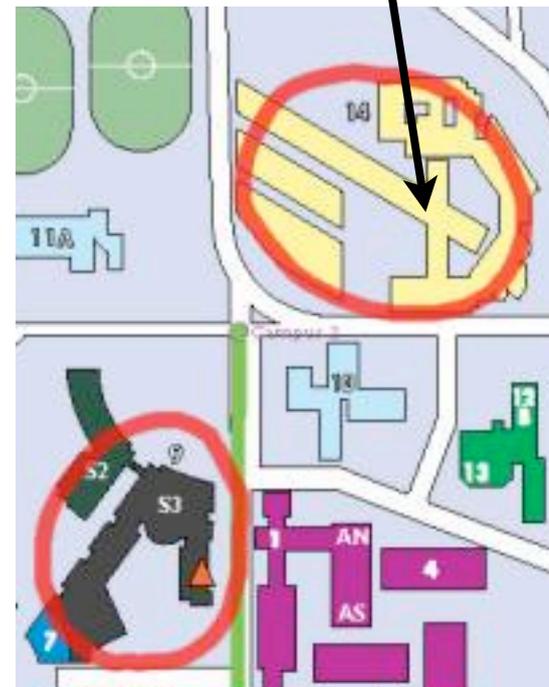


IUT génie chimique, génie chimique. Capteur

Jean-Marc Routoure. 2010-2011

Coordonnées

- Professeur à l'université de Caen Basse-Normandie
- Recherche au GREYC, équipe électronique : “bruit basse fréquence de composants électroniques actifs et passifs”
- routoure@greyc.ensicaen.fr
- <http://www.greyc.ensicaen.fr/~routoure/>



But du cours

- Etre capable de choisir un capteur adapté à un procédé de fabrication => connaissance des capteurs et lecture des fiches capteurs des fabricants
- Etre capable de lire un résultat de mesure et d'éventuellement le critiquer (métrologie !)
résultat juste ? résolution suffisante ?
reproductibilité de la mesure ?

Plan du cours

- I. Introduction
- II. Généralités et définitions : définition, mesurandes, chaine d'acquisition, capteurs actifs, capteurs passifs, transmetteurs, conditionneurs. Caractéristiques du capteur : étendue de mesure, temps de réponse, domaine de détérioration (ect ...), fidélité, justesse, précision
- III. Capteurs de températures : CTN, CTP, Pt100, thermocouple, capteurs SC intégrés
- VI. Capteurs de Niveau
- V. Capteurs de Débit (et masse volumique)
- VI. Capteurs de Pression
- VII. Autres capteurs notamment électrochimiques comme les sondes de pH
- VIII. Environnement du capteurs par ex zone ATEX

I. Introduction

I.1 Les capteurs en génie chimique, génie des procédés

Où est le capteur dans le procédé ?

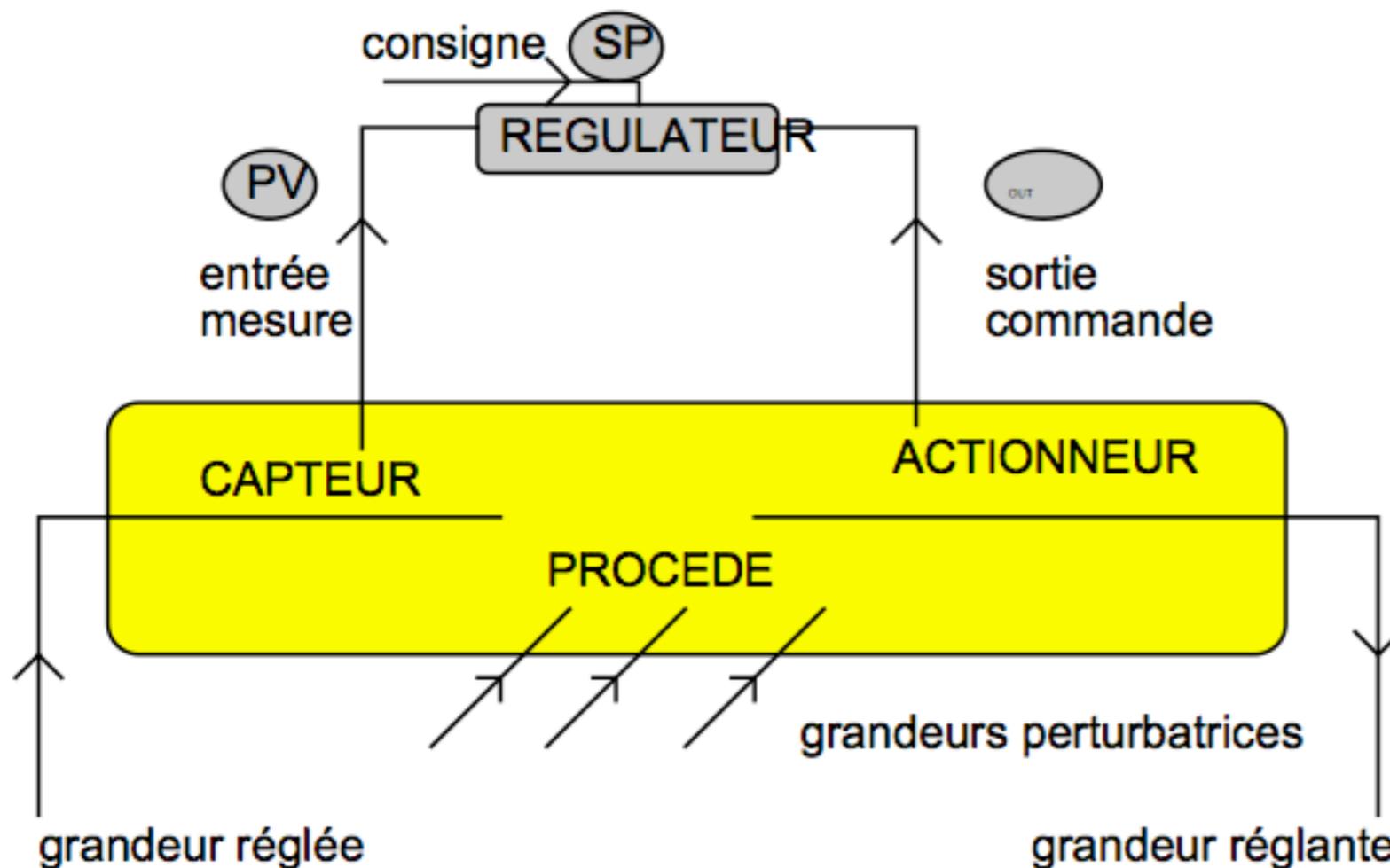


ref : <http://genie-procedes.univ-cezanne.fr>



ref : <http://missiontice.ac-besancon.fr/>

Où est le capteur dans le procédé ?



ref : <http://www.educnet.education.fr/>

Le capteur est l'élément sensible dans la boucle de régulation. Il permet de contrôler le procédé et de s'assurer de la conformité de réalisation du produit.

Un exemple pour un système pédagogique



T3
T4
T5

INSTRUMENTATION

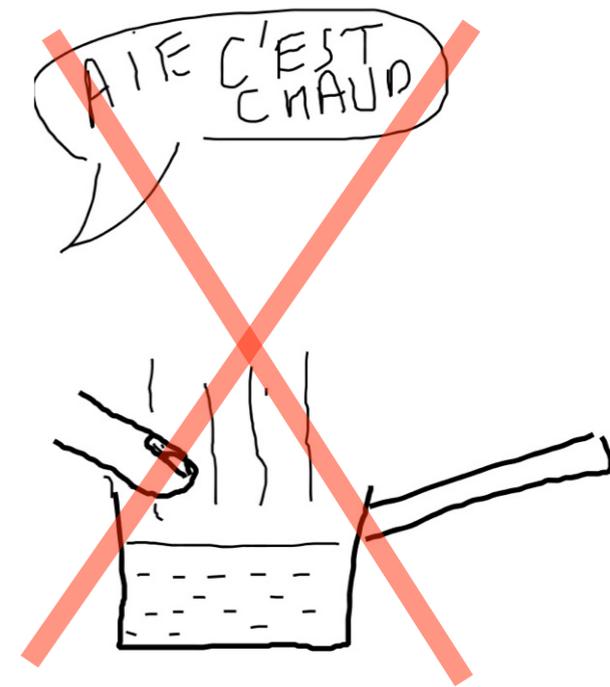
Manomètre de Bourdon en sortie de condenseur forane
Manomètre de Bourdon en entrée d'évaporateur forane
Transmetteur de pression absolue pour régulation du vide
Sonde de température en sortie de compresseur forane
Sonde température en sortie de condenseur forane
Sonde de température en entrée d'évaporateur forane
Sonde de température en sortie d'évaporateur forane
Sonde de température en sortie bouilleur (procédé)

ref <http://www.didatec-technologie.com/g>

Révision A

En conclusion sur les capteurs dans le génie des procédés

- La conduite d'une opération chimique ou physico-chimique implique la connaissance et la maîtrise de certains paramètres tels que la pression, la température, le débit..
- Il faut effectuer des mesures pour obtenir la connaissance de ces grandeurs. Ces mesures sont nécessairement obtenues par des appareillages et elles permettent de quantifier, de comparer, de dupliquer et d'enregistrer.
- Le capteur s'inscrit ou non dans une chaîne de régulation



Le rôle plus exact du capteur

- un capteur est l'élément d'un appareil de mesure servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer. Il consiste en le premier maillon d'un chaîne de mesure.
- Il a pour rôle de saisir et transformer la grandeur physique à mesurer (le mesurande) en une autre grandeur physique accessible au sens humain ou aux maillons suivants de la chaîne de mesure (généralement une grandeur électrique dans ce cas)

Plus généralement sur la mesure

- Mesurer : c'est compter ; c'est comparer en utilisant une référence : le système international d'unités
- La mesure est une science : la métrologie, la science de la mesure
- La mesure accroît la connaissance
- La mesure régit les transactions
- La mesure permet l'innovation et la compétitivité des industries

1.2 Présentation de la chaîne de mesure

Les éléments de la chaîne de mesure

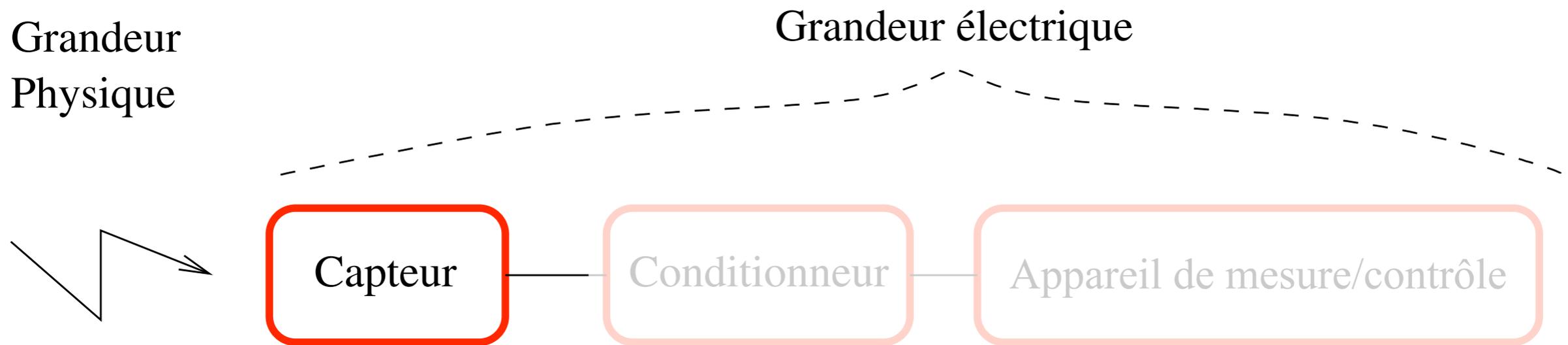
Grandeur
Physique

Grandeur électrique



- Capteur : Conversion d'une grandeur physique -> grandeur électrique
- Conditionneur : grandeur électrique directement exploitable par l'appareil de mesure/contrôle
- Appareil de mesure/contrôle : lecture du résultat ou visualisation binaire
- l'ensemble "capteur + conditionneur" est souvent appelé capteur par abus de langage.

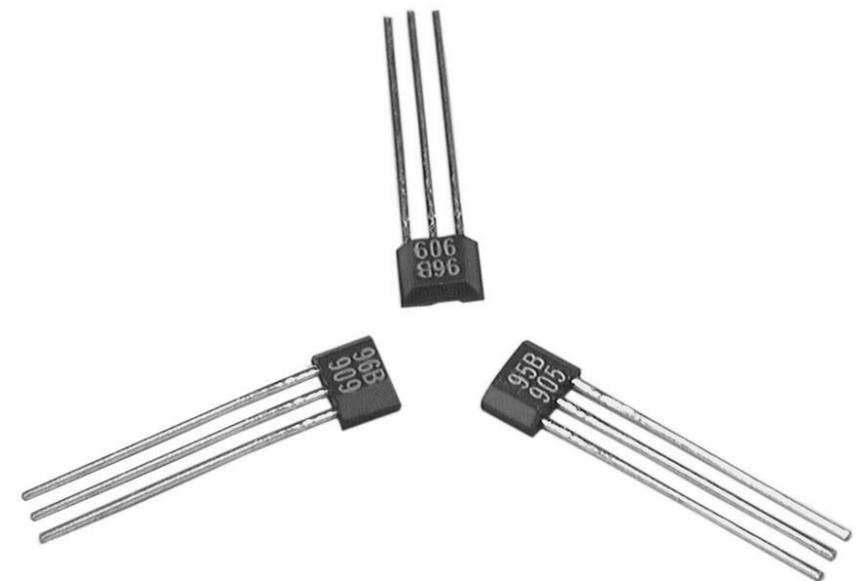
Les éléments de la chaîne de mesure



Exemple : mesure d'un champ magnétique

Utilisation d'un capteur commercial :

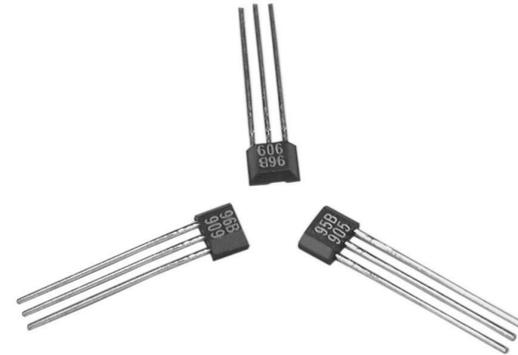
- Basé sur un effet physique : l'effet Hall
- Intégration sur un même support de l'élément sensible et du traitement analogique du signal



Solid State Hall Effect Sensors

High Performance Miniature Ratiometric Linear

SS490 Series



The SS490 Series MRL (Miniature Ratiometric Linear) sensors are small, versatile linear Hall effect devices which are operated by the magnetic field from a permanent magnet or an electromagnet. The ratiometric output voltage is set by the supply voltage and varies in proportion to the strength of the magnetic field.

The integrated circuitry provides increased temperature stability and sensitivity. Laser trimmed thin film resistors provide high accuracy (null to $\pm 3\%$, sensitivity up to $\pm 3\%$) and temperature compensation. These linear position sensors have an operating temperature range of -40°C to $+150^{\circ}\text{C}$, appropriate for industrial and automotive environments. They respond to either positive or negative gauss, monitoring either or both magnetic poles. The quad Hall sensing element minimizes the effects of mechanical or thermal stress on the output. The positive temperature coefficient of the sensitivity ($+0.02\%/^{\circ}\text{C}$ typical) helps compensate for the negative temperature coefficients of low cost magnets, providing a robust design over a wide temperature range. Rail-to-rail operation (over full voltage range) provides a more usable signal for higher accuracy.

The recent extension to the product line, the SS490B Series, offers cost-effective MRL sensing solutions with slightly wider specifications than the SS490 high-performance products. Like the SS490 Series, the SS490B has a typical sinking or sourcing output of 1.5 mA continuous, uses 7 mA of supply current at 5.0 volts and 25°C , and provides predictable performance over the full temperature range. The SS490B Series sensors have wider null and sensitivity tolerances and a wider drift over temperature.

The SS490B Series sensors are a new lower cost product line extension. They complement the SS490 Series of small size, high accuracy and high performance miniature linear products.

FEATURES

- Small size (.160 x .118 in)
- Power consumption of 7 mA at 5 VDC for energy efficiency
- Single current sinking or current sourcing output
- Linear output for circuit design flexibility
- Built-in thin film resistors are laser trimmed for precise sensitivity and temperature compensation
- Rail-to-rail operation provides more useable signal for higher accuracy
- Temperature range of -40°C to $+150^{\circ}\text{C}$
- Responds to either positive or negative gauss
- Quad Hall sensing element for stable output

TYPICAL APPLICATIONS

- Current sensing
- Motor control
- Position sensing
- Magnetic code reading
- Rotary encoder
- Ferrous metal detector
- Vibration sensing
- Liquid level sensing
- Weight sensing

WARNING

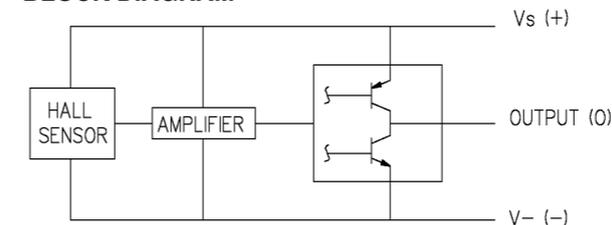
PERSONAL INJURY

- DO NOT USE these products as safety or

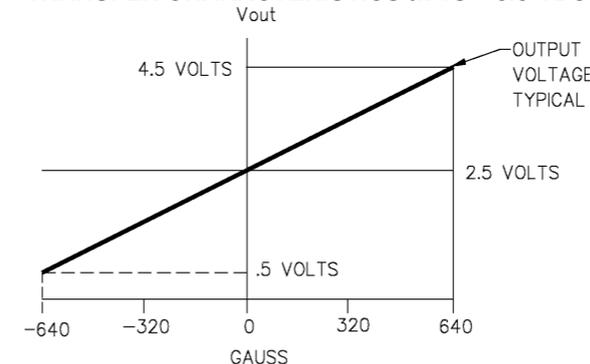
SPECIFICATIONS ($V_s = 5.0\text{ V}$, $t_a = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, unless otherwise noted)

Catalog Listing Type	SS495A	SS495A1	SS495A2	SS495B	SS496A	SS496A1	SS496B	
Supply Voltage (VDC)	4.5 to 10.5							
Supply Current @ 25°C (mA)	Typ.	7.0						
	Max.	8.7						
Output Type (Sink or Source)	Ratiometric							
Output Current (mA)	Typ. Sink or Source	$V_s > 4.5\text{ V}$						
	Min. Source	$V_s > 4.5\text{ V}$						
	Min. Sink	$V_s > 4.5\text{ V}$						
	Min. Sink	$V_s > 5.0\text{ V}$						
Operating Temperature	-40 to $+150^{\circ}\text{C}$ (-40 to $+302^{\circ}\text{F}$)							
Magnetic Range, Gauss	Typ.	± 670	± 670	± 670	± 670	± 840	± 840	
	Min.	± 600	± 600	± 600	± 600	± 750	± 750	
Output Voltage Span	Typ.	0.2 to $(V_s - 0.2)$						
	Min.	0.4 to $(V_s - 0.4)$						
Null (Output @ 0 Gauss, V)		2.50 ± 0.075	2.50 ± 0.075	2.50 ± 0.100	2.50 ± 0.150	2.50 ± 0.075	2.50 ± 0.150	
Sensitivity (mV/G)		3.125 ± 0.125	3.125 ± 0.094	3.125 ± 0.156	3.125 ± 0.250	2.50 ± 0.100	2.50 ± 0.200	
Linearity, % of Span	Typ.	-1.0						
	Max.	-1.5						
Temperature Error	Null Drift ($\%/^{\circ}\text{C}$)	± 0.06	± 0.04	± 0.07	± 0.08	± 0.048	± 0.03	
	Sensitivity Drift ($\%/^{\circ}\text{C}$)	$\geq 25^{\circ}\text{C}$ Max.	-0.01, +0.05	-0.02, +0.06	-0.02, +0.06	-0.01, +0.05	-0.01, +0.05	-0.01, +0.05
		$< 25^{\circ}\text{C}$ Max.	0.0, +0.06	0.0, +0.06	-0.01, +0.07	-0.02, +0.06	0.0, +0.06	0.0, +0.06

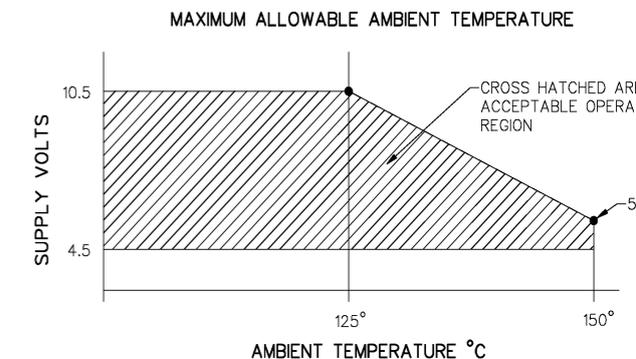
BLOCK DIAGRAM



TRANSFER CHARACTERISTICS at $V_s = 5.0\text{ VDC}$

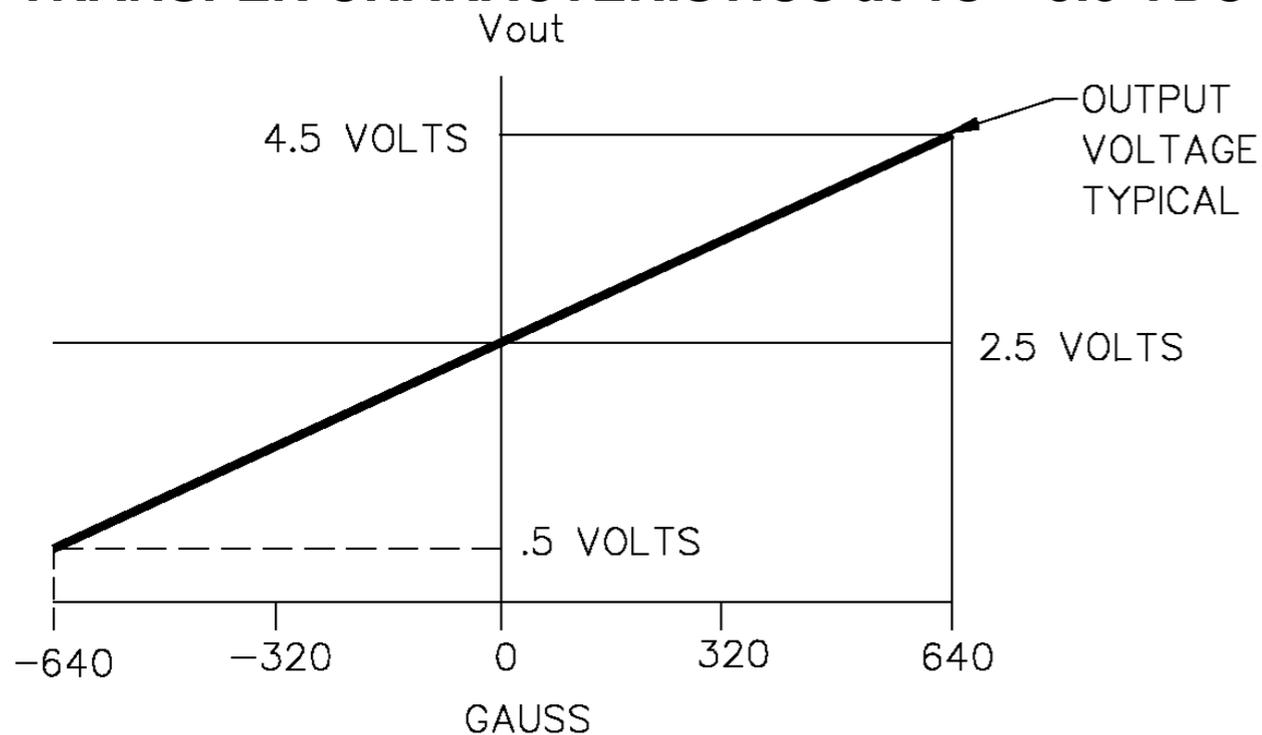


MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE vs. TEMPERATURE



Caractéristique de transfert du capteur

TRANSFER CHARACTERISTICS at $V_s = 5.0$ VDC



$$V_{out} = S \times B(\text{Gauss}) + \text{Decalage}$$

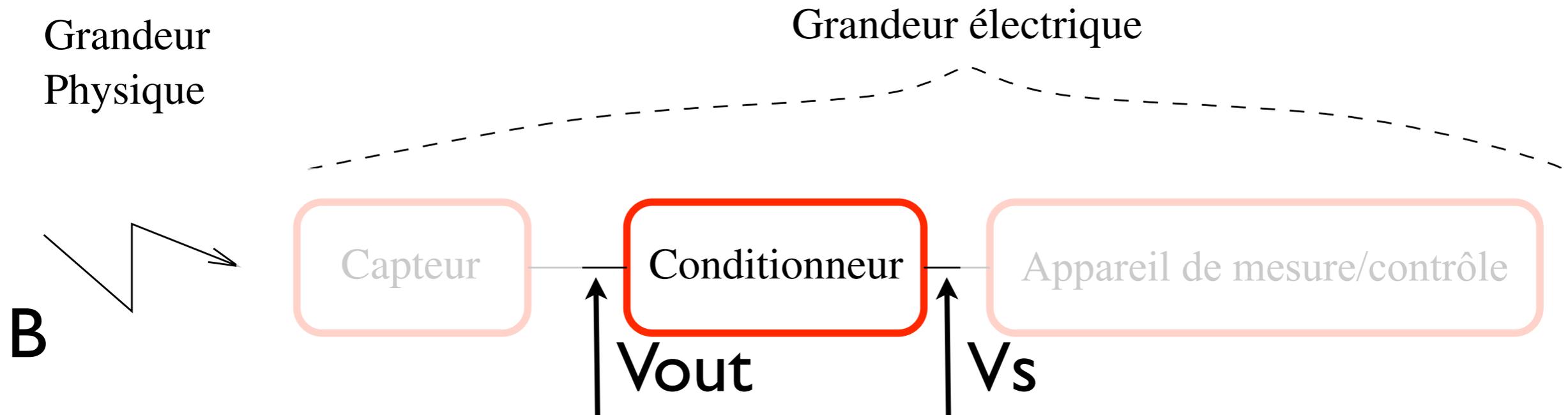
$$S = 3,125 \text{ mV/Gauss}$$

$$\text{Decalage} = 2.5 \text{ V}$$

=> Mesure (lecture) facile :

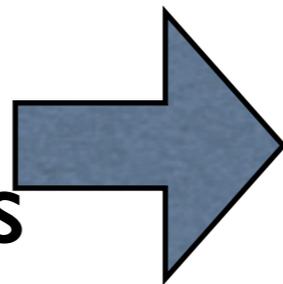
- Elimination du décalage
- en sortie du conditionneur : $|V \leftrightarrow | \text{ Gauss}$

Les éléments de la chaîne de mesure



$$V_s = K_1 \times V_{out} + K_2$$

$V_s = 0 \text{ V}$ pour $B = 0 \text{ Gauss}$
 $V_s = 1 \text{ V}$ pour $B = 1 \text{ Gauss}$



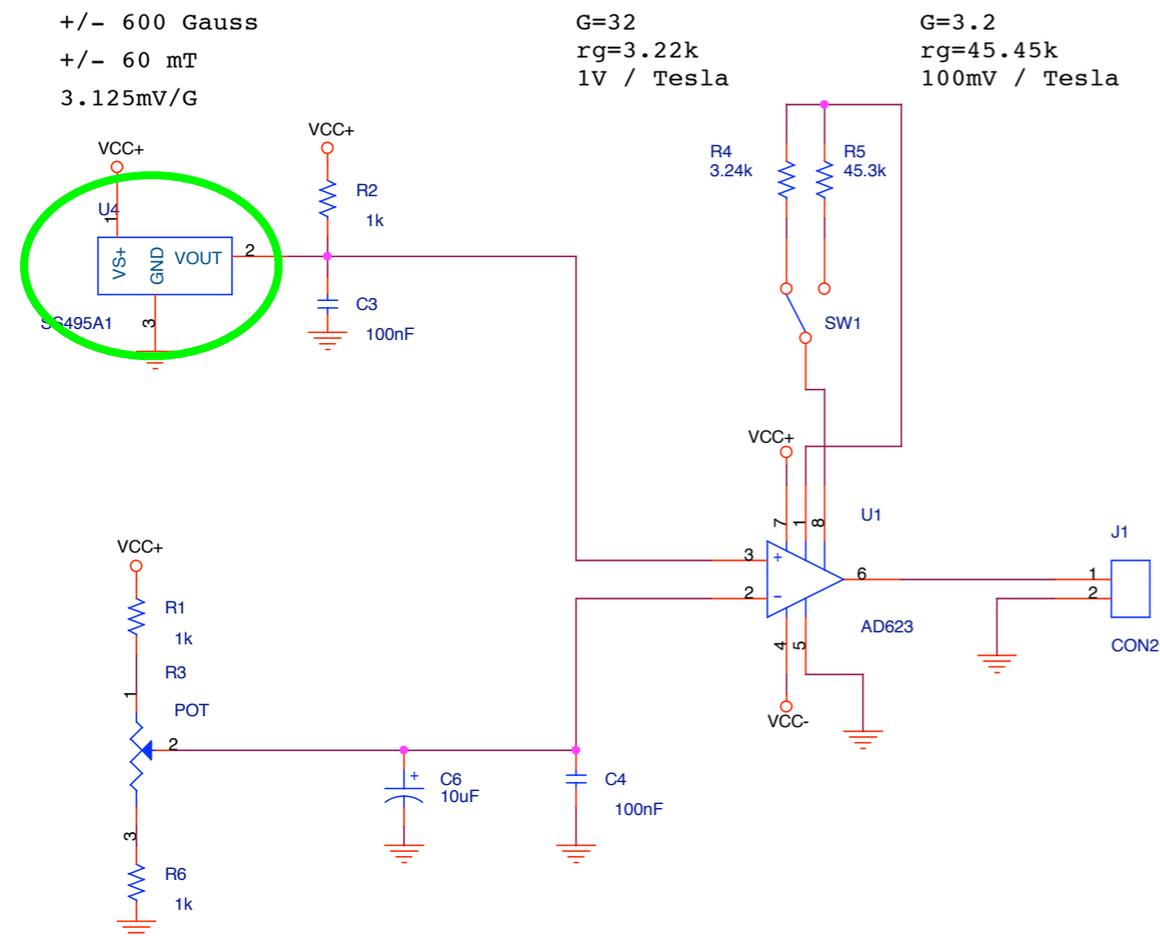
$$V_s = K_1 \times (S \times B + \text{Decalage}) + K_2$$

$$K_1 = 1/S$$

$$K_2 = -\text{Decalage}/S$$

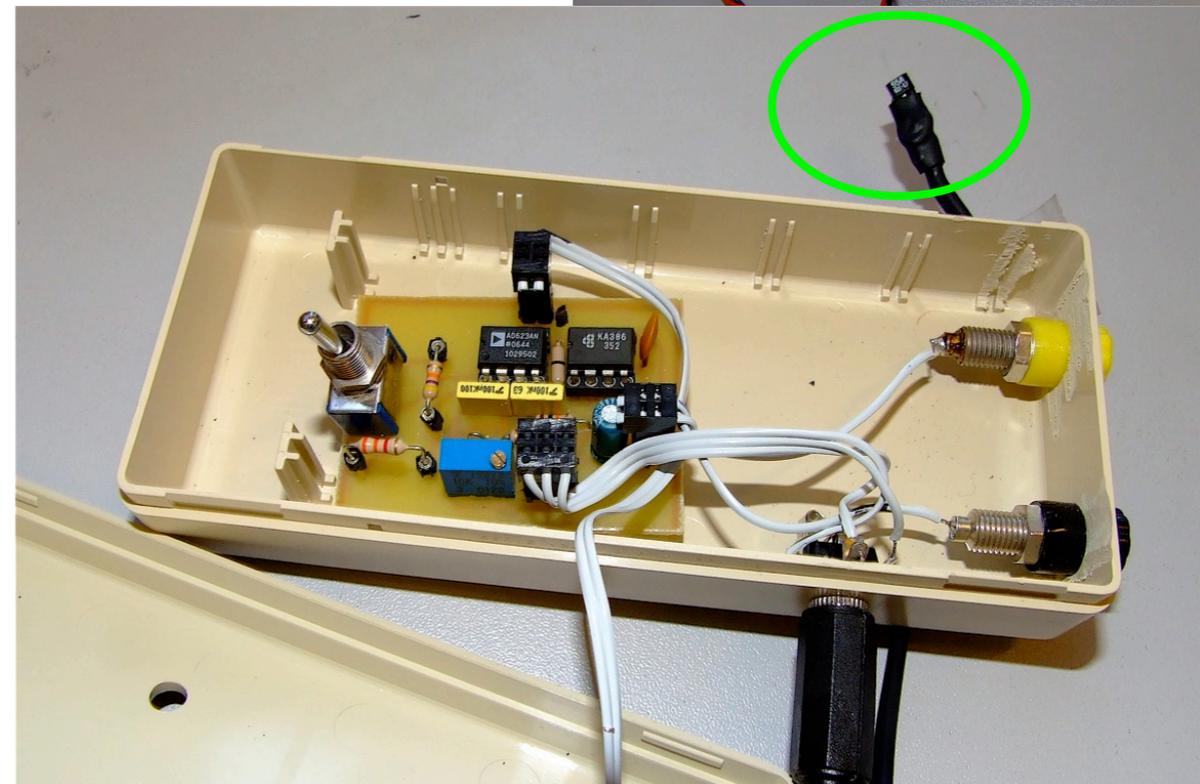
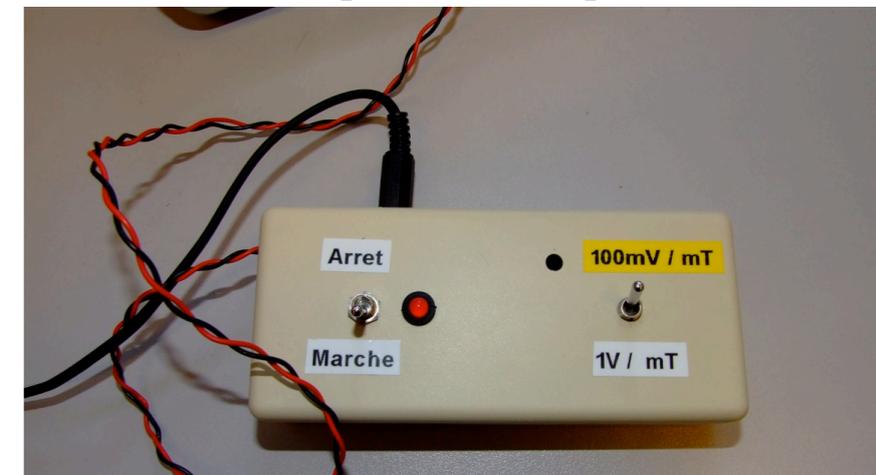
Réalisation du conditionneur

Schéma de principe



Réalisation pratique

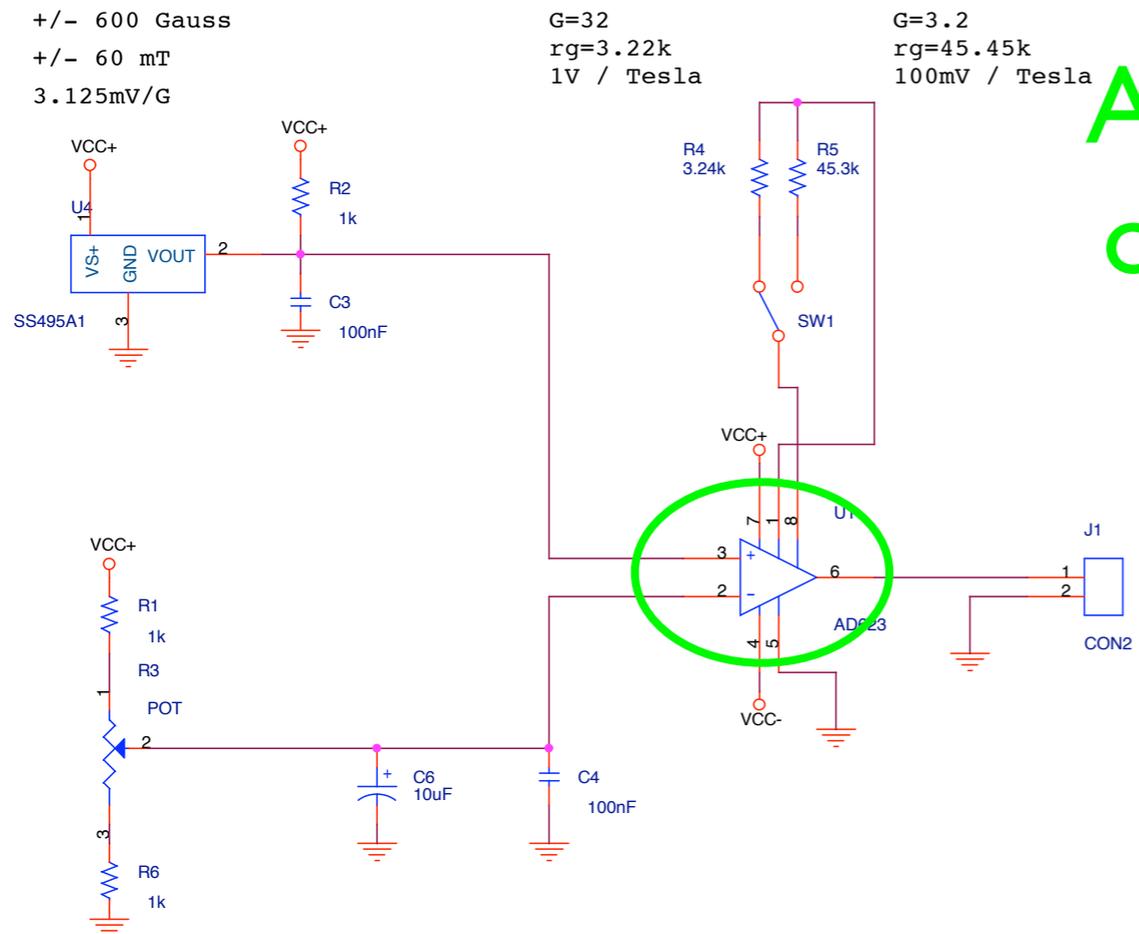
Capteur



Cf. les fonctions de l'électronique

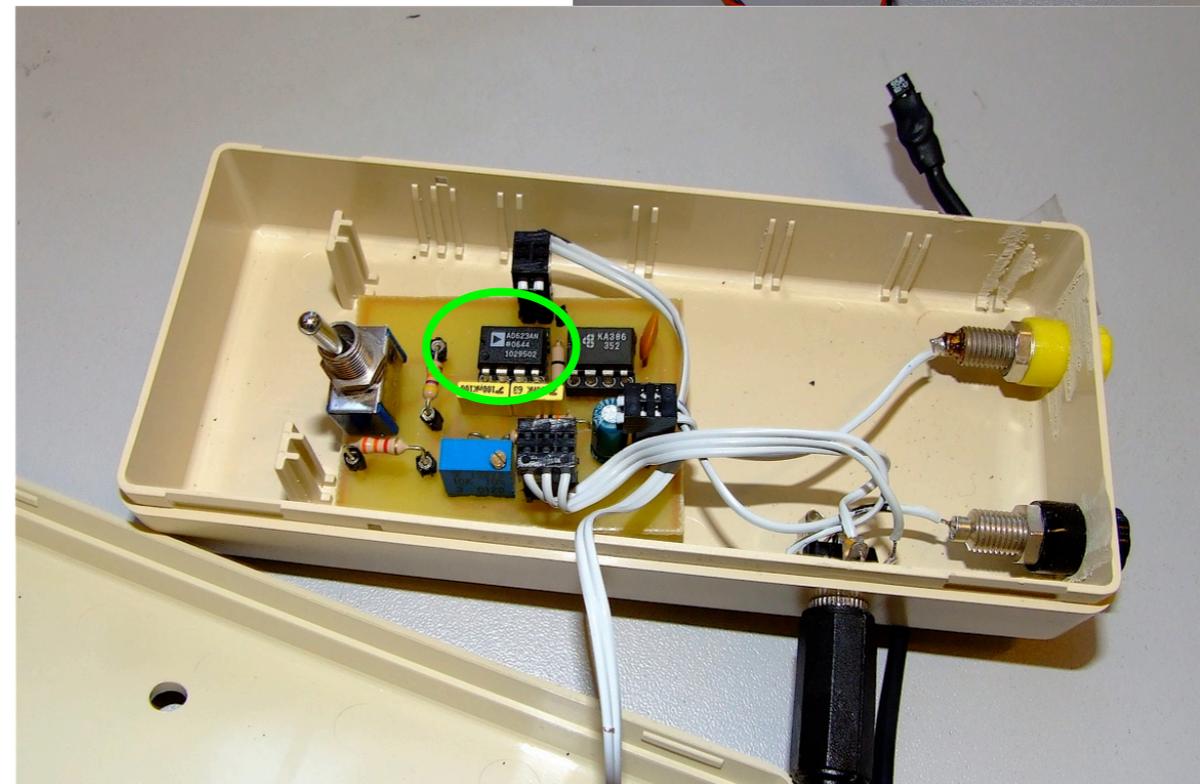
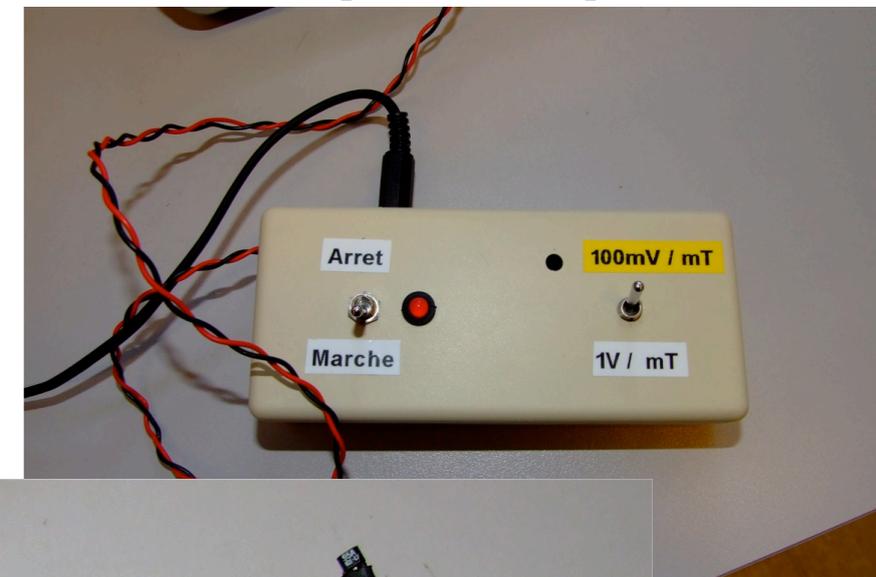
Réalisation du conditionneur

Schéma de principe



Amplificateur
opérationnel

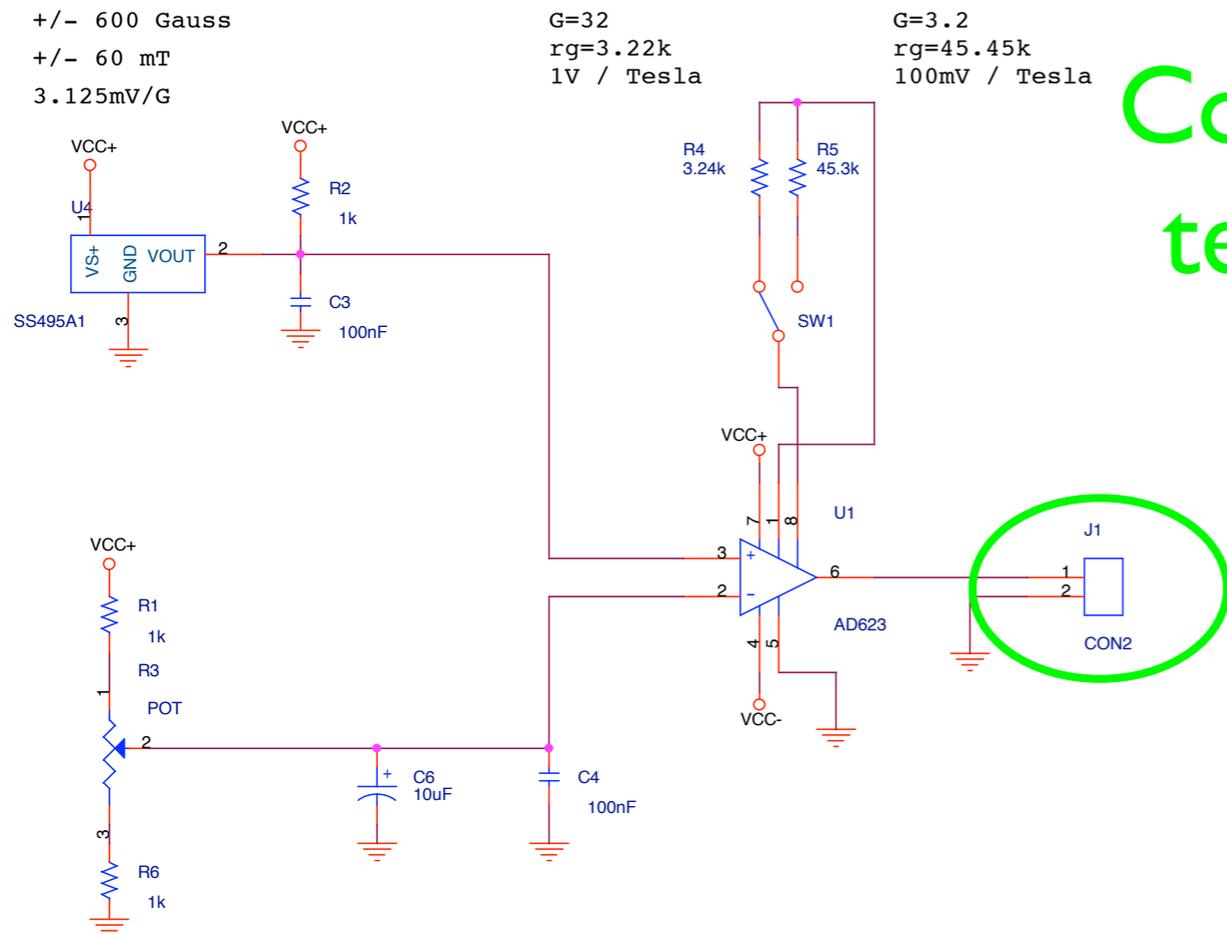
Réalisation pratique



Cf. les fonctions de l'électronique

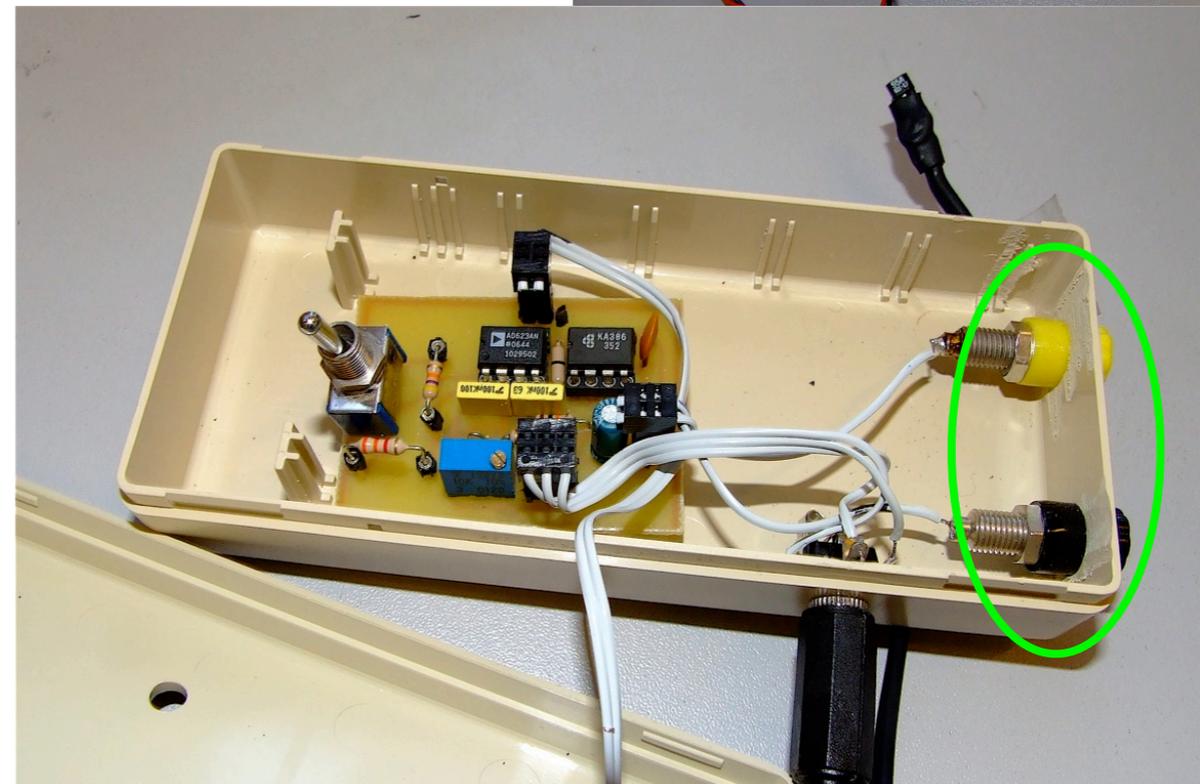
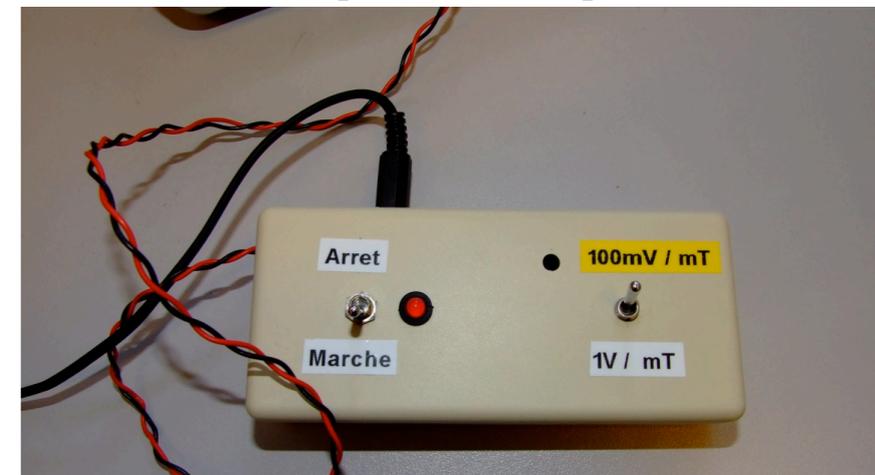
Réalisation du conditionneur

Schéma de principe



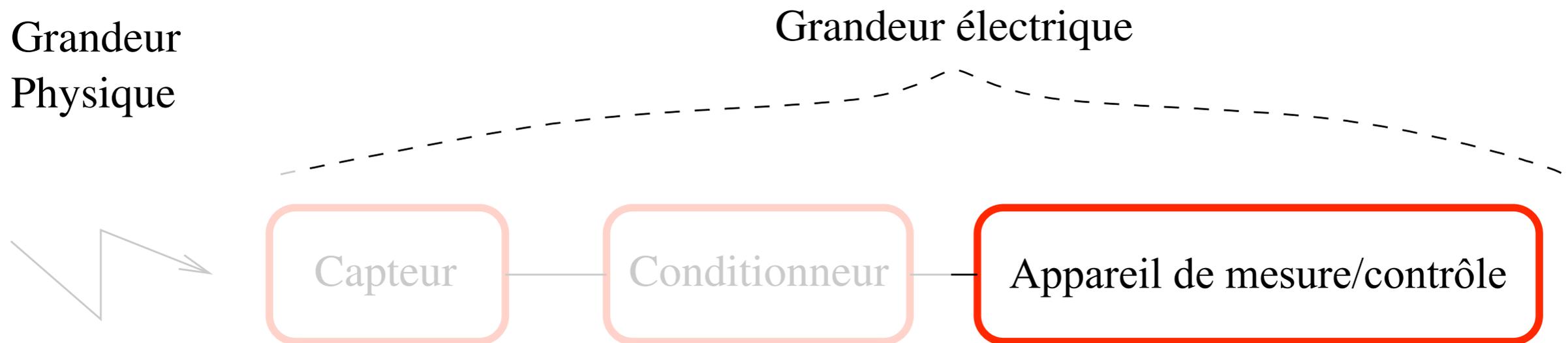
Connecteur tension V_s

Réalisation pratique



Cf. les fonctions de l'électronique

Les éléments de la chaîne de mesure

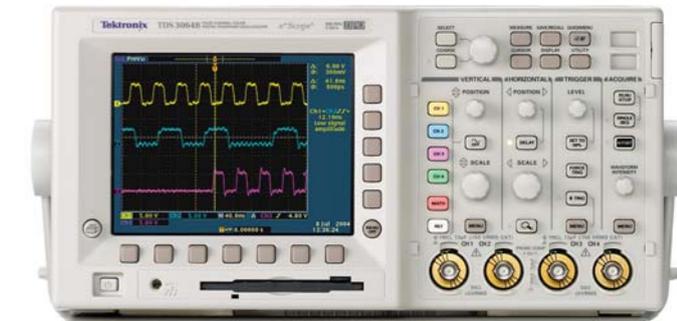
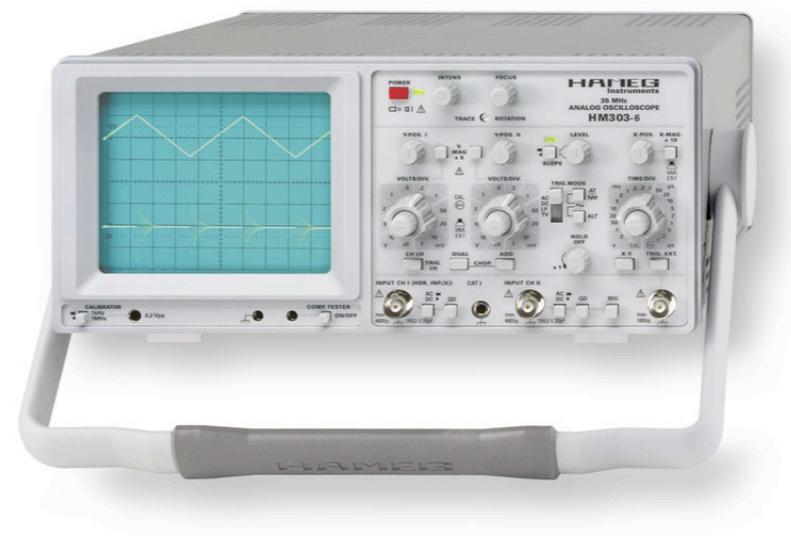


- Appareil de mesure :
 - Multimètre : voltmètre, ampèremètre, ohmmètre, fréquencemètre, capacimètre...
 - Oscilloscope : visualisation de tension en fonction du temps

- Appareil de contrôle :
 - voyant lumineux ou sonore
 - nécessite un conditionneur réalisant une fonction de comparaison !
 - Envoi vers le système de régulation

Appareils de mesure

- Multimètre
- Fréquencemètre
- Oscilloscope
- Analyseur de spectre



1.3 Incertitude de measure, bruit

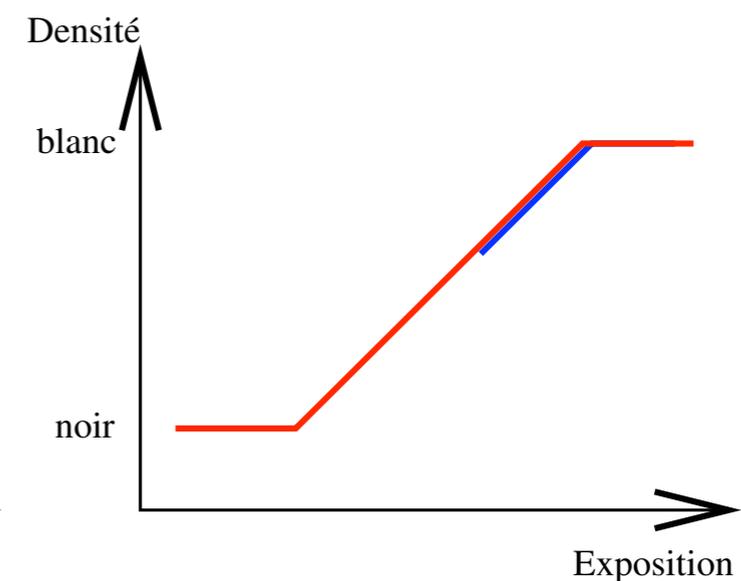
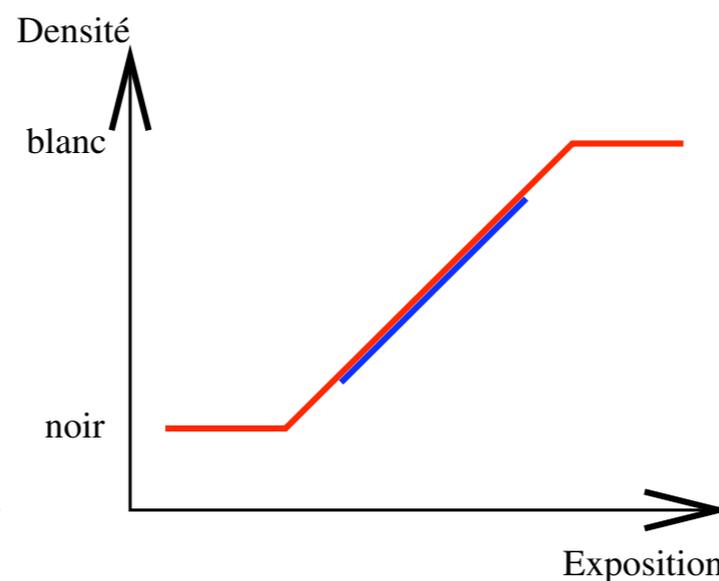
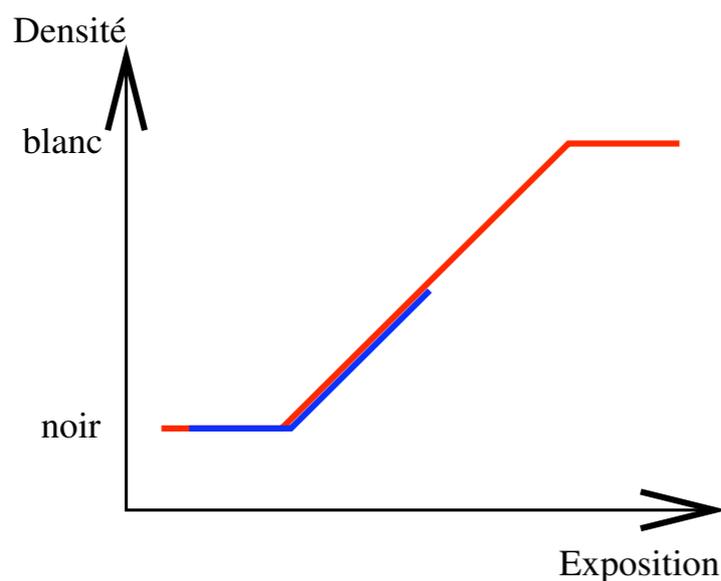
La notion d'erreur

Erreurs de mesure dans l'appareil photographique : sur et sous-exposition

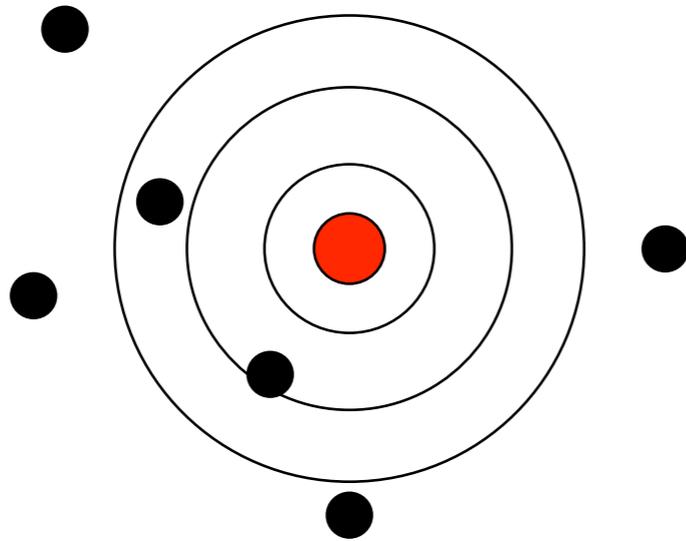
sous exposition

normal

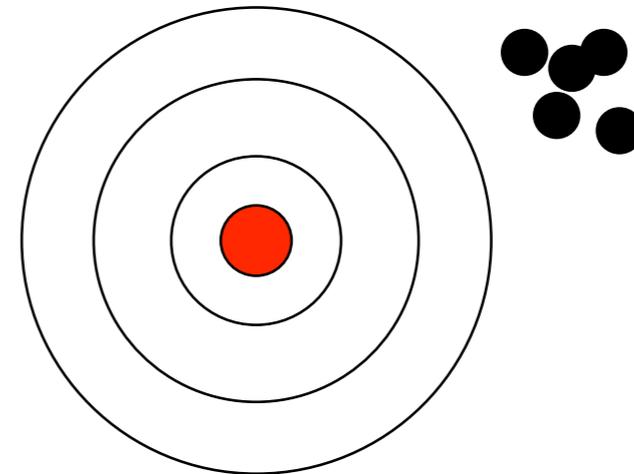
sur exposition



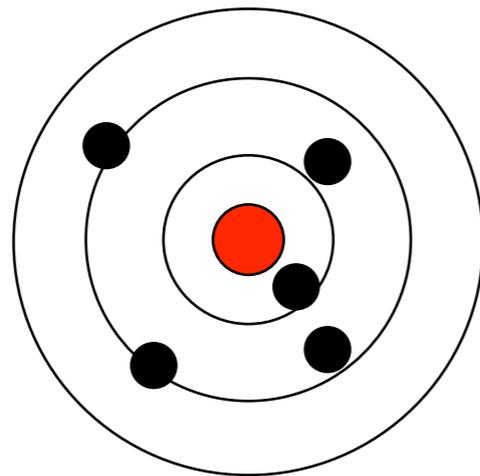
Erreurs systématiques et erreurs aléatoires



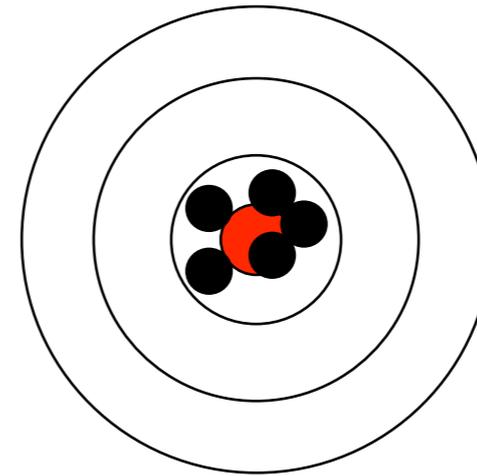
Ni juste, ni fidèle ("imprécis")
(Erreurs aléatoire + systématique)



Pas juste mais fidèle
(Erreur systématique)



Juste mais pas fidèle
(Erreur aléatoire)



Juste et fidèle ("précis")

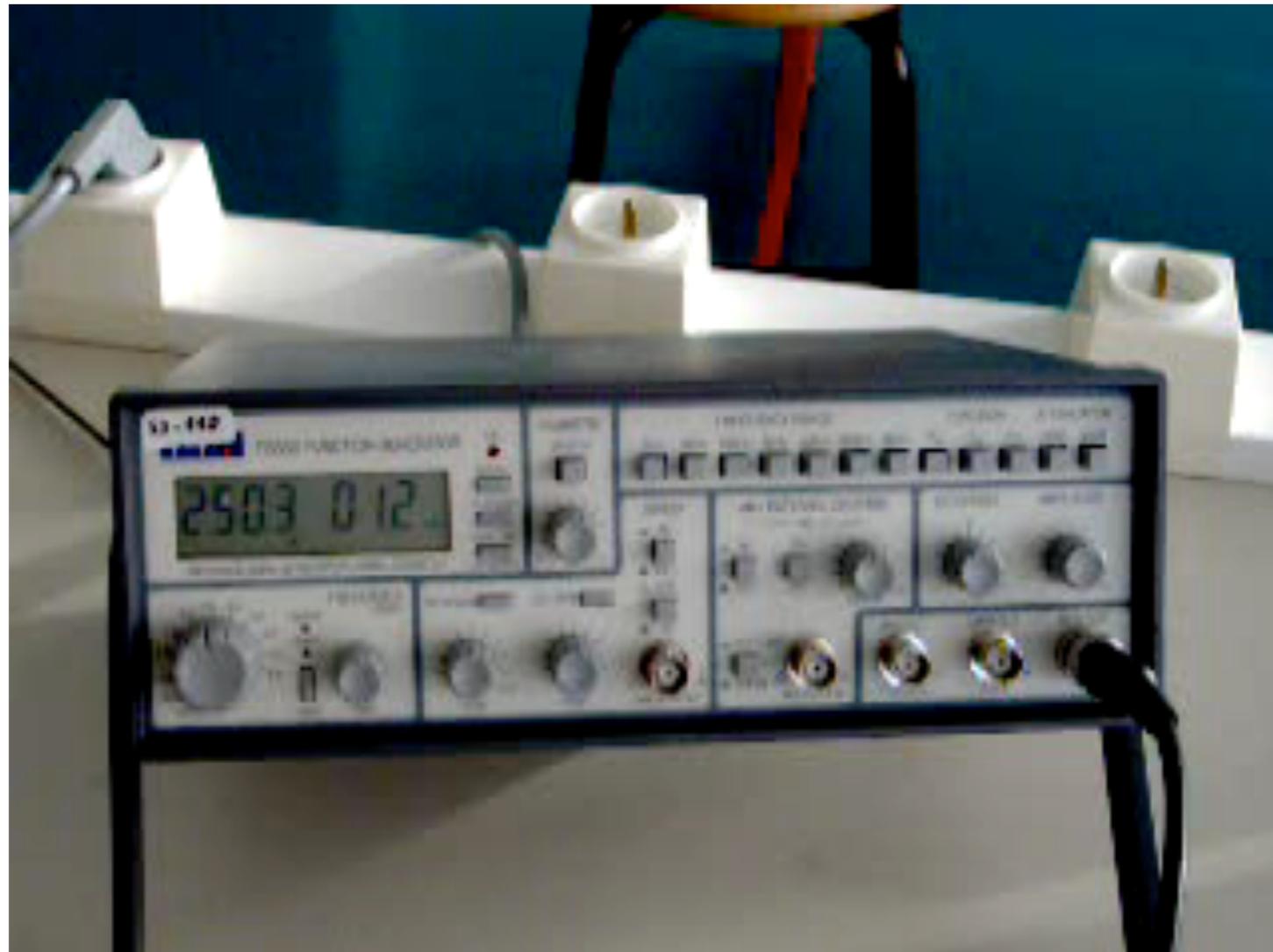
Erreurs systématiques : illustration

Mesure de la valeur efficace d'une tension sinusoïdale



Erreurs systématiques : illustration

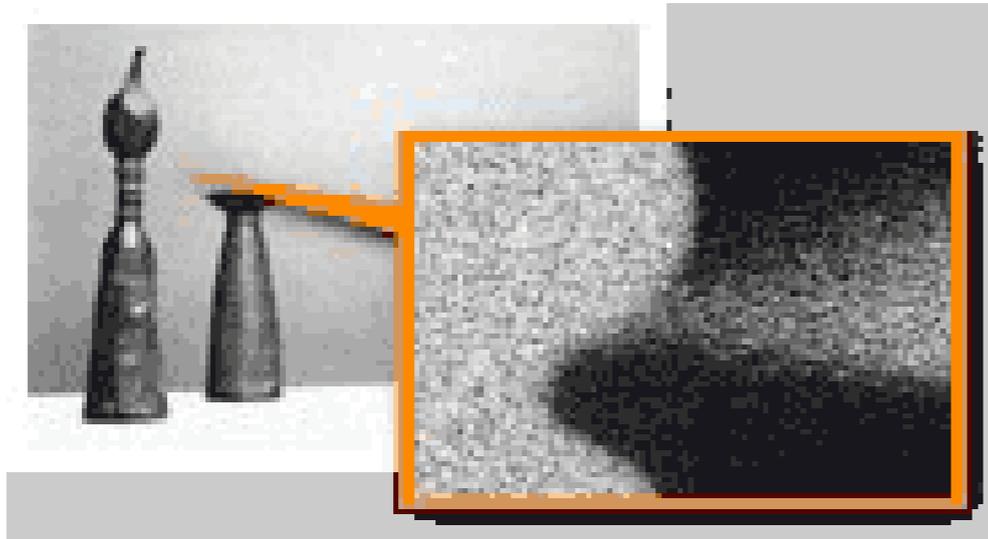
Mesure de la valeur efficace d'une tension sinusoïdale



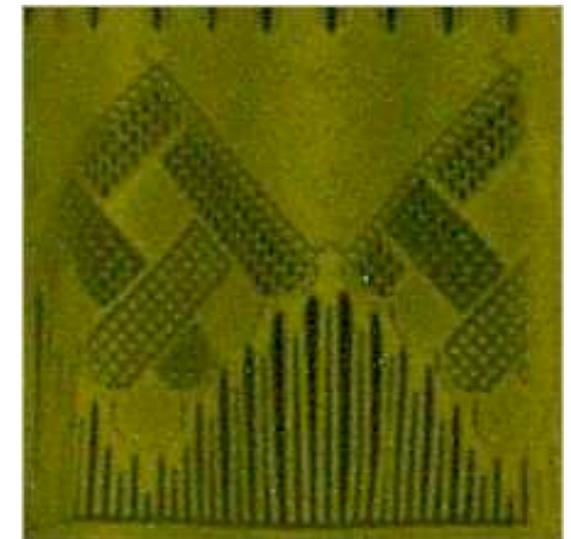
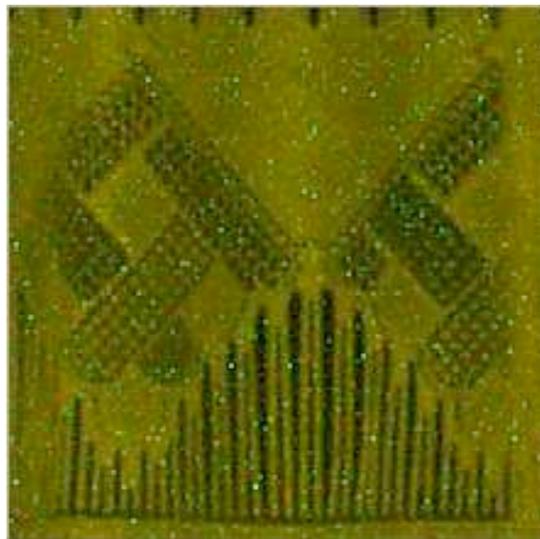
=> Corrections à apporter à la mesure

Erreurs aléatoires : le bruit

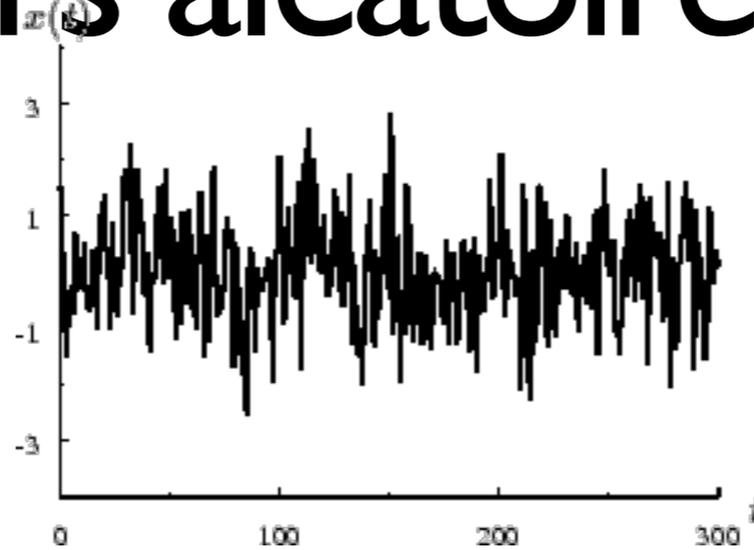
Cas d'une pellicule photographique : le "grain"



Appareil numérique : bruit et traitement numérique pour son élimination



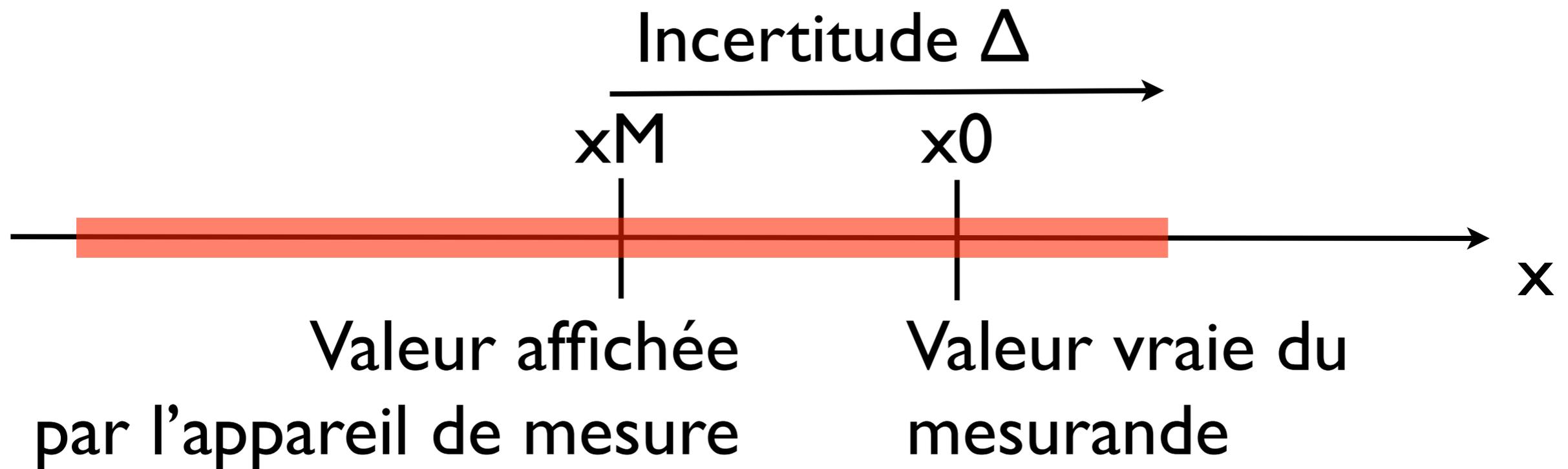
Erreurs aléatoires : le bruit



- Un appareil de mesure avec une résolution suffisante n'affichera jamais le même résultat
- le bruit se modélise comme une variable aléatoire $b(t)$.
Un point intéressant pour la mesure, la valeur moyenne est nulle
- En conséquence, pour limiter les erreurs aléatoires, on effectue plusieurs mesurages et on calcule la valeur moyenne

Simplification adoptée

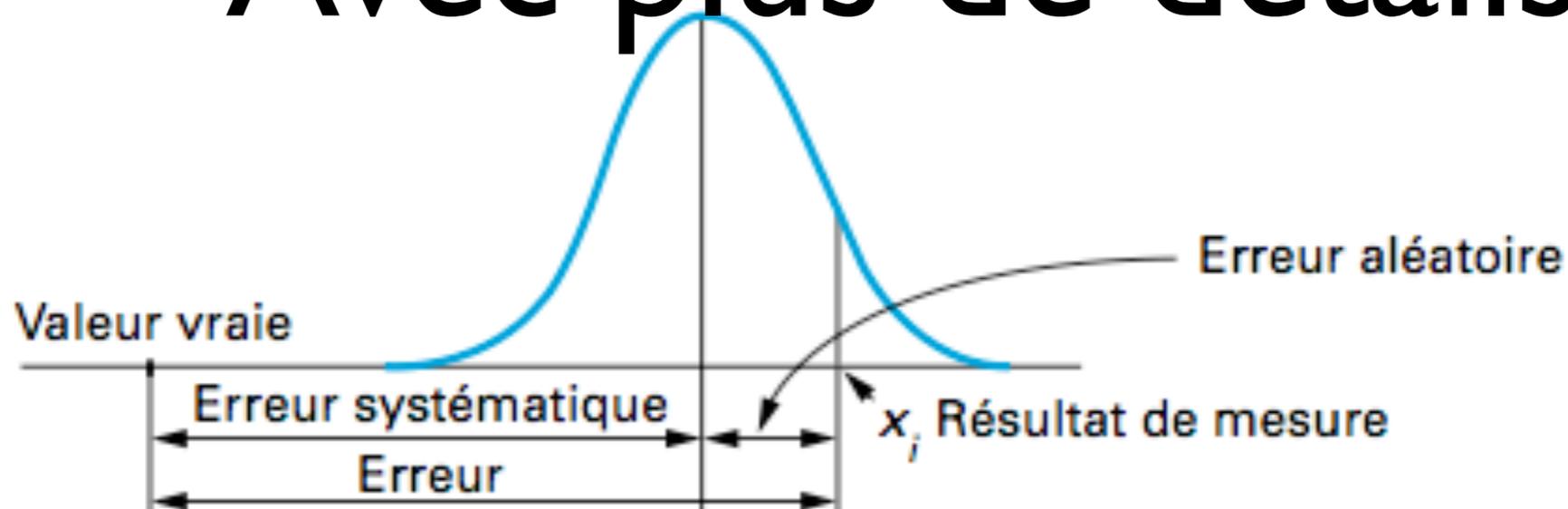
=> On indique une fourchette de valeur



■ Fourchette des valeurs possibles
compte-tenu des erreurs

$$x_0 = (x_M \pm \Delta) \cdot \text{Unité}$$

Avec plus de détails



- L'erreur aléatoire est une variable statistique ayant une loi de probabilité gaussienne \Rightarrow permet de définir des intervalles de confiance
- L'erreur systématique peut se corriger (à l'aide d'étalon).
- La valeur vraie reste toujours inconnue (on ne possède pas d'appareil possédant la résolution suffisante)

II Généralités et définitions

II.1 Définitions et vocabulaire autour des capteurs et de la mesure

Classification

- Un capteur est chargé de transformer une grandeur physique G en grandeur électrique ; ce qui peut s'exprimer par une fonction f telle que $E=f(G)$
- Le capteur se comporte comme une **impédance** : capteur **passif**.
- Le capteur se comporte comme un **générateur** de courant ou de tension : capteur **actif**.

Capteur passif

- Une impédance, quelle que soit sa nature (résistance, condensateur, inductance) est déterminée par
 - ces propriétés électriques : résistivité, constante diélectrique, permittivité
 - Ces dimensions.
- Exemple dans le cas d'une résistance réalisée dans un matériau de résistivité ρ , de longueur L , de largeur W et d'épaisseur Z . On a $R = \rho \cdot L / (W \cdot Z)$
 - Le mesurande peut modifier la résistivité du matériau (exemple : capteurs de température)
 - Le mesurande peut modifier la taille du capteur (exemple : capteur de position)

Exemple de capteur passif

Capteur de position :

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

Thermomètre

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3)$$

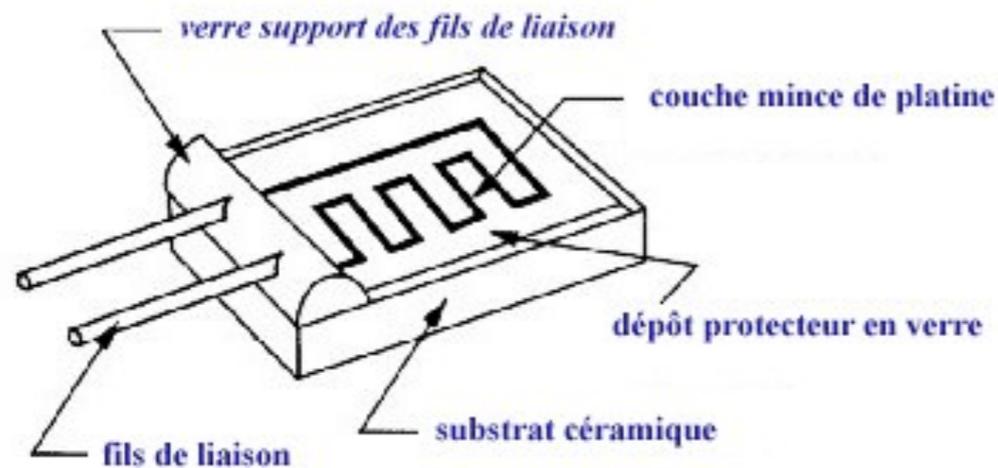
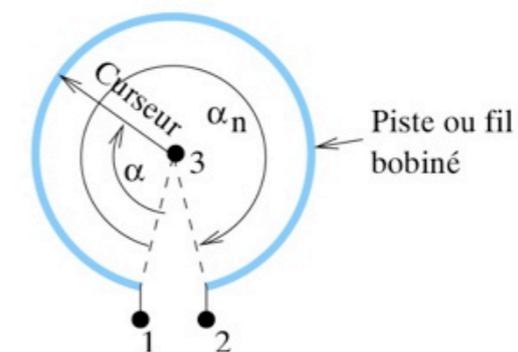
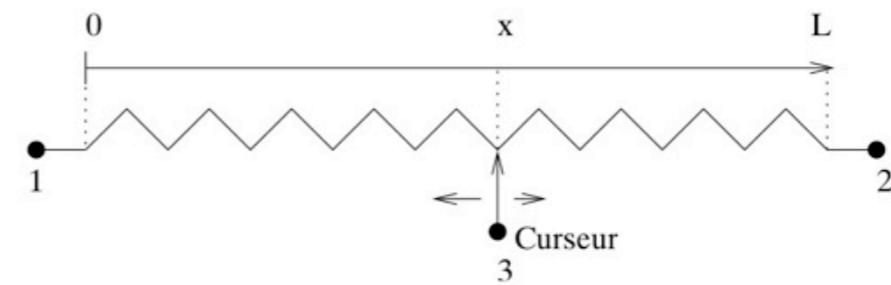


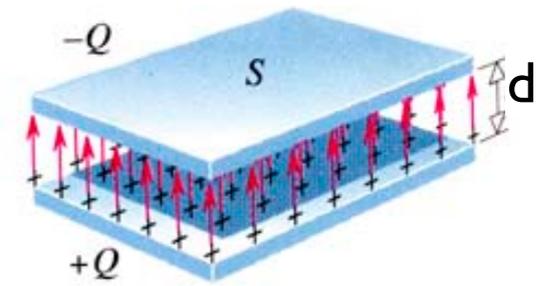
Fig. résistance de platine en technologie couche mince



$$R_{13}(x) = R_n \cdot \frac{x}{L}$$

Cas des condensateurs et inductances

- Capacité d'un condensateur plan de surface S de constante diélectrique ϵ_0 de constante diélectrique relative ϵ_R avec une distance d entre les deux plaques
- Self inductance L d'une bobine de nombre de spires N de section moyenne S et de longueur l_g de la perméabilité du vide μ_0 de perméabilité relative μ_r .



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

$$\Phi = L \cdot I$$

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l_g}$$



Capteurs actifs

- Le capteur fonctionne en générateur. Le principe consiste en une conversion de l'énergie propre du mesurande en une énergie électrique.

Capteurs actifs : principes physiques de base

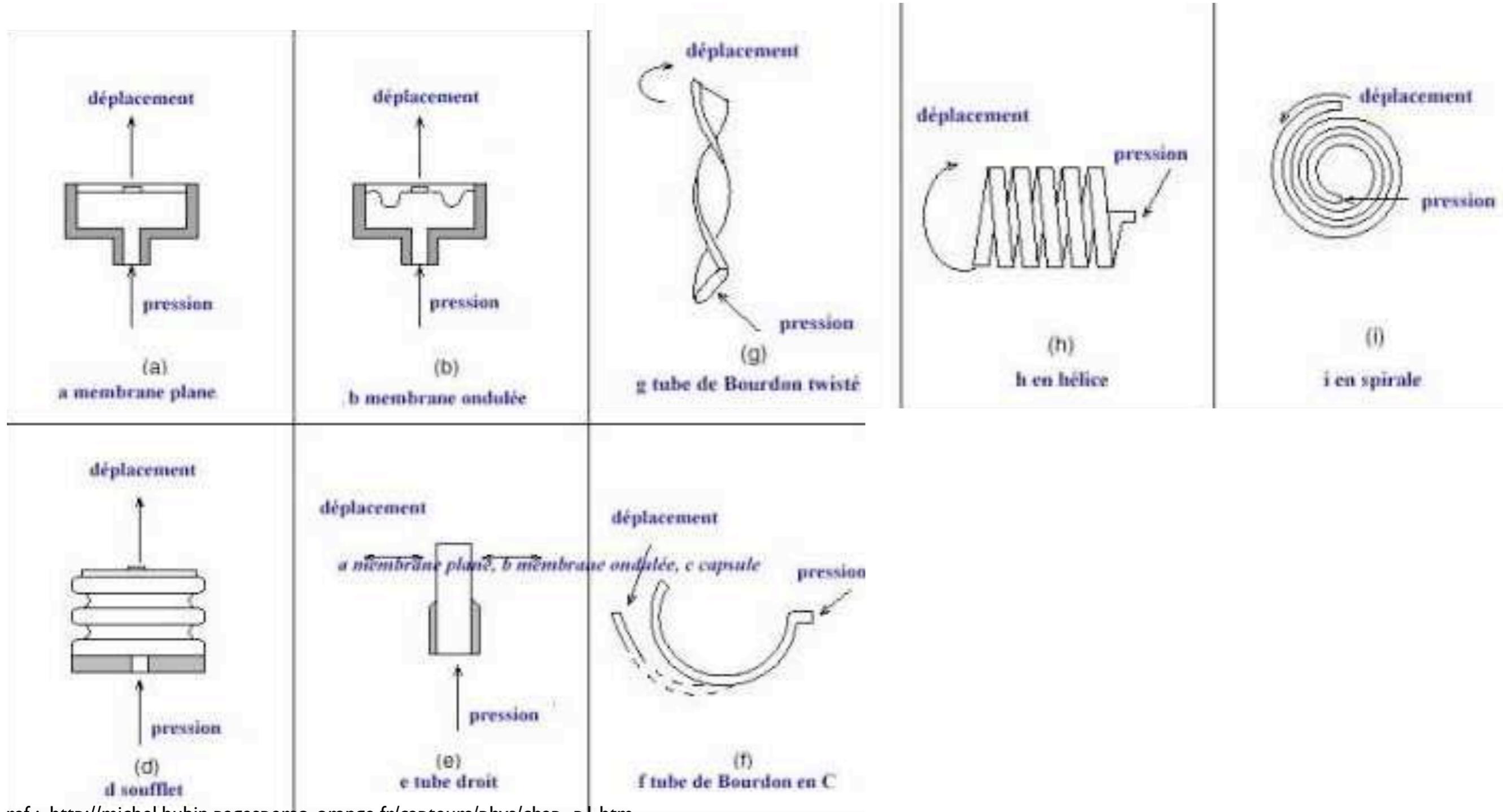
Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité Photoémission Effet photovoltaïque	Charge Courant Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

ref Asch : les capteurs en instrumentation industrielle

Corps d'épreuve

- Le corps d'épreuve a pour rôle de transformer le mesurande en un autre mesurande auquel le capteur est sensible.
- Exemple : microphone capacitif. La variation de pression sonore déplace une membrane dont la position est mesurée par un capteur de position

Quelques exemples de corps d'épreuve



ref : http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/phys/chap_pl.htm

Vocabulaire

- **Mesurande** : grandeur physique, soumise à mesurage
- **Mesurage** : ensemble des opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur.
- Principe de mesure : base scientifique d'un mesurage.
- **Résolution** (d'un dispositif afficheur) : la plus petite différence d'indication d'un dispositif afficheur qui peut être perçue de manière significative.
- **Justesse** (d'un instrument de mesure) : aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreurs systématiques.
- **Fidélité** (d'un instrument de mesure) : aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure.
- **Mesure** : valeur d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature et prise pour unité.
- Exactitude de mesure : étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et la valeur vraie du mesurande.
- **Incertitude de mesure** : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.
- Répétabilité (des résultats de mesurage) : étroitesse de l'accord, entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.
- Reproductibilité (des résultats de mesurage) : étroitesse de l'accord, entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure.

Résolution

- Résolution (d'un dispositif afficheur) : la plus petite différence d'indication d'un dispositif afficheur qui peut être perçue de manière significative.



résolution = digit de
droit



résolution = largeur de
l'aiguille

11.2 Caractéristiques des capteurs

Définitions

- Grandeur d'entrée G (température, pression, intensité lumineuse, ...)
- Grandeur en sortie de la chaîne de sortie : tension, courant, impédance
- Gamme de grandeurs d'entrée et de sortie = valeurs possibles en entrée et en sortie
- **Sensibilité** (également appelé le gain, le transfert,...)

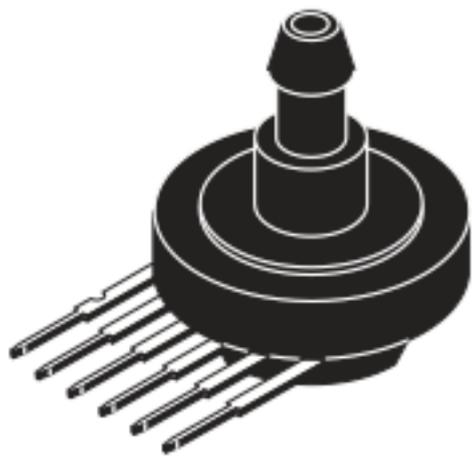
S .

$$S = \left(\frac{dV_S}{dG} \right)_{G=G_0} \quad G_0 \text{ est une valeur particulière de } G$$

Définitions : exemple d'un capteur de pression

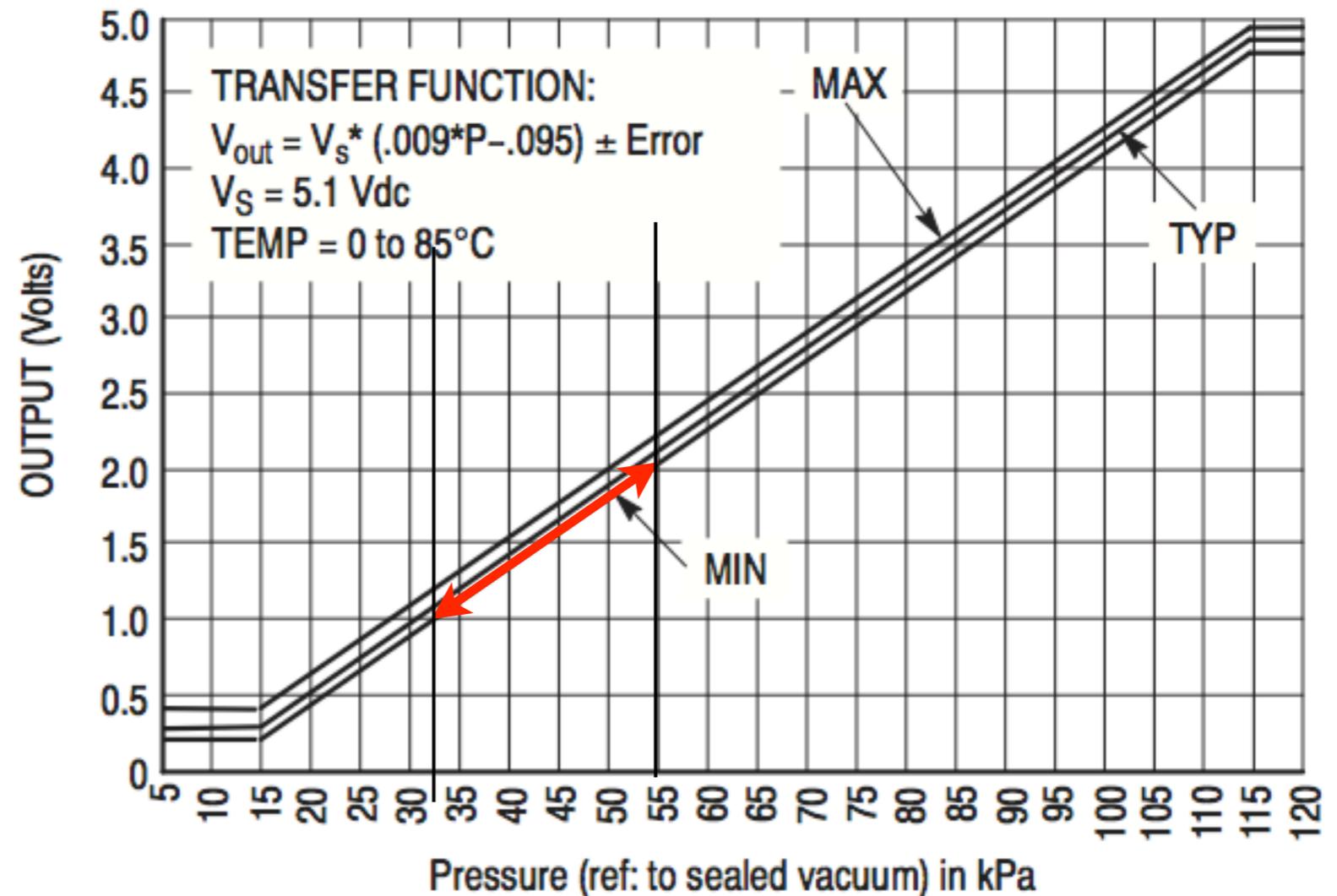


**MPX4115AP
CASE 867B**



**MPX4115AS
CASE 867E**

Référence motorola MPX 4115
 $S=47,6 \text{ mV/kPa}$



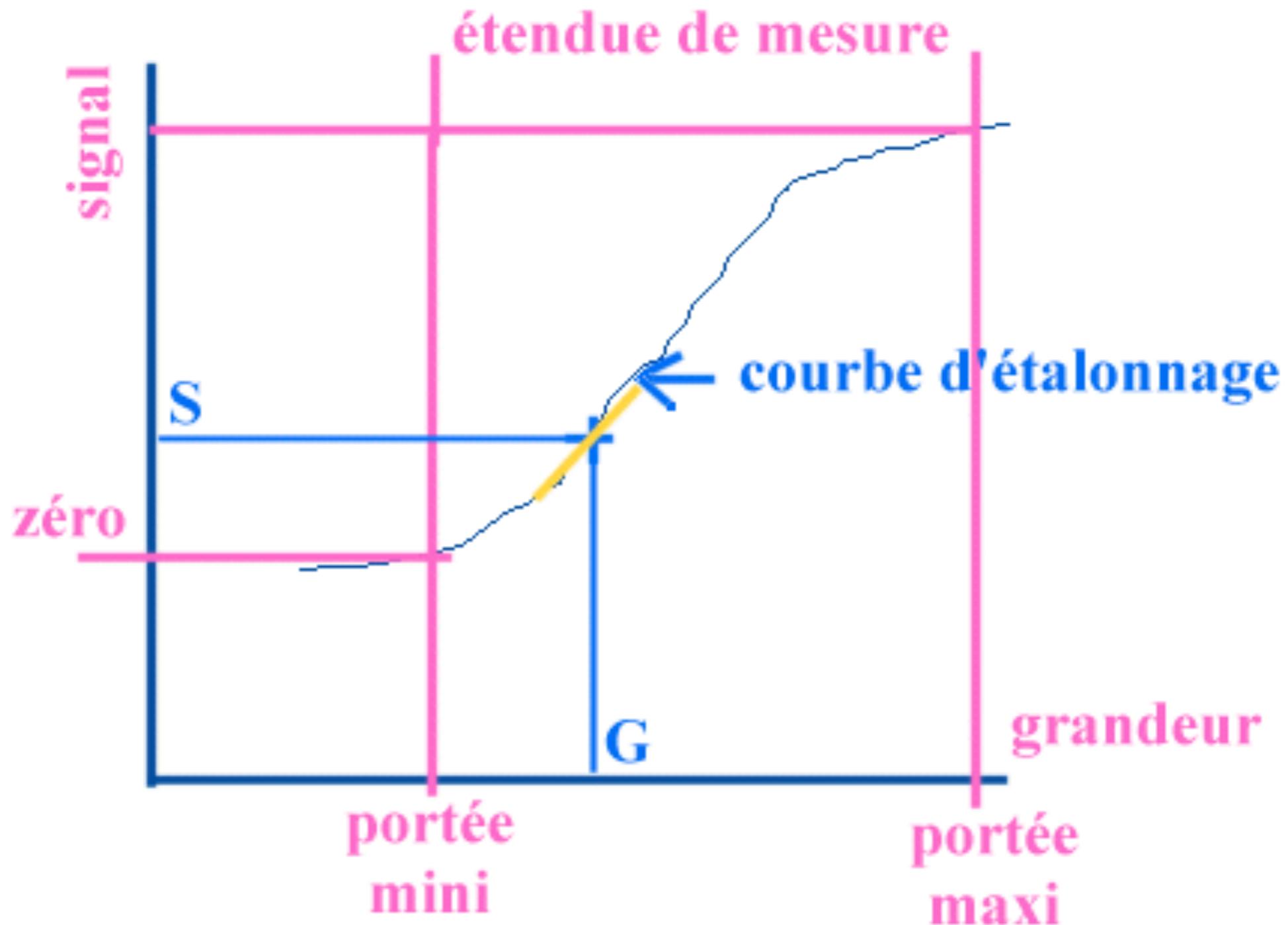
Définitions

- **Linéarité** : définit si la relation liant V_s à G est linéaire ou pas. Dans le cas d'un système linéaire, S est indépendant de G_0
- **Saturation** : un système sature si la tension de sortie ne varie pas lorsqu'on change G
- **Plage d'entrée** : gamme de la grandeur d'entrée ou la sortie ne sature pas
- **Décalage à zéro** (offset) : valeur de la tension en sortie quand $G=0$

Définitions

- **Etendue de mesure, pleine échelle :**
l'étendue de mesure est la différence entre la limite supérieure et la limite inférieure de la grandeur mesurable par un capteur. Lorsque le capteur fournit une valeur de la grandeur entre 0 et le maximum, ce maximum est appelé « Pleine Echelle », sous-entendu « de mesure ». Cette étendue de mesure est notée PE. Elle est toujours à l'intérieur du domaine de non-détérioration qui est lui-même inférieur au seuil destruction

Définitions

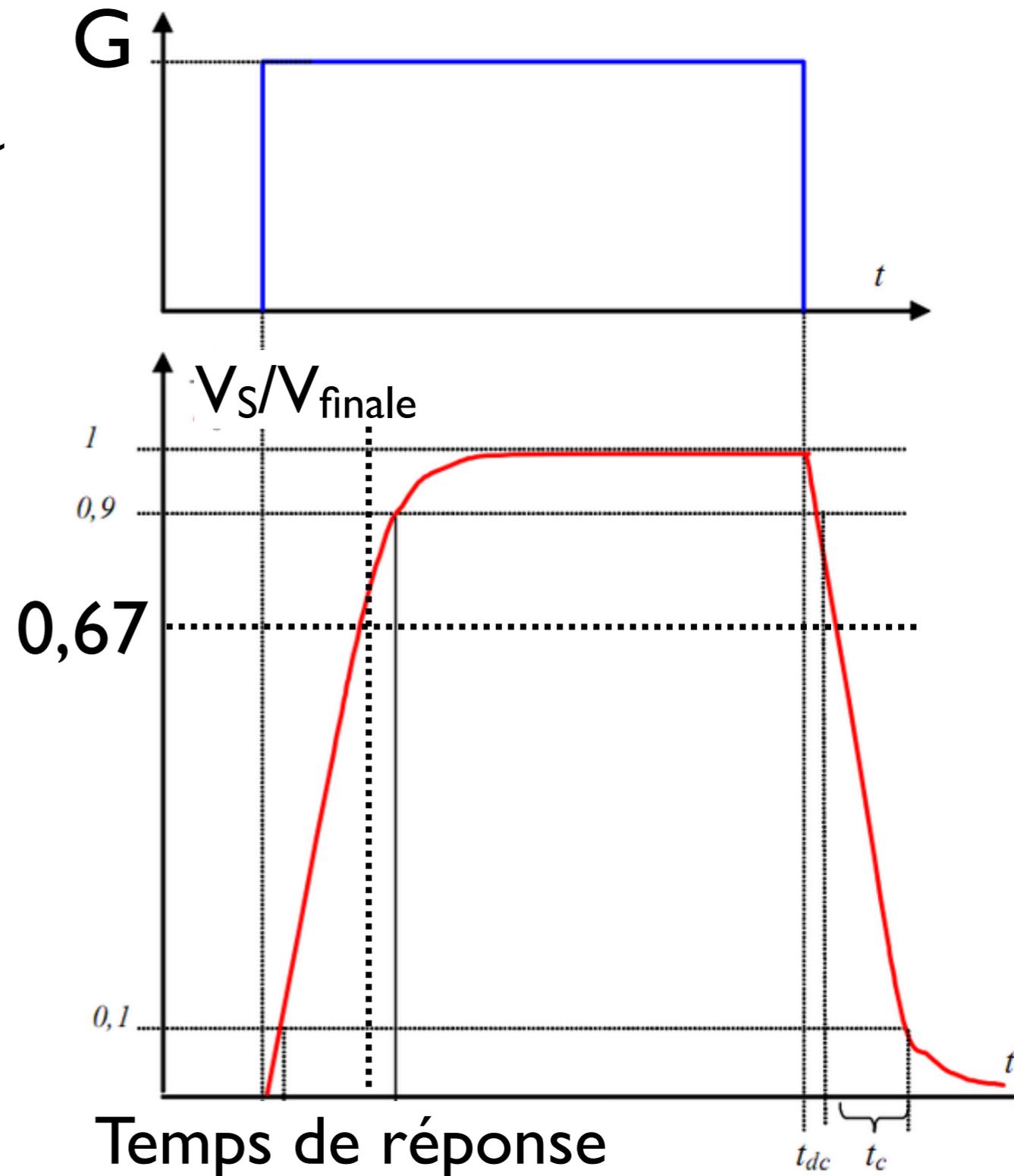


Définitions

- **Finesse** : la finesse permet d'estimer l'influence que peut avoir le capteur et de son support ou de ses liaisons sur la grandeur à mesurer. Par exemple, dans le cas d'un capteur de température, une capacité calorifique importante réduit sa finesse.

Définitions

- **Temps de réponse :** on applique un échelon à l'entrée. La sortie passe d'une valeur initiale à une valeur finale. Le temps de réponse est le temps mis par la sortie pour passer de la valeur initiale à 67% de la (valeur finale-la valeur initiale)

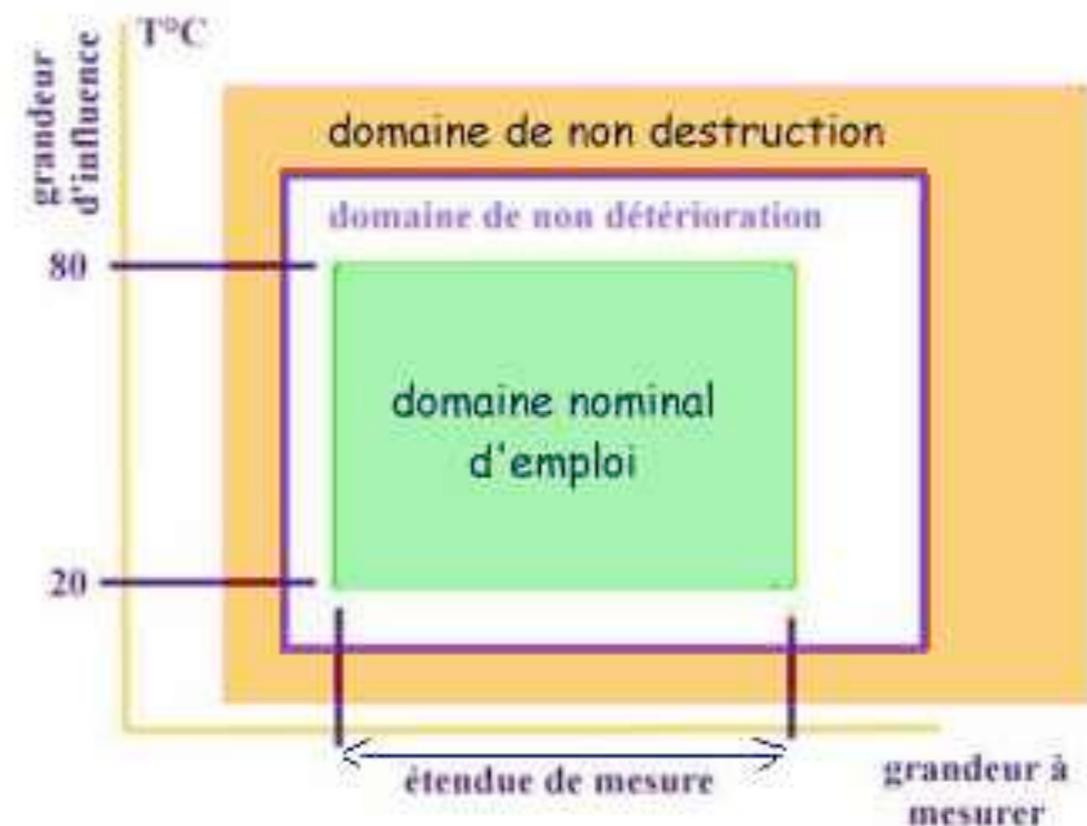


Définitions

- **Domaine nominale d'emploi** : il correspond aux conditions normales d'utilisation. Ces limites sont les valeurs extrêmes que peuvent atteindre de façon permanente le mesurande sans que soient modifiés les différentes caractéristiques du capteur.
- **Domaine de non-détérioration** : lorsque les valeurs, du mesurande ou des grandeurs d'influences, dépassent le domaine nominal mais restent inférieurs au domaine de non-détérioration les caractéristiques métrologiques du capteur sont modifiées. Cette altération est cependant réversible.

Définitions

- **Domaine de non-destruction** : lorsque les valeurs, du mesurande ou des grandeurs d'influences, dépassent le domaine de non-détérioration mais restent inférieurs au domaine de non-destruction les caractéristiques du capteur sont modifiées de manière irréversible. La réutilisation du capteur nécessite un nouvel étalonnage.



cf. http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/metro/chap_met2.htm