

## Résumé

1) **Capteur**: Un dispositif capable d'acquérir une grandeur physique à mesurer (Température, pression, vitesse, lumière, humidité, position, ...etc.), et de la transformer en une grandeur électrique (Courant, tension ou impédance).

2) **Sensibilité**: Variation du signal de sortie (tension, courant ou impédance) par rapport à la variation du signal d'entrée (Température, pression, vitesse, lumière, humidité, position, ...etc.):  $S = \frac{ds}{dm}$ . s est la grandeur de sortie et m est le mesurande (grandeur d'entrée).

3) **Capteur passif**: Un capteur passif est équivalent à une impédance (R, L ou C).

Un capteur passif nécessite un conditionneur de capteur (montage potentiométrique, pont d'impédances ou de résistances, oscillateur, amplificateur, ...etc.).

4) **Capteur actif**: Un capteur actif est équivalent à une source de tension, de courant ou de charge.

5) Le capteur passif avec son conditionneur et le capteur actif nécessitent un **conditionneur de signal**.

6) **Montage potentiométrique pour un capteur résistif**:

La tension mesurée  $v_m$ , si  $R_d \gg R_c$ , est donnée par:

$$v_m = e_s \cdot \frac{R_c}{R_c + R_1 + R_s}$$

avec:  $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$

La tension  $v_m$  n'est pas une fonction linéaire de  $R_c$ .

On souhaite que  $\Delta v_m$  soit proportionnelle à  $\Delta R_c$  (**linéarisation**):

- Solution 1:

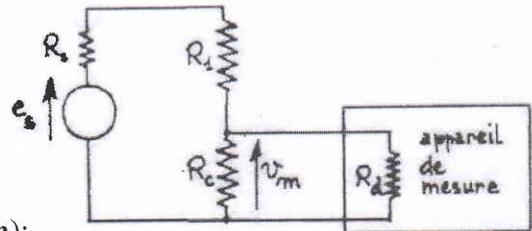
fonctionnement en petits signaux  $\rightarrow \Delta R_c \ll R_{c0} + R_1 + R_s$

- Solution 2:

alimentation par source de courant  $\rightarrow \Delta v_m = I \times \Delta R_c$

- Solution 3:

montage push-pull  $\rightarrow R_c = R_{c0} + \Delta R_c$  et  $R_1 = R_{c0} - \Delta R_c$



L'un des inconvénients du montage potentiométrique est que  $\Delta v_m$  est superposée à une grande tension continue  $v_{m0}$ :  $v_m = v_{m0} + \Delta v_m$ .

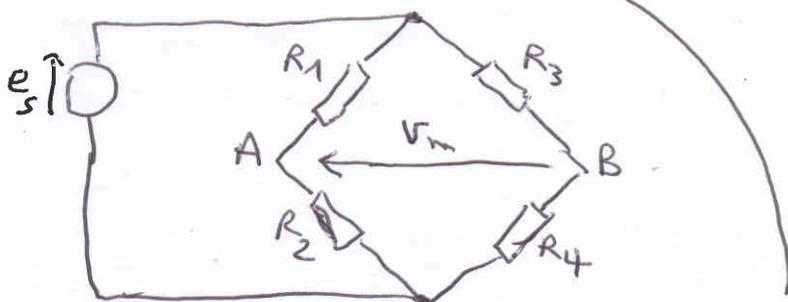
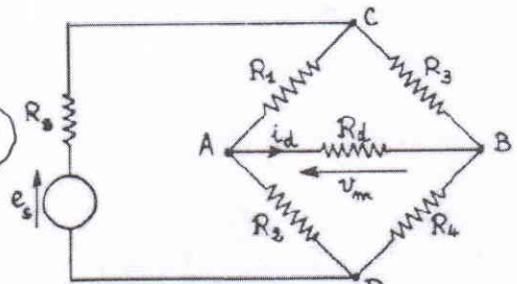
7) **Pont de Wheatstone pour un capteur résistif**:

Le pont est dit équilibré si:  $v_{m0} = V_{AB} = 0 \rightarrow R_1 R_4 = R_2 R_3$

Au déséquilibre:  $v_m = v_{m0} + \Delta v_m = \Delta v_m$

Lorsque  $R_d \gg R_{1,2,3,4}$  et  $R_s \ll R_{1,2,3,4}$ :

$$v_m = e_s \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$



$$v_m = V_A - V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E - \frac{R_4}{R_3 + R_4} E$$

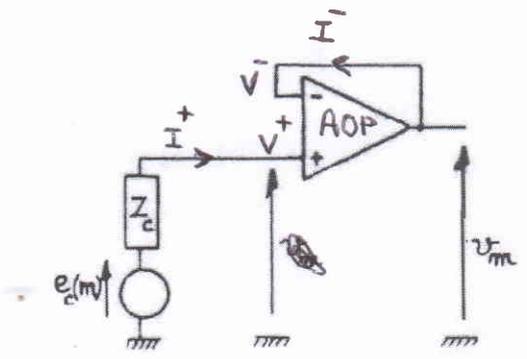
8) Conditionneurs du signal: Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure

8-1) Source de tension:

AOP est idéal  $\Rightarrow \begin{cases} I^+ = I^- = 0 \\ V^+ = V^- \end{cases}$

$e_c(m) - Z_c I^+ - V^+ = 0$

$V_m = V^- = V^+$   
 $\Rightarrow V_m = e_c(m)$

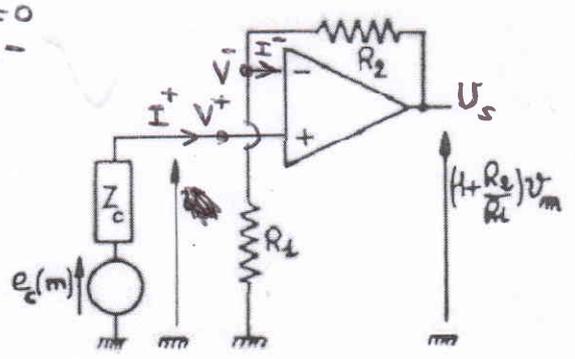


$e_c(m) - Z_c I^+ - V^+ = 0$

$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_s$

$\begin{cases} I^+ = I^- = 0 \\ V^+ = V^- \end{cases}$

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



8-2) Source de courant:

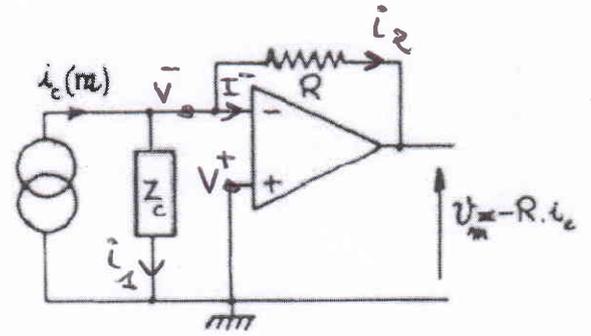
$V^- = V^+$  mais  $V^+ = 0 \Rightarrow V^- = 0$

$V^- = Z_c i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{V^-}{Z_c} = 0$

$\Rightarrow i_2 = i_c(m)$

$U_m + R i_2 - V^- = 0$

$\Rightarrow U_m = -R i_c(m)$



9) Linéarisation du pont de Wheatstone:

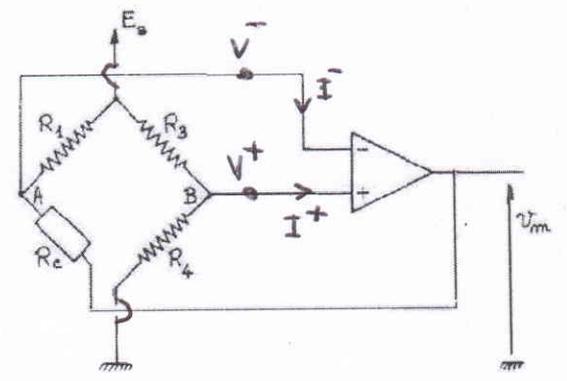
$R_1 = R_3 = R_4 = R_{c0}, \quad R_c = R_{c0} + \Delta R_c$

$V_A = \frac{E_s / R_1 + U_m / R_c}{1/R_1 + 1/R_c} = V^-$

$V_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot E_s = \frac{E_s}{2} = V^+$

$V^+ = V^- \Rightarrow V_m = -\frac{E_s}{2R_{c0}} \cdot R_c + \frac{E_s}{2}$

~~$E_s = R_c = R_{c0} + \Delta R_c$~~   
 ~~$V_m = -\frac{E_s}{2R_{c0}} \cdot R_c + \frac{E_s}{2}$~~   
 ~~$V_m = -\frac{E_s}{2R_{c0}} \cdot (R_{c0} + \Delta R_c) + \frac{E_s}{2}$~~   
 ~~$V_m = -\frac{E_s}{2R_{c0}} \cdot R_{c0} - \frac{E_s}{2R_{c0}} \cdot \Delta R_c + \frac{E_s}{2}$~~   
 ~~$V_m = -\frac{E_s}{2} - \frac{E_s}{2R_{c0}} \cdot \Delta R_c + \frac{E_s}{2}$~~   
 ~~$V_m = -\frac{E_s}{2R_{c0}} \cdot \Delta R_c$~~



on a :  $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$

$\Rightarrow V_m = -\frac{E_s}{2R_{c0}} \Delta R_c$

## 10) Capteurs de température

### 10-1) Les échelles de température

- Echelles thermodynamiques ou absolues : Échelle de Kelvin, Échelle de Rankin.
- Échelles dérivées des échelles thermodynamiques: Échelle Celsius, Échelle Fahrenheit.

### 10-2) Thermométrie par résistance:

- pour les métaux (Nickel, platine, cuivre, ...etc.):  $R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3)$ ,  $R_0 = R(T = 0^\circ\text{C})$ .
- pour les thermistances, mélanges d'oxydes semiconducteurs:

$$R(T) = R_0 \exp(B(1/T - 1/T_0)). \quad R_0 = R(T = T_0 \text{ K}) \text{ et } T \text{ est la température absolue.}$$

### 10-3) Thermométrie par thermocouple:

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures  $T_C$  (température à mesurer) et  $T_{ref}$  (température de référence) délivre une f.é.m  $E_{A/B}^{T_C T_{ref}}$ .

### 10-4) Effets thermoélectriques:

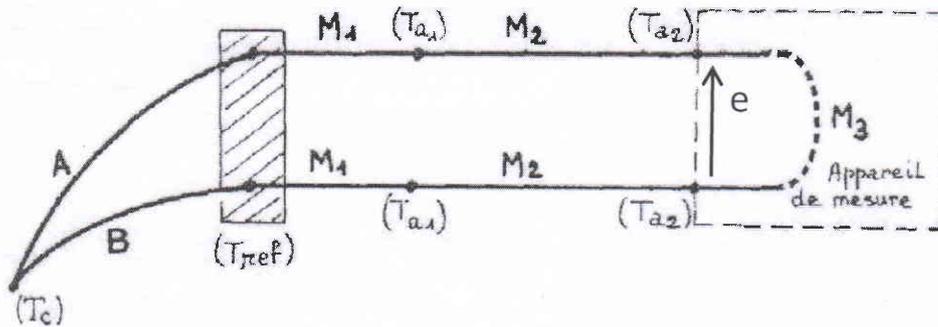
Effets thermoélectriques : a) effet Peltier ; b) loi de Volta ; c) effet Thomson ; d) effet Seebeck.

$$E_{A/B}^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT$$

$$P_{A/B}^{T_2} + E_A^{T_2 T_1} + P_{B/A}^{T_1} + E_B^{T_1 T_2} = P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (h_A - h_B) dT = E_{A/B}^{T_2 T_1}$$

$$P_{A/B}^{T_1} + P_{B/C}^{T_1} + P_{C/D}^{T_1} + P_{D/A}^{T_1} = 0$$

### 10.5) Montage de mesure:



$$\begin{aligned}
 e = & P_{A/B}^{T_c} + \int_{T_c}^{T_{ref}} h_B dT + P_{B/M_1}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_{a1}} h_{M_1} dT + P_{M_1/M_2}^{T_{a1}} + \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} h_{M_2} dT \\
 & + P_{M_2/M_3}^{T_{a2}} + \int_{T_{a2}}^{T_{a2}} h_{M_3} dT + P_{M_3/M_2}^{T_{a2}} + \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} h_{M_2} dT + P_{M_2/M_1}^{T_{a1}} \\
 & + \int_{T_{a1}}^{T_{ref}} h_{M_1} dT + P_{M_1/A}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_c} h_A dT
 \end{aligned}$$

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

### 10.6) La température de référence:

La f.é.m. du thermocouple dépend à la fois de la température  $T_c$  de la jonction placée au point de mesure et de la température,  $T_{ref}$ , de ses jonctions avec les fils de liaison. Pour ce qui est de cette dernière, on peut distinguer trois cas :

- $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$ ;
- $T_{ref}$  est constante mais différente de  $0^\circ\text{C}$ ;
- $T_{ref}$  est variable, généralement égale à la température ambiante.

- La température de référence est  $0^\circ\text{C}$ : La mesure de la f.é.m. du thermocouple permet dans ce cas de connaître immédiatement la température  $T_c$  à l'aide de la Table du thermocouple utilisée.
- La température de référence est constante mais différente de  $0^\circ\text{C}$ : La connaissance de  $T_{ref}$  permet, à l'aide de la Table du thermocouple, de calculer  $E_{A/B}^{T_{ref} 0^\circ\text{C}}$ ; la mesure de la f.é.m. du thermocouple fournit une valeur correspondant à:  $E_{A/B}^{T_c T_{ref}}$ ; on en déduit la f.é.m. dont le thermocouple serait le siège si la température de référence était  $0^\circ\text{C}$  :

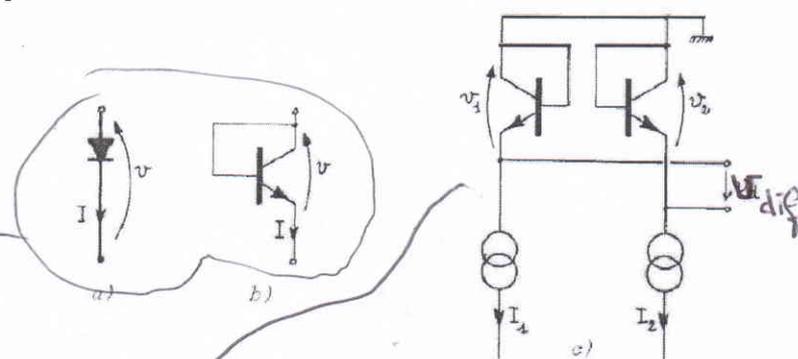
$$E_{A/B}^{T_c 0^\circ\text{C}} = E_{A/B}^{T_c T_{ref}} + E_{A/B}^{T_{ref} 0^\circ\text{C}}$$

- La température de référence est variable et égale à la température ambiante: Connaissant la valeur de la température ambiante  $T_a$  à l'instant de la mesure on procède comme dans le cas précédent :

$$E_{A/B}^{T_c 0^\circ\text{C}} = E_{A/B}^{T_c T_a} + E_{A/B}^{T_a 0^\circ\text{C}}$$

Cependant, il existe des circuits, dits de correction de soudure froide, qui délivrent automatiquement une tension  $v(T_a)$  égale à  $E_{A/B}^{T_a 0^\circ\text{C}}$ ; celle-ci, ajoutée à la f.é.m.

### 10.7) Thermométrie par diodes et transistors:



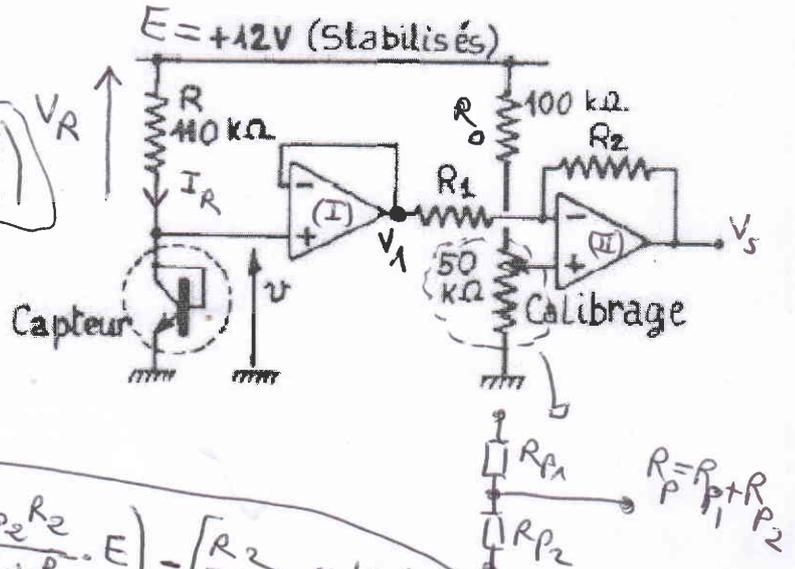
$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{qv}{nkT}\right) - 1 \right)$ ,  $T$  en K, pour  $v \gg \frac{kT}{q} \Rightarrow v = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$

La mesure de la tension différentielle  $v_{diff} = v_1 - v_2$  permet d'éliminer l'influence de  $I_0$  :

$$v_{diff} = \frac{nkT}{q} \cdot \text{Log} \frac{I_1}{I_2} = \frac{nkT}{q} \text{Log} n$$

10.8) Montage de mesure :

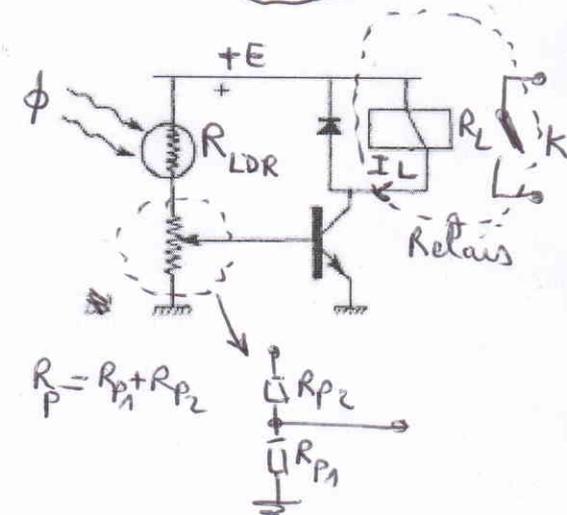
Si  $R$  est très grande  $\Rightarrow V_R \gg V$   
 $\Rightarrow I_R \approx \frac{E}{R} \Rightarrow V = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{E/R}{I_0}\right)$   
 $V_1 = V$  car  $V_1^+ = V_1^-$   
 $V_1^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$   
 $V_1^- = \frac{V_1/R_1 + V_5/R_2}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$   
 $V_1^+ = V_1^- \Rightarrow V_5 = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E\right) - \left[\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{nK}{q} \ln\left(\frac{E/R}{I_0}\right)\right] \cdot T$



11) Capteurs optiques: (LDR)

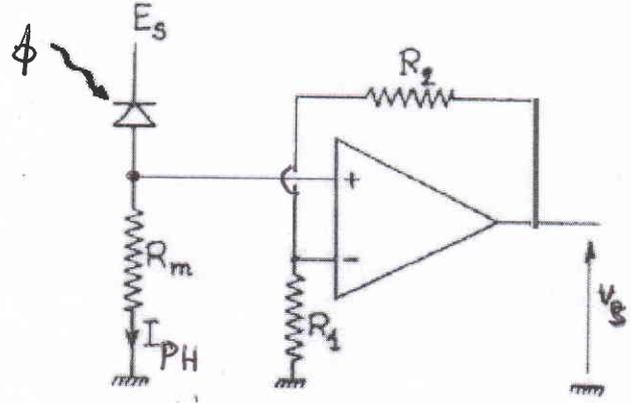
11-1) Cellule photoconductrice: C'est un capteur passif résistif.  
 11-2) Montage pour commander un relais.

$\phi$  augmente  $\uparrow \Rightarrow R_{LDR}$  diminue  $\downarrow$   
 $\Rightarrow V_{BE} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$  augmente  $\uparrow$   
 $\Rightarrow$  saturation de transistor ( $V_{CE} \approx 0$ )  
 $\Rightarrow k$  se ferme  
 $\phi \downarrow \Rightarrow R_{LDR} \uparrow \Rightarrow V_{BE} \downarrow \Rightarrow$  Transistor bloqué  
 $\Rightarrow k$  s'ouvre.

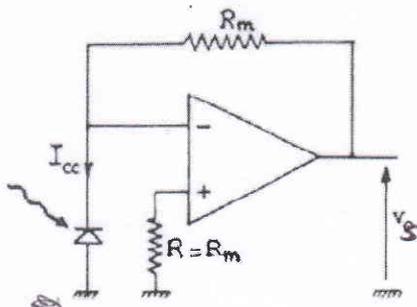


11-3) Photodiode: C'est un capteur actif.  
 11-4) Mode photoconducteur: La photodiode est polarisée en inverse.

$I_{PH} = k \phi$   
 $V^+ = R_m I_{PH}$   
 $V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_5$   
 $\Rightarrow V_5 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot R_m I_{PH}$



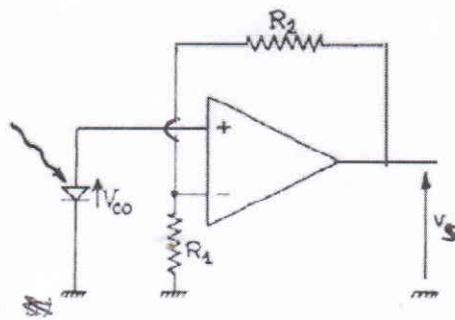
**11-5) Mode photovoltaïque :**



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

$$I^- = 0 \Rightarrow I_{R_m} = I_{cc}$$

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



$$V^+ = V_{co}$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_s$$

$$V^+ = V^- \Rightarrow V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{co}$$

**12) Capteurs de position :**

On distingue plusieurs types :

- Capteurs résistifs (potentiomètre résistif).
- Capteurs inductifs
- Capteurs capacitifs
- Codeurs absolus et codeurs incrémentaux (optiques)
- ...etc.

**12-1) Potentiomètres résistifs :**

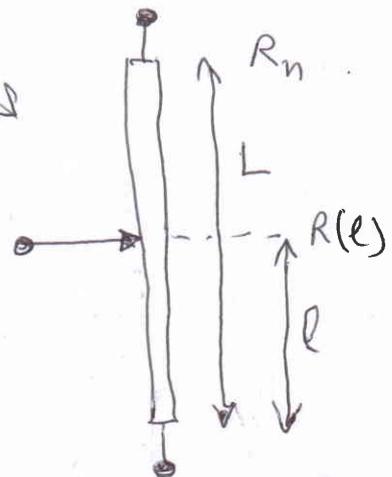
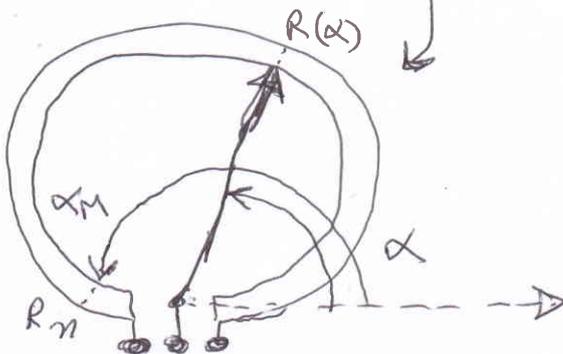
Selon la forme géométrique de la résistance fixe et donc du mouvement du curseur on distingue :

- le potentiomètre de déplacement rectiligne (figure 7.1a)

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

- le potentiomètre de déplacement angulaire

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



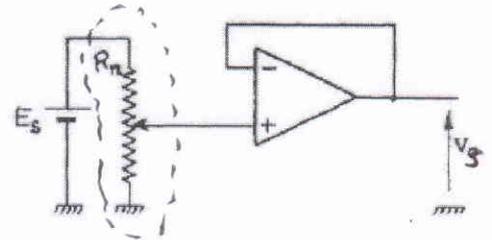
12-2) Montages de mesure :

- Amplificateur suiveur:

$$V^+ = \frac{R(l)}{R_m} \cdot E_s$$

$$V_s = V^- = V^+ = \frac{R(l)}{R_m} \cdot E_s$$

$$\Rightarrow V_s = \frac{l}{L} \cdot E_s \Rightarrow \boxed{V_s = \frac{l}{L} \cdot E_s}$$



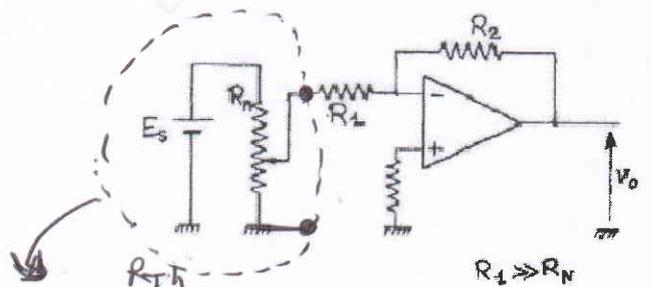
- Amplificateur inverseur:

on choisit  $R_1$  tel que  $R_1 \gg R_{Th}$

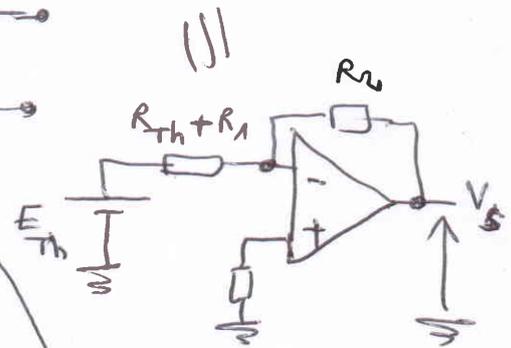
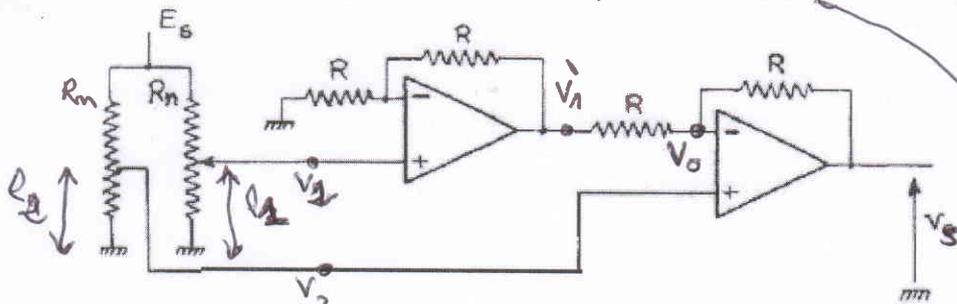
$$\Rightarrow V_s = - \frac{R_2}{R_1} \cdot E_{Th}$$

$$E_{Th} = \frac{R(l)}{R_m} \cdot E_s$$

$$\Rightarrow \boxed{V_s = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{l}{L} \cdot E_s}$$



- Montage différentiel pour la mesure de déplacement relatif:



$$V_1 = \frac{R(l_1)}{R_m} \cdot E_s = \frac{l_1}{L} \cdot E_s$$

$$V_2 = \frac{R(l_2)}{R_m} \cdot E_s = \frac{l_2}{L} \cdot E_s$$

$$V_1' = \frac{R+R}{R} \cdot V_1 \Rightarrow V_1' = 2V_1$$

$$V_o = \frac{V_1'/R + V_s/R}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{V_1' + V_s}{2}$$

$$V_o = V^- = V^+ = V_2 \Rightarrow \frac{2V_1 + V_s}{2} = V_2 \Rightarrow V_s = V_2 - V_1$$

$$\Rightarrow \boxed{V_s = \frac{l_2 - l_1}{L} \cdot E_s}$$