

FISE2 - ELEC4

Système d'Acquisition et de Transformation du Signal

Capteurs et conditionnement

Florent Goutailler

florent.goutailler@telecom-st-etienne.fr

bureau I-123



2022/2023

1 Capteurs

- Type de capteurs
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

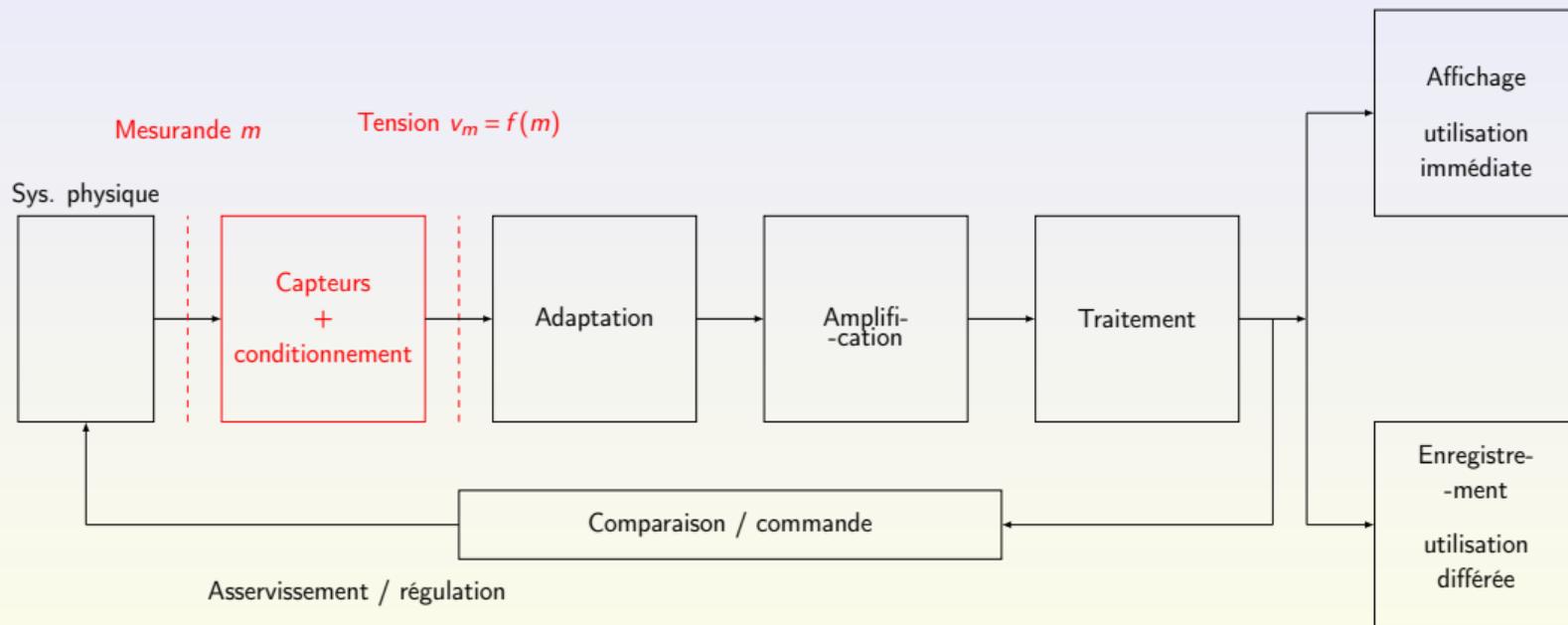
2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Objectifs

- connaître les différents types de capteur : actif, passif, composite, intégré...
- savoir estimer les caractéristiques d'une chaîne de mesure : sensibilité, linéarité et rapidité ;
- connaître les différents types d'erreurs de mesure ;
- savoir faire un bilan rapide des erreurs de mesure et estimer l'erreur totale, absolue et relative ;
- comprendre la plage d'utilisation d'un capteur à partir de sa *datasheet* ;
- savoir conditionner un capteur passif en fonction de son type et du cahier des charges imposé ;

Chaîne d'acquisition



Chaîne de mesure analogique

- 1 Capteurs
 - Type de capteurs
 - Caractéristiques d'une chaîne de mesures
 - Erreurs de mesure
- 2 Conditionnement des capteurs passifs

1 Capteurs

- Type de capteurs
 - Capteur actif
 - Capteur passif
 - Capteur composite
 - Capteur intégré
 - Nature du signal de sortie
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Le capteur

Rappel - capteur

- grandeur électrique = charge Q (C), tension U (V), courant I (A) ou impédance Z (Ω) ;
- s :
- m :
- $s = f(m)$, facteurs de dépendance
 - ▶ loi(s) physique(s) sous-jacente(s)
 - ▶ constitution (matériaux, géométrie...) + fonctionnement du capteur (alim...)
 - ▶ environnement (T, P, humidité...)
- courbe d'étalonnage

1 Capteurs

- Type de capteurs
 - Capteur actif
 - Capteur passif
 - Capteur composite
 - Capteur intégré
 - Nature du signal de sortie
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Capteur actif

Définition - Capteur actif - *Active sensor*

-
- Δ peut être alimenté ou non : thermocouple \neq photodiode ;
-
- effet physique : type d'énergie de m (thermique, mécanique, électromagnétique ou chimique) \rightarrow énergie électrique ;
- transducteur thermo-électrique ou mécano-électrique ;

exemples : microphone, thermocouple, photodiode...

Capteur actif

Quelques exemples d'effets physiques :

Mesurande m	Effet physique	Grandeur de sortie s
Force F (pression ou accélération)	piézo-électricité	charge
Vitesse V ou Ω	induction électromagnétique	tension
Position x	effet Hall*	tension
Température T	thermo-électricité	tension
Flux électromagnétique Φ	effet photovoltaïque	tension

Table 1: Principes physiques - capteurs actifs

Capteur actif

Capteur générateur de force électro-motrice (f.e.m.) e :

- schéma éq. : circuit éq. de Thévenin
- exemple : thermocouple

Capteur générateur de courant :

- mesurande m → dans le matériau, génération d'électrons → modification du courant i :
 - ▶
 - ▶
- schéma éq. : circuit éq. de Norton (en général)
- exemple : photodiode

Photodiode

Capteur - photodiode

- famille des capteurs photoélectriques (phototransistor, photorésistance...)
- diode de structure particulière : photon $\Phi \rightarrow$ photo-courant i_R ;
- $i_R = i_0 + i_P$:
 - ▶ i_0 : courant d'obscurité (nA) ;
 - ▶ i_P : photo-courant ou courant photo-généré ($\mu\text{A} \rightarrow \text{mA}$) ;
- matériaux :
 - ▶
 - ▶
- exemples :
 - ▶ pour usage général : $S = 0,55\text{A/W}$, pour $\lambda = 750\text{nm}$, $t_R = 250\text{ns}$;
 - ▶ pour télécommande : $S = 0,70\text{A/W}$, pour $\lambda = 950\text{nm}$, $t_R = 20\text{ns}$;

Photodiode

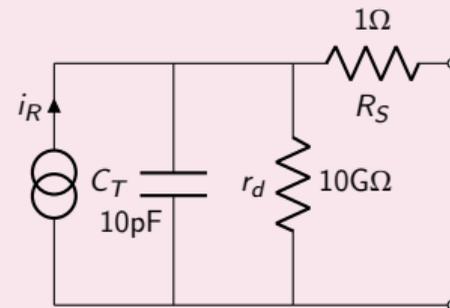
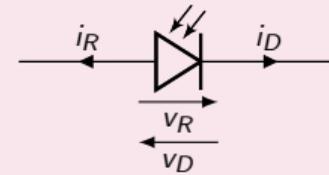
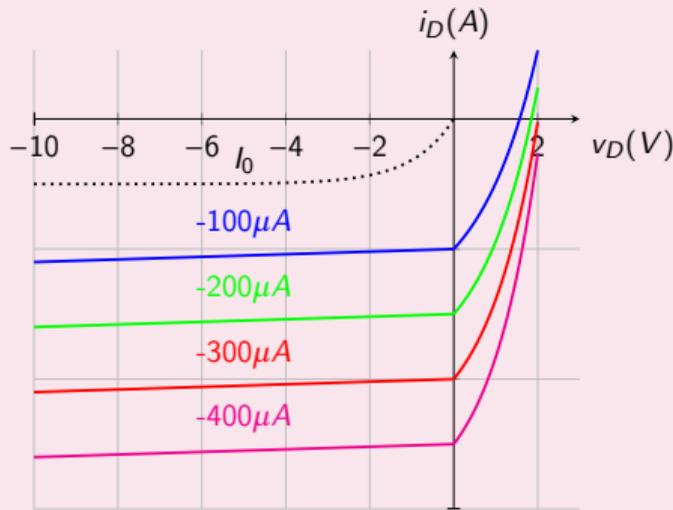
Capteur - photodiode



Photodiode BPW21 Si 320/850nm 8,39€

Photodiode

Capteur - photodiode

Caractéristique $i_D = f(v_D)$ - schéma équivalent

1 Capteurs

- Type de capteurs
 - Capteur actif
 - **Capteur passif**
 - Capteur composite
 - Capteur intégré
 - Nature du signal de sortie
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Capteur passif

Définition - Capteur passif - *Passive sensor*

-
- m peut faire varier :
 - ▶ les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles du capteur, **si élément mobile**
 - ▶ les propriétés électriques des matériaux : ρ , μ ou ε
 - ▶ les 2 éléments ci-dessus (beaucoup plus rarement)
- schéma équivalent électrique = impédance Z complexe (R, L, C ou combinaison)
- **doit être alimenté** par une source continue ou alternative
-
- **conditionnement** = montage potentiométrique, pont, AOp...

Capteur passif - exemple

Capteur - sonde métallique de température

- résistance d'un conducteur métallique : $R = \frac{L}{\sigma S}$;
- $\sigma (S.m^{-1})$, conductivité électrique donc R varie avec la température T ;
- loi du type : $R = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3) - R_0$, A , B et C parfaitement connus ;
- en général, $R(T)$ quasiment linéaire sur une grande plage de T (centaines de degrés) ;
-
- ⊕ meilleure précision que les thermocouples ;
- ⊕ utilisation plus aisée ;
- ⊖

Capteur passif - exemple - **exercice 2**



Sonde Pt100

Capteur - sonde Pt100

- standard industriel
- matériau = platine (Pt) ;
 - ▶ purification à 99,9999%
→ reproductibilité ;
 - ▶ inertie chimique → stabilité ;
 - ▶ T : -200°C → 1000°C ;
- mesurande m = température T ;
- impédance Z = résistance R ;
-
-

1 Capteurs

- Type de capteurs
 - Capteur actif
 - Capteur passif
 - **Capteur composite**
 - Capteur intégré
 - Nature du signal de sortie
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Capteur composite

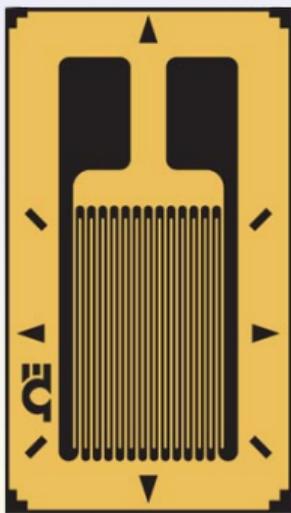
Définition - Corps d'épreuve

Définition - Capteur composite

- capteur composite = corps d'épreuve + capteur - **schéma** ;
- avantage = coût + facilité d'utilisation ;
- très utilisé pour la mesure des grandeurs **mécaniques** : mesure du déplacement ou de la déformation du corps d'épreuve ;
-

Exemples : traction F sur une barre, masse sismique, élongation d'un ressort. . .

Capteur composite - exemple



Jauge simple

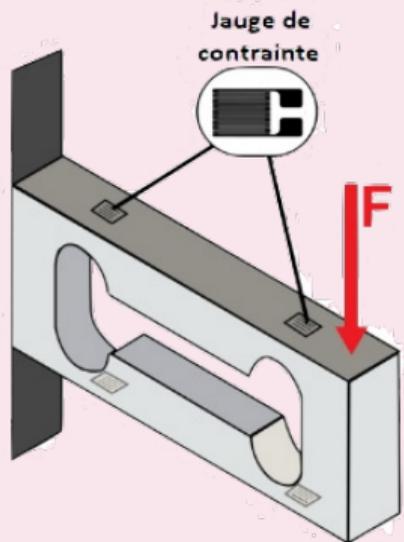
Capteur - jauges d'extensiométrie

- jauges métalliques ($e = 2\mu m$) + support en résine époxy ;
- collées sur la structure à étudier ;
-

- R_0 : résistance nominale de la jauge (120 ou 350Ω) ;
- $K = 0,5 \rightarrow 4$: facteur de jauge ;
- allongement relatif $\frac{\Delta L}{L}$ typiquement de 10^{-1} à 10^{-7} ;

Capteur composite - exemple

Capteur - jauges d'extensiométrie



1 Capteurs

- Type de capteurs
 - Capteur actif
 - Capteur passif
 - Capteur composite
 - **Capteur intégré**
 - Nature du signal de sortie
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Capteur intégré

Définition - Capteur intégré

-
- regroupe le capteur, un éventuel corps d'épreuve et la chaîne de conditionnement sur le même substrat (S_i) ;
-

Avantages ?

- ⊕
- ⊕ réduction des coûts (fabrication en série)
- ⊕ fiabilité accrue (moins de soudure)
- ⊕

Inconvénient ?

- ⊖

Exemples : résistance thermométrique, photodiode ou phototransistor. . .

1 Capteurs

- Type de capteurs
 - Capteur actif
 - Capteur passif
 - Capteur composite
 - Capteur intégré
 - **Nature du signal de sortie**
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Classification

3 types de capteurs en fonction de la nature du signal de sortie :

- capteurs logiques → sortie logique de type “tout ou rien” ou 0/1
Si $e > seuil \rightarrow s = 1$. Si $e \leq seuil \rightarrow s = 0$.
Utilisation : présence ou proximité d'un objet ;
- capteur analogique → sortie = tension ou courant analogique
Plages de variations industrielles :
 - ▶
 - ▶
- capteur numérique → sortie = code numérique binaire ou train d'impulsions (codage en nombre ou en fréquence)
Capteurs de distance, capteurs angulaires incrémentaux, lecteur de code à barres. . .

- 1 Capteurs
 - Type de capteurs
 - Caractéristiques d'une chaîne de mesures
 - Sensibilité
 - Résolution
 - Linéarité
 - Rapidité
 - Erreurs de mesure

- 2 Conditionnement des capteurs passifs
 - Introduction
 - Montage potentiométrique
 - Montage en pont
 - Oscillateur

- 1 Capteurs
 - Type de capteurs
 - Caractéristiques d'une chaîne de mesures
 - Sensibilité
 - Résolution
 - Linéarité
 - Rapidité
 - Erreurs de mesure

- 2 Conditionnement des capteurs passifs
 - Introduction
 - Montage potentiométrique
 - Montage en pont
 - Oscillateur

Définition - Sensibilité - *Sensitivity* S

- facilité d'exploitation → relation linéaire entre **les variations** du mesurande Δm et **les variations** de la grandeur de sortie Δs :

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

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m} \neq \frac{s}{m}$$

-
-

Sensibilité

SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3\text{ V}$, $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$, acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Each axis	± 3	± 3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		± 0.3		%
Package Alignment Error			± 1		Degrees
Interaxis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ¹			± 1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC)²					
Sensitivity at X_{OUT} , Y_{OUT} , Z_{OUT}	Each axis $V_S = 3\text{ V}$	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature ³	$V_S = 3\text{ V}$		± 0.01		%/ $^\circ\text{C}$

Sensibilité - accéléromètre ADXL335

Sensibilité

Définition - Sensibilité - *Sensitivity S*

- dépend des propriétés du capteur : matériaux, dimensions, assemblage, effets physiques. . .
- si possible indépendante :
 - ▶ de la valeur du mesurande m : linéarité ;
 - ▶
 - ▶ du temps : vieillissement du composant ;
 - ▶
- erreurs possibles :
 - ▶ dérive avec la température : $\pm 0,01\%/^{\circ}\text{C}$ - dessin
 - ▶ écart au cas idéal : $\pm 1\%$ - dessin

Sensibilité

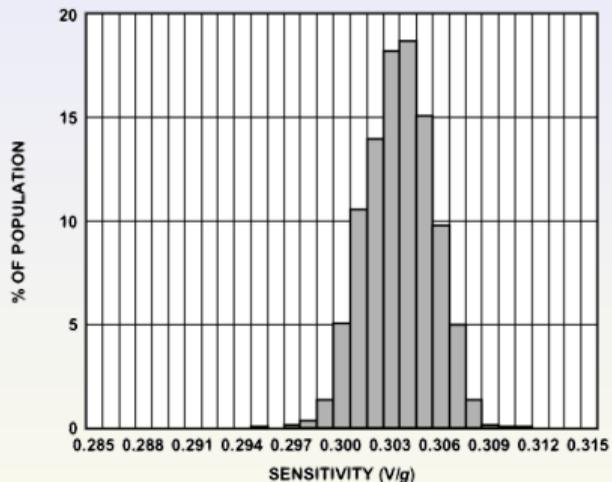


Figure 15. X-Axis Sensitivity at 25°C, $V_S = 3$ V

07-808-017

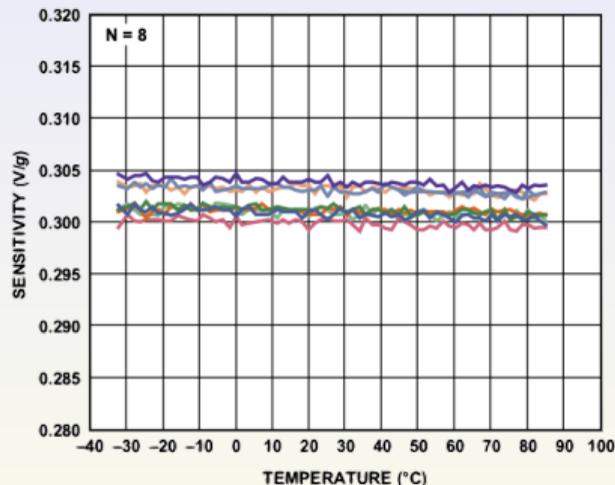


Figure 18. X-Axis Sensitivity vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_S = 3$ V

07-808-020

Sensibilité - accéléromètre ADXL335

Sensibilité

Remarques

- l'unité de S dépend du capteur et des ordres de grandeur - exemples :
 - ▶ accéléromètre analogique (ADXL335) : 300mV/g
 - ▶ gyromètre numérique (ITG3200) : 14,375LSB/(°/s)
 - ▶ résistance thermométrique : $\Omega/^\circ\text{C}$
- S fournie par le constructeur et permet :
 - ▶
 - ▶
- sensibilité statique $S_0 \neq$ sensibilité dynamique S_1 - **exercice - photodiode**

1 Capteurs

- Type de capteurs
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
 - Sensibilité
 - **Résolution**
 - Linéarité
 - Rapidité
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Résolution

Définition - Résolution - *measurement resolution*

-
- résolution $R = \Delta m$ pour une graduation, un digit ou un bit par exemple ;
-
- parfois indiqué sous le titre *Scale Factor*, dans les *datasheets* ;
- \neq *Output Resolution* = résolution du CAN (10 bits, 12 bits ...) ;

gyromètre numérique : $16,4 \text{ LSB}/^\circ/\text{s}$

capteur de vitesse automobile ?

position GPS ?

thermocouple ?

- 1 Capteurs
 - Type de capteurs
 - Caractéristiques d'une chaîne de mesures
 - Sensibilité
 - Résolution
 - **Linéarité**
 - Rapidité
 - Erreurs de mesure

- 2 Conditionnement des capteurs passifs
 - Introduction
 - Montage potentiométrique
 - Montage en pont
 - Oscillateur

Linéarité

Définition - Linéarité - *Linearity*

capteur linéaire si, sur toute ou partie de la plage de mesure :

-
-
- en régime statique : existence d'une partie **rectiligne** sur la caractéristique statique du capteur ;
- en régime dynamique :
 - ▶ exemple systèmes du 1^{er} ordre et du 2^e ordre
 - ▶ linéarité en régime statique $S(0)$
 - ▶ paramètres de $S_1(f)$ indépendants de m

Linéarité

Ecart à la linéarité - *non-linearity* :

- permet d'apprécier la "qualité" de la linéarité d'un capteur
- défini à partir de l'écart **maximum** entre la meilleure droite et la courbe d'étalonnage réelle
- exprimé en % de la **sortie pleine échelle** (*Full Scale*)

$$\%(e_L) = 100 \cdot \frac{|s - s_L|_{max}}{FS}$$

- **dessin** - exemple : ADXL103-203, $e_L = \pm 0,2\%$ et $FS = \pm 6g$

Si capteur non linéaire, possibilité de mettre dans la chaîne de mesure des **dispositifs de correction analogiques ou numériques**

- 1 Capteurs
 - Type de capteurs
 - Caractéristiques d'une chaîne de mesures
 - Sensibilité
 - Résolution
 - Linéarité
 - **Rapidité**
 - Erreurs de mesure

- 2 Conditionnement des capteurs passifs
 - Introduction
 - Montage potentiométrique
 - Montage en pont
 - Oscillateur

Rapidité

Définition - Rapidité - *Rapidity, Response time*

-
- rapidité “convenable” dépend de l'application
exemple - rapidité de 1s pour une sonde de température :
 - ▶ excellent si cette sonde équipe un thermostat de four ;
 - ▶ désastreux pour un capteur associé à un transistor de puissance !
-
- caractérisation du passage du régime transitoire au régime permanent

Rapidité

On définit :

- le temps de retard à la montée t_{rm} : temps nécessaire à s pour passer de sa valeur initiale à 10% de sa valeur finale
-
- le temps de réponse à $x\%$, $t_{x\%}$: temps mis pour atteindre $x\%$ de la valeur finale sans s'en écarter à plus de $(1-x)\%$ - exemple $tr_{95\%}$
-
- exercice photodiode
- lien avec la bande passante

dessin

1 Capteurs

- Type de capteurs
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Erreurs de mesure

Seuls mesurandes m de valeur **parfaitement connue** = grandeurs étalons puisque fixées par convention :

- définition de $1m$?
- définition de $1s$?
- définition de $1kg$?

Définition - Erreur de mesure

- ;
- \triangle valeur vraie du mesurande inaccessible (par définition) ;
- cette valeur peut être uniquement estimée
-

exercices

Limites d'utilisation d'un capteur

- **domaine nominal d'emploi** : conditions normales d'utilisation du capteur - aucune modification des spécifications du capteur
-
- **domaine de non-destruction** : caractéristiques métrologiques modifiées, mais de manière **irréversible** - nouvel étalonnage nécessaire
- domaine de non-destruction $>$ domaine de non-détérioration $>$ domaine nominal d'emploi

Limites d'utilisation d'un capteur

Exemples : capteur de force à jauge piezoélectrique N556-1

Intervalle	Mesurande	Température
nominal	1daN (EM)	0°C à 60°C
non-détérioration	1,5daN	-20°C à 100°C
non-destruction	3daN	-50°C à 120°C

Définition - Etendue de mesure - *Range*

-
- = domaine nominal d'emploi (en général)
-

En résumé - Wooclap

Comment bien choisir son capteur ?

Mesurande <i>Cahier des charges</i>	Capteurs <i>Caractéristiques métrologiques</i>
plage de variation	
variation min. à mesurer	
fréquence ou vitesse de variation	
précision de la mesure	
plage de température de fonctionnement	
placement	
composition de l'atmosphère	
bruit et parasites	

1 Capteurs

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

1 Capteurs

- Type de capteurs
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Définition - conditionnement

exemples :

- séparation d'impédance
-
- minimisation des grandeurs d'influence : T, P, fluctuations de la tension d'alim. . .
-
- filtrage
- démodulation . . .

Caractéristiques générales

Capteur passif ?

2 groupes principaux de conditionneurs :

- variation d'impédance du capteur → **amplitude** du signal de mesure v_m :
 - ▶
 - ▶
 - ▶ impédance R_c (cadre du cours) ou complexe
- variation d'impédance du capteur → **fréquence** du signal de mesure f_m :
 - ▶
 - ▶
 - ▶ traité sous forme d'exercice

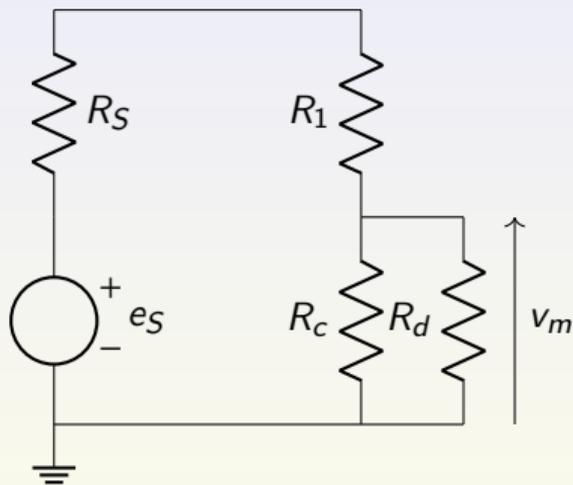
1 Capteurs

- Type de capteurs
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Principe



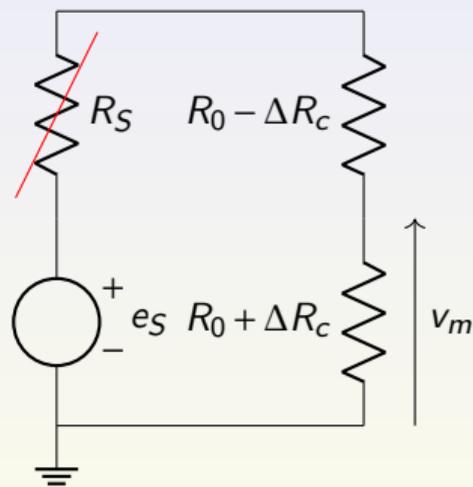
Montage potentiométrique

- capteur : $R_C = R_0 + \Delta R_C = R_0 + S\Delta m$
- objectif = v_m image de ΔR_C
- expression de v_m ? **calculs au tableau**
- condition sur l'appareil de mesure R_d ?
- **séparation d'impédance**
- condition sur le générateur R_S ?

$$v_m = e_S \cdot \frac{R_C}{R_C + R_1}$$

- linéarité du conditionneur ? **calculs au tableau**
- solution possible \rightarrow montage push-pull

Montage push-pull



Montage push-pull

- principe = 2 résistances qui varient en opposition
- $R_C = R_0 + \Delta R_C = R_0 + S.\Delta m$
- $R_1 = R_0 - \Delta R_C = R_0 - S.\Delta m$
- expression de v_m ? **calculs au tableau**

$$v_m = e_S \cdot \frac{R_0 + \Delta R_C}{2R_0}$$

- composante continue : $v_{m0} = \frac{e_S}{2}$

- partie variable : $\Delta v_m = \frac{e_S}{2} \frac{\Delta R_C}{R_0} = \frac{e_S}{2} \frac{S.\Delta m}{R_0}$

Inconvénients

$$v_m = \frac{e_S}{2} + \frac{e_S}{2} \frac{S\Delta m}{R_0}$$

1

Exemple : $v_{m_0} = 5V$ et $\Delta v_m = 5mV$

Cas des phénomènes statiques ou lentement variables ?

Cas des phénomènes dynamiques ?

2

Exemple : sonde de température, typiquement $\frac{\Delta R}{T_0} < 1\Omega/^\circ C$

3 dépendant du type de capteur : $R_0 + \Delta R_c / R_0 - \Delta R_c !$

Inconvénients

$$v_m = \frac{e_S}{2} + \frac{e_S}{2} \frac{S \Delta m}{R_0}$$

4

Δv_m dépend de Δm et de Δe_S

$$\Delta v_m = e_S \cdot \frac{S}{2R_0} \Delta m$$

$$\Delta v_m = (e_{S_0} + \Delta e_S) \cdot \frac{S}{2R_0} \Delta m$$

$$\Delta v_m = e_{S_0} \cdot \frac{S}{2R_0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta e_S}{e_{S_0}} \right) \cdot \Delta m$$

1 Capteurs

- Type de capteurs
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

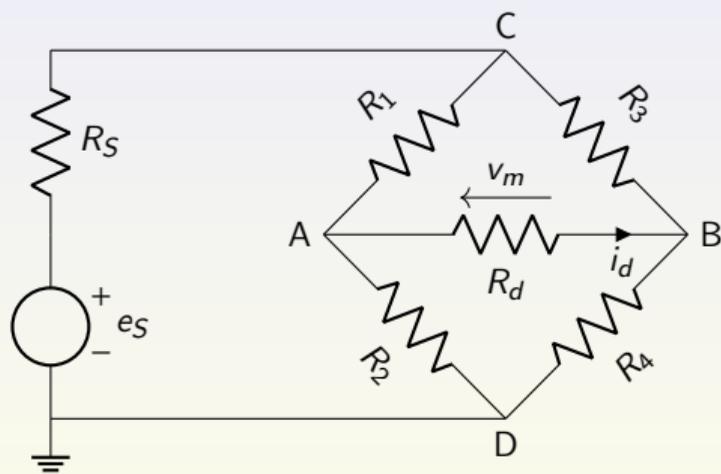
2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur

Définition - mesure de tension

-
- masse = potentiel de référence d'un montage, **fixé arbitrairement** à 0V (borne \ominus de l'alimentation) ;
-

Montage en pont



Pont de Wheatstone

- 2 montages potentiométriques
- **mesure différentielle** de tension
- plus de composante continue v_{m0}
- moins sensible aux bruits et perturbations que le montage potentiométrique
-
-
- **exercice pont de Wheatstone**

1 Capteurs

- Type de capteurs
- Caractéristiques d'une chaîne de mesures
- Erreurs de mesure

2 Conditionnement des capteurs passifs

- Introduction
- Montage potentiométrique
- Montage en pont
- Oscillateur