

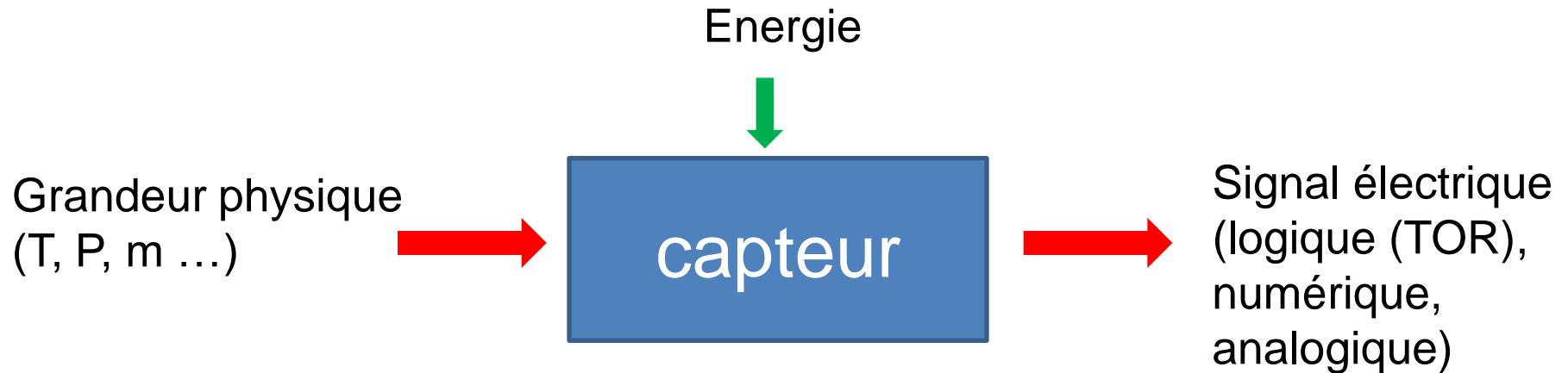


# Chapitre 8

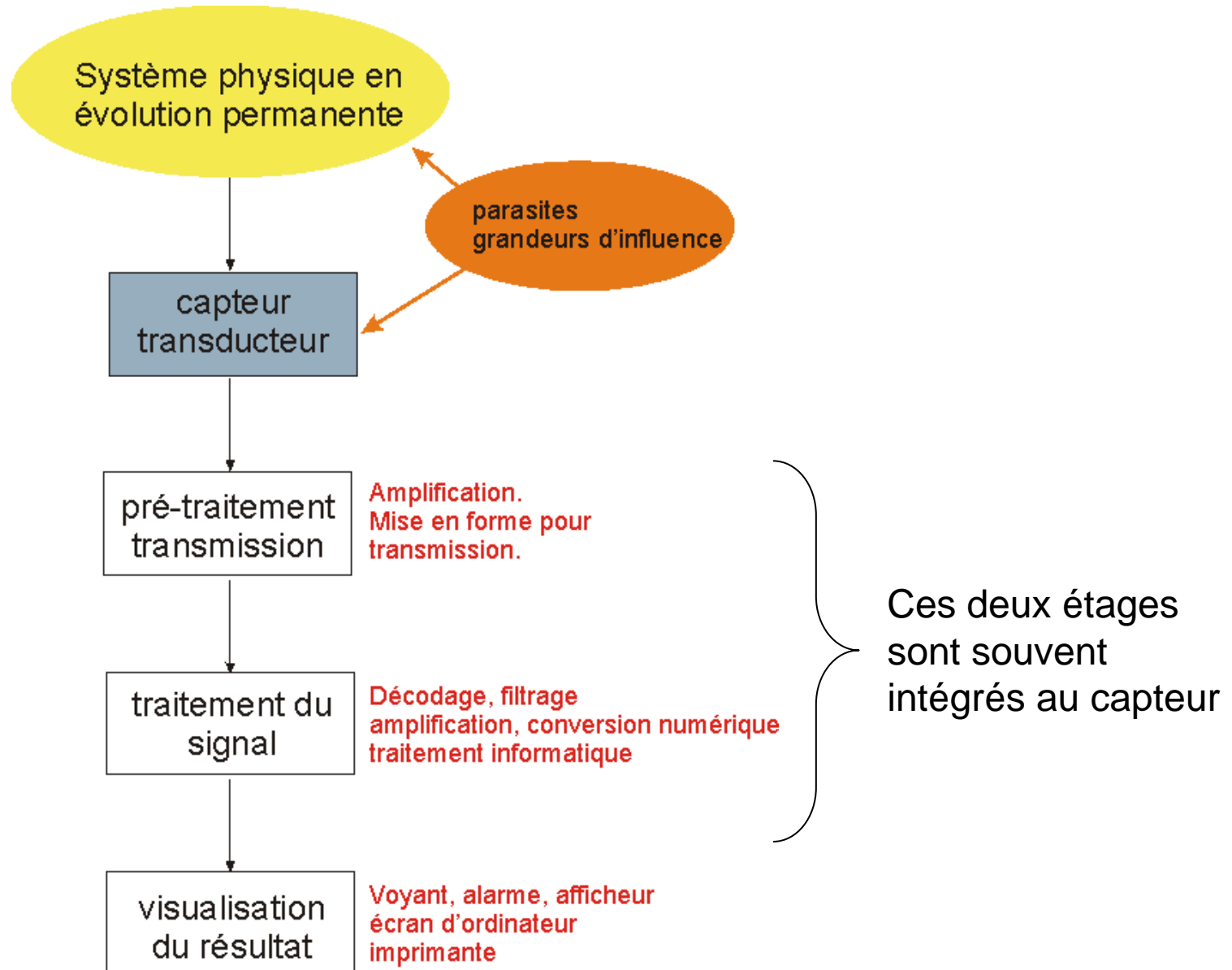
## Les capteurs

# Qu'est ce qu'un capteur ?

Un capteur transforme une grandeur physique en une grandeur normée, généralement électrique, qui peut être interprétée par un dispositif de contrôle commande.



# Le capteur dans la chaîne de mesure

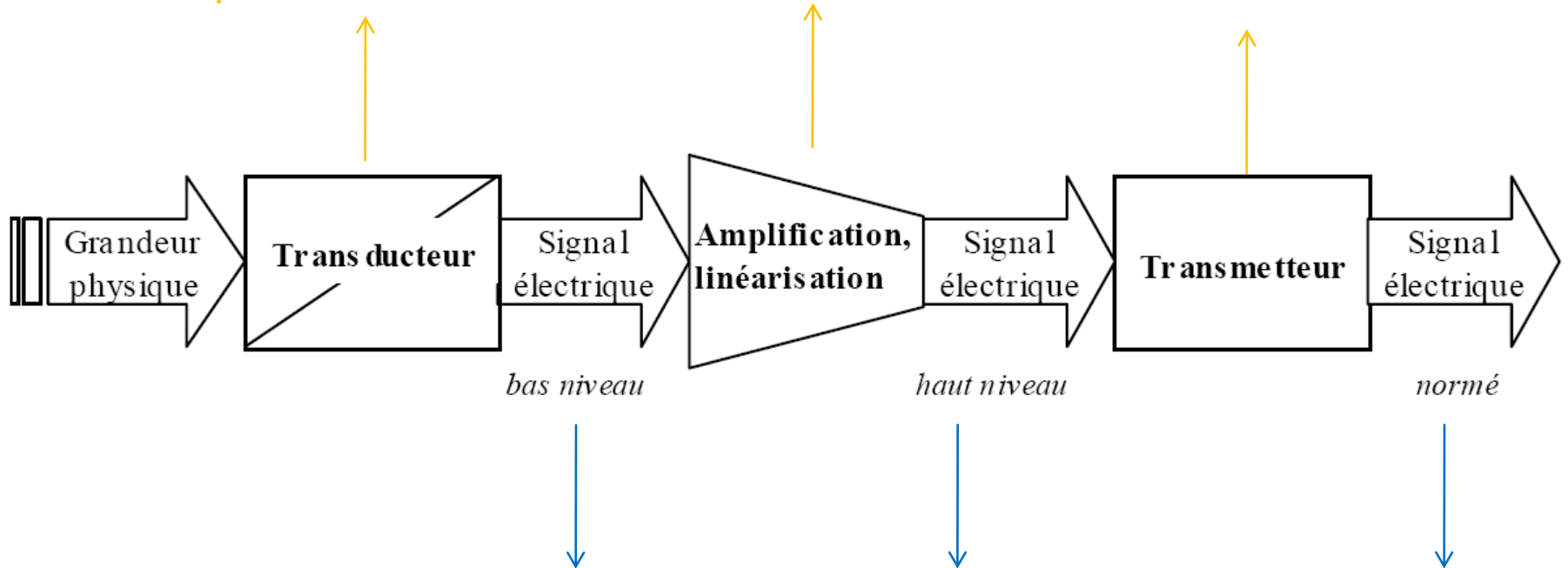


# Schéma de principe d'un capteur industriel

Exploite un effet physique de la modification des propriétés d'un corps

Traitement numérique par microprocesseur

Circuit électrique d'interface



Signal électrique de l'ordre du mV ou du  $\mu\text{A}$

Signal électrique de l'ordre du V ou du mA

Signal électrique normé (+/- 10V, 0..20 mA, 4..20 mA) interprétable par le circuit de contrôle commande

# Quelles sont les caractéristiques d'un capteur ?

**Etendue de mesure :** Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

**Résolution :** Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

**Sensibilité :** Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

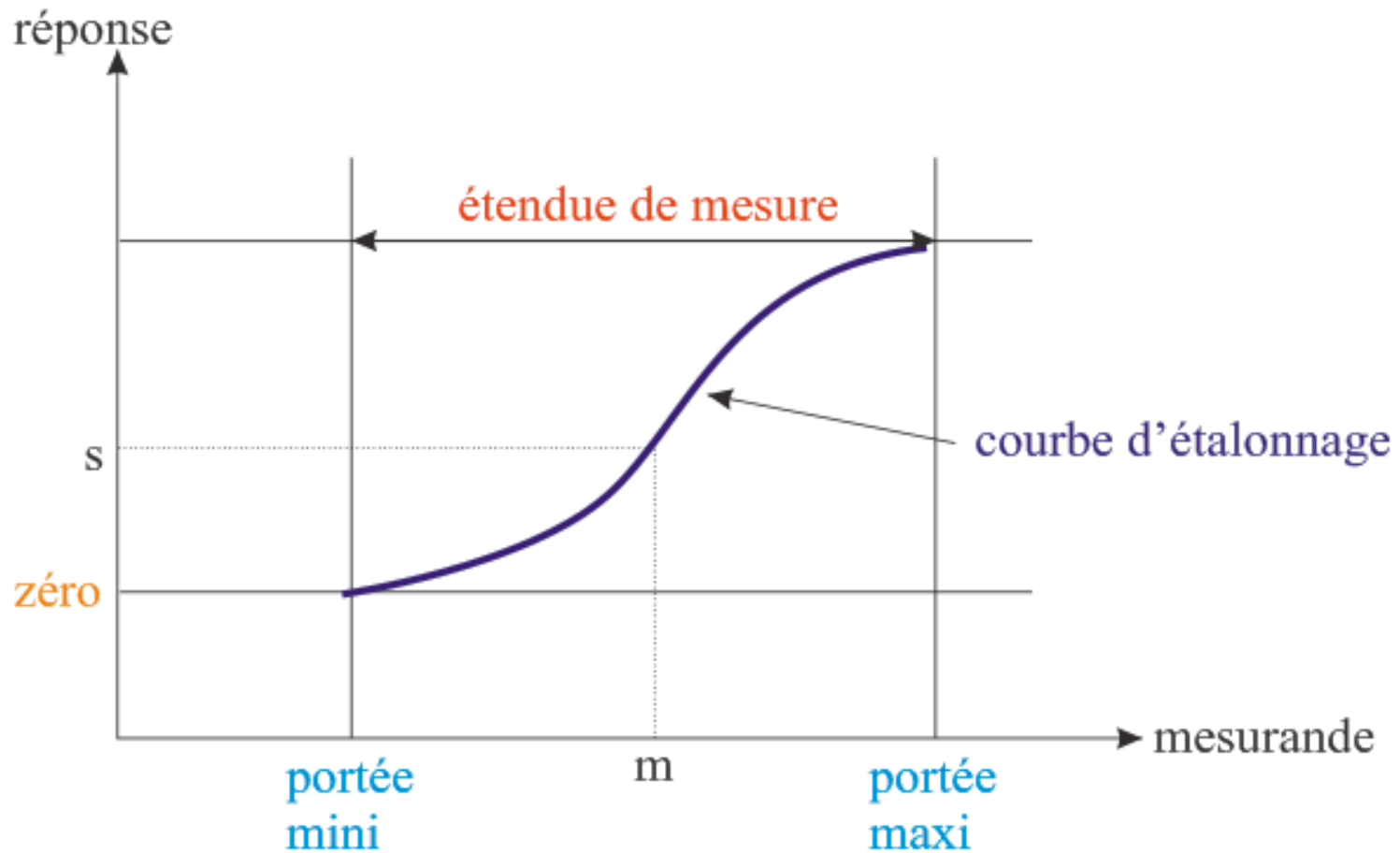
**Précision :** Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

**Rapidité :** Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

**Linéarité :** représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure

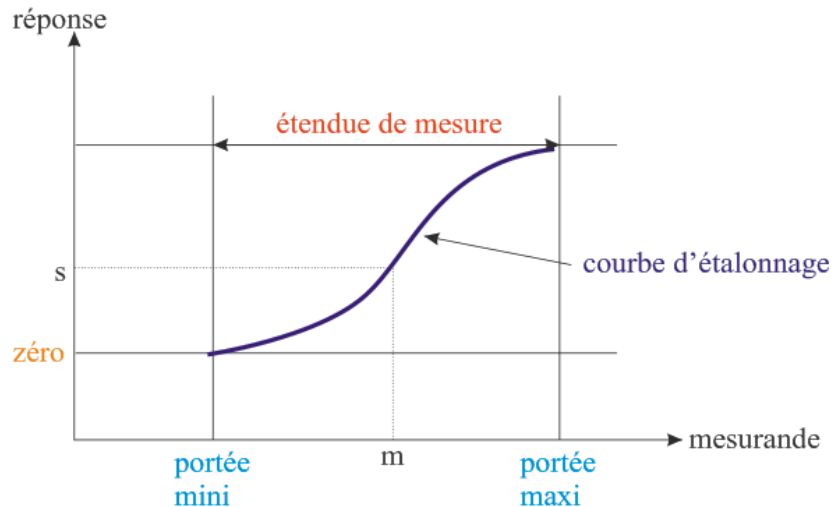
# Quelles sont les caractéristiques d'un capteur ?

Etendue de mesure et courbe d'étalonnage



# Quelles sont les caractéristiques d'un capteur ?

## Sensibilité $S$ du capteur



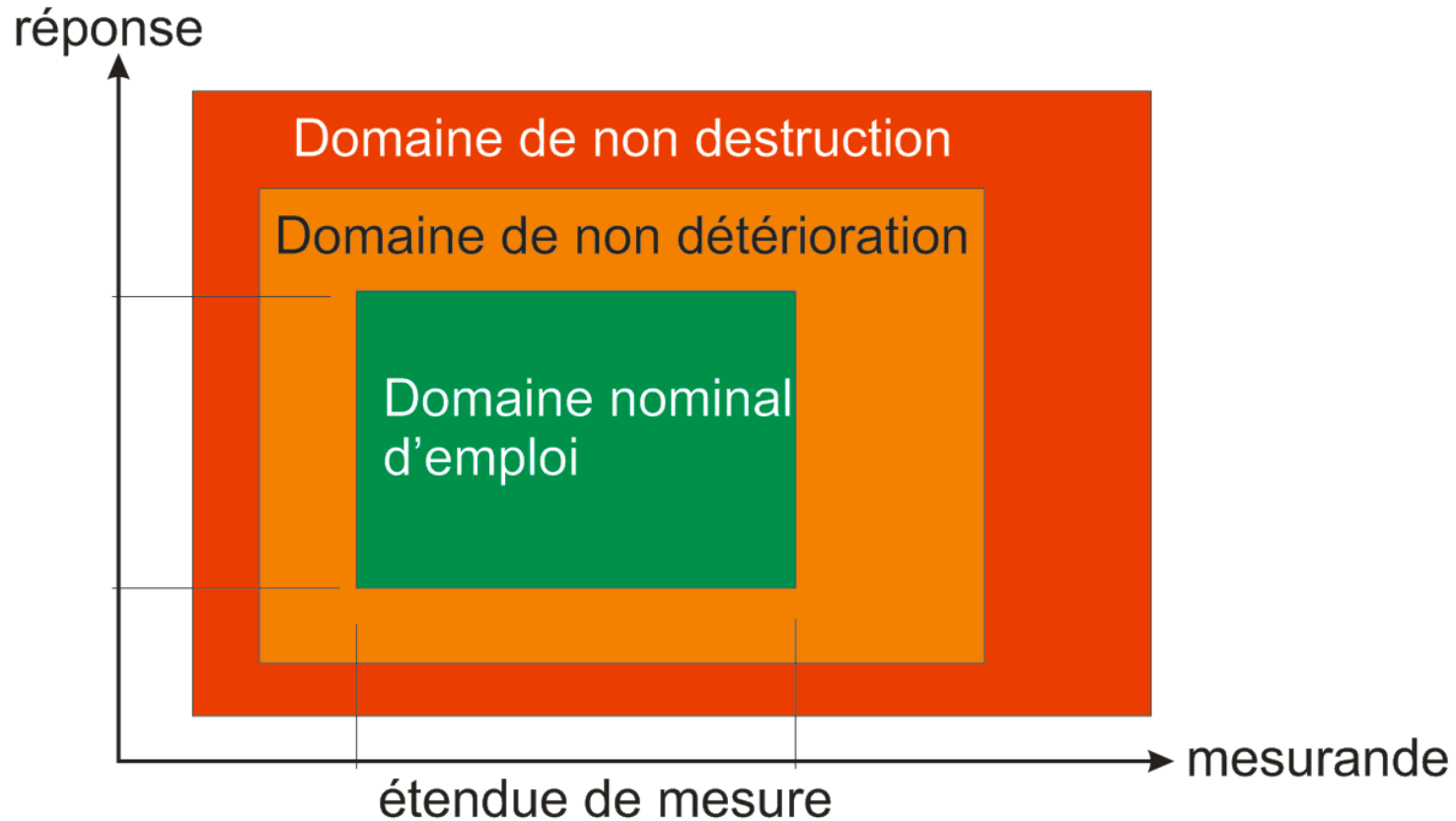
$$\Delta s = S \Delta m$$

Conception d'un capteur :  $S$  doit dépendre le moins possible de :

- La valeur de  $m$  (linéarité)
- la fréquence de variation (bande passante)
- du temps (vieillessement)
- d'actions extérieures (grandeurs d'influence)

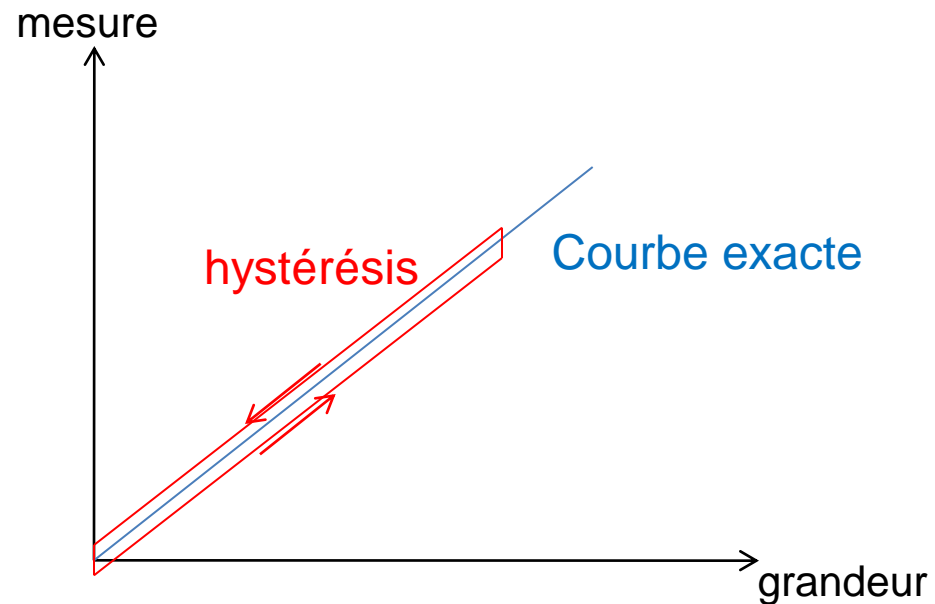
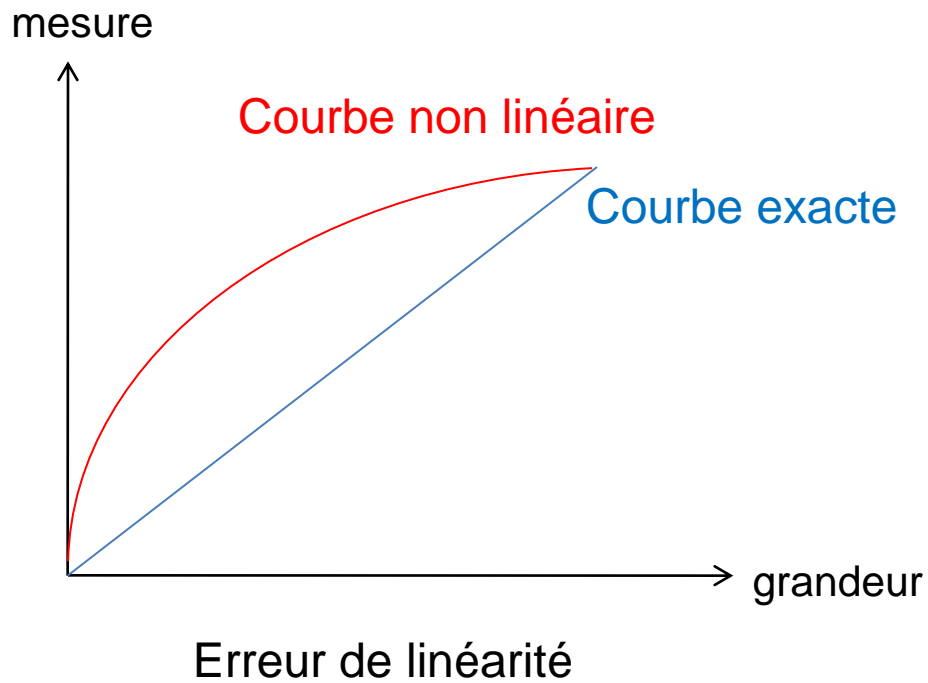
# Quelles sont les caractéristiques d'un capteur ?

## Domaines d'utilisation



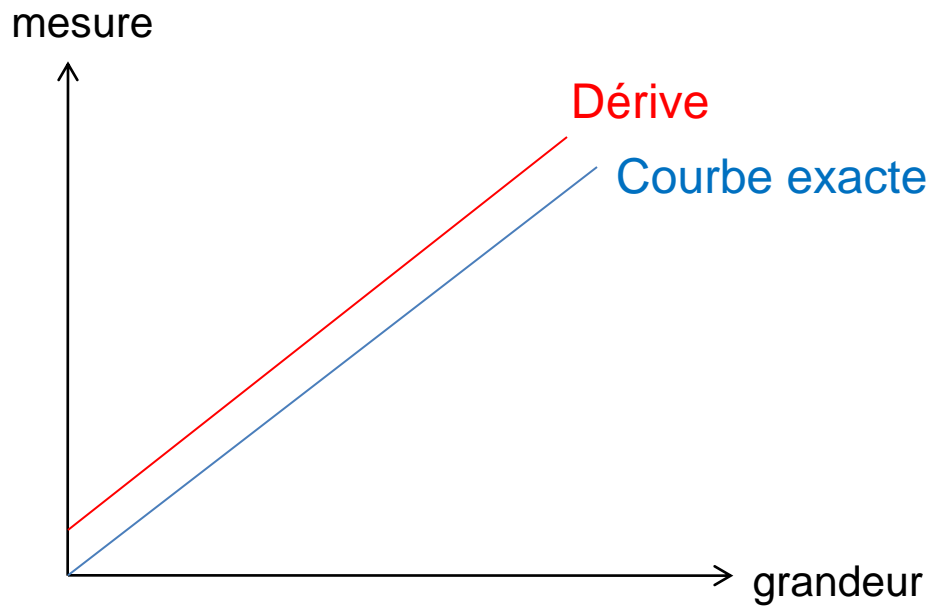


# Types d'erreur d'un capteur

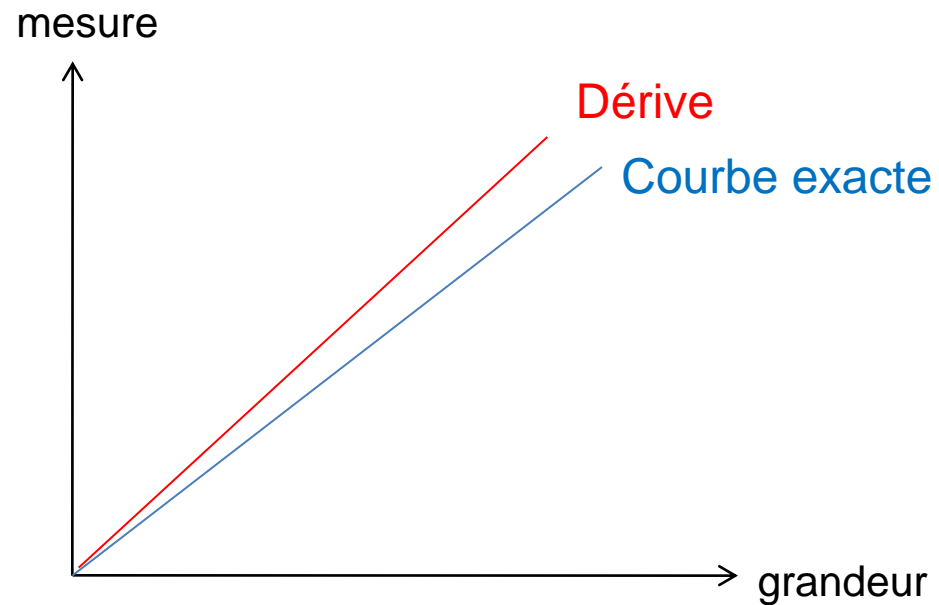


Erreur d'hystérésis : le résultat dépend de la mesure précédente

# Types d'erreur d'un capteur



Erreur de zéro ou « offset »



Erreur d'échelle ou de gain

# Grandeurs d'influence

Grandeur physique autre que le mesurande dont la variation peut modifier la réponse du capteur :

- **Température** : modifications des caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles
- **Pression, vibrations** : déformations et contraintes pouvant altérer la réponse
- **Humidité** : modification des propriétés électriques (constante diélectrique ou résistivité). Dégradation de l'isolation électrique
- **Champs magnétiques** : création de fém d'induction pour les champs variables ou modifications électriques (résistivité) pour les champs statiques
- **Tension d'alimentation** : lorsque la grandeur de sortie du capteur dépend de celle-ci directement (amplitude ou fréquence)

Nécessité de :

- **Réduire** les grandeurs d'influence (tables anti-vibration, blindages magnétiques...)
- **Stabiliser** les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues
- **Compenser** l'influence des grandeurs parasites par des montages adaptés (pont de Wheastone)

# 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 mesurer (énergie thermique, mécanique ou de rayonnement)

**Effet thermoélectrique (ou effet Seebeck)** : Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$ , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique  $e(T_1, T_2)$ .

**Effet piézo-électrique** : L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.

**Effet d'induction électromagnétique** : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).

# Les capteurs actifs

**Effet photo-électrique** : La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique

**Effet Hall** : Un champ magnétique  $B$  (aimant, angle  $\theta$ /surface du matériau) et un courant électrique  $I$  créent dans le matériau une différence de potentiel  $U_H = K_H B I \sin \theta$

**Effet pyroélectrique** : certains matériaux ont une polarisation spontanée en l'absence de champ électrique extérieur. Une variation de température induit une variation de cette polarisation et donc l'apparition de charges électriques à la surface du matériau

# 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
	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position	Résistivité électrique	Matériaux magnétorésistants (Bismuth, antimoine d'indium)
Humidité	Résistivité électrique	Chlorure de lithium

# Les capteurs de température

## Température :

- Agit sur les propriétés physiques de la matière
  - Pression
  - Résistivité électrique
  - Changement de phase
  - ...
- Mesure importante en recherche et industrie
- Liée à l'énergie cinétique moyenne des particules (agitation thermique)

## Méthodes de mesure :

- Méthodes optiques (rayonnement spectral)
- Méthodes mécaniques (dilatation d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz)
- Méthodes électriques (résistivité, fém à la jonction de matériaux de natures différentes, fréquence de résonance d'un quartz)



# Les capteurs de température

## Echelles de température (grandeur intensive)

**Kelvin** : défini à partir du point triple de l'eau, qui vaut 273,16 K

« Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau »

0 K est le zéro absolu (aucune agitation thermique)

**Celsius** :  $T_{\text{°C}} = T_{\text{K}} - 273,15$ , le zéro absolu vaut donc -273,15°C

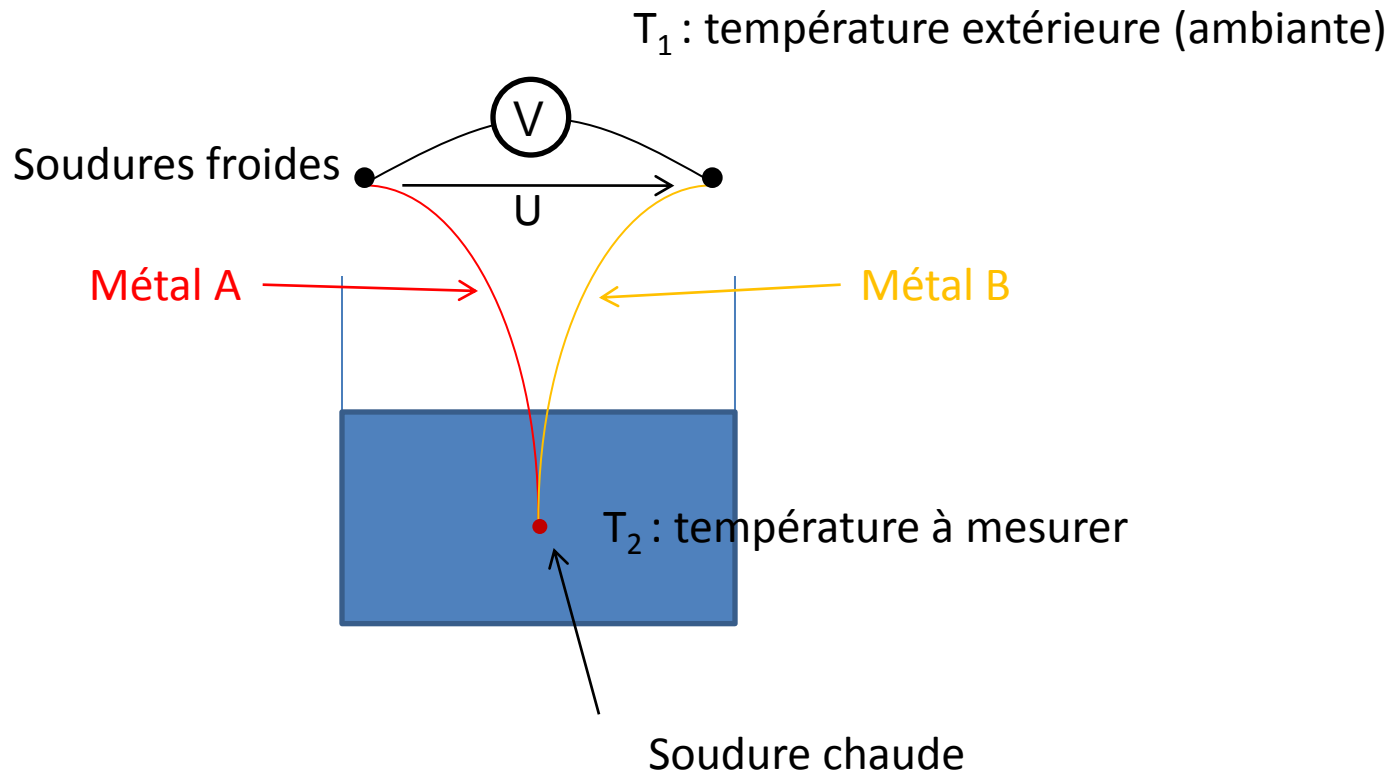
**Fahrenheit** : L'échelle fahrenheit attribue une plage de 180 °F entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition (solidification de l'eau à 32°F et point d'ébullition à 212°F). Ainsi :

$$T_{\text{°F}} = 9/5 T_{\text{°C}} + 32 \quad \text{ou} \quad T_{\text{°C}} = 5/9 (T_{\text{°F}} - 32)$$

# Les capteurs de température

## Les thermocouples

Principe du thermocouple : Si  $T_2 \neq T_1 \rightarrow$  apparition d'une tension  $U$



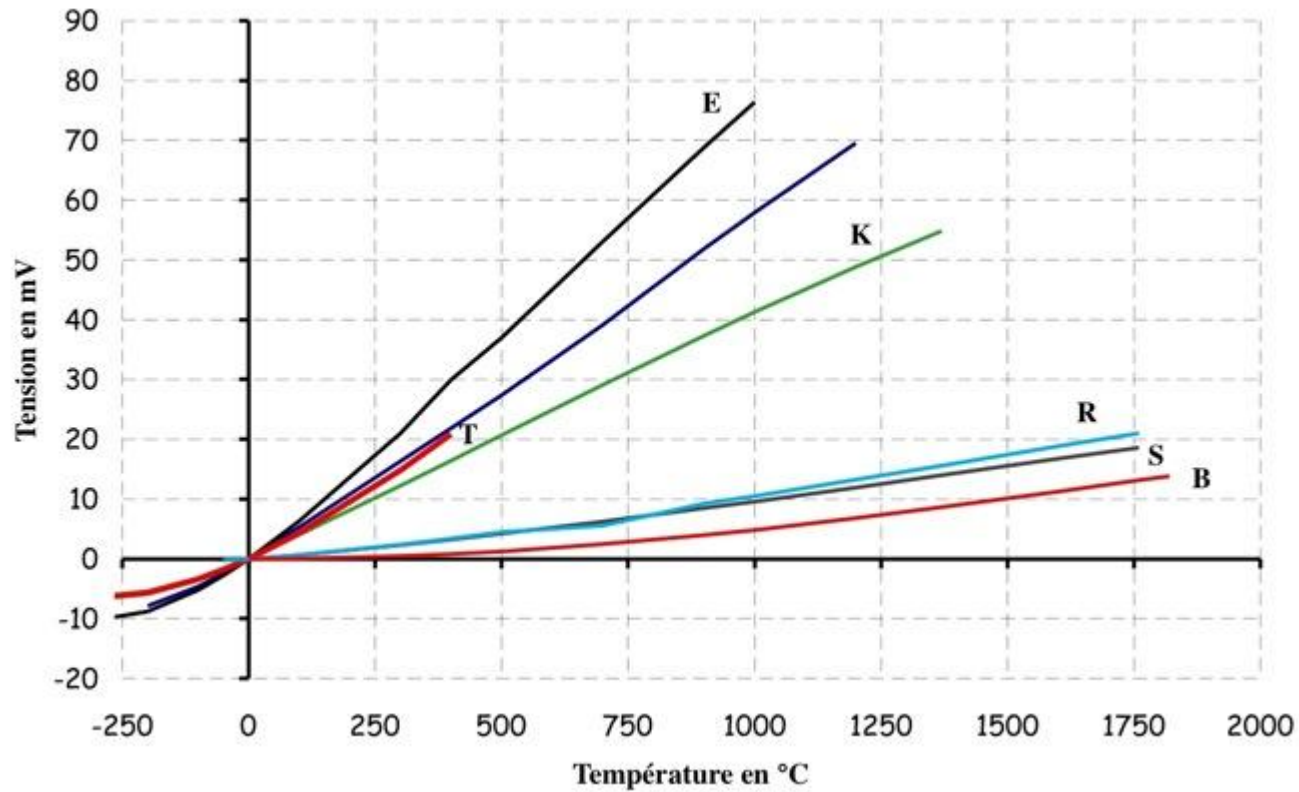
# Les thermocouples

Les différents types de thermocouples : On tient compte de la température attendue pour la mesure mais également de l'action corrosive du milieu ambiant (atmosphère oxydante, réductive, sulfureuse, etc...) sur les constituants du couple pour arrêter son choix.

Type	Métaux utilisés (+) / (-) Couleurs fils	Plages de temp (°C)	Adaptés à : Inadaptés à
E	Chromel (Ni-Cr) / constantan (Ni-Cu) Violet / blanc	-270 à 1 100	Milieus oxydants et inertes Vide, milieux réducteurs
J	Fer / Constantan Noir / Blanc	0 à 750	Milieus réducteurs, inertes, vide Basse température
K	Chromel / Alumel (Ni-Al) Vert / Blanc	-250 à 1 250	Milieus oxydants et inertes Vide, milieux réducteurs
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si) / Nisil (Ni-Si) Mauve / blanc	-270 à 1 300	Milieus oxydants à haute température et dans le vide
T	Cu / Cu-Ni Marron / blanc	- 250 à 400	Bonne précision à basse température Limité en hautes températures

# Les thermocouples

Courbes caractéristiques pour différents thermocouples



# Les thermocouples

## Avantages :

- Grandes gammes de température : de 0 à 1 600 K
- Robustes : résistent aux chocs et aux vibrations
- Réponse rapide (ms à qq s)
- Fiables et précis
- Reproductibles

## Inconvénients :

- Température de référence nécessaire
- Réponse non linéaire
- Faible sensibilité pour certains types de thermocouples

# Les capteurs de température

## Les capteurs à résistance métallique

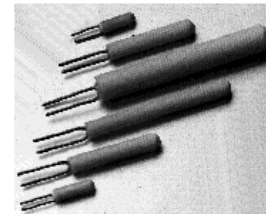
$R = R_0(1 + aT)$  avec  $a = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  pour le platine (petites variations de  $T > 0^\circ\text{C}$  car en réalité  $R(T) = R_0 ( 1 + AT + BT^2 + C(T-100)T^3 )$  )

Le type le plus courant, appelé « Pt100 », a une résistance de  $100 \Omega$  à  $0^\circ\text{C}$  et  $138,5 \Omega$  à  $100^\circ\text{C}$  (variation quasi linéaire entre  $-200$  et  $800^\circ\text{C}$ )

Bonne stabilité chimique

Temps de réponse > thermocouple

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 capteurs de température

## Les capteurs à résistance métallique

### Caractéristiques techniques

<b>Norme</b>	EN 60 751		
<b>Coefficient de température</b>	$\alpha = 3,850 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (entre 0 et 100 °C)		
<b>Plage de température</b>	-70 à +400 °C		
<b>Tolérance</b>	Plage de température valable pour la classe 1/3 DIN B : -50 à +200 °C		
	Plage de température valable pour la classe A : -70 à +300 °C		
	Plage de température valable pour la classe B : -70 à +400 °C		
<b>Courant de mesure/Courant maximal</b>	Pt 100	recommandé 1,0 mA	maximal 7 mA
	Pt 500	recommandé 0,7 mA	maximal 3 mA
	Pt 1000	recommandé 0,1 mA	maximal 1 mA
	Pt 2000	recommandé 0,1 mA	maximal 1 mA
	Pt 5000	recommandé 0,1 mA	maximal 1 mA

Tolérances : (norme CEI 751)

Classe A :  $\Delta T = 0,15^{\circ}\text{C} + 0,002T$

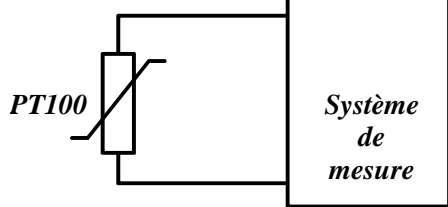
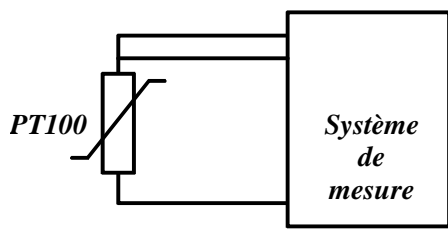
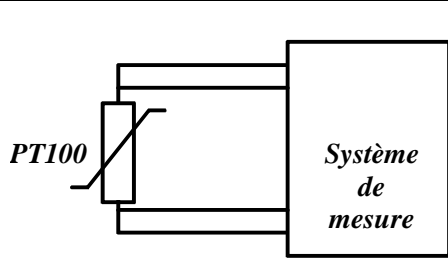
Classe B :  $\Delta T = 0,3^{\circ}\text{C} + 0,005T$

# Les capteurs de température

## Les capteurs à résistance métallique

Pour une grande longueur, les résistances des fils de connections de la sonde au système de mesure ne sont plus négligeables.

Il faut donc tenir compte de cette erreur en employant des dispositifs de câblages particuliers.

2 fils,		<p>Il n'a pas de compensation de la résistance des fils.</p> <p>Utilisation pour de faible longueur</p>
3 fils,		<p>Le système de mesure possède une compensation interne.</p> <p>Utilisation pour de moyenne longueur</p>
4 fils.		<p>Le système de mesure possède une compensation interne encore plus précise.</p> <p>Utilisation pour de grande longueur</p>



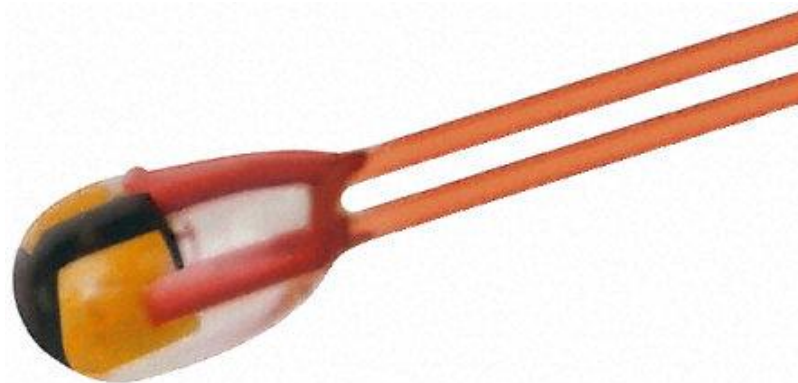
# Les capteurs de température

## Les thermistances

Mélanges d'oxydes métalliques. Leur résistance décroît avec la  $t^\circ$  selon une loi du type :

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

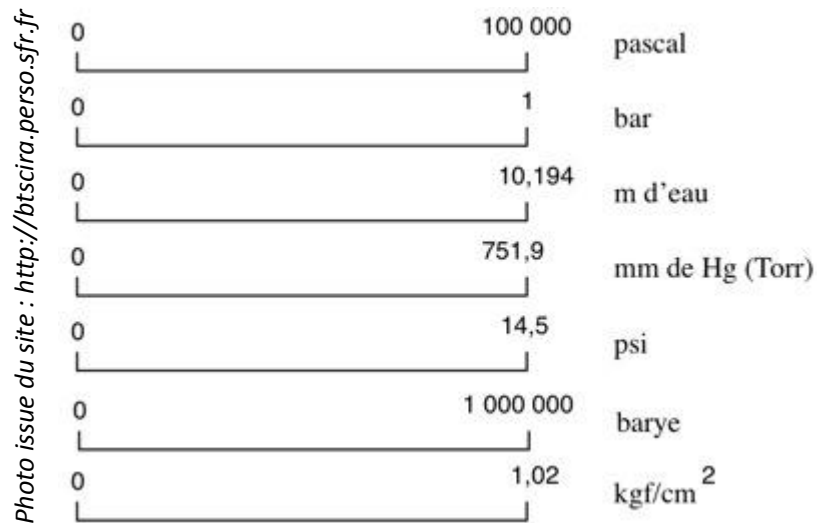
avec T en K. (et B entre 3000 et 5000K). Les thermistances sont généralement utilisables jusqu'à environ 300°C. Mais du fait de la forme de leur réponse, elle ne sont utilisées que sur une faible plage de température (100°C) où elles sont très sensibles (sensibilité environ 10 fois supérieure aux sondes métalliques).



Thermistance de  
précision à capsule  
de verre

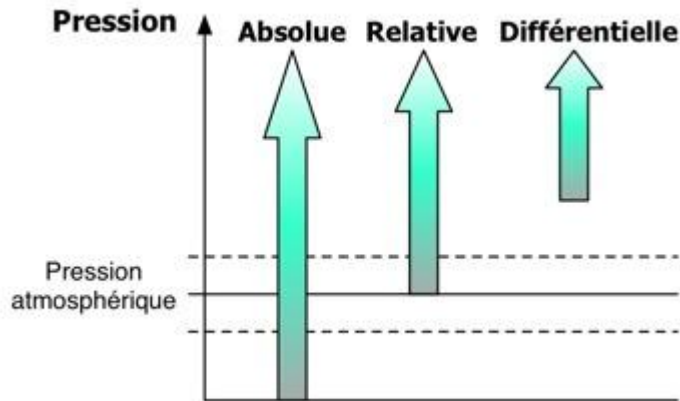
# Mesure de la pression

Grandeur dérivée du SI :  $P=F/S$        $[P]=ML^{-1}T^{-2}$



*Les différentes unités de la pression*

# Mesure de la pression



Pour les fluides en mouvement :

$$p_T = p_S + p_D \quad p_D = \frac{\rho v^2}{2}$$

Représentation des pressions mesurables  
par les capteurs de pression

Domaines d'utilisation :

- circuits hydrauliques
- circuits pneumatiques
- contrôle de mise sous pression de récipients
- contrôle de distribution de gaz ou de fluides
- ...

# Mesure de la pression

Pressostats

Manomètres

Baromètres

Capteurs de pression à membrane

Capteurs de pression différentielle

Capteurs de pression piézo-résistifs

Capteurs de pression hydraulique

Tensiomètres

...

# Mesure de la pression

## Choix d'un capteur

Quel type de pressions ?

- Statique
- Dynamique (rapidité de réponse)

Quelle étendue de mesure ?

- Domaine d'emploi bien connu
- Envisager une surcharge éventuelle (surpression accidentelle → domaine de non-destruction).

Quelle est la nature du fluide ?

- Compatibilité entre les matériaux du capteur et le fluide
- Présence de particules (obstruction de passages vers le capteur)

# Mesure de la pression

## Les pressostats

Dispositif détectant le dépassement d'une valeur prédéterminée, de la pression d'un fluide

- systèmes de contrôle ou régulation (démarrage d'un compresseur d'air ou d'une pompe si la pression du circuit contrôlé descend au-dessous d'une limite déterminée)
- Enclenchement d'une alarme lorsque la pression dépasse un seuil

# 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 :

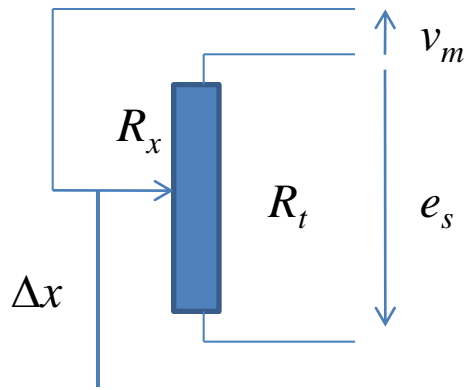
- Les capteurs potentiométriques
- Les capteurs à jauges extensométriques,
- Les capteurs capacitifs,
- Les capteurs à fibres optiques,
- Les capteurs à variation d'inductance

# 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.



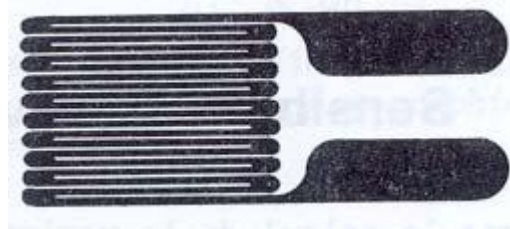
$$v_m = e_s \frac{R_x}{R_t}$$



# Mesure de la pression

Les capteurs à membrane

Capteurs à jauge extensométrique

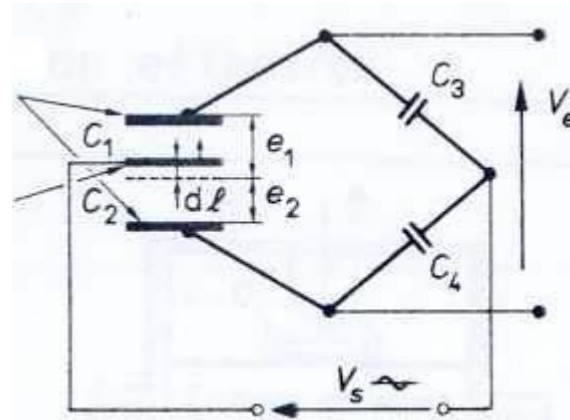


Les jauges sont des éléments résistifs collés sur le corps d'épreuve assurant la conversion directe d'une déformation  $\varepsilon$  de la structure, en variation de résistance électrique  $\Delta R$

# Mesure de la pression

## Les capteurs à membrane

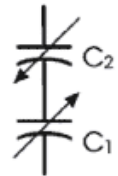
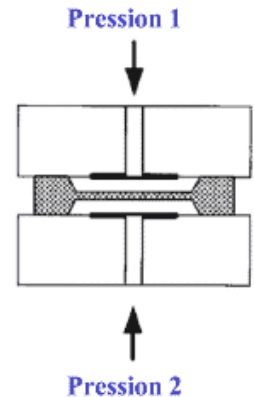
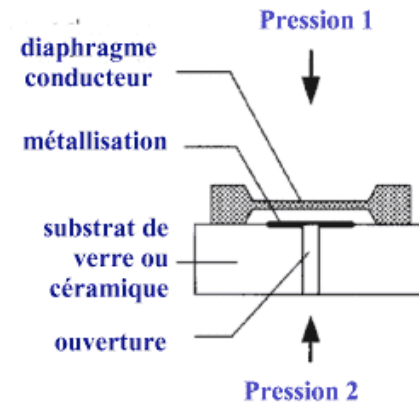
### Capteurs capacitifs



*Capteur capacitif associé à un pont de Wheatstone*

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

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



Sources : [http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/phys/chap\\_p3.htm](http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/phys/chap_p3.htm)

[http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/pulverulents/pulverulent\\_capteur\\_pression\\_V1.pdf](http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/pulverulents/pulverulent_capteur_pression_V1.pdf)

# Mesure de vitesse, débit et niveau de fluides

Description d'un écoulement de fluide : mesure en différents points de

- Vitesse
- Masse volumique
- Pression
- Température
- (viscosité)
- (diffusivité thermique)
- (Chaleur massique)

Le choix d'un capteur va dépendre de la nature de l'écoulement :

Type	Nature	Régime	Température
Écoulement monophasique	Liquide ou gaz	Laminaire ou turbulent	Constante ou non
Écoulement multiphasique	Interface unique ou interfaces dispersées		

# Mesure de vitesse, débit et niveau de fluides

Nombre de Reynolds Re (permet de caractériser la nature de l'écoulement) :

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

Avec  $U=Q/S$  la vitesse caractéristique de l'écoulement où  $Q$  est le débit volumique et  $S$  la section du tuyau

$D$  est le diamètre du tuyau

$\nu$  la viscosité cinématique du fluide

Pour un tuyau, l'écoulement (monophasique) est turbulent si  $Re > 2\,200$

**Autre paramètre de l'écoulement** : la dimension transversale de l'écoulement : de quelques dixièmes de millimètres à plusieurs dizaines de mètres

# Mesure de vitesse d'un fluide

Le corps d'épreuve peut être le fluide lui-même :

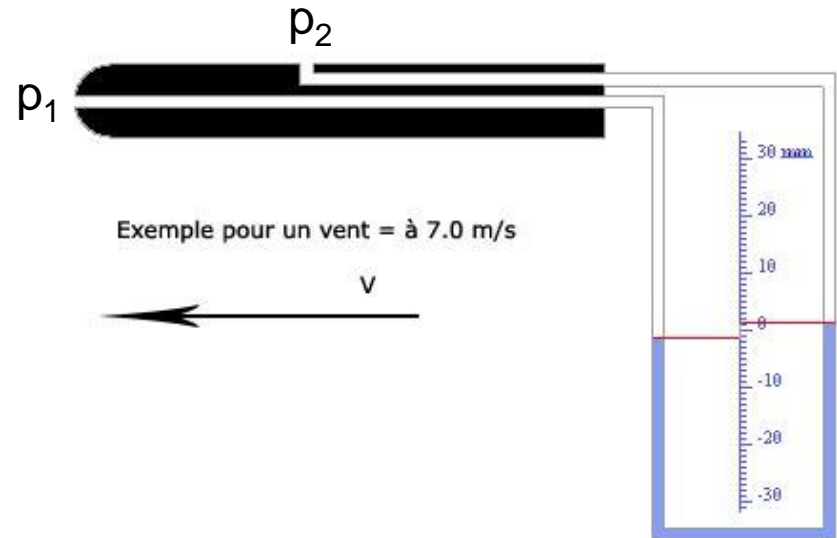
- Effet Doppler subi par un rayonnement laser ou ultrasonore
- Durée de parcours d'un isotope radioactif entre deux sections données

Le corps d'épreuve est un élément du capteur placé dans le fluide

- Température et donc résistance d'un fil chaud alimenté en courant constant
- Vitesse de rotation d'une hélice (anémomètre)
- Tube de Pitot : mesure de pression différentielle (loi de Bernoulli)

# Mesure de vitesse d'un fluide

Tube de Pitot : en aéronautique et en sport automobile



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

# Mesure de niveau

Mesure de remplissage de réservoirs ou de silos. Technologies similaires au capteurs de pression ou de position

-Capteurs de niveau à palettes :

- niveau de solides pulvérulents ou liquides de forte viscosité.
- couple d'une palette rotative



-Capteurs de niveau à lames vibrantes :

- tout type de solide ou de liquide
- variation de la fréquence d'oscillation d'un diapason



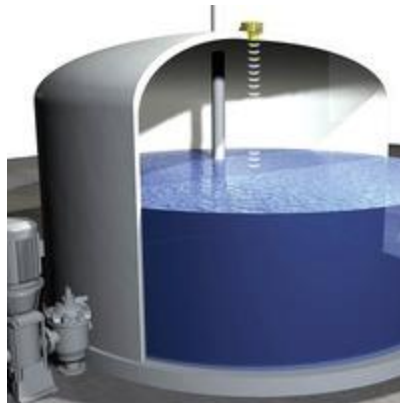
# Mesure de niveau

## -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





# Mesure de débit

Débit volumique :  $Q_v = S.v$  avec  $S$  la section de la conduite et  $v$  la vitesse du fluide. L'unité est le  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ .

Débit massique :  $Q_m = \rho. Q_v$  avec  $S$  la section de la conduite et  $v$  la vitesse du fluide . L'unité est le  $\text{kg}.\text{s}^{-1}$ .

La technologie de mesure dépend de :

- nature du fluide
- vitesse du fluide
- régime d'écoulement
- viscosité

# Capteurs de débit

## Le débitmètre à flotteur

Autres noms : rotamètre ou débitmètre à billes

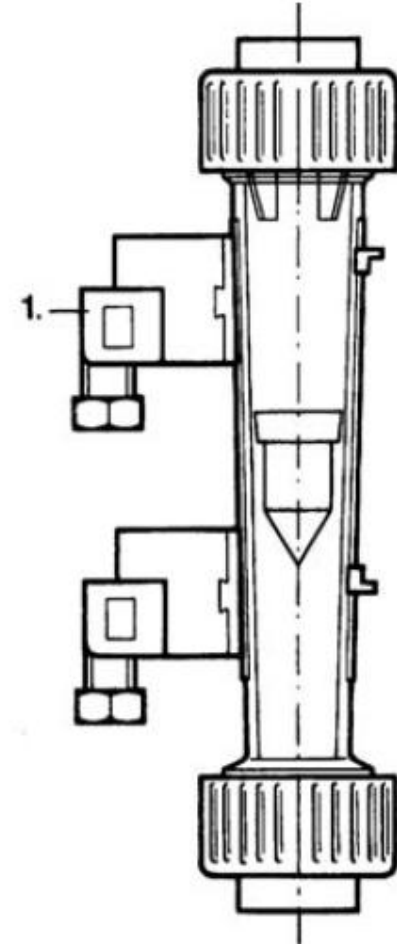
Ils permettent une mesure simple visuelle d'un débit gazeux, liquide ou vapeur.

Constitués d'un tube conique et d'un flotteur, les débitmètres sont montés verticalement sur la tuyauterie et ne requièrent pas d'électricité.

Gamme de débits :  $10^{-4}$  à  $200 \text{ m}^3/\text{h}$

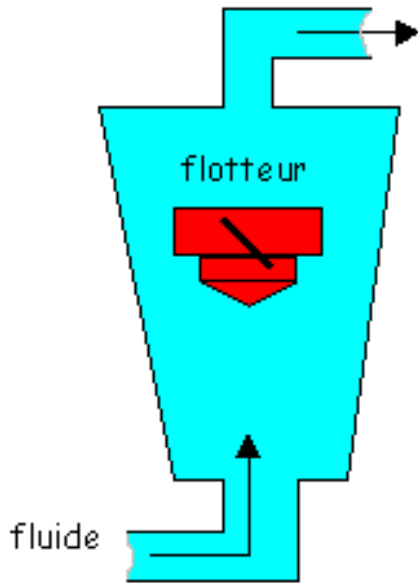
Pour un débitmètre donné, les limites de l'étendue de mesure sont dans un rapport 10

Précision : 3 à 10% de l'EM



# Capteurs de débit

## Le débitmètre à flotteur



Equilibre du flotteur sous l'action

- De la force de poussée d'Archimède
- De la traînée
- De son poids

$$\rho g V + C_x \frac{\rho S U^2}{2} = \rho_0 g V \quad (1)$$

$V$  : volume du flotteur de masse volumique  $\rho_0$

$U$  : vitesse du fluide de masse volumique  $\rho$

$C_x$  : coefficient de traînée et  $S$  la surface projetée sur un plan perpendiculaire à la vitesse ( $\pi r^2$ )

On déduit la vitesse du fluide à la position d'équilibre à partir de l'équation (1)

Le diamètre du conduit varie linéairement avec la hauteur  $z$  :  $D = D_0 + az$

D'où le débit (pour  $a$  assez faible)

$$Q = \sqrt{\pi} a z \sqrt{\frac{2gV}{C_x} \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} = Kz \quad (2)$$

# Capteurs de débit

## Le débitmètre à turbine

Principe : rotation d'une micro-turbine Pelton.

Adapté aux liquides peu visqueux exempts de bulles ou de matière en suspension : eau, alcool, carburants, acides, gaz liquéfiés ...

→ Mesure de la vitesse de rotation d'une turbine



# Capteurs de débit

## Le débitmètre à ultrasons

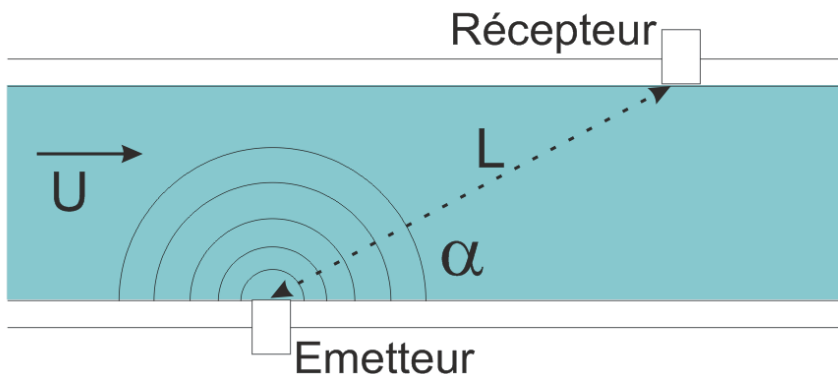
Principe : mesure du temps de propagation d'une onde ultrasonore dans le fluide entre émetteur et récepteur (éléments piézoélectriques).

Pour fluide sans particule (pour éviter la dispersion des ondes).

Généralement utilisé pour les diamètres importants (jusque 6m)

Gamme de débits : 0,1 à  $10^5$  m<sup>3</sup>/h avec une précision de 1% environ

Intérêt : caractère non intrusif de la méthode de mesure (pas de PdC, insensible à l'agressivité du fluide, remplacement facile)



$$t = \frac{L}{c + U \cos \alpha}$$

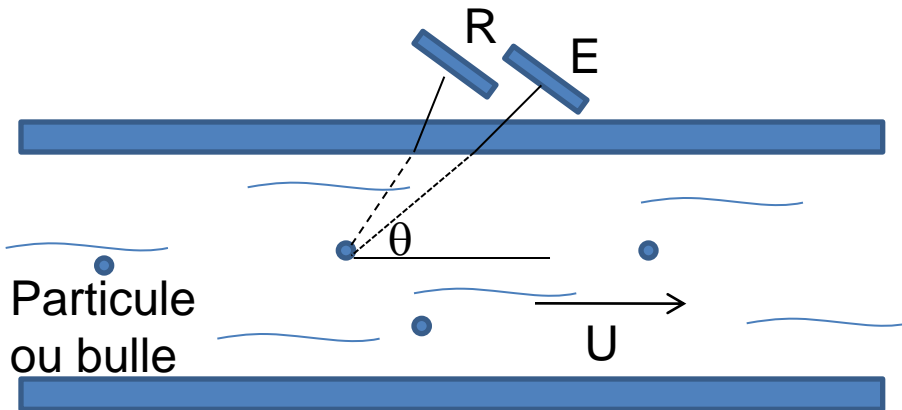
C : vitesse du son dans le fluide

# Capteurs de débit

## Le débitmètre à effet Doppler

Principe : modification de la fréquence d'une onde en fonction de sa vitesse de déplacement. Le glissement de fréquence entre l'émetteur et le récepteur permet de remonter au débit.

Nécessite la présence de gaz (bulles) ou de solides en suspension pour véhiculer l'onde de l'émetteur au récepteur. Utilisé pour les diamètres importants (plusieurs mètres).



Emission d'un onde de fréq  $F_s$

$$\frac{\Delta F}{F_s} = \frac{2U \cos \theta}{c}$$

Inconvénient :  $c$  dépend de  $T$

# Capteurs de débit

## Le débitmètre à pression différentielle

Principe : Un resserrement de la conduite ou un changement de direction créent entre amont et aval une différence de pression  $\Delta p$  liée au débit par une relation de la forme :

$$Q_v = k \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

avec  $\rho$  la masse volumique du fluide, et  $k$  un coefficient fonction de l'organe déprimogène

