

# Capteurs - 6. Mise en oeuvre

PAR F. MORAIN-NICOLIER

GEII - S3  
IUT de Troyes

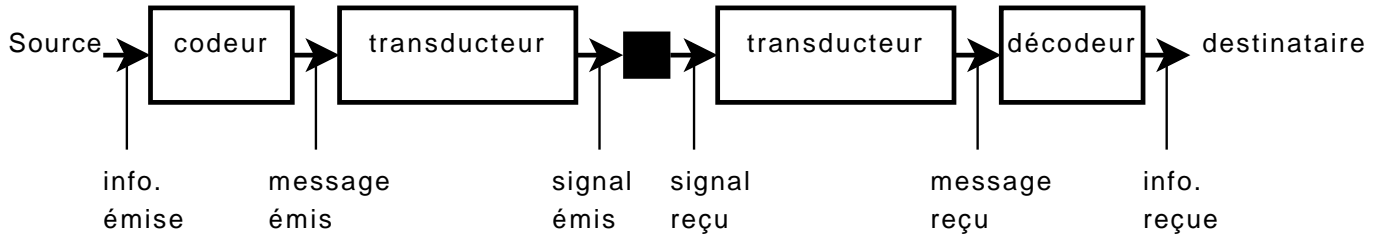
## 1. La chaîne de mesure

Un appareil de mesure comprend souvent :

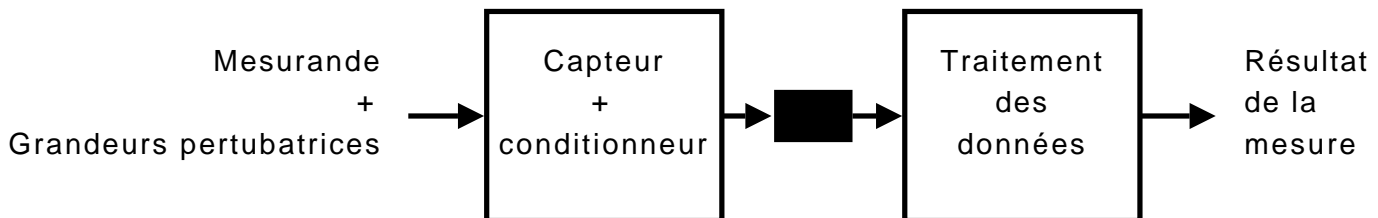
- un capteur qui communique une information
- par un canal (cable, fibre optique, ondes, ...)
- à un récepteur (affichage, carte d'acquisition)

Cet ensemble de trois éléments constitue la chaîne de mesure

### Chaîne de communication



### Synoptique d'une chaîne de mesure



- La mesure correspond à un processus de communication
- L'appareil de mesure souffre des mêmes défauts qu'une chaîne de communication :
  - limitation à certains types de signaux (étendue de mesure, bande passante, ...)
  - déformation du signal à mesurer
  - sensibilité à/introduction de bruit(s)
- **c.f. cours de traitement de l'information/du signal**

## 2. Méthodes de mesure

Il existe trois méthodes de mesure :

**Mesure par comparaison.** Utilise un étalon et procède par correspondance avec cet étalon

**Mesure par compensation.** Une grandeur variable permet d'annuler l'effet du mesurande

**Mesure différentielle.** Utilise la comparaison du mesurande par rapport à une valeur fixe. L'écart entre les deux grandeurs est mesuré

### Une mesure par comparaison : la stroboscopie

- Un stroboscope émet des éclairs espacés régulièrement dans le temps
- L'oeil sert de détecteur

Un stroboscope éclaire un phénomène périodique. Soient :

- $T_e$  : le temps entre deux éclairs
- $T$  : la période du phénomène

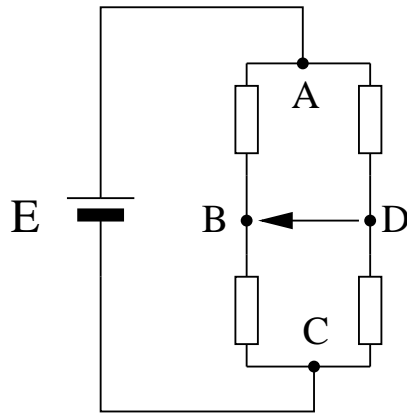
Si  $T_e = kT$ . Le phénomène *apparaît* fixe

Si  $T_e > T$ . Le phénomène *apparaît* ralenti, **dans le sens direct**

Si  $T_e < T$ . Le phénomène *apparaît* ralenti, dans le sens indirect

### Une mesure par compensation : le pont de mesure

Un pont de mesure permet la mesure de grandeurs électriques avec une grande précision

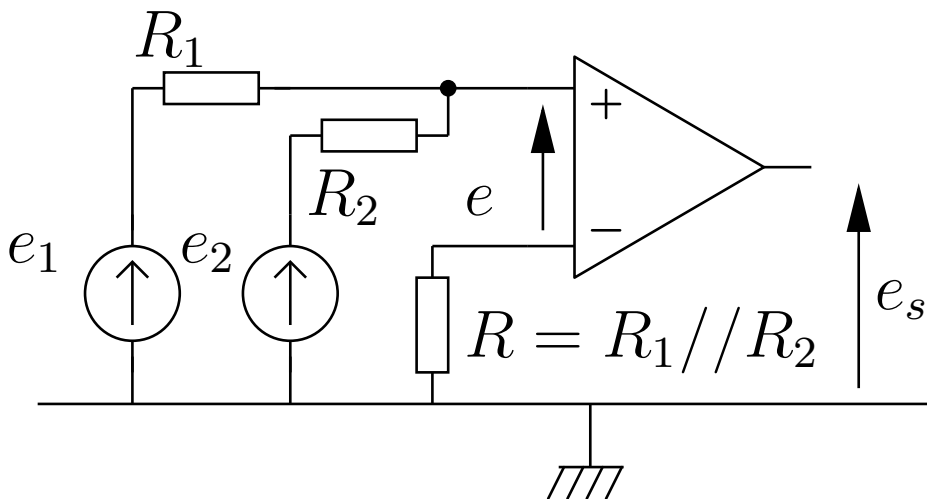


- Lorsque le pont est équilibré :

$$V_{BD} = 0 \implies Z_2 = Z_3 \frac{Z_1}{Z_4} \quad (1)$$

- Il suffit alors de choisir  $Z_3$  variable
  - Le rapport  $Z_1/Z_4$  permet alors la mesure de  $Z_2$  à l'aide de  $Z_3$  qui n'est pas du même ordre de grandeur
- Exemple : si  $Z_1/Z_4 = 10$ , on peut mesurer  $Z_2 \approx 100\text{k}\Omega$  à partir d'une résistance variable de  $10\text{k}\Omega$ .

### Une mesure différentielle : AOP en boucle ouverte

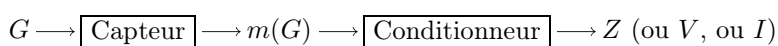


- L'AOP n'est pas branché en contre-réaction
  - il sera donc saturé
  - il bascule lorsque  $e$  change de signe
- La tension de sortie  $e_s$  bascule entre  $V_s$  et  $-V_s$  lorsque  $e$  s'annule :

$$\frac{e_1}{R_1} = -\frac{e_2}{R_2}$$

- Il suffit donc de choisir  $R_1$  et  $R_2$  en fonction de la comparaison souhaitée entre  $e_1$  et  $e_2$ .

## 3. Conditionnement des capteurs



## Qualités d'un conditionneur

### Sensibilité

$$S_{\text{global}} = \frac{dZ}{dG} = \frac{dZ}{dm(G)} \times \frac{dm(G)}{dG} \quad (2)$$

$$\Rightarrow S_{\text{capteur}} = \frac{dZ}{dm(G)} \quad (3)$$

$$S_{\text{cond.}} = \frac{dm(G)}{dG} \quad (4)$$

### Linéarité

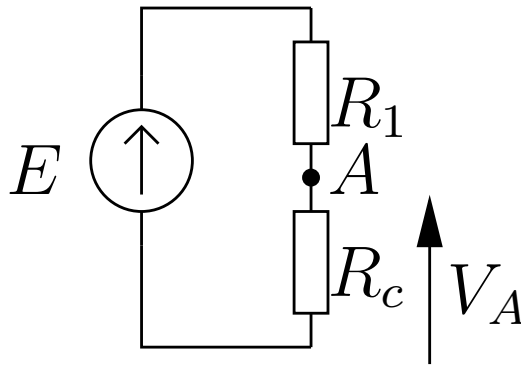
- Un conditionneur peut (éventuellement) compenser la non-linéarité d'un capteur

### Grandeurs d'influence

- (température, rayonnement E.M.)
- il est important de pouvoir éliminer l'influence de ces grandeurs ( $g_k$ )
- On cherche donc :

$$\frac{\partial Z}{\partial g_k} = 0 \quad (5)$$

### Montage potentiométrique



- La tension de sortie est :

$$V = E \frac{R_c}{R_c + R_1} \quad (6)$$

- La sensibilité est :

$$s = \frac{dV}{dR_c} = E \frac{R_1}{(R_1 + R_c)^2} \quad (7)$$

→  $V$  est très dépendante de  $E$  et n'est pas une fonction linéaire de  $R_c$

→ Linéarisation

#### 1) Fonctionnement en petits signaux

$$R_c = R_0 + \Delta R$$

$$\Rightarrow V = V_0 + \Delta V \quad (8)$$

Exprimons  $V$  :

$$V = E \frac{R_c}{R_c + R_1} = E \frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + \Delta R + R_1} \quad (9)$$

mais

$$V_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_1} \quad (10)$$

L'hypothèse « petits signaux » correspond à

$$\Delta R \ll R_0 + R_1. \quad (11)$$

Il vient donc

$$\begin{aligned} \Delta V &= V - V_0 \\ &= E \frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + \Delta R + R_1} - \frac{R_0}{R_0 + R_1} \\ &= E \frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + R_1} - \frac{R_0}{R_0 + R_1} \end{aligned}$$

au final,

$$\boxed{\Delta V = E \frac{\Delta R}{R_0 + R_1}} \quad (12)$$

⇒ Le capteur est donc linéarisé

## 2) Avec deux capteurs

Rappelons l'expression de la sensibilité :

$$s = E \frac{R_1}{(R_1 + R_c)^2}$$

Il suffit donc d'avoir (pour linéariser)

$$R_1 + R_c = \text{Cte} \quad (13)$$

Cela revient à avoir :

$$\begin{aligned} R_c + R_1 &= 2R_0 \\ \text{et } dR_1 &= -dR_c. \end{aligned} \quad (14)$$

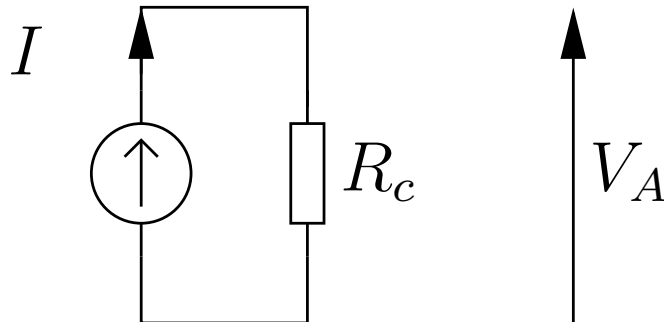
(les variations sont identiques mais de sens contraires)

La sensibilité est alors

$$\boxed{s = E \frac{1}{2R_c}} \quad (15)$$

→ cette technique permet également de rendre le montage insensible aux variations de même sens des grandeurs d'influences (ex. température)

## Montage potentiométrique avec source de courant



La tension de sortie est

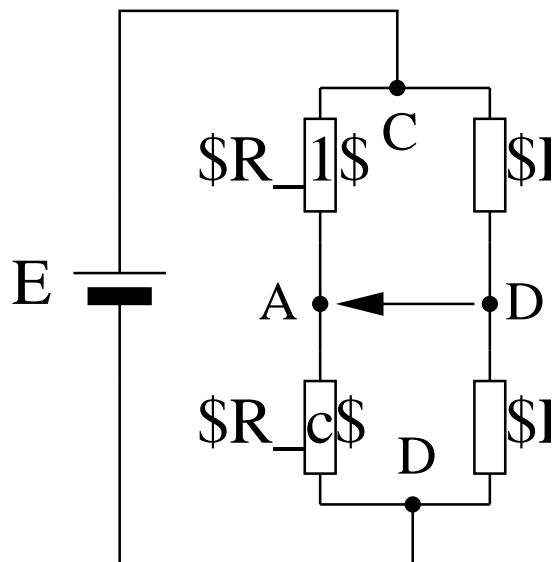
$$V_A = I \cdot R_c, \quad (16)$$

la sensibilité est donc

$$\boxed{s = I} \quad (17)$$

- Le conditionneur est linéaire
- Il est très sensible aux perturbations parasites

## Montage en pont de Wheastone



Calcul des potentiels :

$$\begin{aligned} V_A &= E \frac{R_c}{R_c + R_1} \\ V_B &= E \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \end{aligned} \quad (18)$$

On obtient une tension de mesure, appelée **tension de déséquilibre** :

$$V_m = V_A - V_B = E \frac{R_c R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_c)(R_4 + R_3)}. \quad (19)$$

Si on cherche l'équilibre :

$$\begin{aligned} V_m &= 0 \\ \Rightarrow R_c R_3 &= R_1 R_4 \end{aligned} \quad (20)$$

C'est la condition d'équilibre du pont.

**Cas  $R_1 = R_3 = R_4 = R_{c0} = R$**

- Correspond à une sensibilité maximum, les trois résistances sont égales à  $R_{c0}$ , avec

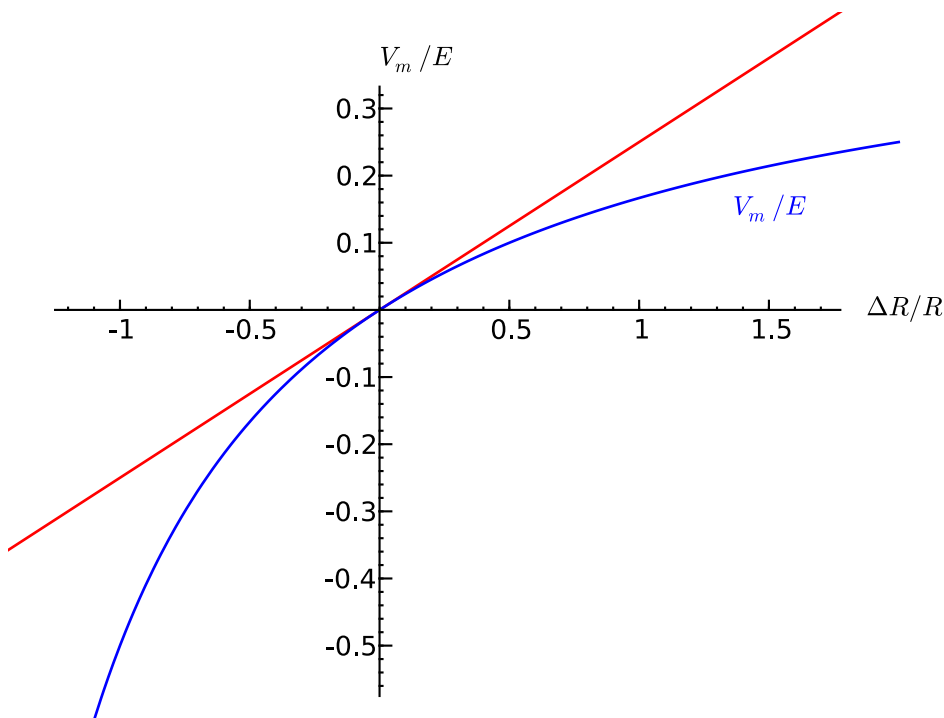
$$R_c = R_{c0} + \Delta R \quad (21)$$

On obtient alors :

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{E}{2} \times \frac{1 + \Delta R/R}{1 + \Delta R/2R} \\ V_B &= \frac{E}{2} \end{aligned} \quad (22)$$

Au final,

$$\boxed{V_m = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R/R}{1 + \Delta R/2R}} \quad (23)$$



→ Une quasi-linéarité est obtenue autour du point d'équilibre.

**En petits signaux**

$$\Delta R \ll R \quad (24)$$

alors

$$\frac{\Delta R}{R} \ll 1 \quad (25)$$

et en simplifiant,

$$\boxed{V_m = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R}{R}} \quad (26)$$

→ la mesure est donc linéaire

## 4. Méthodes de linéarisation

Si le capteur n'est pas linéaire, il existe des méthodes de linéarisation :

- linéarisation à la source du signal
- linéarisation en aval du signal

### Linéarisation à la source (en amont)

- Prépolarisation du capteur :  
décalage du point de fonctionnement vers une zone plus linéaire de l'étendue de mesure
  - Modification de l'impédance par ajout de composants fixes :  
dans sa forme la plus simple : mise en // d'une résistance fixe.
  - Association de capteurs dont les non-linéarités sont de signes opposés
  - Fonctionnement en *push-pull* de capteurs identiques  
Exemple : pont de Wheatstone
- Si ces méthodes échouent ou ne sont pas réalisables : il est nécessaire de linéariser le signal en sortie du conditionneur

### Linéarisation en aval (un exemple de)

On pose :

$v_m$ . la tension de mesure délivrée par le capteur et son conditionneur

$m$ . le mesurande

- A partir de la courbe d'étalonnage, on établit l'équation :

$$m = a_0 + a_1 v_m + a_2 v_m^2 + \dots + a_n v_m^n. \quad (27)$$

→ Les  $a_k$  sont obtenus par régression (moindres carrés) ou en résolvant  $n + 1$  équations tirées de  $n + 1$  couples de valeurs

- Le dispositif de linéarisation doit délivrer une tension  $v_l$  linéarisée, soit :

$$v_l = A \cdot m. \quad (28)$$

En remplaçant  $m$ , il vient :

$$v_l = A \cdot (a_0 + a_1 v_m + a_2 v_m^2 + \dots + a_n v_m^n). \quad (29)$$

Que l'on écrit :

$$\begin{aligned} v_l &= A_0 + A_1 v_m + A_2 v_m^2 + \dots + A_n v_m^n, \\ \text{avec } A_k &= A \cdot a_k. \end{aligned} \quad (30)$$

- Le dispositif est donc réalisable
    - analogiquement par association de multiplieurs et d'additionneurs pondérés
    - numériquement par CAN de  $v_m$ , calcul de  $v_l$ , puis éventuellement CNA.
  - Il existe d'autres méthodes de linéarisation en aval :
    - linéarisation par tabulation : numérisation de la courbe d'étalonnage, utilisation d'une EPROM,
    - linéarisation par morceaux : découpe de la courbe en segments de droite, puis interpolation linéaire
- **Il faut dans tous les cas être vigilant au temps de réponse du dispositif.**