

# Cours de Physique des Capteurs

A. Arciniegas  
N. Wilkie-Chancellor

IUT Cergy-Pontoise, Dep GElI, site de Neuville



- 1 Avant propos
- 2 Introduction à la Physique et l'Électronique des Capteurs
- 3 Introduction à la Métrologie

# Avant propos

## Pré-requis

- Effectuer une analyse dimensionnelle ;
- Appliquer les concepts fondamentaux de la physique : forces, énergie ;
- Utiliser les méthodes d'analyse des systèmes électriques/électroniques ;

## Pré-requis

- Effectuer une analyse dimensionnelle ;
- Appliquer les concepts fondamentaux de la physique : forces, énergie ;
- Utiliser les méthodes d'analyse des systèmes électriques/électroniques ;

## Contenu et objectifs

**Première partie** : *Caractéristiques métrologiques des dispositifs constitutifs de la chaîne de mesure*

- Identifier les caractéristiques d'un capteur et d'une chaîne de mesure
- Déterminer les performances d'un capteur
- Choisir un capteur suivant un cahier des charges

## Pré-requis

- Effectuer une analyse dimensionnelle ;
- Appliquer les concepts fondamentaux de la physique : forces, énergie ;
- Utiliser les méthodes d'analyse des systèmes électriques/électroniques ;

## Contenu et objectifs

### **Deuxième partie** : *Conditionneurs et amplificateurs*

- Identifier les principaux montages de conditionnement de capteurs passifs
- Différencier un conditionneur de capteur et de signal
- Prendre conscience des non linéarités et leurs corrections

## Pré-requis

- Effectuer une analyse dimensionnelle ;
- Appliquer les concepts fondamentaux de la physique : forces, énergie ;
- Utiliser les méthodes d'analyse des systèmes électriques/électroniques ;

## Contenu et objectifs

### **Troisième partie** : *Capteurs et instrumentations*

- S'informer sur les capteurs et instrumentations industrielles
- Comprendre la physique d'un capteur et son conditionnement
- Corriger une non linéarité à l'aide d'un montage électronique

## Pré-requis

- Effectuer une analyse dimensionnelle ;
- Appliquer les concepts fondamentaux de la physique : forces, énergie ;
- Utiliser les méthodes d'analyse des systèmes électriques/électroniques ;

## Contenu et objectifs

**Première partie** : *Caractéristiques métrologiques des dispositifs constitutifs de la chaîne de mesure*

**Deuxième partie** : *Conditionneurs et amplificateurs*

**Troisième partie** : *Capteurs et instrumentations*

## Déroulement du module (27 heures)

- Cours
- Séances de TD
- Évaluations : DS, DM...



## Chaîne d'acquisition

**Définition :** Une chaîne d'acquisition est un système électronique qui recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

## Chaîne d'acquisition

**Définition :** Une chaîne d'acquisition est un système électronique qui recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

Elle est composée de différents blocs fonctionnels :

- Extraction de l'information : capteur (Physique)



## Chaîne d'acquisition

**Définition :** Une chaîne d'acquisition est un système électronique qui recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

Elle est composée de différents blocs fonctionnels :

- Extraction de l'information : capteur (Physique)
- Conversion en signal utile : conditionneur (Électronique)



## Chaîne d'acquisition

**Définition :** Une chaîne d'acquisition est un système électronique qui recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

Elle est composée de différents blocs fonctionnels :

- Extraction de l'information : capteur (Physique)
- Conversion en signal utile : conditionneur (Électronique)
- Traitement analogique du signal : amplificateurs (d'instrumentation) et filtres



## Chaîne d'acquisition

**Définition :** Une chaîne d'acquisition est un système électronique qui recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

Elle est composée de différents blocs fonctionnels :

- Extraction de l'information : capteur (Physique)
- Conversion en signal utile : conditionneur (Électronique)
- Traitement analogique du signal : amplificateurs (d'instrumentation) et filtres
- Électronique de mise en forme : linéarisation, interfaçage...



## Chaîne d'acquisition

**Définition :** Une chaîne d'acquisition est un système électronique qui recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

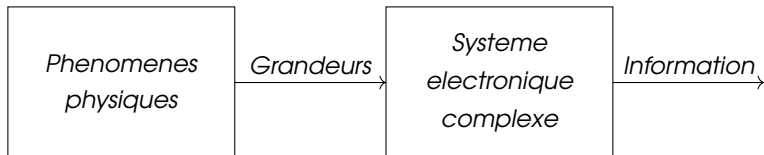
Elle est composée de différents blocs fonctionnels :

- Extraction de l'information : **capteur (Physique)**
- Conversion en signal utile : **conditionneur (Électronique)**
- Traitement analogique du signal : **amplificateurs (d'instrumentation)** et filtres
- **Électronique de mise en forme**



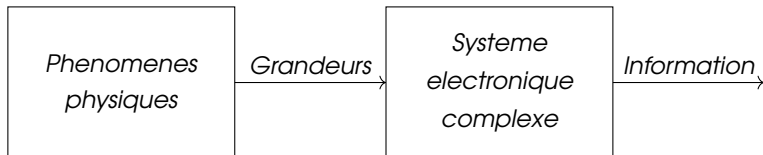
# Introduction à la Physique et l'Électronique des Capteurs

Vous possédez un téléphone portable, il est un système électronique complexe :





Vous possédez un téléphone portable, il est un système électronique complexe :



Quels sont les capteurs dont il dispose ?

Capteurs dans un téléphone portable courant :

Capteurs dans un téléphone portable courant :

- Capteur de gravité ou *Accéléromètre*

Capteurs dans un téléphone portable courant :

- Capteur de gravité ou *Accéléromètre*
- Capteur de champ magnétique ou *Magnétomètre*

Capteurs dans un téléphone portable courant :

- Capteur de gravité ou *Accéléromètre*
- Capteur de champ magnétique ou *Magnétomètre*
- Capteur de luminosité ou *Photomètre*

Capteurs dans un téléphone portable courant :

- Capteur de gravité ou *Accéléromètre*
- Capteur de champ magnétique ou *Magnétomètre*
- Capteur de luminosité ou *Photomètre*
- Capteur de position ou *GPS*

Capteurs dans un téléphone portable courant :

- Capteur de gravité ou *Accéléromètre*
- Capteur de champ magnétique ou *Magnétomètre*
- Capteur de luminosité ou *Photomètre*
- Capteur de position ou *GPS*
- Capteur de proximité ou *PIR*

Capteurs dans un téléphone portable courant :

- Capteur de gravité ou *Accéléromètre*
- Capteur de champ magnétique ou *Magnétomètre*
- Capteur de luminosité ou *Photomètre*
- Capteur de position ou *GPS*
- Capteur de proximité ou *PIR*

Votre téléphone est un laboratoire portable : <https://phyphox.org/>



# Qu'est-ce un capteur ?

## Capteur (Physique)

Dispositif qui soumis à l'action d'un phénomène physique présente une caractéristique de nature électrique.

# Qu'est-ce un capteur ?

## Capteur (Physique)

Dispositif qui soumis à l'action d'un phénomène physique présente une caractéristique de nature électrique.

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

## Capteur (Physique)

Dispositif qui soumis à l'action d'un phénomène physique présente une caractéristique de nature électrique.

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

- générateur → *capteur actif*

## Capteur (Physique)

Dispositif qui soumis à l'action d'un phénomène physique présente une caractéristique de nature électrique.

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

- générateur → *capteur actif*
- impédance → *capteur passif*

## Remarque

**Capteur actif** : transforme une énergie d'entrée en énergie électrique en sortie ; délivre directement un signal électrique.

Grandeur d'entrée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

## Remarque

**Capteur passif** : nécessite un circuit de conditionnement afin d'extraire le signal électrique image des variations d'impédance.

Grandeur d'entrée	Caractéristique électrique sensible	Matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux
Très basse température	Constante diélectrique	Verres
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de Ni, Si dopé. Alliages ferromagnétiques
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium Alumine ; polymères
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants

## Cas particulier : Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à effectuer une mesure indirecte d'un phénomène physique.

## Cas particulier : Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à effectuer une mesure indirecte d'un phénomène physique.

### Corps d'épreuve

Dispositif qui soumis à la grandeur physique étudiée en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique.

Cette grandeur secondaire peut être traduite grandeur électrique par un capteur adéquat.



# Cas particulier : Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à effectuer une mesure indirecte d'un phénomène physique.

## Corps d'épreuve

Dispositif qui soumis à la grandeur physique étudiée en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique.

Cette grandeur secondaire peut être traduite grandeur électrique par un capteur adéquat.

## Capteur composite

Ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif.

# Cas particulier : Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à effectuer une mesure indirecte d'un phénomène physique.

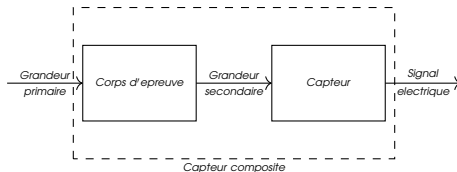
## Corps d'épreuve

Dispositif qui soumis à la grandeur physique étudiée en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique.

Cette grandeur secondaire peut être traduite grandeur électrique par un capteur adéquat.

## Capteur composite

Ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif.



# Cas particulier : Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à effectuer une mesure indirecte d'un phénomène physique.

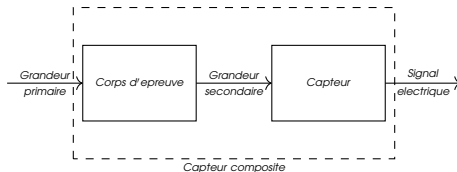
## Corps d'épreuve

Dispositif qui soumis à la grandeur physique étudiée en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique.

Cette grandeur secondaire peut être traduite grandeur électrique par un capteur adéquat.

## Capteur composite

Ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif.



→ Très utilisés pour la mesure de grandeurs mécaniques !

### Capteur intégré

Composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun :

### Capteur intégré

Composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun :

- le capteur proprement dit

## Capteur intégré

Composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun :

- le capteur proprement dit
- le corps d'épreuve éventuel

## Capteur intégré

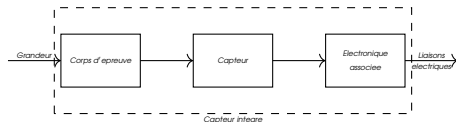
Composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun :

- le capteur proprement dit
- le corps d'épreuve éventuel
- des circuits électroniques de conditionnement du signal

## Capteur intégré

Composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun :

- le capteur proprement dit
- le corps d'épreuve éventuel
- des circuits électroniques de conditionnement du signal

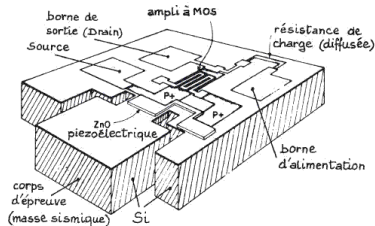
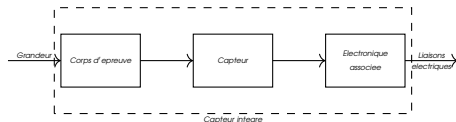




## Capteur intégré

Composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun :

- le capteur proprement dit
- le corps d'épreuve éventuel
- des circuits électroniques de conditionnement du signal

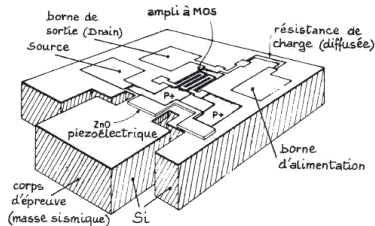
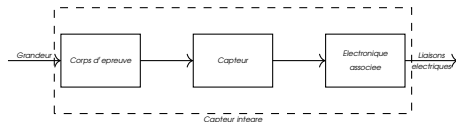


Accéléromètre intégré (d'après G. Asch)

## Capteur intégré

Composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun :

- le capteur proprement dit
- le corps d'épreuve éventuel
- des circuits électroniques de conditionnement du signal



Accéléromètre intégré (d'après G. Asch)

→ Comme ceux dans vos téléphones (capteurs MEMS) !

## Capteur intelligent

- on parle quelquefois de capteur smart

## Capteur intelligent

- on parle quelquefois de capteur smart
- instrument en technologie numérique

## Capteur intelligent

- on parle quelquefois de capteur smart
- instrument en technologie numérique
- sa cellule de mesure permet d'acquérir la(es) grandeur(s) issue(s) du procédé

## Capteur intelligent

- on parle quelquefois de capteur smart
- instrument en technologie numérique
- sa cellule de mesure permet d'acquérir la(es) grandeur(s) issue(s) du procédé
- intègre un ou plusieurs capteurs permettant de mesurer des perturbations !

## Capteur intelligent

- on parle quelquefois de capteur smart
- instrument en technologie numérique
- sa cellule de mesure permet d'acquérir la(es) grandeur(s) issue(s) du procédé
- intègre un ou plusieurs capteurs permettant de mesurer des perturbations !

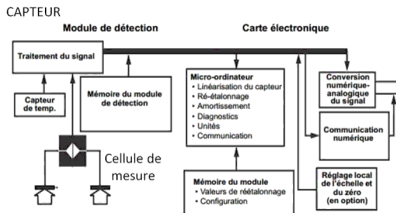


Schéma de principe d'un capteur intelligent  
Transmetteur de pression Rosemount modèle 2051 (d'après G. Asch)

Le raccordement de capteurs industriels aux automates et systèmes de supervision s'effectue en utilisant des *standards* ou *protocoles*.



Le raccordement de capteurs industriels aux automates et systèmes de supervision s'effectue en utilisant des *standards* ou *protocoles*.

## Liaison point à point

Le signal délivré par l'instrument (transmetteur) est analogique de 4-20 mA, ou éventuellement de :

Le raccordement de capteurs industriels aux automates et systèmes de supervision s'effectue en utilisant des *standards* ou *protocoles*.

## Liaison point à point

Le signal délivré par l'instrument (transmetteur) est analogique de 4-20 mA, ou éventuellement de :

- 0-20 mA
- 0-10 V
- 0-5 V (niveaux TTL)

Le raccordement de capteurs industriels aux automates et systèmes de supervision s'effectue en utilisant des *standards* ou *protocoles*.

## Liaison point à point

Le signal délivré par l'instrument (transmetteur) est analogique de 4-20 mA, ou éventuellement de :

- 0-20 mA
- 0-10 V
- 0-5 V (niveaux TTL)

*Protocole HART (Highway Addressable Remote Transducer)* : solution permettant la transmission des données supplémentaires par superposition d'un signal numérique au signal analogique.

Le raccordement de capteurs industriels aux automates et systèmes de supervision s'effectue en utilisant des *standards* ou *protocoles*.

## Liaison point à point

Le signal délivré par l'instrument (transmetteur) est analogique de 4-20 mA, ou éventuellement de :

- 0-20 mA
- 0-10 V
- 0-5 V (niveaux TTL)

*Protocole HART (Highway Addressable Remote Transducer)* : solution permettant la transmission des données supplémentaires par superposition d'un signal numérique au signal analogique.

## Bus de terrain

Il est constitué d'un câble sur lesquels vont circuler les données échangées par les différents capteurs (raccordement de capteurs entièrement numériques). Les plus utilisés :

Le raccordement de capteurs industriels aux automates et systèmes de supervision s'effectue en utilisant des *standards* ou *protocoles*.

## Liaison point à point

Le signal délivré par l'instrument (transmetteur) est analogique de 4-20 mA, ou éventuellement de :

- 0-20 mA
- 0-10 V
- 0-5 V (niveaux TTL)

*Protocole HART (Highway Addressable Remote Transducer)* : solution permettant la transmission des données supplémentaires par superposition d'un signal numérique au signal analogique.

## Bus de terrain

Il est constitué d'un câble sur lesquels vont circuler les données échangées par les différents capteurs (raccordement de capteurs entièrement numériques). Les plus utilisés :

- Modbus
- ProfibusDP/PA
- Fieldbus Foundation

# Introduction à la Métrologie



« À moins qu'une chose ne puisse être définie par la mesure, elle n'a pas sa place dans une théorie. »  
Richard Feynman



« À moins qu'une chose ne puisse être définie par la mesure, elle n'a pas sa place dans une théorie. »  
Richard Feynman

La Physique est basée sur la **mesure** qui consiste à comparer une grandeur physique à une valeur de référence de cette grandeur.



## Généralités

- **Mesurande** : Grandeur physique objet de la mesure, notée  $m$ .
- **Mesurage** : Ensemble d'opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande.

## Généralités

- **Mesurande** : Grandeur physique objet de la mesure, notée  $m$ .
- **Mesurage** : Ensemble d'opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande.

## Capteur (Métrologie)

Dispositif qui, soumis à l'action d'un *mesurande* non électrique, présente une caractéristique de nature électrique désignée par  $s$  et qui est fonction du *mesurande* :

$$s = f(m)$$

- $s$  est la grandeur de sortie ou réponse du capteur
- $m$  est la grandeur d'entrée ou excitation

## Étalonnage

Opération permettant de déterminer la relation existant entre un ensemble de valeurs de  $m$  (connues avec précision) et les valeurs correspondantes de  $s$ .

## Étalonnage

Opération permettant de déterminer la relation existant entre un ensemble de valeurs de  $m$  (connues avec précision) et les valeurs correspondantes de  $s$ .

## Courbe d'étalonnage

À toute valeur mesurée de  $s$ , elle permet d'associer la valeur de  $m$  qui la détermine. Dans l'idéal, elle doit être une relation affine :

$$s = Sm$$

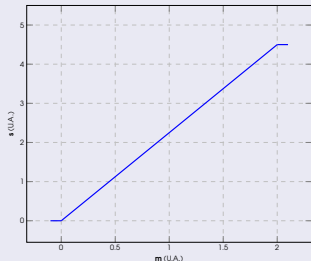
## Étalonnage

Opération permettant de déterminer la relation existant entre un ensemble de valeurs de  $m$  (connues avec précision) et les valeurs correspondantes de  $s$ .

## Courbe d'étalonnage

À toute valeur mesurée de  $s$ , elle permet d'associer la valeur de  $m$  qui la détermine. Dans l'idéal, elle doit être une relation affine :

$$s = Sm$$



avec  $S$  est la **sensibilité** du capteur.

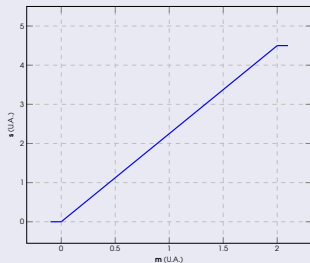
## Étalonnage

Opération permettant de déterminer la relation existant entre un ensemble de valeurs de  $m$  (connues avec précision) et les valeurs correspondantes de  $s$ .

## Courbe d'étalonnage

À toute valeur mesurée de  $s$ , elle permet d'associer la valeur de  $m$  qui la détermine. Dans l'idéal, elle doit être une relation affine :

$$s = Sm$$



avec  $S$  est la **sensibilité** du capteur. Elle dépend :

- de la valeur de  $m$  (**linéarité**)
- de la fréquence de variation de  $m$  (**bande passante**)

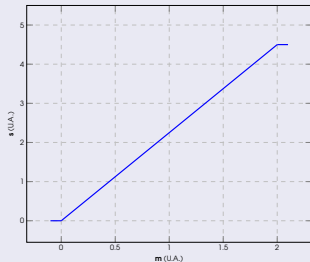
## Étalonnage

Opération permettant de déterminer la relation existant entre un ensemble de valeurs de  $m$  (connues avec précision) et les valeurs correspondantes de  $s$ .

## Courbe d'étalonnage

À toute valeur mesurée de  $s$ , elle permet d'associer la valeur de  $m$  qui la détermine. Dans l'idéal, elle doit être une relation affine :

$$s = Sm$$



avec  $S$  est la **sensibilité** du capteur. Elle dépend :

- de la valeur de  $m$  (**linéarité**)
- de la fréquence de variation de  $m$  (**bande passante**)
- du temps (**vieillesse**) ;

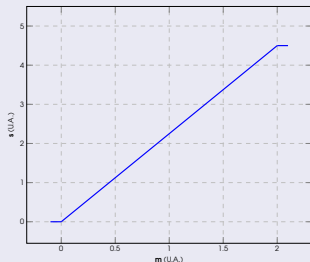
## Étalonnage

Opération permettant de déterminer la relation existant entre un ensemble de valeurs de  $m$  (connues avec précision) et les valeurs correspondantes de  $s$ .

## Courbe d'étalonnage

À toute valeur mesurée de  $s$ , elle permet d'associer la valeur de  $m$  qui la détermine. Dans l'idéal, elle doit être une relation affine :

$$s = Sm$$



avec  $S$  est la **sensibilité** du capteur. Elle dépend :

- de la valeur de  $m$  (**linéarité**)
- de la fréquence de variation de  $m$  (**bande passante**)
- du temps (**vieillesse**) ;
- des perturbations (**grandeurs d'influence**)