



**Institut Supérieur d'Enseignement Technologique de Rosso**

**Support de cours**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie Electromécanique  
4ème Semestre  
Département Génie Electromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**

Année Universitaire 2019-2020



## **Plan de Cours**

**1. Chaîne d'acquisition et de contrôle d'un procédé**

**2. Grandeurs et unités de mesure**

**3. Caractéristiques d'un capteur**

**4. Qualité d'un appareil de mesure**

**5. Incertitudes**

**6. Méthodes d'évaluation des incertitudes**

**7. Capteurs passifs**

**8. Capteurs actifs**

**9. Conditionnement des capteurs passifs**

**10. Conditionnement des capteurs actifs**

**11. Etalonnage**

**12. Régression linéaire simple**

**13. Estimation par la méthode des moindres carrés**

**Cours 01**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie Electromécanique  
4em Semestre  
Département Génie Electromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**

Année Universitaire 2019-2020

## **Plan de Cours**

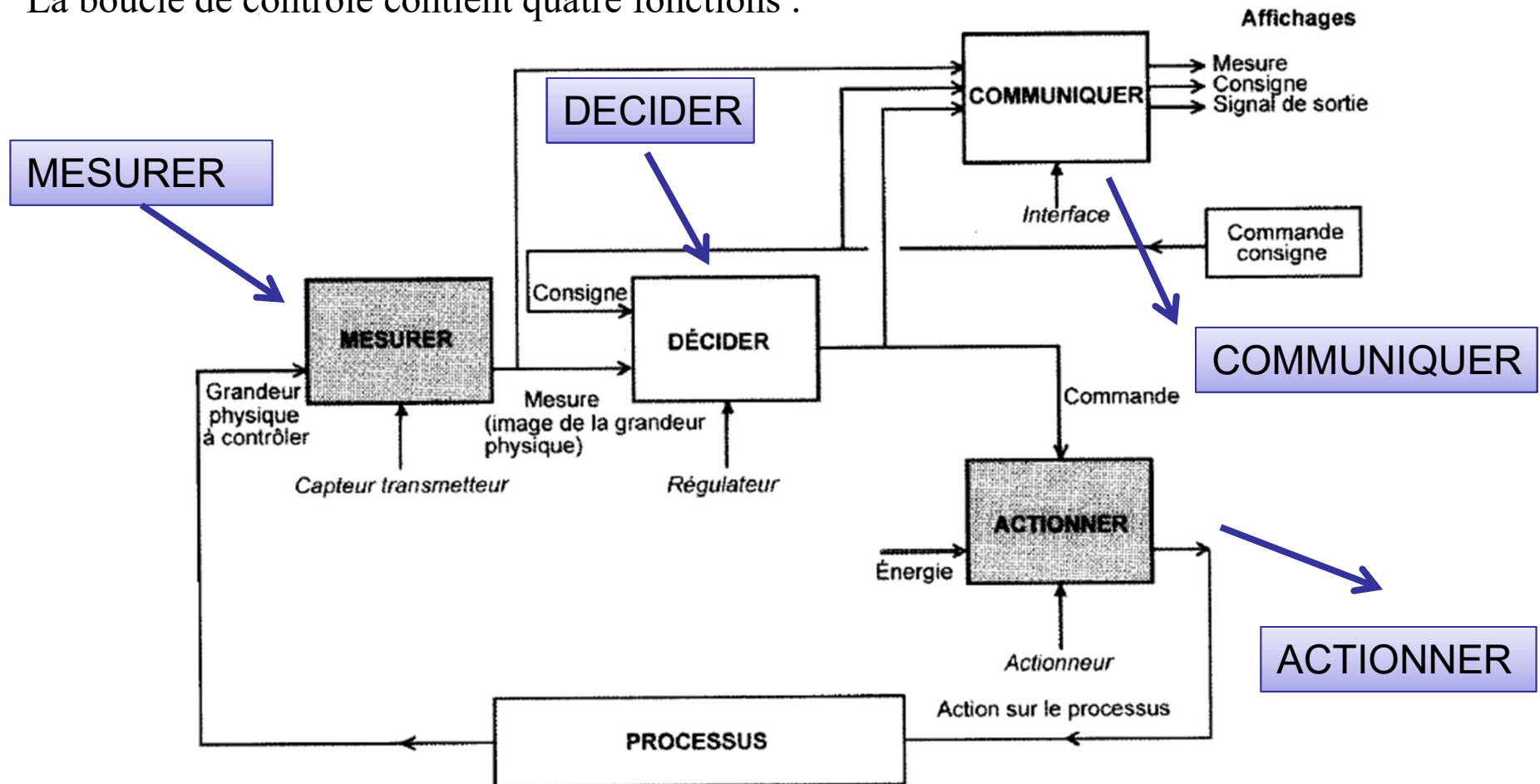
**Chaine d'acquisition et de contrôle d'un procédé**

**Grandeurs et unités de mesure**

## Cours 1

Une chaîne d'acquisition de données recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé. Elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

La boucle de contrôle contient quatre fonctions :



### Les fonctions d'une boucle

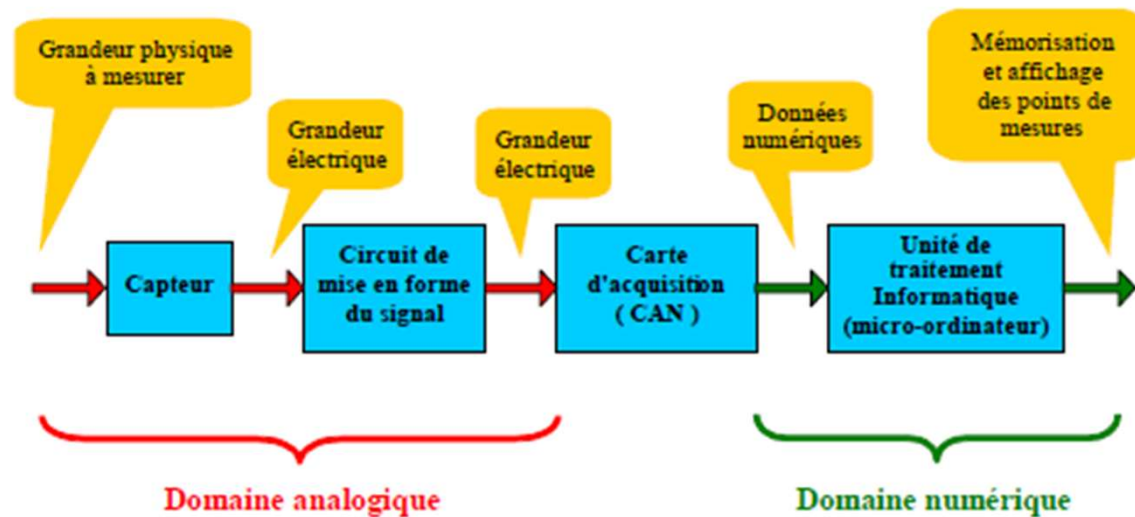
La fonction **MESURER** (assurée par un capteur) permet de connaître la valeur de la grandeur contrôlée en délivrant un signal utilisable par les fonctions situées en aval.

La fonction **DÉCIDER** (assurée par un régulateur) engendre une commande appropriée permettant de ramener en permanence la grandeur mesurée à la valeur fixée par la consigne, avec des écarts les plus réduits possibles quelles que soient les perturbations agissant sur le processus.

La fonction **ACTIONNER** (assurée par un actionneur ou organe de réglage) agit sur une grandeur de contrôle du processus capable de ramener la grandeur contrôlée à la valeur de consigne.

La fonction **COMMUNIQUER** (assurée par une interface spécifique intégrée au régulateur) permet à l'opérateur de connaître les paramètres caractérisant l'état du système, tels que mesure, consigne et signal de commande.

# Caractéristiques d'une chaîne de mesure informatisée



La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum quatre étages :

1- Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal électrique.

2- Un conditionneur de signal dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de numérisation; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.

3- Une unité de numérisation qui va échantillonner le signal à intervalles réguliers et affecter un nombre (image de la tension) à chaque point d'échantillonnage.

4- L'unité de traitement informatique peut exploiter les mesures qui sont maintenant une suite de nombres (enregistrement, affichage de courbes, traitements athématiques, transmissions des données ...).

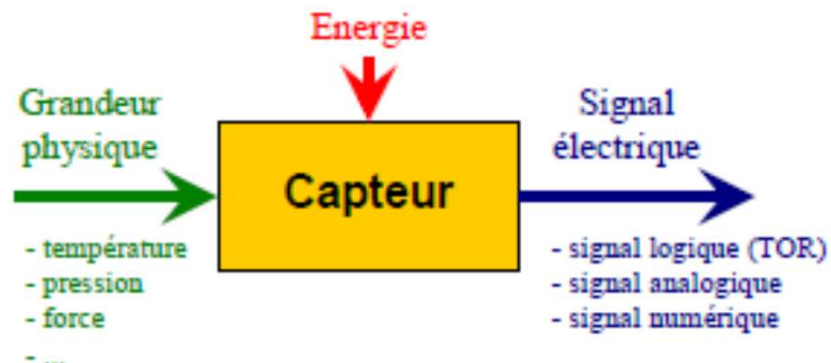


# GÉNÉRALITÉS

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de mesurer et contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

## 1- Définitions

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



### **Grandeurs physiques à mesurer**

On peut classer les grandeurs physiques à mesurer en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une de ces 6 familles :

- Mécanique : déplacement, force, masse, débit ...etc...
- Thermique : température, capacité thermique ...etc...
- Electrique : courant, tension, charge, impédance ...etc...
- Magnétique : champ magnétique, perméabilité ...etc...
- Radiatif : lumière visible, rayons X, micro-ondes ...etc...
- (Bio)Chimique : humidité, gaz ...etc...

## Grandeurs et Unités

| Grandeur de base    | Nom        | Symbole | Définition |
|---------------------|------------|---------|------------|
| Longueur            | mètre      | m       |            |
| Masse               | kilogramme | kg      |            |
| Temps               | seconde    | s       |            |
| Courant             | ampère     | A       |            |
| Température         | kelvin     | K       |            |
| Quantité de matière | mole       | mol     |            |
| Intensité lumineuse | candela    | cd      |            |

## Grandeurs et Unités

| Grandeur de base    | Nom           | Symbole | Autres unités     |
|---------------------|---------------|---------|-------------------|
| Angle plan          | radian        | rad     |                   |
| Angle solide        | stéradian     | sr      |                   |
| Fréquence           | hertz         | Hz      |                   |
| Force               | newton        | N       |                   |
| Pression            | pascal        | Pa      | N/m <sup>2</sup>  |
| Energie             | joule         | J       | N.m               |
| Puissance él        | watt          | W       | J/s               |
| Température Celsius | Degré Celsius | °C      |                   |
| Flux lumineux       | lumen         | lm      | cd.sr             |
| éclairage           | lux           | lx      | Lm/m <sup>2</sup> |

## Grandeurs et Unités

| Facteur    | Préfixe | Symbole |
|------------|---------|---------|
| $10^{+24}$ | yotta   | Y       |
| $10^{+21}$ | zetta   | Z       |
| $10^{+18}$ | exa     | E       |
| $10^{+15}$ | peta    | P       |
| $10^{+12}$ | téra    | T       |
| $10^{+9}$  | giga    | G       |
| $10^{+6}$  | méga    | M       |
| $10^{+3}$  | kilo    | k       |
| $10^{+2}$  | hecto   | h       |
| $10^{+1}$  | déca    | da      |

| Facteur    | Préfixe | Symbole |
|------------|---------|---------|
| $10^{-1}$  | déci    | d       |
| $10^{-2}$  | centi   | c       |
| $10^{-3}$  | mill    | m       |
| $10^{-6}$  | micro   | u       |
| $10^{-9}$  | nano    | n       |
| $10^{-12}$ | pico    | p       |
| $10^{-15}$ | femto   | f       |
| $10^{-18}$ | atto    | a       |
| $10^{-21}$ | zepto   | z       |
| $10^{-24}$ | yecto   | y       |

**Cours 02**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie Electromécanique  
4em Semestre  
Département Génie Electromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**

Année Universitaire 2019-2020

### **Plan de Cours**

**Caractéristiques d'un capteur**

**Qualité d'un appareil de mesure**

### **Etendue de la mesure**

Elle définit la zone dans laquelle les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données. On peut classer cette zone en trois familles :

**Zone nominale d'emploi - Zone de non-détérioration - Zone de non-destruction**

#### **Zone nominale d'emploi**

Zone dans laquelle le mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques du capteur.



### Etendue de la mesure

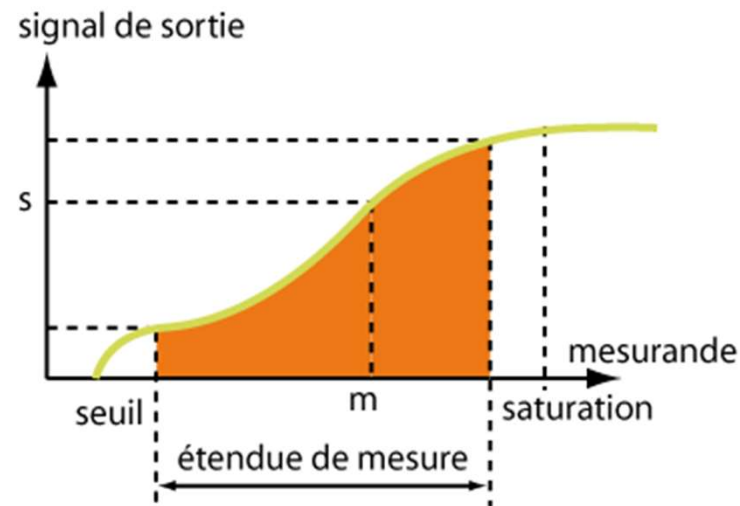
#### **Zone de non-détérioration**

Valeurs limites des grandeurs influençant le capteur (mesurande, température environnante, etc...) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

#### **Zone de non-destruction**

Elle définit les limites garantissant la non-destruction du capteur mais dans laquelle il peut y avoir des **modifications permanentes des caractéristiques du capteur**.

L'étendue de mesure est définie sur la courbe d'étalonnage du capteur (ci dessous). A l'extérieur de cette zone se trouvent deux valeurs particulières: le seuil et la saturation.

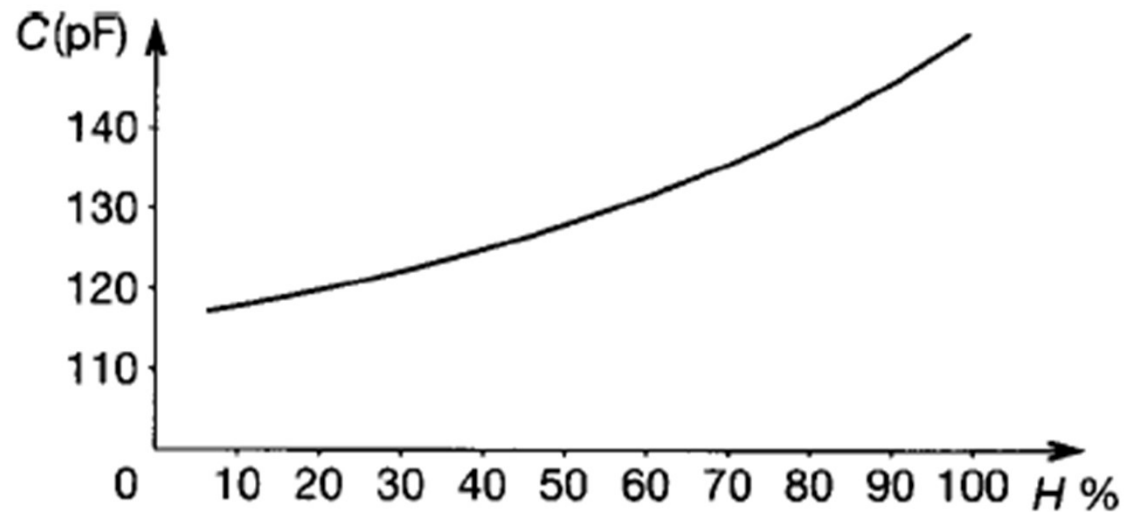


### Résolution

Elle correspond à la plus petite variation du mesurande que le capteur est susceptible de détecter.

### Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur

Elle donne la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée.



Exemple de caractéristique d'un capteur d'humidité du type capacitif.

### Sensibilité

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné.

$$\text{Sensibilité} = \frac{d(\text{Grandeur de sortie})}{d(\text{mesurande})} \bigg|_{\text{Ptd'étude}}$$

Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante.

C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur.

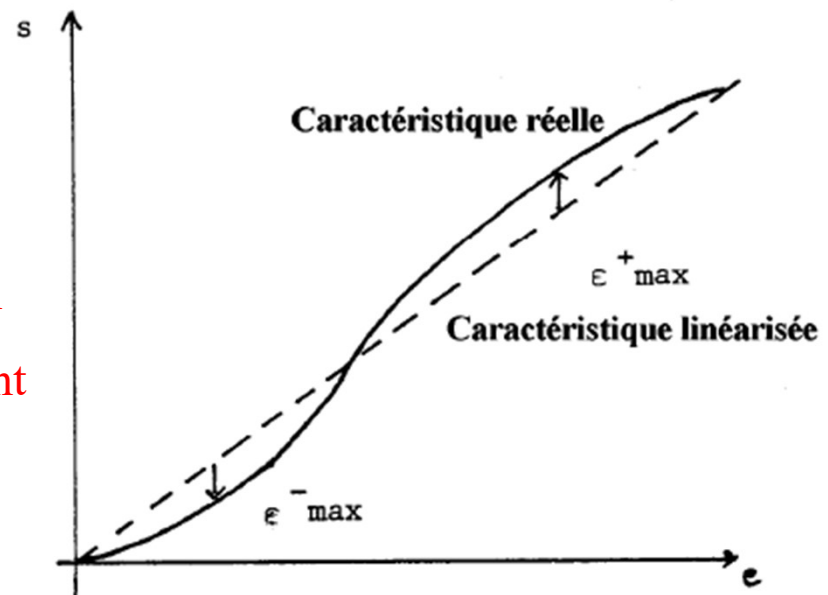
Dans l'exemple précédent, la sensibilité moyenne du capteur est de 0.4pF/%H.

## Linéarité

Zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande. Un capteur est dit "linéaire" lorsque sa sensibilité est constante sur l'étendue de mesure.

Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple par la méthode des moindres carrés.

On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité qui exprime en % l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite approchant la courbe.



## **Finesse**

C'est la qualité d'un capteur à ne pas venir modifier par sa présence la grandeur à mesurer.

## **Rapidité**

C'est la qualité d'un capteur à suivre les variations du mesurande. On peut la chiffrer de plusieurs manières :




- bande passante du capteur. (à  $-3$  dB par exemple).
- Fréquence de résonance du capteur.
- Temps de réponse (à  $x\%$ ) à un échelon du mesurande.

Exemple

| CARACTERISTIQUES            |  |  |   |                          |
|-----------------------------|--|--|---|--------------------------|
|                             | Unités                                     | Gamme de mesure                          | Précision   | Résolution               |
| <b>Vitesse Air</b>          | m/s,<br>km/h,<br>mph,<br>noeuds,<br>ft-min | de 1.4 à 108.0<br>km/h<br>(0.4 à 30 m/s) | $\leq 20$ m/s: $\pm 3\%$ lecture<br>$> 20$ m/s: $\pm 4\%$ lecture                   | 0.1<br>(sauf Ft-min : 1) |
| <b>Eclairement lumineux</b> | lux,<br>Ft-Cd                              | 0 - 20000 lux                            | $\pm 5\%$ lecture $\pm 8$   | 1                        |
| <b>Température</b>          | $^{\circ}\text{C}$ ,<br>$^{\circ}\text{F}$ | -100 à 1300 $^{\circ}\text{C}$           | $\pm (1\% \text{ lecture} + 1^{\circ}\text{C})$                                     | 0.1                      |
| <b>Humidité relative</b>    | %HR  | 10 - 95% HR                              | $< 70\%$ HR : $\pm 4\%$ , pour<br>$\geq 70\%$ HR : $\pm (4\%$<br>lecture + 1.2% HR) | 0.1                      |

Instrument portatif 4 en 1:  
anémomètre, luxmètre,  
thermomètre, hygromètre.

## Exemple

| Modèles  | Application                            | Type de contact     | Gamme de mesure |
|--|--|---------------------|-----------------|
| <b>905-T1</b><br>           | Contrôle de température en laboratoire | Pointe              | -50 / +500°C    |
| <b>Mini thermomètre</b><br> | Mesure de surface                      | Pastille diam. 14mm | -50 / +250°C    |
| <b>905-T2</b><br>         | S'adapte à tout type de surface        | Lamelles souples    | -50 / +500°C    |



### La qualité d'un appareil de mesure

Le choix de l'instrument de mesure dépend de la précision attendue sur la valeur de la grandeur.

Citons trois qualités importantes ( ce ne sont pas les seules...) :

**La Fidélité**

**La Justesse**

**La Précision**

### La Fidélité

Fidélité (d'un instrument de mesure): aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure



$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \langle m \rangle)^2}{n - 1}}$$

QUALITE LIEE A L'ECART TYPE D'UNE SERIE DE MESURES

### La Justesse

Justesse (d'un instrument de mesure): aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.



$$\langle m \rangle = \frac{\sum_i m_i}{n}$$

QUALITE LIEE A LA VALEUR MOYENNE D'UNE SERIE DE MESURES

### La Précision

Précision (d'un instrument de mesure) : aptitude d'un instrument de mesure à donner une indication très proche de la valeur vraie de la grandeur



QUALITE LIEE A L'ECART RELATIF

**Cours 03**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie Electromécanique  
4em Semestre  
Département Génie Electromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**

Année Universitaire 2019-2020

## **Plan de Cours**

**Incertitudes**

**Méthodes d'évaluation des incertitudes**

### Erreur de mesure

L'erreur de mesure est la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence. Si la valeur de référence est la valeur vraie du mesurande, l'erreur est inconnue.

$$E_r = m - M_{\text{vrai}}$$

### Notion d'erreur aléatoire.

Si on effectue N mesures dans des conditions de répétabilité, le meilleur estimateur de la valeur du mesurande est la valeur moyenne  $\langle m \rangle$  de N mesures. Mais une mesure  $m_i$  parmi les N est en général différente de  $\langle m \rangle$ .

**La différence  $E_{ra} = m_i - \langle m \rangle$  est appelée erreur aléatoire.**

### La notion d'erreur systématique

**Par définition, l'erreur systématique est  $E_{rs} = \langle m \rangle - M_{vrai}$ .**

Lors d'une mesure, l'erreur aléatoire peut prendre, au hasard, n'importe quelle valeur sur un certain intervalle. Par contre, l'erreur systématique prend la même valeur (inconnue) lors de chaque mesure.

### Fidélité et justesse

Si l'on reprend les définitions et les notations précédentes, on obtient :

$$E_r = m - M_{vrai} = (m - \langle m \rangle) + (\langle m \rangle - M_{vrai}) = E_{ra} + E_{rs}$$

Une erreur de mesure  **$E_r$**  a donc, en général, deux composantes : une erreur aléatoire  **$E_{ra}$**  et une erreur systématique  **$E_{rs}$** . L'estimation de l'erreur systématique est appelée erreur de justesse.

La fidélité d'un instrument de mesure est son aptitude à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions. La justesse d'un instrument de mesure est son aptitude à donner des indications exemptes d'erreur systématique.



### **Notion d'incertitude de mesure**

L'incertitude de mesure  $\Delta M$  est un paramètre, associé au résultat du mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au Mesurande.

$$M = m \pm \Delta M$$

### **Méthodes d'évaluation des incertitudes:**

L'évaluation des incertitudes par des méthodes statistiques est dite de type A. Quand la détermination statistique n'est pas possible, on dit que l'évaluation est de type B. C'est le cas d'une mesure unique  $m$  réalisée avec un appareil de classe connue.

### **Incertitude absolue**

L'incertitude absolue  $\Delta M$  est l'erreur maximale que l'on est susceptible de commettre dans l'évaluation de  $M$ . L'incertitude absolue s'exprime donc dans les unités de la grandeur mesurée..

$$\Delta M = \text{abs} (M_{\text{vrai}} - \langle M_{\text{min}}, M_{\text{max}} \rangle)$$

### **Incertitude relative**

Par définition l'incertitude relative est le quotient de l'erreur absolue à la valeur vraie :  $\Delta M / M_{\text{vrai}}$  qui est sans dimension et s'exprime souvent en pourcents.

### Évaluation de type A

Dans les cas de plusieurs mesures indépendantes, l'incertitude se calcule à l'aide de l'écart-type d'ordre  $n-1$  (appelé encore écart type de l'échantillon). On prend alors comme valeur de  $m$ , la moyenne des mesures.

**La valeur moyenne**

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_i m_i}{n}$$

**L'écart type**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \langle m \rangle)^2}{n-1}}$$

## Limite de confiance

On peut approfondir la signification statistique de l'écart type (par exemple pour exprimer la précision) à condition d'y associer une limite de confiance (LC). La limite de confiance définit un intervalle de confiance dans lequel la valeur réelle a p % de chance de se trouver.

A une limite de confiance de p % correspond l'intervalle

$$\langle m \rangle \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

où t est le t statistique ou *t de Student*. On trouve dans les ouvrages de statistique des tableaux complets donnant t en fonction de N et des limites de confiance.

| Nombre de mesures N | Facteur p pour les limites de confiance |      |      |       |
|---------------------|---|------|------|-------|
|                     | 80%                                     | 90%  | 99%  | 99,9% |
| 2                   | 3,08                                    | 6,31 | 63,7 | 637   |
| 3                   | 1,89                                    | 2,92 | 9,92 | 31,6  |
| 4                   | 1,64                                    | 2,35 | 5,84 | 12,9  |
| 5                   | 1,53                                    | 2,13 | 4,60 | 8,60  |
| 6                   | 1,48                                    | 2,02 | 4,03 | 6,86  |
| 10                  | 1,38                                    | 1,83 | 3,25 | 4,78  |
| 15                  | 1,34                                    | 1,76 | 2,98 | 4,14  |
|                     | 1,29                                    | 1,64 | 2,58 | 3,29  |

## Exemple d'évaluation des incertitudes de type A :

Dans les cas de plusieurs mesures indépendantes, l'incertitude se calcule à l'aide de l'écart-type d'ordre n-1. On prend alors comme valeur de g, la moyenne des mesures

| Numéro de la mesure | 1  | 2  | 3    | 4     | 5     | 6     | 7     |
|---------------------|----|----|------|-------|-------|-------|-------|
| Valeur (g)          | 10 | 11 | 10,5 | 11,25 | 10,25 | 11,75 | 10,75 |

La valeur moyenne  $\langle g \rangle$

$$\langle g \rangle = (10+11+10,5+11,25+10,25+11,75+10,75)/7$$

$$\langle g \rangle = 10,7857143$$

L'écart type

$$\sigma = \sqrt{\frac{(g_1 - g_0)^2 + (g_2 - g_0)^2 + (g_3 - g_0)^2 + (g_4 - g_0)^2 + (g_5 - g_0)^2 + (g_6 - g_0)^2 + (g_7 - g_0)^2}{6}}$$

$$\sigma = 0,60257384$$

### Estimation de l'erreur à 90%

N = 7 donc le t = 4,03

$$g = \langle g \rangle \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$g = 10,7857143 \pm 4,03 (0,60257384/2,645)$$

$$g = 10,785 \pm 0,918$$

$$\text{L'incertitude relative} = 0,918 / 10,785 = 0,0851$$

En pourcentage  
8,51%

**Cours 04**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie Electromécanique  
4em Semestre  
Département Génie Electromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**

## **Plan de Cours**

**Capteurs passifs**

**Capteurs actifs**



### Les capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédances (résistance, inductance, capacité) dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée.

La variation d'impédance résulte :

- d'une variation de dimension du capteur (capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile).
- d'une déformation résultant d'une force ou d'une grandeur s'y ramenant (pression, accélération). Exemples : armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable.

## Les capteurs passifs

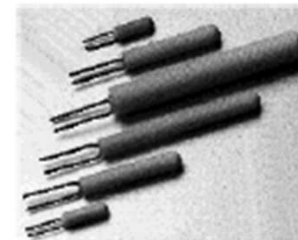
| Grandeur mesurée    | Caractéristique électrique sensible | Types de matériaux utilisés                                  |
|---------------------|-------------------------------------|--|
| Température         | Résistivité électrique              | Platine, Nickel, cuivre ...                                  |
| Rayonnement optique | Résistivité électrique              | Semi-conducteur  |
| Déformation         | Résistivité électrique              | Alliage de Ni, Si dopé                                       |
| Déformation         | Perméabilité magnétique             | Alliage ferromagnétique                                      |
| Position            | Résistivité électrique              | Matériaux magnétorésistants<br>(Bismuth, antimoine d'indium) |
| Humidité            | Résistivité électrique              | Chlorure de lithium  |

### Les capteurs à résistance métallique

$R=R_0(1+aT)$  avec  $a=3.85 \cdot 10^{-3} \text{°C}^{-1}$  pour le platine (petites variations de  $T > 0 \text{°C}$  car en réalité  $R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T-100)T^3)$  ).

Le type le plus courant, appelé «Pt100», a une résistance de 100Ω à 0°C et 138,5Ω à 100°C (variation quasi linéaire entre -200 et 800°C).

La précision de la mesure dépend de la sonde mais aussi de l'électronique de détection et du couplage mécanique et thermique entre la sonde et le milieu étudié qui peut entraîner une erreur de plusieurs degrés.



### Les thermistances

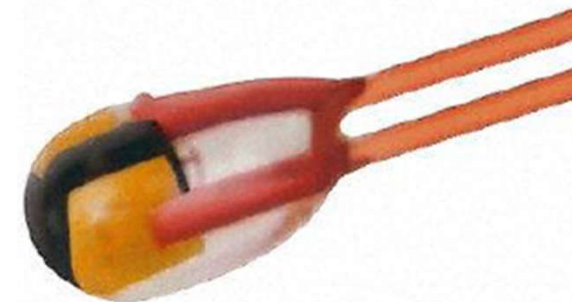
Mélanges d'oxydes métalliques. Leur résistance décroît avec la température selon une loi du type :

$$R(T) = R_0 \exp ( B (1/T - 1/T_0) )$$

avec T en K. (et B entre 3000 et 5000K).

Les thermistances sont généralement utilisables jusqu'à environ 300°C. Mais du fait de la forme de leur réponse, elle ne sont utilisées que sur une faible plage de température (100°C) où elles sont très sensibles (sensibilité environ 10 fois supérieure aux sondes métalliques).

Thermistance de précision à capsule de verre



### Mesure de la pression: Les capteurs à membrane

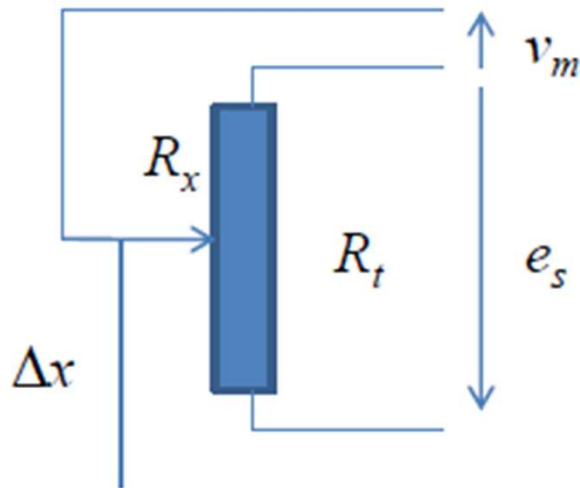
Le corps d'épreuve d'un capteur de pression est l'élément assurant la transformation de la pression en déplacement, déformation ou force (membrane).

Les différents capteurs à membrane sont :

- Les capteurs potentiométriques
- Les capteurs à jauges extensométriques,
- Les capteurs capacitifs,
- Les capteurs à fibres optiques,
- Les capteurs à variation d'inductance.

## Mesure de la pression: Les capteurs à membrane: Capteurs potentiométriques

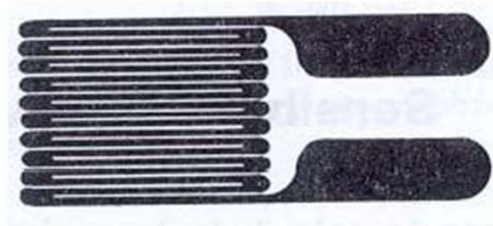
Le curseur d'un potentiomètre est lié à une membrane. La déformation de la membrane entraîne un déplacement  $\Delta x$  du curseur.



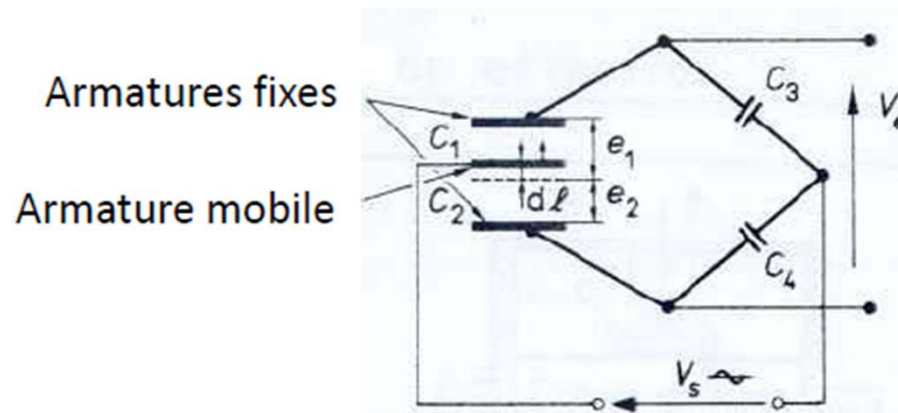
$$v_m = e_s \frac{R_x}{R_t}$$

### **Mesure de la pression: Les capteurs à membrane: Capteurs à jauge extensométrique**

Les jauges sont des éléments résistifs collés sur le corps d'épreuve assurant la conversion directe d'une déformation  $\varepsilon$  de la structure, en variation de résistance électrique  $\Delta R$ .



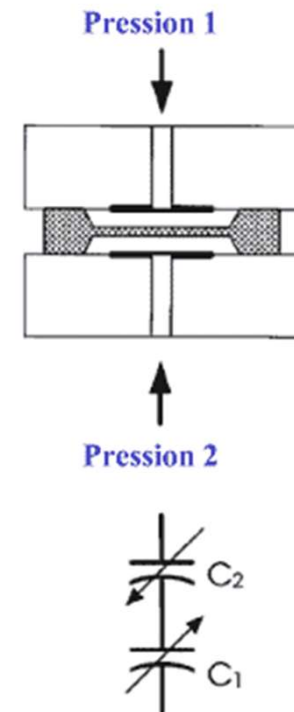
## Mesure de la pression: Les capteurs à membrane: Capteurs capacitifs



Capteur capacitif associé à un pont de Wheastone

Quand  $dl=0$ , le pont est équilibré ( $V_s=0$ )

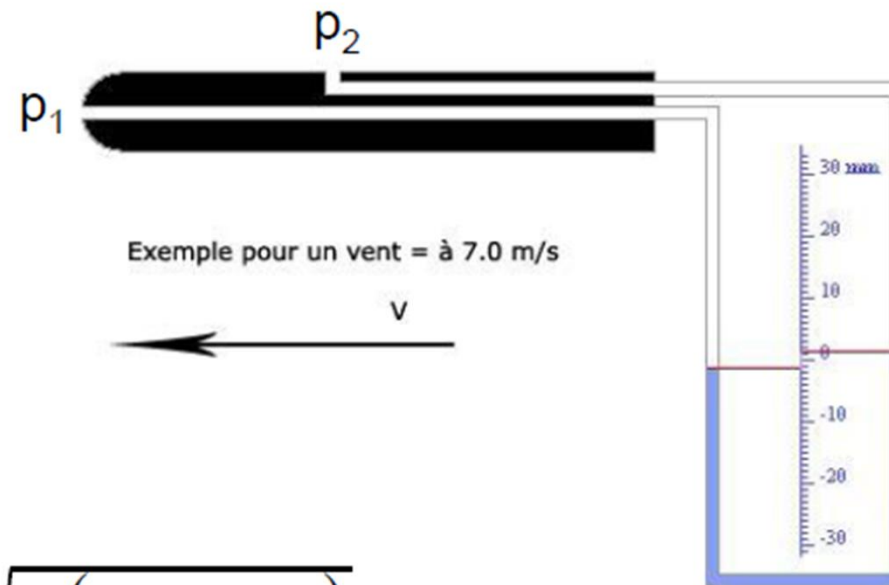
Variation possible de  $e$ ,  $S$  ou  $e$





## Mesure de vitesse d'un fluide

Tube de Pitot



$$U = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Ce dispositif est toujours utilisé pour déterminer la vitesse des aéronefs.

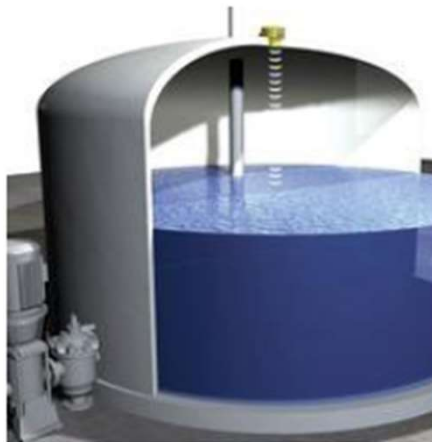
### Mesure de niveau

#### -Capteurs de niveau capacitifs

- Principalement pour les produits non conducteurs (pétrole, huile ...)
- Variation de la capacité électrique (par l'intermédiaire de la constante diélectrique)

#### -Capteurs de niveau à ultrason

- Pour tous produits solides, liquides ou pâteux à toutes températures et jusqu'à des pressions de 40 bars
- Emission et réception d'une onde ultrasonore qui se réfléchit sur la surface du produit



### Les Capteurs actifs

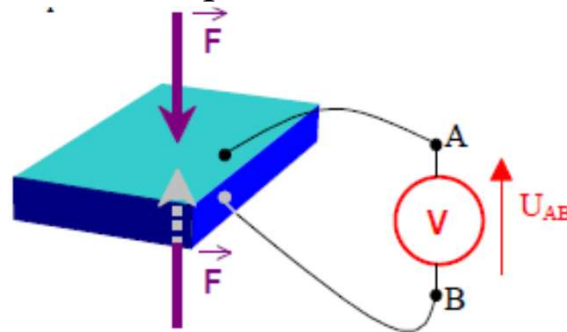
Fonctionnant en **générateur**, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

Le modèle électrique de ce type de capteur que l'on nomme aussi transducteur est un générateur équivalent soit de Thévenin pour les tensions, soit de Norton pour les courants.

#### I-CAPTEURS À EFFET PIÉZOÉLECTRIQUE

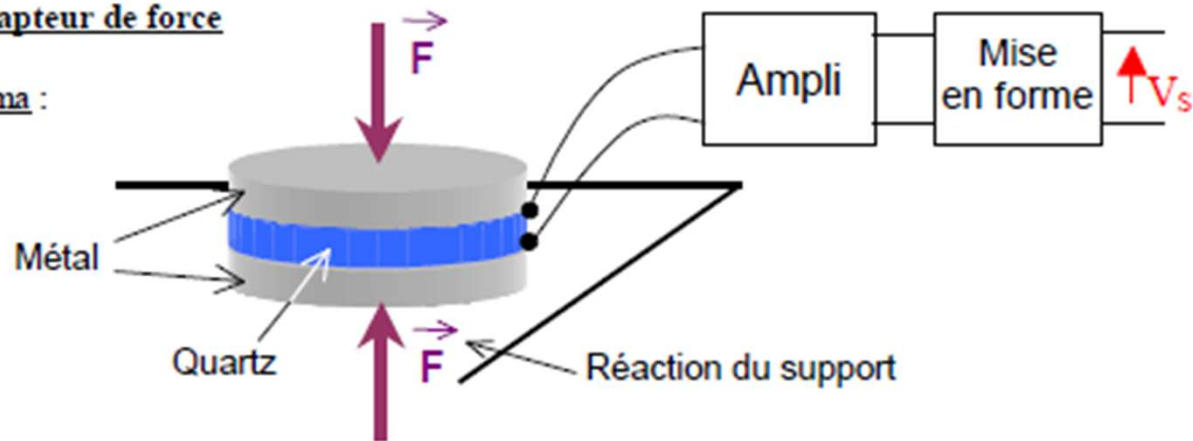
##### 1- Effet piézoélectrique

Une force appliquée à une lame de quartz induit une déformation qui donne naissance à une tension électrique.



### 2- Capteur de force

Schéma :



La tension  $V_s$  de sortie sera proportionnelle à la force  $F$  :  $V_s = k.(F+F) = 2k.F$  avec  $k$  constante.

### 3- 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 :

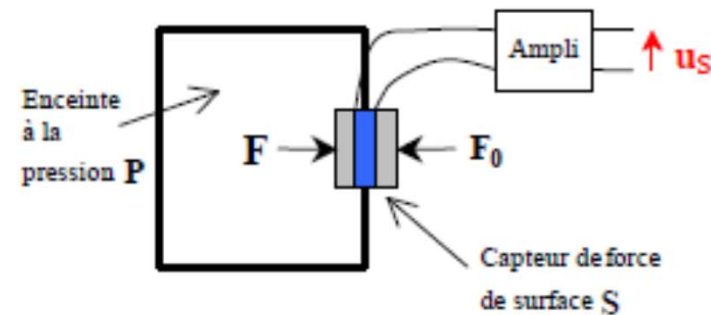
$$P = \frac{F}{S}$$

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  $P_0$ ).

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

Donc  $u_s = k.S ( P + P_0 ) = k' ( P + P_0 ) = k' ( P + P_0 )$  .

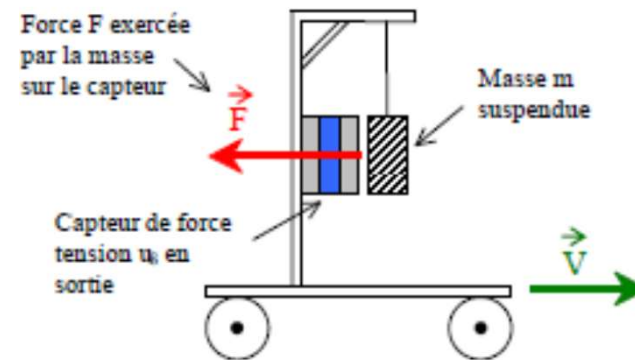
Il s'agit ici d'un capteur de pression qui mesure la somme de la pression extérieure  $P_0$  et de la pression de l'enceinte  $P$ .



### 4- Capteur d'accélération

L'augmentation de vitesse  $V$  du véhicule donne une accélération  $a$  qui induit une force  $F$  exercée par la masse sur le capteur.

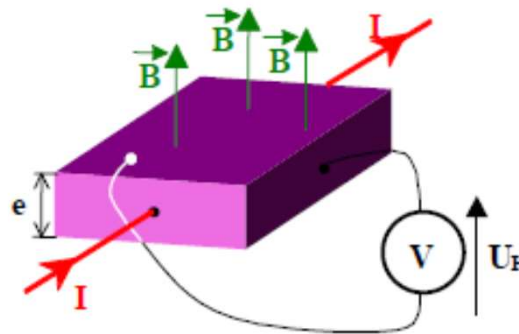
On a donc :  $F = m.a$  mais  $u_s = 2k.F$



### II-CAPTEURS À EFFET HALL

#### 1- L'effet Hall

Un barreau de semi-conducteur soumis à un champ magnétique uniforme  $B$  et traversé par un courant  $I$ , est le siège d'une force électromotrice  $U_H$  sur deux de ses faces.



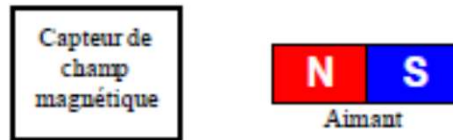
La tension de Hall  $U_H$  est définie par la relation ci-dessous :

$$U_H = R_H \frac{IB}{e}$$

Si on maintient le **courant  $I$  constant**, on a donc une tension  $U_H$  **proportionnelle au champ magnétique  $B$**  :  $U_H = k.B$

### Capteur de proximité

Le capteur détecte l'approche de l'aimant placé au préalable sur un objet.

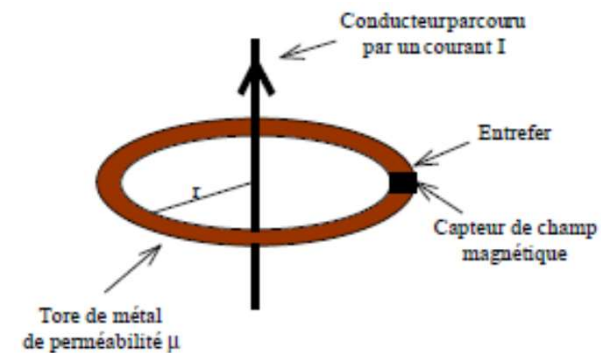


### Mesure de l'intensité d'un courant électrique sans "ouvrir" le circuit

Le courant  $I$  crée un champ magnétique proportionnel à ce courant :  $B = \frac{\mu I}{2\pi r}$

Le capteur donne une tension  $U_s = k.B = k'.I$  avec  $k$  et  $k'$  constantes.

C'est le principe des pinces ampérométriques (mesure de forts courants de 1000A et plus).



**Cours 05**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie électromécanique  
4em Semestre  
Département Génie électromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**



## **Plan de Cours**

**Conditionnement des capteurs passifs**

**Conditionnement des capteurs actifs**

## Conditionnement

❖ Quand un capteur fournit une information électrique, la plupart du temps, le signal est inexploitable directement (tension ou courant trop faible, bruit...).

❖ Il faut donc mettre en forme ce signal afin qu'il soit exploitable. Cette tâche est réalisée par des dispositifs d'amplification ou de conversion  $I \rightarrow V$ ,  $Q \rightarrow V$ ...

## Conditionnement des capteurs passifs

$$\diamond U_D = U_{AC} R_2 / (R_1 + R_2)$$

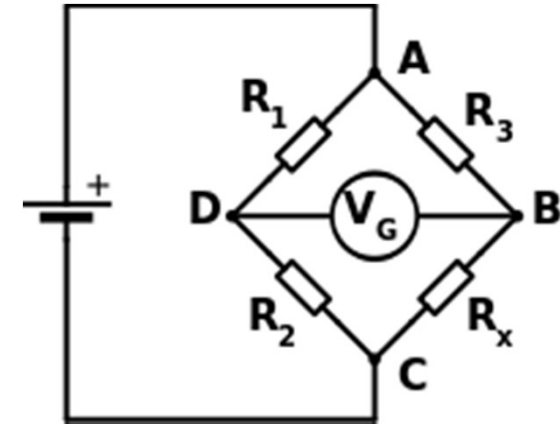
$$\diamond U_B = U_{AC} R_x / (R_3 + R_x)$$

Ajustons  $R_2$  de façon à annuler le courant dans le galvanomètre

$$\diamond R_x = R_2 R_3 / R_1$$

❖ Il suffit de choisir  $R_2$  variable et le rapport  $R_3/R_1$  permet la mesure de  $R_x$  à l'aide d'une résistance  $R_2$  qui n'est pas du même ordre de grandeur.

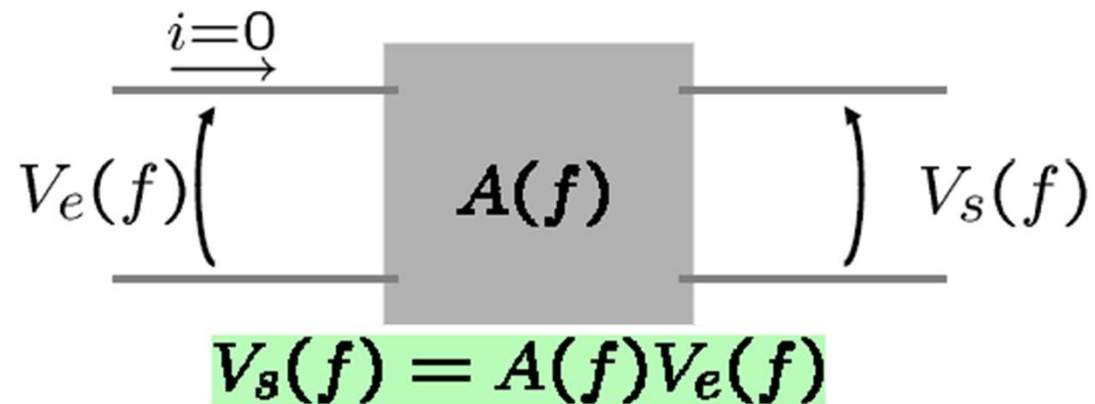
❖ Si  $R_3/R_1 = 10$ , on pourra mesurer  $R_x \approx 100\text{k}\Omega$  à partir d'une boîte de résistances étalonnées jusqu'à  $10\text{k}\Omega$ .



## Conditionneurs des capteurs actifs: Amplificateur Idéal

Système linéaire caractérisé par une fonction de transfert :  $A(f)$

Avec un gain  $G = |A(f)| \geq 1$

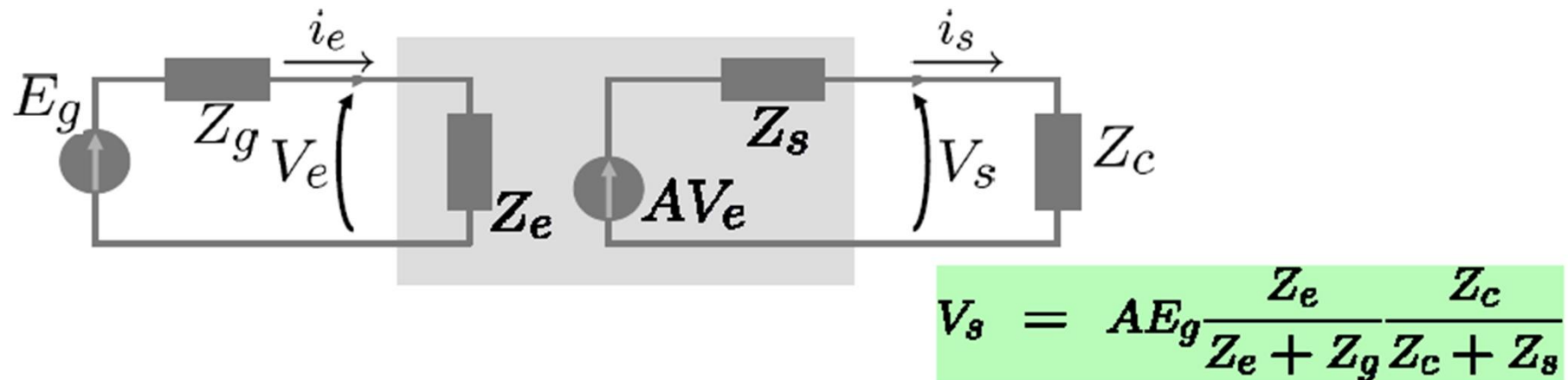
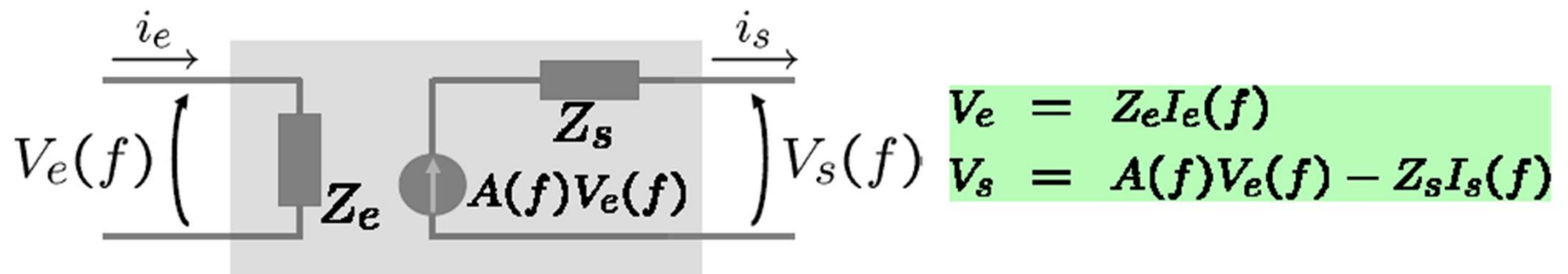


Le courant d'entrée est nul

La sortie est une tension d'entrée parfaite

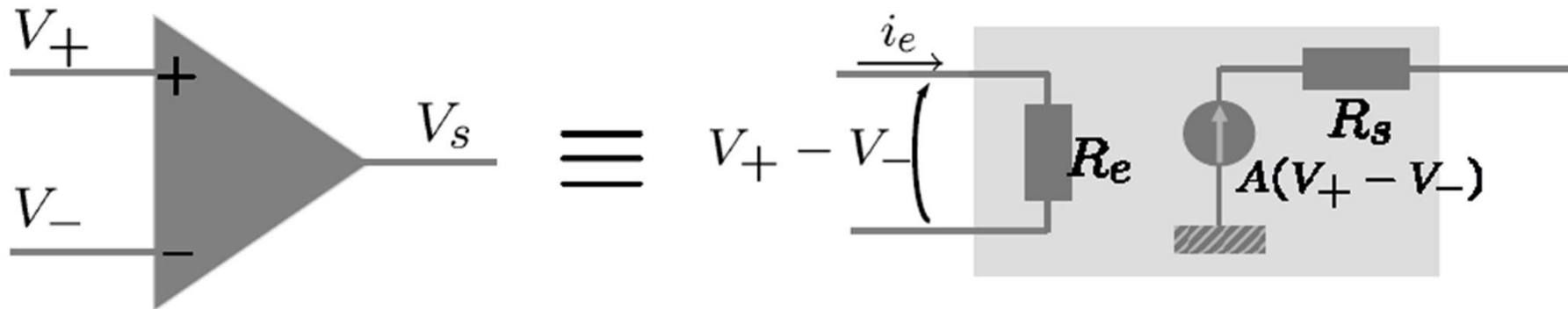
## Amplificateur réel

Amplificateur non Idéal (modèle linéaire):



## Amplificateur Opérationnel:

Amplificateur opérationnel idéal :



$$\left. \begin{array}{l} A \rightarrow \infty \\ R_e \rightarrow \infty \\ R_s \rightarrow 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_+ - V_- \rightarrow 0 \\ i_e \rightarrow 0 \end{array} \right.$$

## Amplificateur Opérationnel:

Amplificateur Opérationnel réel:

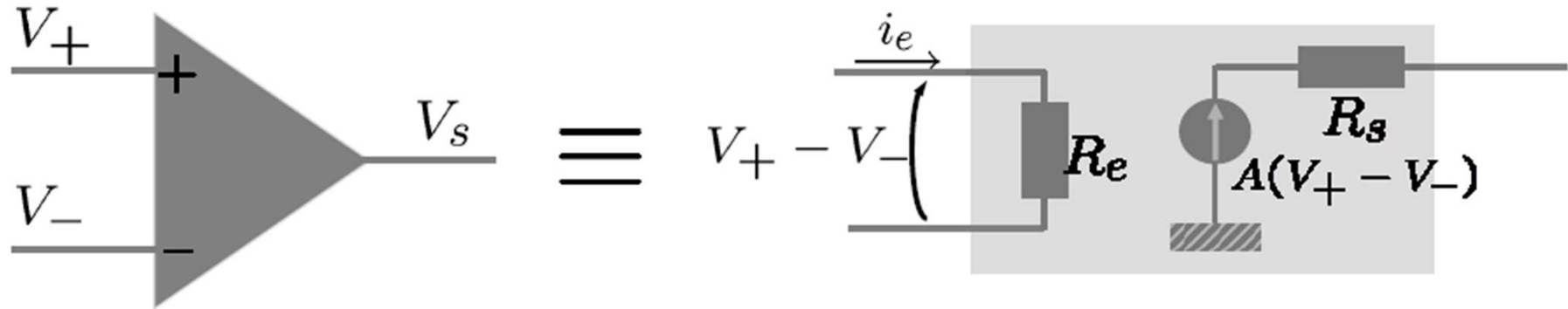
$$A = \text{fini}$$

$$R_e = \text{fini}$$

$$R_s \neq 0$$

$$V_{offset} \neq 0$$

## Amplificateur Opérationnel:



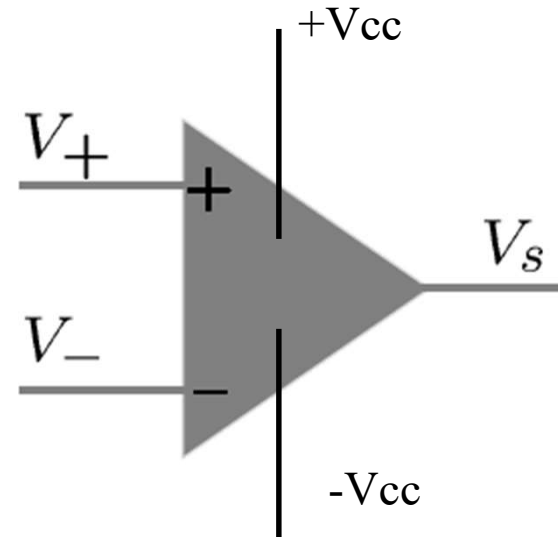
Off set

Quand  $V_+ = V_-$ ,  $V_s = V_{offset} \neq 0$

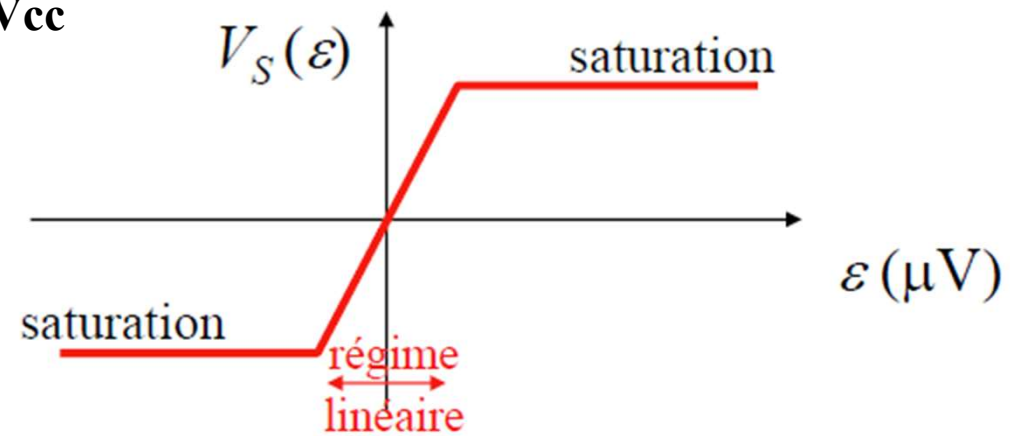
$$V_s = A(V_+ - V_-) + V_{offset}$$



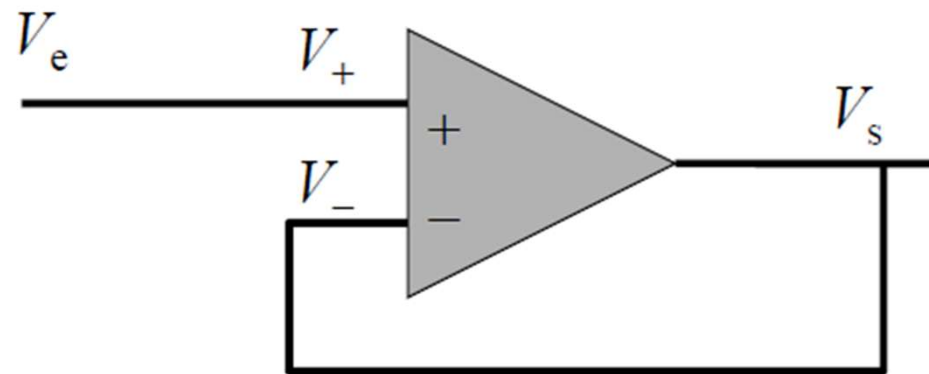
## Dynamique d'un amplificateur Opérationnel:



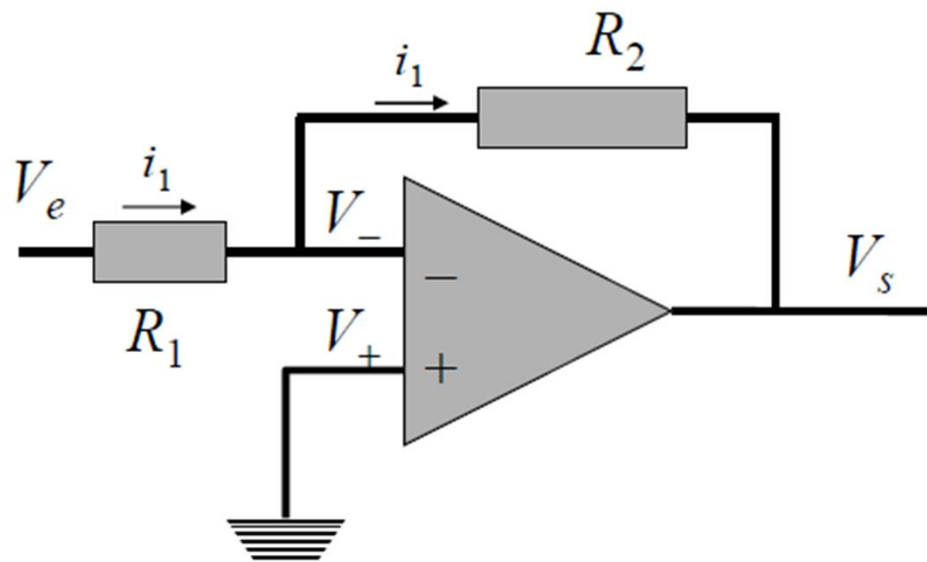
Cette dynamique est limitée par les tension d'alimentation  $+V_{cc}$  et  $-V_{cc}$



## Ampli suiveur

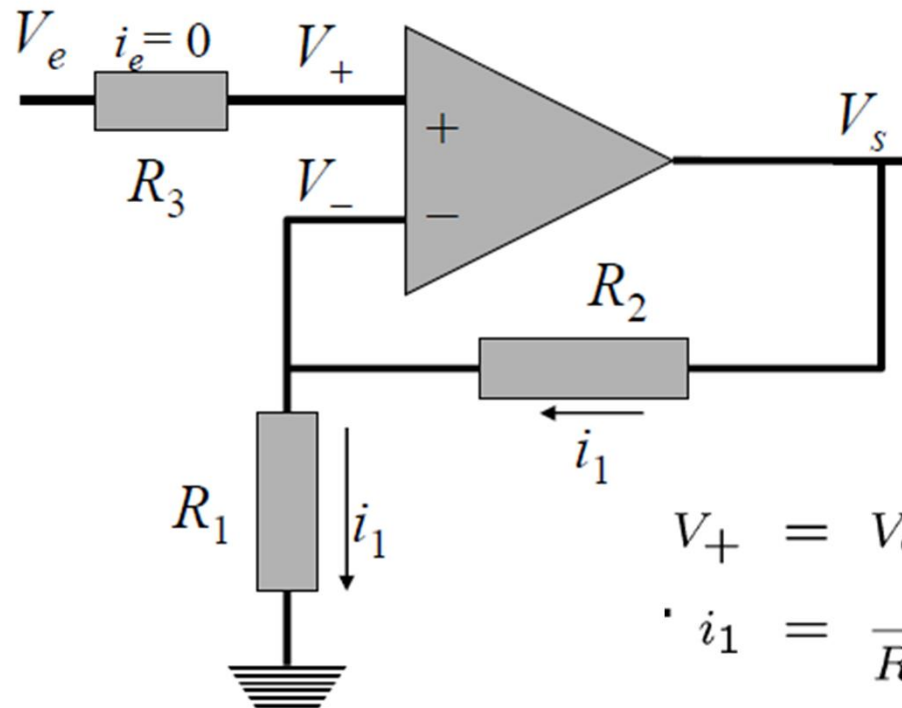


## Ampli inverseur



$$G = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

## Ampli non inverseur



$$V_+ = V_e = V_- \quad (\epsilon = 0 \text{ et } i_e = 0)$$

$$i_1 = \frac{V_s}{R_1 + R_2} ; V_- = R_1 i_1 = \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_2}$$

$$V_+ = V_- = R_1 i_1 = \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_2}$$

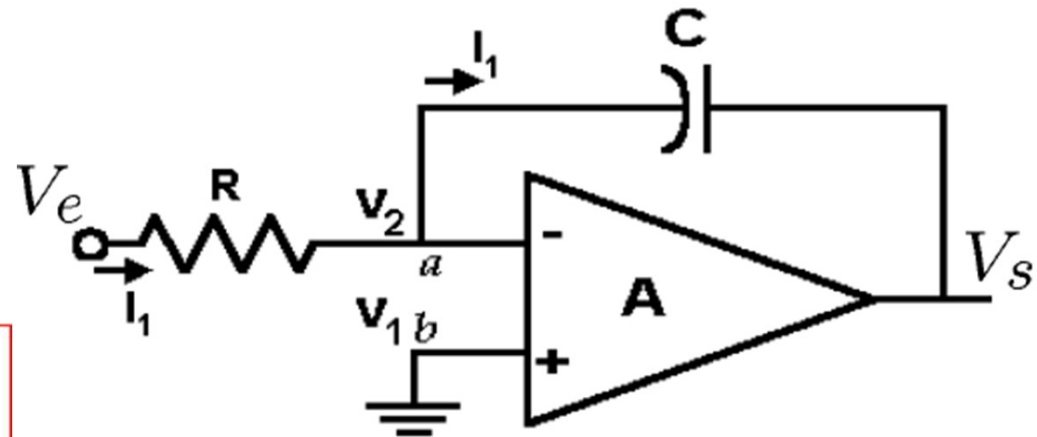
$$G = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

## Conditionneurs des capteurs passifs: Circuit Intégrateur

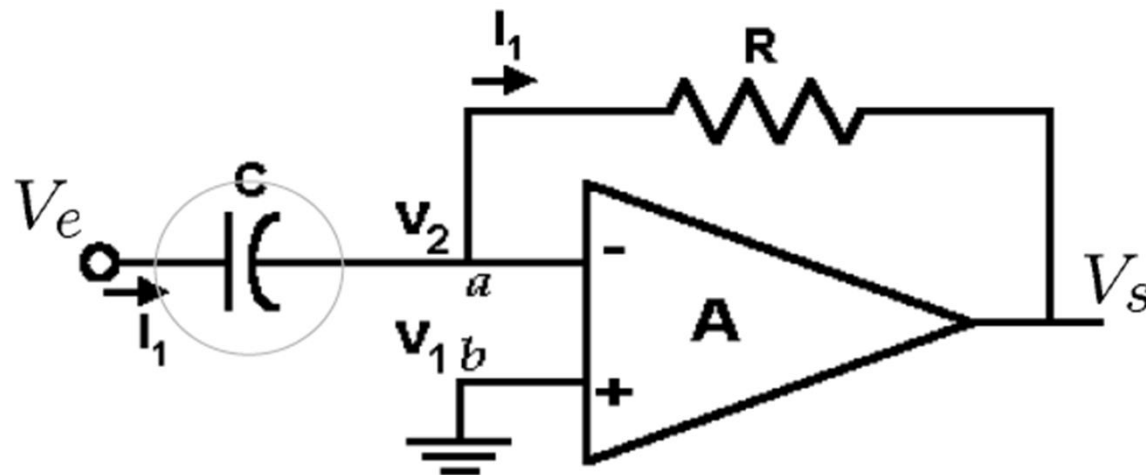
$$i_1 = \frac{V_e}{R}$$

$$i_1 = -C \frac{dV_s}{dt}$$

$$V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$$



## Conditionneurs des capteurs passifs: Circuit Dérivateur



**Cours 06**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie électromécanique  
4em Semestre  
Département Génie électromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**

## **Plan de Cours**

**I. Etalonnage**

**II. Régression linéaire simple**

**III. Estimation par la méthode des moindres carrés**



## I. Etalonnage

### ❖ ETABLIR UNE RELATION ENTRE:

- ☐ valeurs étalons d'une grandeur
- ☐ valeurs fournies par le capteur

### ❖ DEUX ACTIONS POSSIBLES

- ☐ réglage du capteur (ou ajustage constructeur)
- ☐ courbe de correction des valeurs brutes

## I. Etalonnage

### ❖ CORRIGE LES ERREURS SYSTEMATIQUES :

- ☐ offset
- ☐ sensibilité
- ☐ linéarité

### ❖ TIENT COMPTE DES GRANDEURS D'INFLUENCE

### ❖ NE CORRIGE PAS LES ERREURS ALEATOIRES MAIS PERMET DE LES EVALUER

## I. Etalonnage

❖ **CAPTEUR PARFAIT** :  $y = x$

❖ **CAPTEUR REEL**

❑ **erreur d'offset**  $y = a + x$

❑ **erreur de sensibilité**  $y = bx$

❑ **offset + sensibilité**  $y = a + bx$

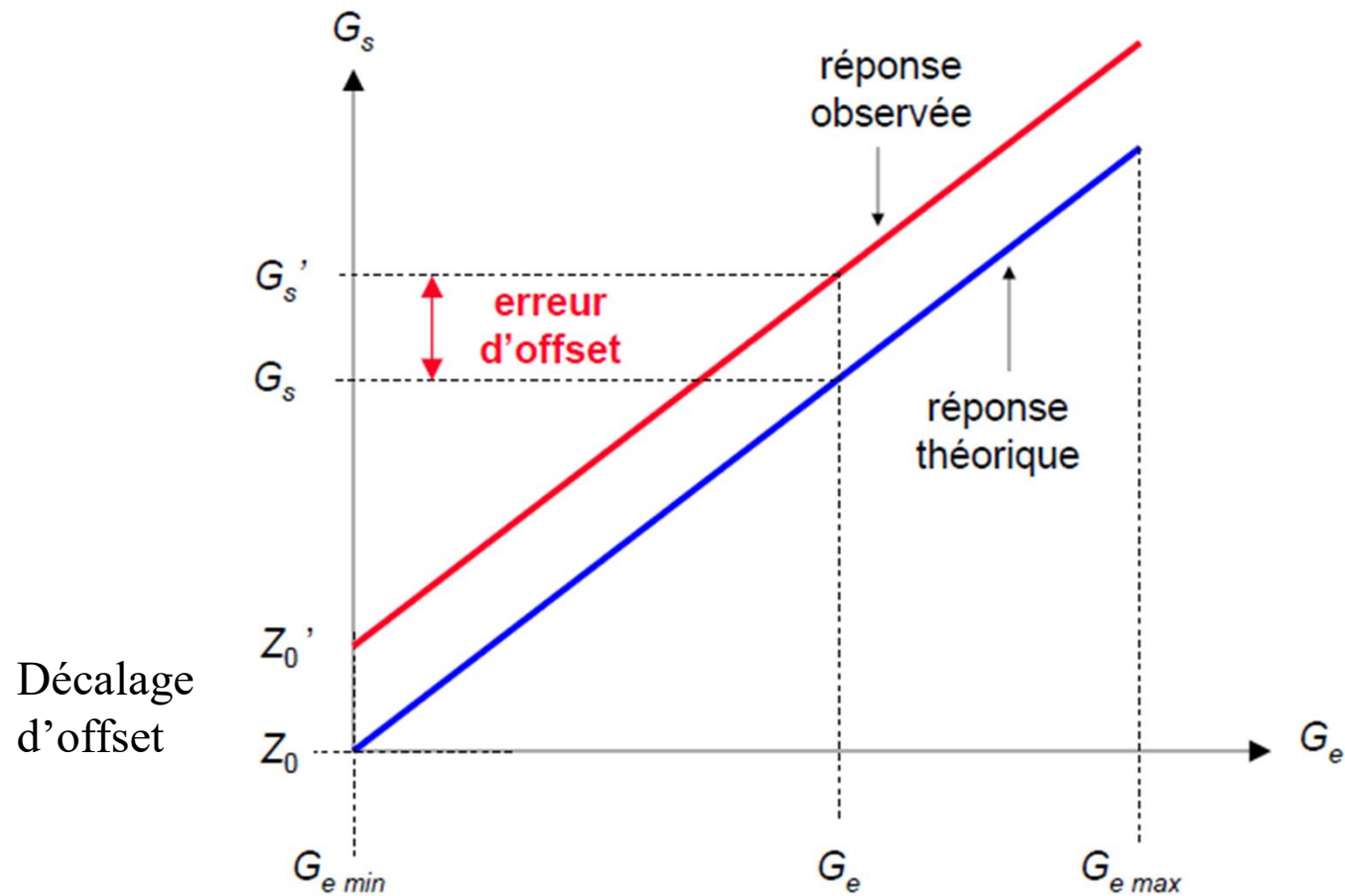
❑ **erreur de linéarité**  $y = bx + cx^2$

❑ **offset + linéarité**  $y = a + bx + cx^2$

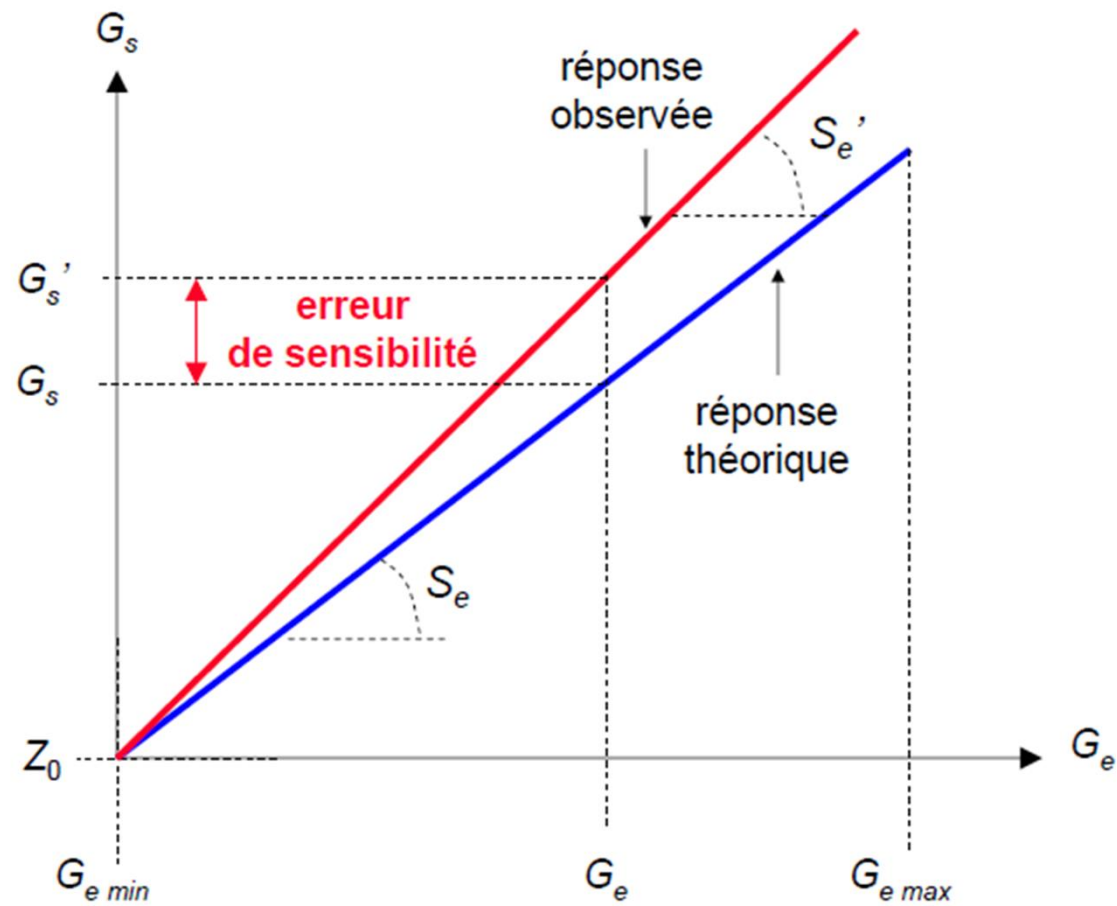
❖ **ETABLIR RELATION**  $y = f(x)$

❖ **UTILISER**  $x = f^{-1}(y)$

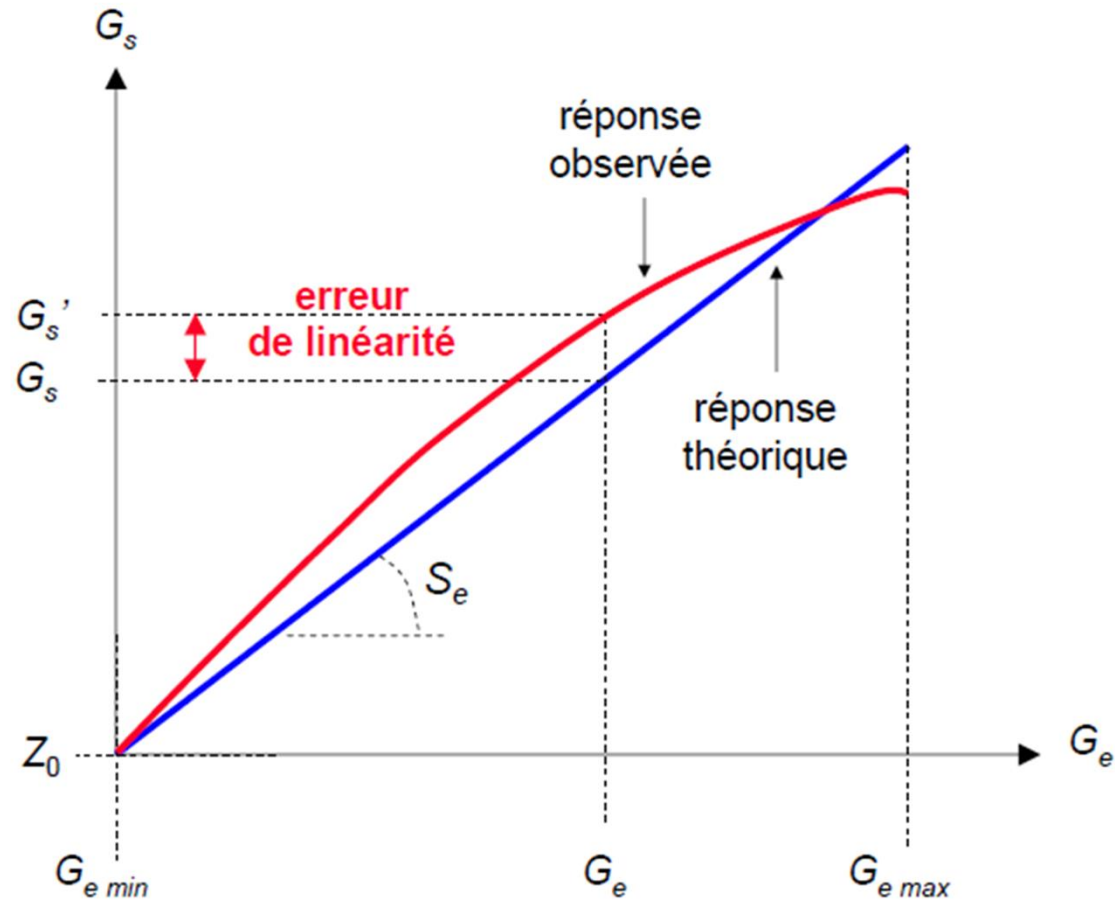
## Erreur d'offset



## Erreur de sensibilité



## Erreur de linéarité



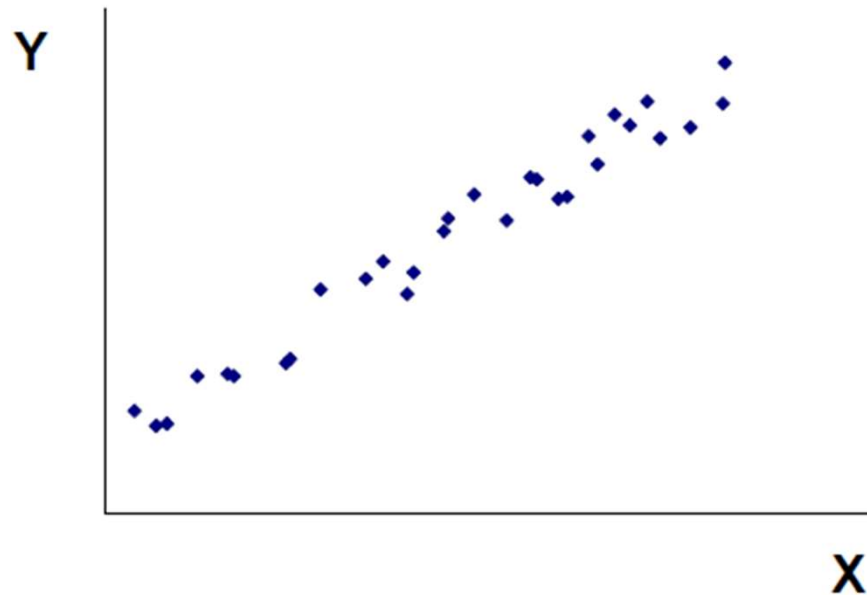
## II. Régression linéaire simple

**La régression s'adresse à un type de problème où les 2 variables quantitatives continues X et Y ont un rôle asymétrique : la variable Y dépend de la variable X.**

**La liaison entre la variable Y dépendante et la variable X indépendante peut être modélisée par une fonction de type  $Y = \alpha + \beta X$ , représentée graphiquement par une droite.**

$$Y = \alpha + \beta X$$

## II. Régression linéaire simple



**Y** : variable dépendante (expliquée)

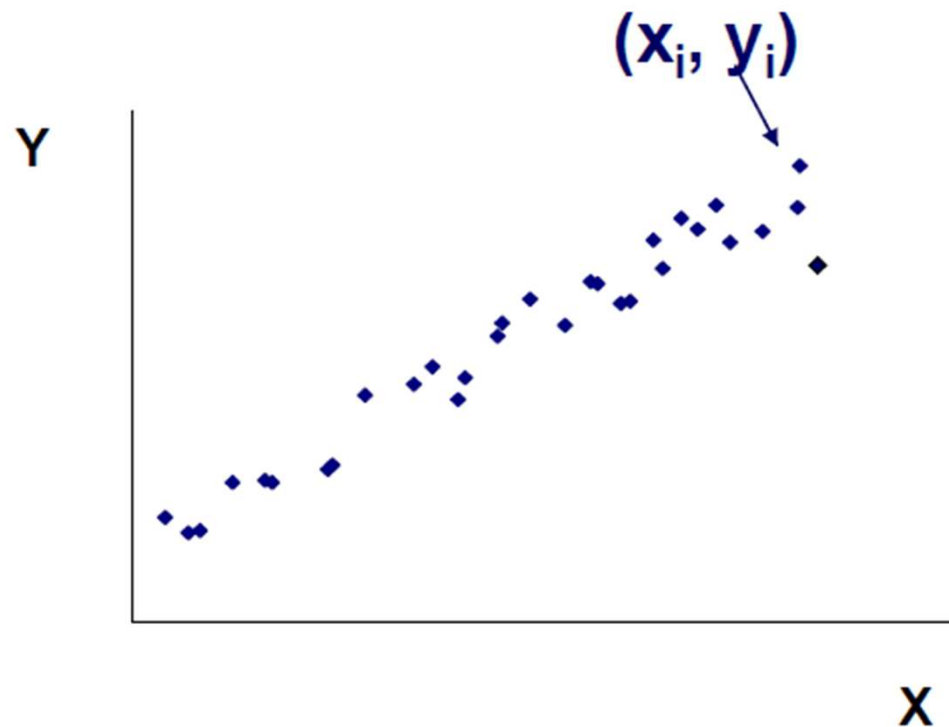
**X** : variable indépendante (explicative)

$\alpha$  : ordonnée à l'origine (valeur de Y pour  $x = 0$ )

$\beta$  : pente (variation moyenne de la valeur de Y pour une augmentation d'une unité de X)



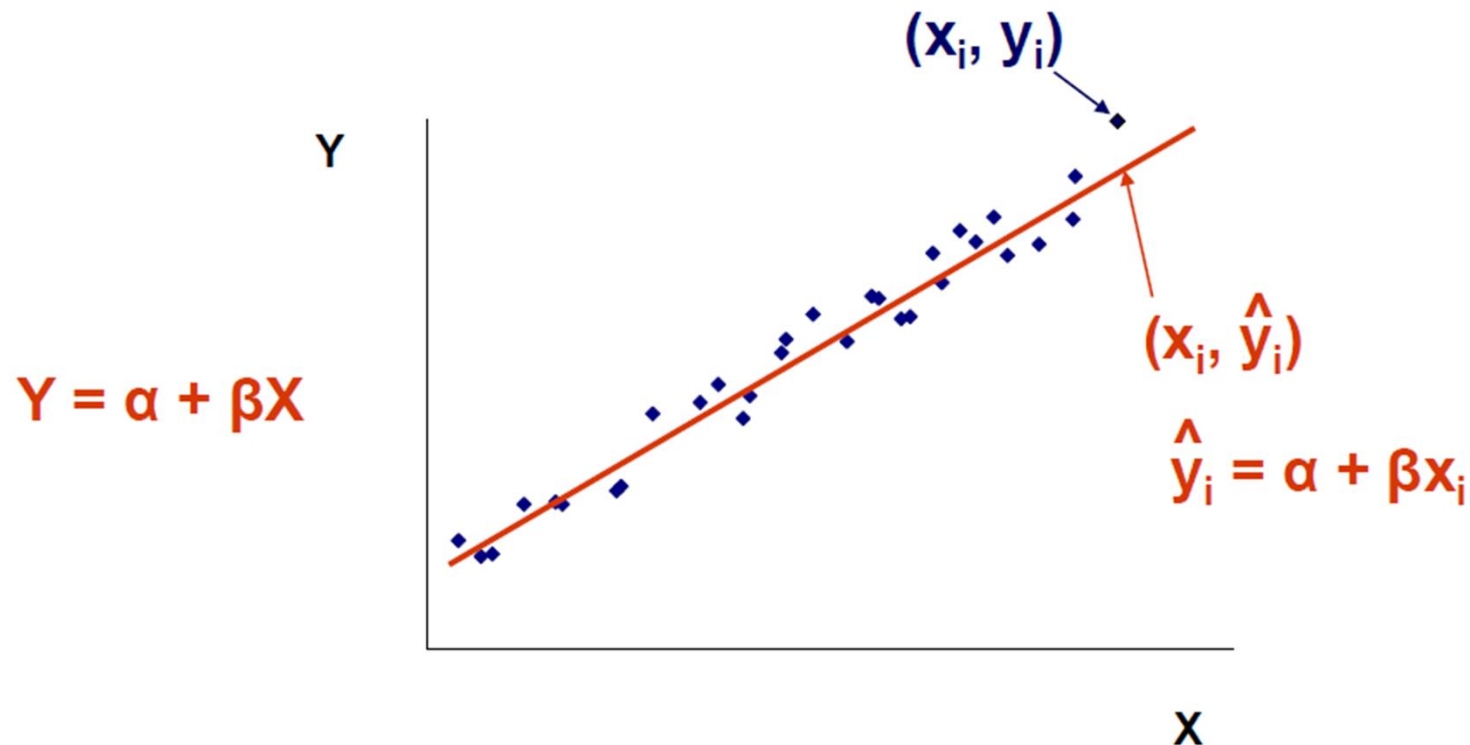
### III. Estimation par la méthode des moindres carrés



Chaque individu  $i$  est caractérisé par un couple de coordonnées  $(x_i, y_i)$  et est représenté par un point sur le graphique.

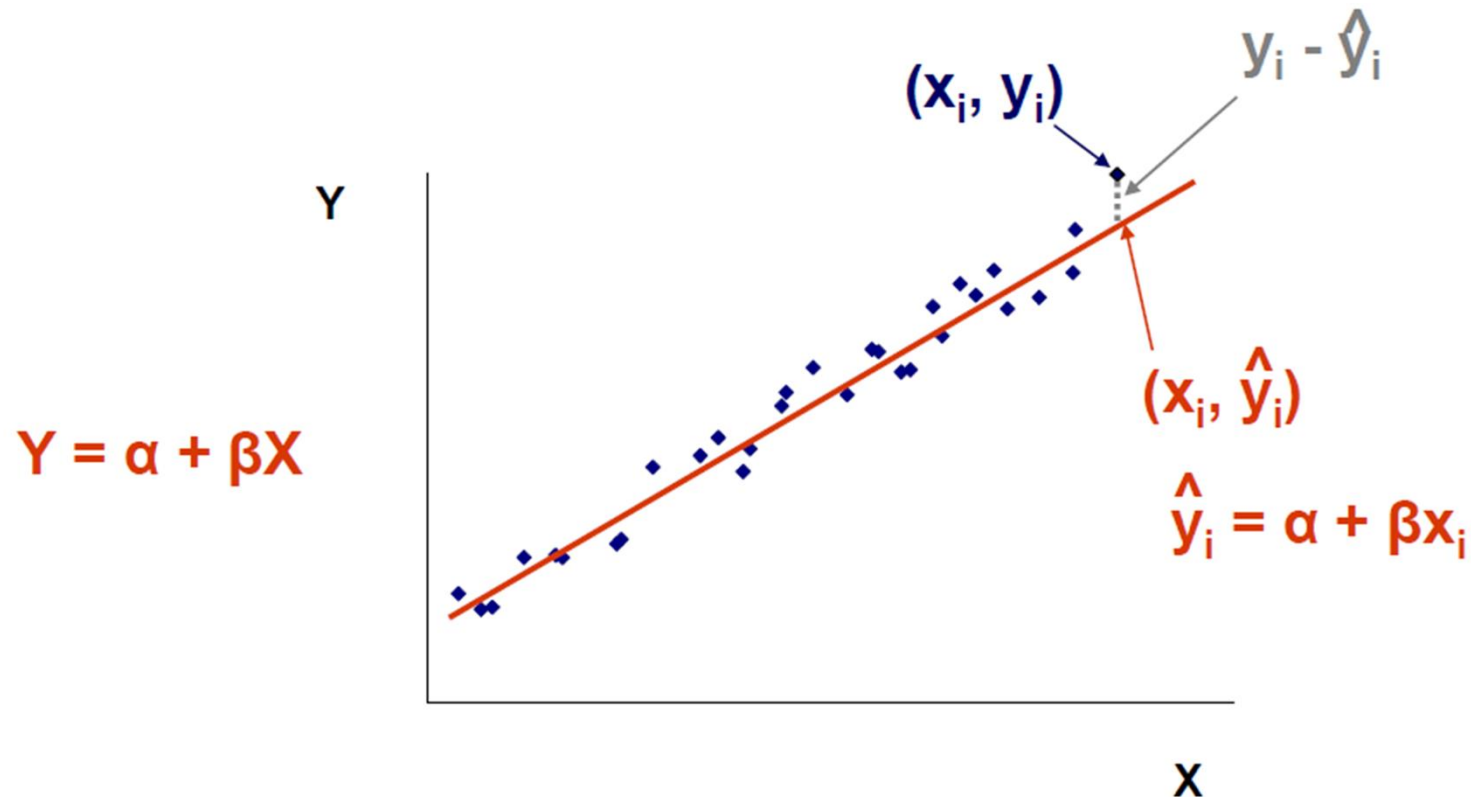
L'ensemble des individus forme un nuage de points.

## Estimation par la méthode des moindres carrés



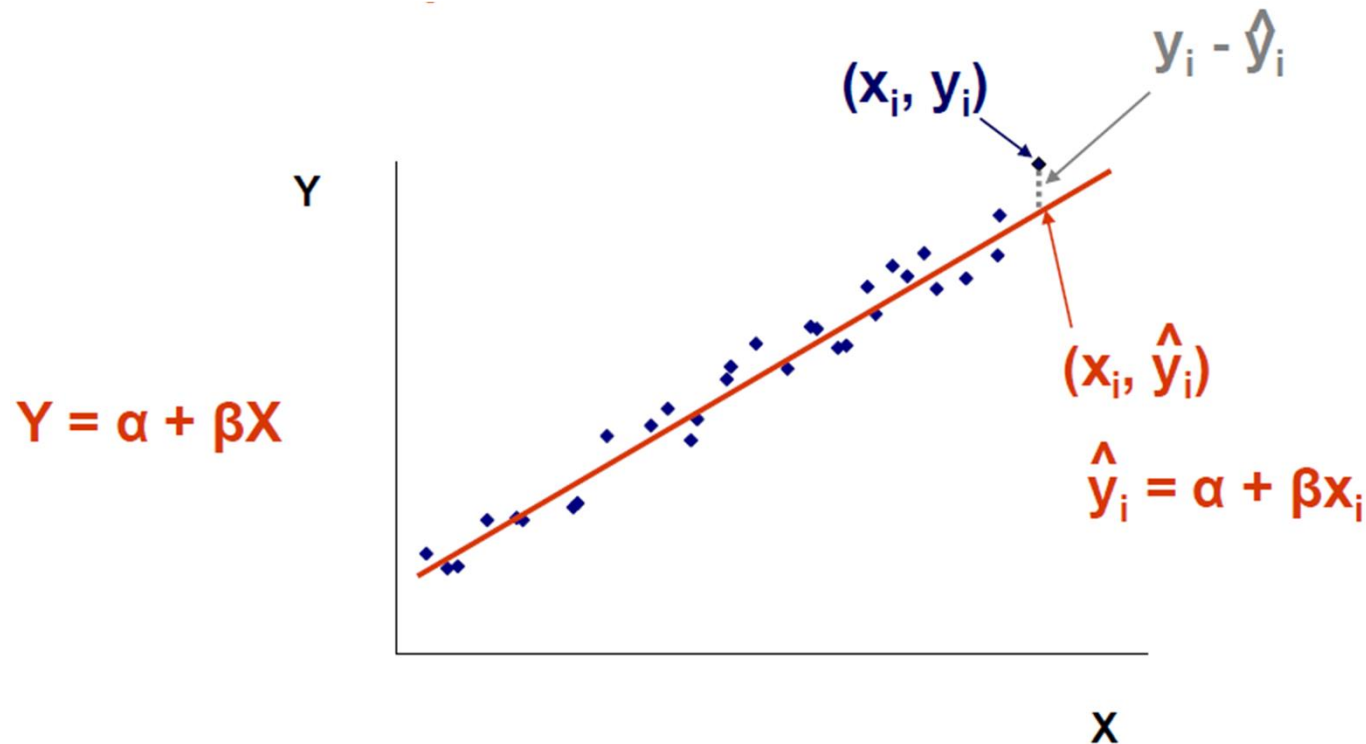
La droite de régression  $Y = \alpha + \beta X$  est la droite qui résume le mieux le nuage de points. Intuitivement, il s'agit de la droite dont les points du nuage sont en moyenne les plus proches (c'est-à-dire la droite qui passe à la plus faible distance de chaque point du nuage, en moyenne).

## Estimation par la méthode des moindres carrés



La distance d'un point à la droite est la distance verticale entre l'ordonnée du point observé  $(x_i, y_i)$  et l'ordonnée du point correspondant sur la droite  $(x_i, \hat{y}_i)$ . Cette distance d'un point à la droite  $(y_i - \hat{y}_i)$  peut être positive ou négative et la somme des distances à la droite s'annule.

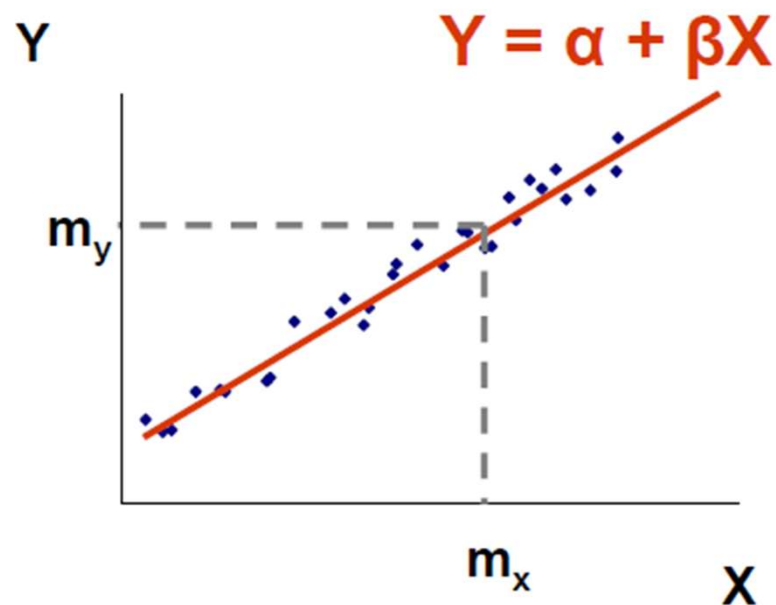
## Estimation par la méthode des moindres carrés



$$SCE = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Pour s'affranchir du signe, on calcule la somme des carrés des distances de chaque point à la droite. La droite de régression est la droite qui minimise la somme des carrés des écarts. Elle est aussi appelée droite des moindres carrés.

## Estimation par la méthode des moindres carrés

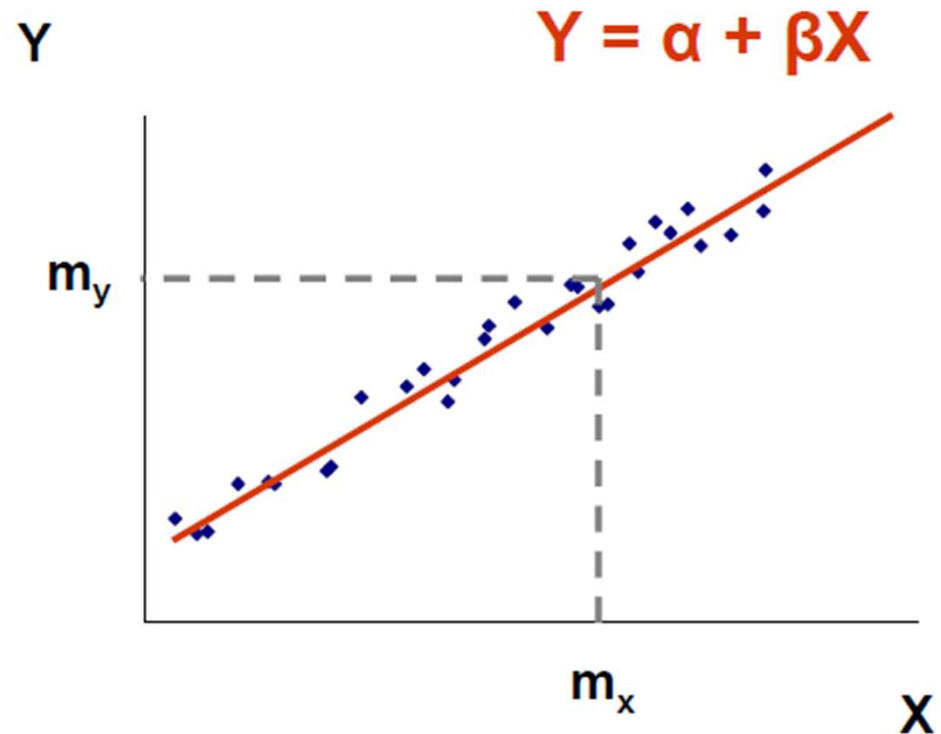


Une particularité de la droite de régression est de passer par le point moyen théorique de coordonnée  $(m_x, m_y)$ .

## Estimation par la méthode des moindres carrés

$a$  et  $b$  sont les estimations de l'ordonnée à l'origine  $\alpha$  et de la pente  $\beta$  de la droite de régression.

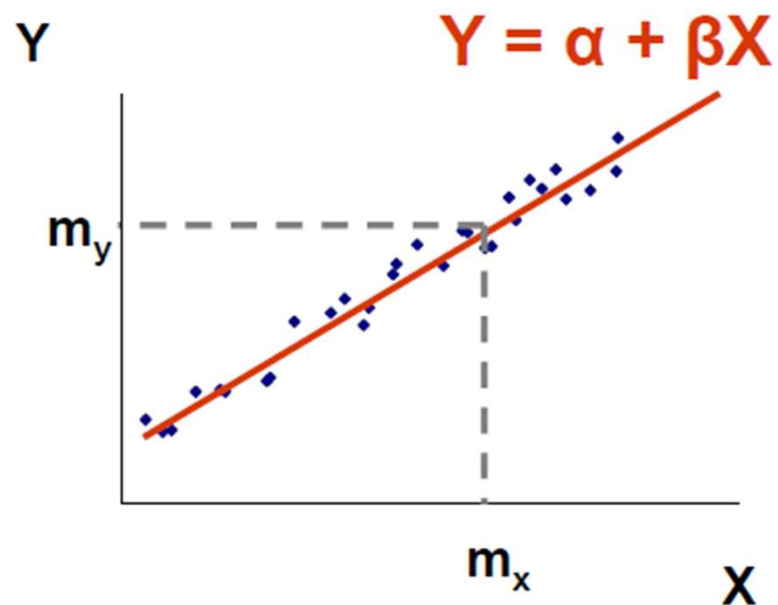
L'estimation de la pente de la droite de régression  $b$  est égale au rapport de la covariance de  $X$  et  $Y$  sur la variance de  $X$ .



$$b = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\text{var}(X)}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}$$

## Estimation par la méthode des moindres carrés



L'estimateur de l'ordonnée à l'origine  $a$  est déduit de la pente  $b$  et des coordonnées du point moyen  $(m_x, m_y)$  :

$$a = m_y - b m_x$$

**Cours 07**  
**Appareils de mesure et instrumentation**

2em année de la filière Génie électromécanique  
4em Semestre  
Département Génie électromécanique

**Dr. Chighali Ould Ehssein**



## **Plan de Cours**

**I. Classification des capteurs**

**II. Capteurs TOR**

**III. Capteurs numériques**

## I. Classification des capteurs

- ❖ **capteur Tout Ou Rien** : le signal peut prendre deux valeurs 0 ou 1
- ❖ **capteur analogique**: le signal évolue en fonction de la grandeur mesurée
- ❖ **capteur numérique**: le signal prend valeur numérique codée en une suite de 0 et de 1

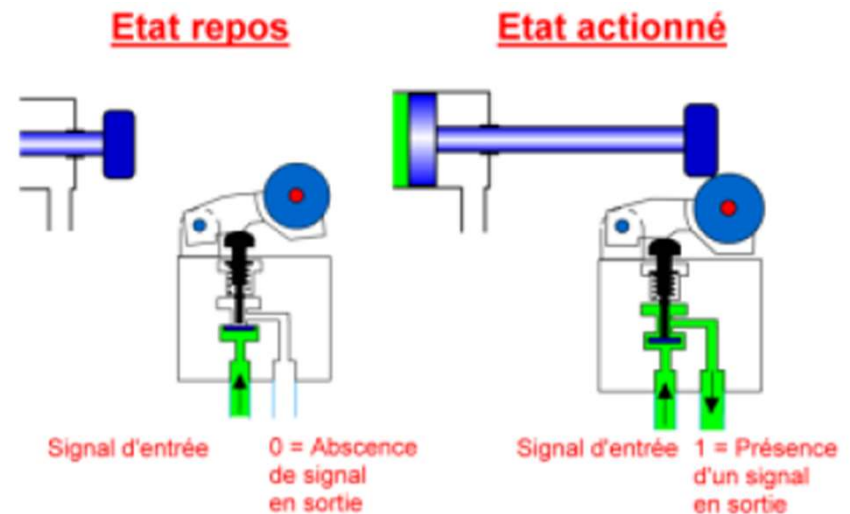
La grandeur de sortie du capteur peut varier :

- de manière binaire (information vraie ou fausse), c'est le capteur **Tout Ou Rien** (TOR).
- de façon progressive (variation continue), c'est le capteur **analogique**.
- d'échelon de tension ou de courant, c'est le **capteur numérique**.

## II. Capteurs Tout Ou Rien

### Capteur de position – Capteur de fin de course:

Les capteurs de position sont des capteurs de contact (capteur de fin de course). Ils peuvent être équipés d'un galet, d'une tige souple, d'une bille.  
L'information donnée par ce type de capteur est de type tout ou rien (TOR).



### **III. Capteurs numériques : optiques de proximité**

#### **Capteur photoélectrique :**

**Un capteur photoélectrique est un capteur de proximité. Il se compose d'un émetteur de lumière associé à un récepteur. La détection d'un objet se fait par la coupure ou variation d'un faisceau lumineux,**

#### **Différents type de détection**

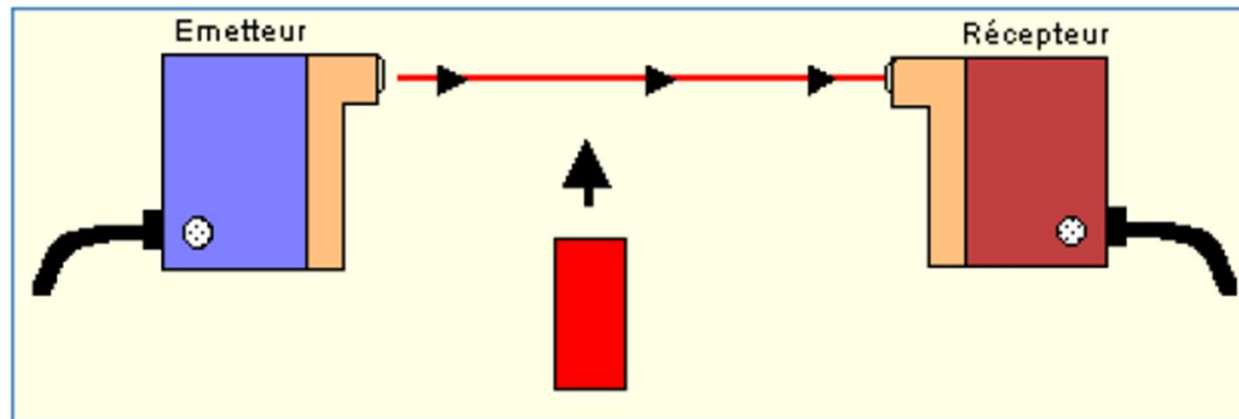
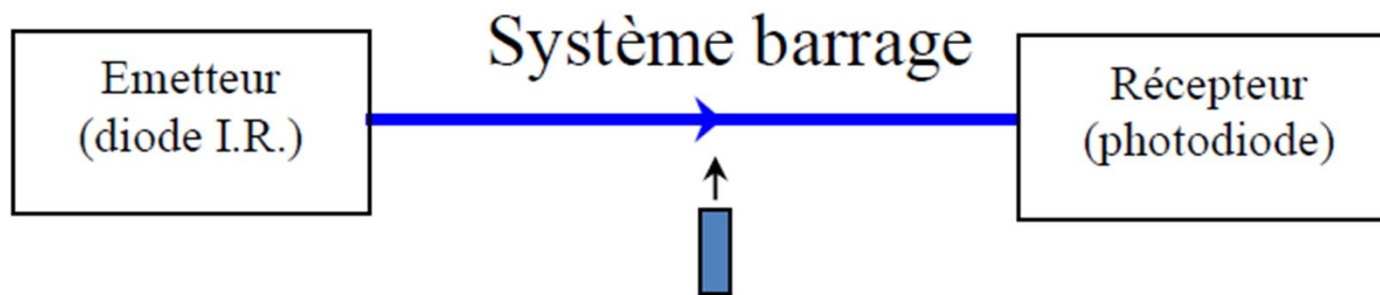
- ❖Système barrage**
- ❖Système reflex**
- ❖Système de proximité**

## I. Système barrage

❖ CORRIGE LES ERREURS SYSTEMATIQUES :

☐ offset

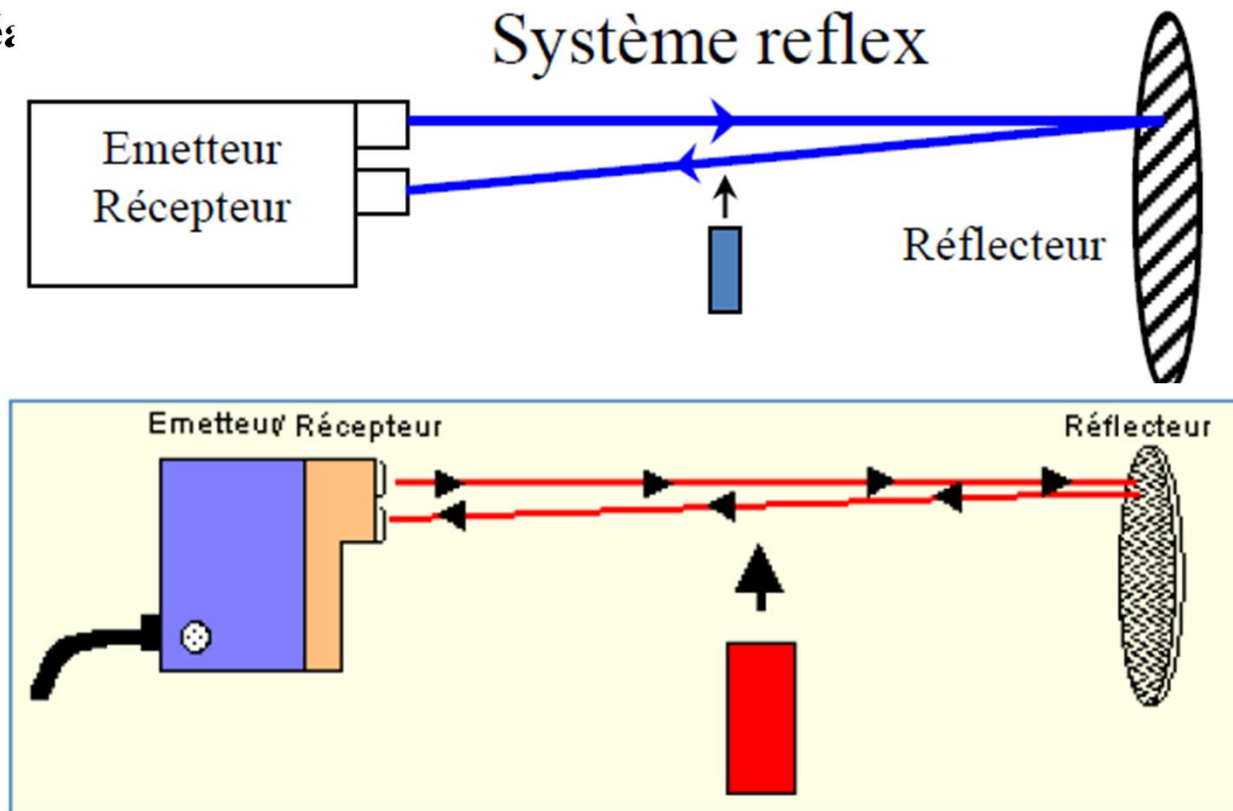
☐ sensibilité



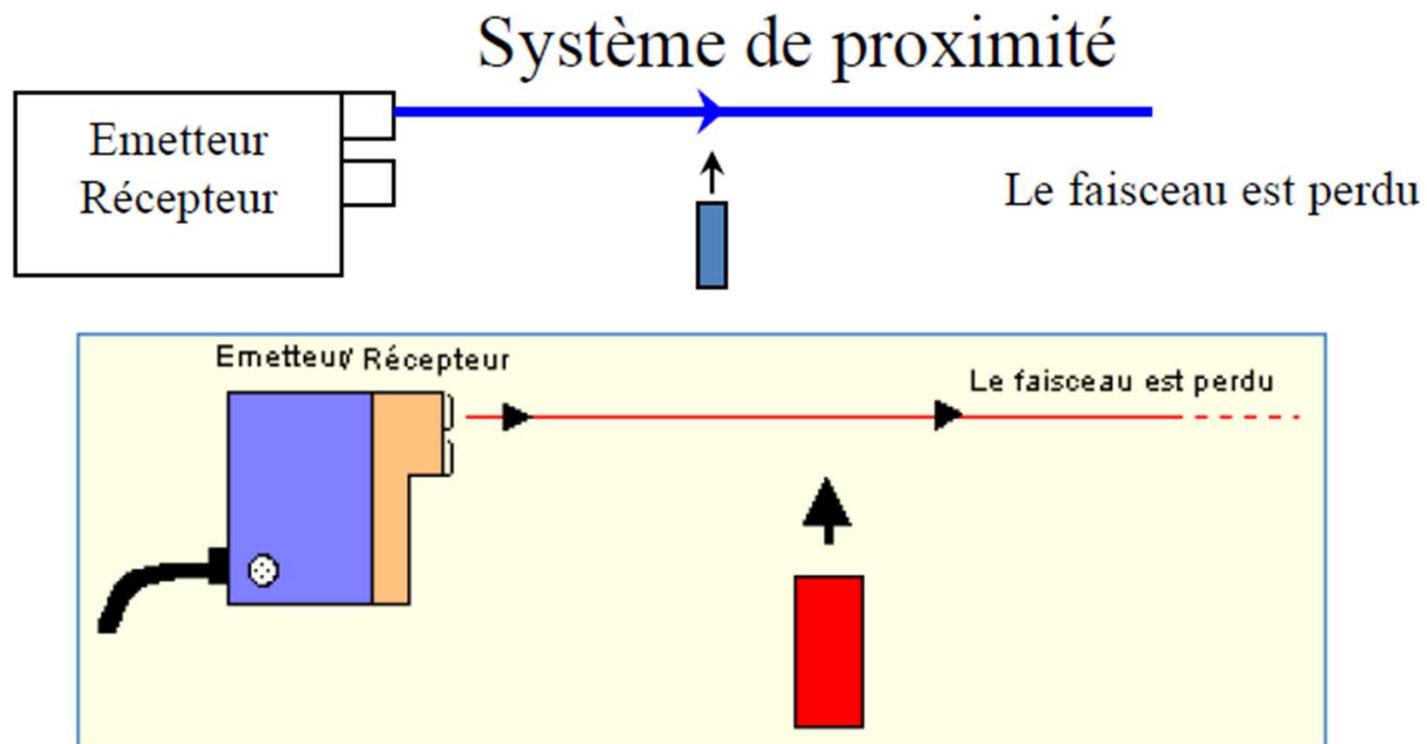
## I. Système reflex

❖ CORRIGE LES ERREURS SYSTEMATIQUES :

- ☐ offset
- ☐ sensibilité
- ☐ linéarité



## I. Système de proximité



## I. Capteurs numériques : optiques de position

### Codeur rotatif :

Les codeurs rotatifs sont des capteurs de position angulaire. Chaque fois que le faisceau est coupé, le capteur envoie un signal qui permet de connaître la variation de position de l'arbre.

