

CAPTEURS

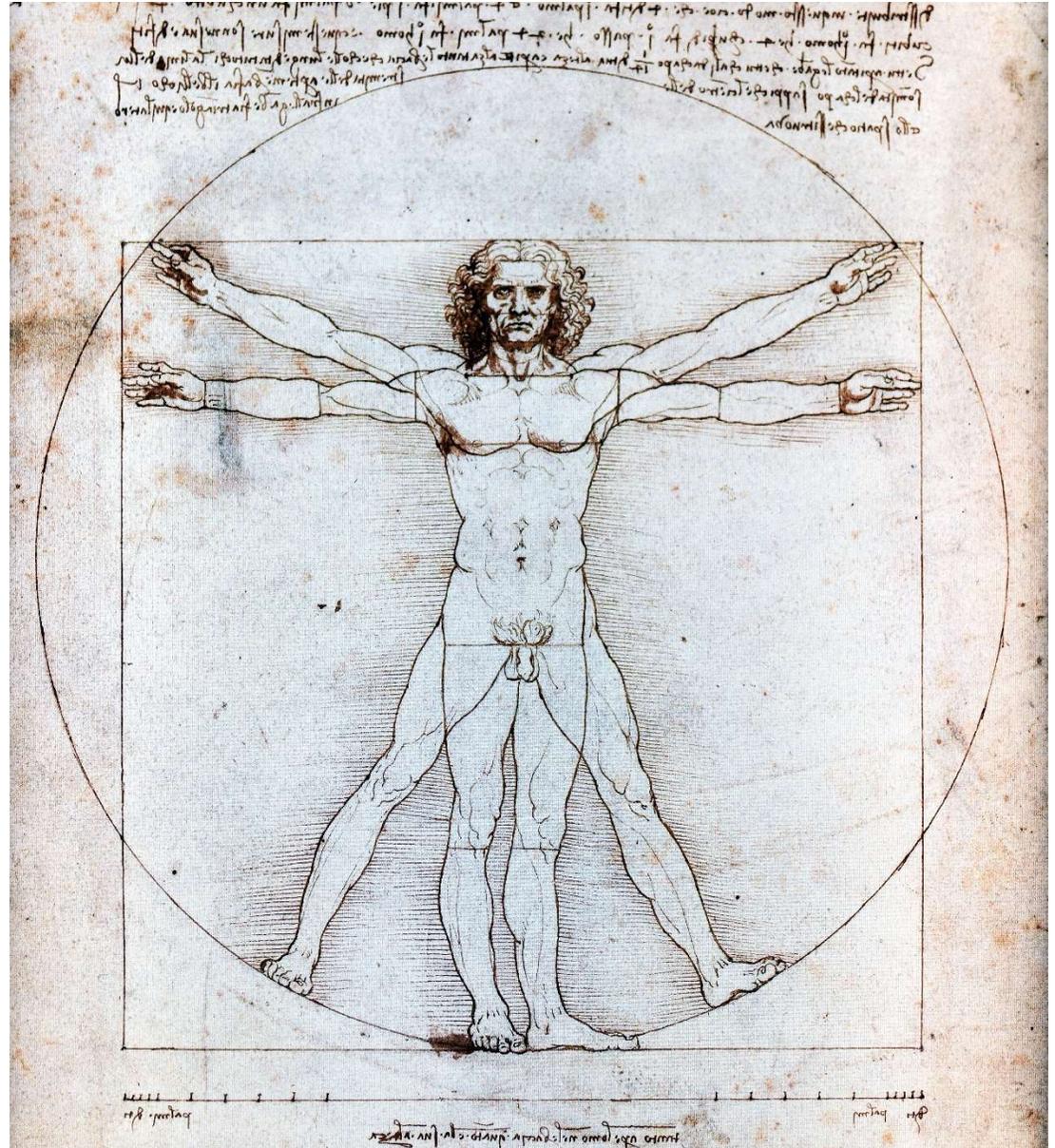
Emmanuel Baudet



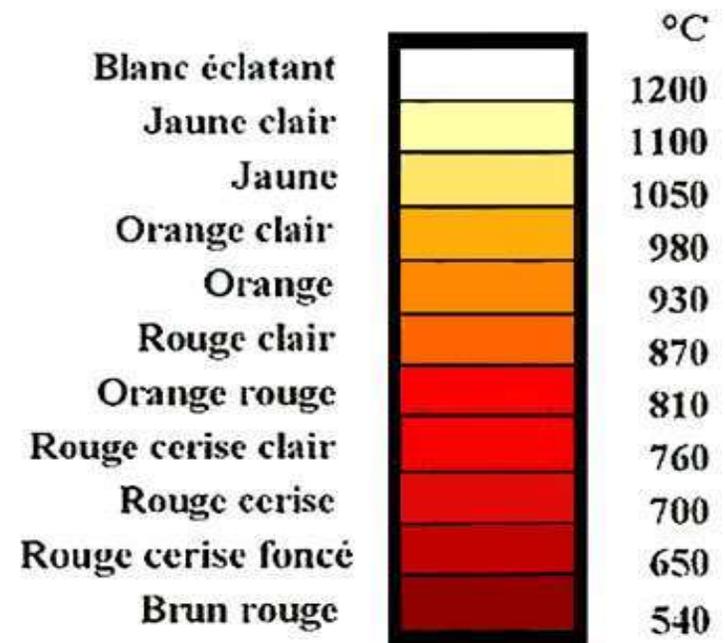
H2i

Introduction

- Mensurare :
estimer, évaluer.
- Captor :
celui qui prend la chasse.

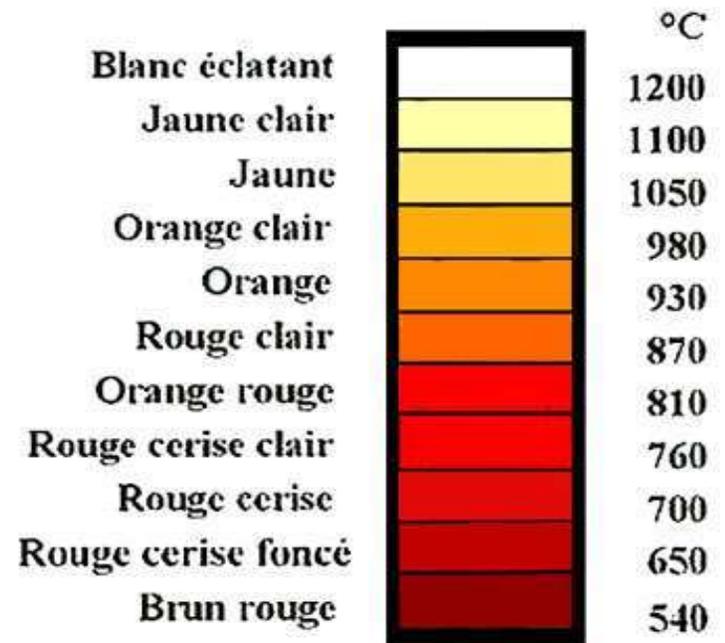


Activité, Travail...

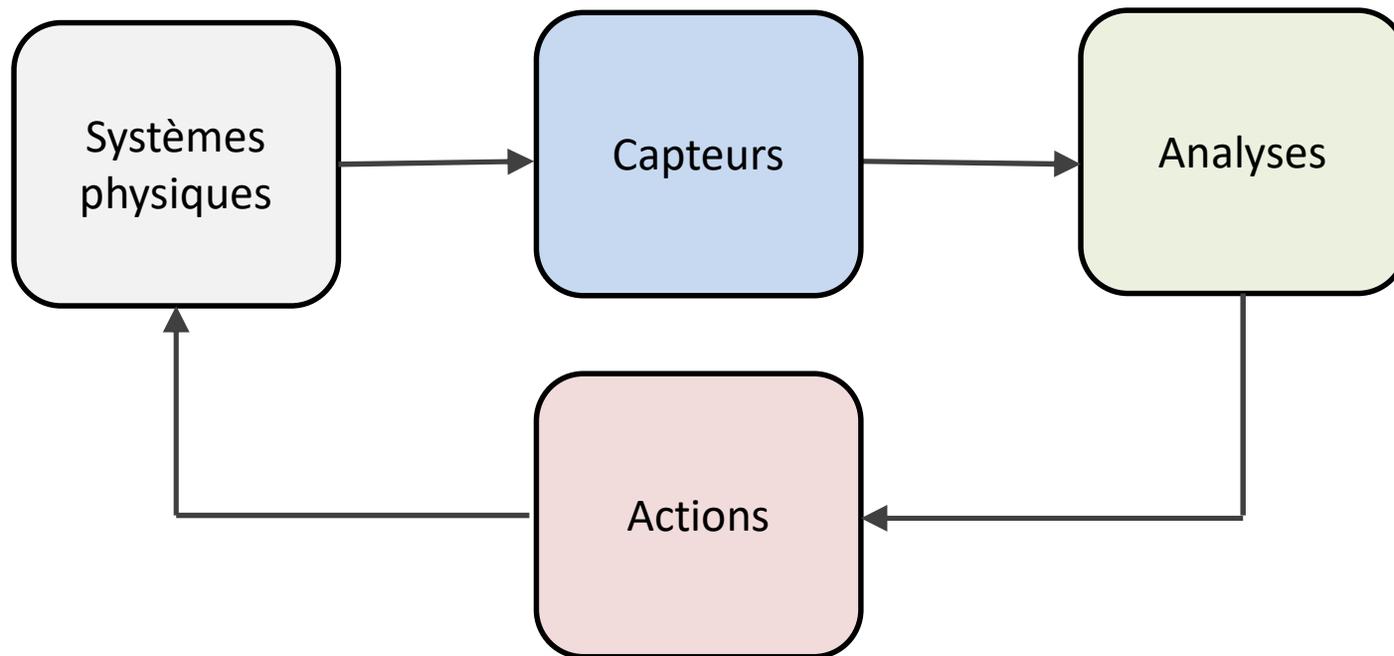




Transducteur
 Capteur
 Action

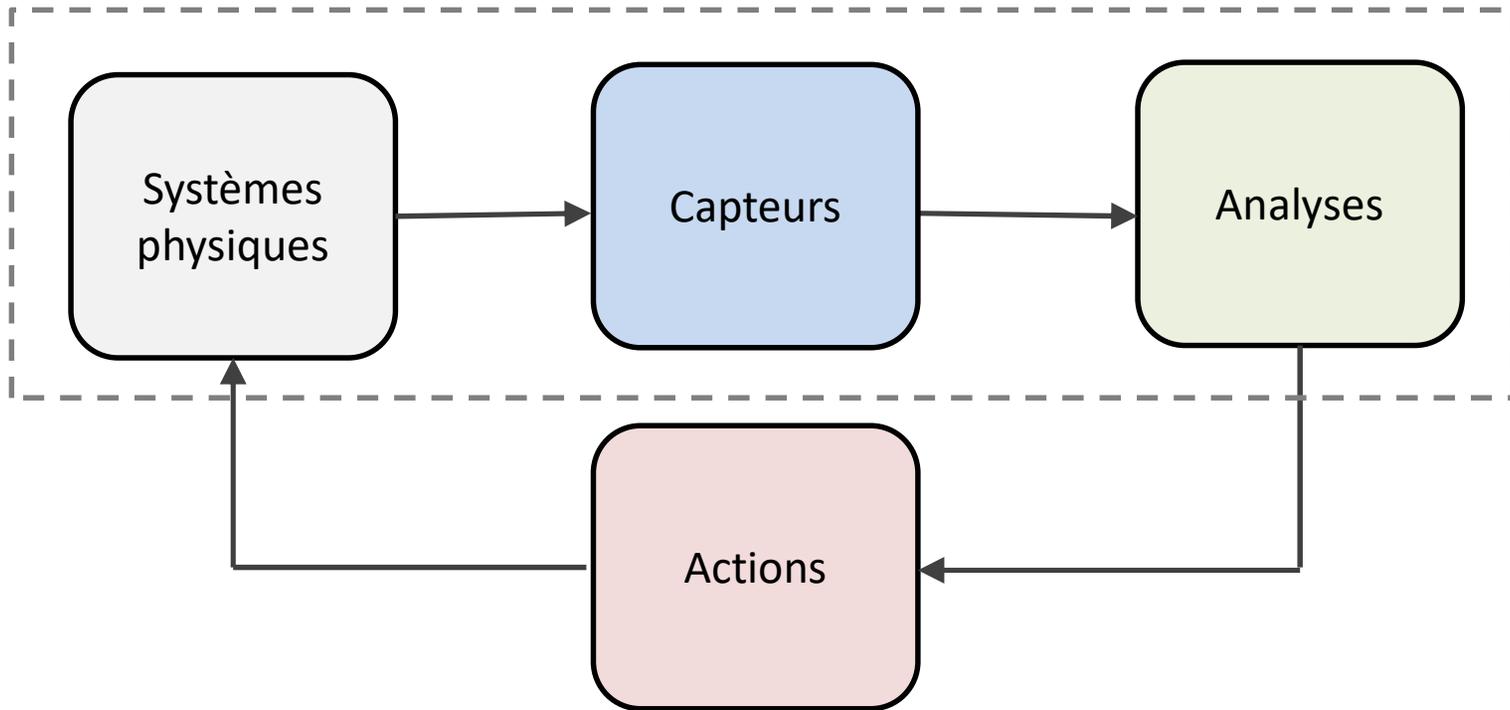


Systeme de controle



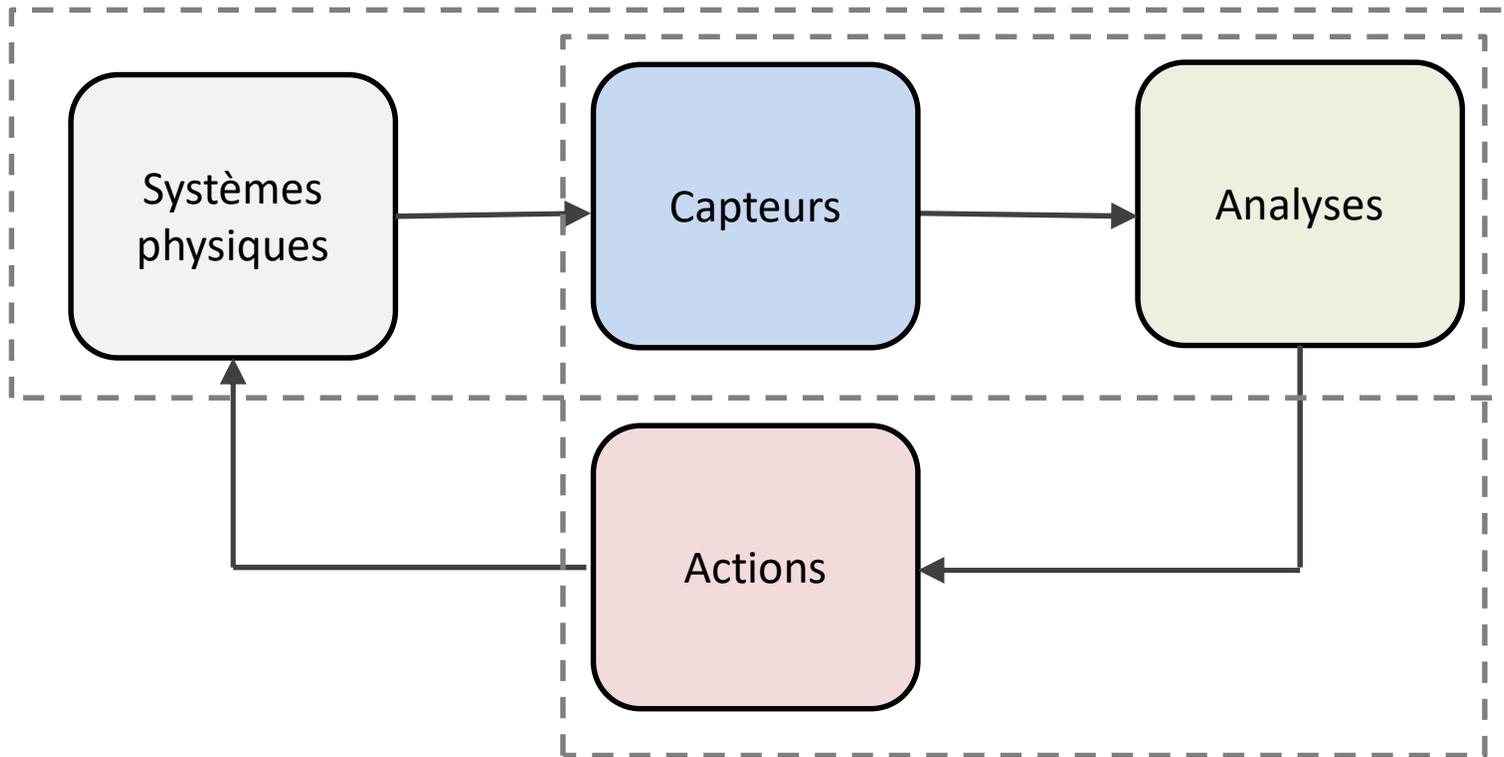
Systeme de controle

Systeme de mesure



Systeme de controle

Systeme de mesure



Humain, électronique, informatique

Systeme de controle moderne



Cabine de pilotage d'une locomotive à vapeur

Système de mesure moderne

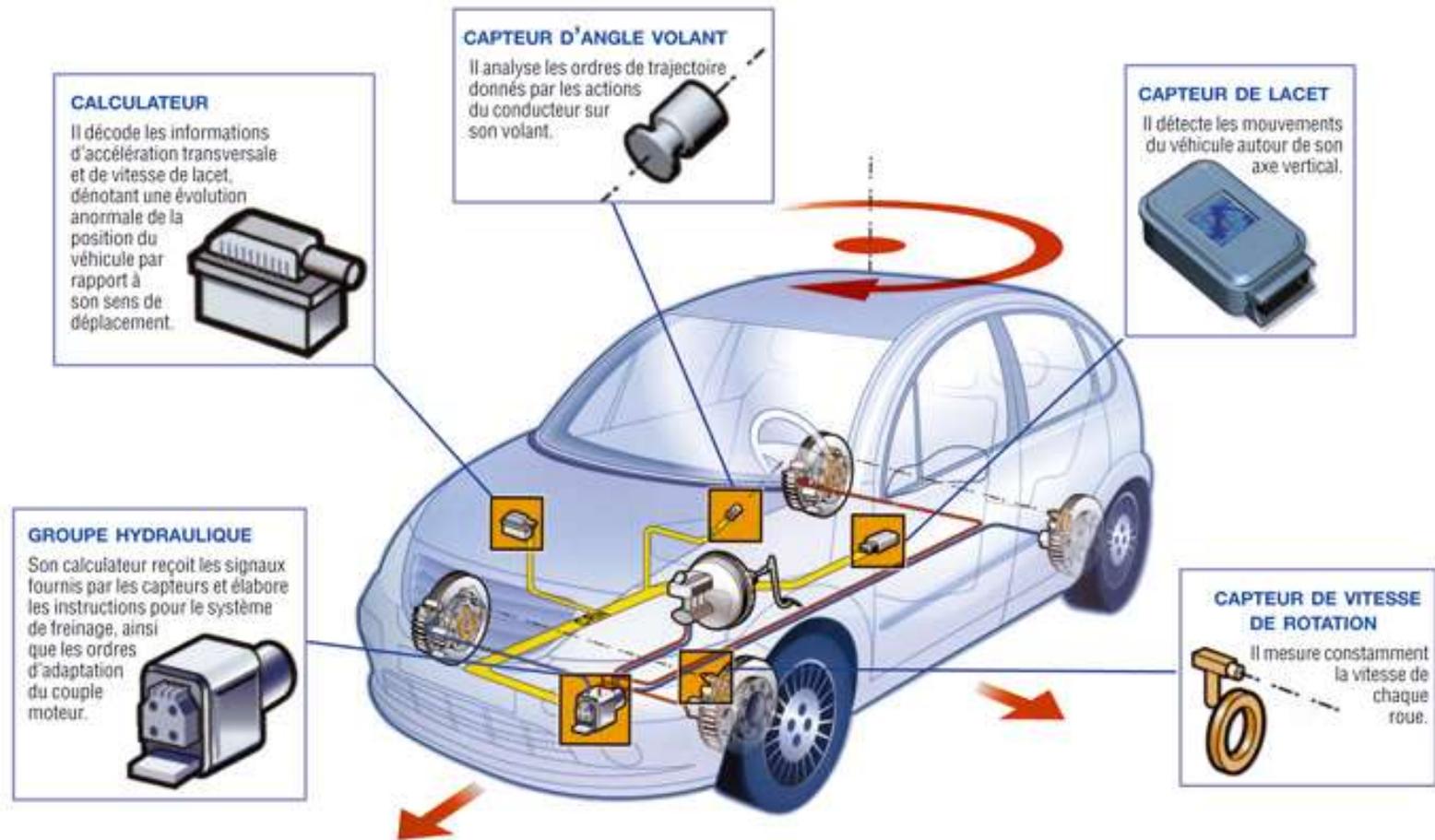


Systeme de controle moderne



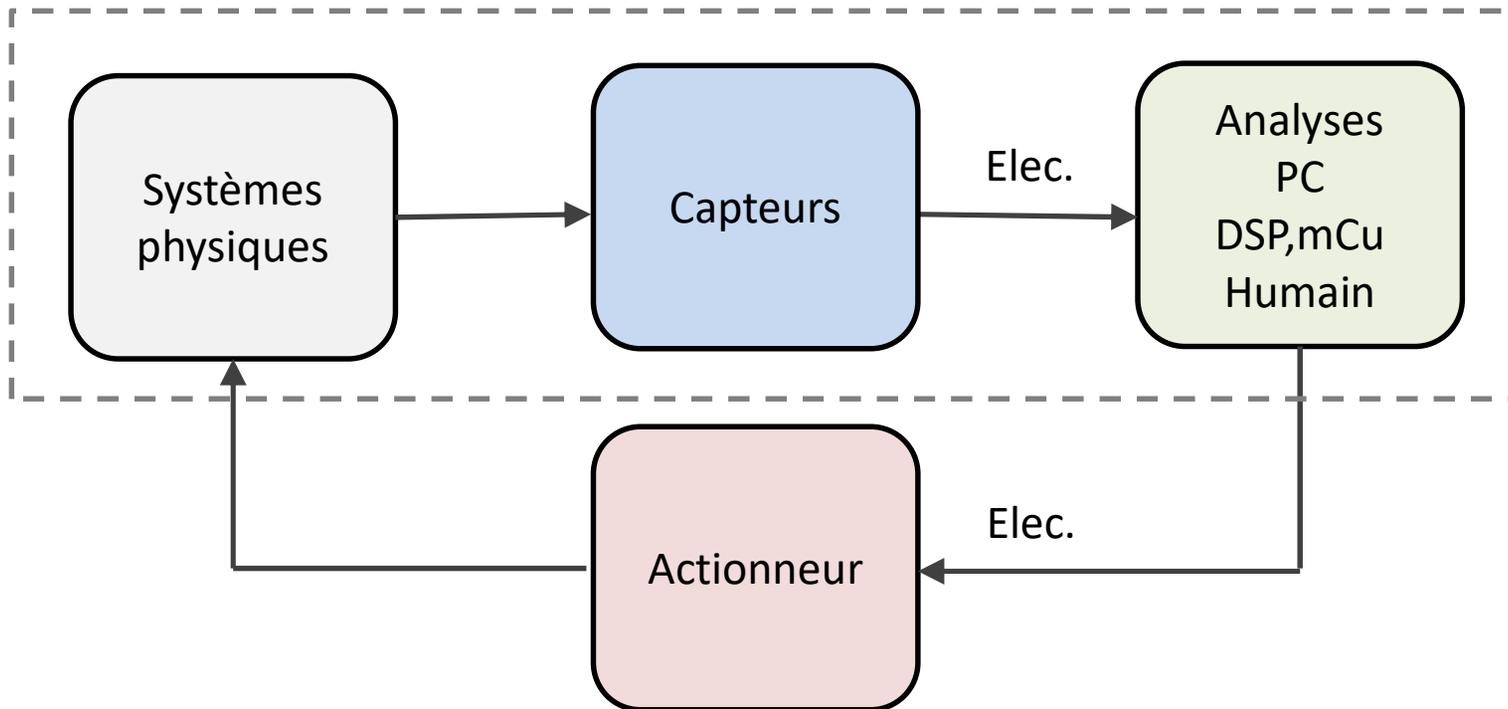
Salle de contrôle d'une centrale nucléaire

Systeme de controle moderne



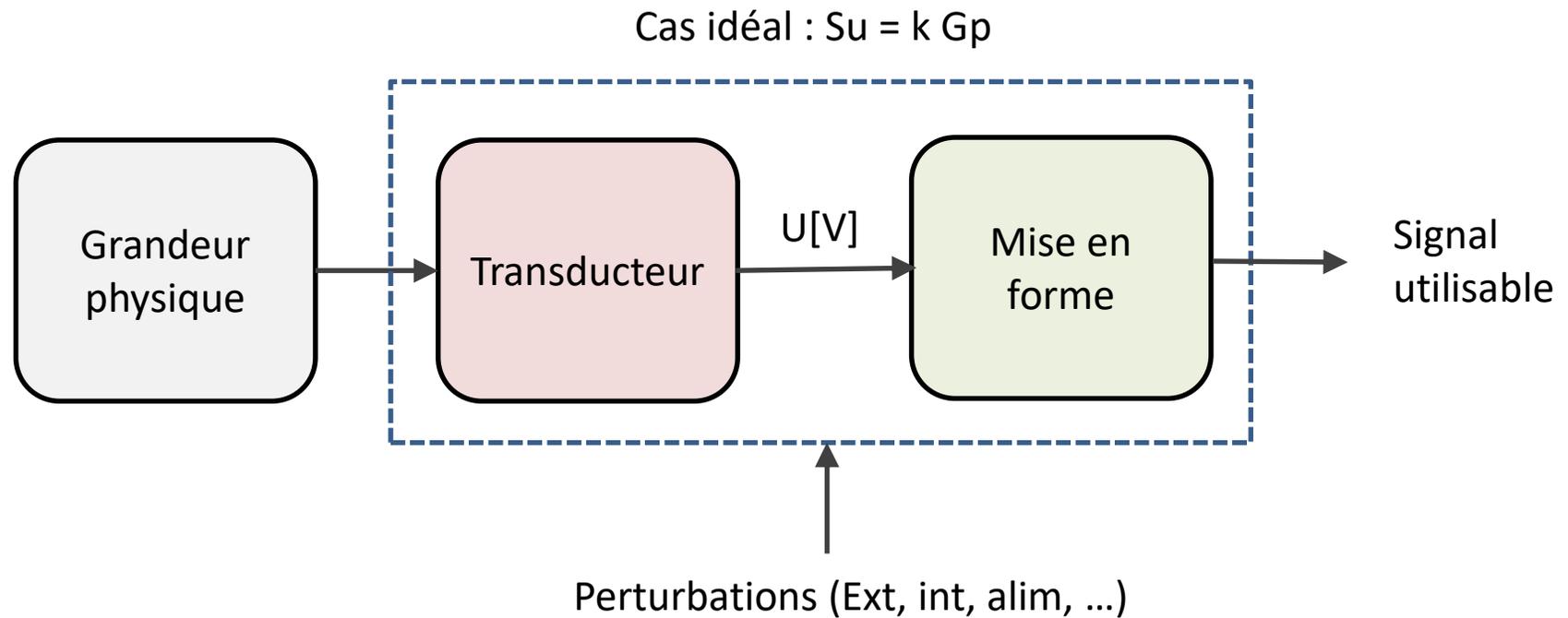
Systeme ESP (Electronic Stability Program) de voiture

Système de mesure moderne



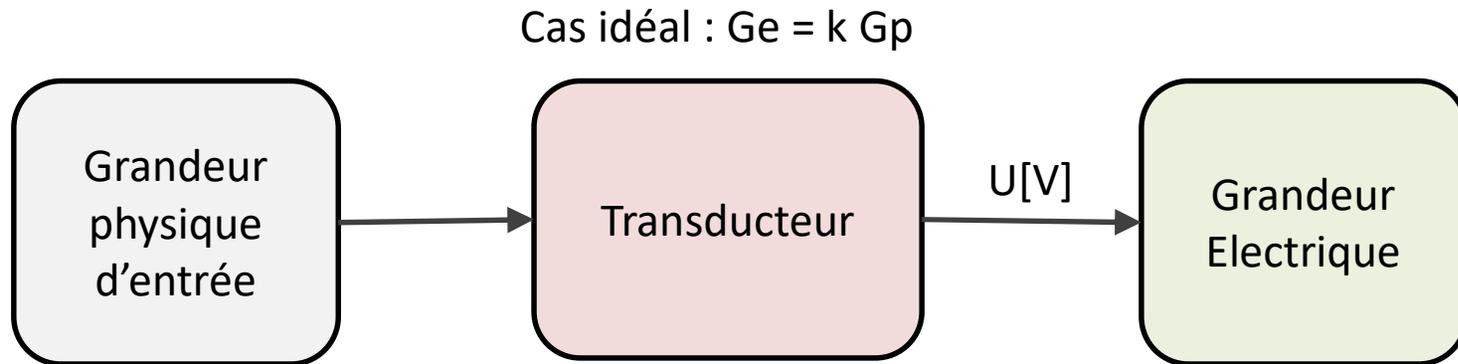
Capteur

- Dispositif qui fournit une quantité électrique utilisable en réponse à une grandeur physique à mesurer.



Transducteur

- Dispositif qui transforme une grandeur physique à mesurer en une autre grandeur physique utilisable.



$$G_e = f(G_p) + g(\text{perturbations}) + \text{bruit} + \dots$$

$$\text{Exemple : } \text{Out} = k G_e + \text{Offset} + g(T) + \text{bruit}$$

Variations de f , g , bruit, ... sur la production -> *Etalonnage*

Transducteurs

In \ Out	Mécanique	Thermique	Electrique	Magnétique	Optique
Mécanique	Gravité Pression Distance	Friction Refroidisseur	Piezoelec. Piezores. Res. Cap. Induct.	Piézomagnétisme	Photoélasticité Interférométrie
Thermique	Dilatation Thermomètre		Thermoresistance		Emission lumineuse
Electrique	Piezoelectricité	Ef. Joule Res. Ef. Peltier	R, C, L Sonde de Langmuir	Biot et Savart	Electroluminescence
Magnétique	Magnetostriction	Righi-Leduc	Induction Ef. Hall Magnetoresistivité		Ef. Faraday
Optique	Pression de rayonnement	Bolomètre	Photovoltaïque Photoconduction		

Transducteurs

Direct / Indirect

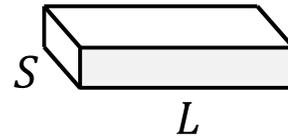
In \ Out	Mécanique	Thermique	Electrique	Magnétique	Optique
Mécanique	Gravité Pression Distance	Friction Refroidisseur	Piezoelec. Piezores.	Piézomagnétisme	Photoélasticité Interférométrie
Thermique	Dilatation Thermomètre		Thermoresistance		Emission lumineuse
Electrique	Piezoelectricité	Ef. Joule Res. Ef. Peltier	R, C, L Sonde de Langmuir	Biot et Savart	Electroluminescence
Magnétique	Magnetostriction	Righi-Leduc	Induction Ef. Hall Magnetoresitivité		Ef. Faraday
Optique	Pression de rayonnement	Bolomètre	Photovoltaïque Photoconduction		

Transducteur résistif

In \ Out	Mécanique	Thermique	Electrique	Magnétique	Optique
Mécanique	Gravité Pression Distance	Friction Refroidisseur	Piezoelec. Piezores. Res. Cap. Induct.	Piézomagnétisme	Photoélasticité Interférométrie
Thermique	Dilatation Thermomètre		Thermoresistance		Emission lumineuse
Electrique	Piezoelectricité	Ef. Joule Res. Ef. Peltier	R, C, L Sonde de Langmuir	Biot et Savart	Electroluminescence
Magnétique	Magnétostriction	Righi-Leduc	Induction Ef. Hall Magnetoresitivité		Ef. Faraday
Optique	Pression de rayonnement	Bolomètre	Photovoltaïque Photoconduction		

Transducteur résistif

$$R = \rho \frac{L}{S}$$



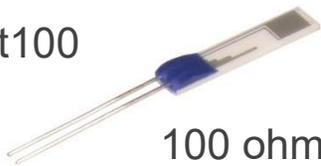
résistivité ρ

Thermorésistif

PTC, NTC, RTC

$$\rho(T) = \rho_0(1 + AT + BT^2 \dots)$$

Pt100



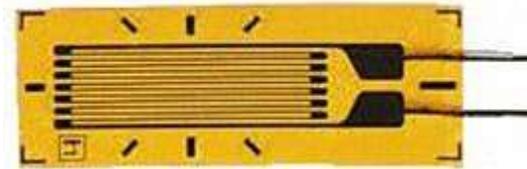
100 ohm @ 0°C



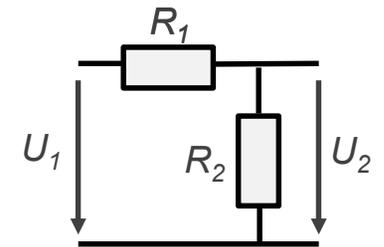
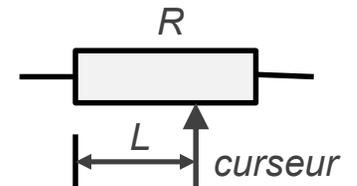
Piézorésistif

$$L/S(\sigma) \text{ ou } \rho(\sigma)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \frac{\Delta L}{L_0}$$



Potentiomètre

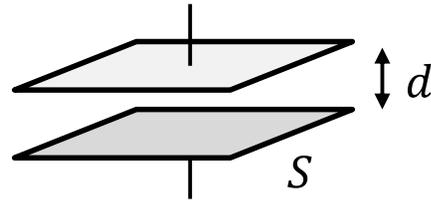


$$U_2 = U_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Transducteur capacitif

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

MEF : Fréquentielle



ϵ_0 constante diélectrique

- Δd très précis : micro, MEMS, ...

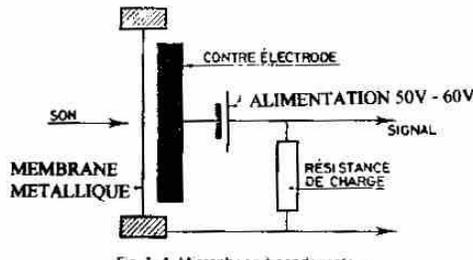
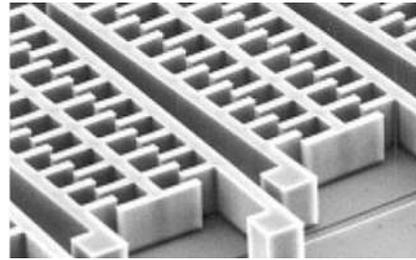
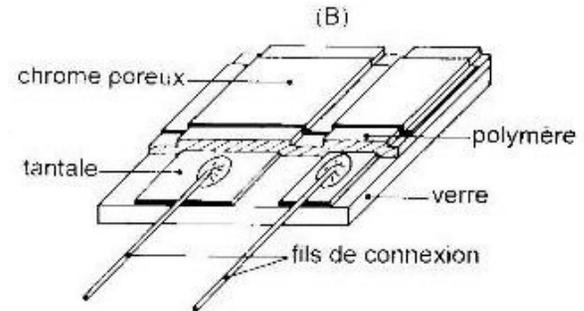


Fig. 1. 4. Microphone à condensateur.



- $\Delta \epsilon_0$ Capteur d'humidité

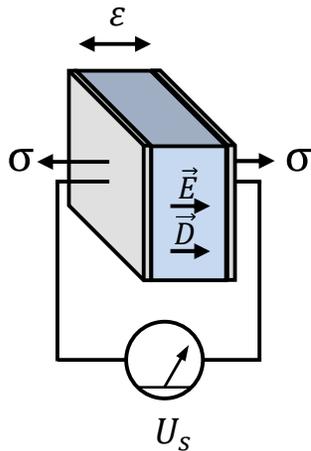


- ΔS grands déplacements

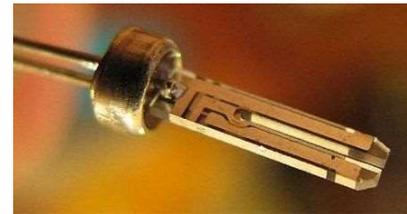


Transducteurs piézoélectrique

$$U_s = f(\varepsilon, \sigma)$$



Capteur de vibration, force, ...



Capteur à variation de fréquence de résonance d'un quartz

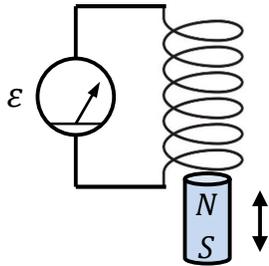
Transducteurs Mag-Elec

In \ Out	Mécanique	Thermique	Electrique	Magnétique	Optique
Mécanique	Gravité Pression Distance	Friction Refroidisseur	Piezoelec. Piezores. Res. Cap. Induct.	Piézomagnétisme	Photoélasticité Interférométrie
Thermique	Dilatation Thermomètre		Thermoresistance		Emission lumineuse
Electrique	Piezoelectricité	Ef. Joule Res. Ef. Peltier	R, C, L Sonde de Langmuir	Biot et Savart	Electroluminescence
Magnétique	Magnetostriction	Righi-Leduc	Induction Ef. Hall Magnetoresitivité		Ef. Faraday
Optique	Pression de rayonnement	Bolomètre	Photovoltaïque Photoconduction		

Transducteur magnétique

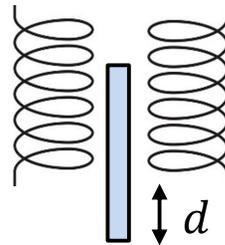
Induction

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}$$



Inductance

$$\tilde{U}_2 = \tilde{U}_1 \frac{d_0 - d}{d_0}$$



Effet Hall

$$U_s = \alpha \vec{H} I_0$$

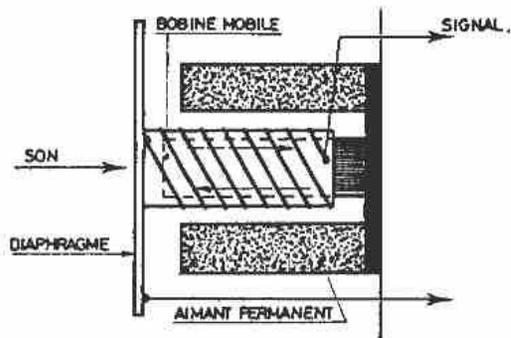
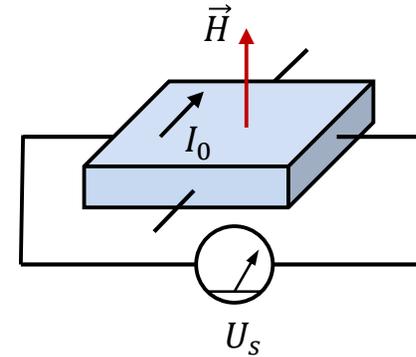
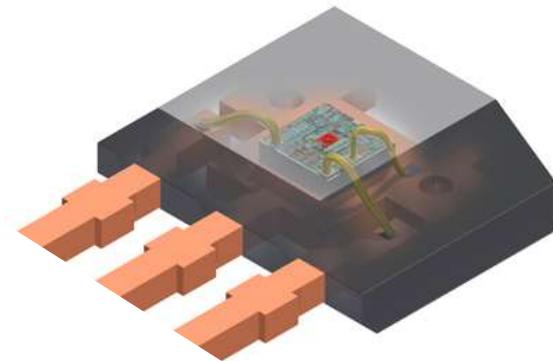


Fig. 1.2. Microphone dynamique à bobine mobile.

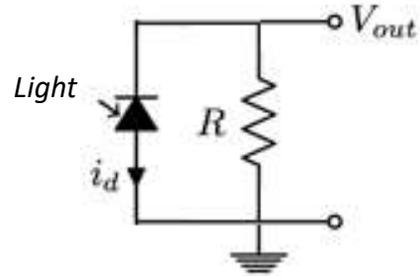


Transducteurs Mag-Opto

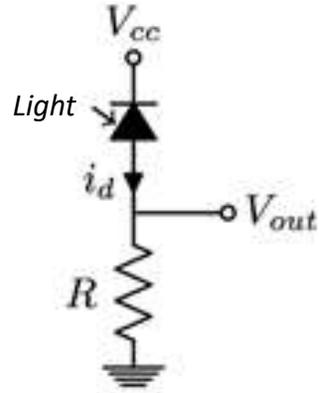
In \ Out	Mécanique	Thermique	Electrique	Magnétique	Optique
Mécanique	Gravité Pression Distance	Friction Refroidisseur	Piezoelec. Piezores. Res. Cap. Induct.	Piézomagnétisme	Photoélasticité Interférométrie
Thermique	Dilatation Thermomètre		Thermoresistance		Emission lumineuse
Electrique	Piezoelectricité	Ef. Joule Res. Ef. Peltier	R, C, L Sonde de Langmuir	Biot et Savart	Electroluminescence
Magnétique	Magnetostriction	Righi-Leduc	Induction Ef. Hall Magnetoresitivité		Ef. Faraday
Optique	Pression de rayonnement	Bolomètre	Photovoltaïque Photoconduction		

Transducteurs optiques

photovoltaic

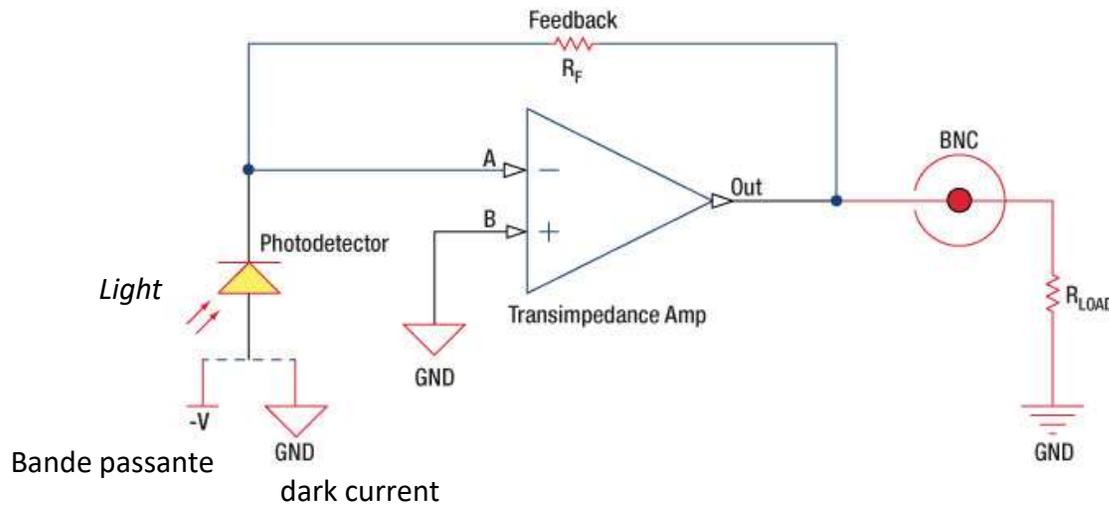
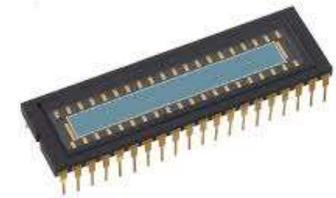
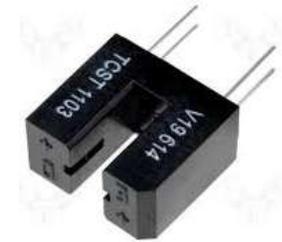


Photoconductif



$$i_d = \alpha P_\gamma$$

$$V_{out} = R i_d$$



Transducteur Output

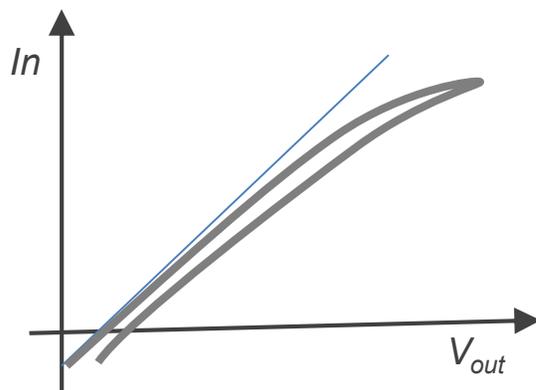
Sensibilité et offset : fonction de transfert

Linéarité

Hystérèse

Signal / Bruit

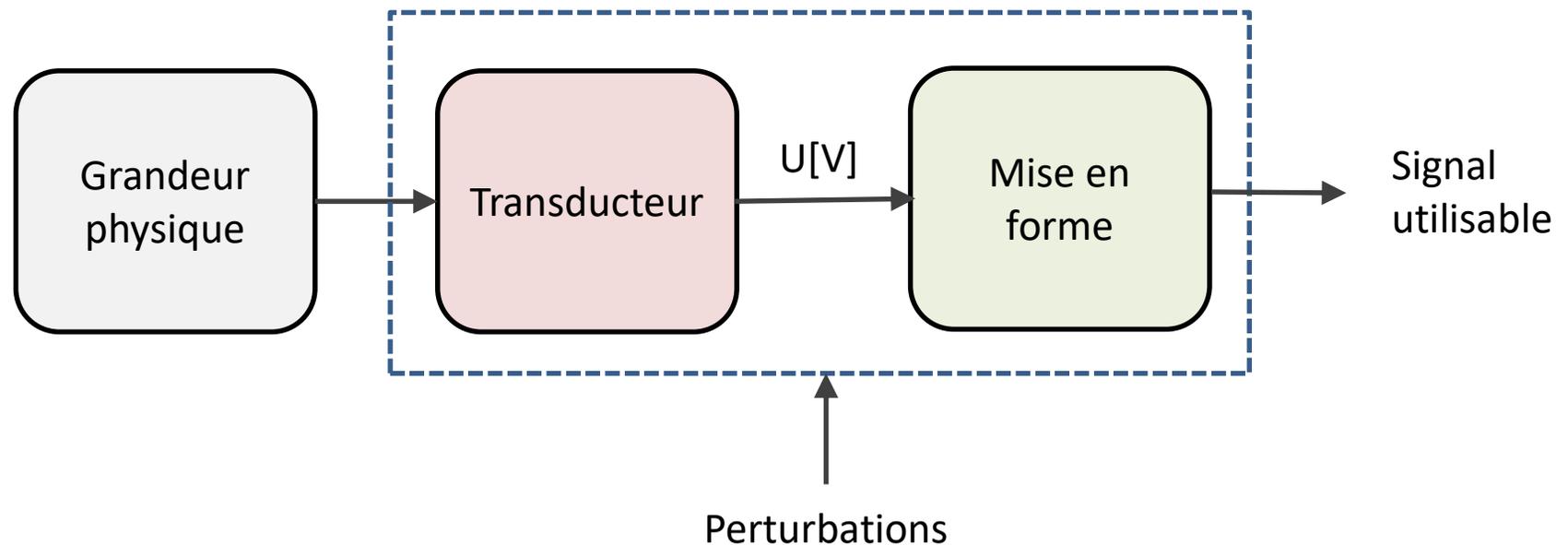
Sensibilité à d'autres grandeurs physiques (Température...)



Mise en forme du signal

Capteur

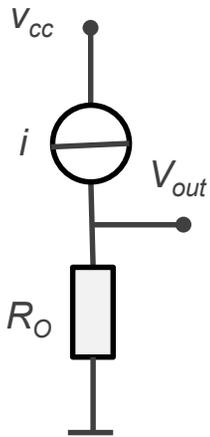
- Dispositif qui fournit une quantité électrique utilisable en réponse à une grandeur physique à mesurer.



Mise en forme du signal

Polarisation

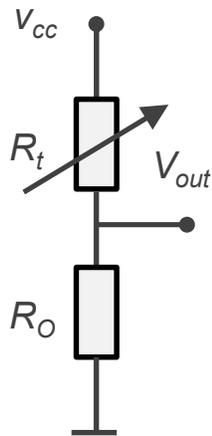
$i \rightarrow U$



$$V_{out} = R_0 i$$

$R_0 \rightarrow$ bruit

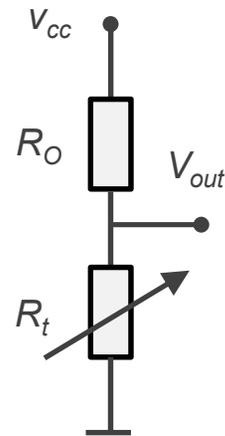
$R \rightarrow U$



$$V_{out} = V_{cc} \frac{R_0}{R_t + R_0}$$

$V_{cc} \rightarrow 0$

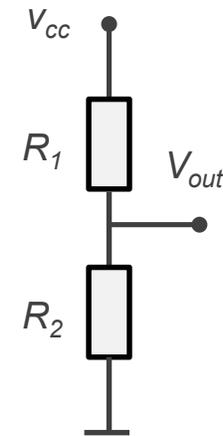
$R \rightarrow U$



$$V_{out} = V_{cc} \frac{R_t}{R_t + R_0}$$

$0 \rightarrow V_{cc}$

$U \rightarrow U$



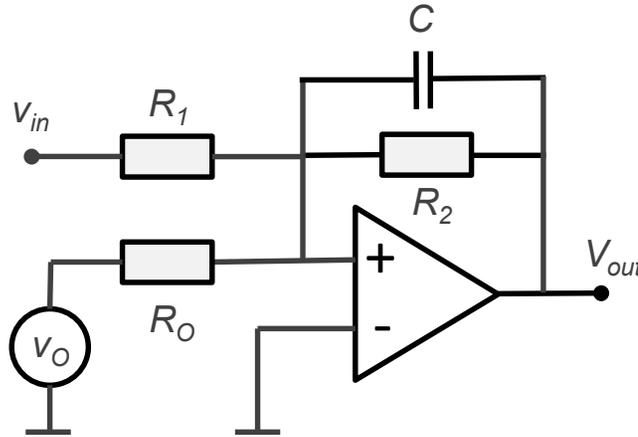
$$V_{out} = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

échelle

Mise en forme du signal

Amplification (exemple)

- Gamme
- Impédances
- Filtrage
- Offset



$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_2}{R_1} - V_0 \frac{R_2}{R_0}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

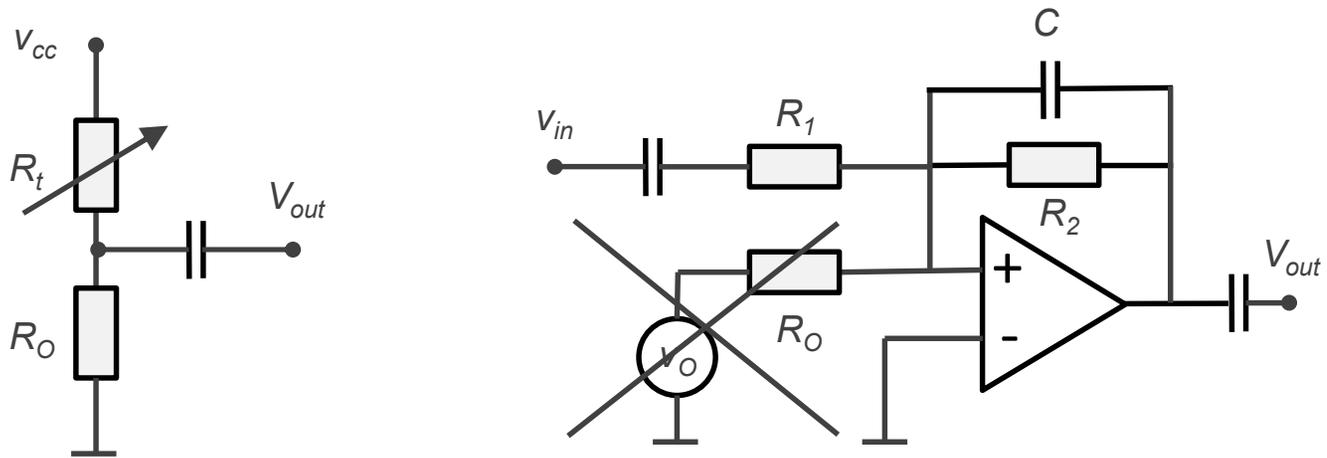
Infinité de variantes et cascades

Alim dual ou single supply...

Attention à la variation des composants

Mise en forme du signal

Découplage (exemples)



Pour avoir des signaux sans composante DC

Annule l'offset

Alimentation Single supply...

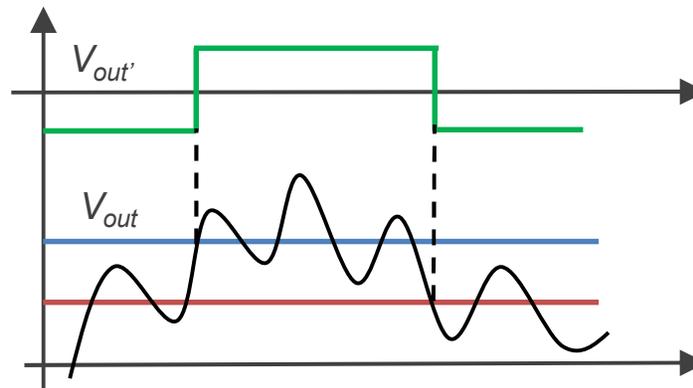
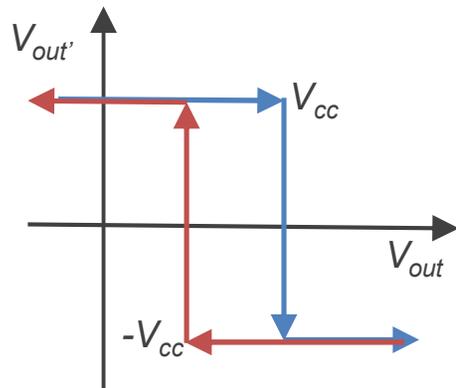
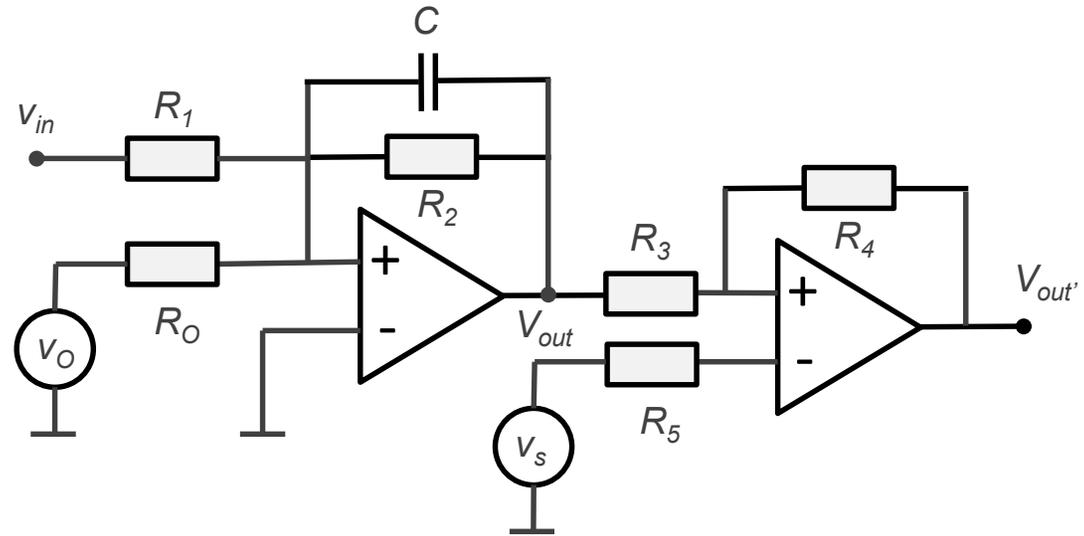
Attention à la bande passante

Mise en forme du signal

Détection et hystérèse (exemple)

Anti-rebond

Filtrage

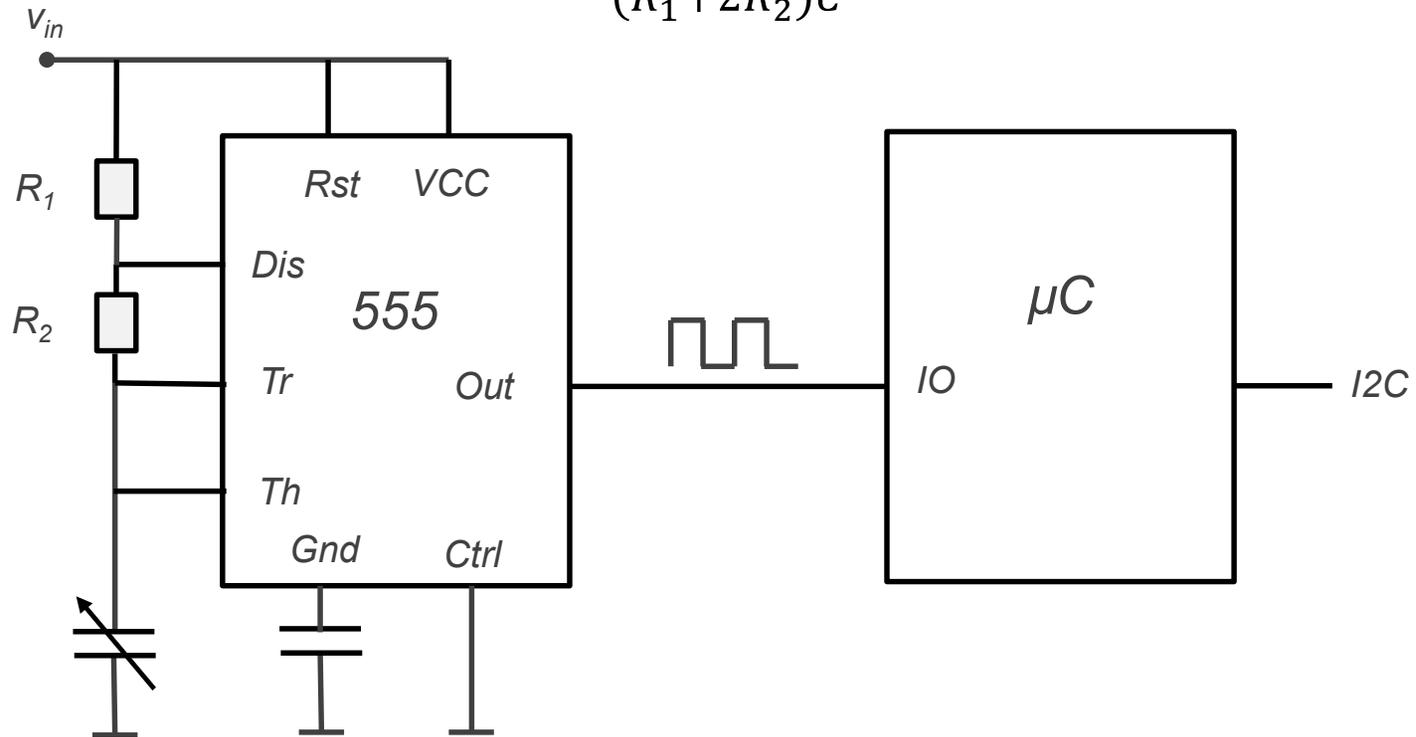


Mise en forme du signal

Avec système oscillant

Capteur de distance, proximité, touch,...

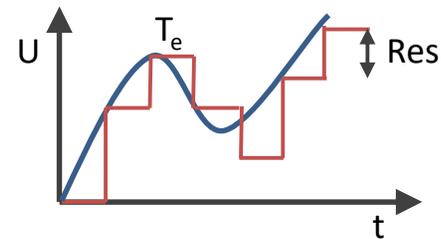
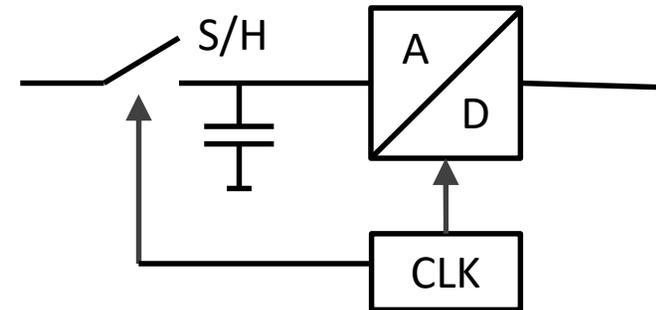
$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C}$$



Numérisation - ADC

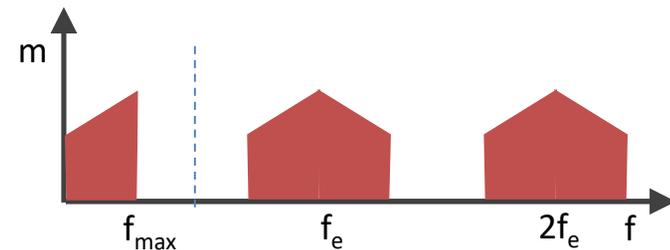
Echantillonnage : S/H

- $f_e > 2 f_{\max}$ (Shannon)
- Filtre anti-repliement
- Bruit (propagation)



Conversion AD

- Résolution = Echelle / N
- Quantification
- Bruit



Spec & Output

Répétabilité : variation de mesures identiques

Exactitude : écart moyen avec la valeur idéale

Résolution : plus petit incrément mesurable

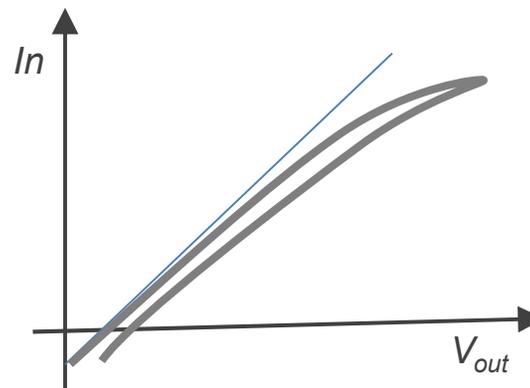
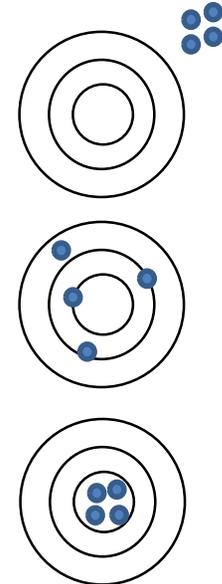
Précision = répétabilité + justesse

Sensibilité et offset : fonction de transfert

Linéarité, hystérèse

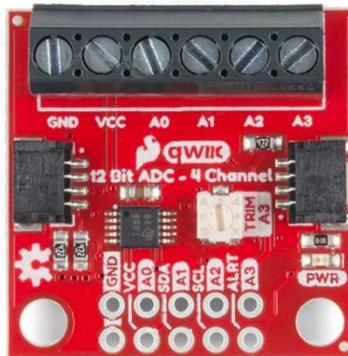
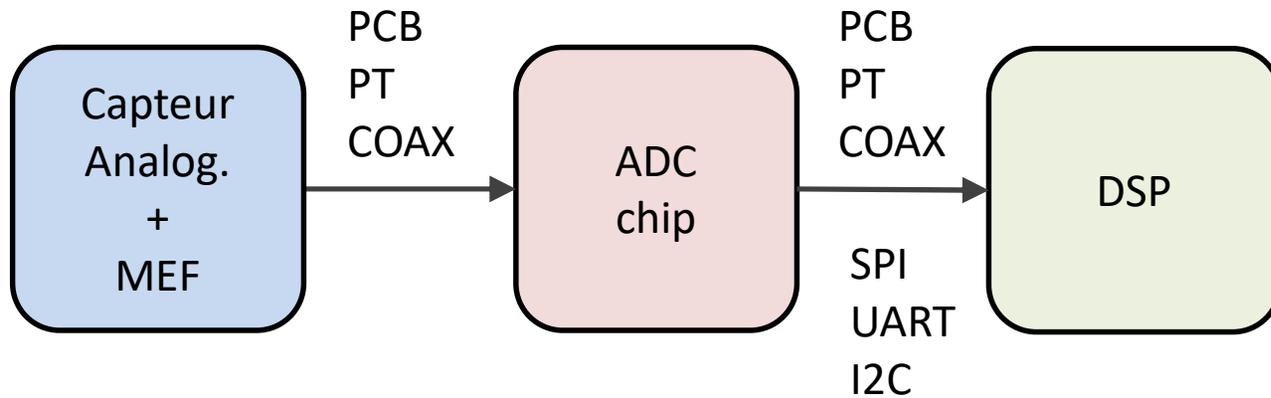
Pleine échelle

Signal / Bruit



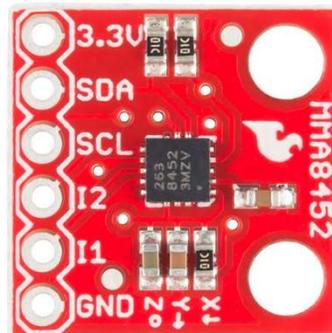
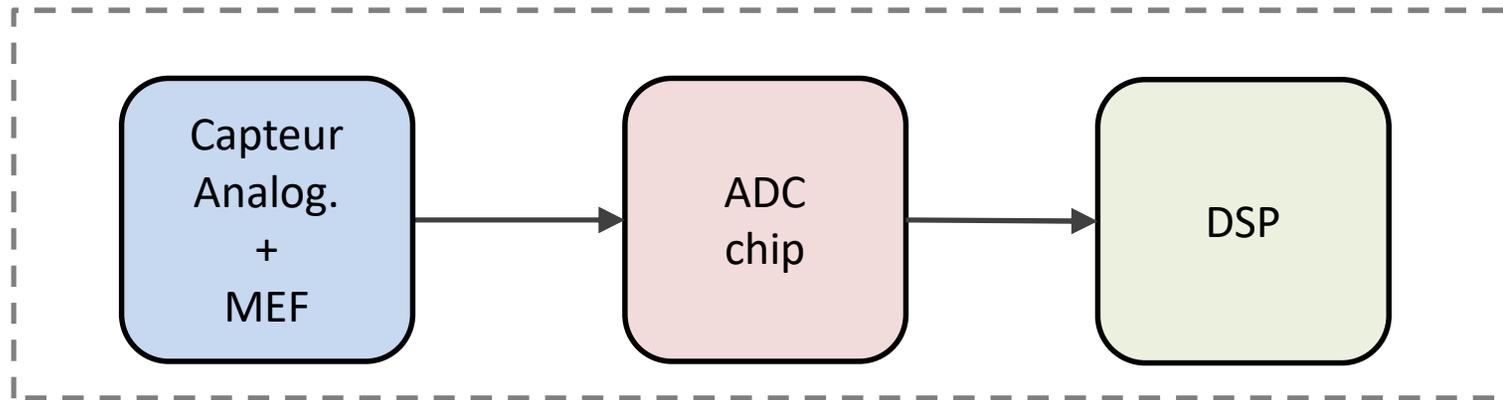
Numérisation

- Aujourd'hui rares sont les application sans interface numérique.



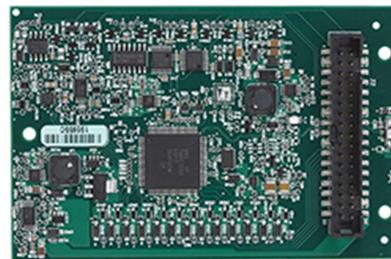
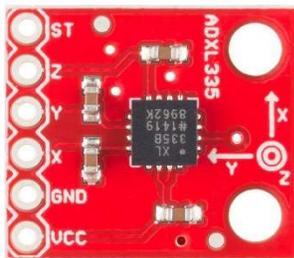
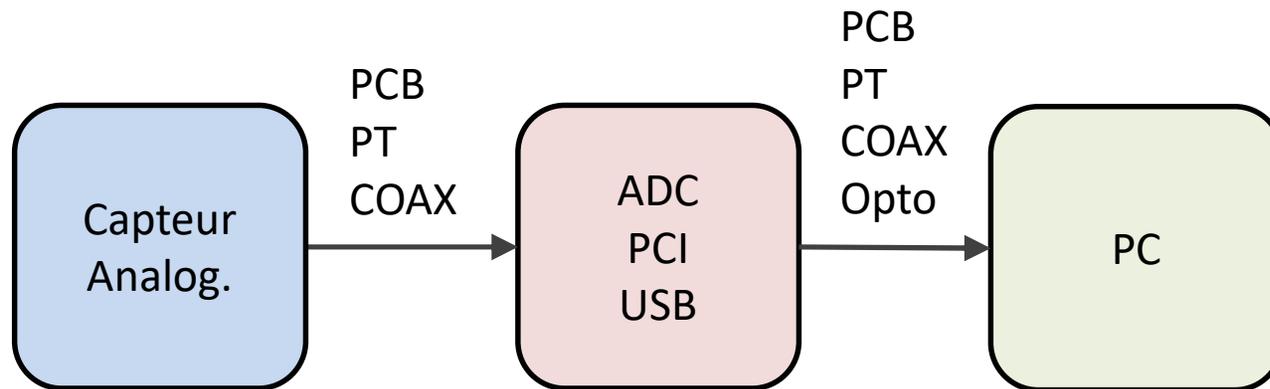
Numérisation intégrée

- Aujourd'hui rares sont les application sans interface numérique.



Numérisation PC

- Aujourd'hui rares sont les application sans interface numérique.

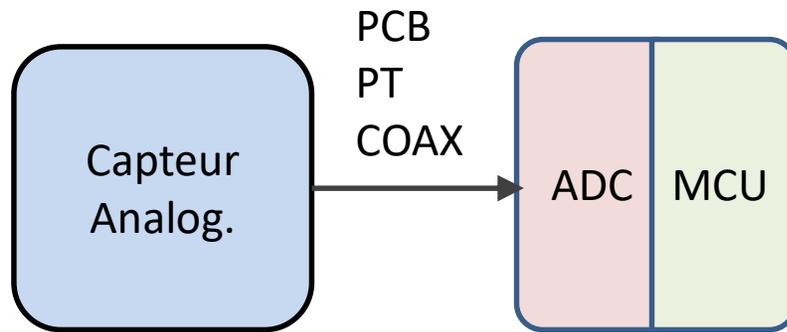


NI 6003 USB

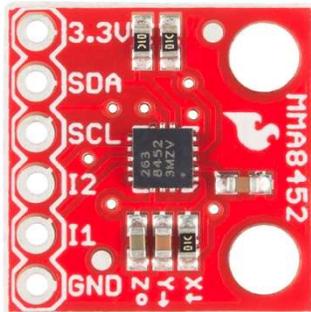


Numérisation MCU

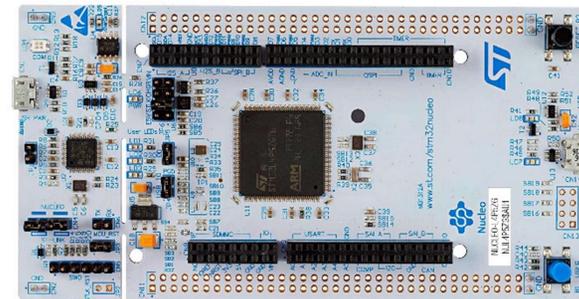
- Aujourd'hui rares sont les application sans interface numérique.



Raspberry

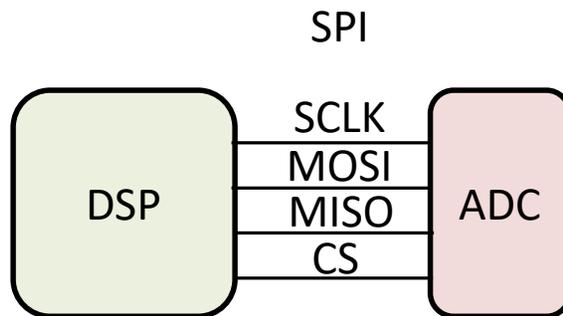
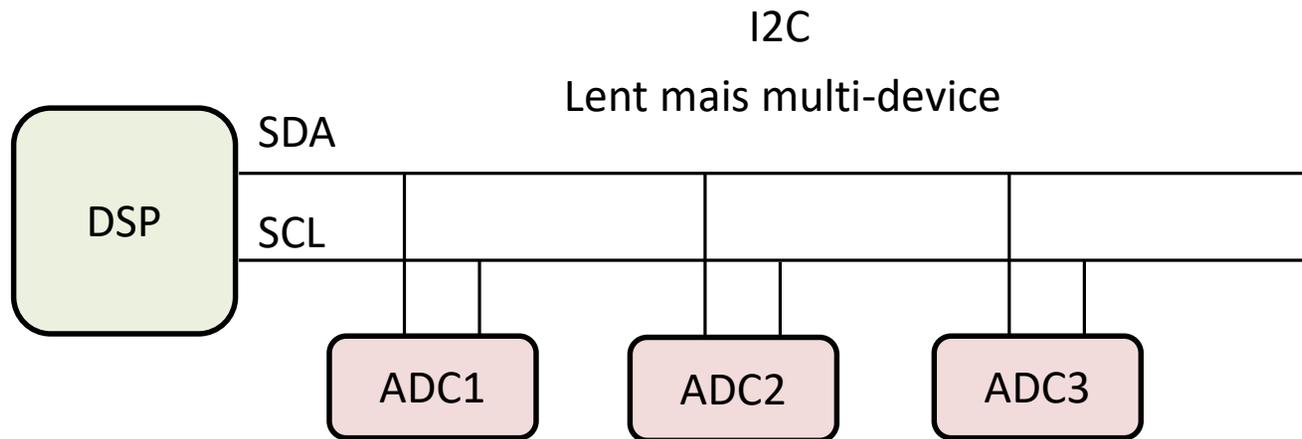


Arduino...

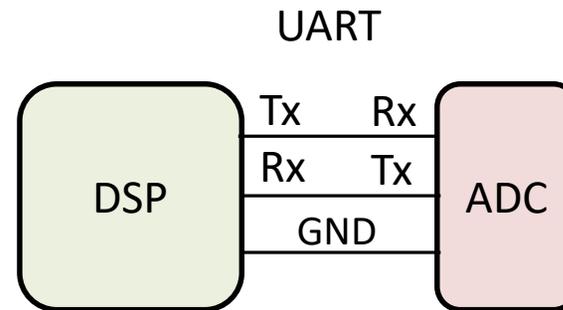


STM32...

Protocoles Numériques



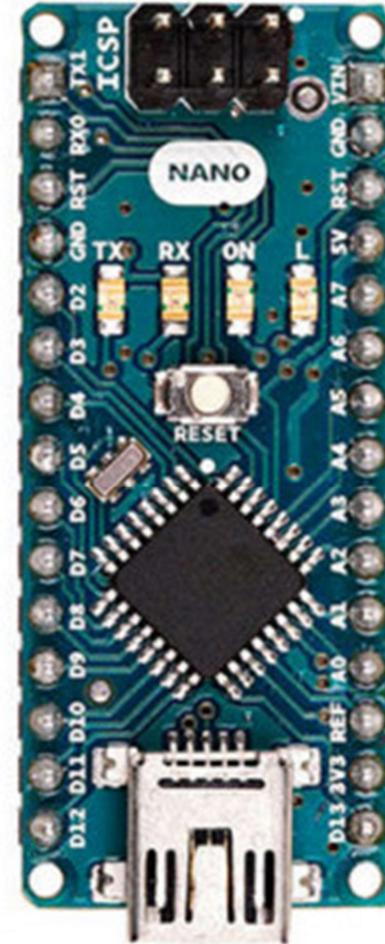
Rapide



Lent mais pratique

Interfaçage numérique - checklist

- Choix du format de sortie : USB, SPI ,.....
- Impédance d'entrée, pull down
- Pleine échelle, résolution
- Offset
- Bruits
- Fréquence d'échantillonnage
- Précision des quartz
- Compensation : température ou autre
- Etalonnage



Algorithmes

Fonctions mathématiques, tables de calculs

Filtrages, compensation

Multi capteurs, multiphysiques

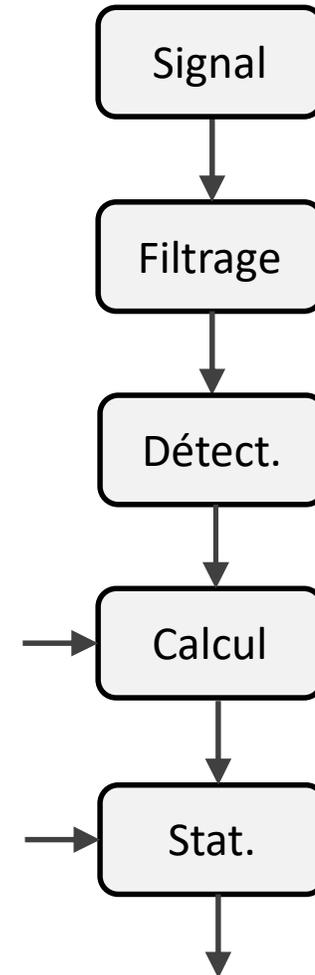
Analyses, décisions, régulation

Etalonnage automatique

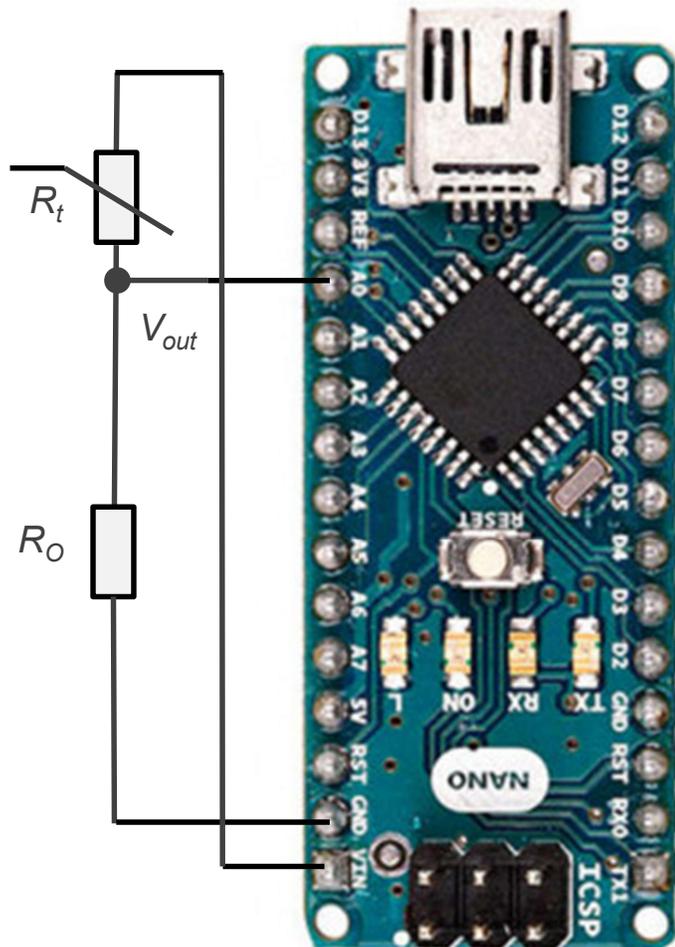
Stockage datas, interfaçage ext.

MAJ firmware rapide

Limitations temporelles et fréquentielles



Exemple : Capteur de température



Thermistor MF52-3950		NTC
Vin [V]	3.3	
R0 [ohm]	10000	
beta	3950	
Temp[°C]	Rt [kOhm]	Vout [V]
-30	182	0.1719
0	39	0.6735
30	13	1.4348
60	3	2.5385
90	1	3.0000
110	0.5	3.1429

Pleine échelle
Atmega 328 ?

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \frac{R_t}{R_0}$$

$$V_{out} = V_{cc} \frac{R_0}{R_t + R_0}$$

$$R_t = (V_{cc} - V_{out}) \frac{R_0}{U_0}$$

Exemple : Capteur de température

```
int a;  
float temperature;  
int B=3975;  
float resTherm;  
  
void setup() { Serial.begin(9600); }  
  
void loop() {  
  a=analogRead(0);  
  resTherm=(float) (1023-a) *10000/a;  
  temperature=1/ (log(resTherm/10000) /B+1/298.15) -273.15;  
  Serial.print(temperature);  
  Serial.write(186);  
  Serial.println("C ");  
  delay(1000); }  

```

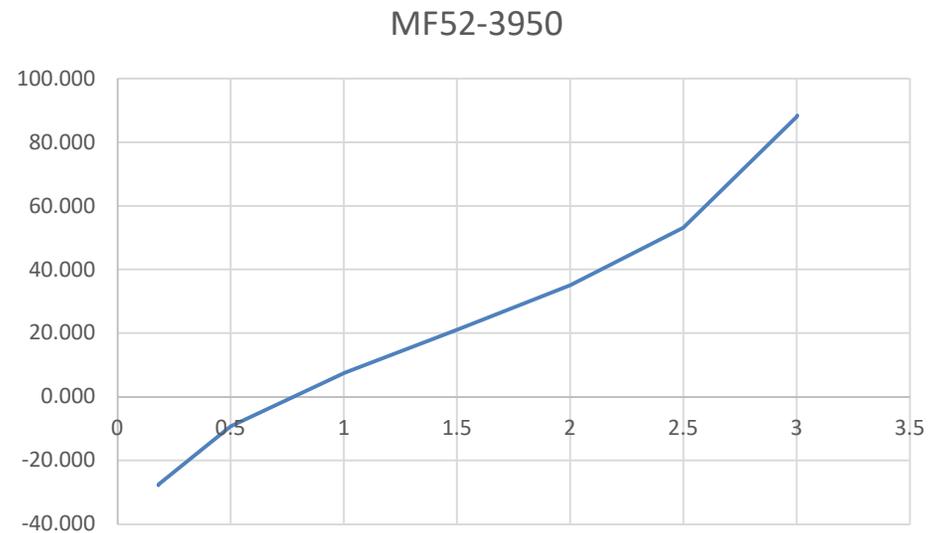
Vout [V]	Vout [ADC]	Rt[Ohm]	temp [°C]
0.18	56	173154	-27.7593991
1.65	512	9980	25.0439596
2.42	751	3623	49.7186456
3.02	937	916	90.5448351

Résolution :

3.3V / 1024 (ADC 10bits)

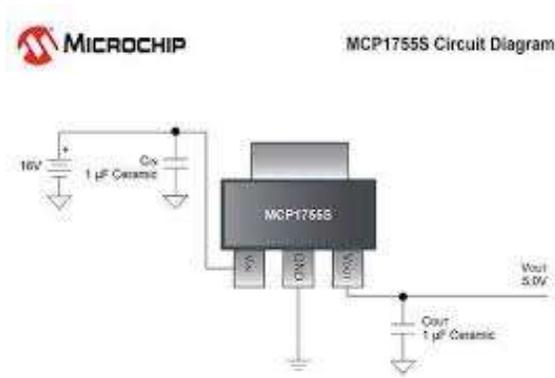
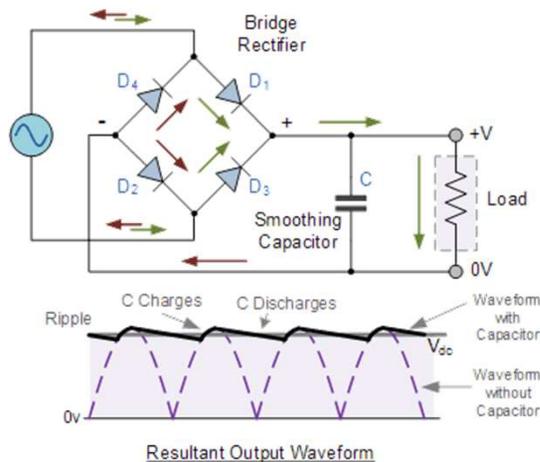
= 3.2 mv = 0.1 °C à 0.3 °C

Gamme / Résolution ?



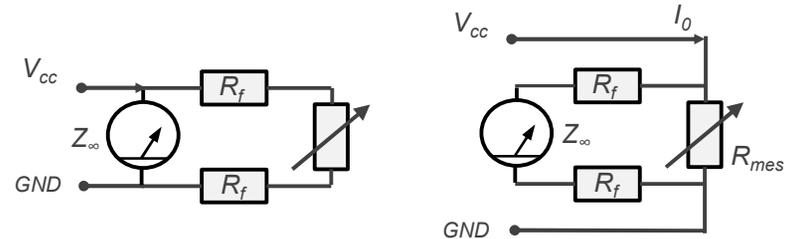
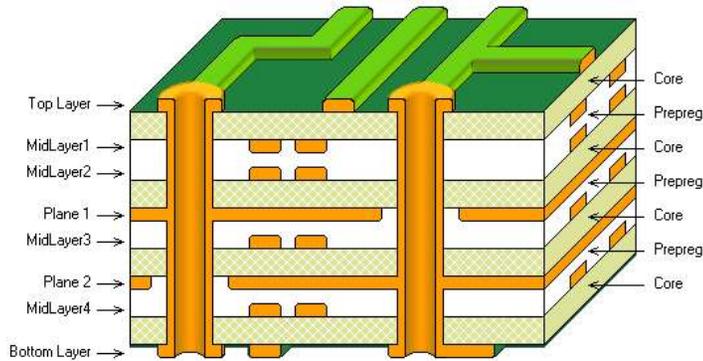
Alimentation

- Critères : Précision, stabilité, bruit, rendement, chaleur, courant max
- Alimentation transducteur : polarisation, sinus, autogénéré...
- Alimentation amplificateurs : Dual, single, rail to rail...
- Linéaires, découpage : Transfo, AC/DC, DC/DC, LDO, Référence.
- Ground, alimentations flottante, bruit ...



Connection

- Branchement à 2 ou 4 fils, pont, ...
- Blindage, protections, CEM, ...
- PCB : Pistes, Plans, couches, ...



Input Configuration	Signal Source Type	
	Floating Signal Source (Not Connected to Building Ground)	Grounded Signal Source
	Examples <ul style="list-style-type: none"> • Thermocouples • Signal Conditioning with Isolated Outputs • Battery Devices 	Examples <ul style="list-style-type: none"> • Plug-in Instruments with Nonisolated Inputs
Differential (DIFF)	<p>Two resistors ($10\text{ k}\Omega < R < 100\text{ k}\Omega$) provide return paths to ground for bias currents</p>	
Single-Ended - Ground Referenced (RSE)		<p>NOT RECOMMENDED</p> <p>Ground-loop losses, V_g, are added to measured signal.</p>
Single-Ended - Nonreferenced (NRSE)		

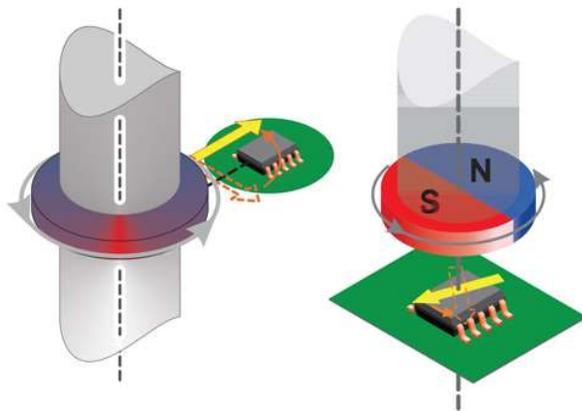
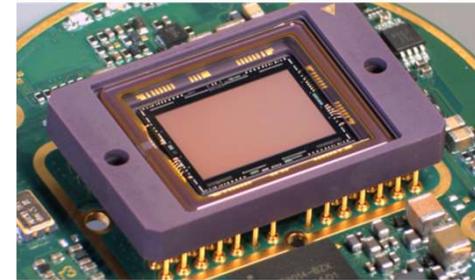
Transduction multiple/indirecte

- Plusieurs transducteurs :

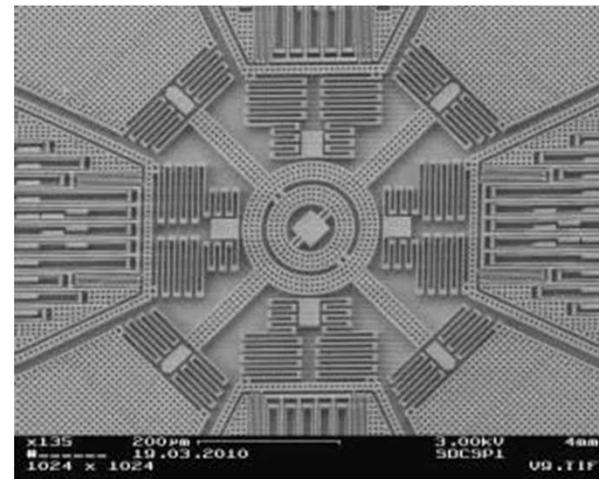
3D, Réseau, compensation (thermique), multiphysique

- Grandeurs physiques indirectes :

Angle, inclinaison, vitesse, distance, ...



Magnetomètre 3D (Allegro)



3D Gyroscope & Accéléromètre (Variense)

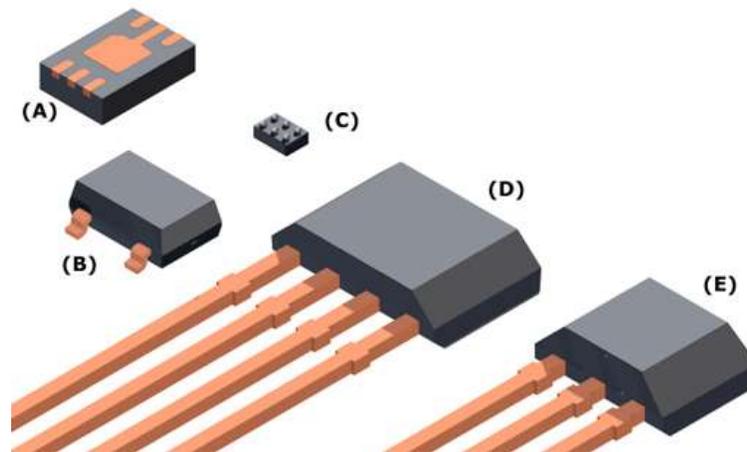
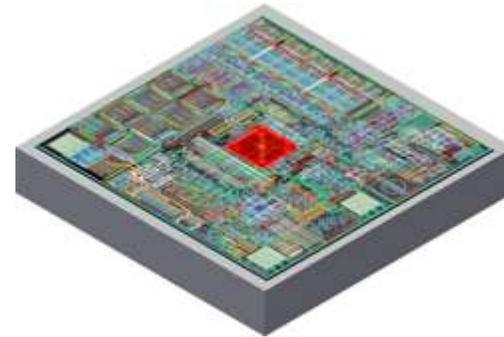
Capteur intégré

Dimension

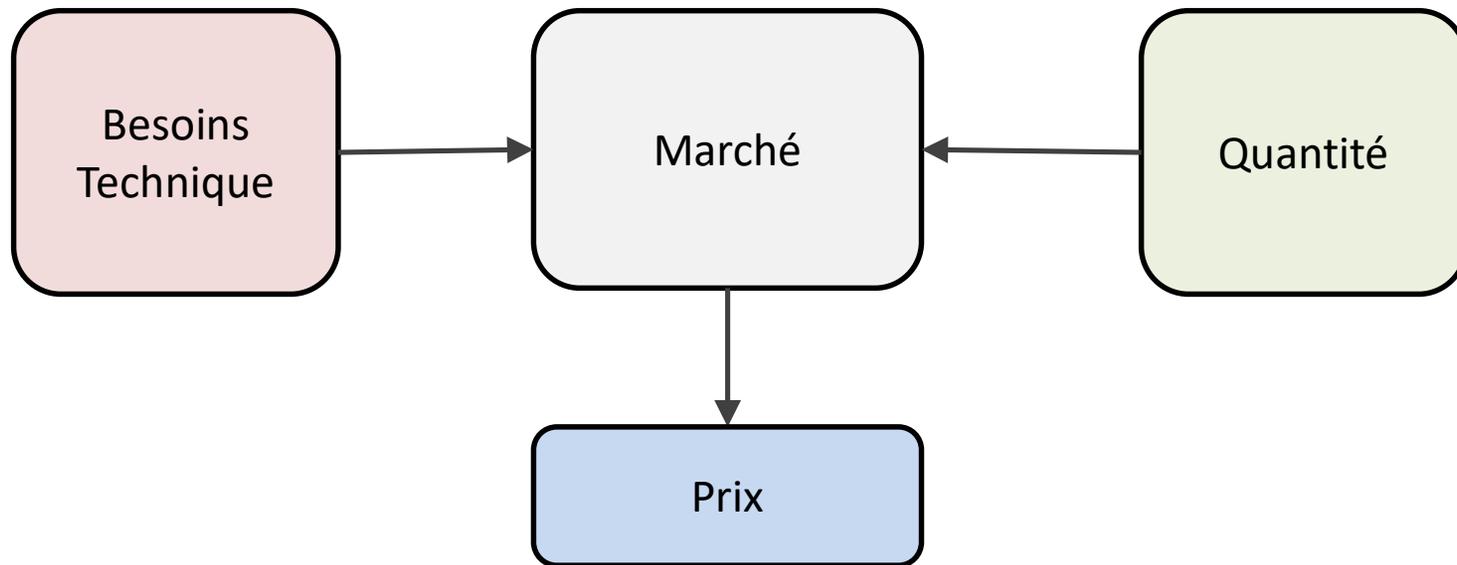
Performances

Précision et Bruit

Prix



Prix



- Le capteur le plus chers n'est pas forcément le meilleur !!!!
- Etalonnage...

Capteur- Choix



- Choix/construction avec le plus grand soin.
- Limite les performances de l'étage suivant de la chaine de mesure.
- Limite les performances du système entier.
- Etude des caractéristique connues (datasheet).
- Validation et caractérisation avec banc de test !!!!!

Evolution

L'univers des capteurs est très vaste.

Couvre toutes des disciplines de l'ingénierie.

En constante évolution :

- Nouvelles technologies
- Intégrations
- Miniaturisation
- Multiplication



Sources

- P-A Paratte et P. Robert, Systèmes de Mesure, PPUR 1996.
- G. Gremaud et R. Schaller, Introduction à la métrologie, EPFL 1995.
- W. Göpel, J. Hesse, J.N. Zemel, Sensors A comprehensive Survey, T. Grandke, W.H.ko, VCH Verlags-AG, 1989.
- H.K.P. Neubert, Instrument Transducers, Clarendon Press, Oxford, 1975.
- <https://www.ni.com/fr-ch/support/documentation/...>
- <https://www.electronics-tutorials.ws/>
- www.allegromicro.com
- www.thorlabs.com
- www.arduino.cc
- www.adafruit.com
- www.sparkfun.com
- www.altium.com
- www.wikipedia.org