proximité** (figure 3.12) caractérisé par :

L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier ;

La présence de la cible renvoie le faisceau lumineux vers le capteur ;

La portée dépend de la couleur de la cible, de son pouvoir réfléchissant et de ses dimensions.

Elle augmente si l'objet est de couleur claire ou de grande dimension.

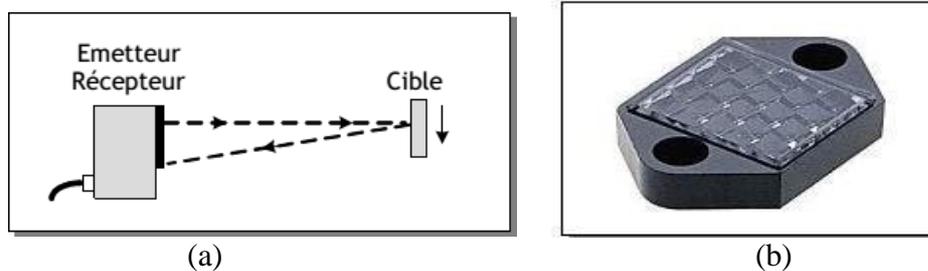


Fig.3.12 Montages types. (a) Proximité. (b) Réflecteur

IV- LES CAPTEURS DE POSITION

1 - Introduction

Ces capteurs sont d'un emploi très général, parce que le contrôle des positions et déplacements est un élément important pour le fonctionnement correct de beaucoup de machines, machines outils par exemple.

Il y a deux méthodes fondamentales utilisées pour le repérage des positions et la mesure des déplacements.

1/ Dans la première méthode, la plus fréquemment utilisée, le capteur fournit un signal qui est fonction de la position de l'une de ses parties liée à l'objet mobile et les variations de ce signal traduisent le déplacement ; le groupe le plus important de ce type est constitué à partir d'impédances électriques dont l'une des caractéristiques géométriques ou dimensionnelles est variable avec la position de l'élément mobile: potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile, transformateur à couplage variable.

A cette catégorie de capteurs, appartiennent aussi les codeurs digitaux absolus à l'aide desquels la position et le déplacement sont déterminés par lecture optique ou magnétique d'une graduation codée en binaire qui est portée par une règle ou un disque solidaires de l'élément mobile.

2/ Dans la seconde méthode, d'emploi moins fréquent, le capteur délivre une impulsion à chaque déplacement élémentaire : la position et les déplacements sont déterminés par comptage des impulsions émises, ou décomptage selon le sens du déplacement. Il s'agit dans ce cas de capteurs incrémentaux.

Les capteurs dits de proximité sont caractérisés par l'absence de liaison mécanique avec l'objet dont ils mesurent la distance ou le déplacement: ils ont donc une grande finesse. Le couplage entre l'objet en déplacement et le capteur est établi par l'intermédiaire d'un champ magnétique, électromagnétique ou électrostatique et c'est l'intensité de ce couplage, fonction de la position relative de l'objet et du capteur, qui détermine la réponse électrique du capteur.

2 - Potentiomètre résistive

La résistance est fonction de la position du curseur lié à l'élément mobile

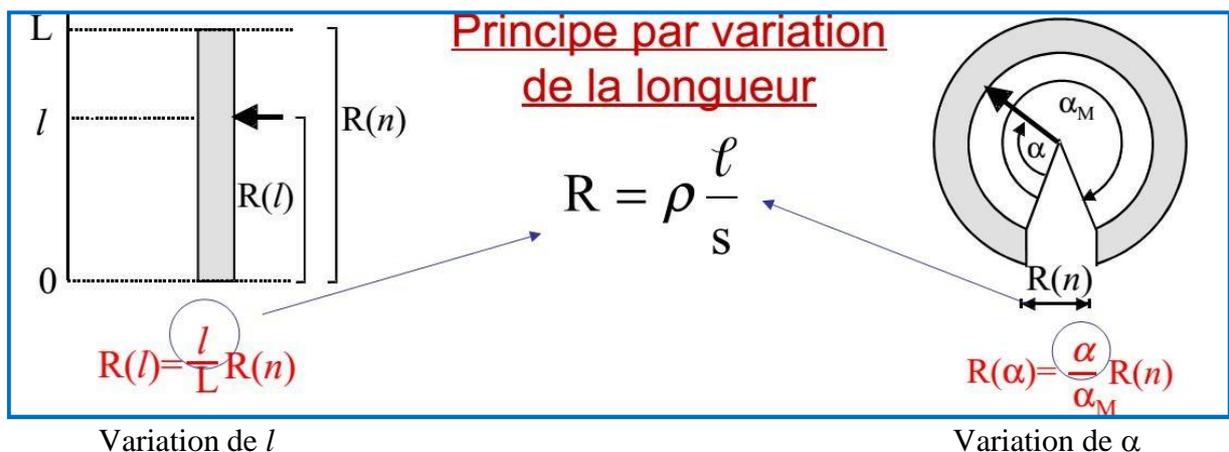


Fig.4.1 Principe de variation d'une longueur



Fig.4.2 Principe de variation d'une longueur

Elle peut être constituée soit par un fil bobiné soit par une piste conductrice

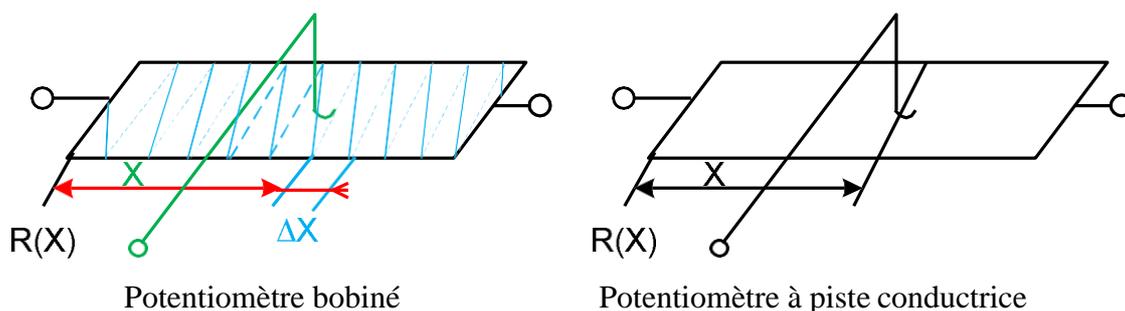


Fig.4.2 Principe de variation d'une longueur

Le curseur doit assurer un bon contact électrique ce qui implique; l'absence de f.é.m. de contact, une résistance de contact faible et stable, d'une part dans le temps (usure), d'autre part en présence de vibrations ou de vitesse élevée de déplacement du curseur. La résistance de contact dépend de la pression du curseur, de la nature et de l'état des surfaces en contact; elle est nettement plus élevée pour les potentiomètres à piste conductrice: elle peut atteindre quelques % de la résistance de la piste. En outre les variations aléatoires de cette résistance au cours du déplacement sont une source de bruit: c'est l'un des inconvénients des potentiomètres à piste conductrice mais il n'est apparent que si le courant dérivé par le curseur est relativement important (utilisation du potentiomètre en rhéostat).

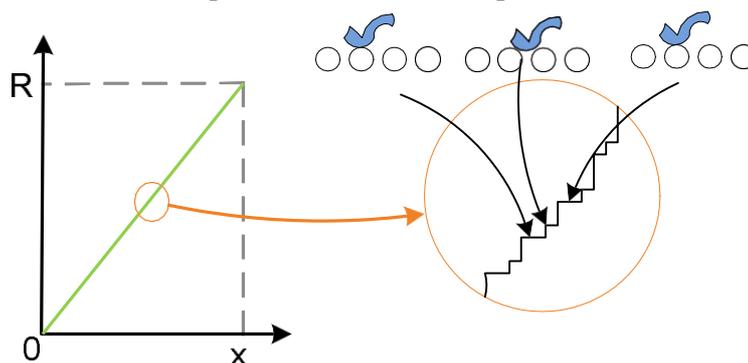


Fig.4.3 Résolution d'un potentiomètre a fils bobinés

Avantage

Potentiomètres à fils bobinés (Coil pot.)

Capteur très économique et simple;

Course relativement étendue;

Le problème majeur est celui de l'usure;

Un potentiomètre n'est pas étanche;

La vitesse de l'objet est limitée.

Résolution en %: $r(\%) = \frac{100}{NB.de.tours} \%$

Potentiomètres à film conducteur à film conducteur

Plastiques conducteurs -> Résolution infinie

3 - Capteurs de position capacitifs

Variation des paramètres géométrique

L'une des armatures est fixe alors que l'autre peut se déplacer avec le dispositif dont on veut suivre le mouvement

➤ 3.1.1 Condensateur unique

ϵ_0 est la permittivité du vide $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

ϵ_r est la permittivité relative du milieu entre les armatures

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (4.1)$$

S surfaces des armatures en regard (m^2)

d distance entre armatures (m)

C capacité (F)

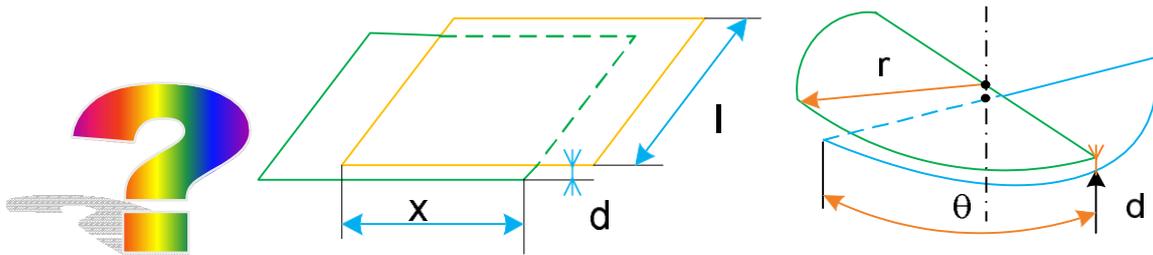


Fig.4.4 Modes de variation d'une capacité unique

La capacité varie linéairement en fonction du déplacement x

$C(x) = k \cdot x$ avec $x = \alpha$ en degrés

$$k = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \sqrt{l} r^2}{360d} \quad (4.2)$$

➤ 3.1.2 Condensateur à double référentiel

L'armature mobile est déplacé entre deux armature fixes constituent deux condensateurs dont les capacités C_1 et C_2 varient en sens contraire en fonction de déplacement x

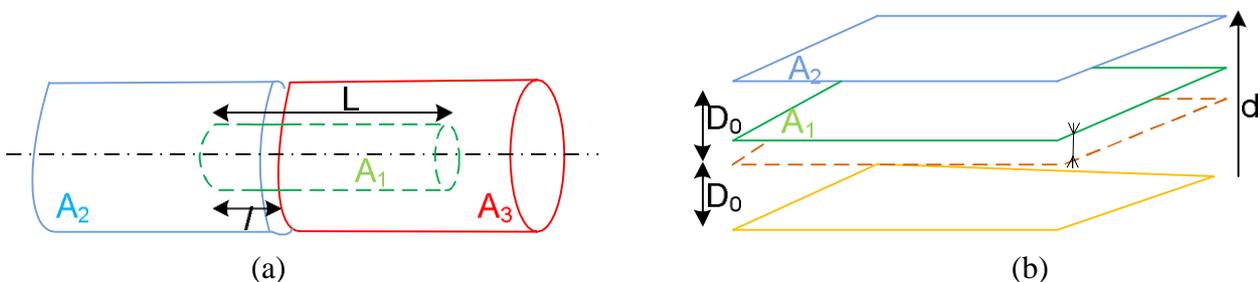


Fig.4.5 Modes de variation d'une capacité doublée

$$C_1 = k(X + x) = kX \left(1 + \frac{x}{X} \right) = C_0 \left(1 + \frac{x}{X} \right)$$

$$C_2 = k(X - x) = kX \left(1 - \frac{x}{X}\right) = C_0 \left(1 - \frac{x}{X}\right)$$

Avec $X=L/2$

L'armature mobile est déplacée perpendiculairement à son plan entre deux armatures fixes

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{D_0 - d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{D_0} \cdot \frac{1}{1 - d/D_0} = C_0 \frac{1}{1 - d/D_0}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{D_0 + d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{D_0} \cdot \frac{1}{1 + d/D_0} = C_0 \frac{1}{1 + d/D_0}$$

Capteur capacitif de proximité

La tête de mesure est formée d'un condensateur cylindrique et d'une enveloppe métallique coaxiale réalisent un condensateur de capacité fixe C_1 lorsqu'une cible métallique s'approche de l'extrémité des condensateurs précédents, ils constituent avec elle deux autres condensateurs.

- l'un ayant pour armatures la surface extrême du conducteur central et la cible distante de x , sa capacité $C(x)$ est simplement liée à x , $C(x)=K/x$, K étant une constante
- l'autre est un condensateur parasite formé par l'enveloppe extérieure et la cible.

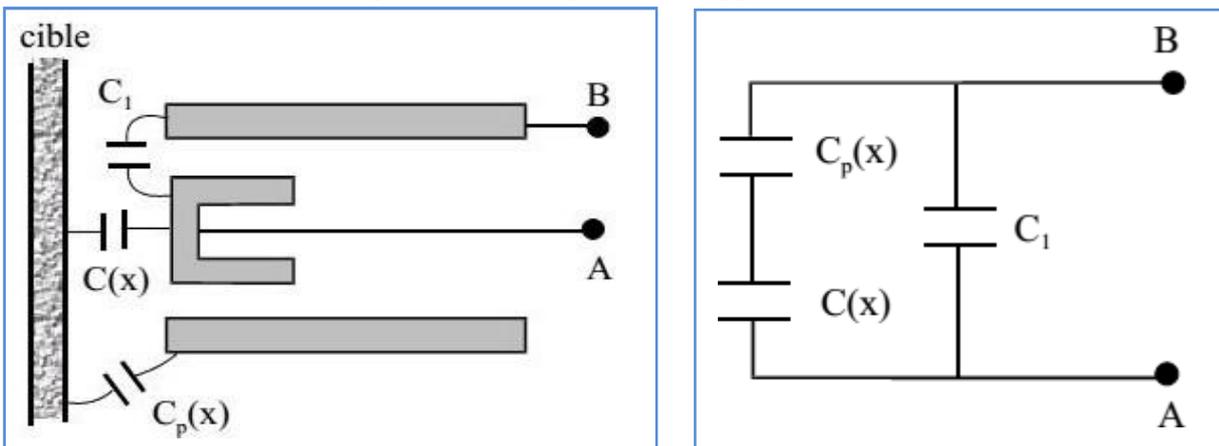


Fig.4.6 Principe d'un capteur de proximité

$$C_m = C_1 + \frac{C(x) \cdot C_p(x)}{C(x) + C_p(x)} \quad (4.7)$$

$$C_m = C_1 + C(x) \quad (4.8)$$

Méthodes de mesure des variations de capacité

Il y a d'abord les méthodes générales de mesure d'impédances (potentiomètre, transformateur de rapport, pont) qui lorsqu'elles sont appliquées au condensateur double différentiel permettent d'obtenir un signal de mesure d'amplitude proportionnelle au déplacement; elles nécessitent évidemment une détection sensible à la phase si l'on veut connaître le sens du déplacement.

Il y a aussi un certain nombre de méthodes spécifiques, applicables à des condensateurs uniques et basées sur les propriétés de l'amplificateur opérationnel, des oscillateurs sinusoïdaux ou de relaxation.

* Pont de Sauty et condensateur différentiel

Mesure de courant de déséquilibre, cette méthode de mesure permet de réduire l'influence des capacités parasites

$$i_m = e_s \frac{j\omega (C_2 - C_3)}{2 + j\omega R(C_2 + C_3)} \quad (4.9)$$

$$V_m = \frac{e_s C_2 - C_3}{2 C_2 + C_3} \quad (4.10)$$

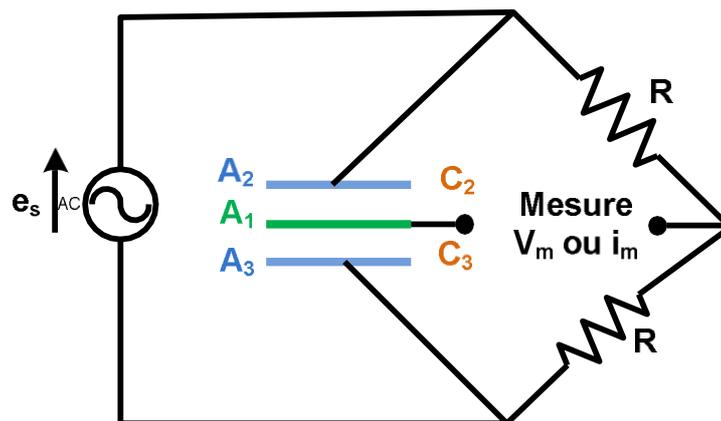


Fig.4.7 Pont de Sauty

** Montage potentiométrique résistance -condensateur

On peut utiliser un montage potentiométrique constitué d'une résistance fixe en série avec le condensateur variable, l'ensemble étant alimenté par une tension connue

Les équations du montage sont

$$V_c + V_R = E_s \text{ et } C = C_0 + C_1 \quad (4.11)$$

$$i = e \quad j\omega(C_2 - C_3) \quad (4.12)$$

$$m = \frac{s}{2 + j\omega R (C_2 + C_3)}$$

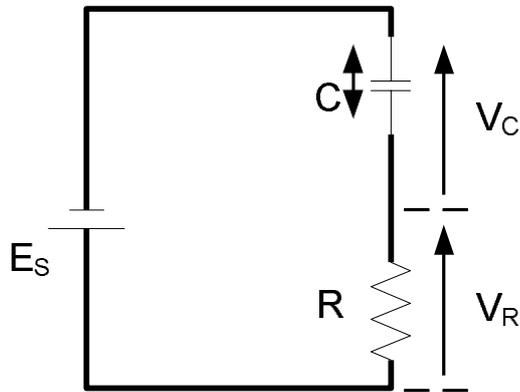


Fig.4.8 Montage potentiométrique

4 - Capteurs de position inductifs

Le déplacement à mesurer est imposé à l'un des éléments du circuit magnétique entraînant une variation du flux du champ magnétique dans un enroulement de mesure.

- ❖ Soit l'élément mobile est un noyau ferromagnétique, en translation ou en rotation, son déplacement peut être mis en évidence.
- ❖ Soit par le changement du couplage entre les enroulements primaire et secondaire d'un transformateur provoquent une variation de tension secondaire.

Capteur inductif à entrefer variable

Lorsque le noyau bobine se déplace à proximité d'un matériau ferromagnétique, le champ magnétique engendré varie, modifiant ainsi le coefficient d'auto induction dans la bobine.

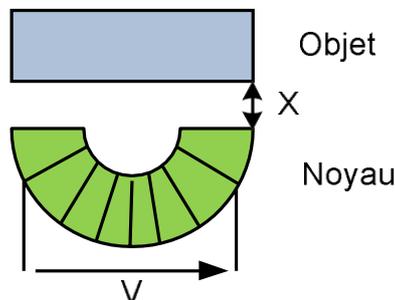


Fig.4.9 Principe capteur inductif

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l_{0e}}$$

Capteurs chaine de mesures

Un déplacement de l'armature entrainant une variation de l'entrefer x , l'inductance prend une nouvelle valeur.

$$L + \Delta L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l_{0e}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2x}{l_{0e}}}$$

Avantages	Inconvénients
mesure sans contact simple	non linéaire mesure de déplacement d'objets ferromagnétiques

Capteur inductif à noyau plongeur

Le déplacement du noyau magnétique lié à l'élément mobile dont on veut mesurer le déplacement entraîne une modification de l'inductance, le coefficient d'auto-induction L du bobinage dépend de l'enfoncement du noyau.

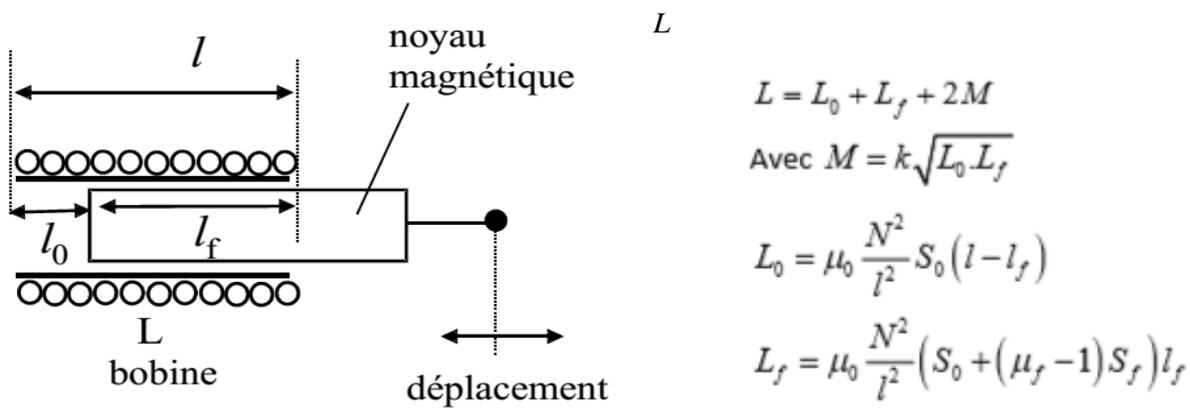


Fig.4.10 Principe capteur inductif a noyau

- Avantages:
 - Etendue de mesure importante
- Inconvénients:
 - Non linéarité de L en fonction de l_f
 - Sensible aux champs magnétiques

Capteur de déplacement à LVDT

Linear Variable Differential Transformator

C'est un transformateur comprenant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires, symétriques par rapport au primaire. Le couplage magnétique entre primaire et secondaires est assuré notamment par le noyau ferromagnétique mobile dont on mesure la position.

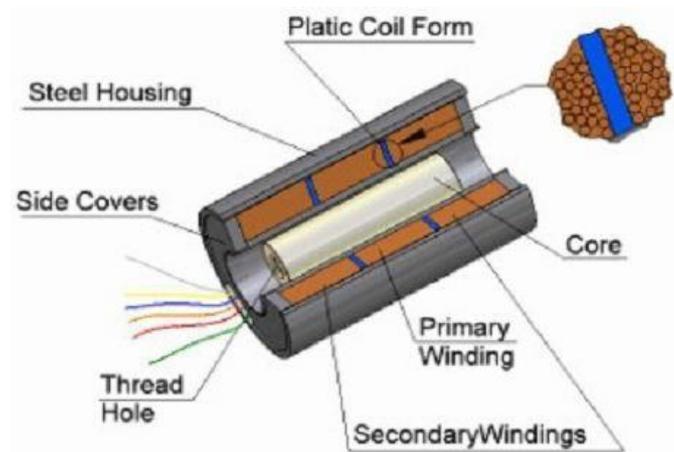


Fig.4.11 Compositions d'un capteur LVDT

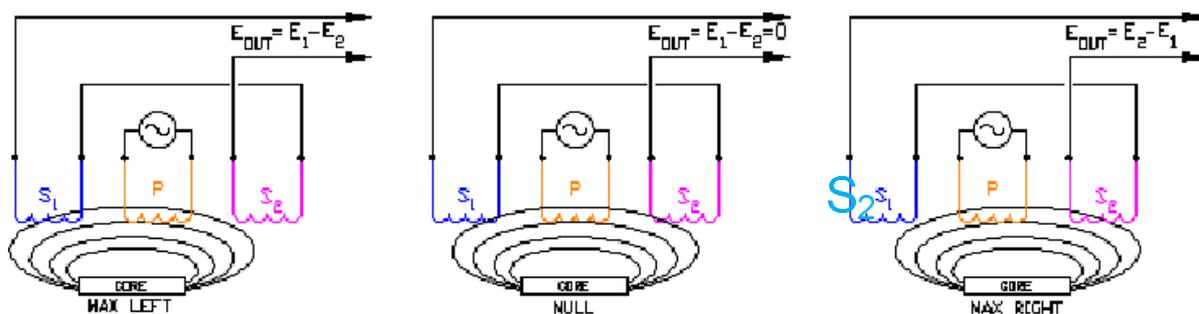


Fig.4.12 Principe capteur inductif LVDT

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

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<ul style="list-style-type: none"> - Ils sont sensibles aux champs magnétiques; - Les LVDT exigent une électronique de conditionnement pour convertir le signal

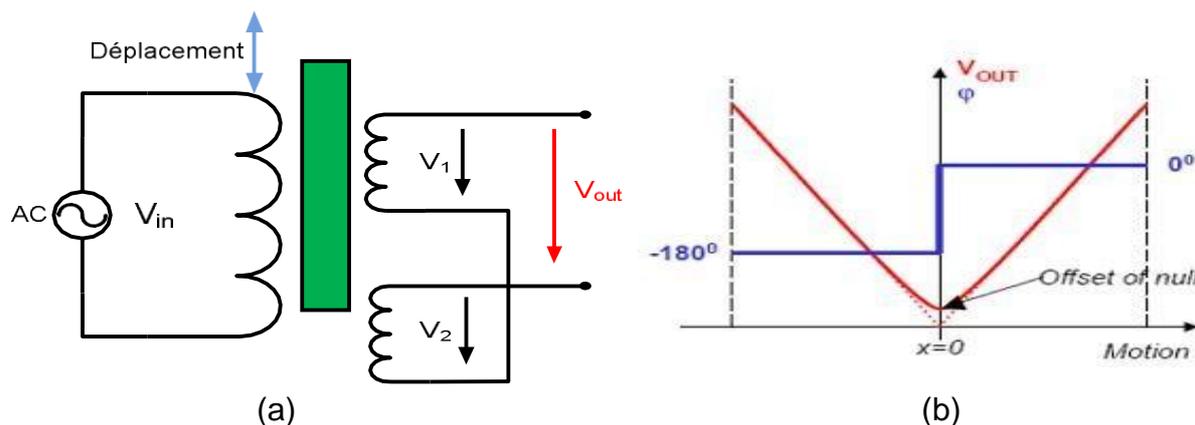


Fig.4.13 Capteur inductif LVDT. (a) Schéma simplifié. (b) La réponse du capteur

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.

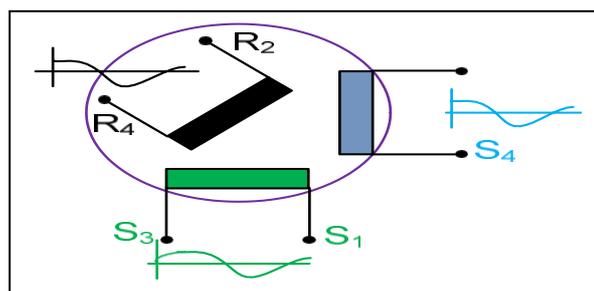


Fig.4.14 Principe d'un capteur Resolver a position

A l'enroulement rotorique est appliquée la tension

$$U_{ref} = U_{ref} \sin(\omega_r t) \quad (4.16)$$

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

$$U_{sin} = U_{ref} * \sin \omega_r t * \sin \theta$$

$$U_{cos} = U_{ref} * \sin \omega_r t * \cos \theta$$

U_{ref} = Amplitude de l'excitation du rotor

ω_r = fréquence de l'excitation du rotor

θ = Angle de la position absolue du rotor

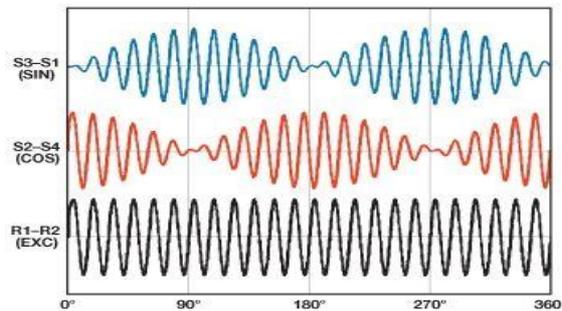


Fig.4.15 Réponse d'un capteur Resolver a position

Dans le cas du resolver sans collecteur, le transformateur rotatif d'alimentation du circuit d'excitation placé au rotor.

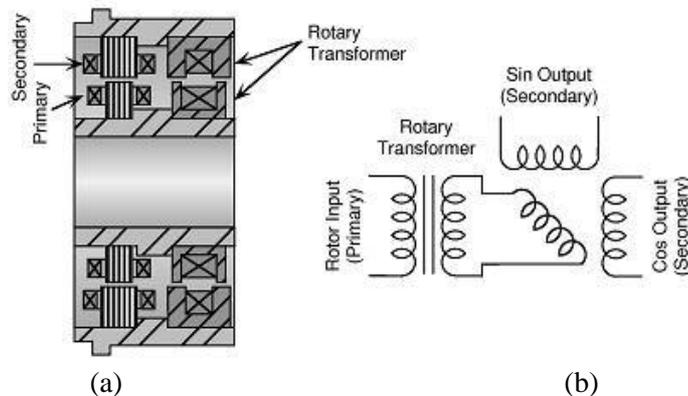


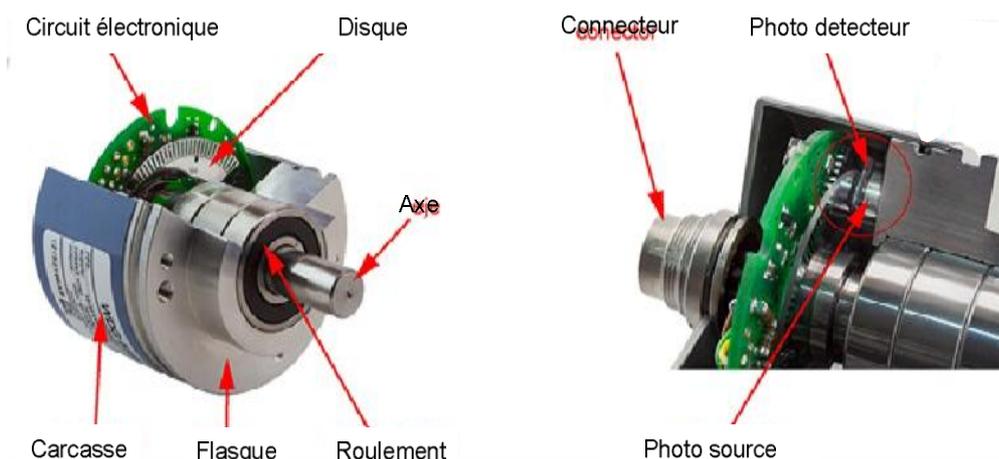
Fig.4.16 Resolver a position sans contacts. (a) Principe d'un capteur. (b) Schéma interne



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.

Les codeurs

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.



Les composants d'un encodeur industriel

Les codeurs absolus

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.

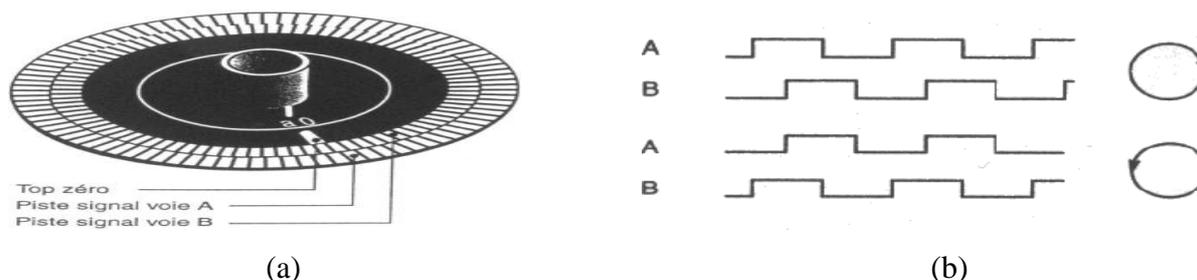
Par exemple : codeur 10bits donne 1024 positions soit une précision de $360/1024=0,35^\circ$

Les codeurs incrémentaux

Ces codeurs fournissent 3 signaux logiques qui caractérisent la rotation angulaire :

- A : signal impulsionnel de n impulsions par tour (ou n caractérisé la précision)
- B : signal impulsionnel de n impulsions par tour déphasé de 90° par rapport à A
- top (ou z) : signal actif une fois par tour lors du passage par le 0° . Ce signal duré $1/4$ de période du signal A

Le déphasage entre A et B permet de déterminer le sens de rotation. Dans un sens, lors du front montant de A, B est à "0", dans l'autre sens pendant le front montant de A, B est à "1".



Codeur de position. (a) Disque d'un codeur. (b) Réponse du capteur.

Exemple d'application

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.

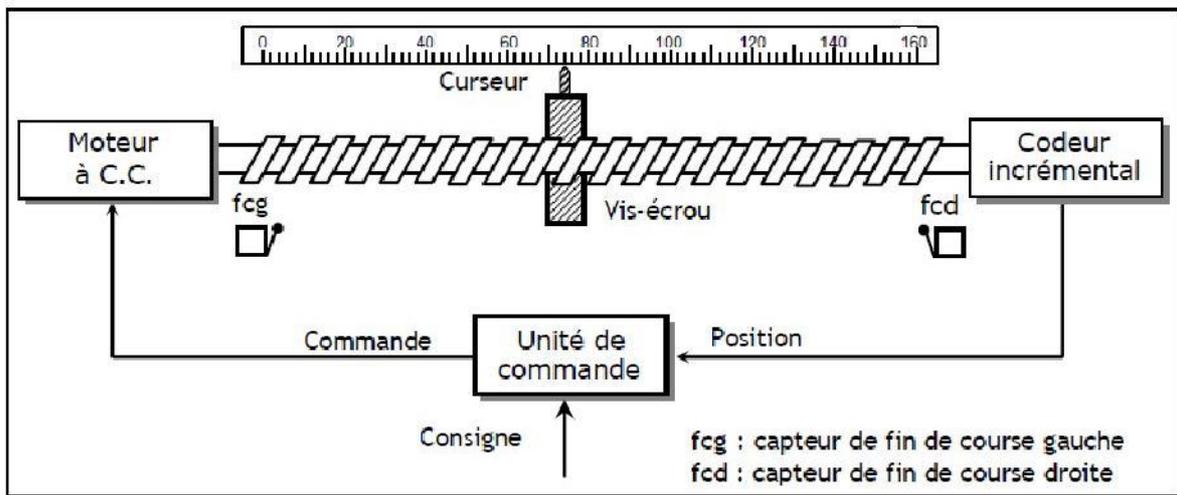


Fig.4.20 Exemple d'application d'un codeur.

V- LA SONDE DE HALL (MESURE DE COURANT)

1. Mesure de Courant

Dans la pratique, la mesure de courant est très largement utilisée. Le but de ce chapitre est d'étudier les principales méthodes utilisées en fonction des exigences imposées par l'environnement, principalement

- .Niveau de courant à mesurer
- .Précision, résolution, stabilité
- .Avec ou sans séparation galvanique
- .Réponse en fréquence (AC/DC)

Dans le choix de l'instrumentation de mesure, les coûts du matériel et de son utilisation sont de première importance. Il est donc nécessaire d'optimiser le design de manière à répondre aux maximums des exigences du cahier des charges.

Les techniques de mesure couramment

- 1/ Shunt de mesure
- 2/ Transformateur de courant
- 3/ .Capteur de courant basé sur la mesure directe d'induction
- 4/ .Transducteur de courant sans circuit magnétique (bobine de Rogowski)
- 5/ .Capteur de courant à effet Hall
- 6/ .Capteur à champ moyen nul de type Fluxgate

2. Shunt de Mesure

La méthode la plus simple mais sans séparation galvanique, consiste à mesurer la tension aux bornes d'une résistance pour déterminer le courant la traversant. Cette méthode est peu onéreuse et assure une bonne précision en basse fréquence.

La tension aux bornes d'un shunt donne, par une mesure indirecte le courant traversant l'élément de mesure.

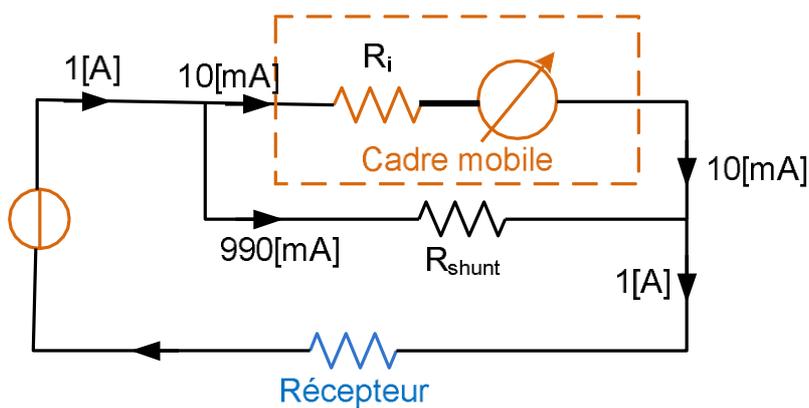


Fig.5.1 Mesure du courant par shunt

Deux cas sont à distinguer.

- ✓ Le courant à mesurer est dans un conducteur dont le potentiel est celui de la masse électronique.
- ✓ Le courant à mesurer est dans un conducteur dont le potentiel (mode commun) est quelconque.

La résistance de mesure et le circuit associé doivent présenter une bonne stabilité en température, une bonne précision.

3. Transformateur de Courant

Le transformateur de courant, constitué de deux enroulements liés par un circuit magnétique est la plus simple possibilité de mesurer un courant en assurant une séparation galvanique entre le mesurant et la mesure. Toutefois ce mode de mesure présente des caractéristiques limitant son champ d'application.



Fig.5.2 Transformateur de courant

Pour pouvoir utiliser le transformateur de courant comme système de mesure, il est de première importance de connaître son comportement dynamique. Sans tenir compte des capacités réparties entre spires de chaque enroulement ainsi qu'entre les enroulements et le circuit magnétique.

En pratique, de manière simplifiée, la mesure est réalisée selon les figures suivantes

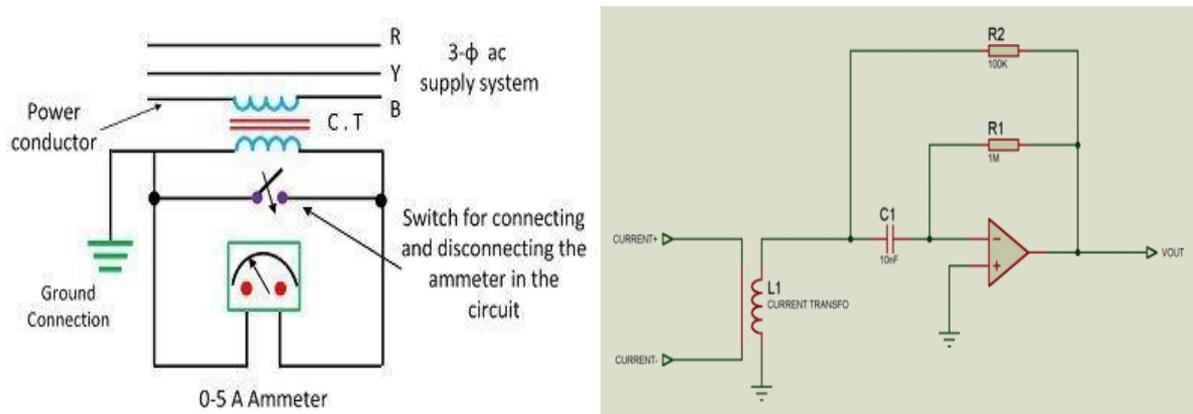


Fig.5.3 Circuits de mesure d'un transformateur de courant

4. Transducteur de Courant . (Bobine de Rogowski)

Pour les mesures de courants alternatifs (AC), c'est à dire sans composante continue (DC) une bobine placée dans l'air et magnétiquement couplée avec le conducteur primaire. Il ne s'agit ni plus ni moins que d'un transformateur à faible couplage. Le bobinage est réalisé de manière à avoir une surface maximum offerte au champ d'induction magnétique produit par la circulation de courant dans le conducteur principal (enroulement primaire) mais une surface aussi petite que possible aux champs parasites externes.

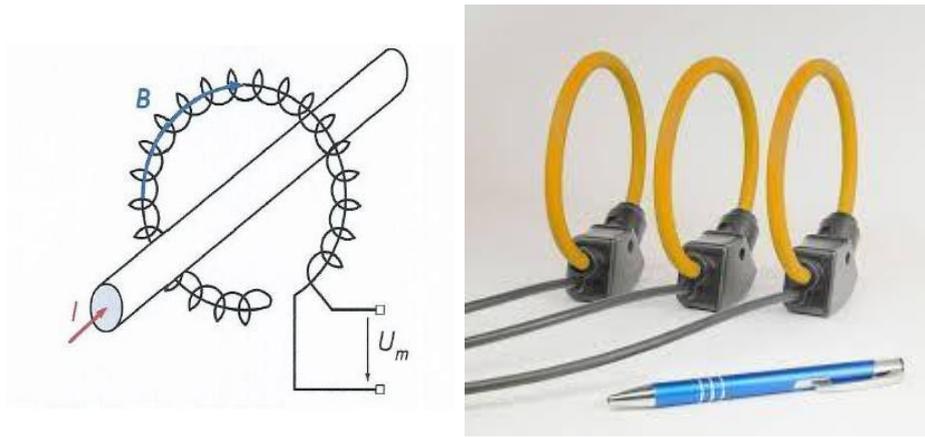


Fig.5.4 Bobine de Rogowski

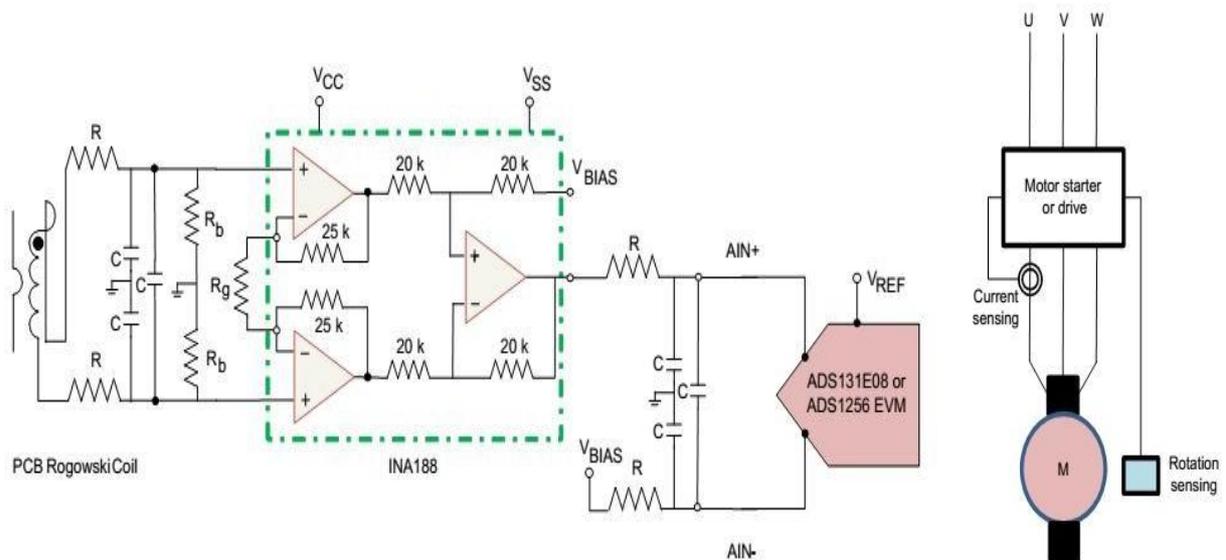


Fig.5.6 Circuit de mesure avec bobine de Rogowski

Principes de la bobine de Rogowski

La tension de mesure correspond à la tension induite due à la variation du flux mutuel entre les enroulements primaire (fil linaire) et secondaire.

$$U_m = \frac{\partial \varphi}{\partial t} = NA \frac{\partial i}{\partial t}$$

sachant que N et A sont le nombre de spires et la constante de Rogowski respectivement.

Le capteur est constitué d'un tube isolant souple sur lequel un fil conducteur est bobiné en spires jointives. Les extrémités du tube sont équipées d'un système de fixation verrouillage pour pouvoir constituer une boucle d'enserrage avec cet ensemble. La sortie de la bobine est suivie d'une électronique de mise en forme et de calibrage du signal.

Ce type de capteur présente des avantages, notamment :

- ✓ .la flexibilité et la maniabilité pour enserrer les conducteurs
- ✓ .Une faible masse du capteur due à l'absence de circuit magnétique et suppression des effets de saturation.
- ✓ .Très faible déphasage permettant une meilleure adaptabilité aux mesures de puissance.

Plusieurs conceptions de bobines de Rogowski fabriquées sur des circuits imprimés ont été analysées, dans le but de réduire les coûts de fabrication, la taille ou la masse. Pour l'instant, peu de produits basés sur ces technologies sont utilisés industriellement.

5. Transducteurs de Courant d'Effet Hall

Ce type de capteur de courant exploite l'effet Hall pour produire une tension qui est l'image exacte (avec un facteur de proportionnalité connu) du courant à mesurer.

On appelle *effet Hall* l'apparition d'un champ électrique transversal et, par suite, d'une différence de potentiel dans un métal ou un semi-conducteur parcouru par un courant électrique lorsqu'on l'introduit dans un champ d'induction magnétique perpendiculaire à la direction du courant.

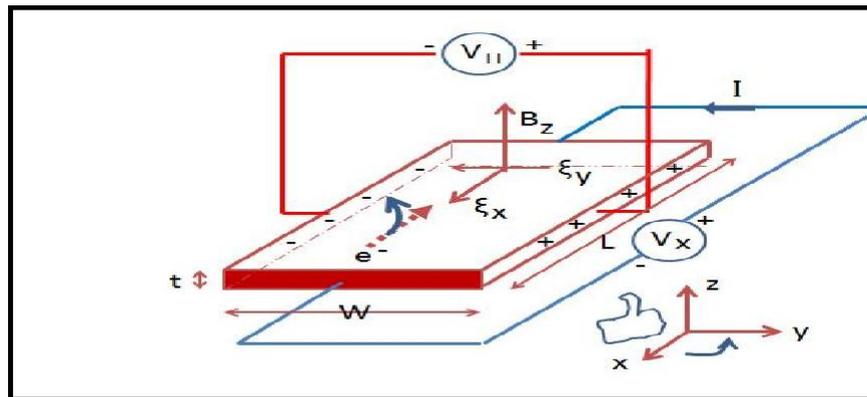


Fig.5.7 Transducteurs d'Effet Hall

Si un courant I traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension V_h , proportionnelle au champ magnétique et au courant I_0 apparaît sur les faces latérales du barreau

$$V_h = K_h * B * I \quad (5.2)$$

Avec K_h : constante de hall, qui dépend du matériau utilisé

La Constante de Hall étant inversement proportionnelle à la densité des porteurs, la tension de Hall est beaucoup plus importante dans les semi-conducteurs que dans les métaux.

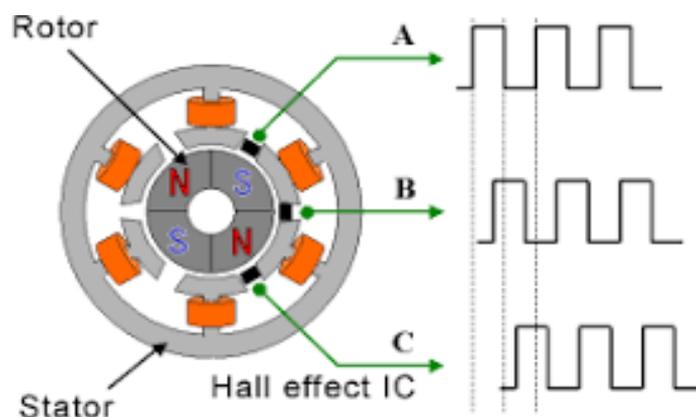


Fig.5.8 Application dans un moteur BLDC

Finalement la tension de Hall dépend du courant I , du champ d'induction magnétique, de la surface et de l'épaisseur du matériau ainsi que du type de matériau.

Il existe plusieurs technologies exploitant l'effet Hall pour la mesure du courant alternatif et continu.

5.1. Pinces ampérométriques pour courant alternatif et continu

Le rôle premier d'une pince ampérométrique est de mesurer de manière non intrusive des intensités dans une très large étendue de mesure. Ces appareils sont toutefois de plus en plus polyvalents et présentent aujourd'hui la plupart des fonctionnalités de base des multimètres numériques portables.

Deux grandes familles existent :

- ✓ .Celles de type transformateur, capables de mesurer uniquement des courants alternatifs.
- ✓ .Celles, dit à effet Hall, aptes à mesurer des courants alternatifs et continus

La construction de base de la mâchoire d'une telle pince est montrée par la figure suivante. Une ou deux cellules de Hall peuvent être utilisées suivant le type de pince.

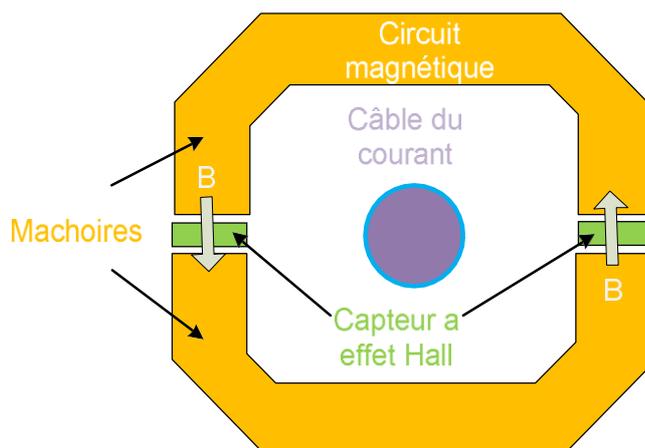


Fig.5.9 Application dans une pince ampérométrique

Les pinces pour courant alternatif et continu des principaux fournisseurs sont développées suivant ce principe avec un circuit électronique pour obtenir une sortie linéaire et un système de compensation pour la température. Les courants continus peuvent être mesurés directement de façon économique (sans shunt de puissance) et les courants alternatifs peuvent être mesurés jusqu'à plusieurs dizaines de kHz pour répondre aux exigences de mesure de signaux complexes ou RMS.

Ces pinces sortent en tension mV (mV DC pour les courants continus et mV AC pour les courants en alternatif).

Les transducteurs à effet Hall en boucle ouverte

Les transducteurs à boucle ouverte exploitent l'effet Hall. La tension du générateur de Hall est générée par le courant de Hall I_c et par l'induction dans l'entrefer B

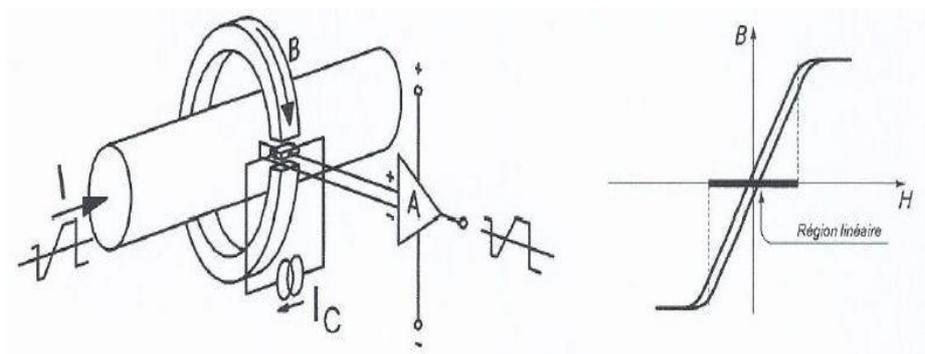


Fig.5.10 Transducteurs à boucle ouverte à effet Hall

Bien adaptés aux applications industrielles, ce type de transducteur vise plutôt des critères économiques.

- ❖ .plage de mesure : 0.....15000A
- ❖ .bande passante : 0.....25kHz
- ❖ .précision typique : +/-1%
- ❖ .linéarité : +/-0,5%
- ❖ .temps de réponse : < 3 μ s à 7 μ s
- ❖ .faible consommation d'énergie
- ❖ .poids et taille réduits

Par contre, ils présentent l'inconvénient d'avoir une bande passante et un temps de réponse modestes et une précision de mesure qui varie beaucoup avec la température. Dans certaines applications spécifiques, les pertes de courant de Foucault à haute fréquence risquent également d'être un facteur restrictif.

Les transducteurs à effet Hall en boucle fermée

Les transducteurs de courant à boucle fermée, dits aussi à flux nul, possèdent un circuit de compensation intégré qui améliore notablement les performances. La cellule Hall des transducteurs en boucle fermée est utilisée comme signal de contre réaction régulant le courant I de la bobine secondaire de manière que le champ magnétique dans l'entrefer soit égal à zéro. L'enroulement secondaire comprend plus de tours que l'enroulement primaire. La figure ci-dessous illustre un transducteur de courant en boucle fermée. Le primaire constitué d'une seule spire ($n_1=1$) est parcouru par un courant I_1 . Le secondaire possède n_2 spires et est parcouru par un courant i_2 .

Un capteur Hall, placé dans l'entrefer du circuit magnétique permet la mesure du flux circulant dans ce dernier.

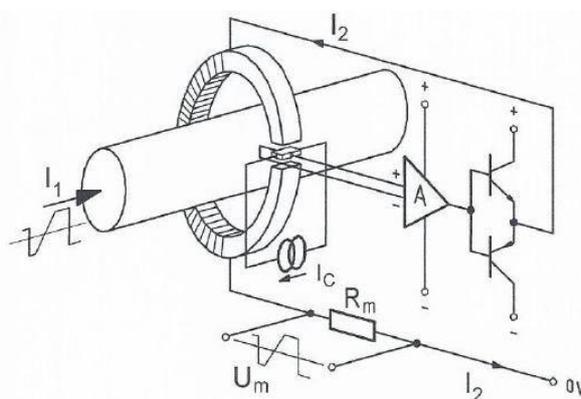


Fig.5.11 Transducteurs à boucle fermée à effet Hall

La tension aux bornes du capteur Hall est amplifiée à l'aide d'un amplificateur différentiel dont la sortie est directement connectée à l'enroulement secondaire qui joue le rôle de circuit de contre réaction. Idéalement on aimerait avoir un flux nul, de manière à avoir un courant secondaire proportionnel au courant primaire. De plus, le point de fonctionnement du circuit magnétique est indépendant du niveau du courant à mesurer ce qui assure une bonne linéarité de la mesure.

Les performances sont bien adaptées aux applications industrielles exigeantes en performances, précision et bande passante.

- ❖ .précision : +/-0,5%
- ❖ .linéarité : +/-0,1%
- ❖ .temps de réponse : <1 μ s
- ❖ .bande passante : 0 à 20kHz

Les transducteurs à effet Hall en boucle fermée sont capables de mesurer des formes d'onde de courants continus, alternatifs et complexes tout en assurant une isolation galvanique. Ils se distinguent par d'excellentes précisions et linéarité, une faible dérive en température, un temps de réponse rapide, aucune perte d'insertion dans le circuit primaire et une sortie de courant très résistante aux interférences électromagnétiques.

6. Capteurs de Courant Fluxgate

Les transducteurs de courant de ce type sont des capteurs à large bande passante utilisés pour des applications particulières nécessitant une très grande précision associée à une excellente résolution.

Le principe de fonctionnement d'un transducteur standard intégrant la technologie Fluxgate est similaire à celle d'un transducteur de courant à sonde de Hall en boucle fermée. La sonde de Hall placée dans l'entrefer du circuit magnétique étant remplacée par un (ou plusieurs) élément magnétique saturable entouré d'un enroulement.

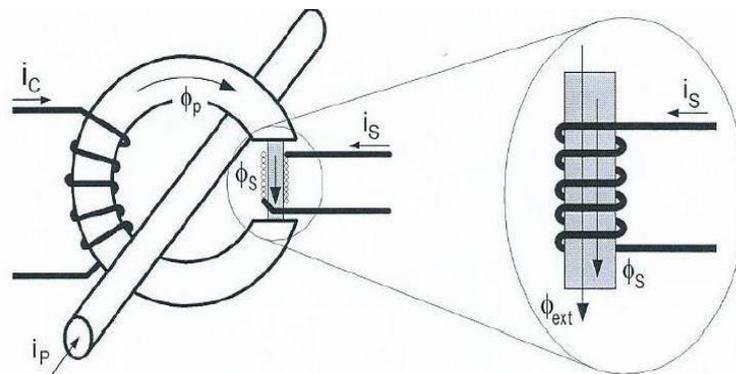


Fig.5.12 Capteur de courant Fluxgate

L'inductance vue aux bornes de l'enroulement de l'élément saturable varie fortement en fonction du courant qui le traverse mais également en fonction du flux produit par une ou plusieurs sources magnétiques extérieures. La caractéristique liant le courant dans l'enroulement au flux totalisé traversant l'élément saturable est ci-dessous illustré.

Il existe plusieurs configurations de transducteurs de capteur de courant de type Fluxgate. Mesure de la composante continue de l'élément saturable I_{st} , analyse spectrale du courant I_{st} et mesure de l'amplitude d'une harmonique remarquable, généralement celle de rangs 2 ou 3. Le paramètre détecté est ensuite utilisé comme signal de retour pour la boucle fermée.

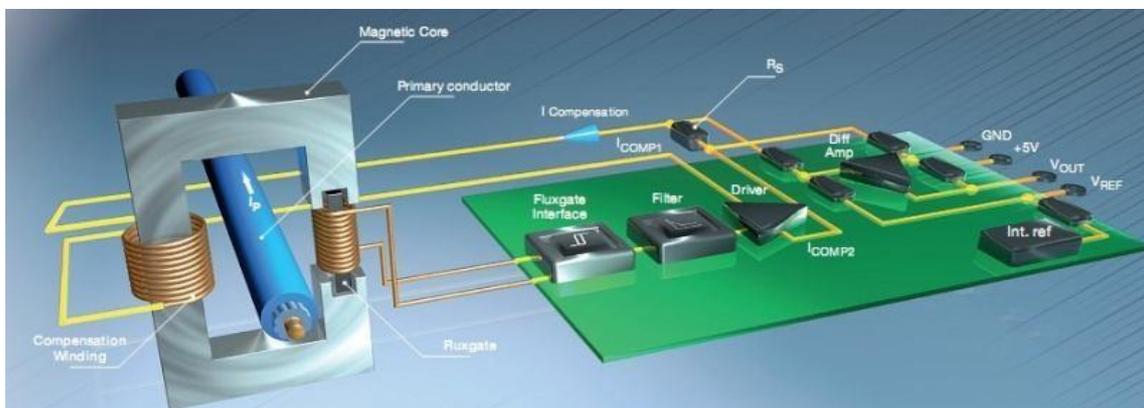


Fig.5.13 Capteur de courant Fluxgate a boucle fermé

VI- LES CAPTEURS DE VITESSE DE ROTATION

1. Introduction

Dans la pratique industrielle, la mesure de vitesse concerne, dans le plus grand nombre de cas, les vitesses de rotation de machines tournantes qu'il s'agit soit de surveiller, pour des raisons de sécurité, soit d'asservir à des conditions de fonctionnement préétablies. Dans le cas de déplacements rectilignes, la mesure de la vitesse peut, le plus souvent, être ramenée à une mesure de vitesse de rotation. Les capteurs tachymétriques sont donc, dans leur quasi généralité, des capteurs de vitesse angulaire.

Les capteurs industriels destinés spécifiquement à la mesure de vitesse sont basés sur la loi de Faraday :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (6.1)$$

Dès lors que le flux à travers un circuit est une fonction de la forme: $\phi(x) = \phi_0.F(x)$

x étant une variable de position linéaire ou angulaire, tout déplacement relatif entre la source du flux (inducteur) et le circuit traversé par le flux (induit) produit dans ce dernier une f.é.m. dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse du déplacement et qui constitue le signal de sortie du capteur ainsi constitué :

$$e = -\phi_0 \frac{dF(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$$

Ce type de tachymètre est désigné comme tachymètre électromagnétique.

Lorsque le mobile étudié a un mouvement périodique, de rotation par exemple, la détermination de sa vitesse peut se ramener à une mesure de fréquence: c'est ainsi qu'un capteur de proximité placé en regard d'une cible dont la distance varie périodiquement délivre un signal dont la fréquence est égale ou multiple, selon la configuration de la cible, de la fréquence du mouvement. De même, un disque entraîné par l'arbre dont on mesure la vitesse et muni de parties alternativement translucides et opaques peut être utilisé pour hacher le faisceau lumineux reçu par un détecteur optique. Ce dernier délivre alors une suite d'impulsions électriques de fréquence proportionnelle à la vitesse. Ce type de tachymètre est dit à impulsions.

2. Tachymetre electromagnetique a vitesse angulaire

Le stator ou inducteur, carcasse ferromagnétique portant deux ou plus généralement 2p pièces polaires canalisant le champ d'induction magnétique produit soit par des bobinages parcourus par un courant (électroaimant) soit par des aimants permanents ;



Fig.6.1 Tachymetre electromagnetique

Le rotor ou induit, cylindre de fer feuilleté tournant entre les pôles du stator, son axe étant confondu avec celui du stator; à sa périphérie sont disposés parallèlement à son axe et à l'intérieur d'encoches,

conducteurs de cuivre ; ces conducteurs, dits actifs, sont reliés deux à deux à leurs extrémités par d'autres conducteurs, dits passifs, placés sensiblement le long de diamètres du rotor ;

le collecteur, cylindre de même axe que le rotor mais de diamètre très inférieur et portant des lames de cuivre isolées entre elles et reliées chacune à un conducteur actif, les deux balais, reliés aux bornes de la génératrice et s'appuyant sur le collecteur, en contact avec deux lames diamétralement opposées, les balais sont placés le long de la ligne neutre, perpendiculairement à la direction moyenne de l'induction, de façon à recueillir la f.é.m. maximale.

La f.é.m. délivrée a pour valeur :

$$E = \frac{\omega}{2\pi} \frac{p}{a} . n . \phi_0$$

3. Réaction d'induit

La f.é.m. dont est le siège l'induit provoque, lorsqu'il est relié à un circuit extérieur, la circulation d'un courant I qui parcourt en sens inverse les conducteurs actifs situés de part et d'autre de la ligne neutre.

En associant deux à deux les conducteurs symétriques par rapport à la ligne neutre on constate qu'ils créent une induction perpendiculaire à la ligne des pôles et proportionnelle à I : cette induction transversal est dite de réaction d'induit.

La réaction d'induit provoque une distorsion des lignes de force de l'induction entraînant un décalage de la ligne neutre dans le sens de mouvement. La f.é.m. étant maximale le long de la ligne neutre, la f.é.m. qui est recueillie par des balais fixes salés sur la ligne neutre primitive ($I=0$) est donc diminuée lorsque circule un courant I et cela d'autant plus que I est plus intense.

4. Génératrices tachy métriques a courant alternatif

Ce type de génératrices a l'intérêt de n'avoir ni collecteur ni balais: il en résulte un accroissement notable de la durée de vie, l'absence de chute de tension fluctuante aux balais, la suppression des parasites de commutation. Par contre, les circuits associés sont généralement plus complexes, la détermination de l'amplitude nécessitant redressement et filtrage de la tension délivrée.

Génératrice synchrone

Il s'agit d'un petit alternateur. Le rotor lié à l'axe dont on mesure la vitesse est constitué d'un aimant ou d'un ensemble d'aimants. Le stator porte le bobinage induit, mono ou polyphasé qui est le siège d'une f.é.m. sinusoïdale dont l'amplitude et la fréquence sont proportionnelles à la vitesse de rotation ω du rotor soit :

$$e = E \sin \Omega t \quad \text{ou } E = k_1 \omega \quad \text{et } \Omega = k_2 \omega$$

k_1 et k_2 étant des caractéristiques de la génératrice. La valeur de ω peut donc être déduite soit de l'amplitude de la f.é.m. soit de sa fréquence.

. Génératrice tachymétrique asynchrone

La réalisation est semblable à celle du moteur asynchrone biphasé. le rotor est formé d'un cylindre métallique mince et amagnétique entraîné à la vitesse angulaire ω , objet de la mesure; sa masse et son inertie sont très faibles; le stator, en tôles magnétiques, porte deux enroulements en quadrature: un enroulement d'excitation auquel est appliquée une tension V_e d'amplitude v_e et de pulsation ω_e :

$$v_e = V_e \cos \omega_e t \quad (6.5)$$

Un enroulement de mesure, siège d'une f.é.m. induite qui constitue le signal tachymétrique e_m car son amplitude est proportionnelle à ω : $e_m = E_m \cos(\omega_e t + \varphi) = k \omega V_e \cos(\omega_e t + \varphi)$

Où k est une constante pour une installation donnée.

Le déphasage φ Varie de quelques degrés d'angle dans la plage de vitesse de la génératrice mais subit une discontinuité égale à π quand la rotation change de sens. A vitesse nulle, il apparaît une faible tension résiduelle aux bornes de l'enroulement de mesure : elle est due aux imperfections de réalisation: asymétrie du rotor, hétérogénéité du circuit magnétique, quadrature imparfaite des enroulements.

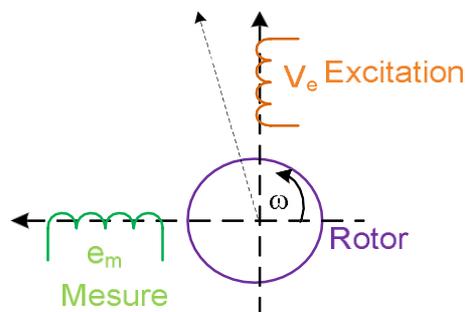


Fig.6.2 Génératrice tachymétrique asynchrone

4.3 Tachymètres électromagnétiques de vitesse linéaire

Lorsque le déplacement de la pièce étudiée est important, supérieur au mètre, la mesure de sa vitesse doit être ramenée à une mesure de vitesse angulaire soit, par exemple, au moyen d'une roulette, soit en faisant porter la mesure sur une pièce tournante, partie du même dispositif et dont la vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse linéaire de déplacement : c'est ainsi que la vitesse d'une tôle à la sortie d'un laminoir peut être déduite de la vitesse de rotation des rouleaux.

Dans le cas de déplacements de faible amplitude, un capteur de vitesse est réalisable en associant un aimant et une bobine, l'un de ces éléments étant fixe, l'autre étant lié à la pièce en mouvement : leur mouvement relatif induit dans la bobine une f.é.m. proportionnelle à la vitesse. Lorsque la bobine est mobile, elle est déplacée dans le champ d'induction radiale d'un aimant toroïdal; la f.é.m. dont elle est le siège a pour expression:

$$e = 2\mathcal{L}.r.n.B.v$$

Où r et n sont respectivement le rayon des spires et leur nombre,

$l = 2\mathcal{L}.r.n.$ est la longueur du fil de la bobine,

B est la valeur de l'induction,

v est la vitesse de déplacement.

Le déplacement maximum est de quelques mm, la sensibilité est de l'ordre du volt par mètre par seconde et l'écart de linéarité d'environ $\pm 10\%$.

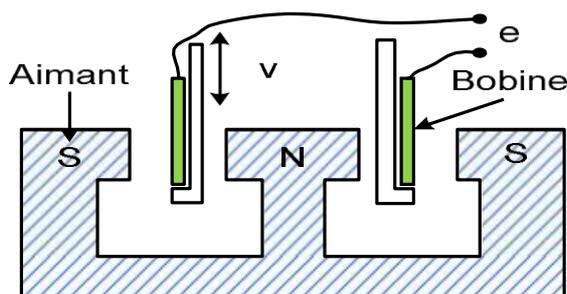


Fig.6.3 Capteur tachymétrique à vitesse linéaire.

5. . Tachymètres de vitesse angulaire à impulsions

Le corps d'épreuve est fréquemment un disque solidaire de l'arbre dont la vitesse de rotation est à déterminer. Ce disque a une configuration périodique, sa surface étant divisée en p secteurs égaux, chacun portant un repère caractéristique : trou, fente, denture. On peut utiliser aussi comme corps d'épreuve toute pièce tournante à structure périodique: pignon, arbre cannelé, roue à aubes, etc...

.Capteurs a reluctance variable

La bobine détectrice a son noyau magnétique soumis au flux d'induction d'un aimant permanent; elle est placée en regard d'un disque (roue polaire) ou d'une pièce tournante ferromagnétique. Le défilement des discontinuités magnétiques (dents, fentes, trous) "portées par le disque ou la pièce en rotation provoque une variation périodique de la réluctance du circuit magnétique de la bobine qui induit dans celle-ci une f.é.m. d'induction de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation.

L'amplitude de cette f.é.m. dépend:

- De la distance bobine-pièce tournante et elle diminue rapidement avec l'augmentation de cette distance qui ne peut en général dépasser quelques mm.
- De la vitesse de rotation, elle est proportionnelle à cette vitesse.

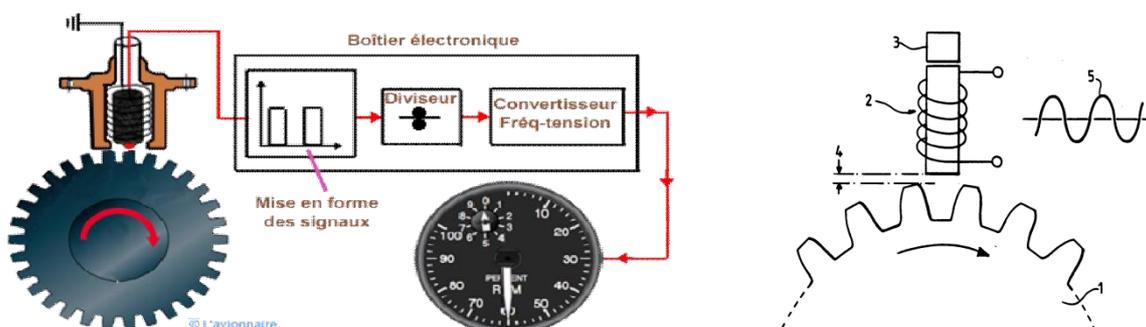


Fig.6.4 Capteur a reluctance variable.

. Tachymètre Optique

Sous sa forme la plus ample, il comprend une source lumineuse et: un détecteur optique : photodiode ou phototransistor.

La pièce en rotation,

- Soit, est munie de repères réfléchissants régulièrement espacés sur une circonférence et vers lesquels est dirigé le faisceau lumineux,
- Soit, est associée a un disque, a secteurs alternativement translucides et opaques, placé entre source et détecteur.

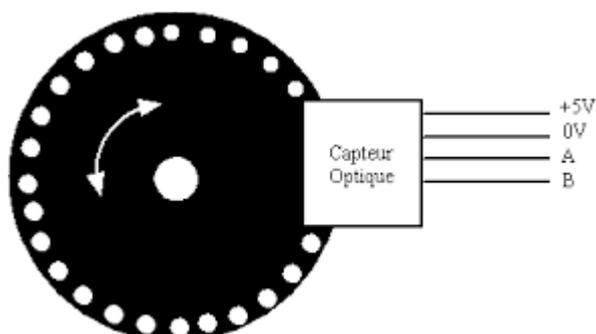


Fig.6.5 Capteur tachymetrique optique.

VII- CAPTEURS DE DEFORMATION, FORCE ET PRESSION

1. Introduction

La force est donnée par la loi fondamentale de la dynamique : $\vec{F} = M \vec{\gamma}$ où M est la masse (kg) soumise à la force F (N) et $\gamma(\text{ms}^{-2})$ est l'accélération résultante. Cette relation, plutôt qu'à la détermination de la force à partir d'une mesure d'accélération, est utilisée à la détermination de l'accélération à partir d'une mesure de force.

La mesure d'une force inconnue est effectuée en réalisant un équilibre entre cette force et une force antagoniste en sorte que, leur résultante et leur moment résultant étant nuls, le dispositif auquel ces forces sont appliquées et qui constitue le dynamomètre demeure au repos.

Un capteur dynamométrique est constitué d'un corps d'épreuve soumis à la force inconnue et subissant de ce fait une déformation qui est à l'origine de la force antagoniste: dans le domaine élastique, il y a proportionnalité entre déformation et force (Loi de Hooke).

La déformation et la force peuvent être mesurées :

- Directement à l'aide de jauges extensométriques ou de capteurs de déplacement,
- Indirectement, si l'une des propriétés électriques du matériau constituant le corps d'épreuve dépend de sa déformation : matériau piézoélectrique ou magnétostrictif.

1 Capteurs piézoélectriques

Définitions

Le phénomène de piézoélectricité consiste en l'apparition d'une polarisation électrique, ou la variation d'une polarisation déjà existante dans certains diélectriques; anisotropes naturels (quartz, tourmaline...) ou artificiels (sulfate de lithium, quartz de synthèse, céramiques traitées...) lorsqu'ils sont déformés sous l'effet d'une force de direction convenable.

L'effet piézoélectrique est réversible: soumis à un champ électrique de direction convenable, un matériau piézoélectrique se déforme; il peut en particulier être excité à sa résonance mécanique, qui est très aiguë. Cette propriété trouve application dans la réalisation de générateurs d'ultrasons, filtres, ainsi que le pilotage d'oscillateurs; il en résulte la possibilité de réaliser un autre type de capteurs piézoélectriques, utilisant en particulier le quartz, dont la résonance se produit à une fréquence qui est sensible à diverses grandeurs physiques (température, pression) susceptibles d'être le mesurande du capteur ainsi constitué.

2 Capteurs à magnétostriction

Les substances ferromagnétiques soumises à un champ magnétique subissent une modification de nature soit géométrique (variation de dimensions avec ou sans variation de volume, torsion, flexion) soit mécanique (variation du module d'Young). Ces effets magnétostrictifs directs sont mis en œuvre dans la réalisation de transducteurs ultrasonores, où l'élément ferromagnétique fonctionne généralement à la résonance mécanique.

Réciproquement, toute contrainte créée par exemple sous l'effet d'une force à mesurer, modifie la courbe d'aimantation et l'on peut exploiter la variation de la perméabilité ou de l'induction rémanente pour connaître la force.

Capteur à variation de perméabilité

La variation de la perméabilité μ sous l'influence d'une contrainte est traduite par son effet sur l'inductance d'une bobine ou le couplage entre deux enroulements.

Capteur à variation d'inductance

Il est constitué d'une bobine dont le noyau est déformé par la force à mesurer (figure 7.1). La variation de la perméabilité moyenne du noyau donc de sa réluctance R , détermine une variation ΔL de l'inductance L de la bobine; les variations relatives de L , R , ou " μ " sont proportionnelles à la contrainte σ , donc à la force F à mesurer :

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = - \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} = k \sigma$$

Le circuit magnétique est feuilleté afin de limiter les pertes par courants de Foucault et ne doit pas comporter d'entrefer qui introduirait dans l'expression de la réluctance

R un terme de valeur importante dont une variation même faible risquerait de masquer la variation de réluctance du noyau lui-même.

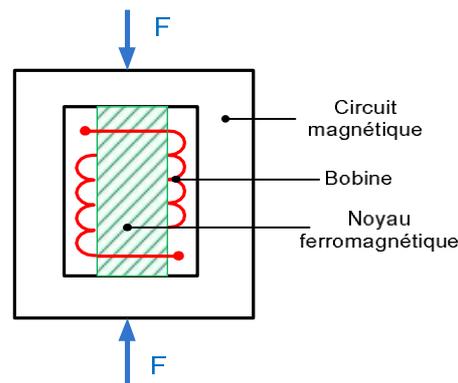


Fig.7.1 Capteur magnétostrictif à variation d'inductance.

Sensibilité

Elle dépend évidemment du matériau du noyau et ne peut être connue de façon précise que par étalonnage. Ordre de grandeur du coefficient k : $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ (Alliages fer-nickel). En outre la sensibilité est influencée par divers paramètres qui agissent sur la perméabilité :

- 1- température: l'agitation thermique contribue à détériorer l'alignement relatif des moments magnétiques et diminue la perméabilité de quelques 0,1 %/°C;
- 2- fréquence du courant d'excitation: la perméabilité diminue quand la fréquence augmente;
- 3- amplitude du courant d'excitation: la valeur la plus favorable est celle qui donne la plus forte perméabilité moyenne, les variations d'amplitude du courant ayant alors peu d'influence.

Etendue de mesure

Ordre de grandeur des contraintes maximales admissibles: pour le nickel pur : $20 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-2}$ et pour le permalloy 68 : $80 \cdot 10^6 \text{ N.m}^{-2}$

Précision

Erreur de précision (toutes causes confondues) : 2 à 5 % de l'étendue de mesure. Les effets des diverses grandeurs d'influence sont minimisés si l'on compare les inductances de deux bobines dont l'une, non soumise au mesurande, sert de référence.

Capteur à variation de couplage

Il est constitué d'un bloc ferromagnétique feuilleté, ayant quatre ouvertures disposées en carré, et à travers lesquelles sont bobinés deux enroulements qui constituent le primaire et le secondaire d'un transformateur (figure 7.2a); leur disposition à angle droit supprime tout couplage entre eux lorsque la

perméabilité du milieu est isotrope (figure 7.2b). Ces enroulements sont disposés à 45° de l'axe primaire du capteur (axe selon lequel doit être appliqué la force).

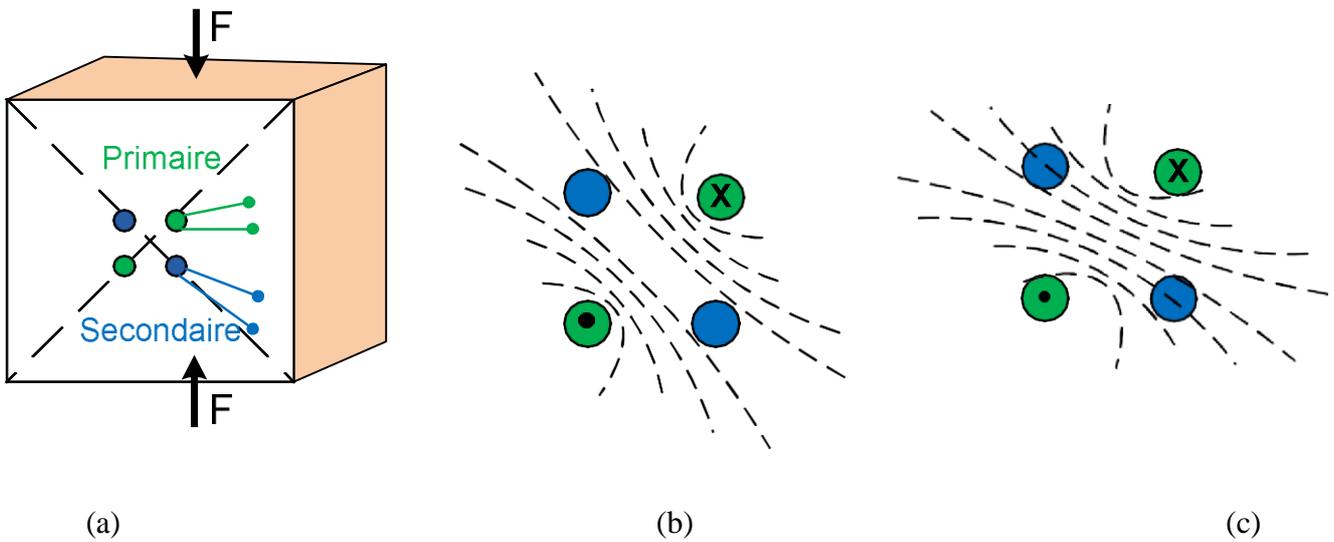


Fig. 7.2 Capteur magnétostrictif à variation de couplage: a) structure; b) et c) allure de: lignes d'induction dans le capteur au repos (b) ou contraint (c).

Lorsqu'une force est appliquée suivant cet axe, il en résulte, dans le cas par exemple du permalloy, une diminution de la perméabilité dans la direction de la force de compression et une augmentation dans la direction transversale. La symétrie de: lignes d'induction s'en trouve altérée (figure 7.2c) de sorte qu'un signal est induit par le primaire dans le secondaire, d'amplitude proportionnelle à la force à mesurer; la relation de phase entre signaux primaire et secondaire permet de connaître le signe de la force appliquée.

3. Capteurs à jauges d'extensométrie

Le mesurande primaire (force) agit sur un corps d'épreuve sollicité en traction-compression, flexion ou cisaillement. La déformation qui en résulte (mesurande secondaire) est traduite électriquement au moyen de jauges collées sur le corps d'épreuve et montée: dans un pont de Wheatstone.

La qualité métrologique du capteur dépend étroitement des caractéristiques des trois éléments: corps d'épreuve, jauge et colle, et elles sont limitées par leur hystérésis et leur usage.

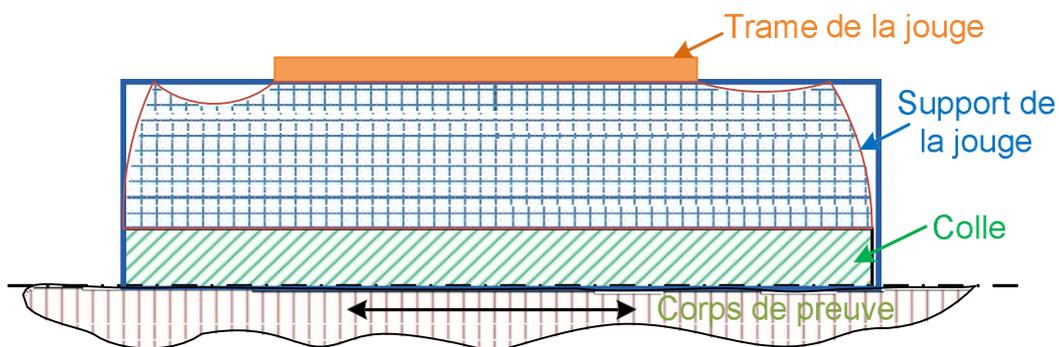


Fig. 7.3 Relaxation de la jauge sur le corps d'épreuve étiré

4. Capteurs de force par mesure de déplacement

La force imposée à un corps d'épreuve une variation de dimension Δl , mesurable à l'aide d'un capteur de déplacement; v_m étant le signal de sortie, le rapport de transfert s'explique:

$$\frac{\Delta l}{F} = \frac{v_m}{\Delta l} \cdot \frac{\Delta l}{F}$$

$\frac{v_m}{\Delta l}$ est le rapport de transfert du capteur de déplacement

$\frac{\Delta l}{F}$

$\frac{\Delta l}{F}$ Inverse la raideur, est la souplesse du corps d'épreuve.

5. . Capteurs de couple

Le couple désigne un système de deux forces colinéaires, de directions opposées et de même intensité. Il est caractérisé par son moment, qui est égal au produit de l'intensité de l'une des forces par la distance qui sépare les deux forces. Le moment s'exprime donc en newtonmètre (N. m).

La mesure de couple, fréquente sur des pièces en rotation pose problème pour le transfert de l'information quand le capteur est mobile. Chaque fois que cela est possible, on mesure donc non pas le couple moteur sur un organe mobile, mais le couple de réaction s'exerçant sur une partie fixe de la machine.

La nécessité fréquente de mesurer les couples sur des organes en rotation pose le problème des liaisons électriques entre capteur mobile et chaîne de mesure fixe. Les liaisons peuvent être assurées avec ou sans contact.

. Liaisons sans contact .

La transmission électrique est dans ce cas soit capacitive: condensateur tournant, soit inductive : transformateur rotatif et ne concerne dès lors que des: signaux alternatifs :

Il n'y a plus dans ce cas de frottement susceptible de limiter la durée de vie et la vitesse de rotation. Tout couplage parasite doit être évité entre la liaison d'excitation du capteur (lorsqu'il est passif) et celle recueillant le signal de mesure. Cependant lorsque l'excitation et signal de mesure peuvent être séparés a posteriori.

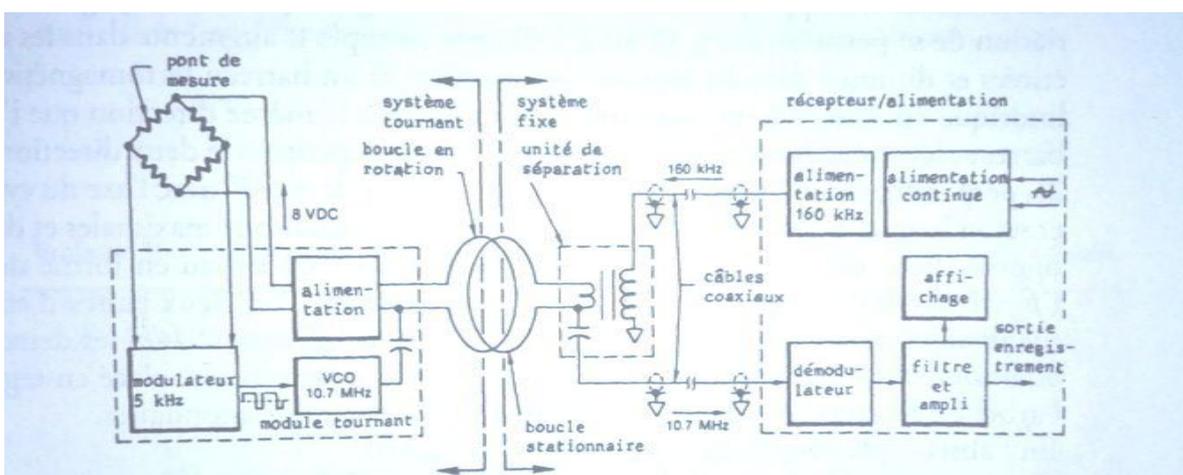


Fig. 7.4. Exemple de dispositif pour la mesure sans contact d'un couple sur un arbre en rotation (Acurex).

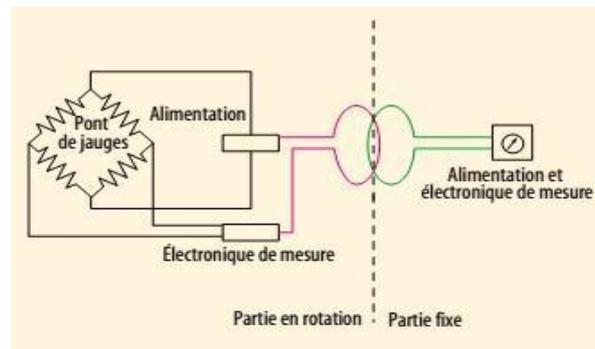


Fig. 7.5. Schéma de principe

Les couple mètres à transformateurs tournants sont composés de deux bobines: l'une est solidaire du corps d'épreuve (inséré dans l'arbre de transmission dont on souhaite mesurer le couple), l'autre, fixe, est reliée à l'électronique de mesure. Lorsque la bobine fixe est traversée par un courant alternatif, elle induit un courant dans la bobine placée sur l'arbre. (C'est l'effet transformateur). Ce courant permet d'alimenter le pont de jauges. Suivant le même principe, la bobine mobile transmet à la bobine fixe le signal provenant des jauges.

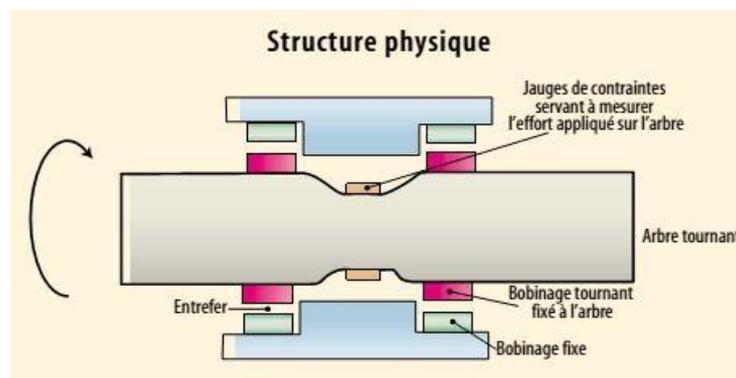


Fig. 7.6. Structure physique

2 . Liaisons sans contact (magnétisation de l'arbre)

L'arbre doit pour cela être ferromagnétique : une fois magnétisé, il conserve son aimantation même en l'absence d'un champ magnétique extérieur. Cette aimantation varie en fonction des contraintes mécaniques qu'on lui applique. En mesurant les variations du champ magnétique, on peut alors accéder au couple subi par l'arbre... « Ce principe permet d'obtenir des capteurs peu encombrants, plus simples à utiliser et moins coûteux que les capteurs à jauges de contraintes » (Fast Technology).

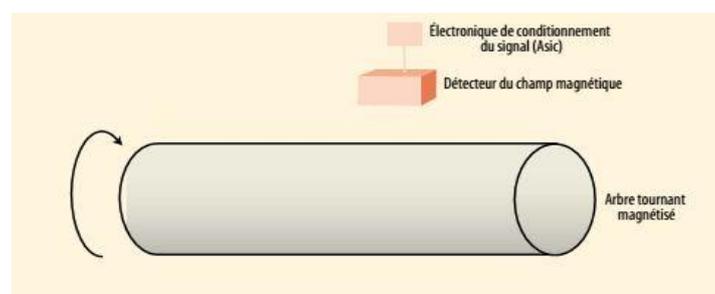


Fig. 7.7. Couple mètres basés sur une magnétisation de l'arbre

Le couple est mesuré dans une gamme comprise entre 2,5 et 1 000 N. m, jusqu'à une vitesse de rotation de 100 000 t/min. En revanche, la résolution (de l'ordre de 0,8 % de l'étendue de mesure) est plus faible

que celle que l'on obtient avec des jauges de contraintes (près de 0,1 %). Il faut bien sûr que l'arbre soit ferromagnétique. D'autre part, cette technique nécessite de prendre quelques précautions. En présence d'un faible champ extérieur contraire à leur aimantation, les matériaux ferromagnétiques peuvent perdre facilement leur aimantation. Dans ce cas, impossible de mesurer les contraintes qui leur sont appliquées. De même, lorsque la température atteint une certaine limite (appelée point de Curie), le matériau perd ses propriétés ferromagnétiques.

3 . Couplemetre a transformateur différentiel

L'arbre qu'intègre le couple mètre à une structure particulière. Il est rattaché de part et d'autre à deux cloches en vis-à-vis. Elles sont chacune dotées de deux fenêtres rectangulaires. Au centre du capteur, ces deux cylindres se chevauchent et deux bobines fixes (traversées par un courant alternatif) les encerclent, à quelques millimètres de distance. Lorsque l'arbre est au repos, les fenêtres des deux cylindres ne coïncident pas aucun champ magnétique ne peut les traverser. Lorsque l'arbre transmet une certaine puissance, les deux cylindres traduisent la déformation qu'il subit en tournant en sens contraire l'un de l'autre, de telle sorte que les fenêtres commencent à se chevaucher. Un flux magnétique peut alors les traverser. En le mesurant, on accède à la déformation angulaire des cylindres, donc au couple appliqué à l'arbre.

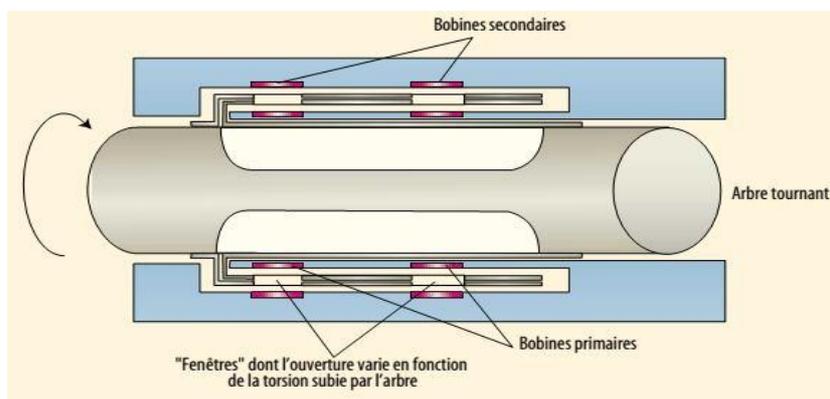


Fig. 7.8. Couple mètre à transformateur différentiel

4 . Couplemetre a jauges

Les couple mètres associés à des systèmes de télémesure radio se composent de jauges de contraintes et d'une électronique montées sur l'arbre en rotation. L'information provenant du capteur est transmise par ondes hertziennes (modulées en amplitude, en fréquence ou en phase) vers un récepteur de télémesure situé à proximité de l'arbre.

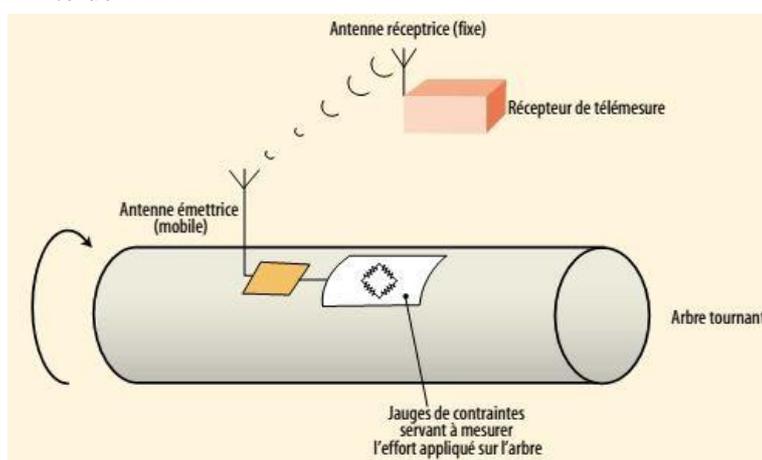


Fig. 7.9. Couple mètre a jauge avec système de télémesure

Ces deux techniques offrent une précision importante (grâce à la sensibilité des jauges de contraintes) mais leur mise en œuvre peut être délicate. Il faut notamment prendre le plus grand soin dans le collage des jauges et de l'électronique associée et ce d'autant plus qu'elles sont soumises à rude épreuve. Il n'est pas rare que des fils électriques se dessoudent à cause d'une trop forte accélération centrifuge, par exemple. Dans le cas des transformateurs tournants, la vitesse de rotation est également limitée. Sans compter les pertes. Quant aux systèmes de télémessure, ils requièrent une certaine expérience dans le choix des antennes et de leur positionnement, ainsi que dans la manière d'alimenter l'émetteur : les piles embarquées sur l'arbre tournant, par exemple, sont relativement simples à utiliser mais elles ne conviennent pas au trop haut.

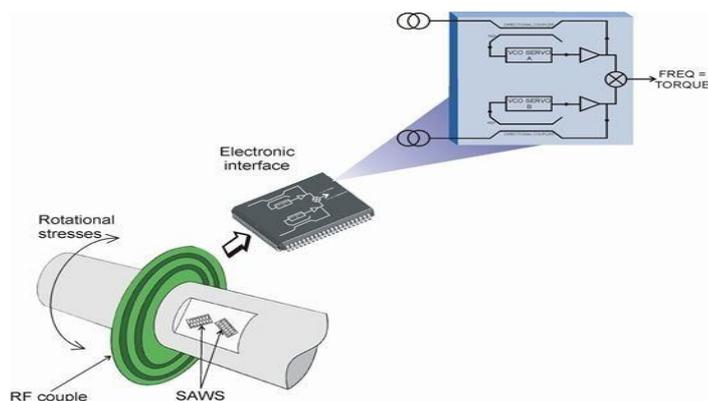


Fig. 7.10. Principe de système télémessure d'un Couple mètre a jauges.

5 . Couplemetre optique

La technologie du couple mètre optiques est basée sur un principe de mesure largement éprouvé et développé selon lequel deux disques avec des réseaux segmentés sont positionnés sur la tige de sorte que les secteurs opaques d'un disque masquent partiellement les secteurs clairs de l'autre. La lumière traverse les secteurs et est détectée par des détecteurs photovoltaïques. L'intensité des faisceaux lumineux, qui est surveillée en permanence, est modulée par le couple appliqué et produit une sortie électrique utilisée pour fournir une indication précise du couple transmis par l'arbre. L'intensité lumineuse est automatiquement contrôlée dans le corps du transducteur par une cellule de contrôle. Les lampes utilisées pour fournir la source de lumière sont sélectionnées pour assurer une longue durée de vie et une grande stabilité.

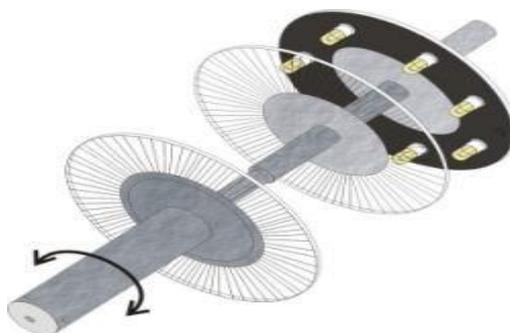


Fig. 7.11. Couple mètre optique.

L'utilisation de cette technique de mesure permet à un transducteur de détecter le couple de manière bidirectionnelle. Une très grande sensibilité à l'échelle réelle peut être obtenue avec des réponses électriques rapides jusqu'à 50 kHz et une faible inertie. Comme la mesure est sans contact, elle est également totalement exempte de balais et de composants électroniques complexes sur l'arbre, qui se retrouvent souvent dans les autres types.

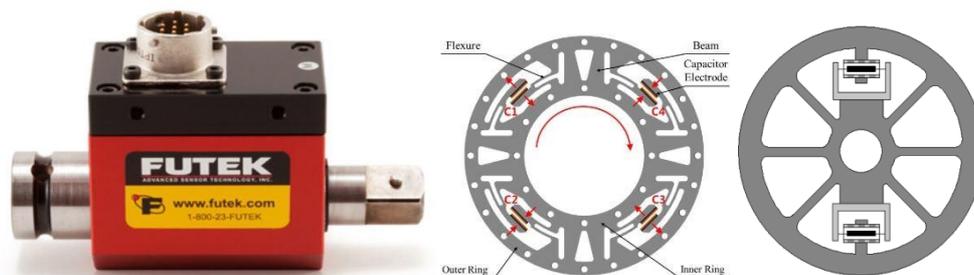


Fig. 7.12. Couple mètre capacitif.

6. Capteurs de pression

Définition de la pression

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

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

Conversion par variation de capacité

La différence de pression entraîne la variation de l'épaisseur entre les conducteurs, d'où une variation de la capacité de la cellule.

Cas des capteurs de pressions 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.

Avantages

- Faible masse ;
- Peu sensible aux accélérations.

Inconvénients

- Sensibilité à la température (sauf montage différentiel) ;
- Sortie haute impédance.

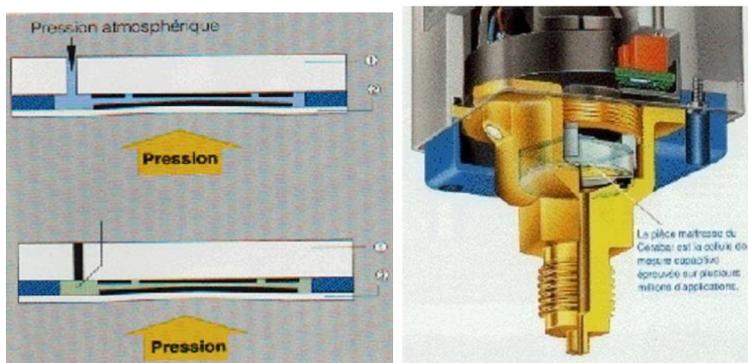


Fig.7.13. Cellule de mesure d'un capteur de pression capacitif

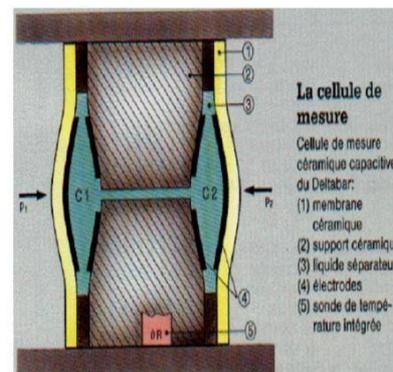


Fig.7.14. Capteur de pression différentielle

Conversion par effet piézoélectrique

Les structures piézoélectriques 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 . Des structures piézoélectriques tubulaires. Elles permettent la mesure de faibles variations de pressions en milieu haute pression ou pour le contrôle l'écoulement.

Avantages :

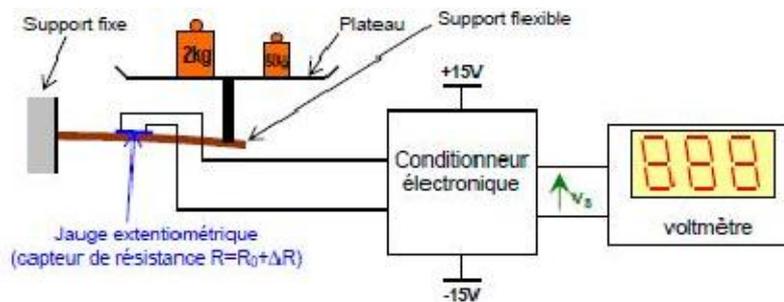
- Excellente réponse en fréquence ;
- Miniaturisation.

Inconvénients :

- sensibilité à la température ;
- nécessite un câble de liaison de faible bruit.

Exemple

La mesure de poids repose sur le principe de déformation d'une jauge de contrainte collée sur le support flexible de pesage:



La jauge est une résistance R qui varie avec la déformation due à la masse m sur le plateau :

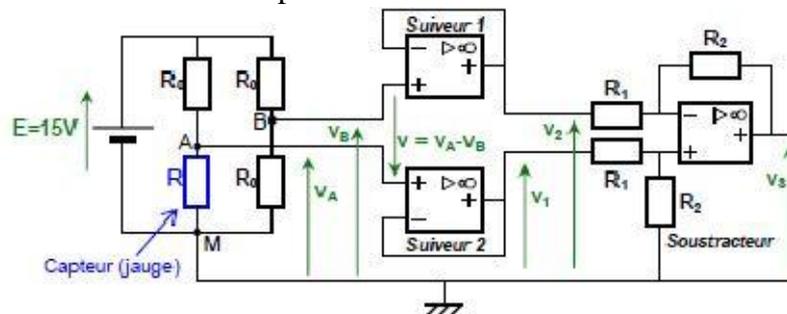
$$R = R_0 + \Delta R \text{ avec } R_0 = 360 \Omega \text{ et}$$

$$(\Delta R / R_0) = K \cdot N \text{ avec } K = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg}^{-1}$$

R_0

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 : $i^+ = i^- = 0A$

⇒ Tension différentielle d'entrée $\varepsilon = v^+ - v^- = 0V$ (ce qui donne : $v^+ = v^-$)

⇒ Tension maximale et minimale en sortie : +15V ou -15V.

1- Etude du pont de jauge

a- Exprimer la tension v_A en fonction de E , R_0 et ΔR .

b- Exprimer la tension v_B en fonction de E .

c- En déduire que v peut se mettre sous la forme:

$$v = E \frac{\Delta R}{4R_0 + 2\Delta R}$$

d- Montrer que l'on peut simplifier l'expression de v pour obtenir

$$v = \frac{E}{4} \frac{K.m}{1 + \frac{K.m}{2}}$$

e- Calculer la valeur de la tension v pour $m=10kg$.

f- On admet qu'avec une masse $m < 15kg$, 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

a- Montrer que $v_1 - v_2 = v$.

b- Expliquer le rôle de ces étages.

3- Etude du montage soustracteur

a- Exprimer v^+ en fonction de R_1 , R_2 et v_1 .

b- Exprimer v^- en fonction de v_2 ; v_S ; R_1 et R_2 .

c- En déduire que $v_S = \frac{R_2}{R_1} (v_1 - v_2)$

d- On donne $R_2 = 10k\Omega$. Calculer la valeur de R_1 pour obtenir $v_S = 10V$ lorsque $m = 10kg$.

Justifier l'intérêt de ce choix.

e- Tracer la caractéristique $v_S = f(m)$. En déduire la masse maximale mesurable.

IX - CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNÉES

1 - Introduction

La Chaîne d'instrumentation est un dispositif qui contient

- Tous les éléments servant à mesurer des grandeurs physiques (capteur)
- Des fonctions de conditionnement, de filtrage, de stockage, d'affichage, d'analyse des données

Qui traite les mesures en vue d'effectuer

- De la surveillance (mesure quotidienne de la température), du diagnostic des tests.
- De la commande d'appareillage (mesure du taux de sucre dans le sang pour commander une pompe à insuline.), on parlera alors de chaîne de régulation.
- De la modélisation de phénomènes.

La connaissance des phénomènes physiques et l'interprétation qu'en fait l'utilisateur sont primordiales.

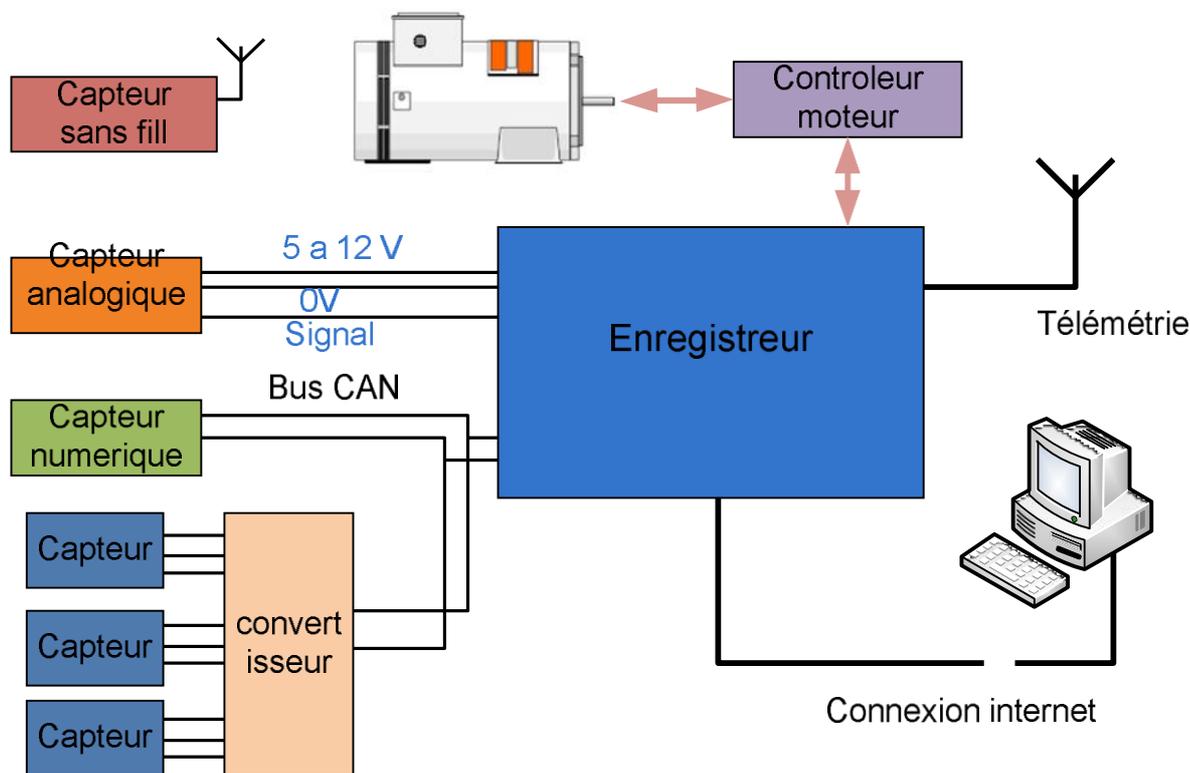


Fig.8.1. Topologie d'une chaîne d'acquisition.

Lorsque la distance devient grande, la liaison parallèle devient techniquement difficile à réaliser à cause de la longueur du câblage et des parasites de transmission ; on utilise alors la liaison série. Par exemple, un API est généralement, programmé avec un PC ; le mode de communication dans cette situation est le mode série. Dans une liaison série, on distingue plusieurs procédés et techniques de transmission ; dans ce qui suit on s'intéresse à la liaison série asynchrone, en particulier avec les normes IEEE 488, RS232 et RS485.

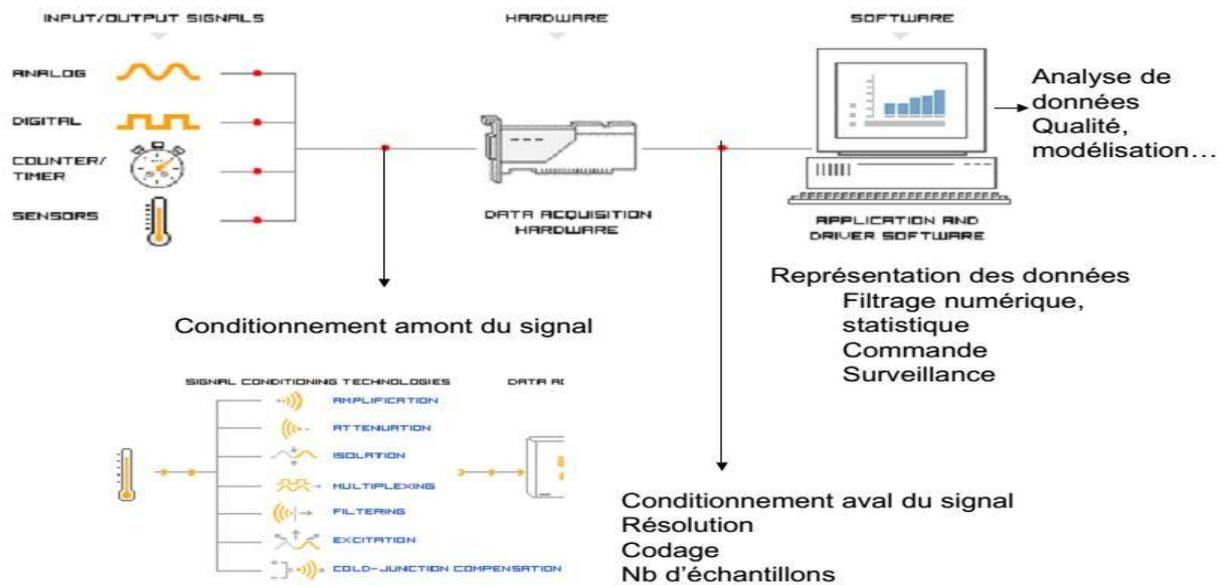


Fig. 8.2. Chaîne d'acquisition par PC.

2. Principe de la liaison série asynchrone

2.1- Format

La liaison série asynchrone est orientée pour une transmission par caractères ; ces derniers sont envoyés individuellement et l'intervalle séparant 2 octets est quelconque. Ce mode asynchrone utilise un format où chaque caractère :

- A une longueur de 5 à 8 bits
- Est encadré par des bits délimiteurs :
 - ✓ 1 bit START au début de chaque caractère.
 - ✓ 1 à 2 bits STOP à la fin de chaque caractère.

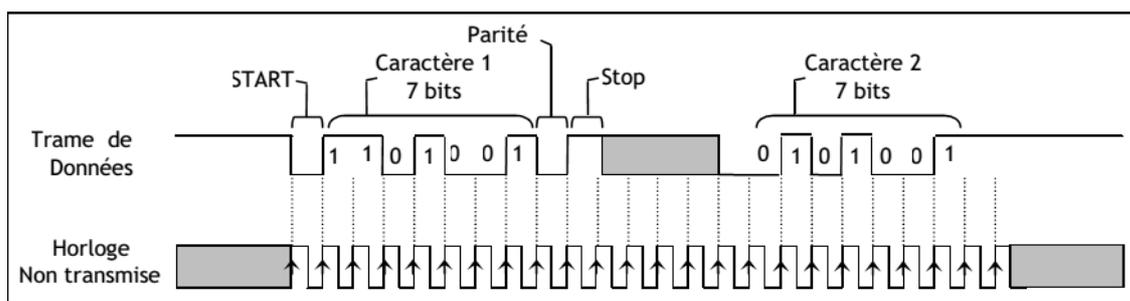


Fig. 8.3. Principe de transfert la donnée en mode série.

- Peut être protégé contre les parasites de transmission, par un bit de parité optionnel (suivant la configuration du système) destiné à la détection d'erreurs ; il est généré à l'émission et testé à la réception. Il existe deux types de parité :
 - ✓ Parité paire : la parité est dite paire si le nombre de bits (donnée + bit parité) au niveau logique 1 est pair.
 - ✓ Parité impaire : la parité est dite impaire pour un nombre impair de bits à 1. L'ensemble {Bit Start, Bits données, Bit parité, Bits Stop} est appelé "trame" (frame). Voici un exemple de trame série asynchrone avec une parité paire.

2.2- Fonctionnement

Le fonctionnement est donc comme suit :

- Au repos, la ligne de transmission se trouve dans l'état logique 1 ;
- Au début de la transmission d'un caractère, on commence par le bit de Start, qui dure une période d'horloge ;
- On enchaîne par les bits du caractère (suivant la configuration du système), en commençant par le LSB ;
- On termine par le bit de stop.
- A la réception de chaque caractère, l'initialisation a lieu par la transition (haut-bas) du bit START qui assure la synchronisation des deux horloges (émetteur et récepteur). Dès la réception du bit Stop, il n'y a plus de synchronisation.

3. Bus d'entrées/sorties

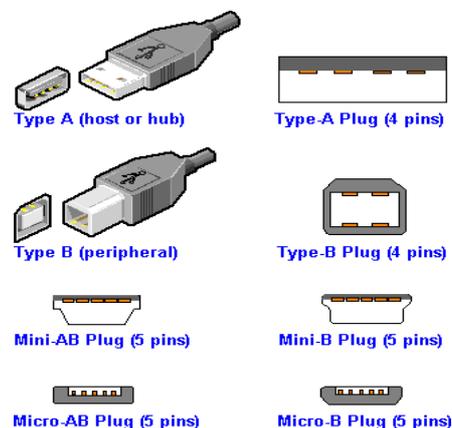
La plupart du temps, les envois sur les bus d'entrées/sorties sont bufférisés et suspensifs pour le programme les émettant. Cela signifie qu'un programme qui envoie des données sur un bus d'entrées/sorties envoie des données dans le buffer, puis se suspend (le processeur peut être utilisé à autre chose) jusqu'à ce qu'il y ait à nouveau de la place dans le buffer, etc., jusqu'à épuisement des données à émettre. Généralement, les entrées/sorties utilisant des bus sont suspensives pour l'émission de données et bloquantes pour la réception, grâce à l'utilisation des interruptions matérielles.

Le nombre des interruptions matérielles est limité sur un système informatisé (par exemple, il y en a 16 sur les PC). Les interruptions sont utilisées par les bus d'entrées/sorties et autres éléments d'entrées/sorties.

Bus série (norme RS-232) : l'un des bus externes (permettant de brancher un élément externe au système informatisé) les plus utilisés encore aujourd'hui pour communiquer avec du matériel d'acquisition/commande « intelligent ». La communication série (transfert bit à bit) est très répandue aussi bien au niveau des microprocesseurs, qui cohabitent le plus souvent avec des puces capables de gérer des entrées/sorties série, qu'au niveau des microcontrôleurs, qui intègrent très souvent ce type de communication. Ce bus est très souvent utilisé avec un protocole bidirectionnel de type ASCII (ce sont des caractères qui sont échangés), permettant au processeur d'envoyer des commandes ou des informations de configuration, et de recevoir des informations de statut ou des données d'acquisition. C'est un bus relativement simple à programmer, car il existe de nombreuses bibliothèques logicielles permettant de tirer parti de ce bus capable de transporter des flots de données jusqu'à 128 000 bits/s.

Bus parallèle : presque obsolète, ce bus externe permet une transmission de 8 bits en parallèle à des débits de 3 Mo/s. Il y a quelques années, c'était un bus très utilisé pour communiquer avec des imprimantes.

Bus USB (Universal Serial Bus) : ce bus externe héritier du bus série permet, dans sa version 1.0, des débits de l'ordre de 1,5 Mo/s et dans sa version 2.0 des débits aux alentours de 60 Mo/s. Dans le monde de la micro-informatique, ce bus a supplanté les bus série et parallèle pour permettre la communication avec des éléments variés qui peuvent être relativement gourmands en débits de données. Il a l'avantage de pouvoir transporter l'alimentation vers le matériel lorsque celui-ci consomme peu d'énergie. Cependant, bien qu'il soit possible qu'il s'impose dans quelques années sur le marché des



éléments temps réel, il n'a pas encore fait de réelle apparition dans ce domaine, et peu de microcontrôleurs intègrent un bus USB ;

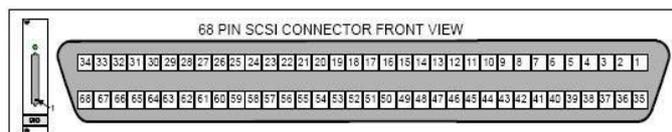
Bus FireWire (norme IEEE 1394) : ce bus série externe concurrence l'USB 2.0 dans sa version a, offrant des débits de l'ordre de 50 Mo/s. Ce bus est très utilisé pour l'acquisition vidéo numérique. Dans sa norme b, offrant des débits de l'ordre de 400 Mo/s, il concurrence le bus SCSI pour le branchement de disques durs/lecteurs DVD ou CD externes. Il est pour l'instant peu présent sur les microcontrôleurs et dans le monde des systèmes temps réel ;



Bus SCSI (Small Computer System Interface) : en perpétuelle amélioration, ce bus externe parallèle fournissant des débits allant de 5 Mo/s (SCSI-1) à 320 Mo/s (Ultra-4-SCSI), permet notamment la connexion d'un ordinateur à des périphériques de stockage externe (disques durs externes, etc.) ;



Connector Pinning

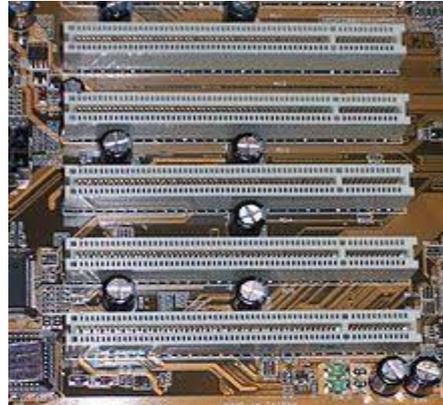


DIO-connector pinning /DIO-200 connector pinning in "normal" mode		
pin	Description	pin Description
1	D0, Data I/O	35 GND
2	D1, Data I/O	36 GND
3	D2, Data I/O	37 GND
4	D3, Data I/O	38 GND
5	D4, Data I/O	39 GND
6	D5, Data I/O	40 GND
7	D6, Data I/O	41 GND
8	D7, Data I/O	42 GND
9	D8, Data I/O	43 GND
10	D9, Data I/O	44 GND
11	D10, Data I/O	45 GND
12	D11, Data I/O	46 GND
13	D12, Data I/O	47 GND
14	D13, Data I/O	48 GND
15	D14, Data I/O	49 GND
16	D15, Data I/O	50 GND
17	D16, Data I/O	51 GND
18	D17, Data I/O	52 GND
19	D18, Data I/O	53 GND
20	D19, Data I/O	54 GND
21	HSO	55 GND
22	HSI1	56 GND
23	HSI2	57 GND
24	PB0 ,pattern bit	58 GND
25	PB1 ,pattern bit	59 GND
26	PB2 ,pattern bit	60 SDO0, static D output
27	PB3 ,pattern bit	61 SDO1, static D output
28	PB4 ,pattern bit	62 SDO2, static D output
29	PB5 ,pattern bit	63 SDO3, static D output
30	PB6 ,pattern bit	64 SDO4, static D output
31	PB7 ,pattern bit	65 SDO5, static D output
32	SDI0, static D input	66 SDO6, static D output
33	SDI1, static D input	67 SDO7, static D output
34	SDI2, static D input	68 SDI3, static D input

Bus PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association) : ce bus externe parallèle permettant des débits de l'ordre de 130 Mo/s, présent surtout sur les ordinateurs portables, permet l'utilisation de périphériques compacts (équivalent des périphériques PCI des ordinateurs de bureau). De format presque identique (modulo un petit adaptateur), le format Compact Flash est de plus

en plus utilisé pour des éléments compacts facilement embarquables (comme des GPS pour PC de poche) ;

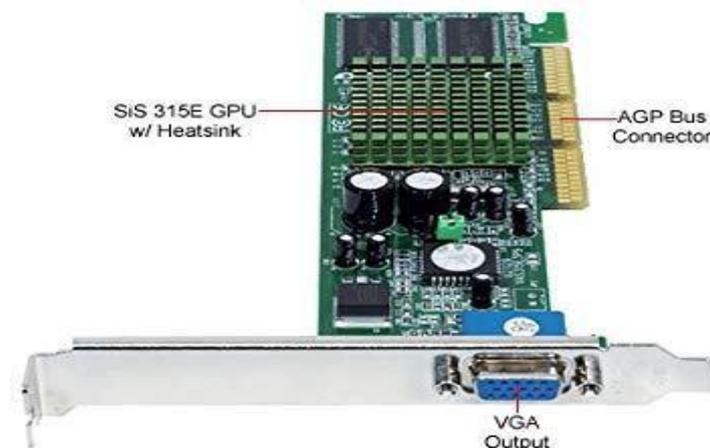
Bus ISA (Industry Standard Architecture) : presque obsolète, ce bus interne (lorsqu'il est présent, se trouve sur la carte mère des ordinateurs utilisant un microprocesseur) permet de connecter différents types de cartes internes (vieille carte son, vieille carte d'acquisition...) peu gourmandes en débit de données ;



Bus PCI (Peripheral Component Interconnect) : très utilisé pour brancher des cartes internes (cartes d'acquisition, cartes son, etc.) dans les ordinateurs, ce bus interne parallèle fournit des débits de l'ordre de 1 Go/s ;

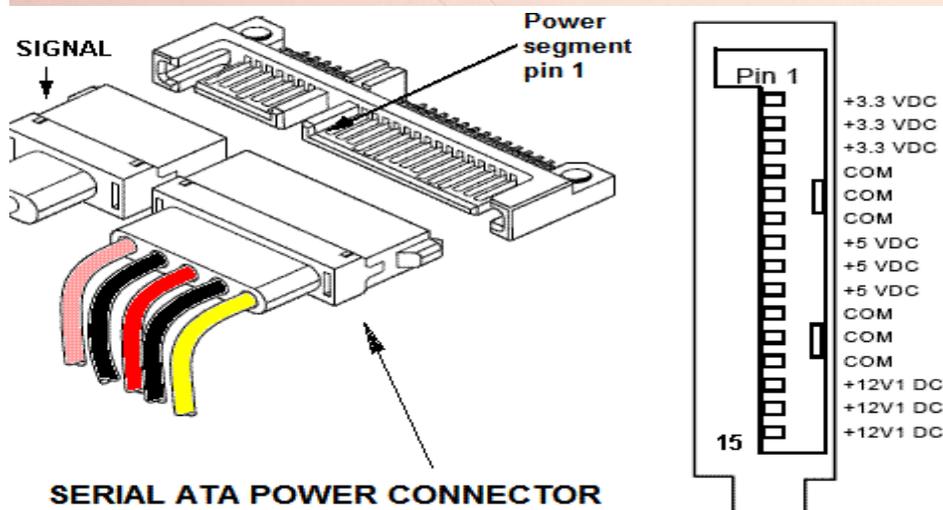
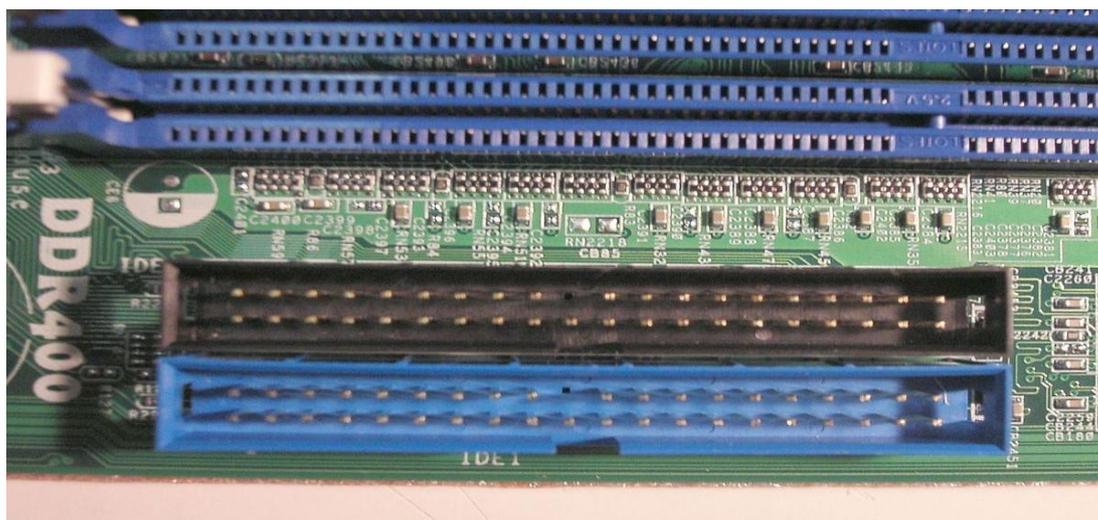


Bus AGP (Advanced Graphic Port) : utilisé exclusivement pour connecter des cartes vidéo (carte se chargeant de l'affichage graphique), ce bus interne parallèle est l'un des bus d'entrées/sorties les plus rapides avec des débits qui augmentent continûment (la version 8x permet un débit de 2,1 Go/s) ;



Bus ATA (Advanced Technology Attachment) : généralement appelé bus IDE (Integrated Drive Electronics), ce bus parallèle interne est généralement utilisé pour communiquer avec les éléments

internes de stockage (disque dur, lecteur/graveur de CD ou DVD, etc.). En perpétuelle évolution, ce bus permet des débits de 133 Mo/s dans sa version Ultra DMA/133.



Finalement, le bus d'entrées/sorties le plus utilisé avec des éléments d'acquisition externes est le bus série. Quel que soit le bus employé, il est important de conserver en mémoire que le fait d'accéder à un périphérique via un bus d'entrées/sorties (que ce soit en lecture ou en écriture de données) est suspensif pour un programme. Le tableau 8.1 donne quelques mesures communément utilisés dans les systèmes informatisés.

Tableau 8.1 – Récapitulatifs sur les bus d'entrées/sorties

Nom	Norme	Largeur en bits	Fréquence	Débit maximal théorique	Applications
bus externes					
Série	RS 232	1		240 Ko/s	Tout type de capteurs intelligents, modem
Parallèle		8		3 Mo/s	Presque plus utilisé
USB	Universal Serial Bus	1		60 Mo/s	Vidéo, imprimante, souris, clavier...
FireWire	IEEE 1394	1		50 à 400 Mo/s	Vidéo, disques externes
SCSI	Small Computer System Interface	8/16/32	4,77 à 80 MHz	320 Mo/s	Disque externe
PCMCIA	Personal Computer	16	33 MHz	130 Mo/s	Mémoire flash,

	Memory Card International Association				Cartes d'acquisition, réseau...
bus internes					
ISA	Industry Standard Architecture	16	8 MHz	8 Mo/s	Obsolète, servait au branchement de cartes internes (son, acquisition...)
PCI	Peripheral Component Interconnect	32/64	133 MHz	1 Go/s	Cœur reliant les différents bus d'entrées/sorties au microprocesseur
AGP ×	Advanced Graphic Port	32	66*8	2,1 Go/s	Carte vidéo
ATA/IDE	Advanced Technology Attachment / Integrated Drive Electronics	16	66	133 Mo/s	Disque interne

4. Norme RS232

4.1 Liaison possible

La norme RS232 définie par l'EIA (Electrical Industry Association), correspond à la norme ISO2110. Elle permet une liaison "point à point". Il ne peut y avoir que 2 éléments communicants.

4.2- Caractéristiques :

Définition des signaux et connectique :

La liaison RS232 est une interface de tension pour la transmission série aussi bien synchrone qu'asynchrone, utilisée pour les liaisons point à point. Elle est définie pour un connecteur SUB-D25 ou SUB-D9. Elle comporte plusieurs signaux qu'on peut rassembler en deux groupes de fonctions :

- Signaux de communication principaux : Tx et Dx.
- Signaux de dialogue "optionnels" : RTS, DTR, etc.

Longueur de ligne et vitesse

La norme RS232 est aussi caractérisée par :

- La longueur maximale du câble qui est d'environ 15 mètres.
- Le débit maximal qui est à présent de 20Kbits/s. La norme prévoit ainsi des débits (bits/s) de 75, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 et 19200.

Les niveaux de tension

Pour la résistance au bruit, les niveaux de tension de la RS232 sont plus grands que ceux de la TTL/CMOS. L'équivalence avec les niveaux logiques sont décrits par le tableau suivant :

N. logique	Niveau électrique
'0' logique	+12V (de +5V à +15V)
'1' logique	-12V (de -5V à -15V)

Les circuits logiques à l'origine de la transmission sont compatibles TTL/CMOS, il faut alors des circuits d'adaptation à la norme RS232 :

N. broche	Abréviation	Désignation (EN)	Désignation (FR)
1	CD	Carrier Detect	Détection de porteuse
2	RXD	Receive Data	Réception de données
3	TXD	Transmit Data	Transmission de données
4	DTR	Data Terminal Ready	Terminal prêt
5	GND	Signal Ground	Masse logique
6	DSR	Data Set Ready	Données prêtes
7	RTS	Request to Send	Demande d'émission
8	CTS	Clear To Send	Prêt à émettre
9	RI	Ring Indicator	Indicateur de sonnerie

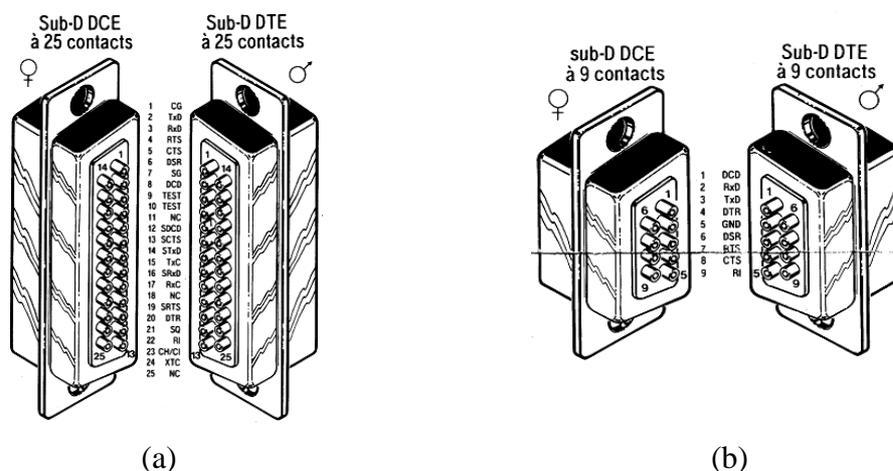


Fig.8.4. Connexion les broches de RS232, (a) DB25, (b) DB9.

Langage LabVIEW

LabVIEW étant un langage graphique, c'est de façon graphique que l'on choisit le type d'une variable. Dans ce langage, tout est flot. L'origine d'un flot a un type, qui définit le type d'un flot. L'origine d'un flot peut être une « variable d'entrée » nommée commande, et la fin d'un flot, une « variable de sortie » du flot nommée indicateur.

Chaque programme, ou sous-programme LabVIEW s'appelle un instrument virtuel (virtual instrument ou vi). La philosophie est de définir un instrument par son interface graphique, ou face avant, et son programme ou diagramme. La figure 6.1 montre un vi prenant en paramètre un entier a, lui appliquant un calcul $(a + 1)/2$ afin d'afficher le résultat b. a en tant que paramètre d'entrée s'appelle une commande (pour commande utilisateur, modifiable via l'interface graphique) et b en tant que paramètre de sortie visible par l'utilisateur, s'appelle un indicateur. Au début du programme, les constantes et les commandes produisent une valeur sur chacun des flots (fils) auxquels ils sont connectés. Dès qu'une valeur est disponible sur chacun des flots en entrée, le vi devient exécutable. Il est alors exécuté et produit ses valeurs en sortie, qui à leur tour rendent d'autre vi exécutables, etc. Dès qu'un flot est disponible en entrée d'un indicateur, la valeur est affichée sur l'élément correspondant de la face avant. Les littéraux numériques se voient graphiquement imposer un type, et peuvent être représentés en décimal, octal, hexadécimal ou binaire, etc. La couleur des flots des éléments graphiques a une sémantique. Ainsi, graphiquement, les flots de données

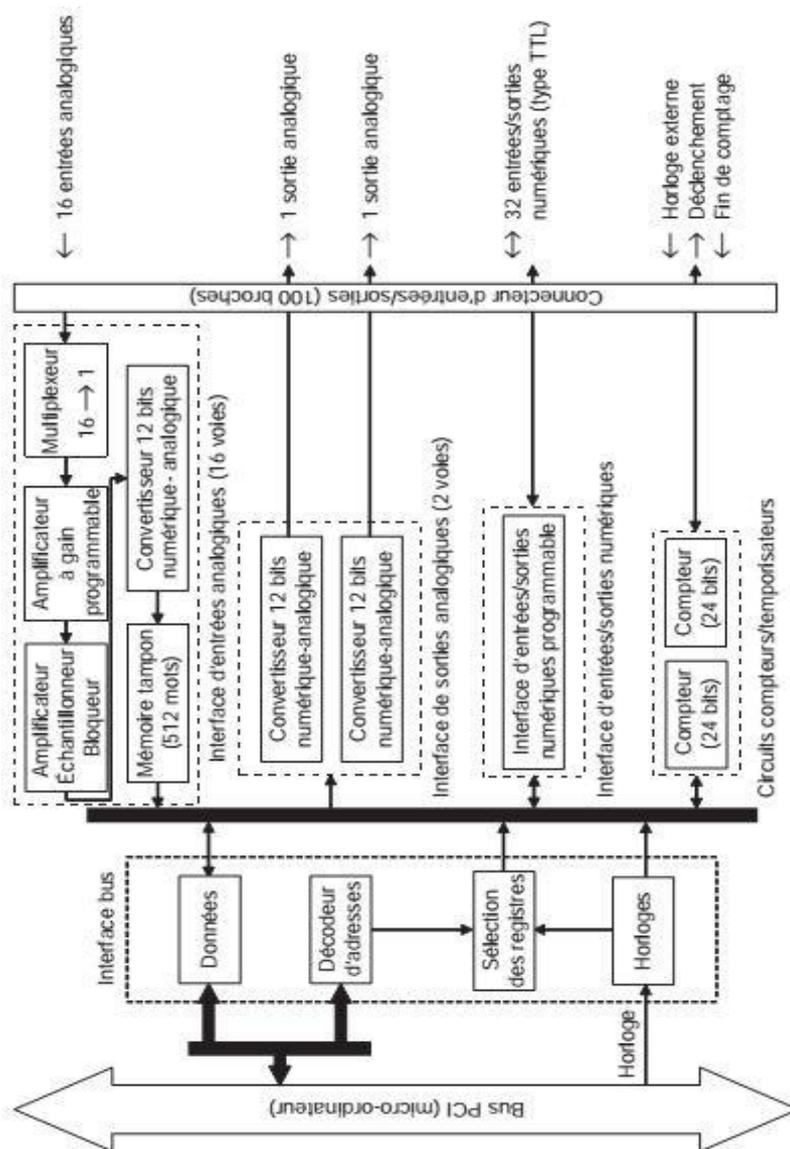
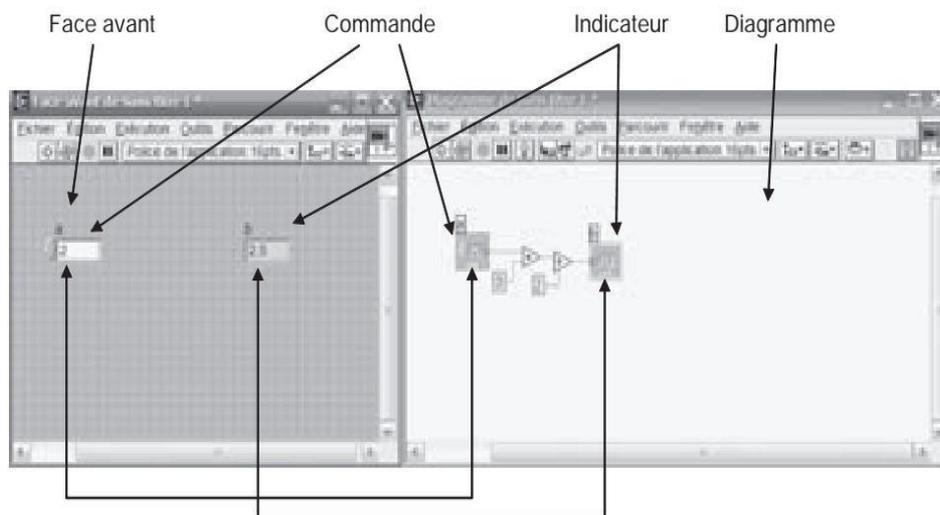


Figure.8.5. Schéma simplifié de carte d'acquisition



Correspondance entre face avant et diagramme

Figure 8.6. Un programme simple en langage LabVIEW

d'entiers (signés ou non, quelle que soit leur taille) sont représentés en bleu. Les flots de données de réels sont représentés en orange. Les booléens, normalement implémentés sur 8 bits, sont représentés graphiquement en vert. Les chaînes de caractères sont distinguées des tableaux en langage LabVIEW. Représentées en rose, celles-ci sont des types de base du langage. La figure 8.6 montre une commande de type enregistrement (*cluster* en langage LabVIEW).

Références

- [1] Les capteurs en instrumentations industrielle, Georges Asch et Collaborateurs, Dunod.
- [2] Sensors and transducers, Ian R. Sintclair, NEWNES 2001.
- [3] Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, J. G. Webster, Taylor & Francis Ltd.
- [4] Instrumentations industrielle : Spécifications et installation des capteurs à des vannes de régulation, M. Grout, Dunod 2002.
- [5] Sensors and signal conditioning, R. Palas-Areny, J. G. Webster, Wiley and Sons 1991.
- [6] Sensors and Transducers, R. Sinclair, Newness, Oxford 2001.
- [7] G. Asch et collaborateurs. Acquisition de données, du capteur à l'ordinateur. Edition Dunod.