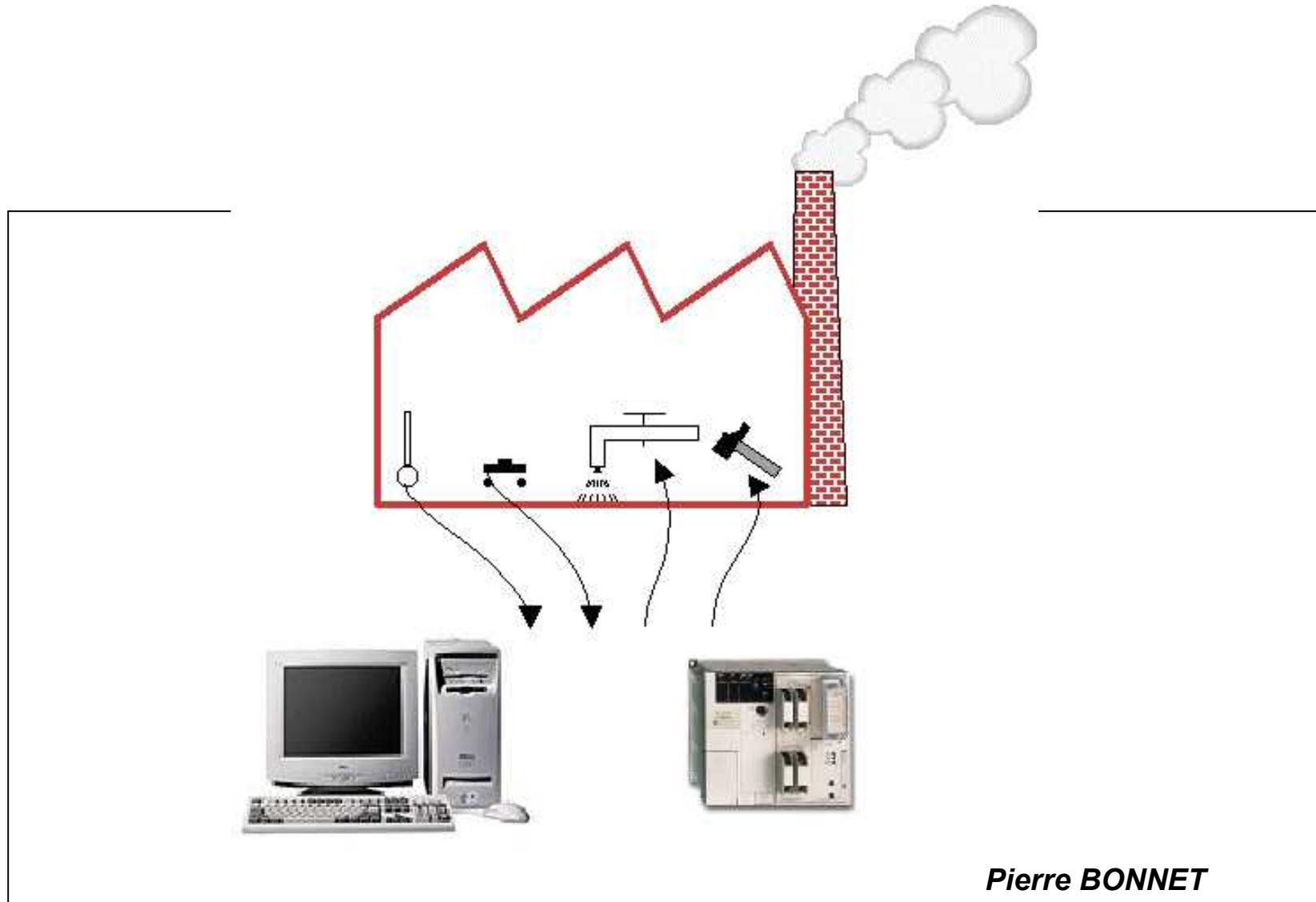


CAPTEURS - CHAINES DE MESURES



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://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



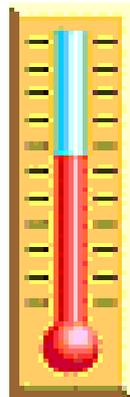
kilogramme



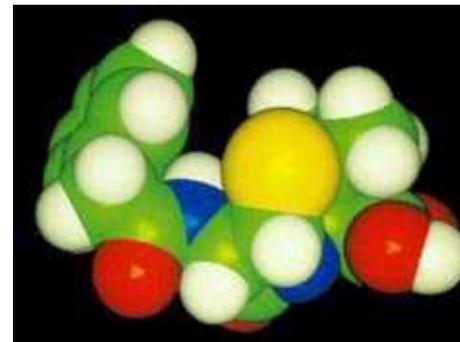
seconde



ampère



kelvin



mole



candela

Notion de Mesure

Définitions de base

Le Système International d'unités

- Définition des unités de base

Nom	Symbole	Définition
mètre	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.
kilogramme	kg	Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.
seconde	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

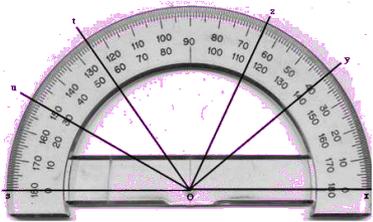
Nom	Symbole	Définition
ampère	A	Courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.
kelvin	K	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.
mole	mol	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.
candela	cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{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



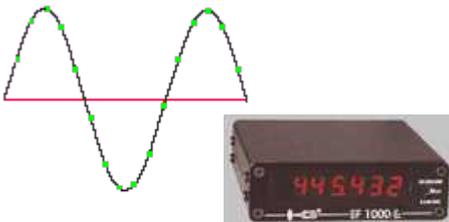
newton



joule



watt



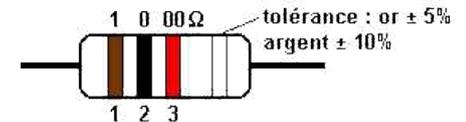
hertz



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

Notion de Mesure

Définitions de base

Le Système International d'unités

- Unités dérivées

Nom	Symbole	Définition
hertz	hz	Le hertz est ...
coulomb	C	Le coulomb est ...
volt	V	Le volt est ...
ohm	Ω	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 ²		
kWh		
Tonne force		
noeud		
psi		

Notion de Mesure

Définitions de base

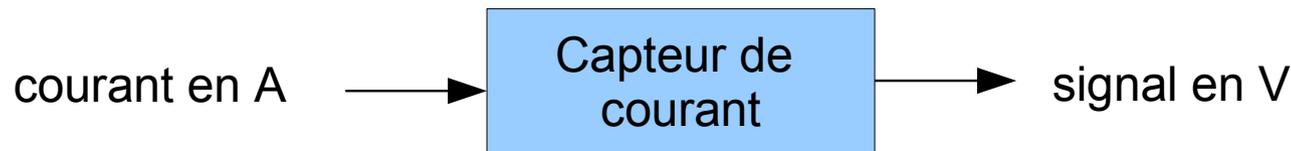
Le Système International d'unités

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°

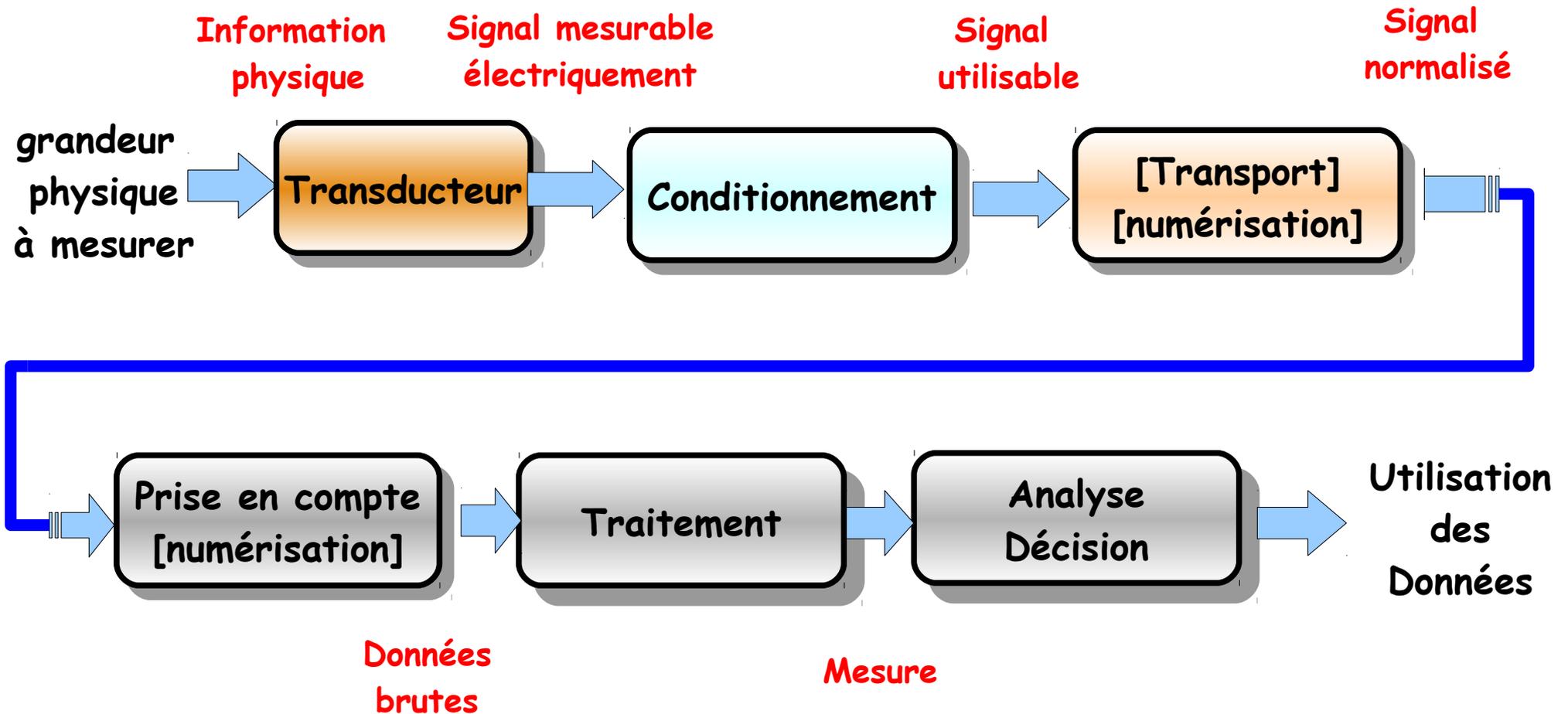
Généralement, un capteur fournit un signal dont le gain (facteur d'échelle) est exprimé par rapport au système SI. Exemple : un capteur de courant donne un signal exprimé en V/A



Notion de Mesure

Définitions de base

Rôle du capteur



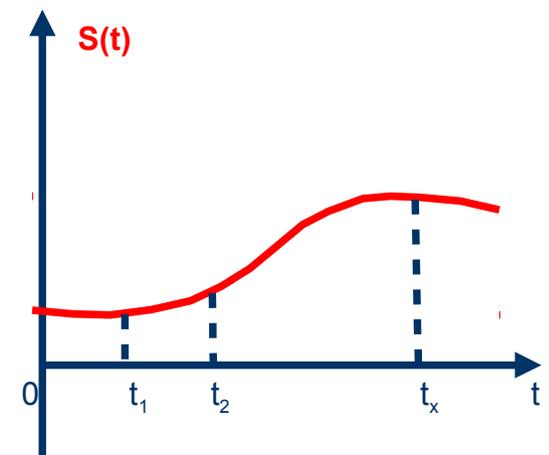
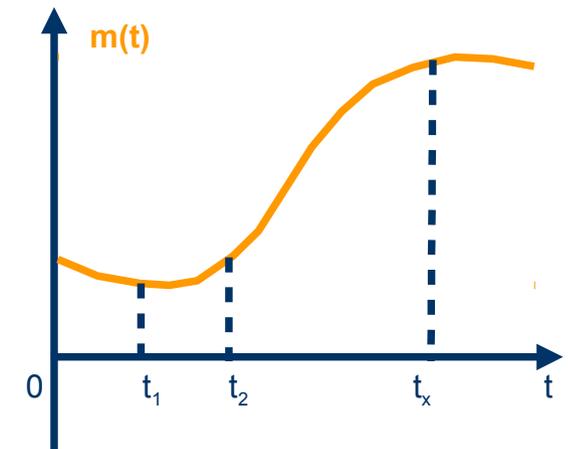
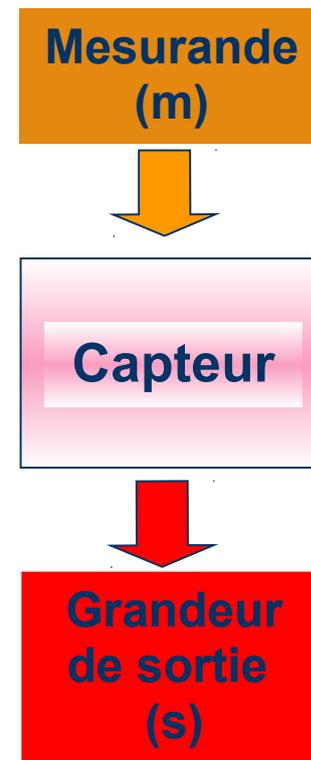
Le capteur est le premier élément de la chaîne de mesure

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

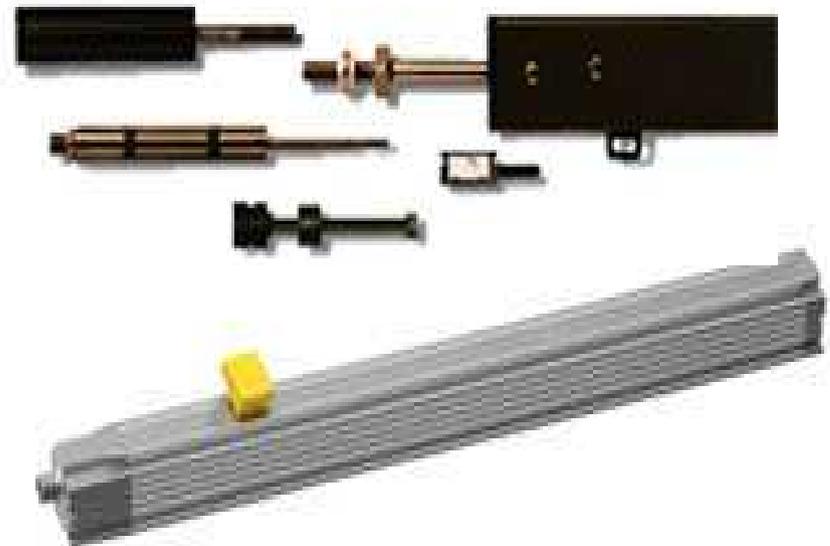
Capteurs de position

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

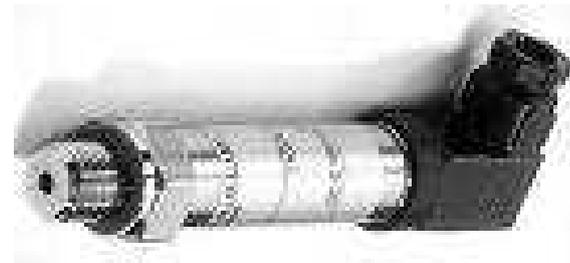
Capteurs de pression



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

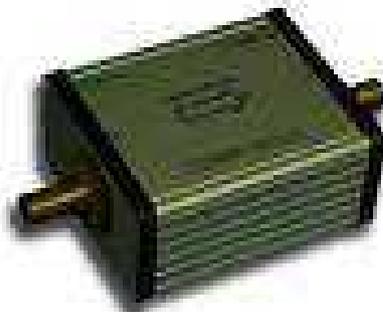
modèles de poche



Modèle de laboratoire



Haute tension



Forts courants



Boucle de Rogowski

Sans contact

Notion de Mesure

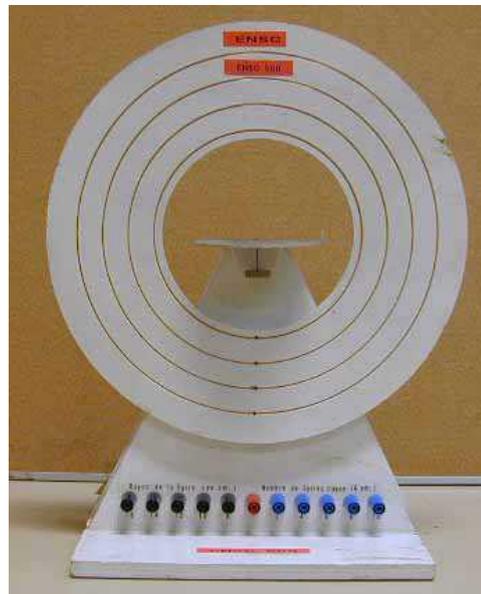
Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs électriques

Mesure de champ magnétique



**Capteur de champs
basse fréquence**



« boussole des tangentes »



Détecteur de champ magnétique.

Hutech EMF detector

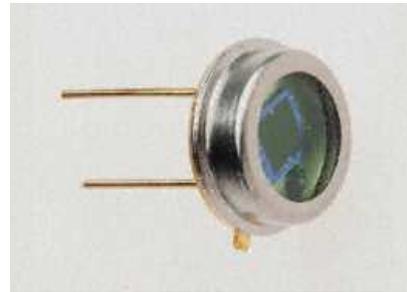
Seuil de detection : 2 mG

Notion de Mesure

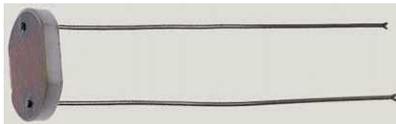
Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

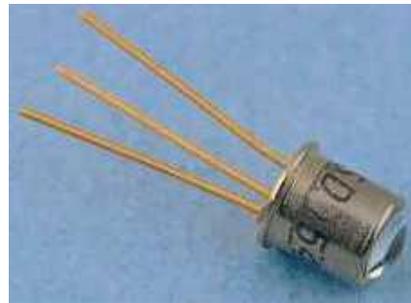
Capteurs de lumière



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



Capteurs capacitifs



Capteur résistif



Notion de Mesure

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs chimiques

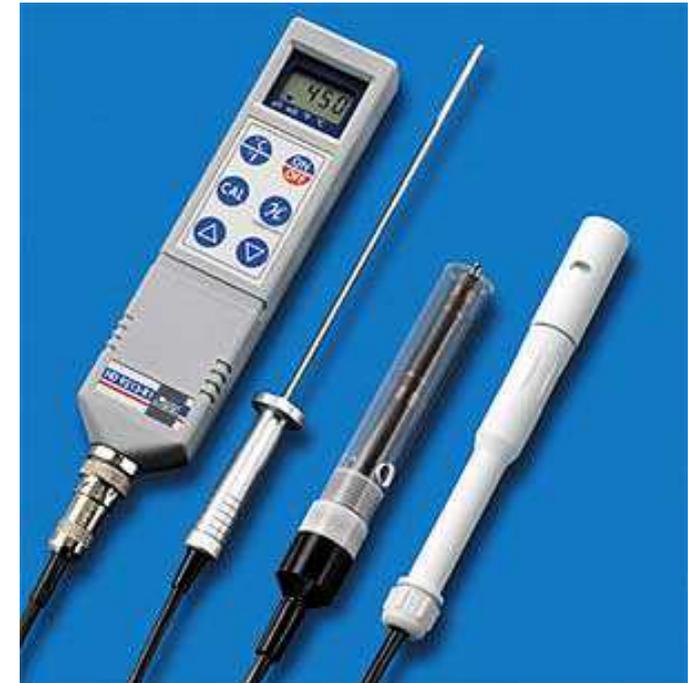
Capteurs de pH



laboratoire



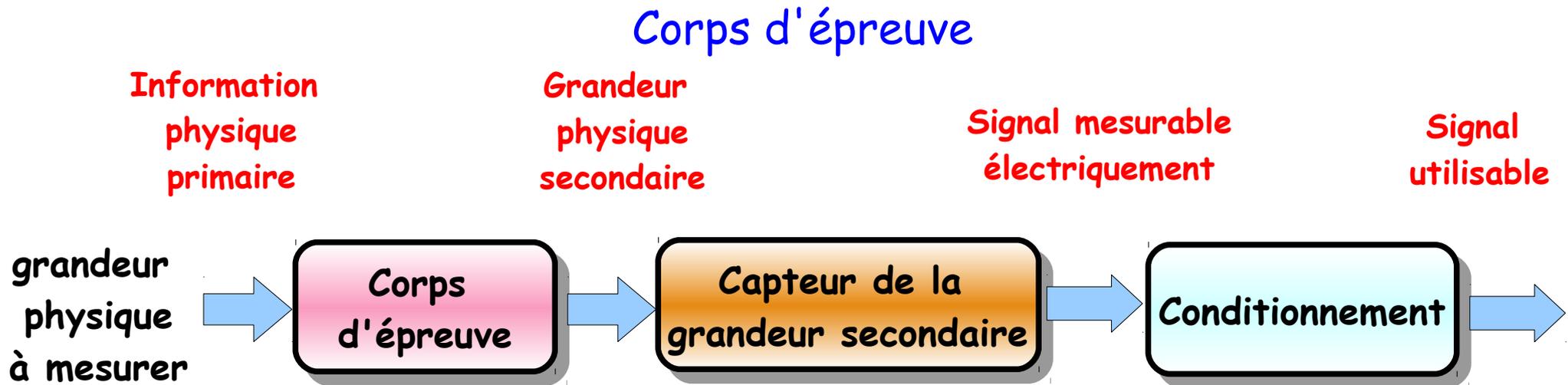
Sonde pH industrielle



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

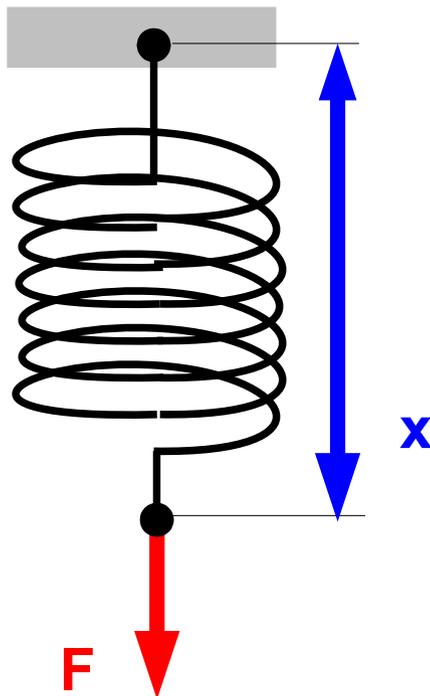
Notion de Mesure

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

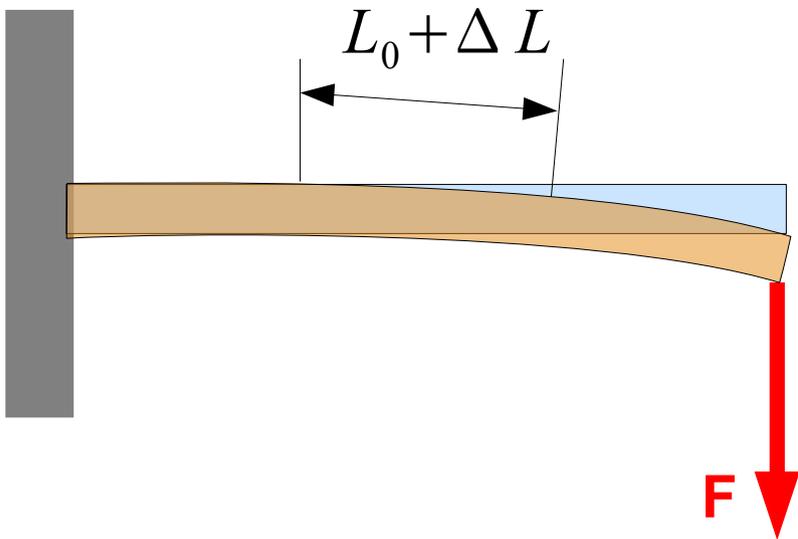
Notion de Mesure

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)

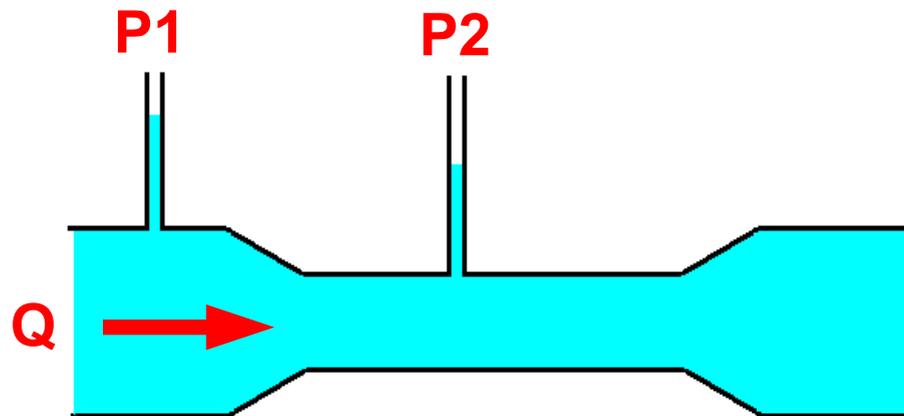
Notion de Mesure

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

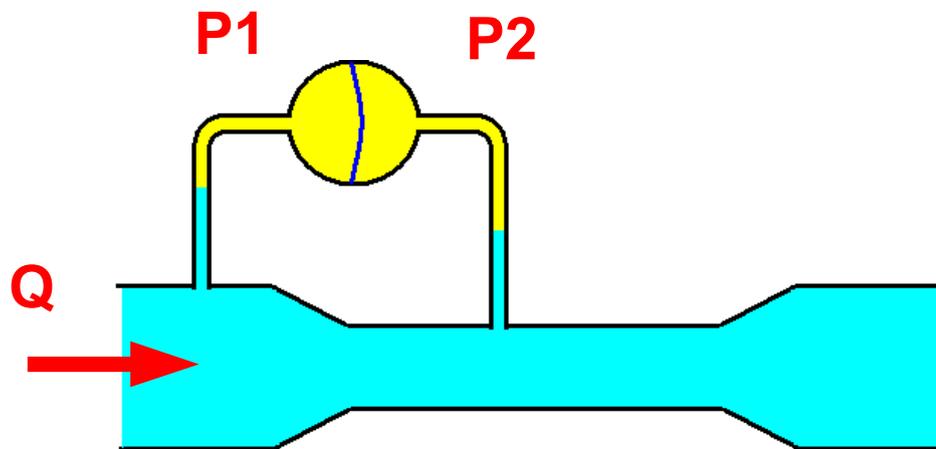
Notion de Mesure

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**

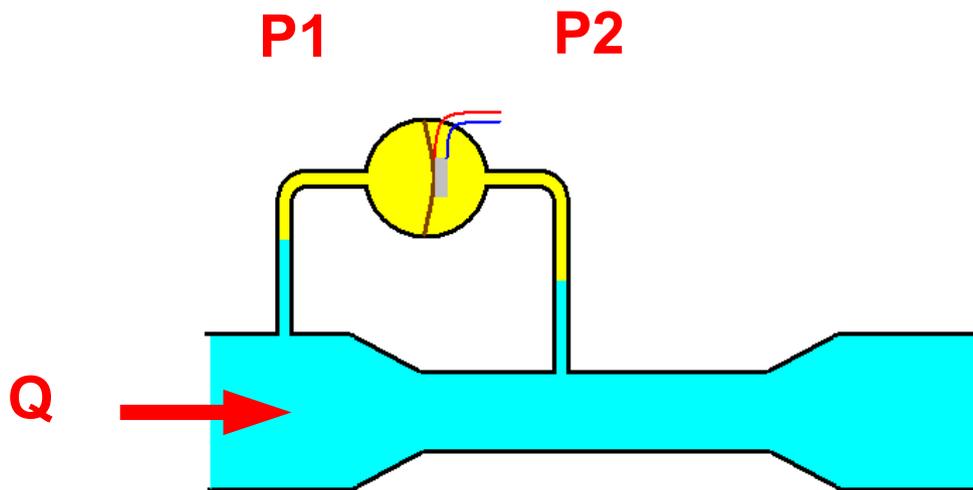
Notion de Mesure

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**

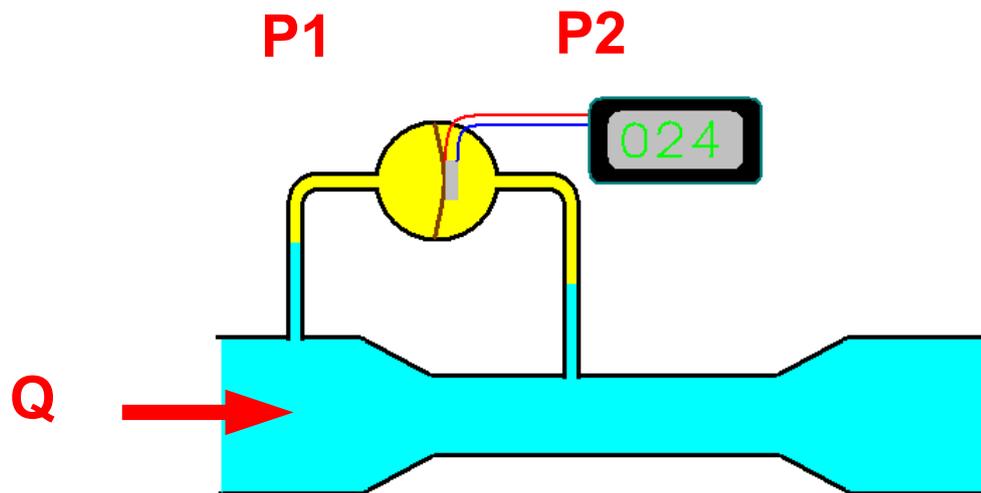
Notion de Mesure

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

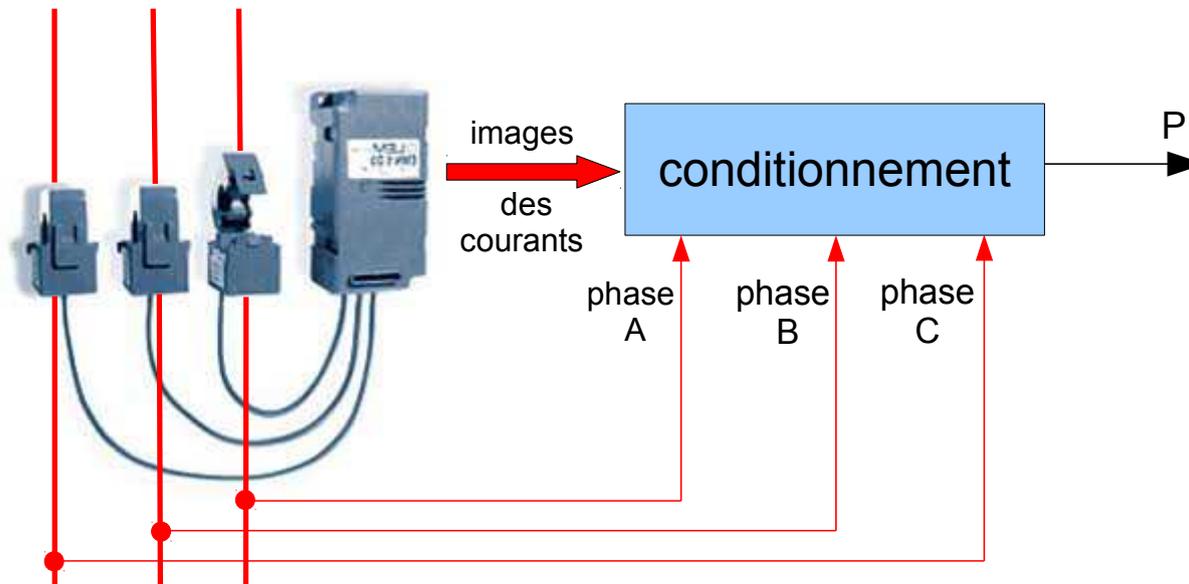
La puissance électrique instantanée est le produit de la tension par le courant.

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

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

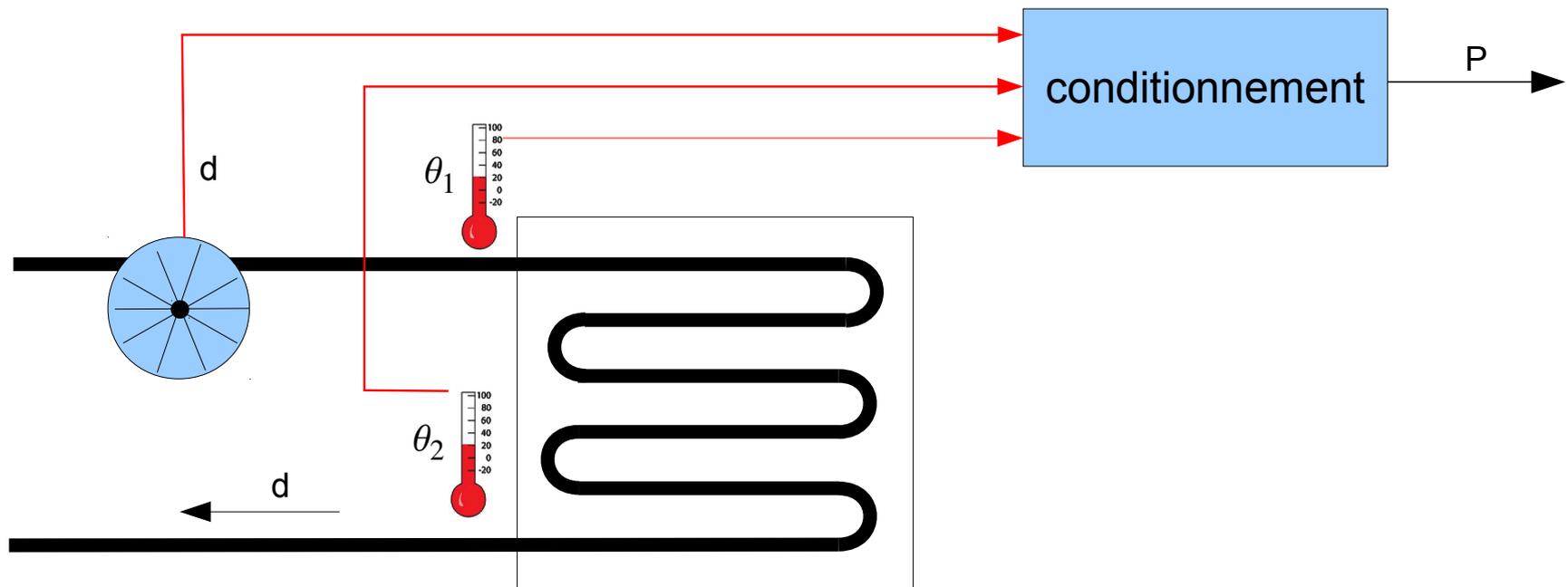
Mesure multiple

- **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

