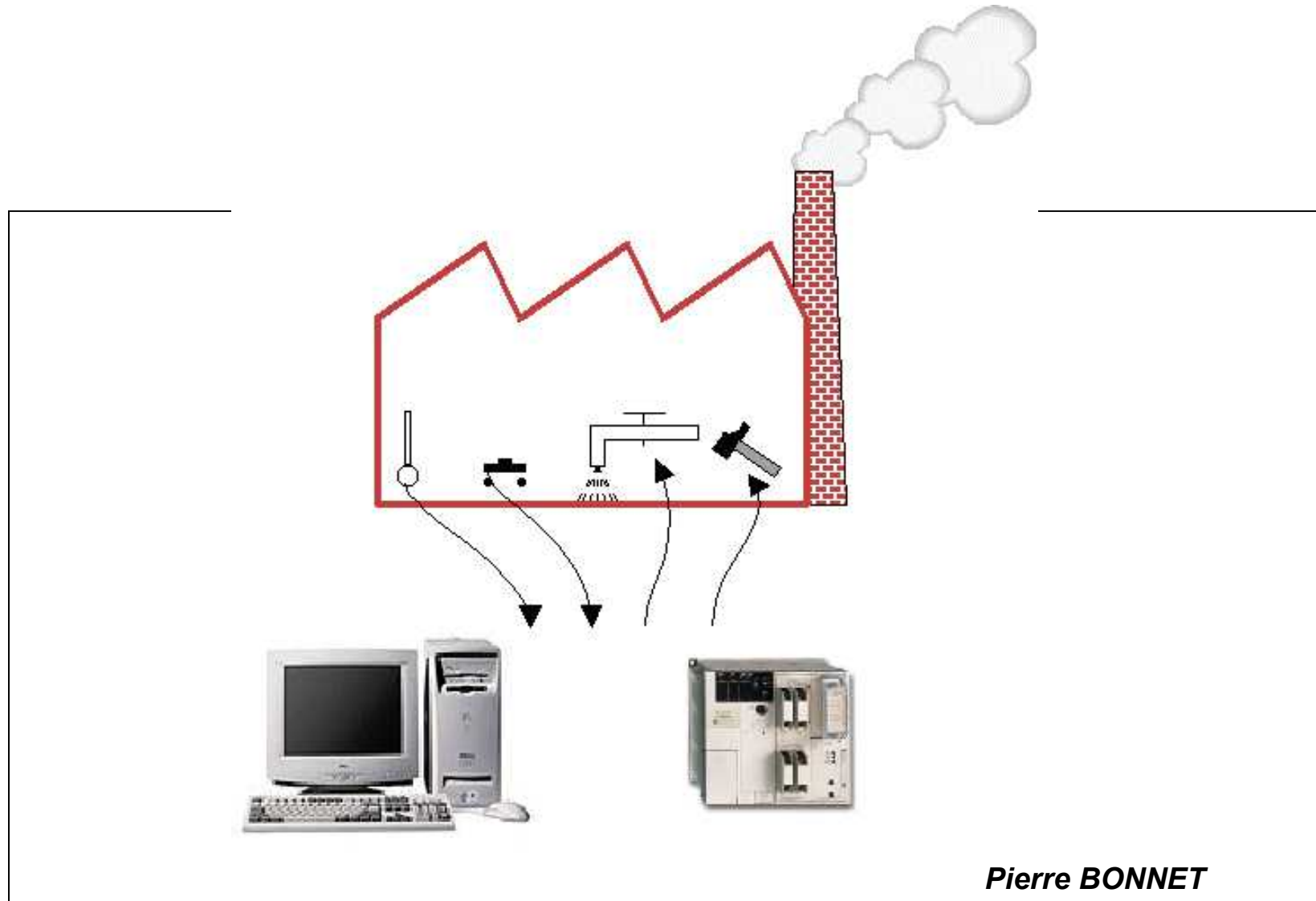


# CAPTEURS - CHAINES DE MESURES



*Pierre BONNET*

# Plan du Cours

## Propriétés générales des capteurs

- Notion de mesure
- Notion de capteur: principes, classes, caractéristiques générales
- Caractéristiques en régime statique
- Caractéristiques en régime dynamique
- Conditionnement et électronique de mesure
- Conversion numérique
- Transport, perturbations, protection, Isolation des signaux

# Bibliographie

## Les livres essentiels :

- **Acquisition de données : Du capteur à l'ordinateur**  
*Georges Asch, E. Chambérod, Patrick Renard, Gunther*  
528 pages - 2003 - 2e édition - Dunod
- **Mesure et instrumentation Volume 1. De la physique du capteur au signal électrique**  
*Dominique Placko*  
1970 - Hermès-Lavoisier

## Pour en savoir plus :

- **Les Capteurs en instrumentation industrielle**  
*Georges Asch et collaborateurs*  
832 pages 1999 5ème édition Dunod
- **Mesure physique et instrumentation :Analyse statistique et spectrale des mesures, capteurs**  
*Dominique Barchiesi*  
178 pages - 2003 - Ellipses

## Sur internet :

- <http://www.si.ens-cachan.fr/ressource/r7/r7.htm>
- <http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/instrum.htm>
- [http://www.esiee.fr/~francaio/enseignement/version\\_pdf/II\\_capteurs.pdf](http://www.esiee.fr/~francaio/enseignement/version_pdf/II_capteurs.pdf)
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Mesure\\_en\\_physique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mesure_en_physique)

# Notion de Mesure

## Définitions de base

- 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

## Définitions de base

### 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

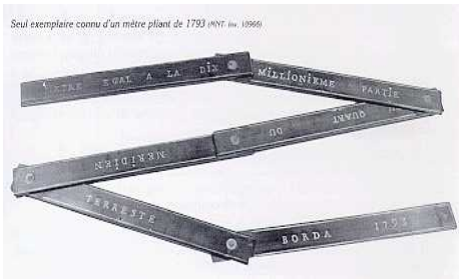
Exemples : position, vitesse, quantité de mouvement, poids, force...

# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Le Système International d'unités

- Les sept unités de base :



mètre



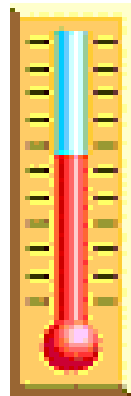
kilogramme



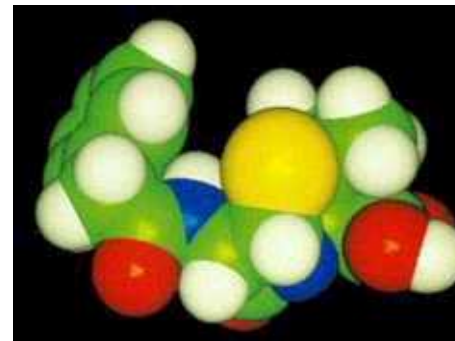
seconde



ampère



kelvin



mole



candela

# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Le Système International d'unités

- Définition des unités de base

Nom	Symbole	Définition
<b>mètre</b>	m	Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde, dans le vide, du rayonnement correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton-86.
<b>kilogramme</b>	kg	Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.
<b>seconde</b>	s	La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes du rayonnement correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium-133.

# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Le Système International d'unités

- Définition des unités de base

Nom	Symbole	Définition
<b>ampère</b>	<b>A</b>	Courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \times 10^{-7}$ newton par mètre de longueur.
<b>kelvin</b>	<b>K</b>	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1 / 273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Le point triple de l'eau est la température d'équilibre ( $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $273,16\text{K}$ ) entre la glace pure, l'eau exempte d'air et la vapeur d'eau.
<b>mole</b>	<b>mol</b>	La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone-12. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de ces particules.
<b>candela</b>	<b>cd</b>	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \times 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.

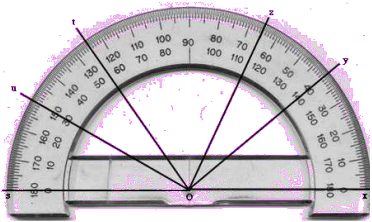


# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Le Système International d'unités

- Unités dérivées



radian



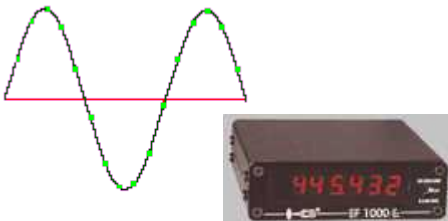
newton



joule



watt



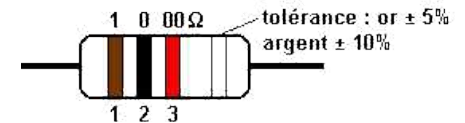
hertz



coulomb



volt



ohm

# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Le Système International d'unités

- Unités dérivées

Nom	Symbole	Définition
radian	rad	Le radian est la <b>mesure d'angle</b> plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un <b>arc</b> de longueur égale à celle du <b>rayon</b> .
newton	N	Le newton est la <b>force</b> qui communique à un corps ayant une <b>masse</b> d'un kilogramme, l' <b>accélération</b> d'un mètre par seconde par seconde.
joule	J	Le joule est le <b>travail</b> effectué lorsque le point d'application d'une <b>force</b> d'un newton se déplace d'une <b>distance</b> égale à un mètre dans la direction de la force.
watt	W	Le watt est la <b>puissance</b> qui donne lieu à une production d' <b>énergie</b> égale à un joule en une <b>durée</b> de une seconde.

# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Le Système International d'unités

- Unités dérivées

Nom	Symbole	Définition
<b>hertz</b>	hz	Le hertz est ...
<b>coulomb</b>	C	Le coulomb est ...
<b>volt</b>	V	Le volt est ...
<b>ohm</b>	$\Omega$	L'ohm est ...

# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Le Système International d'unités

- Unités hors système SI

unité	grandeur	unité légale
km/h		
bar		
Ah		
mach		
kg/cm <sup>2</sup>		
kWh		
Tonne force		
noeud		
psi		

# Notion de Mesure

## Définitions de base

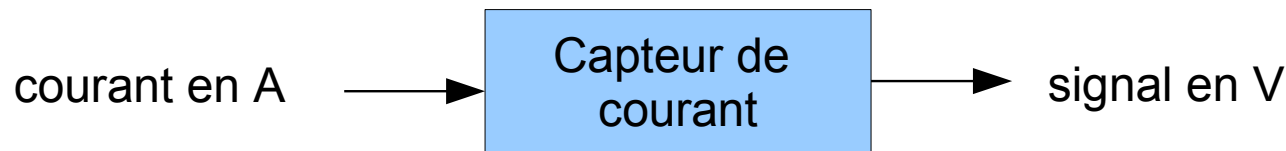
### Le Système International d'unités

Il existe de nombreux domaines de mesure pour lesquels il n'existe pas d'unité SI .

Exemples :

- mesure de  $pH = -\ln a_H$   $a_H$  étant l'activité de l'ion hydrogène . Mise en place d'une expérience de référence
- mesure de turbidité : unité NTU (Nephelometric Turbidity Units) référence à partir de la précipitation d'une solution de formazine observée à  $90^\circ$

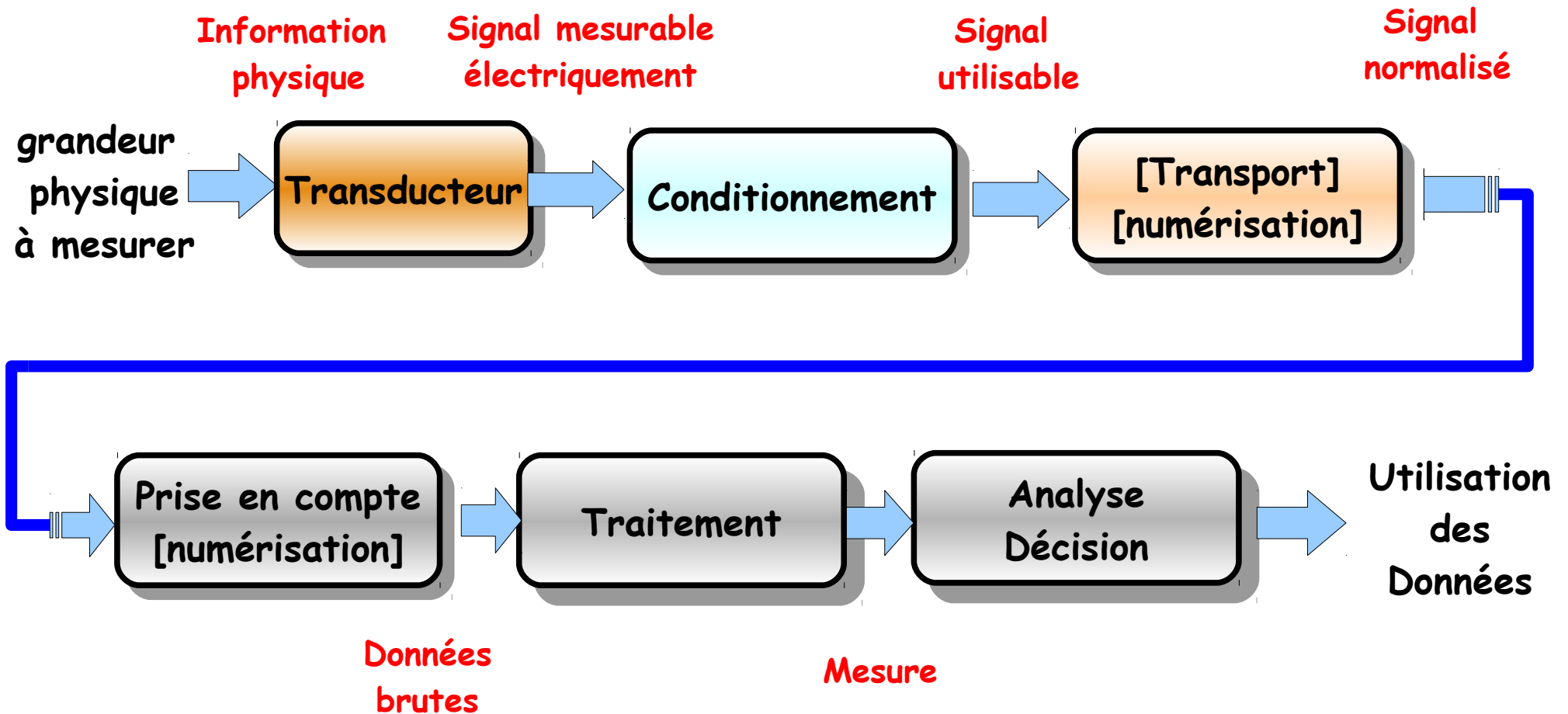
Généralement, un capteur fournit un signal dont le gain (facteur d'échelle) est exprimé par rapport au système SI. Exemple : un capteur de courant donne un signal exprimé en V/A



# Notion de Mesure

## Définitions de base

### Rôle du capteur



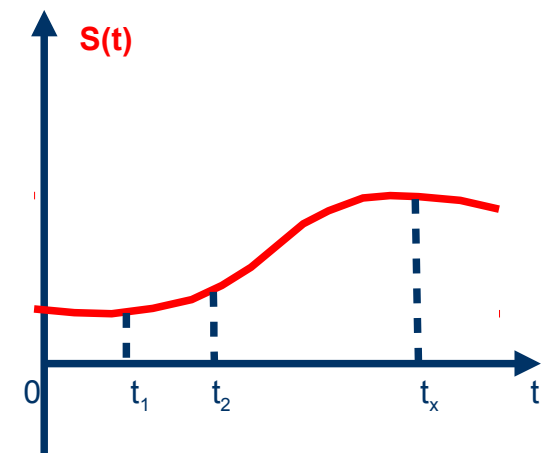
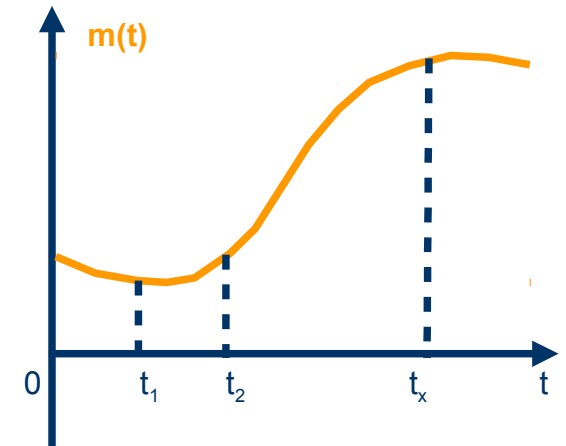
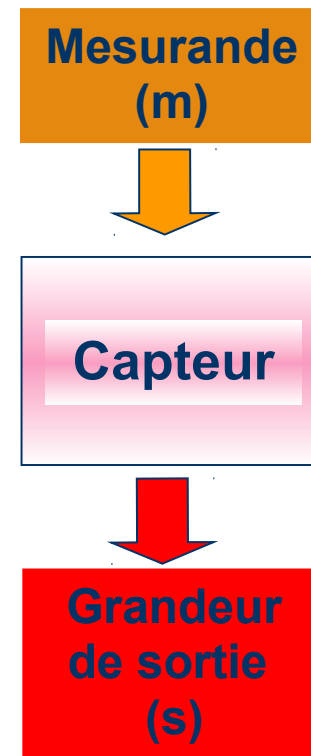
Le capteur est le premier élément de la chaîne de mesure

# Notion de Mesure

## Définitions de base

### 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...]



# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

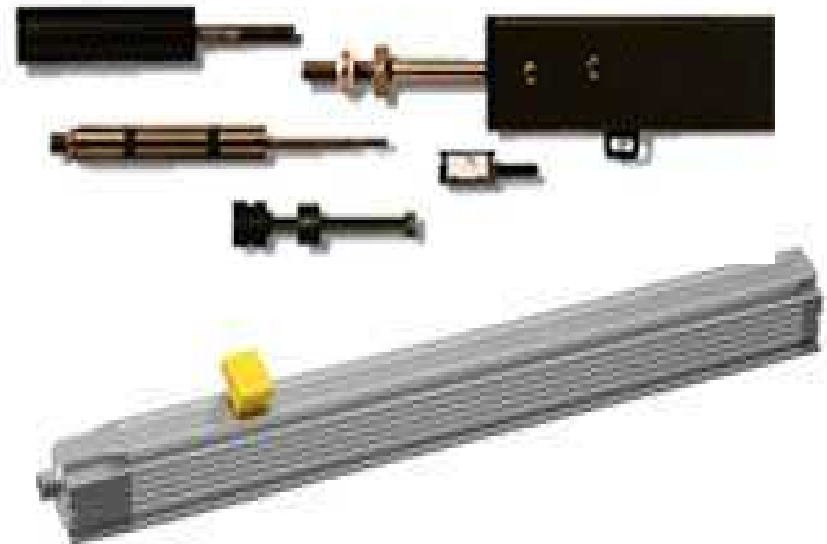
### Capteurs de position

Faible distance



capteurs de proximité

Forte distance



règle de mesure



# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

### Capteurs de vitesse

Sans contact



Tachymétrie optique ou magnétique

Avec entraînement



Dynamo Tachymétrique

# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

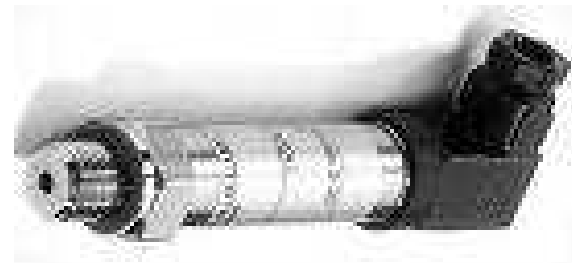
### Capteurs de pression



Affichage mécanique



Capteurs électroniques



Capteurs industriels

# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

### Capteurs de force/couple

Pesage en extension



Pesage en compression



Balance



Couple



# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

### Capteurs de débit

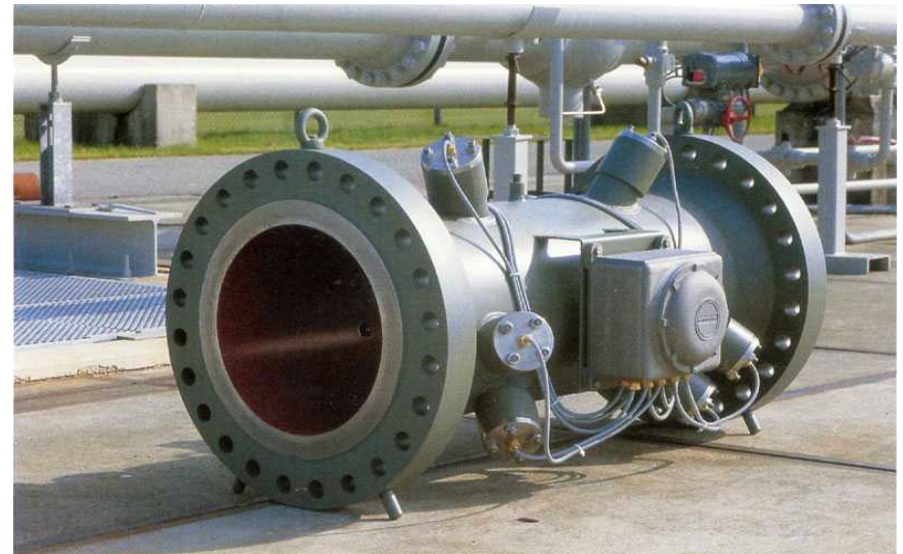
Gaz



Capteur automobile



Portable



Capteur industriel



Laboratoire

Liquides



# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs thermiques

### Capteurs de température

modèle portable



Pyromètre Sans contact



Canne de mesure  
industrielle

Thermistance  
électronique

# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

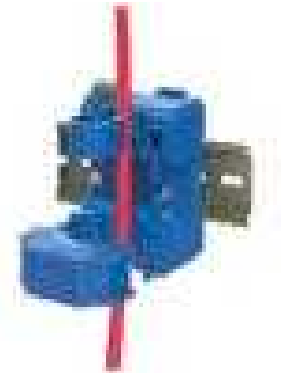
Types de mesurande : grandeurs électriques

### Mesure de tension/courant

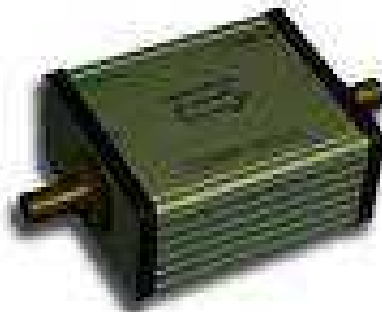
modèles de poche



Modèle de laboratoire



Haute tension



Forts courants



Boucle de Rogowski

Sans contact

# Notion de Mesure

## 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**

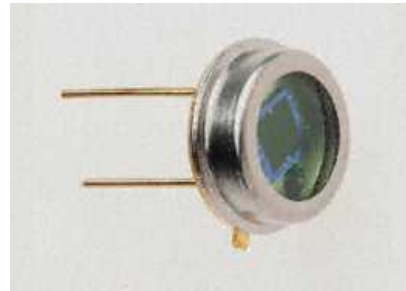
**Seuil de detection : 2 mG**

# Notion de Mesure

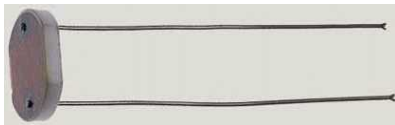
## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

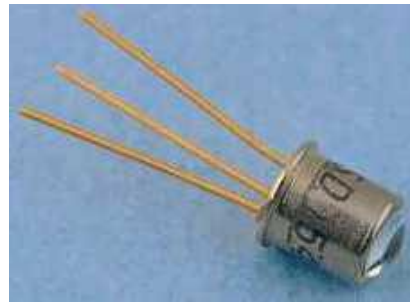
### Capteurs de lumière



Photodiodes



Photorésistance



Phototransistor



Luxmètre



# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

### Capteurs de radiations



Compteur Geiger



Dosimètre électronique



Caméra infrarouge

# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs chimiques

### Capteurs de gaz



Fixe



Analyseur de poche



Sonde Lambda



Capteur résistif  
de CO

# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs chimiques

### Capteurs d'humidité



Capteur industriel de point de rosée

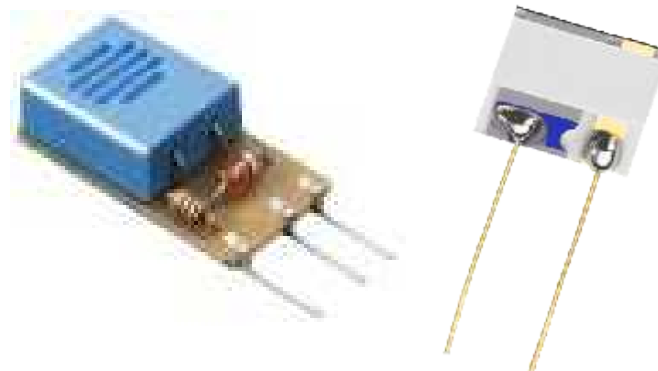
Capteur à oxyde d'aluminium



Capteur résistif



Capteurs capacitifs



# Notion de Mesure

## Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs chimiques

### Capteurs de pH



laboratoire



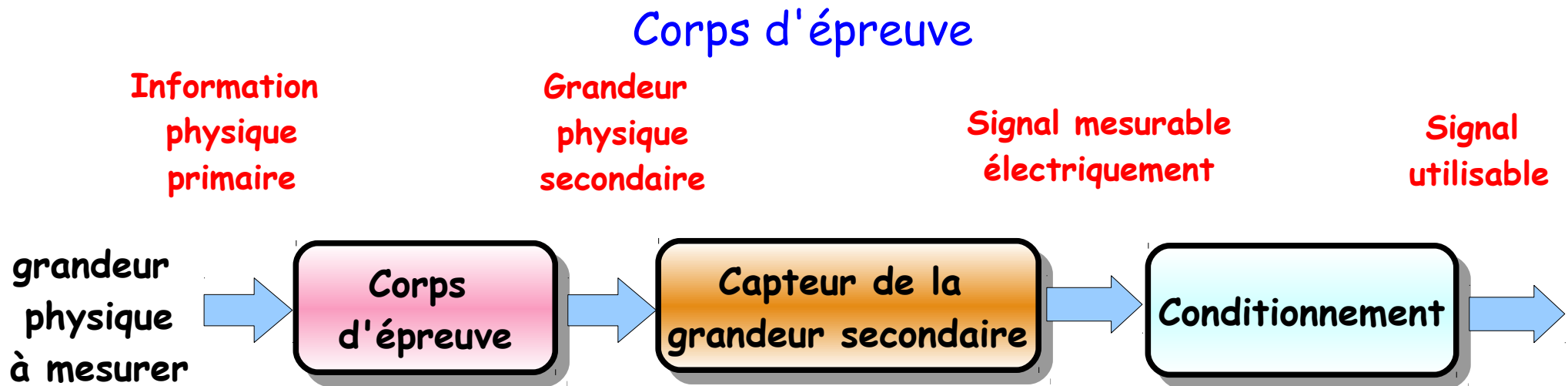
Sonde pH industrielle



Portable

# Notion de Mesure

## Structure des capteurs



- 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

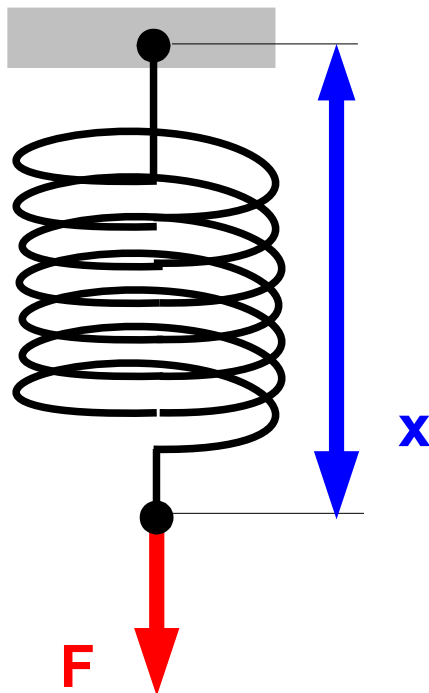
# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Corps d'épreuve

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

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



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

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

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

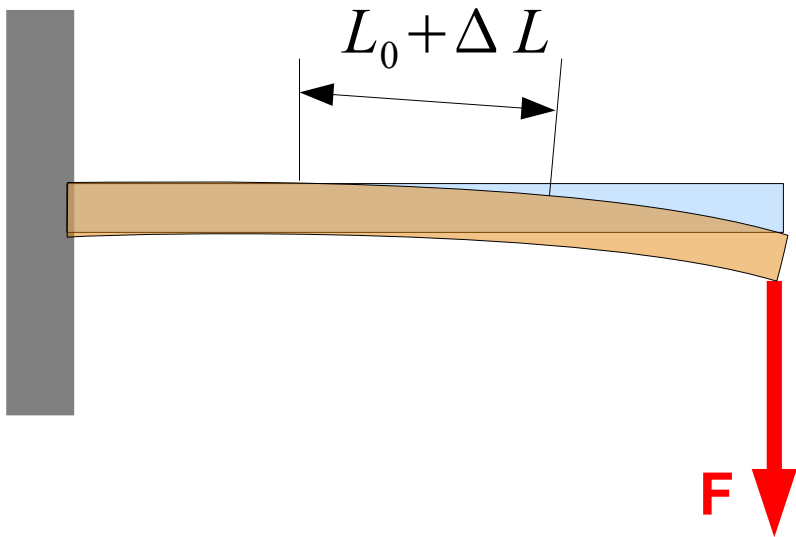
# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Corps d'épreuve

- **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)

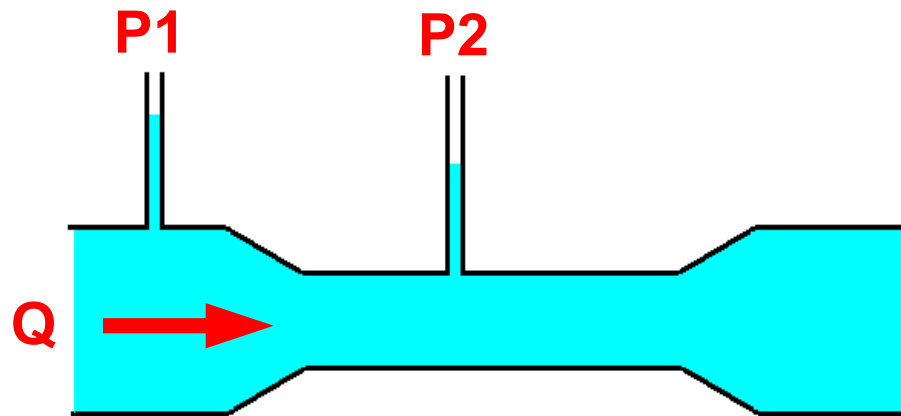
# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Corps d'épreuve

- 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



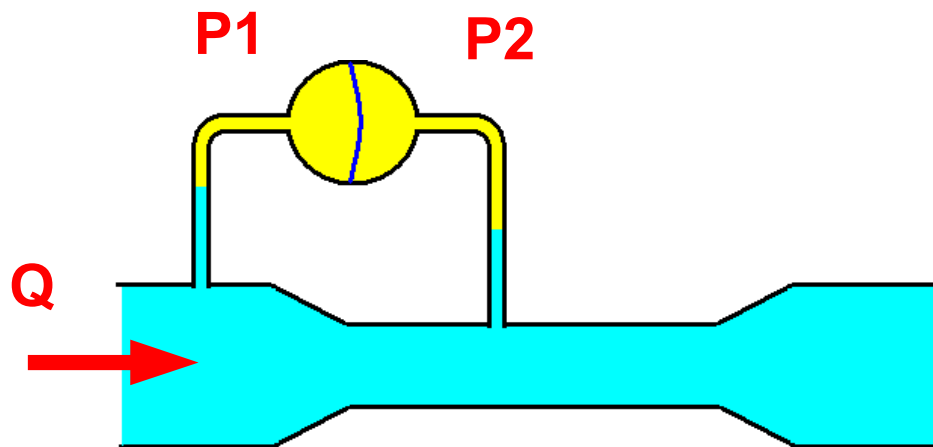
# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Corps d'épreuve

- Exemple simple: Mesure d'un débit

La différence de pression déforme la membrane



Le mesurande **pression différentielle** est transformé en mesurande **déformation/élongation**

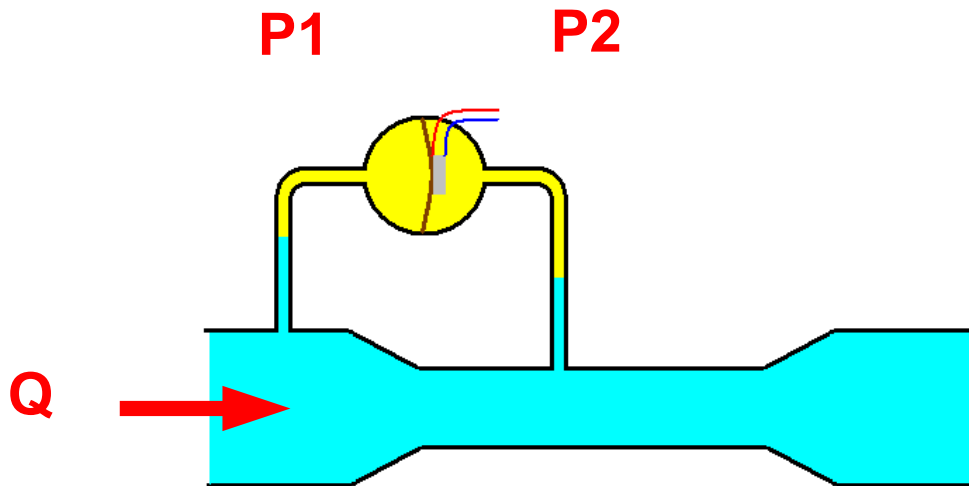
# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Corps d'épreuve

- Exemple simple: Mesure d'un débit

La déformation de la membrane modifie la résistance de la jauge



Le mesurande **déformation/élongation** est transformé en mesurande **résistance**

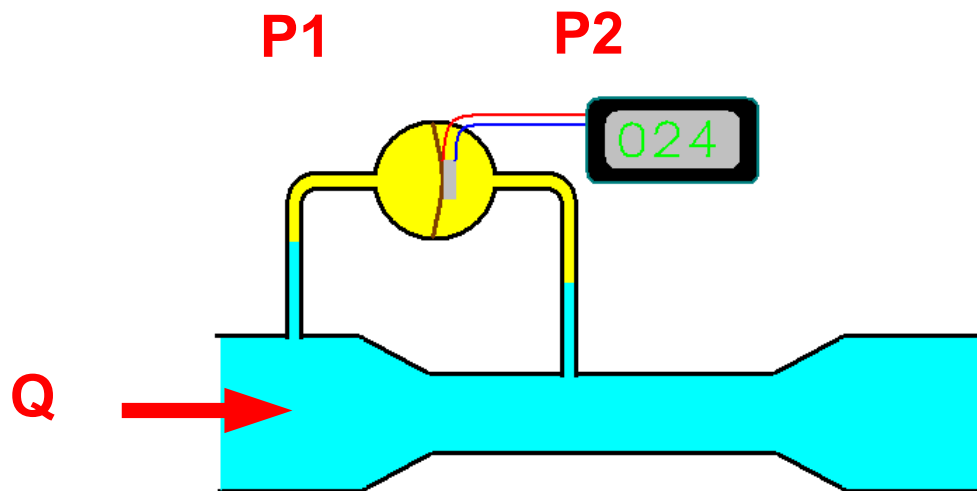
# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Corps d'épreuve

- Exemple simple: Mesure d'un débit

La déformation de la membrane modifie la résistance de la jauge



Le mesurande **résistance** est transformé en **tension** : c'est la valeur mesurée par le capteur

- L'ensemble des éléments utilisés constitue une chaîne de mesure

# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Mesure multiple

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

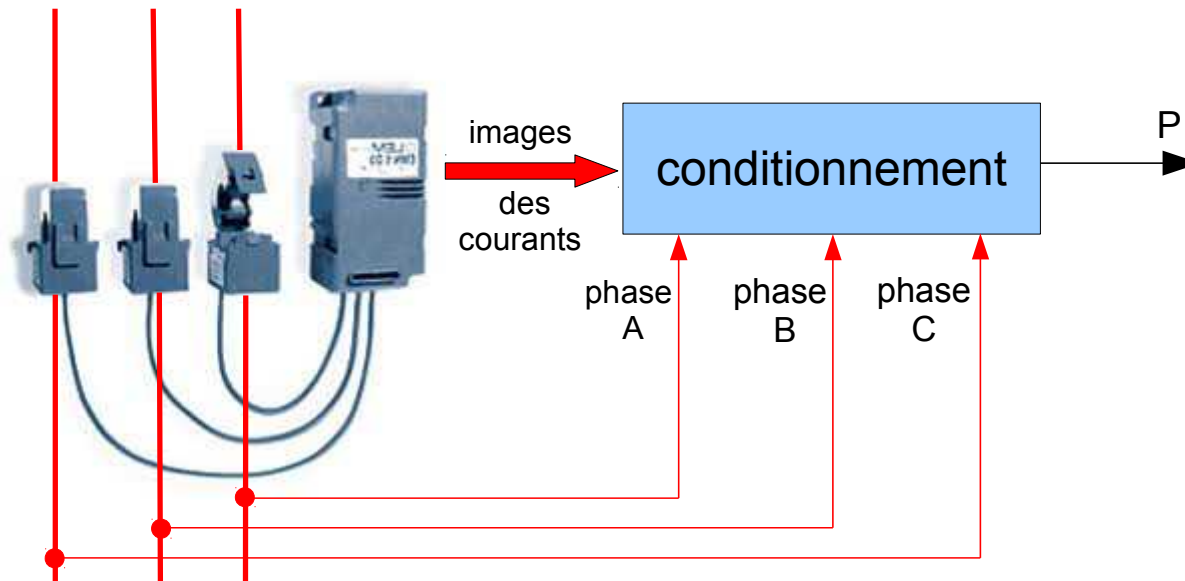
La puissance électrique instantanée est le produit de la tension par le courant.

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

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

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

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



# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

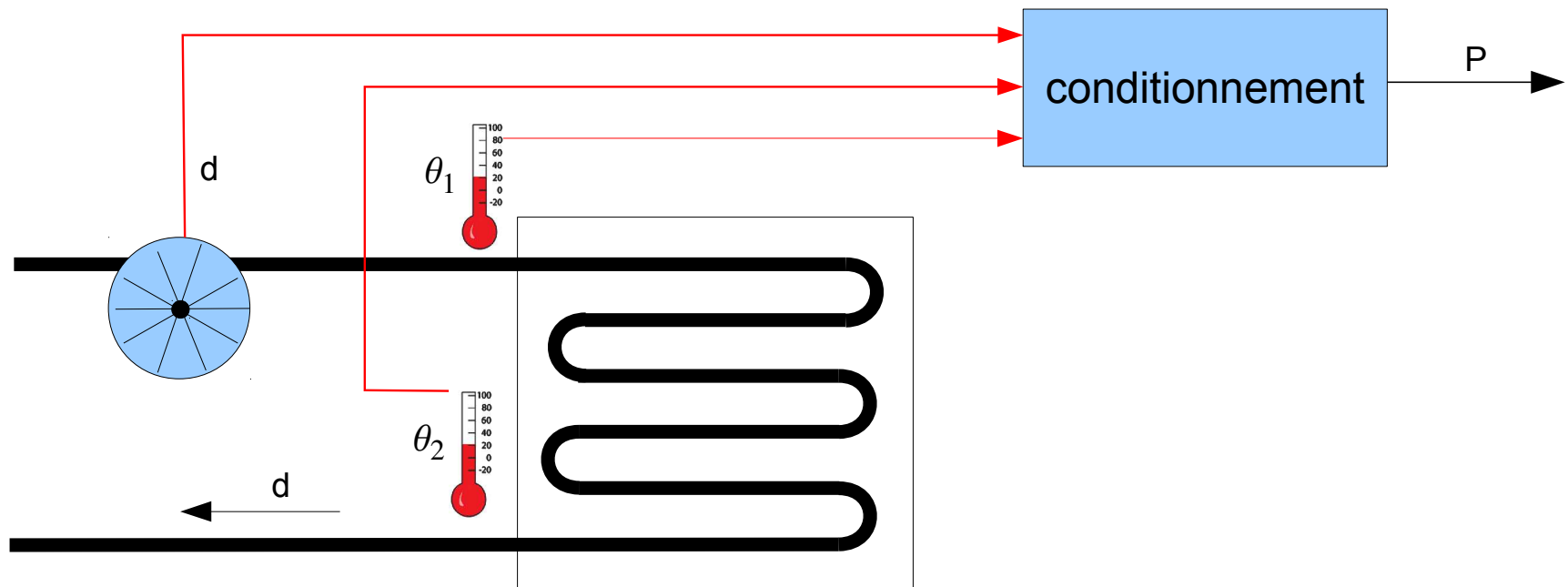
### Mesure multiple

- **Exemple :** Mesure de la puissance calorifique dissipée par un échangeur/radiateur

La puissance calorifique instantanée délivrée par un appareil est le produit du débit par la différence de température entrée/sortie .

$$p(t) = d \times (\theta_1 - \theta_2)$$

La mesure de la puissance calorifique se ramène donc à la mesure d'un débit et celle des deux températures.



# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Classes de capteurs: Capteurs passifs

- La sortie est équivalente à un dipôle passif dont l'impédance (R, L, ou C) varie avec le mesurande ;

exemples résistifs:

Mesurande	Grandeur de sortie	Matériaux
Température	Résistivité	platine, nickel, semi-conducteurs
Flux lumineux	Résistivité	semi-conducteurs
Déformation	Résistivité	alliages résistifs NiCr
Position	Résistivité	Polymères résistifs
Humidité	Résistivité	chlorure de lithium, $ZrCrO_4$

- Le mesurande est évalué grâce à la mesure de la résistance

# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Classes de capteurs : capteurs passifs

- autres exemples :

Mesurande	Grandeur de sortie	Matériaux
Déformation	Résistivité	platine, nickel, semi-conducteurs
Déplacement	Self inductance	bobine, matériaux magnétiques
Déplacement	Couplage mutuel	transformateur magnétique
Déformation	Capacité	vide
Humidité	Capacité	polymère, or

- 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

# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

### Classes de capteurs : capteurs actifs

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

exemples :

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	thermoélectricité	tension
Flux lumineux	photoémission pyroélectricité	courant charge
Force, pression, accélération	piézoélectricité	charge
Position	effet Hall	tension
Vitesse	induction	tension

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



# Notion de Mesure

## Structure des capteurs

Classes de capteurs : capteurs passifs/actifs

