



Université Echahid Hamma Lakhder EL-Oued.
Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique
3 -ème Année Licence : Electronique (2019 /2020)
Matière : Capteurs et Instrumentation

Chargée de la matière : Dr LAIB Ismail

Cours : Capteurs et Instrumentation

2019/2020

Plan du Cours

- ✓ **Présentation générales des capteurs:**

Notion de mesure, Le Capteur (Sensor), Importance du capteur dans la chaîne de mesures.

- ✓ **Éléments constitutifs d'un capteur:**

L'entrée du capteur, corps d'épreuve, conditionneur/transmetteur, sortie du capteur, Les perturbations.

- ✓ **Exemples de Capteurs:**

Les types de mesurande (grandeurs mécaniques, thermiques, électriques et radiatives)

Exemples (Microphone à condensateur, capteurs CCD, Applications des capteurs CCD)

- ✓ **Caractéristiques Métrologiques:**

Caractéristiques en régime statique, Caractéristiques en régime dynamique

- ✓ **Conditionnement et électronique de mesure:**

Conditionneurs pour capteurs passifs, Conditionneurs de signaux pour capteurs actifs.

Bibliographie

Le présent document est une version modifiée (et adapté) du polycopier de cours de Capteurs Chaînes de Mesures, Université de Lille et cours de Capteurs à IUT Mesures Physiques, Aix Marseille Université dispensés par Prof. Pierre Bonnet , Thomas BEGOU et Marcel PASQUINELLI.

Comment vous joindre?

Prof. Pierre Bonnet –
Master GSI - Capteurs Chaînes de Mesures, Université de Lille



Thomas BEGOU – Marcel PASQUINELLI,
IUT Mesures Physiques à Aix Marseille Université





Université Echahid Hamma Lakhder EL-Oued.
Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique
3 -ème Année Licence : Electronique (2019 /2020)
Matière : Capteurs et Instrumentation

Chargée de la matière : Dr LAIB Ismail

Chapitre 1:

Les capteurs et chaine d'acquisition

2019/2020

Notion de mesure

- Définition:

Une grandeur est *mesurable* si on sait définir l'*égalité*, la *somme* et le *rapport* entre deux valeurs de cette grandeur.

- Exemple:

la température exprimée en Kelvin est une grandeur *mesurable*, correspondant à un niveau d'énergie : l'entropie S d'un système varie comme sa température en Kelvin ; à 600K, elle vaut deux fois plus qu'à 300K.

la température exprimée en Celsius est une grandeur *repérable* : on sait définir l'égalité, comparer (A est plus chaud que B), mais le rapport n'a pas de sens : à 40°C, il ne fait pas deux fois plus chaud qu'à 20°C

Notion de mesure

Types de grandeurs mesurables

- Grandeurs scalaires S
nombre (valeur) + unité

Exemples : longueur, surface, volume, masse, durée, travail, énergie, puissance...

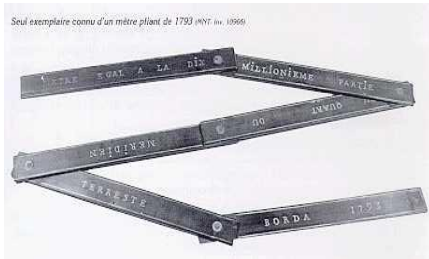
- Grandeurs vectorielles
nombre (valeur) + unité + direction + sens
ou
(composante_X , composante_Y,...) + unité

Exemples : position, vitesse, quantité de mouvement, poids, force...

Notion de mesure

Le Système International d'unités

Les sept unités de base :



mètre



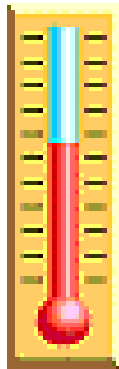
kilogramme



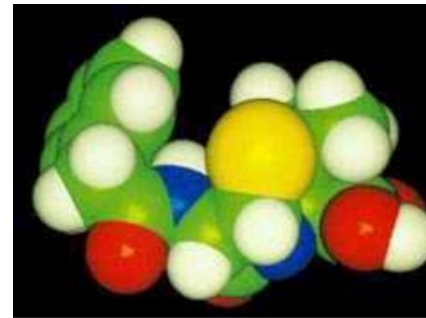
seconde



ampère



kelvin



mole

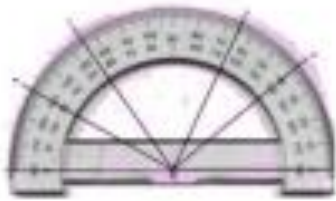


candela

Notion de mesure

Le Système International d'unités

Unités dérivées



radian



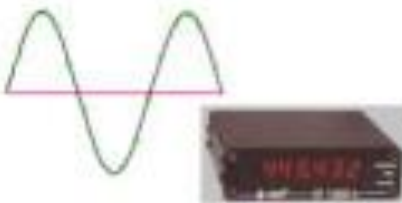
newton



joule



watt



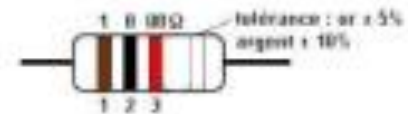
hertz



coulomb



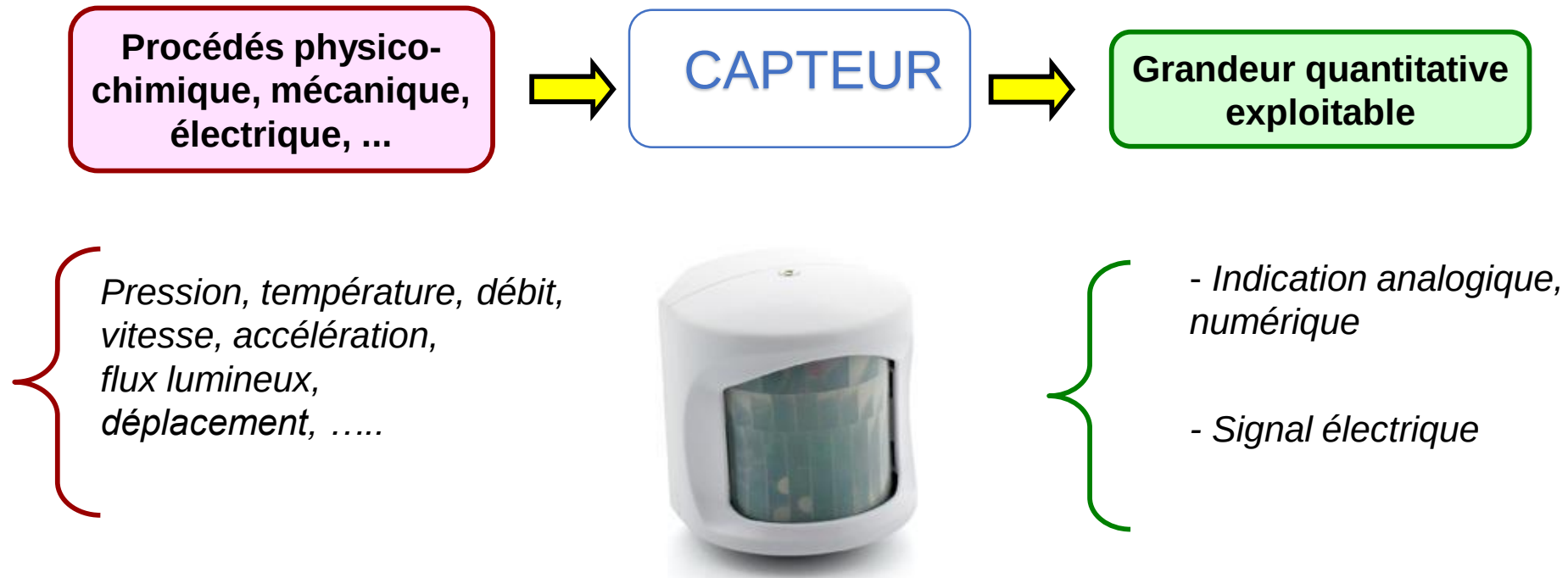
volt



ohm

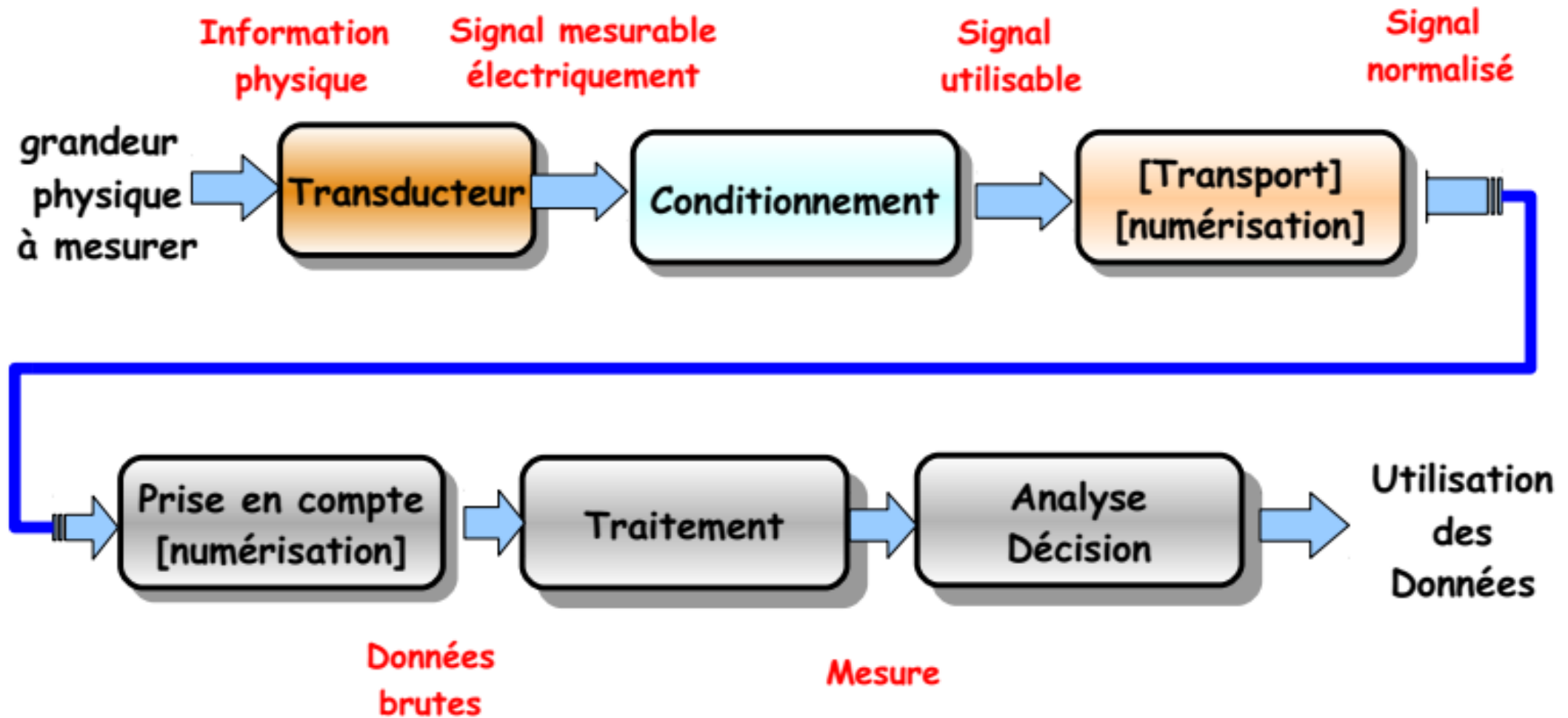
Le Capteur (Sensor)

Définition : Dispositif de **métrologie** chargé de traduire les **variations** d'un procédé **physico-chimique** en une **grandeur exploitable**



Importance du capteur dans la chaîne de mesures

Rôle du capteur

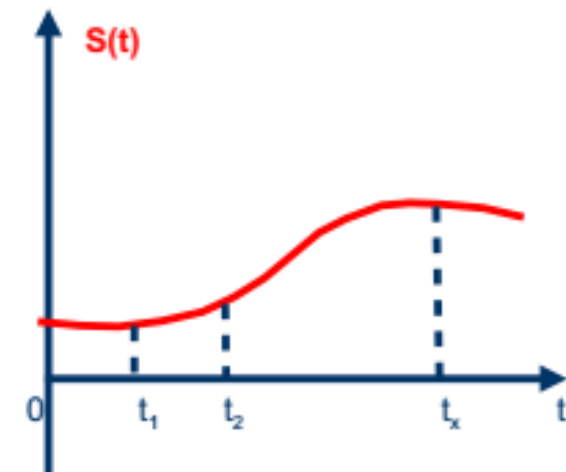
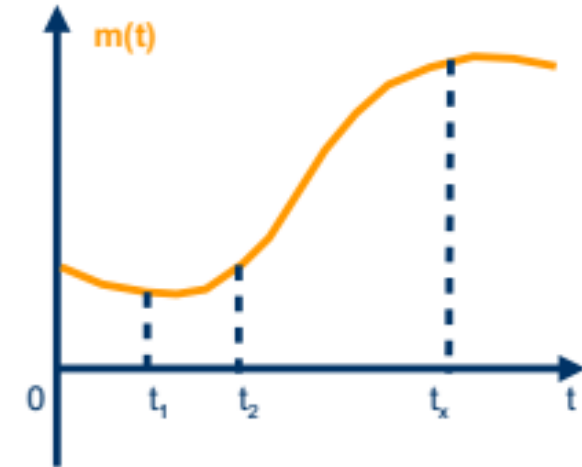


Le capteur est le premier élément de la chaîne de mesure

Importance du capteur dans la chaîne de mesures

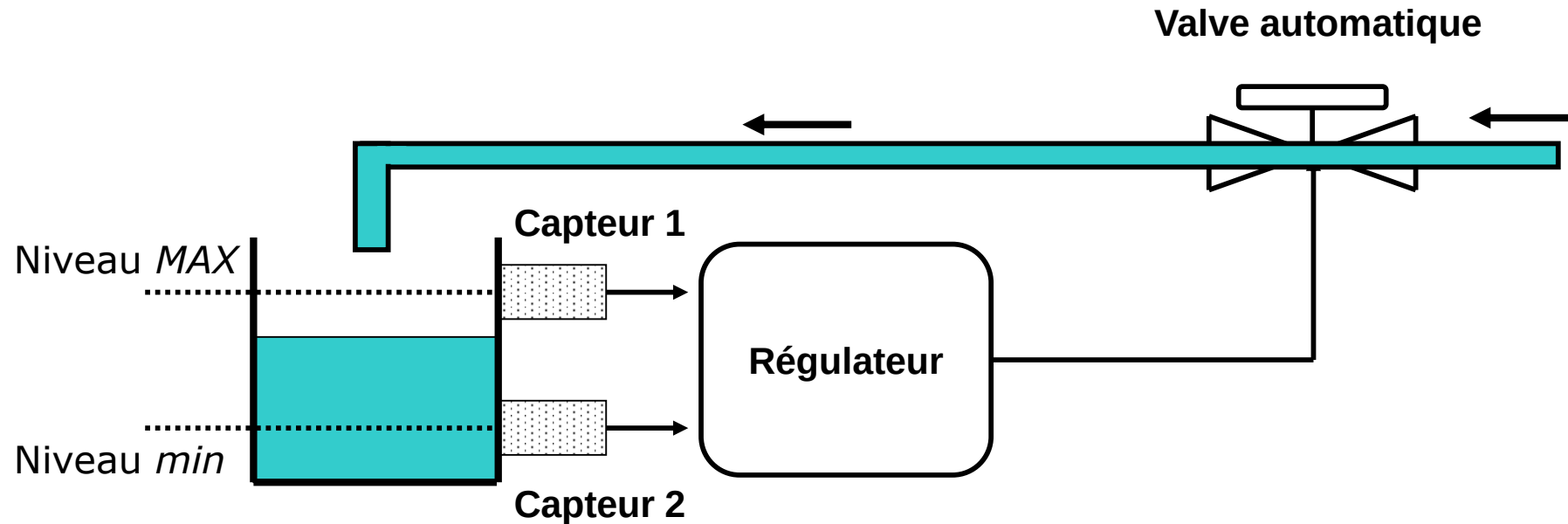
Rôle du capteur

- Le capteur réagit aux variations de la grandeur physique que l'on veut étudier (**mesurande**), en général en délivrant un signal électrique donnant une **image du mesurande**
- Le **transducteur** est l'élément fondamental qui permet de passer du **domaine physique** du mesurande au **domaine électrique** [optique, pneumatique...]



Importance du capteur dans la chaîne de mesures

Exemple : Détection niveau et régulation



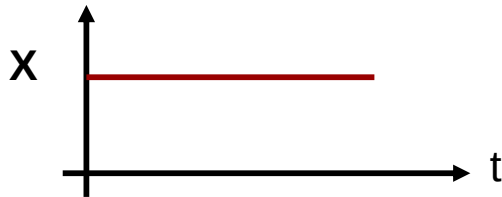
Les mesures réalisés par les **capteurs 1 et 2** permettent par le biais du **régulateur** de régler le **niveau d'eau** dans le récipient.

L'entrée du capteur : Le mesurande

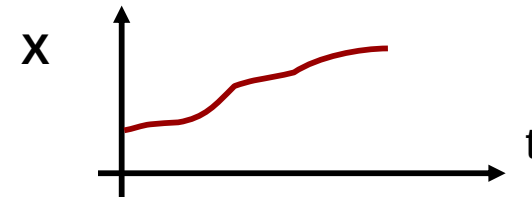
Définition : Le **mesurande** est la **grandeur physico-chimique à mesurer**, on le notera μ , x , X ou E pour se référer à l'entrée du capteur.

Exemple : Pression, température, position, déplacement, accélération, tension, pH, ...

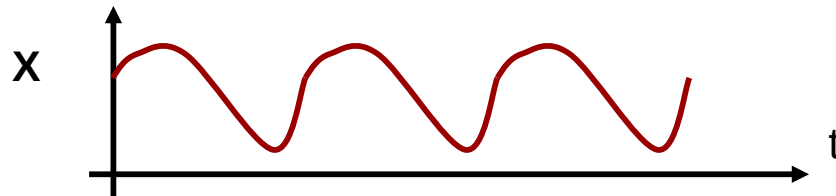
On peut distinguer plusieurs type de mesurandes :



Mesurande **constant**



Mesurande à évolution
temporelle non répétitive



Mesurande à évolution
temporelle répétitive
(périodique)

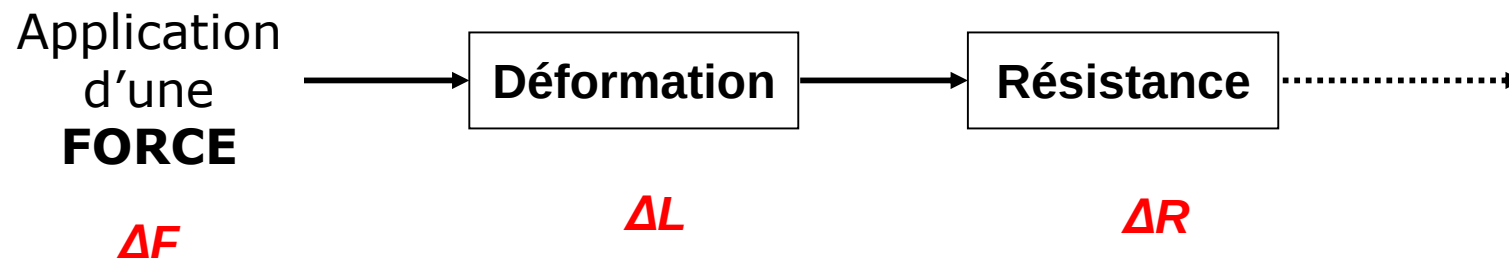
Le corps d'épreuve



- Le **corps d'épreuve** a pour fonction de transformer la grandeur à mesurer (**mesurande**) en une grandeur physique secondaire (**mesurande secondaire**) plus facile à mesurer.
- Pour de nombreux capteurs, il peut y avoir plusieurs corps d'épreuve avant la mesure électrique

Le corps d'épreuve

Exemple : Capteur de force résistif



Le **mesurande primaire** est la force appliquée, ΔF , le **corps d'épreuve** est constitué par un **conducteur métallique** qui va se déformer d'une quantité ΔL sous l'action de ΔF , cette **déformation** est alors traduite en **variation de résistance** ΔR .

L'idée : Chercher les relations ...

- ... liant la valeur de la **résistance** R à la valeur de la **force appliquée** F
- ... liant la valeur de la **variation de la résistance** ΔR de la jauge à la **variation de la force appliquée** ΔF

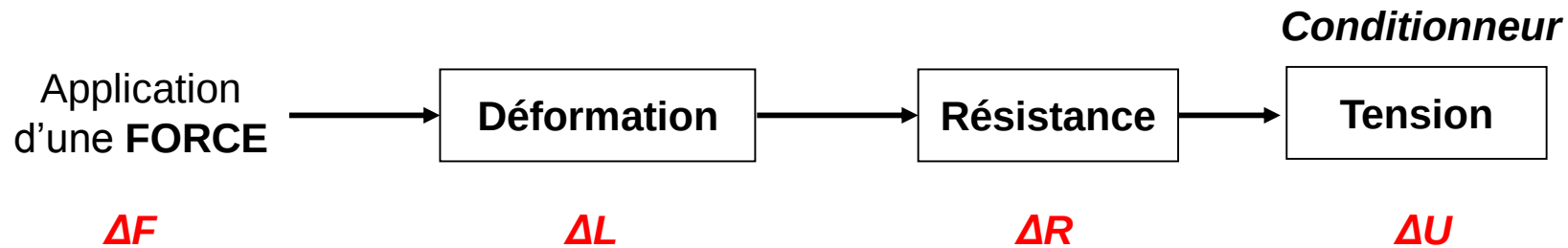
$$R = f(F)$$

$$\Delta R = g(\Delta F)$$

Le conditionneur / transmetteur

Définition : Le **conditionneur** est l'élément de **sortie du capteur** qui transforme les **variations du mesurande primaire ou secondaire** en **variations électriques exploitables** (tension, courant,).

Exemple : Capteur de force résistif avec son conditionneur



Nota : Du point de vue de l'utilisation, on **regroupe** souvent les **fonctions capteur-conditionneur** sous un même terme de **capteur** ou **transducteur**.



La sortie du capteur

Définition : La **sortie du capteur** est noté **Y, y** ou **S**. La **principale fonction** du **capteur** est de **quantifier le mesurande**, cette traduction est généralement réalisée par l'**existence** d'une **relation mathématique** liant la **sortie** et l'**entrée** du **capteur**.



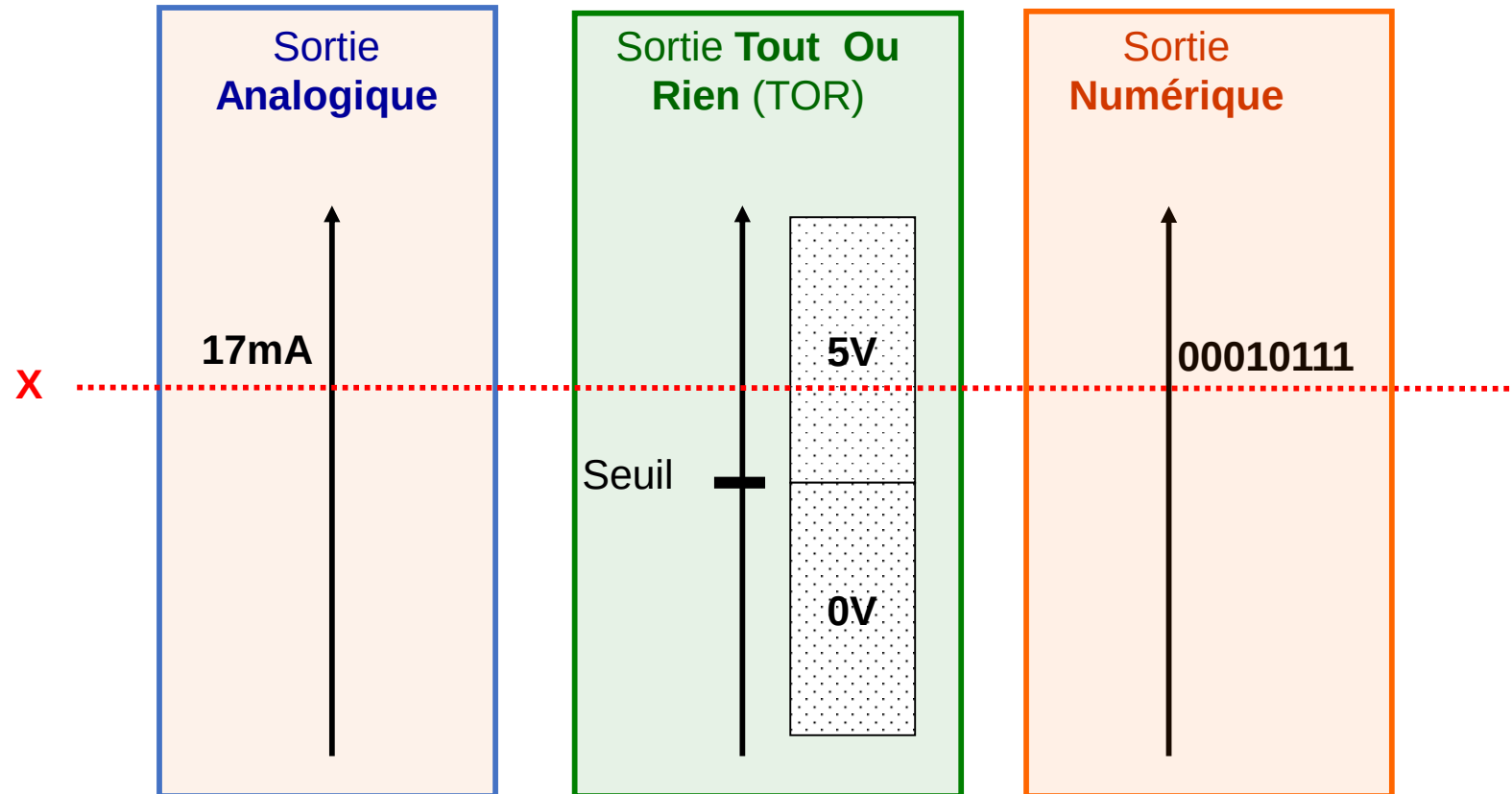
On cherche un lien entre: $X \rightarrow Y$ Que l'on peut mettre sous la forme de $X = X_0 + \Delta X \rightarrow Y = Y_0 + \Delta Y$

Avec : $Y = f(X)$, $\Delta Y = g(\Delta X)$, X_0 et Y_0 valeur de X et Y à "l'équilibre"

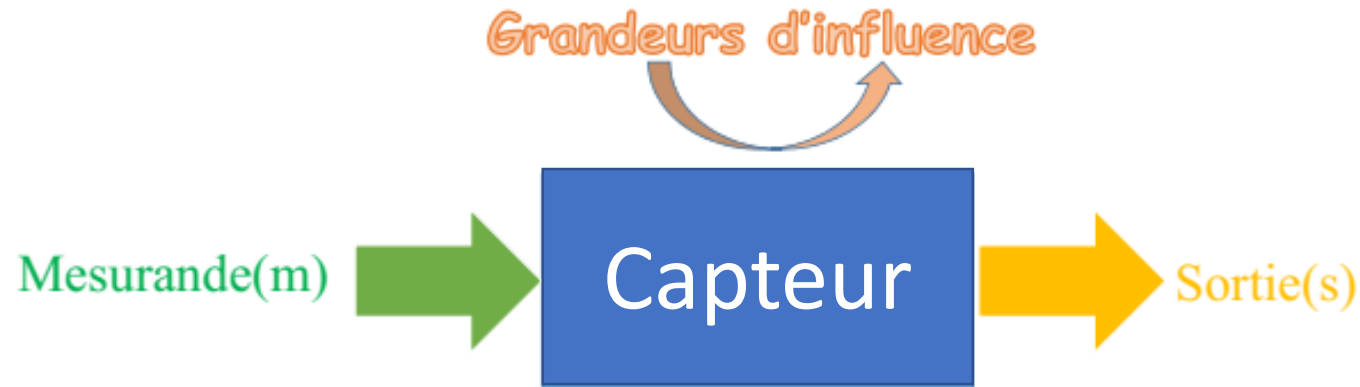
Nota 1 : Si la réponse est linéaire alors $y = k.x$ et $\Delta y = h.\Delta x$ ou $f(X) = g(X)$

La sortie du capteur

On peut distinguer plusieurs type de sorties :



La sortie du capteur



Les **grandeurs influentes** sont **toujours prises en compte** dans le processus de mesure :

- Le **mesurande** est **bruité**
- Les **caractéristiques métrologiques** du capteur sont **modifiées**

La **sortie** est alors **fonction** du **mesurande** et de ces **grandeurs perturbatrices** (bruit).

$$S = f(m) + g(\text{bruit, métrologie})$$

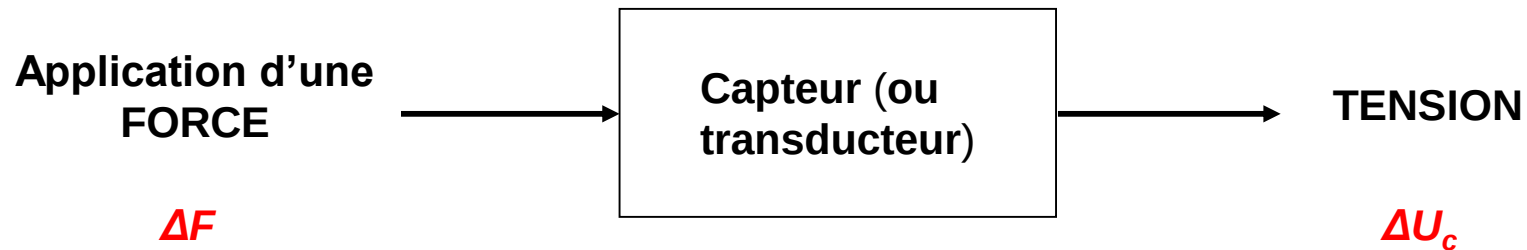
Il est donc **nécessaire** :

- de **préciser** les **conditions de mesures**
- de **vérifier périodiquement** les **caractéristiques métrologiques** du capteur en réalisant des **calibrations régulières** ou des **étalonnages certifiés**

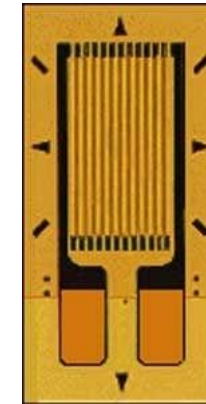
Les perturbations

Exemple : Capteur résistif : Jauge de contrainte ou capteur de force

Principe : L'application d'une **force ΔF** se traduit par une **variation de résistance ΔR_c** de la jauge, cette variation de résistance est traduite en **variation de tension ΔU_c** par l'intermédiaire du **conditionneur**.



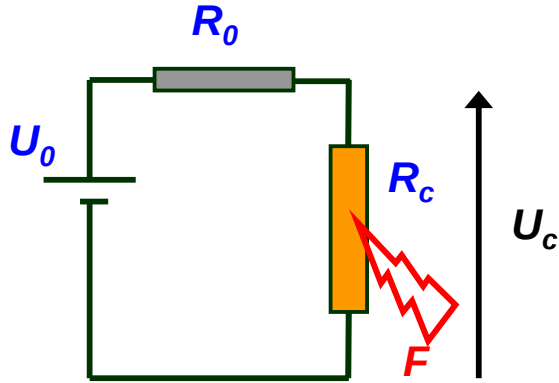
Hypothèse : $\Delta R_c = f(\Delta F)$



jauge de contrainte

Les perturbations

Exemple : Capteur résistif : Jauge de contrainte ou capteur de force



➤ **Relation** entre U_c et U_0 :

$$U_c = \frac{R_c}{(R_c + R_0)} U_0$$

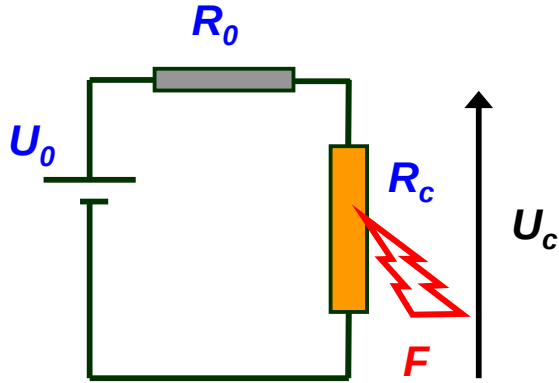
➤ On veut $U_c = \frac{1}{2} U_0$ pour $\Delta F = 0$ (pas de sollicitations) :

$$\frac{R_c}{(R_c + R_0)} = \frac{1}{2} \Rightarrow R_c = R_0$$

Hypothèse (lorsqu'une force ΔF est appliquée) : $R_c = R_0 + \Delta R_c$

Les perturbations

Exemple : Capteur résistif : Jauge de contrainte ou capteur de force



➤ Dérivée de U_c par rapport à R_c :

$$\frac{dU_c}{dR_c} = \frac{(R_c + R_0) - R_c}{(R_c + R_0)^2} U_0 = \frac{R_0}{(R_c + R_0)^2} U_0$$

Que l'on peut écrire :

$$\frac{dU_c}{dR_c} = \frac{R_0}{(2R_0 + \Delta R_c)^2} U_0$$

Si l'on prend R_0 telle que $R_0 \gg \Delta R_{cMAX}$, alors on peut simplifier l'équation de la dérivée,

$$\frac{dU_c}{dR_c} \approx \frac{R_0}{4R_0^2} U_0 \approx \frac{1}{4R_0} U_0$$

qui peut être écrit sous la forme :

$$\Delta U_c = \frac{U_0}{4R_0} \Delta R_c$$

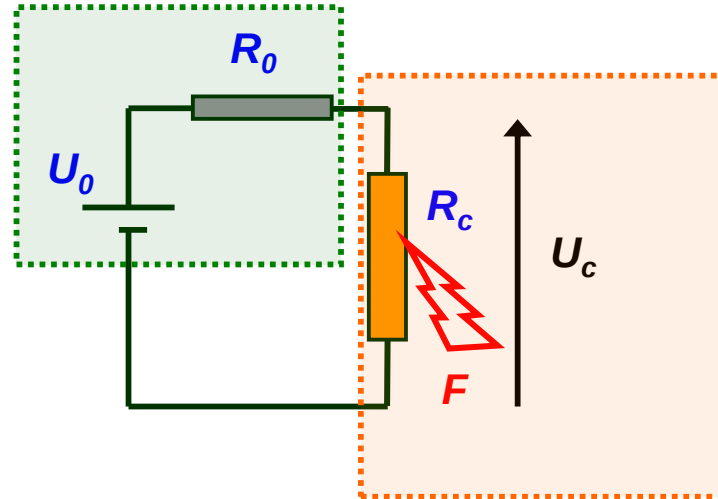
Les perturbations

Exemple : Capteur résistif : Jauge de contrainte ou capteur de force

Grandeurs
modifiantes

La stabilité de l'alimentation de tension U_0 ainsi que l'effet de la température sur R_0 interviennent ici comme grandeurs **modifiantes**,

$$U_0 = g(T) \text{ et } R_0 = h(T)$$



Grandeurs (bruit)

La température conditionne la valeur de R_c , elle agit ici comme grandeur **interférente**

$$\Delta R_c = f(T)$$

$$\Delta U_c = \frac{U_0}{4R_0} \Delta R_c$$

Spécification de la sortie

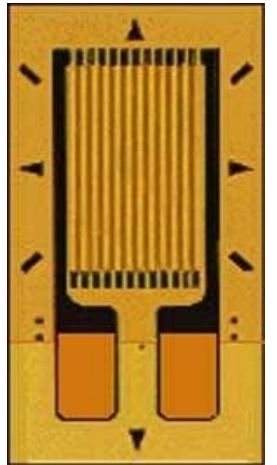
La **nature** du **signal** de **sortie** dépend du **type** de **capteur utilisé**, cependant on peut regrouper les **familles suivantes**:

Classes de capteurs : capteurs passifs

Le **signal** de **sortie** est équivalent à une **impédance**. Une **variation** du **phénomène physique étudié** (mesuré) engendre une **variation de l'impédance**. Ce type de capteur doit être **alimenté** par une **tension électrique** pour obtenir un signal de sortie.

- La sortie est équivalente à un dipôle passif dont l'impédance (R, L, ou C) varie avec le mesurande ;
- Le mesurande est évalué grâce à la mesure de la résistance
- Les capteurs passifs ont besoin d'une **source d'excitation** pour fournir un signal électrique de mesure
- Certains capteurs passifs ont besoin d'un **circuit complexe** pour fournir un signal électrique de mesure

Exemple : thermistance, photorésistance, potentiomètre,
jauge d'extensométrie appelée aussi jauge de contrainte...



jauge de contrainte

Spécification de la sortie

Classes de capteurs : capteurs actifs

- La sortie du capteur est équivalente à une source de tension, de courant ou de charges.

- Signal de sortie équivalent à une source de tension continue

Exemple : Sortie 0-1V, $\pm 5V$, 0-200mV

- Signal de sortie équivalent à une source de courant continu

Exemple : sortie 4-20mA

- Autres signaux de sortie

Exemple : Tension alternative sinusoïdale, sortie impulsionnelle, sortie numérique, sortie TOR,...

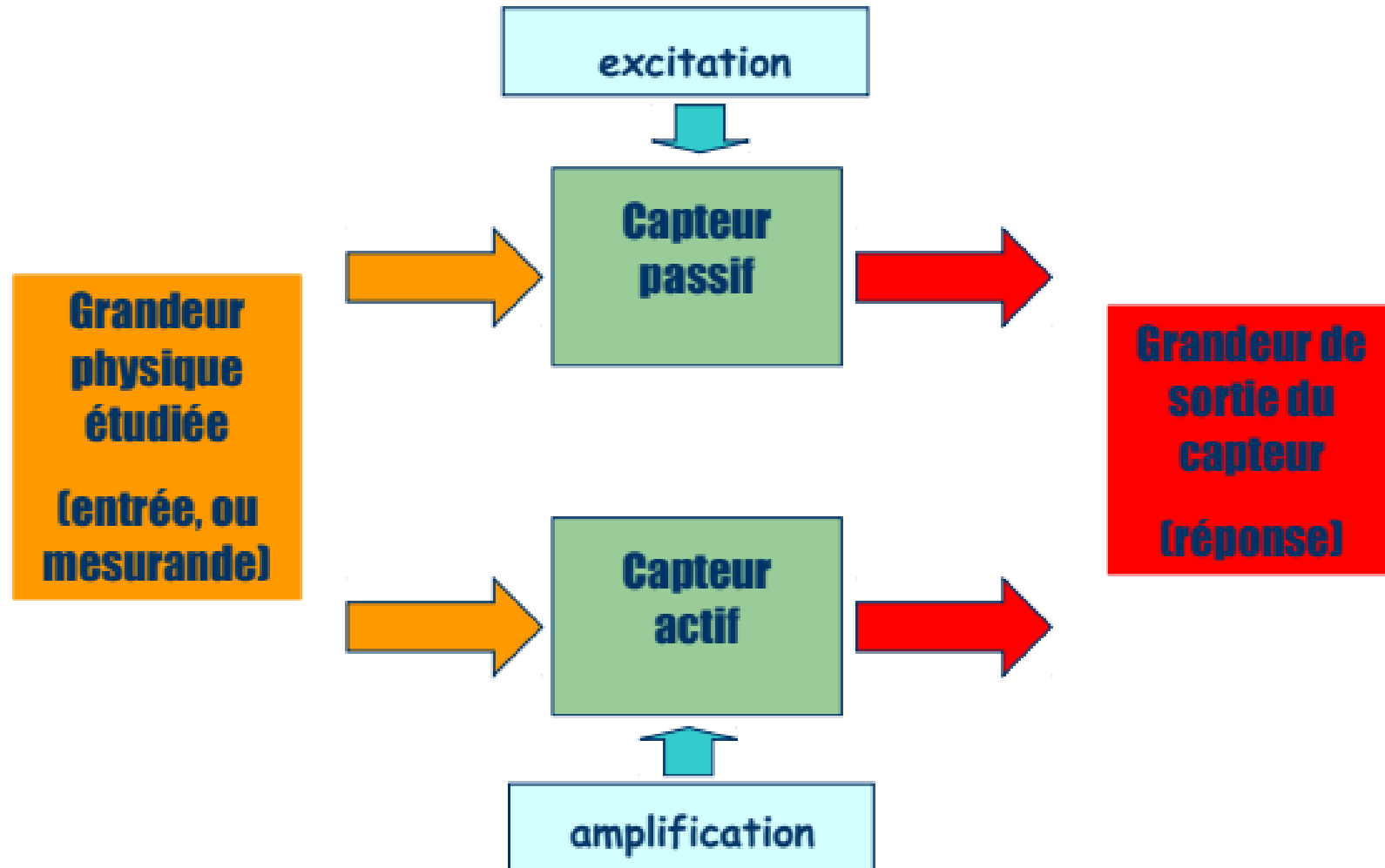
Calibre ou Pleine Echelle (Full Scale Output) : Valeur maximale de la sortie

Exemple de capteur actif : thermocouples, capteur CCD, microphone, ...

- Ces capteurs actifs ont besoin d'un **circuit d'adaptation** pour fournir un signal électrique de mesure utilisable

Spécification de la sortie

Classes de capteurs : capteurs passifs/actifs



Chapitre 2:

Exemples de Capteurs

Exemples de Capteurs

Anémomètre

Capteur solaire

Capteur de gaz



Mesure de la vitesse du vent, du taux de CO2, de l'ensoleillement

Capteur à ultrasons



Détection de la présence d'obstacles

Capteur de présence



Détection de la présence d'une personne

Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de position

Faible distance



capteurs de proximité

Forte distance



règle de mesure

Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de vitesse

Sans contact



Tachymétrie optique ou magnétique



Avec entraînement



Dynamo Tachymétrique

Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de pression



Affichage mécanique



Capteurs électroniques



Capteurs industriels

Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de force/couple

Pesage en extension



Pesage en compression



Balance



Couple



Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de débit

Gaz



Capteur automobile



Portable



Capteur industriel

Liquides



Laboratoire



Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs thermiques

Capteurs de température

modèle portable



Canne de mesure
industrielle



Thermistance
électronique

Pyromètre Sans contact



Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs électriques

Mesure de tension/courant

modèles de poche



Modèle de laboratoire



Haute tension



Forts courants



Boucle de
Rogowski



Sans contact

Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs électriques

Mesure de champ magnétique



Capteur de champs
basse fréquence



« boussole des tangentes »



Détecteur de champ magnétique.

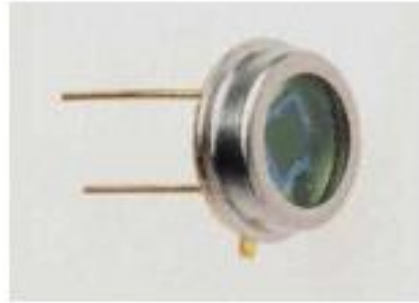
Hutech EMF detector

Seuil de detection : 2 mG

Exemples de Capteurs

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

Capteurs de lumière



Photodiodes



Photorésistance



Phototransistor

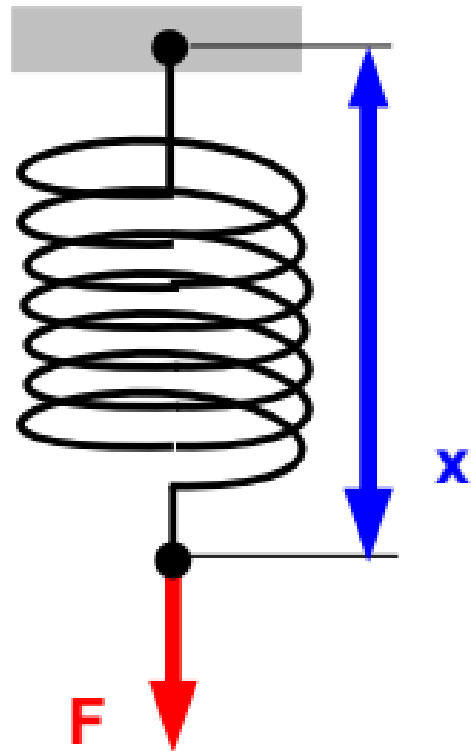


Luxmètre

Exemples de Capteurs

- **Exemple simple:** Mesure d'une force mécanique

On utilise comme corps d'épreuve un élément élastique, respectant la loi linéaire (raideur constante).



$$F = -kx \Rightarrow x = -\frac{F}{k}$$

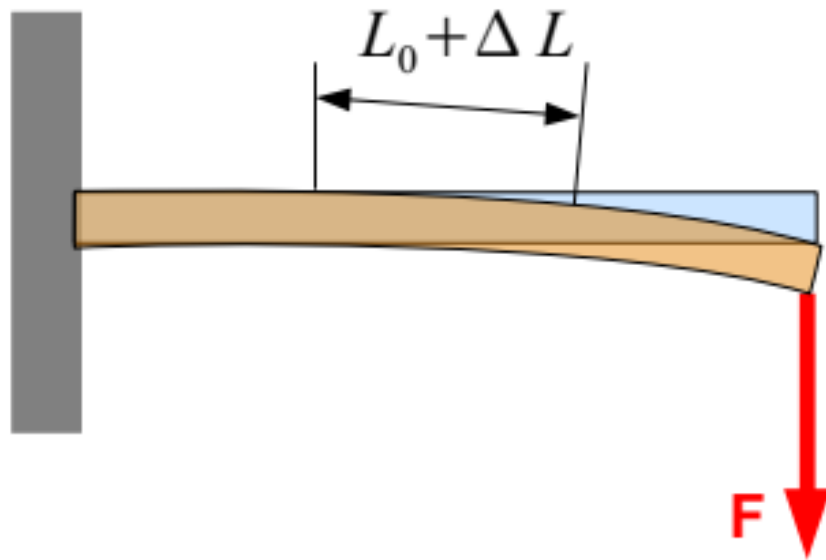
Le mesurande **force** est transformé
en mesurande **déplacement**

Le capteur de force utilise ainsi les
technologies du capteur de
déplacement

Exemples de Capteurs

- Exemple simple: Mesure d'une force mécanique

On utilise comme corps d'épreuve un élément élastique en flexion.



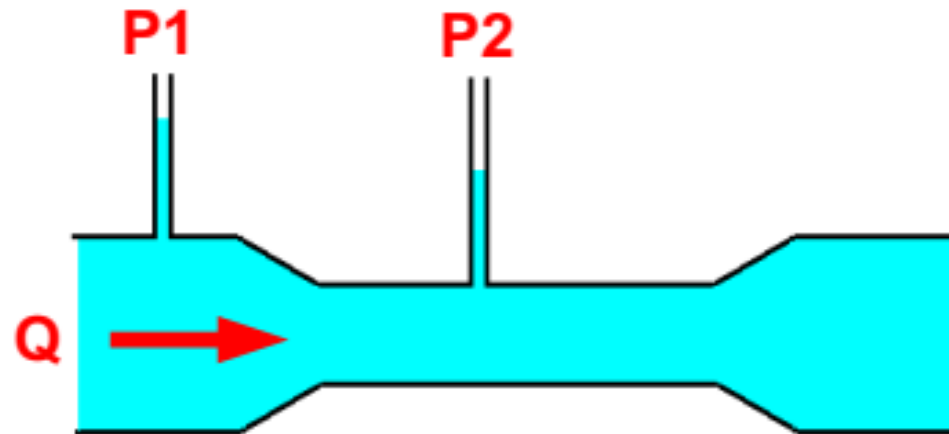
Le mesurande **force** est transformé en mesurande **élongation**

Le capteur de force utilise ainsi les technologies des capteurs de d'élongation (jauges de contraintes)

Exemples de Capteurs

- Autre exemple: Mesure d'un débit

Le débit crée une différence de pression



Le mesurande **débit** est transformé en mesurande **pression différentielle**

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \alpha Q(t) = \beta \Delta p(t)$$

* équation faisant l'objet d'un brevet
CNRS/Univ Poitiers 2005

Exemples de Capteurs

- **Exemple :** Mesure de la puissance électrique

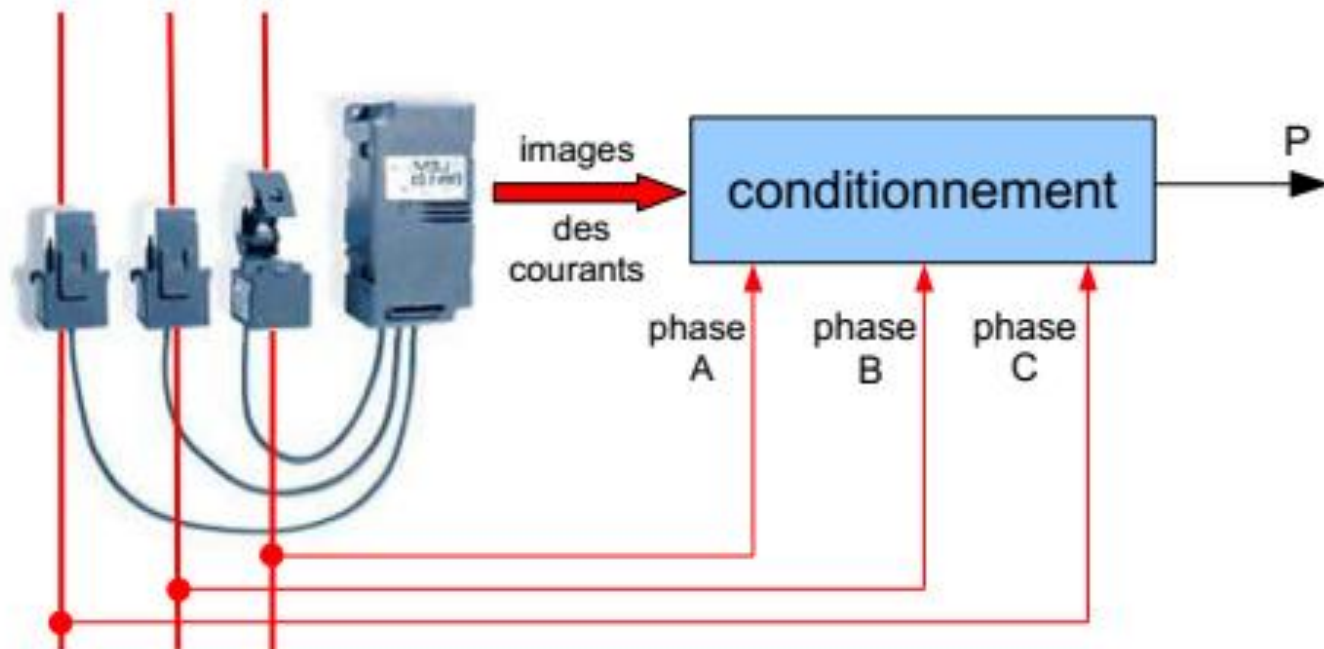
La puissance électrique instantanée est le produit de la tension par le courant.

$$p(t) = u(t) \times i(t)$$

Pour des signaux alternatifs, la puissance instantanée fluctue au cours d'une période (20ms)

Généralement, la puissance dite active est exprimée en valeur moyenne.

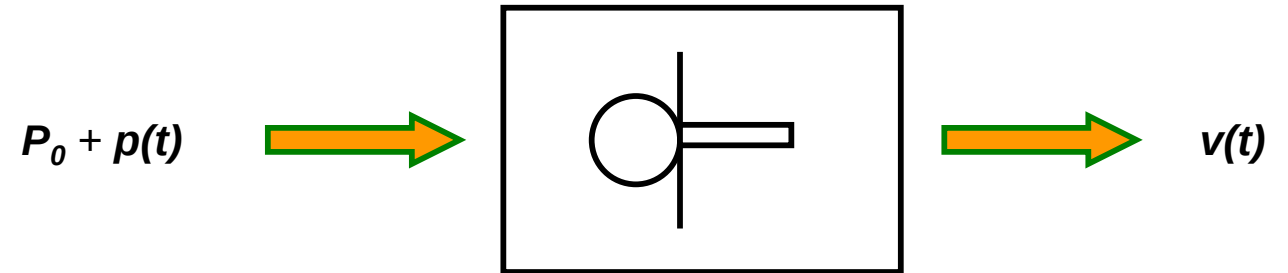
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \times i(t) dt$$



Exemples de Capteurs

- **Exemple** : Le microphone à condensateur

Le **microphone à condensateur** ou **sonomètre** est principalement dédié à l'**instrumentation**.
Il détecte une **pression acoustique** $p(t)$ qui se superpose à la **pression atmosphérique** P_0 . Le sonomètre traduit ensuite cette pression $p(t)$ en une **tension électrique** $v(t)$.



Exemples de Capteurs

- **Exemple : Les capteurs CCD**

- Les capteurs CCD (Charge Coupled Device ou capteur à transfert de charge) sont des composants électroniques semi-conducteurs qui permettent de transformer l'énergie lumineuse des photons en électrons puis en un signal vidéo numérique par l'intermédiaire d'un système de traitement.

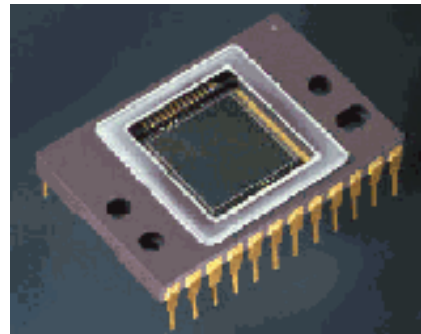


Photo d'un capteur CCD :

Exemples de Capteurs

Applications des capteurs CCD

On utilise des capteurs CCD dans :

- Les appareils d'imagerie grand public : dans les appareils photos numériques, dans caméscopes numériques et dans les téléphones portables.



- L'astronomie. Pour observer les étoiles très peu lumineuses on utilise les capteurs CCD avec un temps d'intégration (d'ouverture) de l'ordre d'une seconde pour capter plus de photons.

- L'imagerie militaire on utilise le spectre des CCD dans les infrarouges pour créer des appareils de vision nocturne.



Lunettes infrarouge:

Chapitre 3:

Quelques caractéristiques métrologiques

caractéristiques métrologiques(علم القياس)

Le **choix** d'un **capteur** dépend de ses spécifications métrologiques, ses applications sont elles mêmes conditionnées par le comportement ou la réponse du capteur à une entrée (mesurande) donnée.

Métrologie: Science qui s'intéresse aux côtés théoriques et pratiques de la mesure (sous tous ses aspects), et ce, dans tous les domaines de la science et de la technologie. Plus spécifiquement, la métrologie touche l'utilisation des unités, la réalisation des étalons, les méthodes, les techniques et les appareils de mesure, ainsi que la précision obtenue.

La qualité métrologique d'un appareil de mesure est l'ensemble des caractéristiques qui fera qu'un appareil de mesure effectuera les mesures avec la qualité correspondante à l'attente de l'utilisateur. La qualité d'un appareil est définie par les caractéristiques suivantes :

La justesse, la fidélité, précision (exactitude); La résolution; La sensibilité; L'étendue de mesure; Le temps de réponse; La linéarité.

caractéristiques métrologiques

On distingue usuellement les réponses **statiques** et **dynamiques** du capteur :

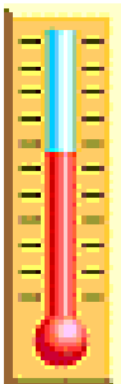
- Dans **réponses statiques** l'entrée ne **varie pas** ou **varie par paliers** et la grandeur de sortie est relevée **lorsque tout effet transitoire a disparu**.
- La **réponse dynamique** traduit le **comportement transitoire temporel du capteur**, elle renseigne également sur son **comportement fréquentiel**.

Caractéristiques statiques des Capteurs

La **réponse statique** est généralement obtenue après un **étalonnage statique** qui consiste à relever les **valeurs de la sortie** lorsque l'**entrée** considérée **varie par paliers**. Les **autres paramètres (entrées interférentes ou modifiantes)** sont maintenus **constants**. Elle est représentée par le tracé : $Y = f(X)$

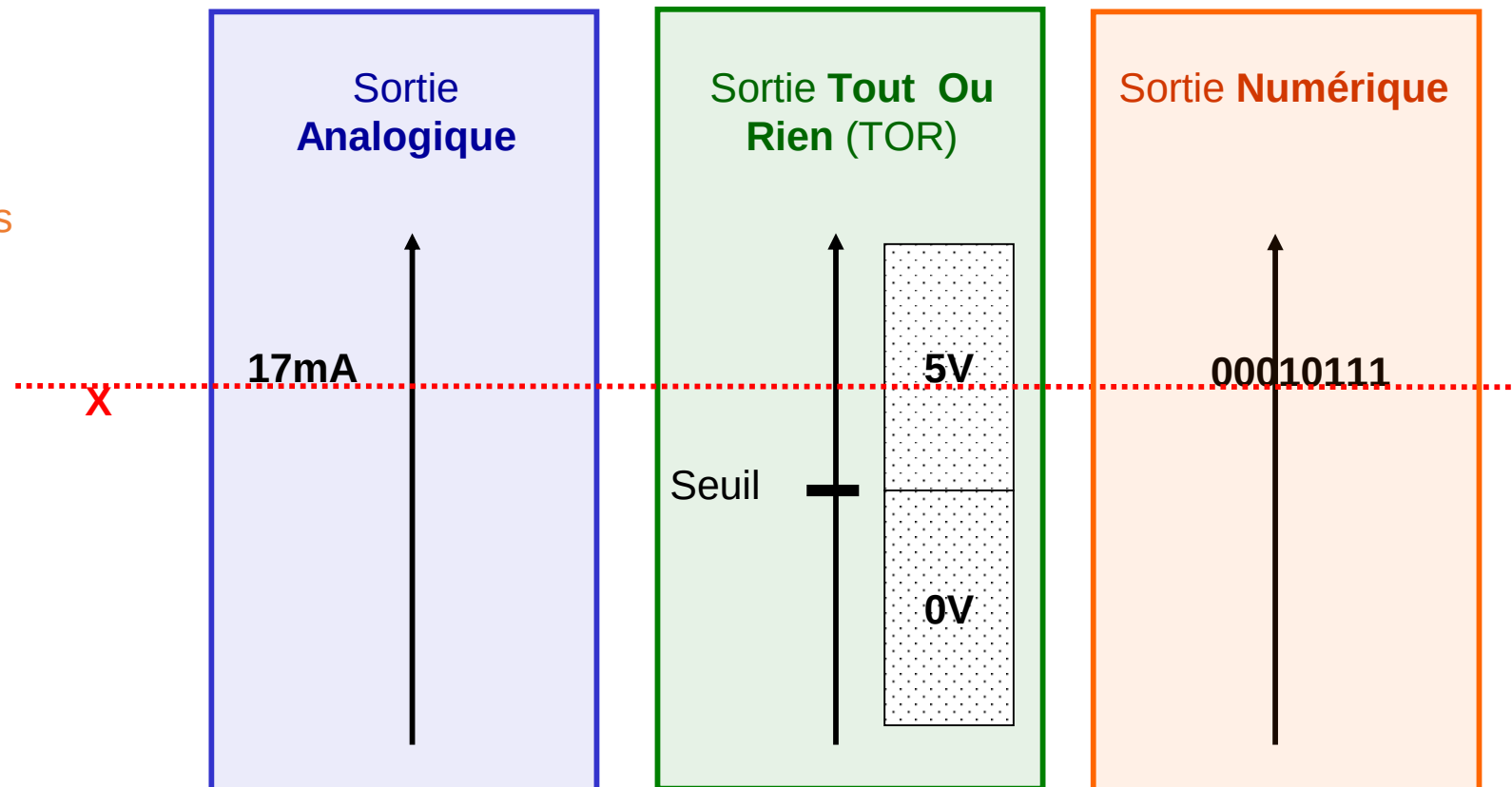
Exemple:

un thermomètre indique la température du milieu dans lequel il se trouve quand il est en **équilibre thermique** avec ce milieu, c'est à dire quand leurs **températures** sont **égales**



Ce thermomètre est-il en régime statique ?

On peut distinguer **trois** comportements :



Caractéristiques statiques des Capteurs(Etendue de mesure)

- L'étendue de mesure est la **zone nominale** d'emploi

Zone dans laquelle les caractéristiques du capteur correspondent aux spécifications de **fonctionnement normal** ; elle est bornée par la limite inférieure et la limite supérieure (**portées**)

Exemple 1: pour le capteur de force à sortie fréquentielle dont les caractéristiques sont données ici, la **portée minimum** est 0N, la **portée maximum** est 30N, soit une étendue de mesure de 30N

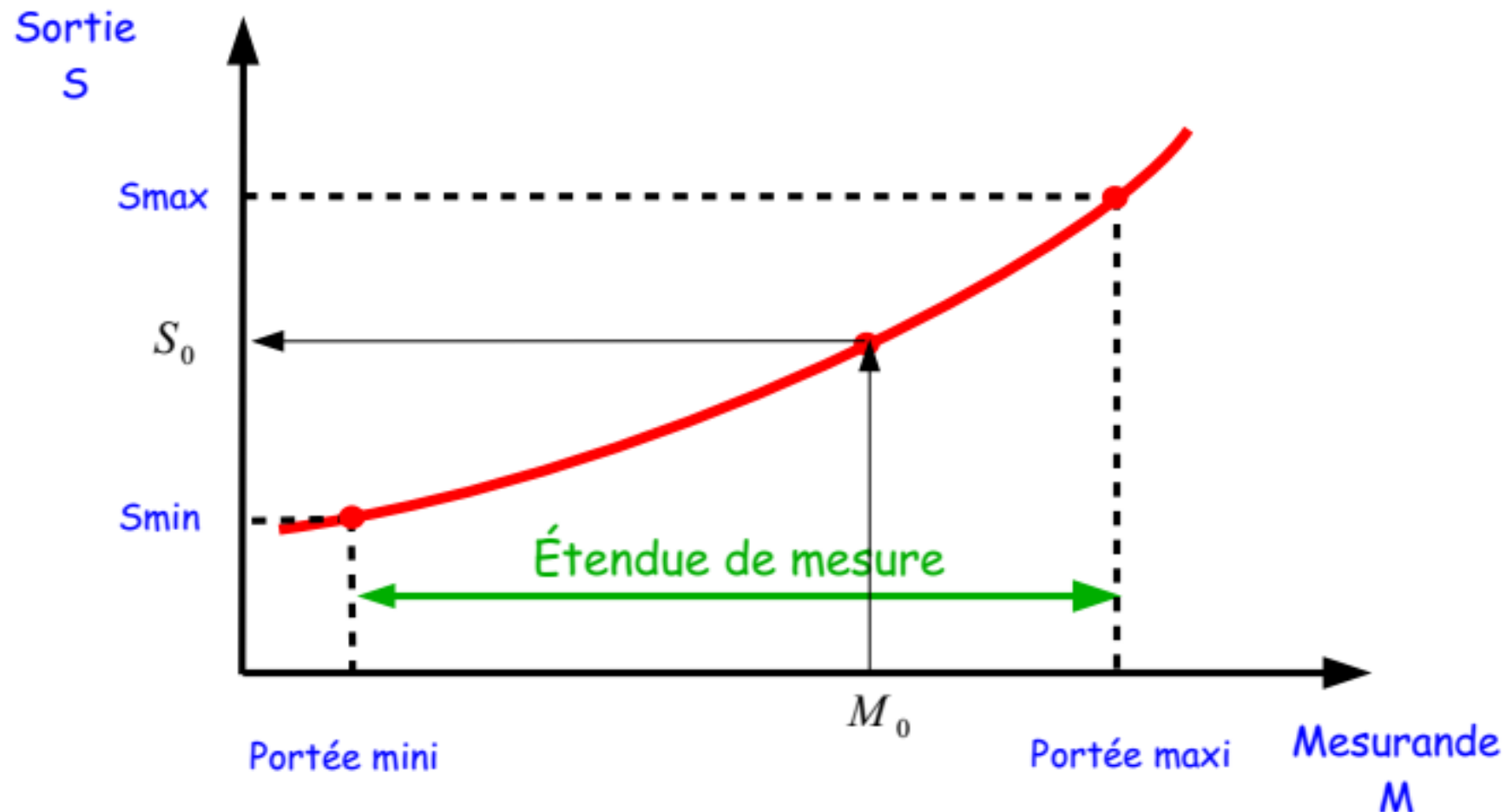
étendue de mesure	0 - 30 N
sensibilité	10,5 Hz . N ⁻¹
linéarité	3,6 % de l'étendue de mesure
répétabilité	2 %
hystérésis	1,8 %
dérive temporelle	- 0,6 Hz . h ⁻¹
dérive thermique	0,5 Hz . °C ⁻¹
facteur de qualité	180

Tableau 4.1 : caractéristiques techniques du capteur

Caractéristiques statiques des Capteurs (Courbe d'étalonnage)

- La caractéristique statique est la courbe qui représente la **réponse statique** en fonction du **mesurande**

↳ on l'appelle aussi **courbe d'étalonnage**.



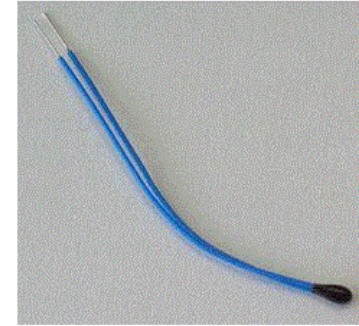
Caractéristiques statiques des Capteurs (Courbe d'étalonnage)

- La courbe d'étalonnage peut être définie une relation fonctionnelle $S = \Phi(M)$

Cas 1 : la loi est connue physiquement

Exemple d'une sonde de température type thermistance

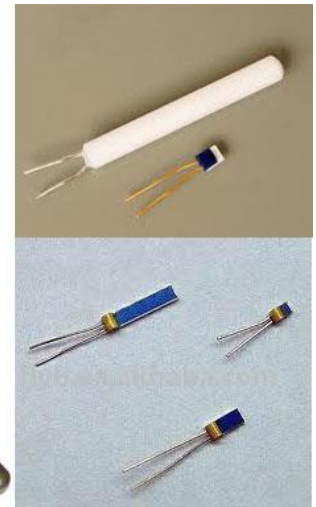
$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$



Cas 2 : la loi est une approximation polynomiale déterminée par régression

Exemple d'une sonde de température type PT100

$$R_T = 100(1 + 3.9083 T - 5,775 \times 10^{-7} T^2)$$



Caractéristiques statiques des Capteurs (**Linéarité**)



D'une manière générale, on a :

$$X \rightarrow Y \quad \text{et} \quad X = X_0 + \Delta X \rightarrow Y = Y_0 + \Delta Y$$

$$\text{avec} \quad Y = f(X) \quad \text{et} \quad \Delta Y = g(\Delta X)$$

Définition : Si la réponse du capteur est **linéaire** alors on aura $f(X) = g(X)$

Le **capteur** est dit **linéaire** si, avec : $X_1 \rightarrow Y_1$ et $X_2 \rightarrow Y_2$

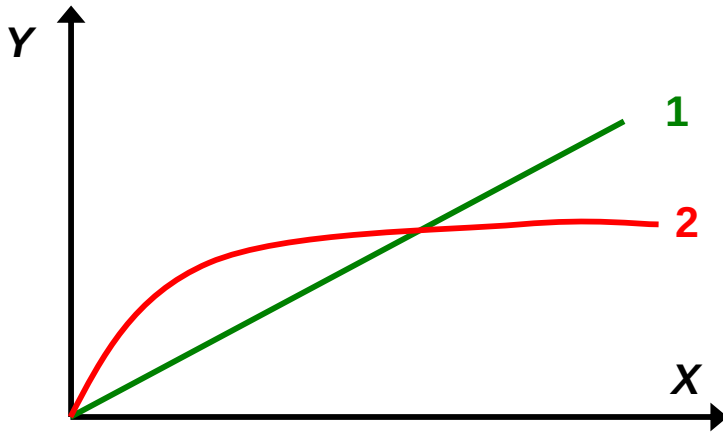
On a :

$$X = X_1 + X_2 \rightarrow Y = Y_1 + Y_2$$

$$X = aX_1 \rightarrow Y = aY_1 \quad \text{avec } a = \text{cste}$$

Caractéristiques statiques des Capteurs (**Linéarité**)

Exemple : Capteur linéaire et non linéaire



Si la caractéristique $Y = f(X)$ est tracé dans une échelle linéaire, alors on a :

Capteur **1** : **linéaire**

Capteur **2** : **non linéaire**

Not : La relation entrée sortie d'un capteur linéaire est donc de la forme :

$$Y = kX$$

avec $k = \text{cste}$

On appelle souvent capteur linéaire un capteur de caractéristique

$$Y = kX + Y_0$$

Caractéristiques statiques des Capteurs(**Sensibilité**)

Définition : La **sensibilité** (k , G ou S) du capteur est donnée par le **quotient** de l'**accroissement** de la **grandeur** de sortie ΔY par l'**accroissement** correspondant du **mesurande** ΔX .

$$G = k = S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} \bigg|_{X=X_0} = \frac{dY}{dX} \quad (\text{en } X = X_0)$$

Note : La **sensibilité** peut se déterminer graphiquement à partir de la **courbe d'étalonnage**. La sensibilité est la **pente** de la courbe au point X_0

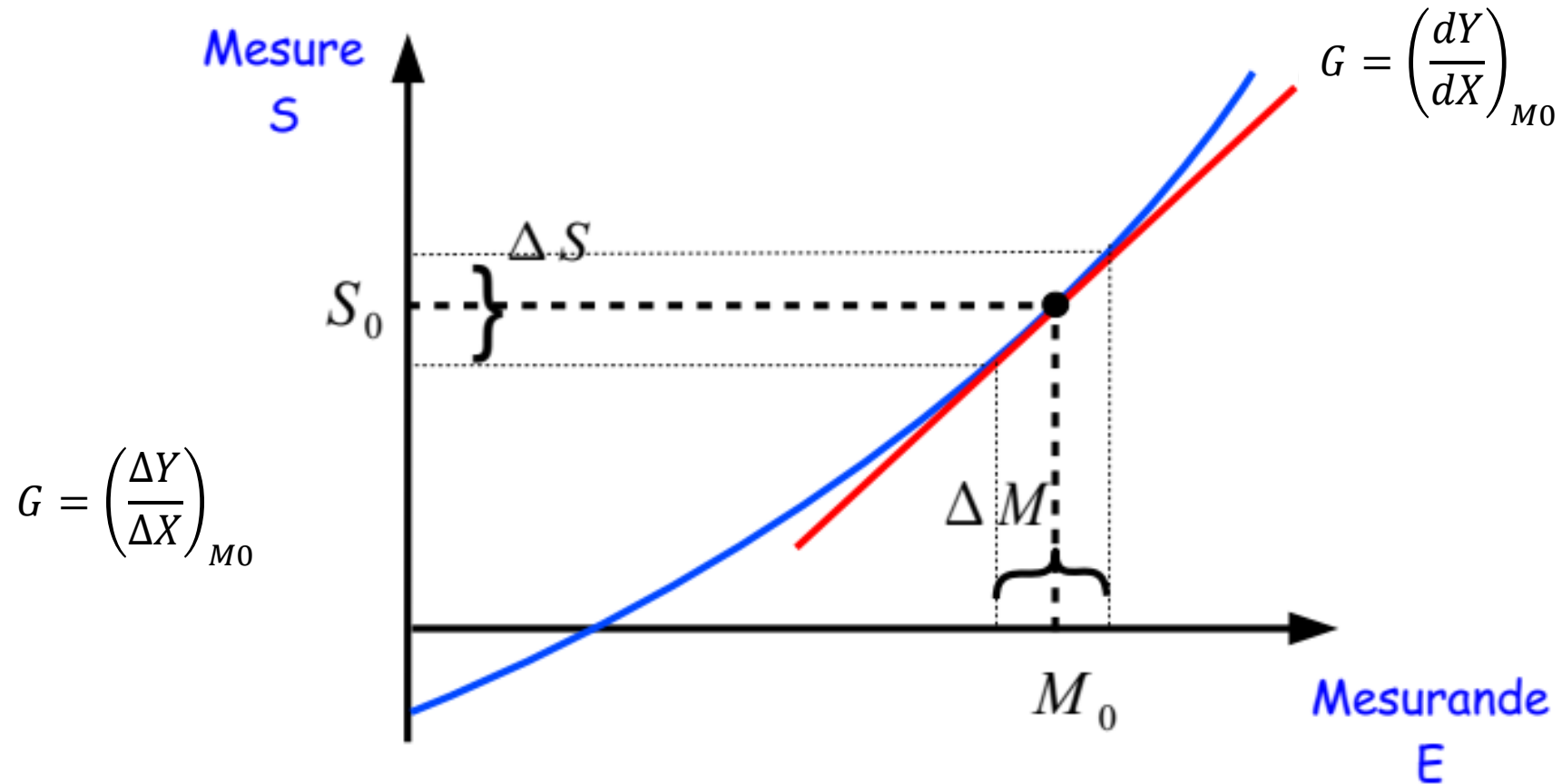
La **sensibilité** d'un capteur **linéaire** est **constante** sur son **étendue** de **mesure**.

Exemple : Sensibilité d'un microphone : $S = 46,2 \text{ mV/Pa}$

Sensibilité d'un thermocouple : $S = \text{qqes dizaines de } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (selon leurs types)

Caractéristiques statiques des Capteurs(Sensibilité)

- Evaluation graphique de la sensibilité:



Un capteur est dit "**linéaire**" lorsque sa sensibilité est constante sur l'étendue de mesure

Caractéristiques statiques des Capteurs(Sensibilité)

- Sensibilité calculée à partir du modèle physique:

$$\sigma = \left(\frac{dS}{dE} \right)_{E_0}$$

Exemple 1 :

pour un capteur à loi quadratique $s = a.e^2 + b.e + c$

$$\sigma = 2a.e + b$$

Exemple 2:

Pour une thermistance ayant pour résistance R_0 à la température absolue T_0 , l'équation d'état est :

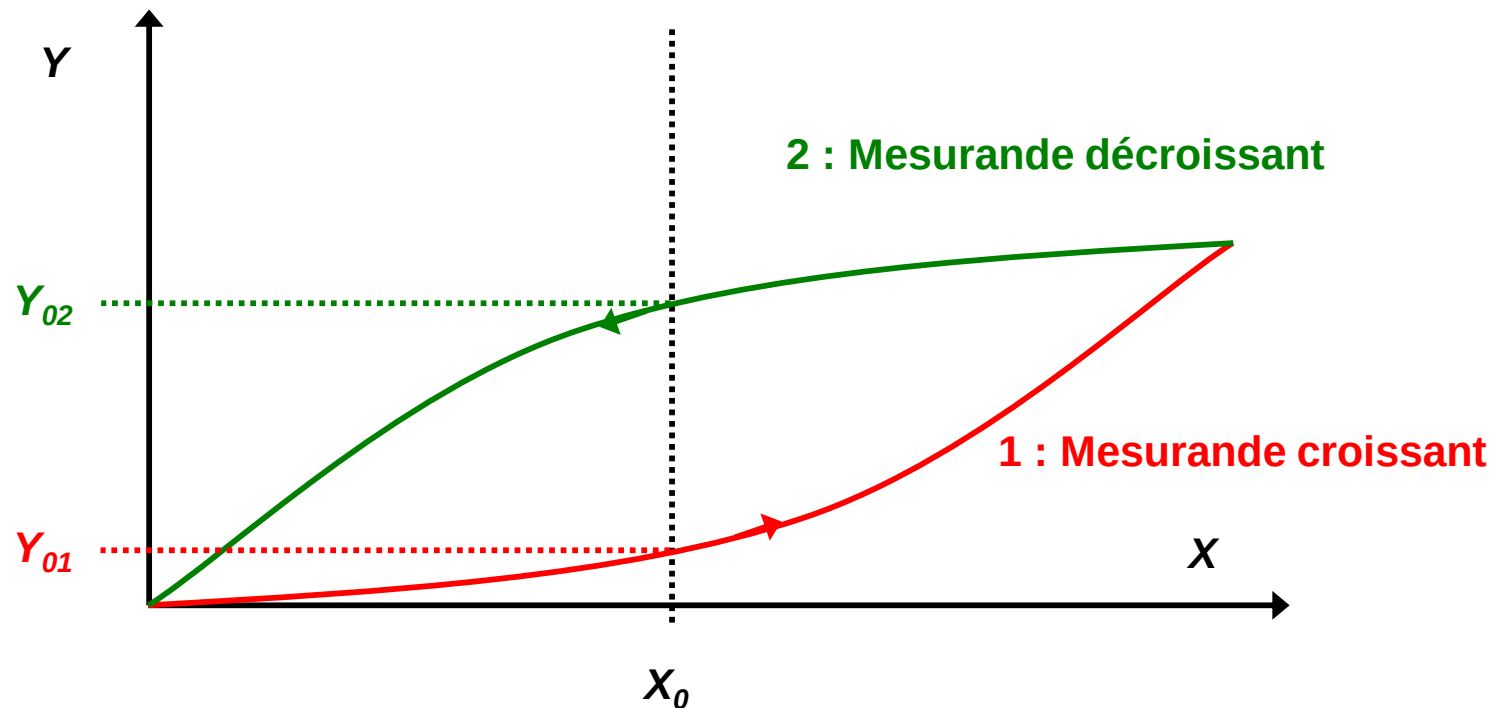
$$R(T) = R_0 \cdot \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

La sensibilité de ce capteur est donc :

$$\sigma(T) = \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \cdot R_0 \cdot \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Caractéristiques statiques des Capteurs(Hystérésis)

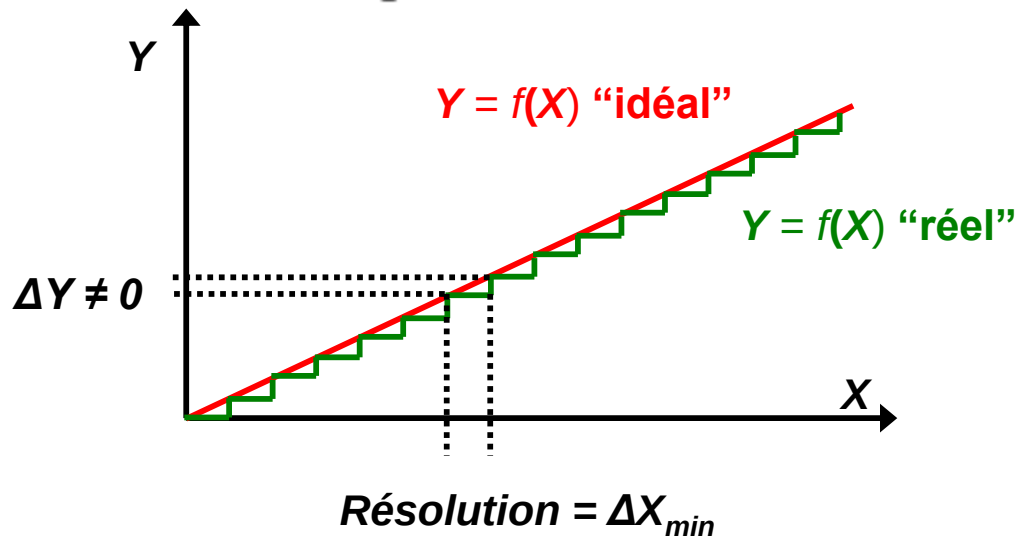
Définition : Un capteur présente une **hystérésis** lorsque la **valeur** de la **sortie** dépend de la **manière** dont celle-ci a été **atteinte** (**mesurande croissant** ou **décroissant**)



Exemple : mesure de **température** par un capteur comportant une **protection** en **plastique** comme les thermistances ou la Pt 100 surmoulée. Des résultats différents sont obtenus pour une étude par **température croissante** ou par **température décroissante**.

Caractéristiques statiques des Capteurs(Résolution)

- La résolution est la **plus petite variation** de la mesure qu'il est possible d'observer
 - ✓ La résolution doit être regardée avec importance lors de la mesure d'une grandeur car celle-ci conditionne la précision du résultat obtenu.
- ❑ Plus la résolution est petite, plus l'appareil est précis.
- ❑ Pour un appareil donné, la résolution diminue en général avec le calibre.
- ❑ Pour un appareil numérique, la résolution est la variation de valeur correspondant à une variation de 1 unité du dernier digit (chiffre) à droite.



References	Capacities	Resolutions
AND CNR EH 0.3	0.3 Nm	0.03 mNm
AND CNR EH 1.5	1.5 Nm	0.15 mNm
AND CNR EH 6	6 Nm	0.6 mNm
AND CNR EH 12	12 Nm	1.2 mNm

Les capteurs de couple de cette série ont une résolution égale à 1/10000 de leur étendue de mesure

Caractéristiques statiques des Capteurs(Résolution)

- Autre exemple:



FONCTIONS

Température de -20°C à 60°C (résolution : 0,1°C).

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Sélecteur °C/°F.

Ecran LCD 1 ligne (affichage de la température ambiante).

Affiche la mesure sur son écran LCD et la transmet à l'unité mère sur 433 Mhz.

Boîtier résistant et étanche.

Transmission sur 433 Mhz à 30 m maxi.

Cycle de transmission vers l'unité mère : 30 secondes.

LED rouge témoin de communication.

Se fixe à une paroi ou se pose.

Alimentation : 2 piles LR03 'AAA' (fournies).

Dimensions : 91x59x20 mm. Poids : 78 g.

Notice en français. Garantie d'un an.

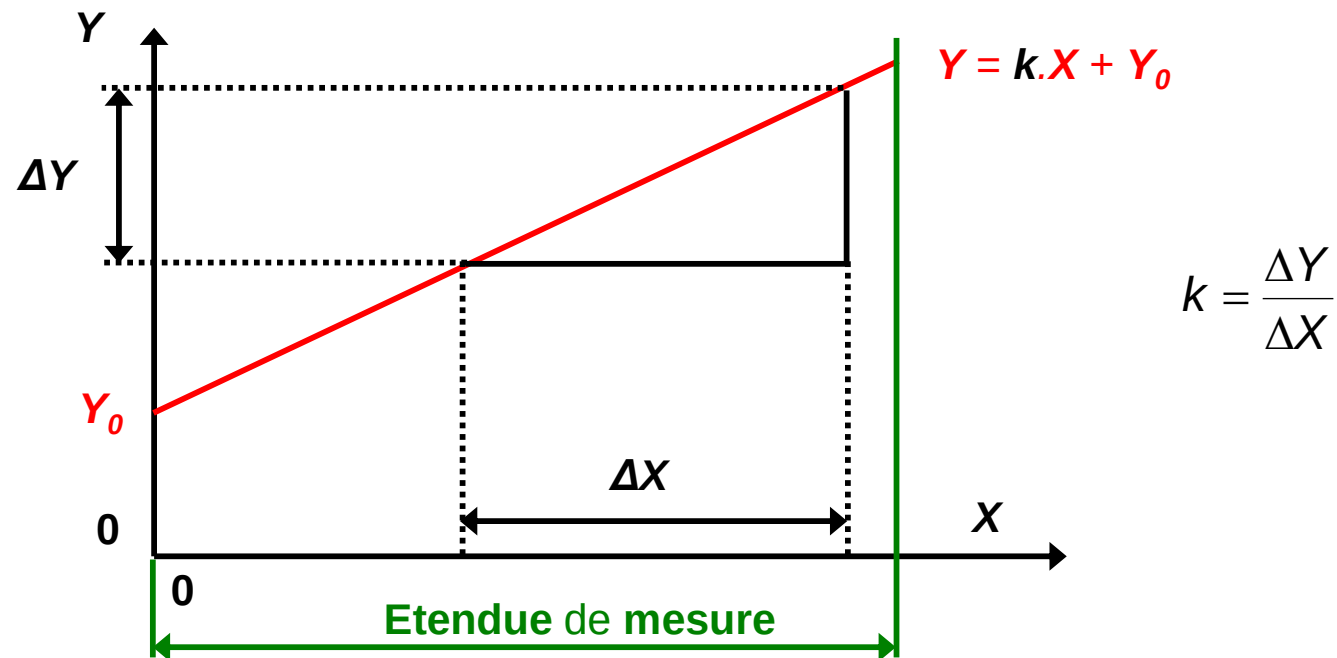
Attention : la résolution n'est pas la précision !!!!

Caractéristique de transfert

Définition : La **caractéristique de transfert** détermine la **relation** entre la **l'entrée** et la **sortie** du capteur. Dans la plupart des applications, quand cela est **possible**, la sortie du capteur suit une loi du type :

$$Y = k.X + Y_0$$

Ou **k** est la **sensibilité** du capteur et **Y₀** le **décalage du zéro**. (**Y = Y₀** pour **X = 0**)



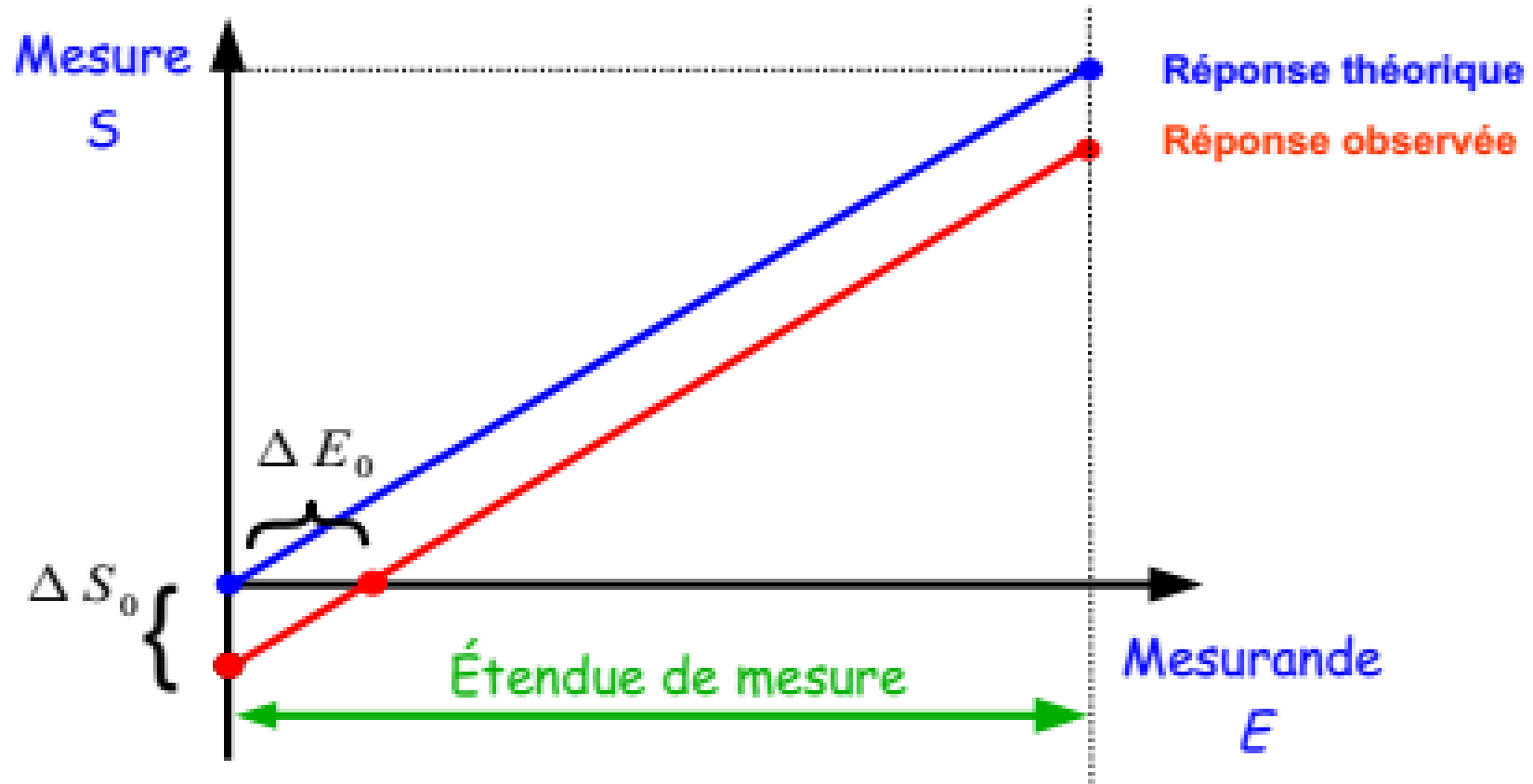
Type d'erreurs

Définitions :

- Une **erreur [systématique]** est une différence entre la valeur « vraie » de la mesure et celle obtenue à partir de la réponse du capteur.
- L'erreur **absolue** est caractérisée par une valeur **absolue** et un **signe**
Une erreur présente un caractère **systématique** et **répétitif**.
- Les erreurs **aléatoires**.

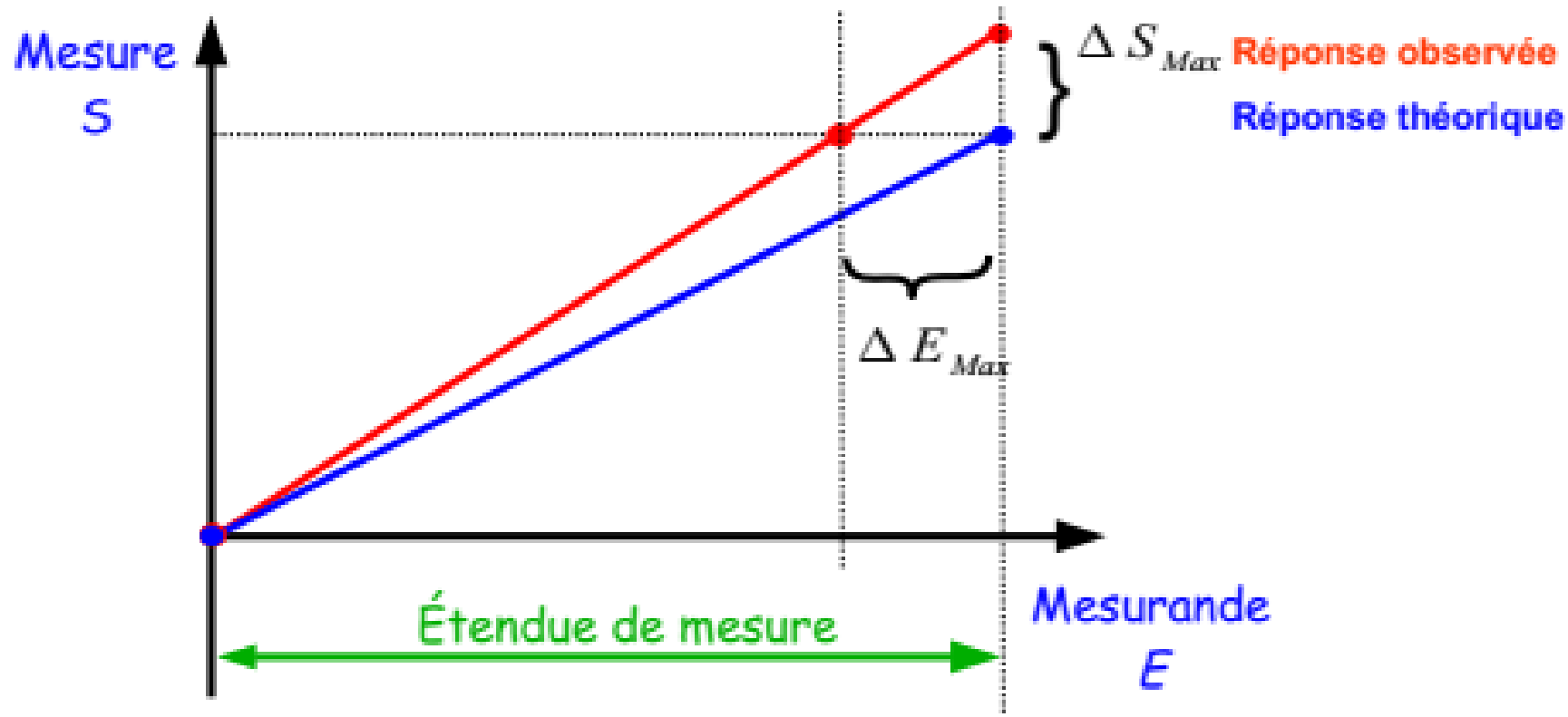
Erreurs systématiques

- L'**erreur d'offset** ou **décalage** est la différence entre la valeur « vraie » de la mesure et celle obtenue à partir de la réponse du capteur pour la **borne inférieure** de l'étendue de mesure



Erreurs systématiques

- L'**erreur de gain** est l'erreur de pente de la courbe caractéristique du capteur; elle est visible essentiellement pour la **borne supérieure** de l'étendue de mesure.



Erreurs aléatoires

Evaluation des erreurs aléatoires :

Moyenne : soient les mesures $x_1, x_2, \dots, x_n$ d'un même grandeur X répétée n fois, la valeur moyenne de la mesure est :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

Écart : c'est la différence entre une mesure x et la moyenne ; elle peut être positive ou négative ; la moyenne des écarts est nulle pour une erreur aléatoire centrée.

$$x_i - \bar{X}$$

Écart absolu moyen (EAM): moyenne des valeurs absolues des écarts à la moyenne.

$$EAM = \frac{1}{n} \sum |x_i - \bar{X}|$$

Variance : moyenne des carrés des écarts

$$V_x = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X})^2$$

Écart quadratique moyen (EQM) ou écart type : racine de la moyenne des carrés des écarts

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X})^2}$$

Erreurs aléatoires

Exemple sur: L'écart-type des valeurs prises par une variable

On considère un ensemble de valeurs prises par une grandeur numérique. L'écart-type est une mesure de la dispersion des valeurs autour de leur moyenne arithmétique.

Prenons par exemple les tailles suivantes relevées sur 7 personnes :

152 158 164 168 168 169 176

Calculons la moyenne arithmétique des tailles, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i$, avec ici $n = 7$:

$$\bar{x} = \frac{1}{7} [152 + 158 + 164 + 2 \times 168 + 169 + 176] = 165,0$$

Par définition, l'écart-type est la moyenne quadratique des écarts à la moyenne $\bar{x}$. On le note habituellement s (de l'anglais *standard deviation*) :

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad \{1\}$$

Soit, pour l'exemple,

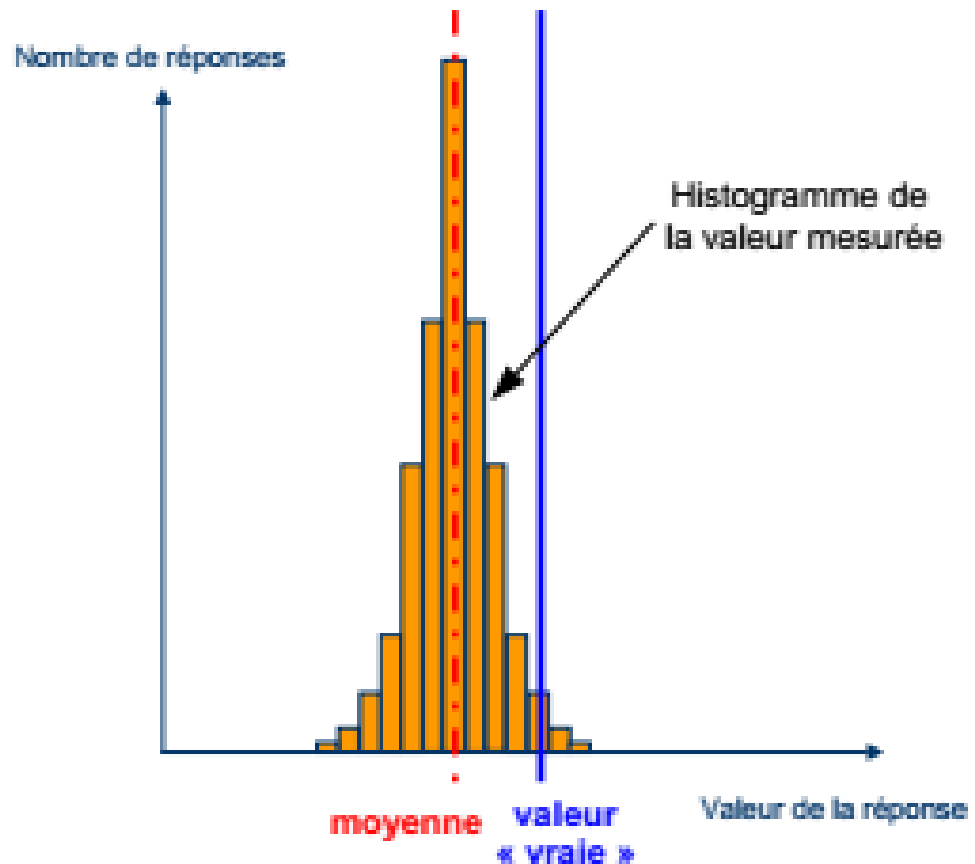
$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{1}{7} [(152 - 165)^2 + (158 - 165)^2 + (164 - 165)^2 + 2 \times (168 - 165)^2 + (169 - 165)^2 + (176 - 165)^2]} \\ & = 7,3 \end{aligned}$$

Erreurs aléatoires

- Fidélité:

la fidélité est l'aptitude à donner, pour une **même valeur** de la grandeur mesurée, des indications voisines entre elles,

même si la valeur moyenne de cette réponse est éloignée de la **valeur « vraie »**, c'est à dire attendue compte tenu des caractéristiques du capteur



Un capteur est **fidèle** si **l'écart-type** sur les réponses à une même valeur du mesurande est **faible**

Erreurs aléatoires

- Fidélité:

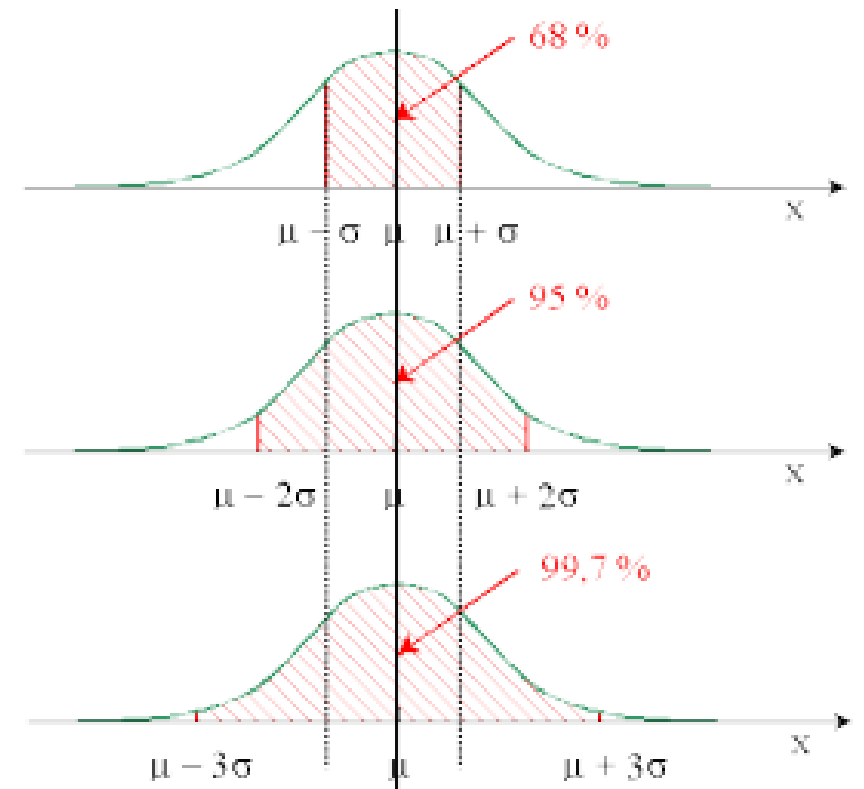
la mesure de la fidélité est basée sur l'écart-type σ de l'histogramme.

La fidélité est la probabilité cumulée que la mesure soit incluse dans un intervalle donné.

La fidélité pour une confiance donnée s'exprime par : $F = k \sigma$

Généralement, on adopte $k=2$; pour les applications critiques, on adopte $k=3$.

écart type :
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X})^2}$$

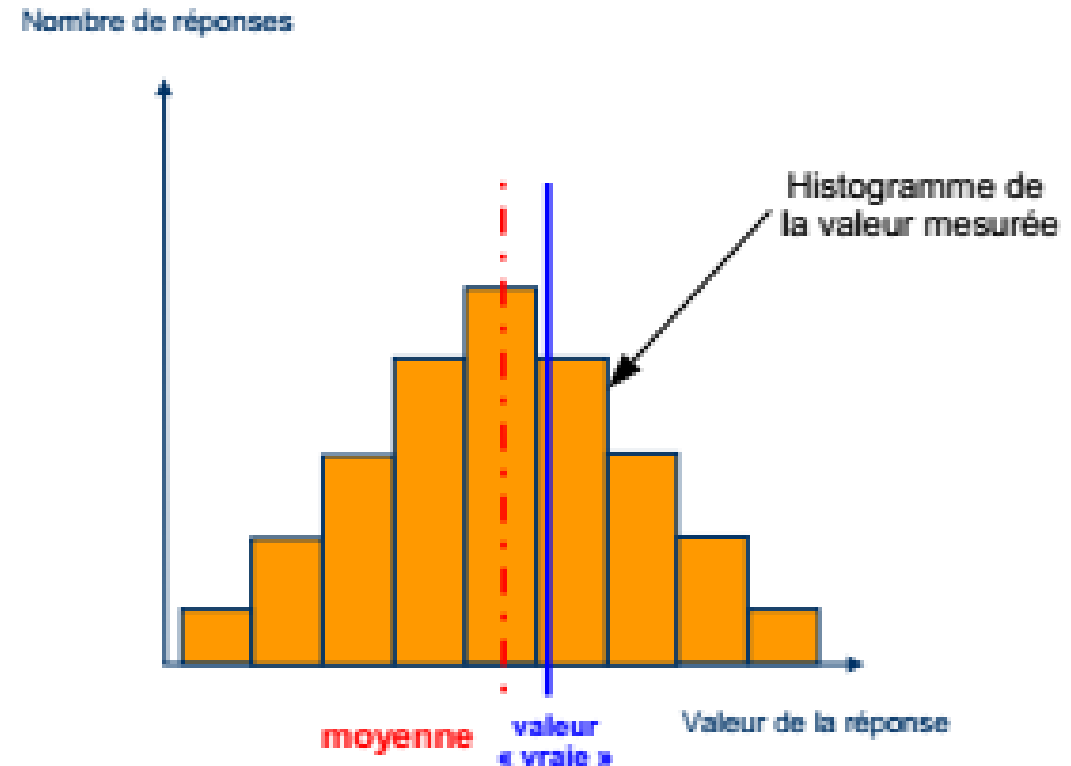


Erreurs aléatoires

- Justesse :

La justesse est l'aptitude à donner des indications **égales** à la grandeur mesurée, *les erreurs de fidélité n'étant pas prises en considération*

Un capteur est **juste** si l'écart entre la **moyenne** des résultats et la **valeur « vraie »** est faible, même si l'écart-type est grand.



Un capteur est **juste** si la **réponse moyenne** est proche de la **valeur « vraie »**

Erreurs aléatoires

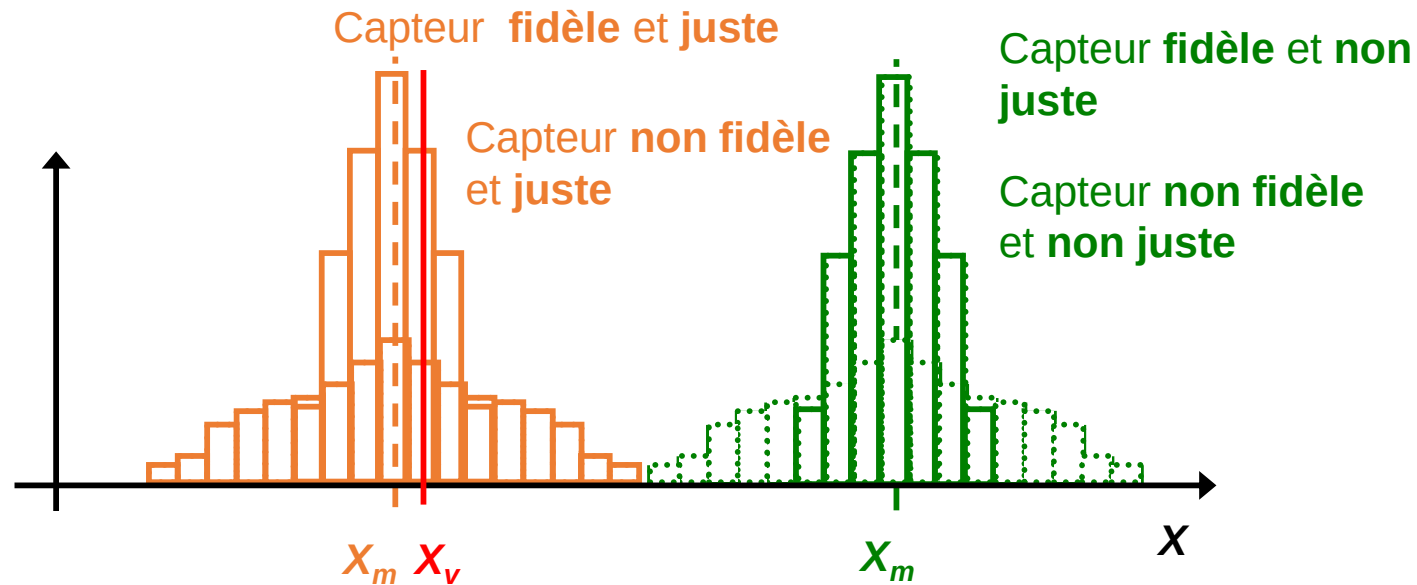
- **Classe de précision (fidélité et justesse):**

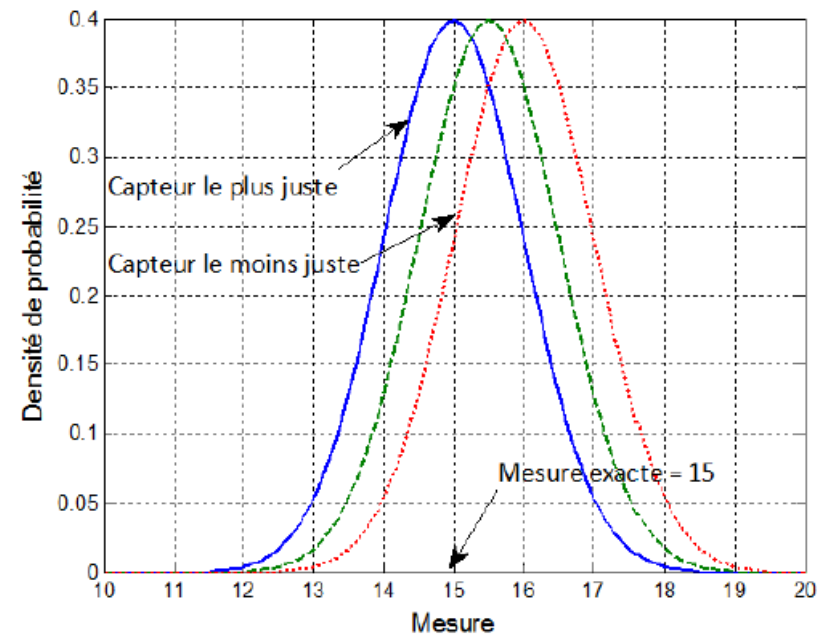
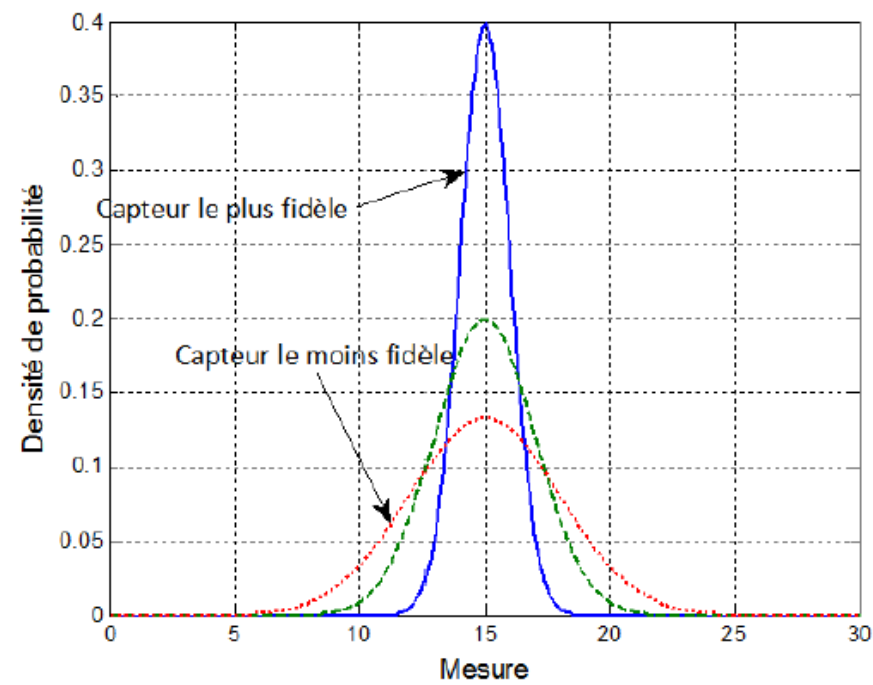
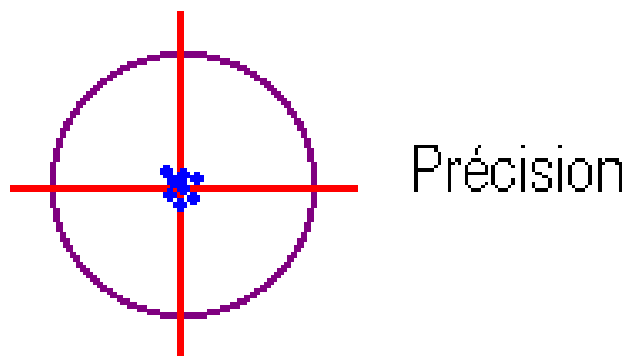
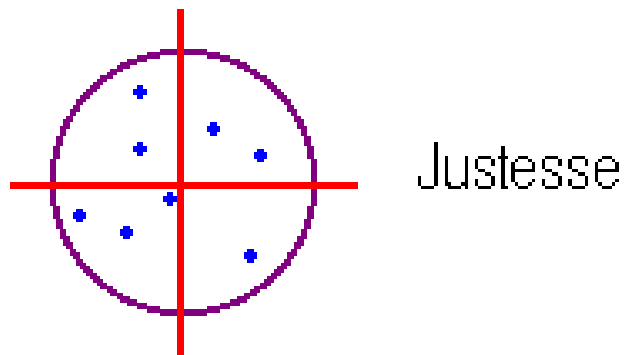
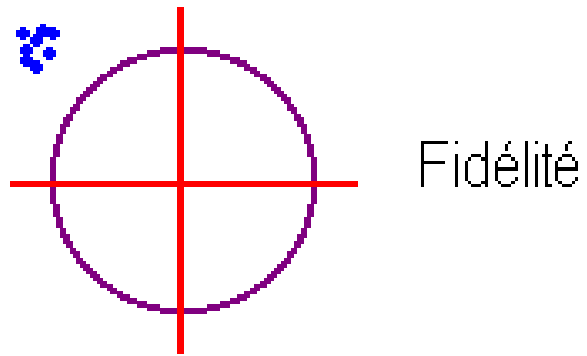
Un capteur est **précis** s'il est **juste** et **fidèle**

Pour définir cette **notion** nous allons considérer le cas où l'on effectue des **mesures** en **conditions** de **répétabilité** qui sont les suivantes :

- même mesurande,
- même opérateur,
- mêmes conditions expérimentales.

La **valeur vraie** du mesurande est X_v , les **valeurs mesurées** sont notées X_i et la **valeur moyenne** des mesures X_i est notée X_m





Erreurs aléatoires

- Précision :

Un capteur est **précis** s'il est **juste** et **fidèle**



Juste et fidèle → précis



Fidèle, non juste



Juste, non fidèle



ni fidèle, ni juste

Erreurs aléatoires

- **Classe de précision (fidélité et justesse):**

Les constructeurs indiquent souvent la **classe** de **précision** qui permet d'**estimer** l'**incertitude** de mesure.

Exemple : Capteur de force :

- **Etendue de Mesure (*Full Scale*)** 100 N
- **Précision (*Measurement uncertainty*)** 1 % E.M

Incertitude-type sur la **valeur affichée** : Elle obéit ici à une loi uniforme

$$u(F) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

avec $a = 100 * 1\% = 1 \text{ N}$, on obtient $u(F) = 0,58 \text{ N}$

Exercices

Exercice 1 :

L'étalonnage d'un capteur de température a donné le relevé suivant :

$\theta \text{ en } ^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	45	50
$R \text{ en } \Omega$	107,8	109,8	112,0	114,1	116,2	118,4	120,4

- 1) Ce capteur est-il actif ou passif ?
- 2) Tracer la courbe d'étalonnage. Quelle est la forme de cette courbe ?

La fonction $\mathbf{R=f(\theta)}$ est du type: $R = A \times \exp\left(\frac{B}{\theta+273}\right)$

- 3) Déterminer les valeurs de **A** et **B** à l'aide de couples du tableau en créant un système de deux équations à deux inconnues A et B.
- 4) Quelle est la réponse du capteur pour **37,5°C**. Quelle température mesure-t-on lorsque la valeur de **R** est **110,2Ω** ?
- 5) Calculer la valeur de la sensibilité σ pour deux points de mesure.

Exercices

Exercice 2:

Un capteur de température présente les caractéristiques suivantes:

T (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R (Ω)	500	519,5	538,9	558,3	577,7	597,0	616,2	635,3	654,4	673,5	692,5

1. D'après le tableau ci-dessus, déduire le type du capteur. (actif ou passif)
2. A partir de deux points de mesure, déterminer le coefficient de température A, de l'équation: $R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T)$
3. Que doit être la résistance du capteur, quand la température atteint la consigne 25°C.
4. A partir de deux points de mesure, déterminer la sensibilité. ($S = \Delta \text{ sortie} / \Delta \text{ entrée}$)

Exercices

Exercice 3:

- En mesurant 9 fois de suite la même pression, dans les mêmes conditions, on a obtenu les lectures suivantes, en kPa :

103,42	103,40	103,46	103,41	103,44	103,49	103,47	103,43	103,45
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

- valeur moyenne : écart-type :
- Fidélité 95% : Fidélité relative :

- Ce tableau de mesures correspond en fait à une pression de 103,30kPa ;

L'écart entre la valeur moyenne et la valeur vraie est de

Exercices

Exercice 4 :

Le capteur de température fournit un signal de $1\mu\text{A}/^\circ\text{K}$. On place deux capteurs dans une chaîne de mesure.

Un relevé des indications T_1 et T_2 fournies par chacun des capteurs a donné le tableau suivant:

t en minutes	3	10	12	20	28	30	35	41	44	50
T_1 en μA	371	371	370	371	371	370	370	371	371	371
T_2 en μA	372	375	371	369	373	373	372	372	374	370

- 1) D'après le tableau ci-dessus, déduire le type du capteur (actif ou passif) pourquoi ?
- 2) Explique brièvement la différence entre les deux en termes de(Justesse, Fidélité et Précision)

	Justesse	Fidélité	Précision
Capteur 1			
Capteur2			