

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

I. Classification des capteurs

Classification des capteurs en fonction :

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

II. Quelques exemples de capteurs

II.1. Capteurs de températures

II.1.1. Les thermo-résistances

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

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

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

Classification :

- ❖ Les résistances métalliques.
- ❖ Les thermistances.

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

A. Les résistances métalliques

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

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

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

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

avec :

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

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

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

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

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

Avantages & Inconvénients

Avantages

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

Inconvénients

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

B. Les thermistances

Caractéristiques

- résistances à base d'oxydes métalliques
- faible encombrement
- deux types de thermistances :
 - à coefficient de température positif (PTC)
 - à coefficient de température négatif (NTC)

Variation résistance/température

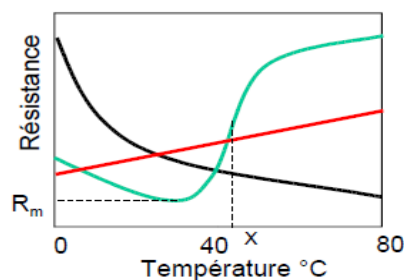


Fig. V.1 : Variation résistance/température

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Relation résistance-température des NTC :

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


Avantages & Inconvénients :

Avantages : temps de réponse rapide, moins chers.

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

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

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


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

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

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

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

Avantages & Inconvénients :

Avantage

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

Défaut

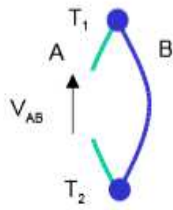
- ❖ étendue de mesure limitée

II.1.3 Les Thermocouples

Principe : effet Seebeck (capteurs actifs)

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

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs



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

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

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

Avantages et inconvénients :

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

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

II.2. Capteurs à effet photoélectrique

II.2.1. Détecteurs optiques passifs : La photorésistance

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

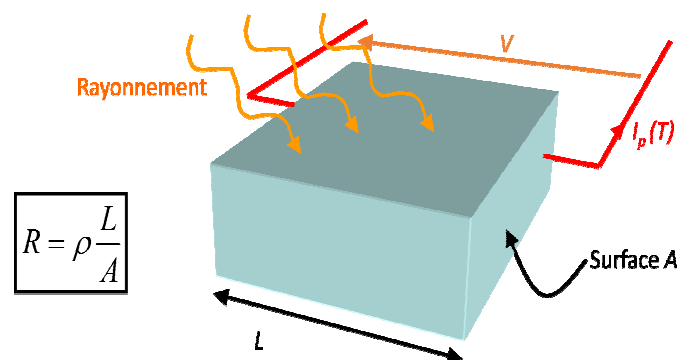


Fig. V.2 : Schéma de principe d'une cellule photoconductrice

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

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

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

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

Avec :

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



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

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

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

Caractéristique lumière/Résistance :

Exemple :

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

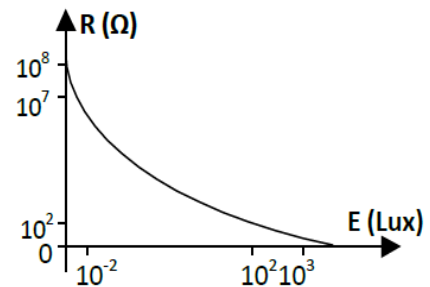


Fig. V.4 : Exemple de variation de la résistance d'une cellule photoconductrice en fonction de son éclairement.

Avantages & Inconvénients :

Avantages

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

Inconvénients

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

Utilisation :

Détection des changements obscurité-lumière (éclairage public).

II.2.2. Détecteurs optiques actifs : La photodiode

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

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

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

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

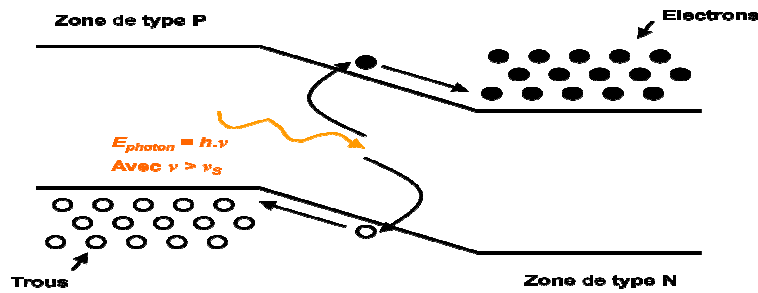


Fig. V.5 : Transferts électroniques dans semi-conducteur.

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

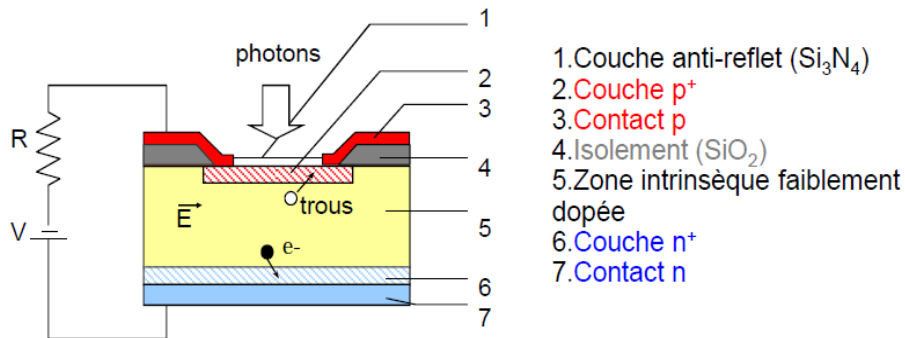


Fig. V.6 : Schéma de principe de la photodiode

Le montage de base

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

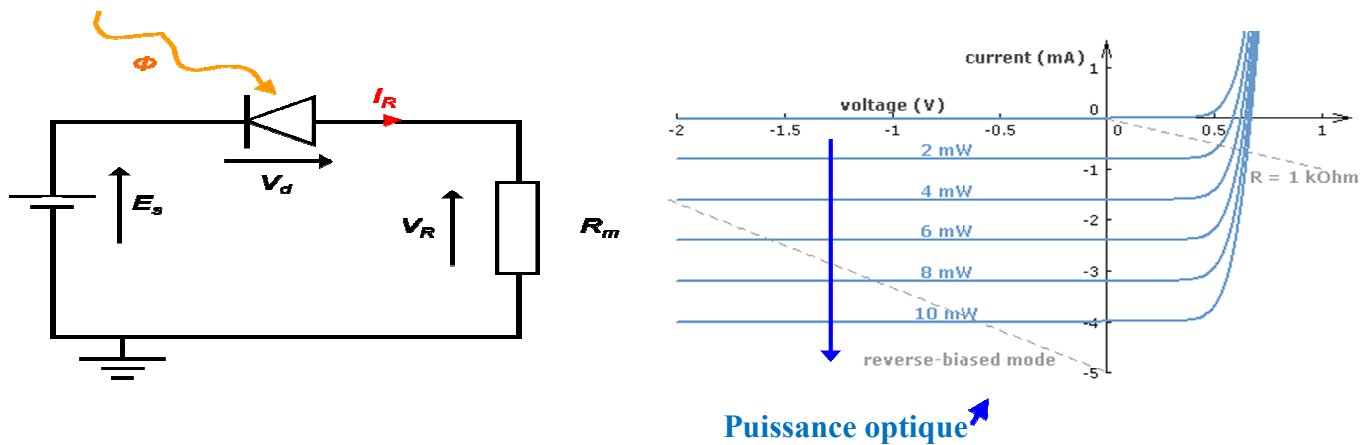
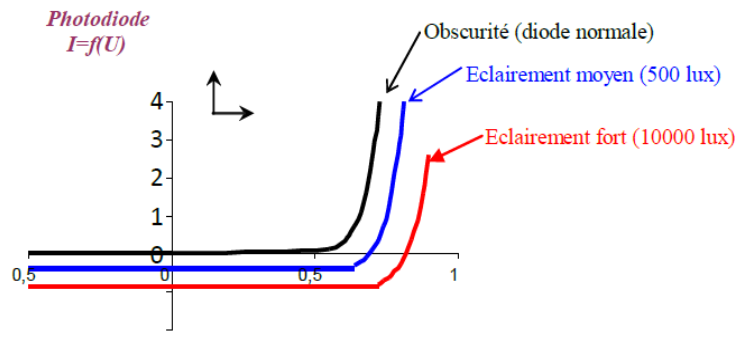


Fig. V.7 : Droite de charge de la photodiode

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Courbe

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



en fonction de

Avantages & inconvénients

Avantages :

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

Inconvénients :

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

Utilisation

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

II.2.3 Détecteurs optiques actifs : Le Phototransistor

Définition

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

Utilisation : Utilisé dans les optocoupleurs.

II.2.4. Détecteurs optiques actifs : Le Photographique

Définition

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

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

Utilisation

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

II.3. Capteurs à effet piézoélectrique

II.3.1. Capteur de pression

Définition :

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

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

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

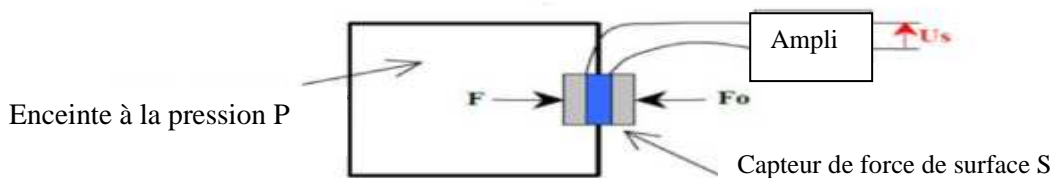


Fig. V.9 : Principe d'un capteur de pression

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

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

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

II.3.2. Capteur d'accélération

Définition :

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

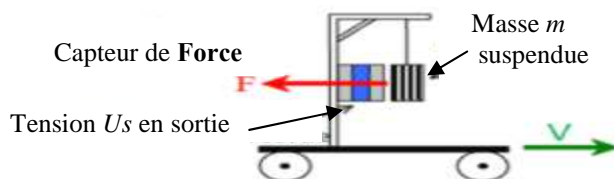


Fig. V.10 : Principe d'un capteur d'accélération

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

II.3.3 Capteur ultrason

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

III. Conclusion

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

IV. Exercices corrigés

Exercice N°1

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

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

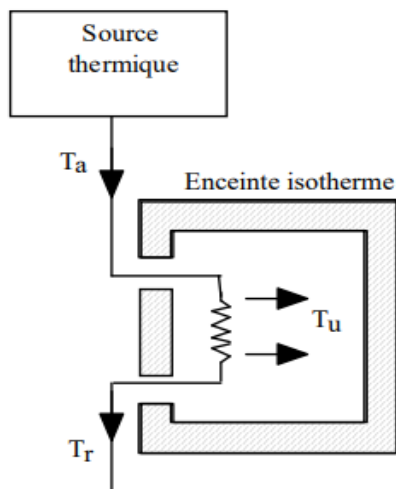
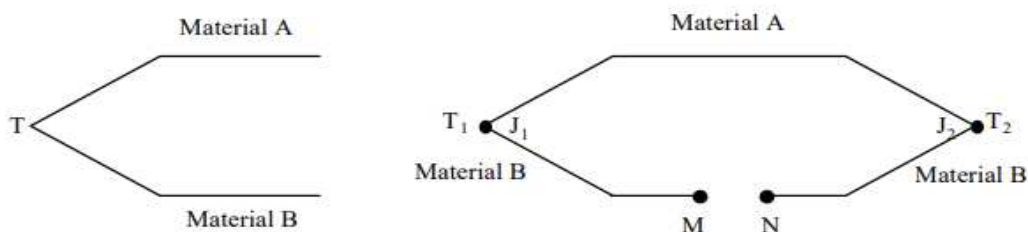


Fig.V.11 : Chauffage d'une enceinte isotherme

Réponse

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



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

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

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

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

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

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

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

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

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

3.

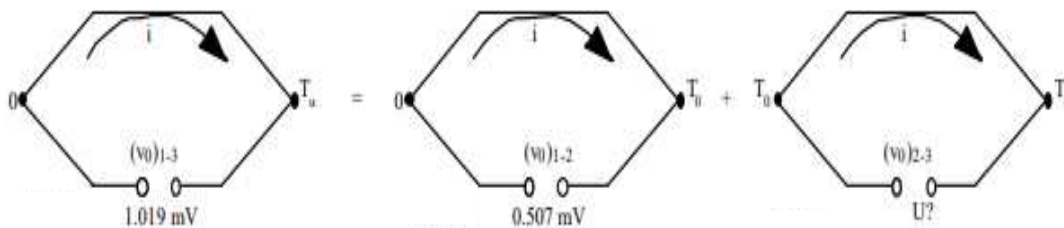


Fig.V.13. Calcul de la tension aux bornes du thermocouple

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

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

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

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

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

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

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

En faisant une interpolation linéaire, nous obtenons :

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

CHAPITRE V : Quelques exemples de capteurs

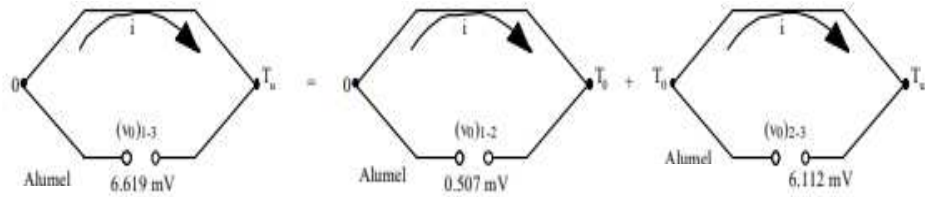


Fig.V.14. Règle d'utilisation d'un thermocouple

Exercice N°2

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

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

Exercice N°3

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

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

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

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

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

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

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

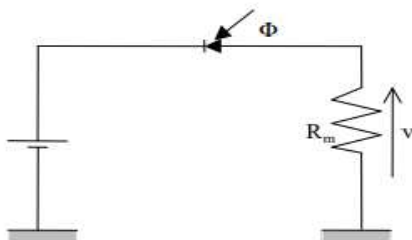


Fig.V.15.a

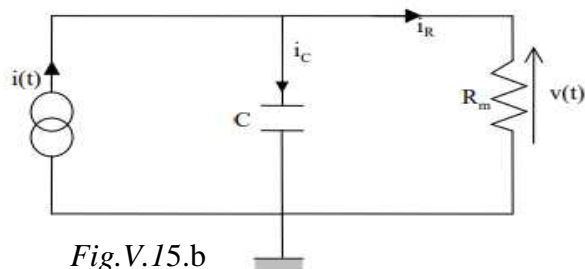


Fig.V.15.b