

Résumé : Capteurs et Métrologie

1. Définition d'un capteur :

Le capteur est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance).

2. Sensibilité d'un capteur

La sensibilité S est définie, autour d'une valeur m_i constante du mesurande, par le rapport de la variation Δs de la grandeur de sortie à la variation Δm du mesurande qui lui a donné

naissance :
$$S = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i}$$

Un capteur est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande si sa sensibilité S est indépendante de la valeur du mesurande m .

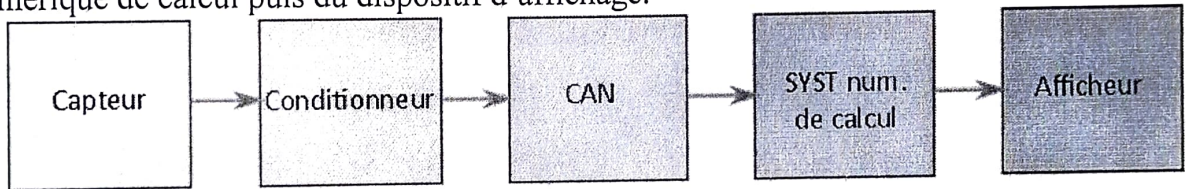
3. Capteur passif et capteur actif

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

- soit comme un générateur de charge, de tension ou de courant et il s'agit alors d'un capteur actif;
- soit comme une impédance (une résistance, une inductance ou une capacité) : le capteur est alors dit passif.

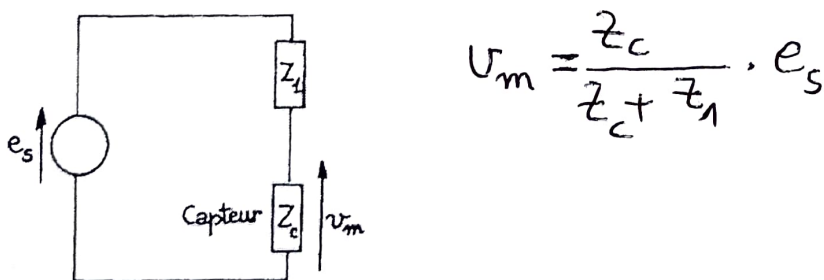
4. La chaîne de mesure

Une chaîne de mesure est essentiellement constituée d'un capteur, d'un conditionneur, d'un dispositif de filtrage si nécessaire, d'un convertisseur analogique numérique, d'un système numérique de calcul puis du dispositif d'affichage.

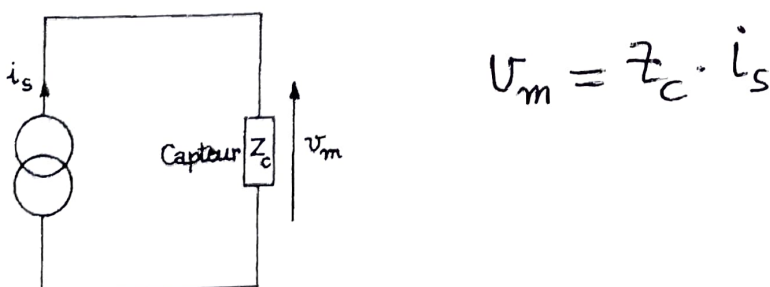


5. Conditionneurs des capteurs passifs

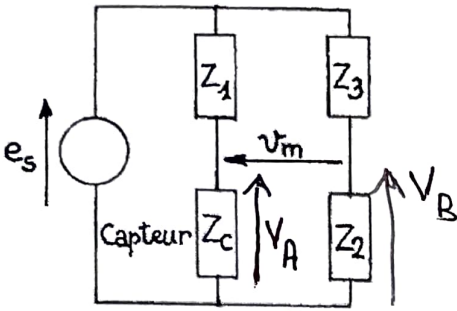
5.1. Montage potentiométrique



5.2. Capteur alimenté par une source de courant



5.3. Montages en pont alimenté par une source de tension

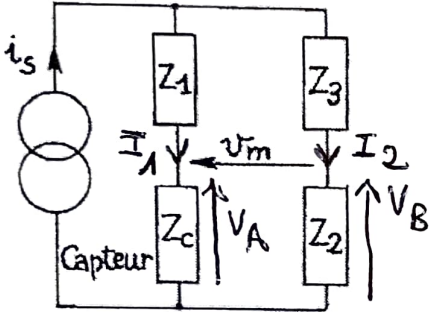


$$V_m = V_A - V_B$$

$$= \frac{z_c}{z_c + z_1} \cdot e_s - \frac{z_2}{z_2 + z_3} \cdot e_s$$

$$\Rightarrow V_m = \frac{z_c z_3 - z_1 z_2}{(z_1 + z_c)(z_2 + z_3)} \cdot e_s$$

5.4. Montages en pont alimenté par une source de courant



$$V_m = V_A - V_B, \quad V_A = z_c I_1, \quad V_B = z_2 I_2$$

$$I_1 = \frac{z_2 + z_3}{z_1 + z_2 + z_3 + z_c} i_s, \quad I_2 = \frac{z_1 + z_c}{z_1 + z_2 + z_3 + z_c} \cdot i_s$$

$$\Rightarrow V_m = \frac{z_c z_3 - z_1 z_2}{z_1 + z_2 + z_3 + z_c} \cdot i_s$$

5.5. Les oscillateurs

Lorsqu'un capteur, dont l'impédance comporte un terme réactif (L ou C) sensible au mesurande, est associé au circuit oscillant d'un générateur sinusoïdal, la tension v_m que celui-ci délivre est modulée en fréquence.

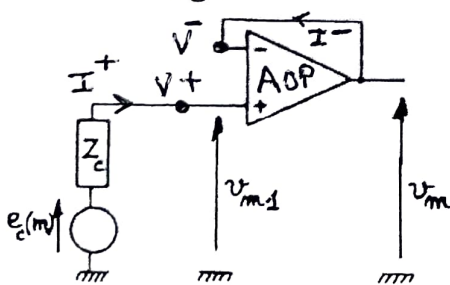
6. Conditionneurs du signal

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

Le capteur, associé à son conditionneur lorsqu'il est passif, équivaut à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne.

a. Capteur source de tension

- Montage suiveur

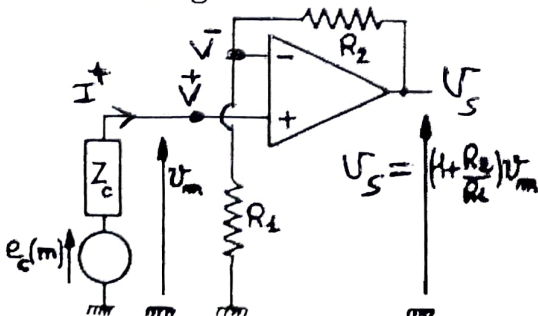


$I^+ = I^- = 0$
 $v^+ = v^-$) Pour un AOP idéal en régime linéaire

$$e_c(m) - z_c I^+ - v_{m1} = 0, \quad I^+ = 0, \quad v^+ = v_{m1}$$

$$v_m = v^- \Rightarrow v_m = e_c(m)$$

- Montage non-inverseur

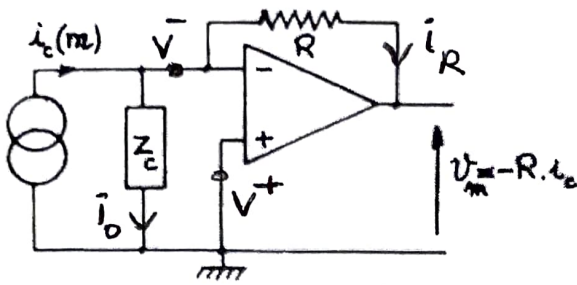


$$e_c(m) - z_c I^+ - v_m = 0, \quad I^+ = 0, \quad v^+ = v_m$$

$$v^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_s \quad \text{car } I^- = 0$$

$$\Rightarrow v_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot e_c(m)$$

b. Capteur source de courant
Convertisseur courant-tension



$$V^+ = 0, \quad V^- = V^+ \Rightarrow V^- = 0$$

$$V^- = Z_c i_o \Rightarrow i_o = 0$$

$$i^- = 0 \Rightarrow i_R = i_c(m)$$

$$V_m + R i_R - V^- = 0$$

$$\Rightarrow V_m = -R \cdot i_c(m)$$

7. Capteurs de température

7.1. Thermométrie par résistance (Capteurs résistifs)

- pour les métaux : $R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3)$, T étant exprimé en $^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$;
- pour les thermistances, mélanges d'oxydes semi-conducteurs :

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

T étant la température absolue.

Coefficient de température

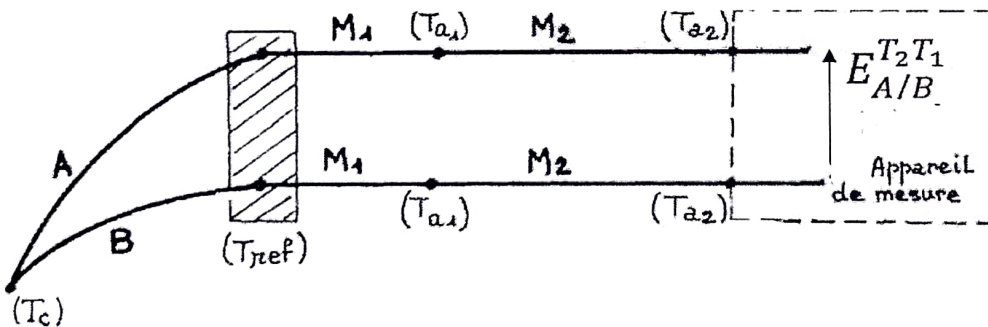
α_R est le coefficient de température de la résistance ou sensibilité thermique à la température T .

$$\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{dR}{dT} \quad \text{pour le platine : } \alpha_R = 3,9 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C},$$

$$\text{pour un certain type de thermistance : } \alpha_R = 5,2 \cdot 10^{-2} / ^{\circ}\text{C}.$$

7.2. Thermométrie par thermocouple

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T_1 et T_2 ; délivre une f.é.m. $E_{A/B}^{T_2 T_1}$; qui dépend, d'une part, de la nature des conducteurs A et B et, d'autre part, des températures T_1 et T_2 .



$$P_{A/B}^{T_c} - P_{A/B}^{T_{ref}} + \int_{T_c}^{T_{ref}} (h_A - h_B) dT = E_{A/B}^{T_c T_{ref}}$$

Température de référence T_{ref}

On distingue les cas suivants :

- $T_{ref} = 0^{\circ}\text{C}$: La mesure de la f.é.m. du thermocouple $E_{A/B}^{T_c 0^{\circ}\text{C}}$ permet dans ce cas de connaître immédiatement la température T_c à l'aide de la Table du thermocouple utilisé.

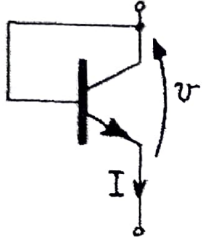
- La température de référence est différente de 0 °C:

$$E_{A/B}^{T_c, 0^\circ C} = E_{A/B}^{T_c, T_{ref}} + E_{A/B}^{T_{ref}, 0^\circ C}$$

La connaissance de T_{ref} permet, à l'aide de la Table du thermocouple, de calculer $E_{A/B}^{T_{ref}, 0^\circ C}$; la mesure de la f.é.m. du thermocouple fournit une valeur correspondant à $E_{A/B}^{T_c, T_{ref}}$.

7.3. Thermométrie par diodes et transistors

a. Transistor monté en diode

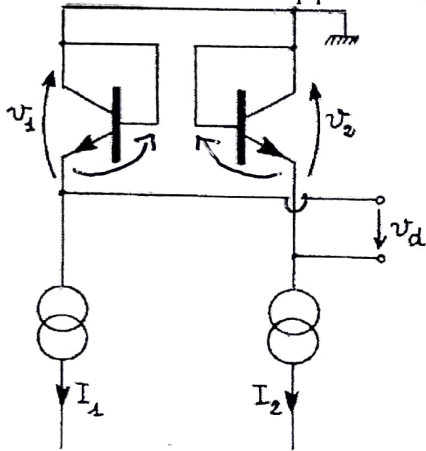


$$I = I_s e^{\frac{V}{V_T}}, \quad V \gg V_T$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} = 26 \text{ mV pour } T = 300 \text{ K}$$

$$\Rightarrow V = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right)$$

b. Transistors appairés montés en diodes



$$V_d + V_2 - V_1 = 0$$

$$\Rightarrow V_d = V_1 - V_2$$

$$V_1 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_s}\right)$$

$$V_2 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_2}{I_s}\right)$$

$$\Rightarrow V_d = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

8. Capteurs optiques

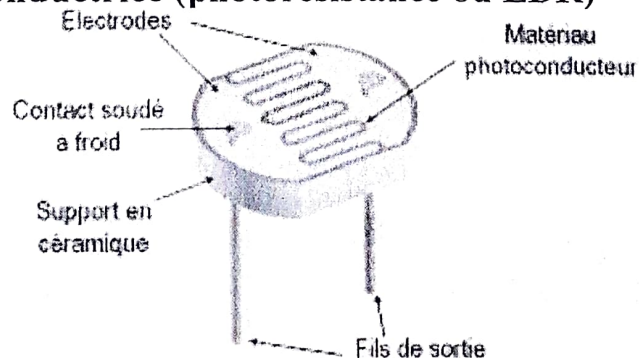
8.1. Le photocourant

Le photocourant I_p est le courant électrique traversant un photodétecteur qui résulte de l'exposition de ce dernier à une source lumineuse.

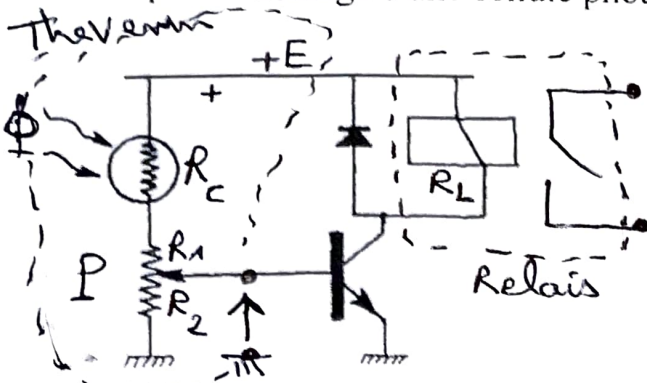
8.2. Courant d'obscurité

Le courant d'obscurité I_0 est le courant permanent délivré par le dispositif photosensible placé dans l'obscurité et polarisé dans des conditions définies.

8.3. Cellule photoconductrice (photorésistance ou LDR)



Montage d'une cellule photoconductrice pour commander un relais



Condition de saturation (ON):

$$V_{BE} > V_{BE(sat)} \approx 0,7V$$

$$V_{BE} = E_{Th} - R_{Th} i_{b(sat)}$$

$$E_{Th} = \frac{R_2}{P + R_c} \cdot E; R_{Th} = R_2 \parallel (R_1 + R_c)$$

$$i_{b(sat)} = \frac{1}{\beta} \cdot i_{c(sat)}$$

$$i_{c(sat)} = \frac{E}{R_L} \text{ pour } V_{CE} = 0$$

Condition de blocage (OFF): $V_{BE} < V_{BE(sat)}$

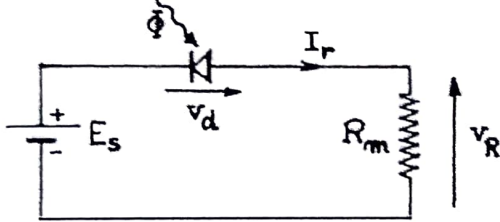
8.4. Photodiode



Le courant inverse qui traverse la photodiode a pour expression:

$$I_r = -I_o \cdot \exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) + I_o + I_p$$

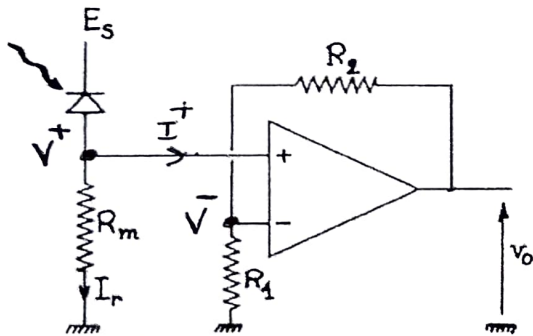
a. Mode photoconducteur (photodiode polarisée en inverse)



$$I_r = -I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) + I_p$$

$$\approx I_p \text{ car } V \ll -V_T \text{ et } I_s \ll I_p$$

$$\Rightarrow V_R = R_m I_p \text{ et } I_p = k \cdot \phi$$



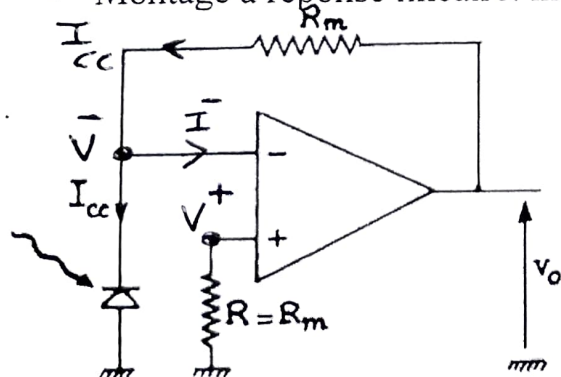
$$I_r \approx I_p \Rightarrow V^+ = R_m I_p$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_o \text{ car } I^- = 0$$

$$V^+ = V^- \Rightarrow V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot R_m I_p$$

b. Mode photovoltaïque (photodiode non polarisée)

- Montage à réponse linéaire: mesure du courant de court-circuit I_{cc}



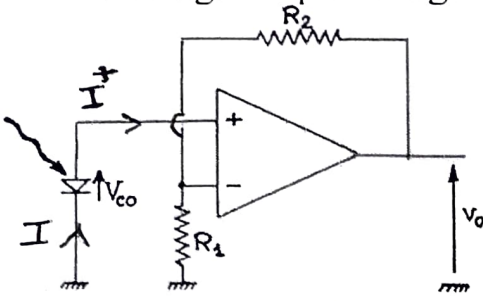
$$V^+ = -R I^+ = 0$$

$$V^- = V^+ \Rightarrow V^- = 0$$

$$V_o - R_m I_{cc} - V^- = 0$$

$$\Rightarrow V_o = R_m I_{cc}$$

- Montage à réponse logarithmique : mesure de la tension en circuit ouvert V_{co}



$$V^+ = V_{co}, \quad V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_0$$

$$I = -I_s \left(e^{\frac{V^-}{V_T}} - 1 \right) + I_p = I^+ = 0$$

$$\Rightarrow V = V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_p}{I_s} \right)$$

$$\Rightarrow V_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_T \ln \left(\frac{I_p}{I_s} \right)$$

8.5. Phototransistor

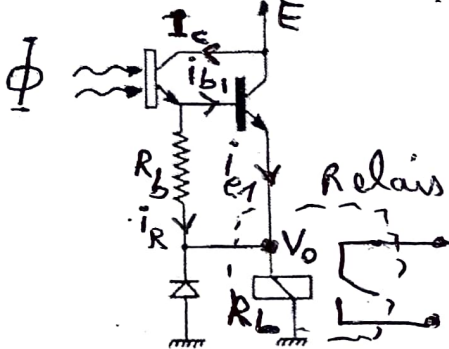
Il s'agit d'un transistor, en général au silicium et de type NPN, dont l'élément semi-conducteur constituant la base peut être éclairé.

Montages associés au phototransistor

Le phototransistor peut être utilisé soit en commutation, soit en régime linéaire.

a. Phototransistor en commutation

Commande d'un relais après amplification:



$$I_c = \beta I_p, \quad I_p = k \Phi$$

$$\phi = 0 \Rightarrow I_c = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow i_{e1} = 0$$

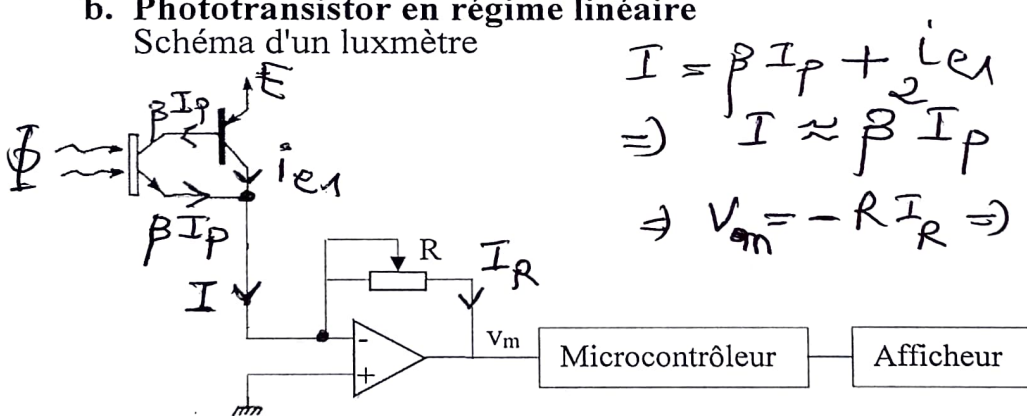
$$\Rightarrow \text{Relais OFF}$$

$$\phi > \phi_0 (\text{seuil}) \Rightarrow i_{b1} > i_{b1}(\text{sat})$$

$$\Rightarrow i_{e1} = \frac{E}{R_L} \Rightarrow V_0 = E \Rightarrow \text{Relais ON}$$

b. Phototransistor en régime linéaire

Schéma d'un luxmètre



$$I = \beta I_p + i_{e1}, \quad i_{e1} = \beta (\beta I_p)$$

$$\Rightarrow I \approx \beta I_p, \quad I_R = I \text{ car } i_{e1} = 0$$

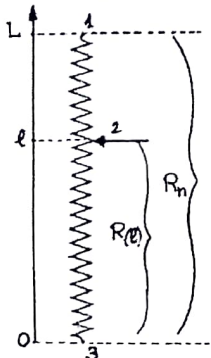
$$\Rightarrow V_m = -R I_R \Rightarrow V_m = \beta R I_p$$

9. Capteurs de position et déplacement

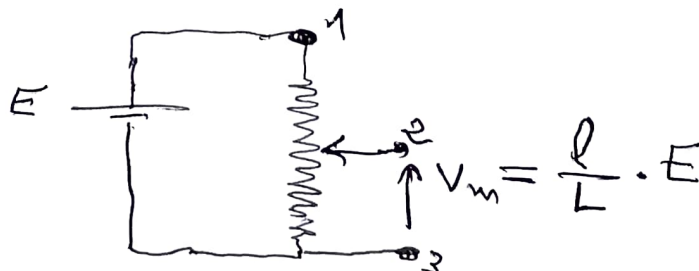
9.1. Potentiomètre résistif

Un potentiomètre est constitué d'une résistance fixe sur laquelle peut se déplacer un contact électrique, le curseur. Celui-ci est solidaire mécaniquement de la pièce dont on veut traduire le déplacement.

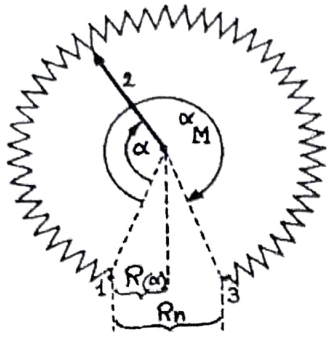
- Potentiomètre de déplacement rectiligne :



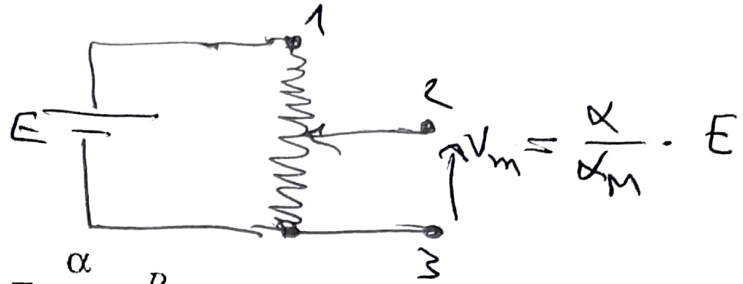
$$R(l) = \frac{l}{L} \cdot R_n$$



- Potentiomètre de déplacement angulaire :

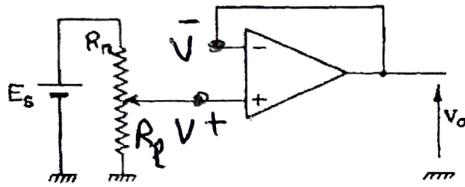


$$R(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha_M} \cdot R_n$$



Montages de mesure :

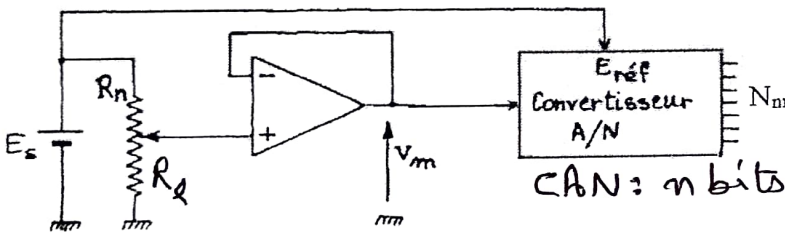
- Amplificateur suiveur



$$V^+ = \frac{R_p}{R_n} \cdot E_s \quad , \quad V_o = V^+$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{R_p}{R_n} \cdot E_s$$

- Montage quotientmétrique éliminant l'influence de la tension de mesure



CAN: n bits $\Rightarrow 2^n$ valeurs: 000...0

$2^n - 1$ - 111...1

$$E_{ref} \longrightarrow 2^n - 1$$

$$V_m \longrightarrow N_m$$

$$\Rightarrow N_m = \frac{V_m}{E_{ref}} \cdot (2^n - 1)$$

$$\text{et } V_m = \frac{R_p}{R_n} \cdot E_s \quad , \quad E_{ref} = E_s$$

$$\Rightarrow N_m = \frac{\frac{R_p}{R_n} \cdot E_s}{E_s} \cdot (2^n - 1)$$

$$\Rightarrow N_m = \frac{R_p}{R_n} \cdot (2^n - 1) \quad \text{indépendante de } E_s$$