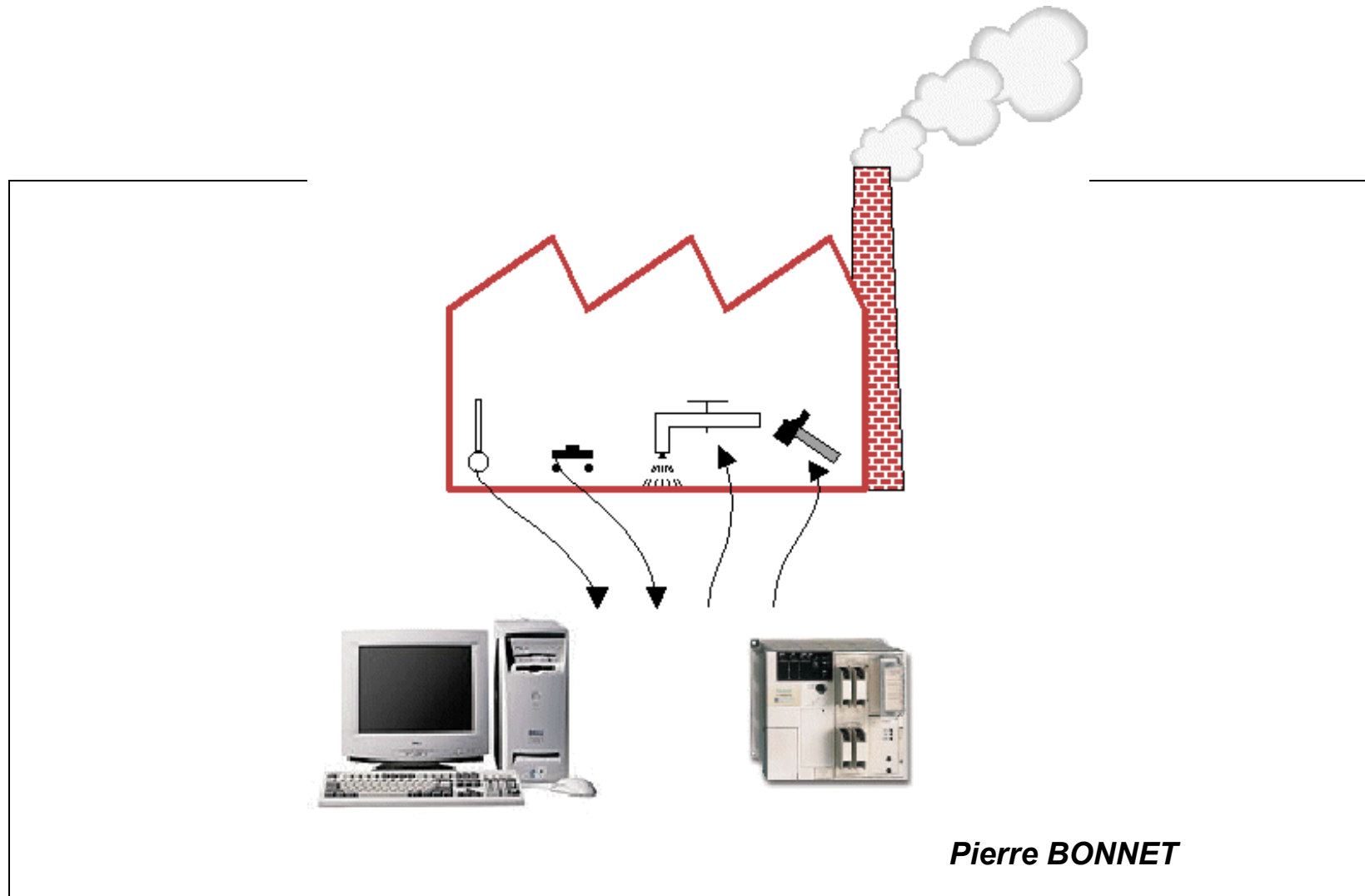


CAPTEURS - CHAINES DE MESURES



Pierre BONNET

Plan du Cours

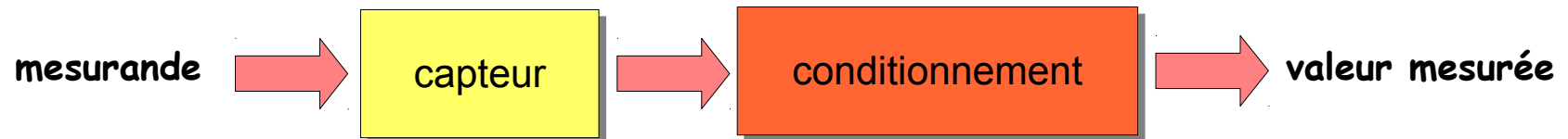
Propriétés générales des capteurs

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

Conditionnement et Electronique de mesure

Problématique

- Les signaux électriques issus de capteurs (thermocouples, ponts, jauges de contrainte...) sont généralement de faible niveau. Il est donc nécessaire de les amplifier pour atteindre des valeurs compatibles avec les outils de mesure modernes (chaîne de mesure numérique).
- La mesure du signal électrique doit se ramener à une tension continue, seule grandeur matériellement prise en compte.
- La mesure ne doit pas perturber le phénomène étudié (modification électrique, modification thermique...)
- La mesure doit être significative, même en environnement perturbé (perturbations électriques, thermique, lumineuse, autre grandeur d'influence...). La technique de conditionnement peut participer au rejet des perturbations et grandeurs d'influence.



Conditionnement et Electronique de mesure

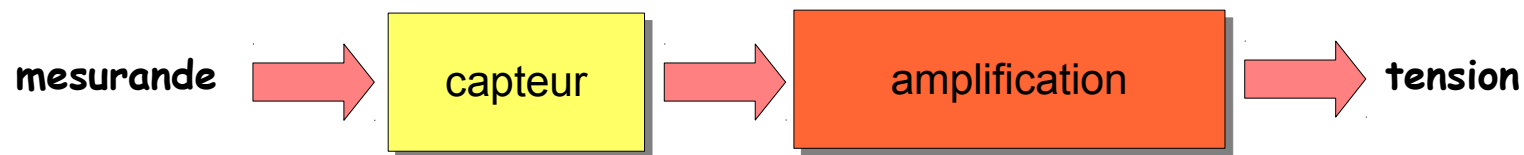
Problématique

- Les capteurs actifs fournissent un signal électrique par définition même.

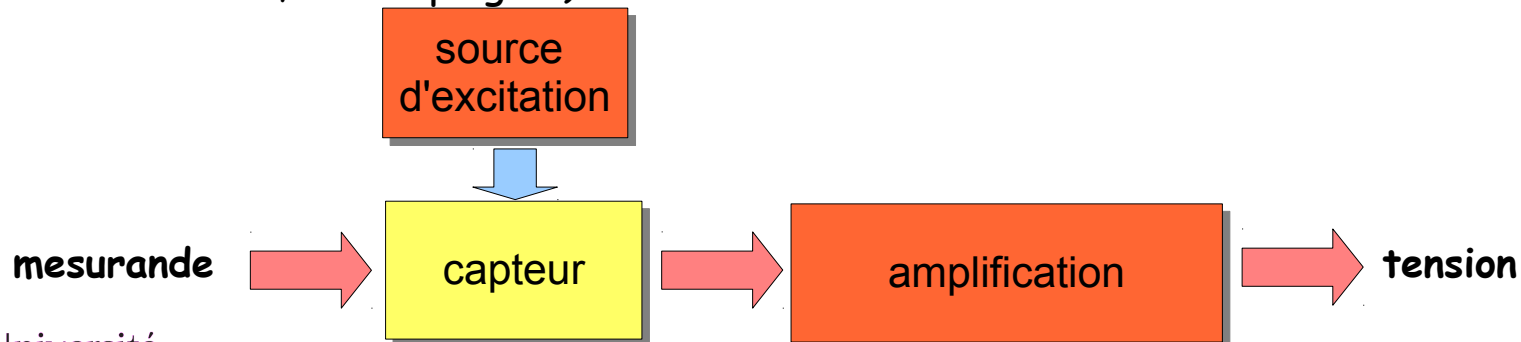
Les grandeurs usuelles sont :

- tension généralement de qqes millivolts
- courant en μA ou mA
- charge électrique

La mesure est une conversion de la grandeur en **tension** sans perturbation du phénomène source.



- Les capteurs passifs demandent une **source d'excitation** (continue ou alternative) pour mettre en évidence la propriété électrique (variation de résistance, de capacité, d'inductance, de couplage...)



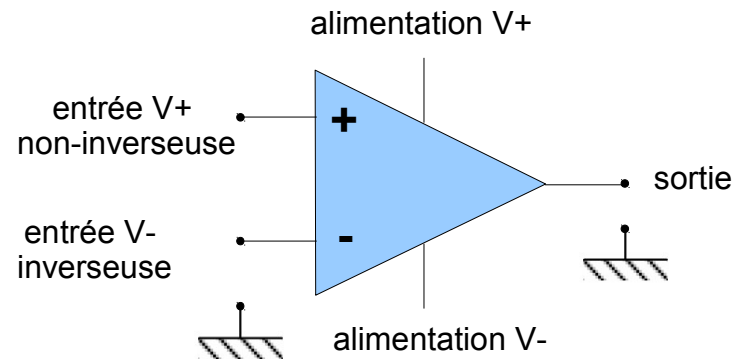
Conditionnement et Electronique de mesure

Amplificateur opérationnel

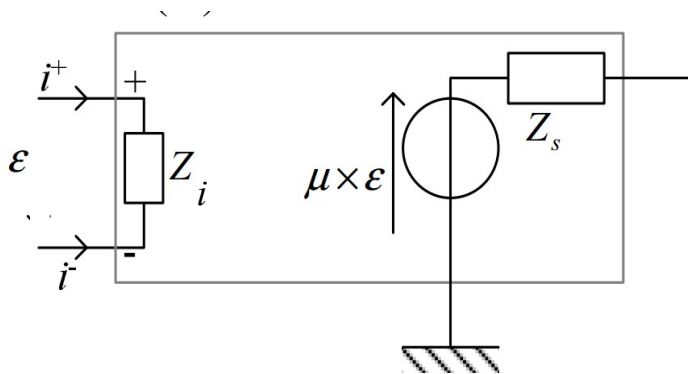
L'amplificateur opérationnel est la base du conditionneur.

Il permet de réaliser les principales fonctions de la mesure électronique des capteurs.

- Représentation symbolique :



- Modèle en régime linéaire :



- Z_i impédance d'entrée de l'amplificateur 10^5 à 10^{10} ohms
- i^+ , i^- courant des entrées 10^{-8} à 10^{-12} A
- Z_s impédance de sortie de l'ordre de 10 à 100 ohms
- μ gain complexe basse fréquence à petits signaux

Conditionnement et Electronique de mesure

Amplificateur opérationnel

● Spécificités réelles d'un amplificateur réel

- les courants de polarisation i_+ , i_- présentent une composante continue statique qui circulent dans le circuit associé à l'entrée considérée
- les courants de polarisation i_+ , i_- ne sont pas identiques (offset de courant)
- il existe une tension de décalage entre les entrées v_+ et v_- (offset de tension)
- la vitesse de variation de la tension de sortie est limitée (slew rate) , indépendamment de la bande passante.

● Modèle idéal de l'amplificateur opérationnel

- les courants de polarisation i_+ , i_- sont négligés, ainsi que l'offset de courant
- l'offset de tension est négligeable
- l'impédance d'entrée Z_i est ∞
- le gain μ est ∞ → cette propriété n'est pas adaptée à l'usage en mesure !!!!

La tension de sortie étant finie (bornée par les valeurs d'alimentation) , il en résulte que : $\varepsilon = (V_s + Z_s I_s) / A = 0$

En régime linéaire, l'amplificateur idéal a un comportement tel que : $V_+ = V_-$

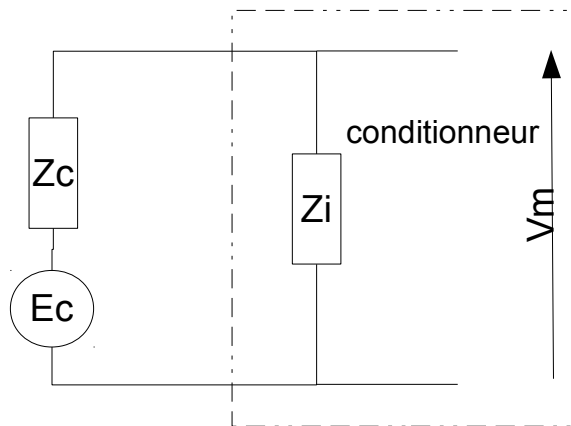
L'amplificateur opérationnel est l'outil de base pour amplifier les signaux de mesure.
Son gain doit être adapté pour les usages en instrumentation.

Conditionnement et Electronique de mesure

Capteurs actifs

- Capteur source de tension (exemple : thermocouple)

La fonction à réaliser par le conditionneur est une **amplification de tension**. La source E_c présente généralement une impédance de sortie Z_c . Le conditionneur charge cette source par sa propre impédance d'entrée. Par application de la règle du diviseur de tension, on obtient :



$$V_m = E_c \frac{Z_i}{Z_i + Z_c}$$

↳ Le conditionneur doit présenter une impédance d'entrée importante devant celle de la source. Le choix dépend de la précision souhaitée. Pour une précision 1/1000, il faut un rapport d'impédance de même valeur.

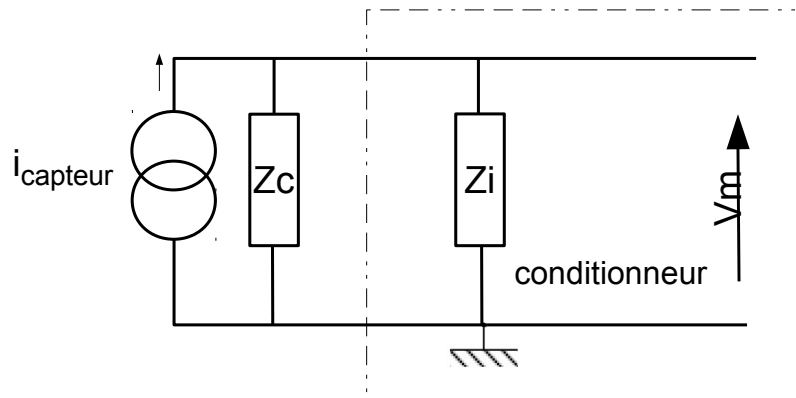
Le montage à retenir est le suiveur avec gain

Conditionnement et Electronique de mesure

Capteurs actifs

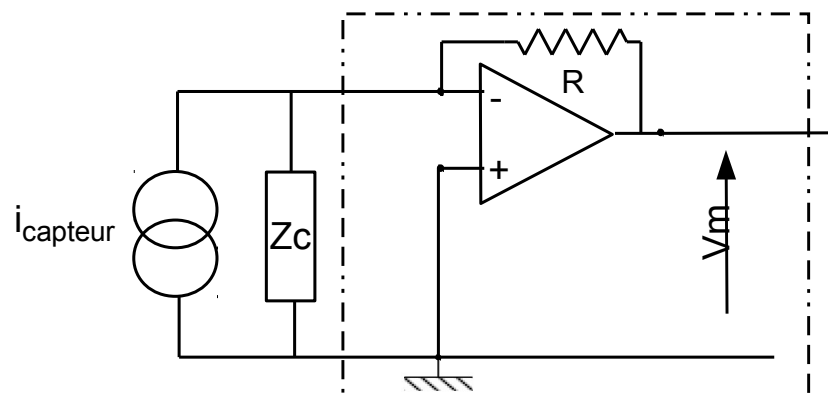
- Capteur source de courant (exemple : phototransistor)

Modèle du capteur à source de courant :



↪ Le conditionnement peut se limiter à une simple résistance calibrée $Z_i = R$. La tension mesurée est fonction de la résistance de mesure et de l'impédance parallèle du générateur de courant. Solution acceptable pour un générateur de courant pur ($Z_c \rightarrow \infty$)

Convertisseur courant/tension :



↪ Le capteur devient source de courant à tension nulle (et constante). Sa conductance parallèle n'intervient pas dans la valeur mesurée. La bande passante est largement augmentée si le capteur présente une impédance fortement capacitive.

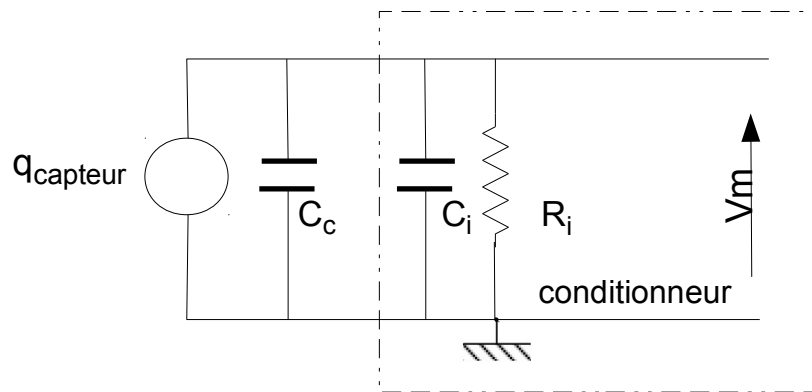
$$V_m = \frac{I_c}{R}$$

Conditionnement et Electronique de mesure

Capteurs actifs

- Capteur source de charge (exemple : capteur piézo-électrique)

Modèle du capteur générateur de charges :

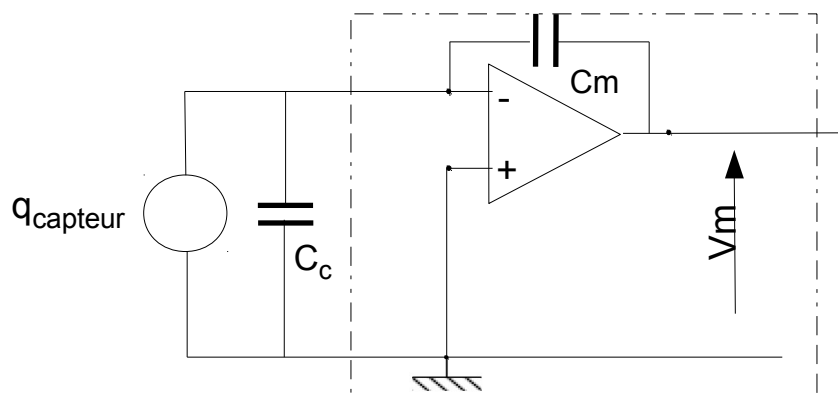


$$V_m = \frac{q_c}{C_c + C_i}$$

↳ la résistance interne d'entrée R_i introduit une décharge de la source (circuit du premier ordre)
Si la décharge est trop rapide (constante de temps faible), la mesure est impossible.

↳ Un tel capteur n'est adapté que pour des mesures à valeur moyenne nulle (accélération/ vibration par exemple)

Convertisseur charge/tension : amplificateur de charges



↳ Le capteur devient source de charges à tension nulle (et constante). Sa capacité parallèle n'intervient pas dans la valeur mesurée. La bande passante est largement augmentée si le capteur présente une impédance fortement capacitive.

$$V_m = -\frac{q_c}{C_m}$$

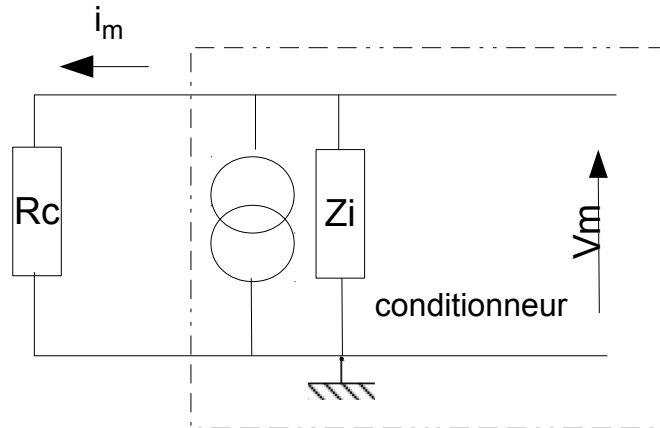
↳ Un circuit auxiliaire est nécessaire pour assurer la compensation de la dérive de l'intégrateur

Conditionnement et Electronique de mesure

Capteurs passifs

- Capteur résistif (exemple : sonde température PT100)

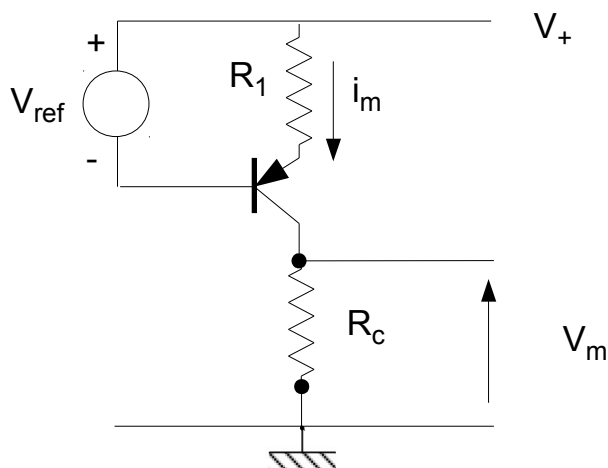
Mesure par générateur de courant



$$V_m = R_c i_m$$

- ↪ la mesure est directement proportionnelle à la valeur de résistance du capteur (linéarité intrinsèque de la mesure si $Z_i \rightarrow \infty$)
- ↪ la tension aux bornes de la résistance est non nulle, le générateur de courant travaille à tension variable (erreur de mesure si imparfait)

Montage élémentaire d'un générateur de courant:



$$V_{ref} = R_1 i_m + V_{be}$$

- ↪ Le transistor se comporte en générateur de courant de valeur :

$$i_m = \frac{V_{ref} - V_{be}}{R_1}$$

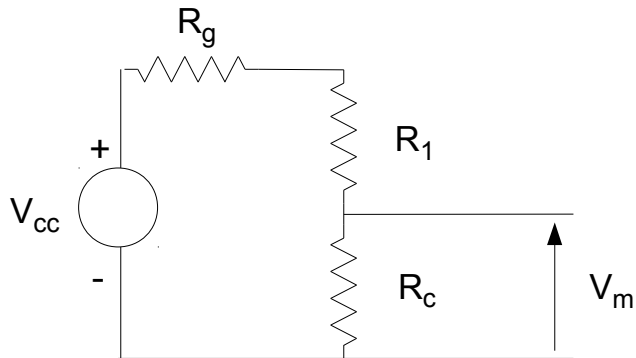
La mesure de R_c est directement référencé à la masse

Conditionnement et Electronique de mesure

Capteurs passifs

- Capteur résistif (exemple : sonde température PT100)

Montage dit "potentiométrique" (diviseur de tension)



Pont diviseur potentiométrique ($R_1=1k$, $V_{cc}=5v$)

$$V_m = \frac{R_c}{R_c + R_1} V_{cc} \quad \text{pour } R_g = 0$$

la mesure V_m est liée à la valeur de résistance R_m par une loi non-linéaire

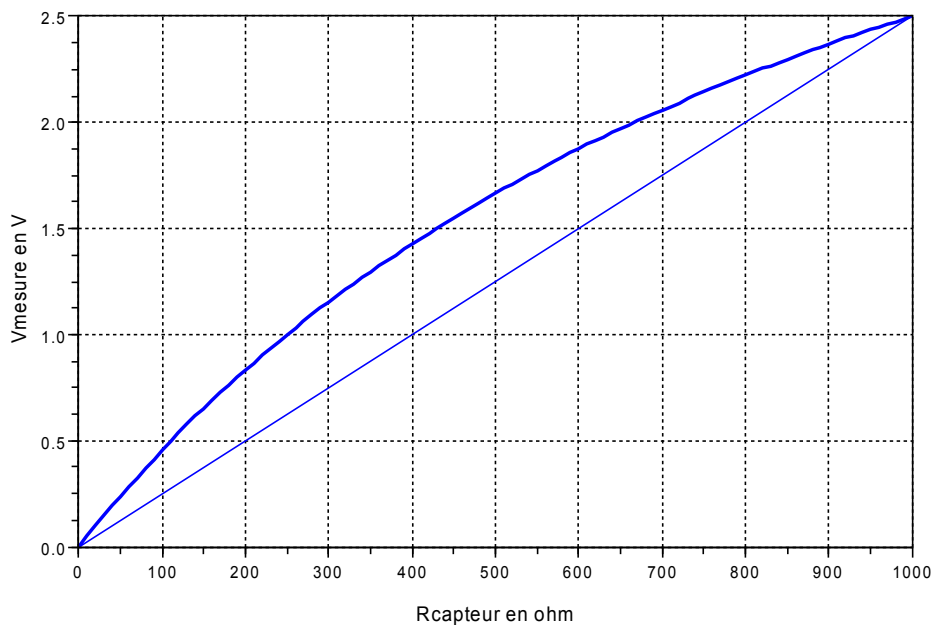
↳ sensibilité

$$\sigma = \frac{R_1}{(R_c + R_1)^2} V_{cc}$$

La sensibilité est maximale pour $R_1 = R_c$

Elle est alors :

$$\sigma = \frac{V_{cc}}{4 R_1}$$

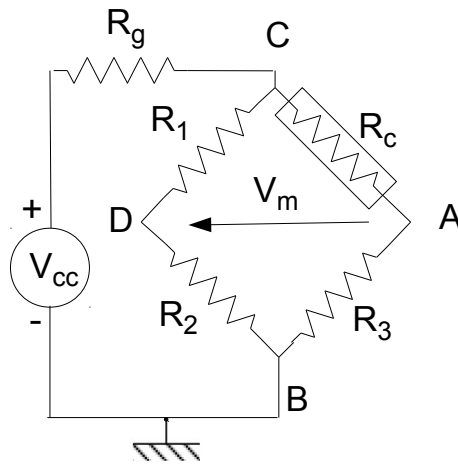


Conditionnement et Electronique de mesure

Capteurs passifs

- Capteur résistif (exemple : sonde température PT100)

Montage en pont (double diviseur de tension)



- On suppose que R_g est négligeable (V_{cc} référence de tension stabilisée)

$$\text{en A : } V_A = \frac{R_3}{R_3 + R_c} V_{cc} \quad \text{en D : } V_D = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{cc}$$

$$V_m = V_D - V_A = \frac{R_1 R_c - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_c)} V_{cc}$$

- Le pont est dit équilibré lorsque $V_m = 0 \Leftrightarrow R_1 R_c = R_2 R_3$

Pour cette valeur des résistances, les branches droites et gauches donnent le même rapport de division de V_{cc} .

- Pour simplifier la construction, on adopte souvent $R_1 = R_2 = R_3 = R_{c0}$ avec R_{c0} valeur de référence du capteur (point particulier)

$$V_m = \frac{R_1 R_c - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_c)} V_{cc} = \frac{R_{c0} R_c - R_{c0}^2}{2 R_{c0} (R_{c0} + R_c)} V_{cc}$$

Conditionnement et Electronique de mesure

Capteurs passifs

- Capteur résistif (exemple : sonde température PT100)

Montage en pont (double diviseur de tension)

- Etude variationnelle :

on suppose que $R_c = R_{c0} + \Delta R$

$$V_m = \frac{R_{c0}(R_{c0} + \Delta R) - R_{c0}^2}{2R_{c0}(2R_{c0} + \Delta R)} V_{cc} = \frac{R_{c0} \Delta R}{4R_{c0}^2 + 2R_{c0} \Delta R} V_{cc}$$

d'où :
$$V_m = \frac{\Delta R / R_{c0}}{1 + \Delta R / 2 R_{c0}} \frac{V_{cc}}{4}$$

- Pour des petites variations de résistance, la réponse est quasi-linéaire :

$$V_m = \frac{\Delta R}{R_{c0}} \frac{V_{cc}}{4}$$

- Dans le cas général, la sensibilité peut s'exprimer en fonction de $\alpha = \Delta R / R_{c0}$:
$$V_m = \frac{\alpha}{1 + \alpha/2} \frac{V_{cc}}{4}$$

en considérant que $\frac{1}{1 + \alpha/2} \simeq 1 - \alpha/2$,

la tension de sortie s'exprime par :
$$V_m = \alpha(1 - \alpha/2) \frac{V_{cc}}{4}$$

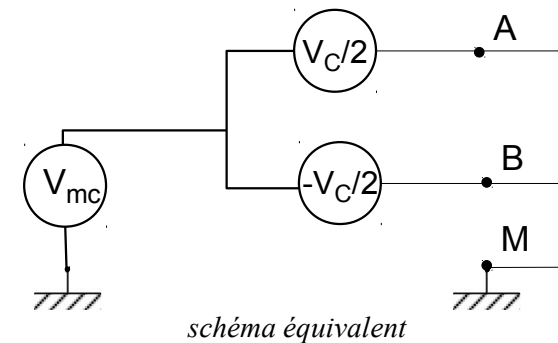
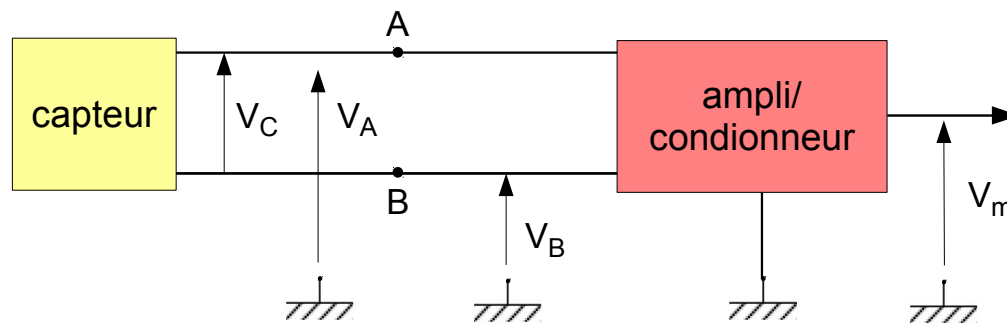
Cette relation montre le terme d'erreur de non-linéarité en α^2 . Le pont de mesure demande donc une correction pour être utilisable sur de grandes étendues de mesure de résistance.

Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

● Problématique de la mesure de tension

Les signaux issus de capteurs sont généralement de faible niveau et doivent être amplifiés. Le signal utile est généralement une *différence de potentiel* entre deux points, alors que les outils de mesure usuels (amplificateur opérationnel) évaluent le potentiel par rapport à une *référence* imposée appelée *masse*.



La tension de mesure V_C issue d'un capteur est la différence de potentiel entre les deux conducteurs A et B:

$$V_C = V_A - V_B$$

- On appelle tension de mode commun $V_{mc} = \frac{(V_A + V_B)}{2}$

D'où $V_A = V_{mc} + \frac{V_C}{2}$ et $V_B = V_{mc} - \frac{V_C}{2}$

La tension de mode mode peut être très importante devant la tension de signal (plusieurs volts pour un signal de quelques millivolts). Elle peut être stable, mais le plus souvent, elle est perturbée par des grandeurs externes (sources de bruits, couplages...)

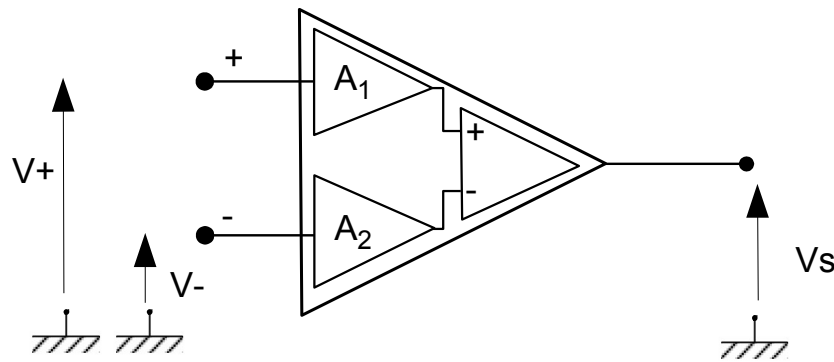
Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

● Amplification différentielle

La méthode la plus courante de mesure de potentiels dits "flottants" est le voltmètre. Cet appareil permet d'évaluer la différence de potentiel entre ses deux points de mesure ; son usage est limité à l'observation. En effet, sa conception même est de ne pas avoir de référence de masse ; son emploi est donc impossible pour une instrumentation couplée à d'autres équipements électroniques (PC par exemple).

- L'outil de mesure utilisé en instrumentation est l'amplificateur différentiel, composé de 2 amplificateurs et d'un soustracteur.



La tension de sortie est :

$$V_s = A_1 V^+ - A_2 V^-$$

On pose : $V_{cm} = \frac{V^+ + V^-}{2}$ et $V_{diff} = V^+ - V^-$ d'où $V_s = A_1(V_{cm} + V_{diff}/2) - A_2(V_{cm} - V_{diff}/2)$

On définit le gain de mode commun $A_{cm} = A_1 - A_2$ et le gain différentiel $A_{diff} = \frac{A_1 + A_2}{2}$

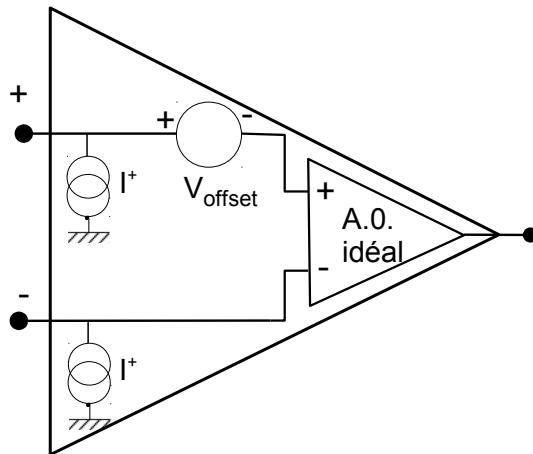
$$V_s = A_{diff} \left(V_{diff} + \frac{1}{\tau} V_{mc} \right) \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{A_{diff}}{A_{cm}} \quad \text{taux de réjection du mode commun}$$

Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

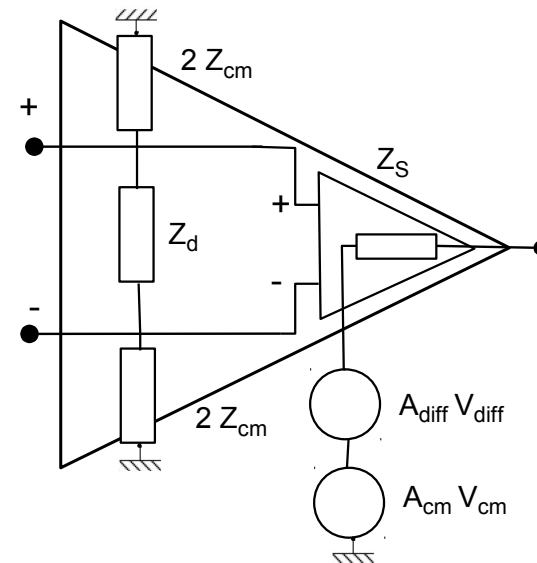
● Modélisation de l'amplificateur différentiel

L'amplificateur différentiel se présente comme un amplificateur opérationnel, avec les mêmes défauts inhérents à réalisation technologique.



Défauts statiques :

- courants d'entrée
- tension d'offset



Défauts dynamiques :

- impédances d'entrée de mode commun et différentielle
- impédance de sortie

Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

- Exemple de caractéristiques d'amplificateur différentiel moderne TL 2372/TL2374

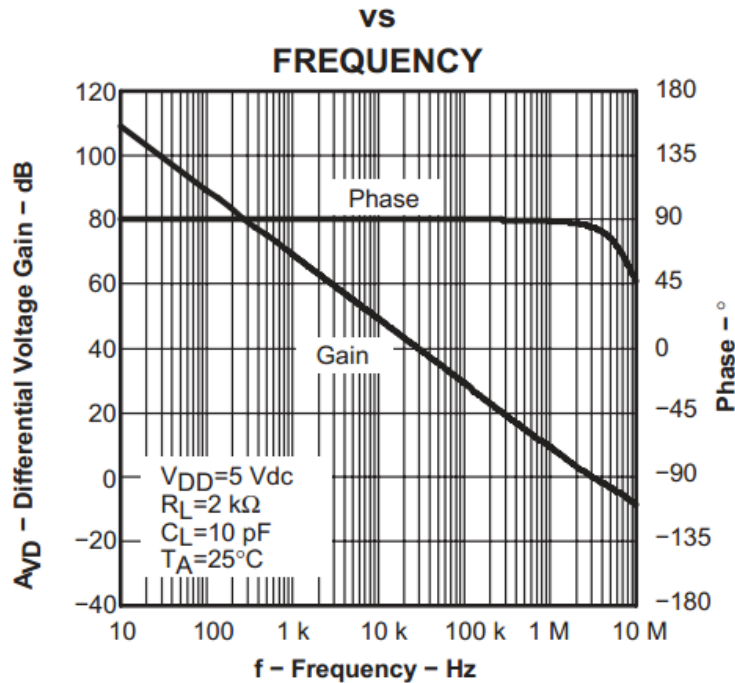
PARAMETER		TEST CONDITIONS		T _A	MIN	TYP	MAX	UNIT
V _{IO}	Input offset voltage	V _{IC} = V _{DD} /2, V _O = V _{DD} /2, R _S = 50 Ω		25°C		2	4.5	mV
				Full range			6	
αV _{IO}	Offset voltage drift			25°C		2		μV/°C
CMRR	Common-mode rejection ratio	V _{IC} = 0 to V _{DD} , R _S = 50 Ω,	V _{DD} = 5 V	25°C	55	72		dB
				Full range	54			
		25°C		67	80			
		Full range		64				
I _{IO}	Input offset current	V _{DD} = 15 V, V _O = V _{DD} /2, V _{IC} = V _{DD} /2,		25°C		1	60	pA
				70°C			100	
				125°C			1000	
I _{IB}	Input bias current	V _{DD} = 15 V, V _O = V _{DD} /2, V _{IC} = V _{DD} /2,		25°C		1	60	pA
				70°C			100	
				125°C			1000	
r _{l(d)}	Differential input resistance			25°C		1000		GΩ
C _{IC}	Common-mode input capacitance	f = 21 kHz		25°C		8		pF
PSRR	Supply voltage rejection ratio (ΔV _{DD} / ΔV _{IO})	V _{DD} = 2.7 V to 15 V, V _{IC} = V _{DD} /2, No load		25°C	70	80		dB
				Full range	65			

Conditionnement et Electronique de mesure

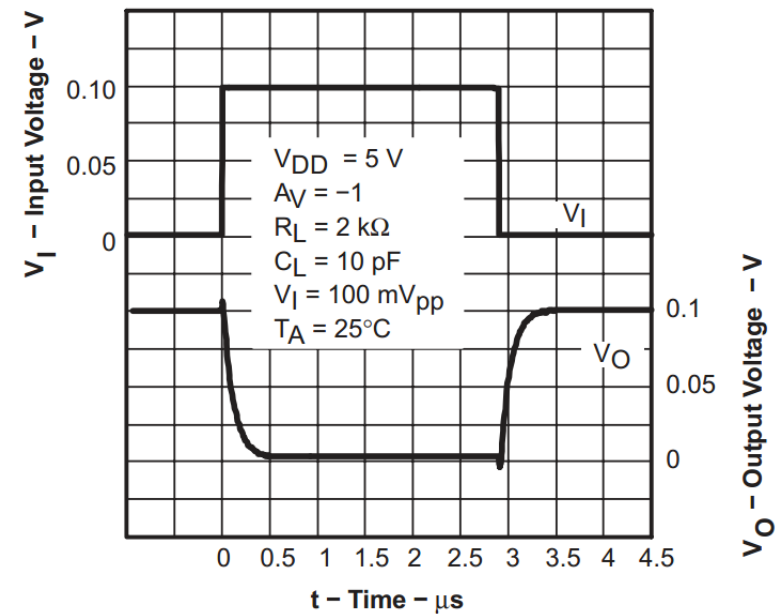
Mesure de la tension

- Exemple de caractéristiques d'amplificateur différentiel moderne TL 2372/TL2374 (suite)

DIFFERENTIAL VOLTAGE GAIN AND PHASE



INVERTING SMALL-SIGNAL RESPONSE



Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

- Amplificateur d'instrumentation

L'amplificateur d'instrumentation est l'amplificateur différentiel idéal .

- Caractéristiques souhaitées :

- mesure de la différence de potentiel pour une forte étendue de mode commun

$$V_s = A_{diff}(V^+ - V^-)$$

- impédance d'entrée infinie pour ne pas perturber le circuit à mesurer

- impédance de sortie nulle (pas d'affaiblissement du signal sous l'effet d'une charge de sortie)

- taux de réjection de mode commun infini (en valeur ou en dB)

- Gain différentiel réglable pour un moyen simple (choix d'une résistance, liaison numérique...)

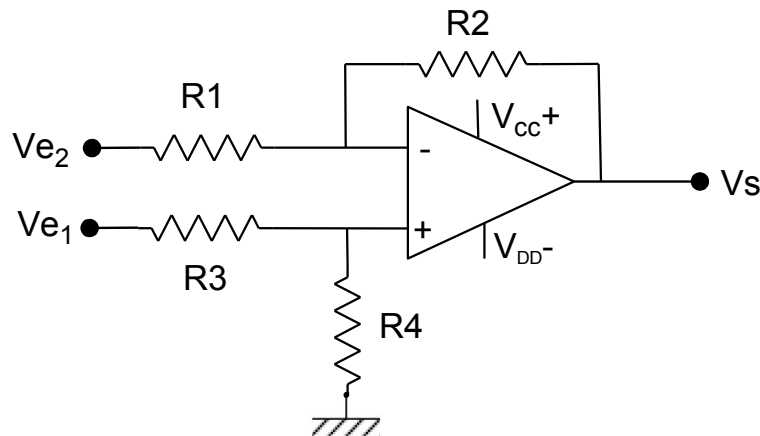
- La réalisation de l'amplificateur d'instrumentation est souvent basée sur un ou plusieurs amplificateurs opérationnels .

Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

● Amplificateur d'instrumentation

- Montage à Amplificateur opérationnel sommateur/soustracteur (idéal)



$$V^+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{e1} \quad V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{e2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_S$$

en régime linéaire : $V^+ = V^-$

$$\text{D'où : } V_S = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left[\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{e1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{e2} \right]$$

Pour avoir le même gain sur les deux entrées, on choisit $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$

D'où :

$$V_S = \frac{R_2}{R_1} (V_{e1} - V_{e2})$$

↪ Ce montage présente l'inconvénient de présenter une impédance d'entrée de l'ordre de grandeur de R_1 . Ce montage n'est donc adapté que si V_{e1} et V_{e2} sont des sources de tension pures (sorties d'autres amplis)

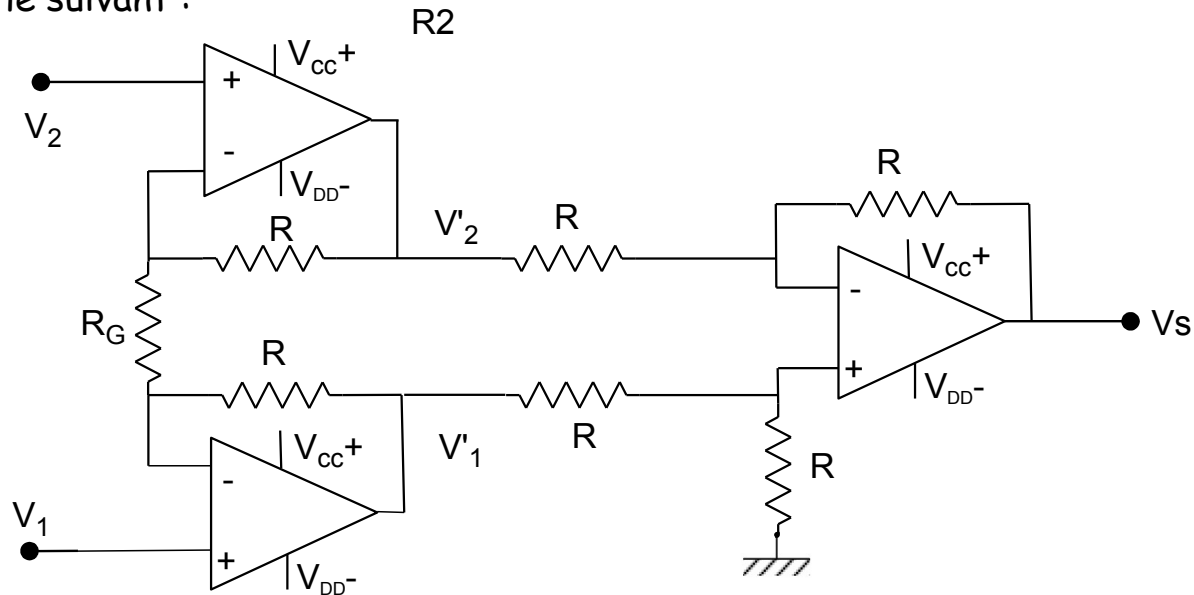
↪ Le taux de réjection du mode commun est directement lié à la stricte égalité des résistances.

Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

- Amplificateur d'instrumentation à 3 amplis

Le montage est le suivant :



Les entrées sont amplifiées par des étages suiveurs dont l'impédance d'entrée dynamique est très élevée.

$$V'_1 = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right)V_1 - \frac{R}{R_g}V_2 \qquad V'_2 = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right)V_2 - \frac{R}{R_g}V_1$$

$$V_s = \left(1 + 2\frac{R}{R_G}\right)(V_1 - V_2)$$

Le gain se fixe avec une seule résistance R_G ; il est au minimum de 1 .

Conditionnement et Electronique de mesure

Mesure de la tension

- Amplificateur d'instrumentation : exemple commercial

AD8220

FEATURES

Low input currents

- 10 pA maximum input bias current (B grade)
- 0.6 pA maximum input offset current (B grade)

High CMRR

- 100 dB CMRR (minimum), $G = 10$ (B grade)
- 80 dB CMRR (minimum) to 5 kHz, $G = 1$ (B grade)

Excellent ac specifications and low power

- 1.5 MHz bandwidth ($G = 1$)
- 14 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input noise (1 kHz)
- Slew rate: 2 V/ μs
- 750 μA quiescent supply current (maximum)

Versatile

- MSOP package
- Rail-to-rail output
- Input voltage range to below negative supply rail
- 4 kV ESD protection
- 4.5 V to 36 V single supply
- ± 2.25 V to ± 18 V dual supply
- Gain set with single resistor ($G = 1$ to 1000)

Qualified for automotive applications

APPLICATIONS

- Medical instrumentation
- Precision data acquisition
- Transducer interfaces

PIN CONFIGURATION

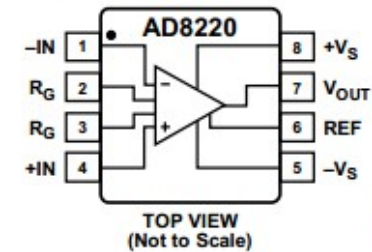


Figure 1.

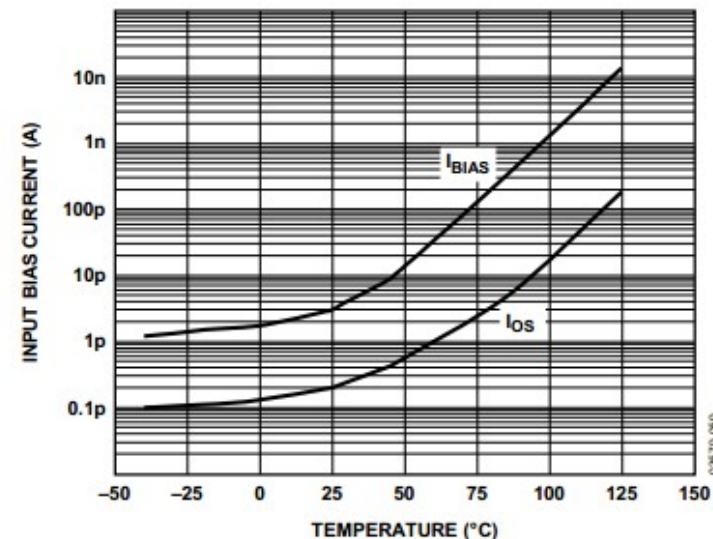
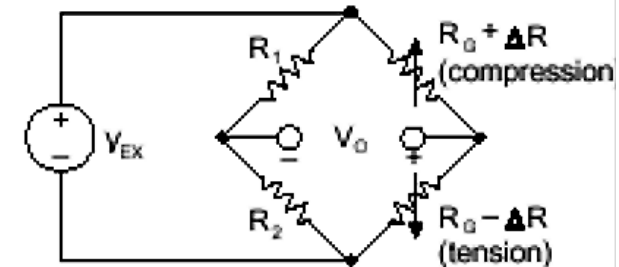
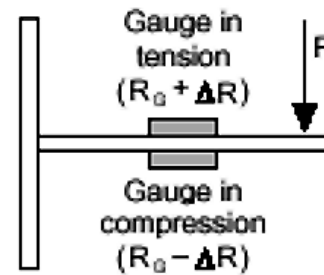
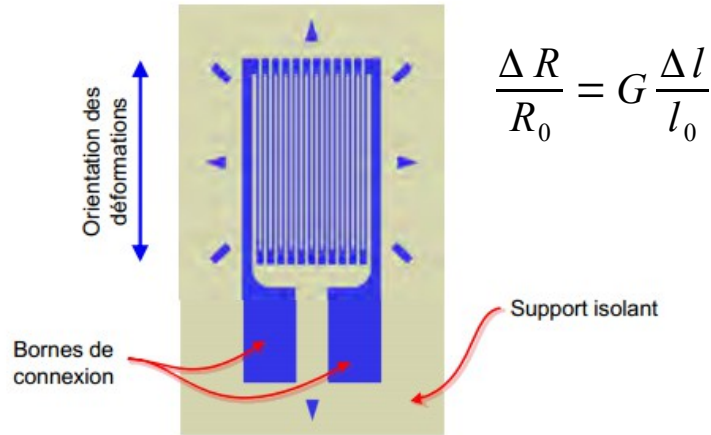


Figure 2. Input Bias Current and Offset Current vs. Temperature

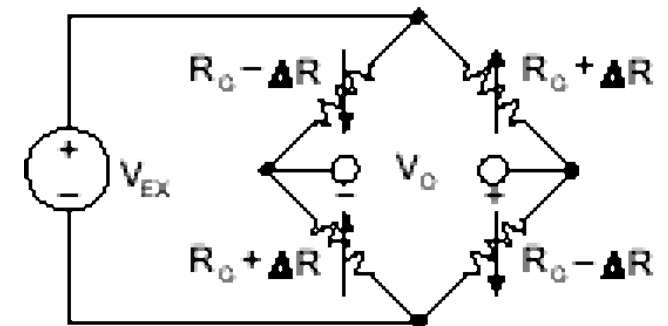
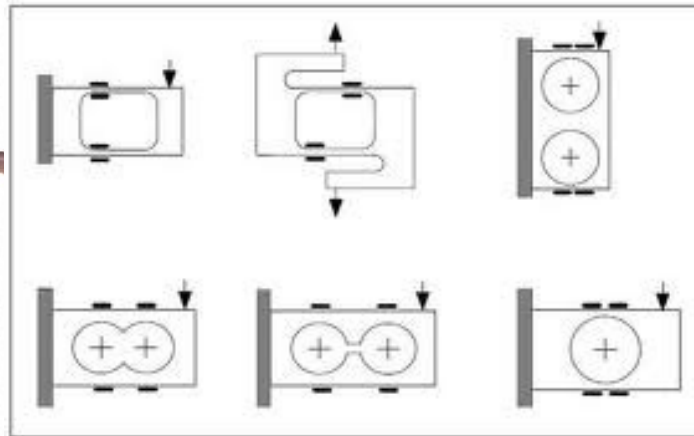
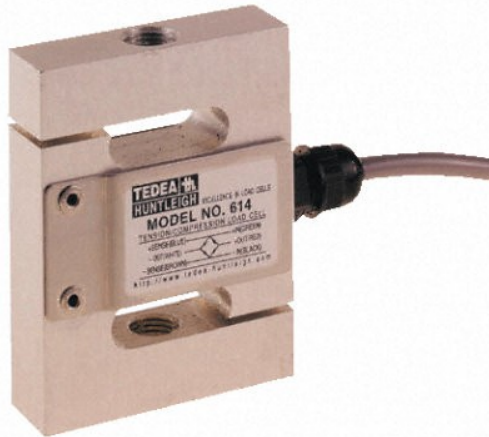
Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

- Jauges de contraintes



$$\frac{V_O}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \epsilon}{2}$$



$$\frac{V_O}{V_{EX}} = -GF \cdot \epsilon$$

Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

● Sonde température PT100



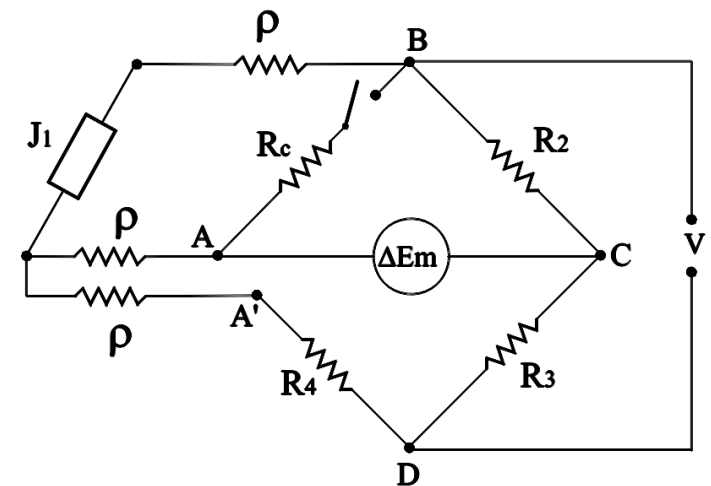
pont de mesure /transmetteur



$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma(\theta - 100)\theta^3)$$

Avec

- $\alpha = 3.9083 \cdot 10^{-3} K^{-1}$,
- $\beta = -5.775 \cdot 10^{-7} K^{-2}$,
- $\gamma = -4.183 \cdot 10^{-12} K^{-4}$ pour $\theta < 100^{\circ}C$. et 0 si $\theta > 100^{\circ}C$.

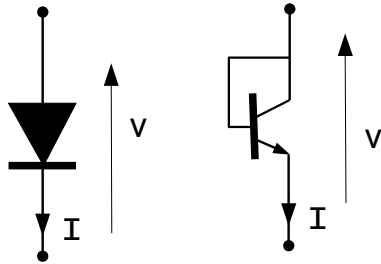


montage 3 fils pour compensation de la résistance des fils de câblage

Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

● Sonde température à diode



En polarisation directe : $I = I_0 e^{\frac{qv}{kT}}$ avec $I_0 = C T^m e^{\frac{-qv_\Phi}{kT}}$

v_Φ hauteur de la bande interdite (1,12V pour le silicium)

C constante dépendant de la géométrie de la jonction

m coefficient voisin de 3

$e \approx 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

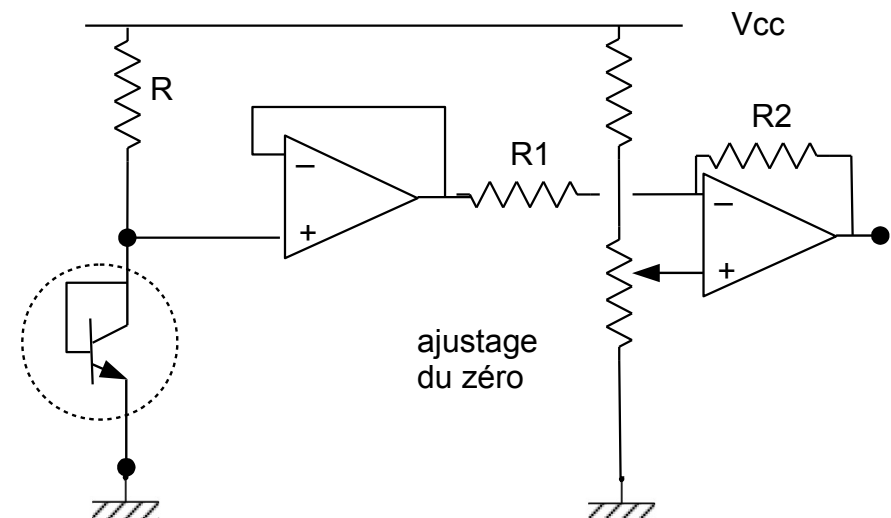
k constante de Boltzman $(1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K})$

- Le capteur est mesuré pour une température de référence T_1 ; soit v_1 la tension pour un courant I donné. La tension mesurée à la température T est :

$$v(T) = v_1 \frac{T}{T_1} + v_\Phi \left(1 - \frac{T}{T_1}\right) + m \frac{kT}{q} \ln \frac{T}{T_1}$$

Cette relation n'est pas linéaire, mais pour des composants spécialisés, l'erreur est de 1°C dans la gamme $[0 \text{ } 100^\circ\text{C}]$.

La sensibilité thermique d'une diode 1N4148 est de l'ordre de $-2,15\text{mV}/^\circ\text{C}$



montage économique avec résistance R d'injection du courant

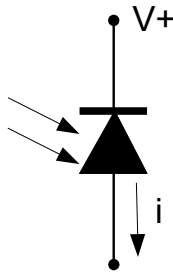
Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

● Capteur de luminance



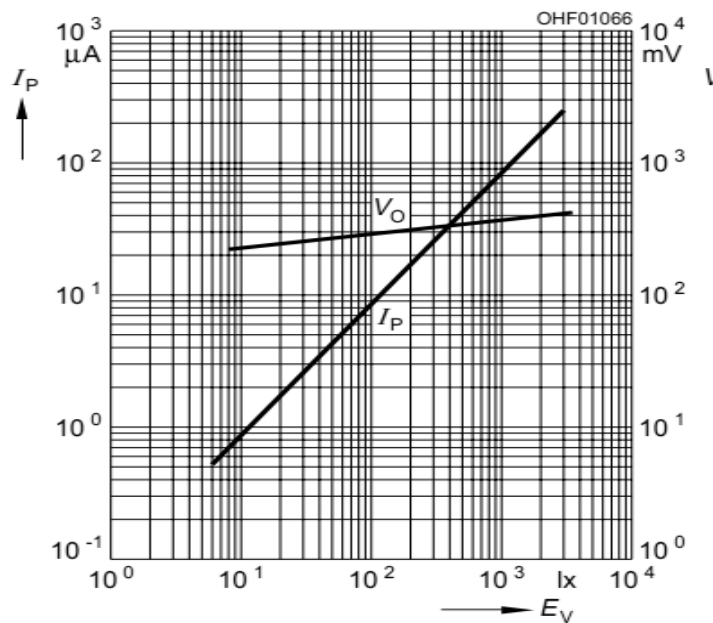
BPW34



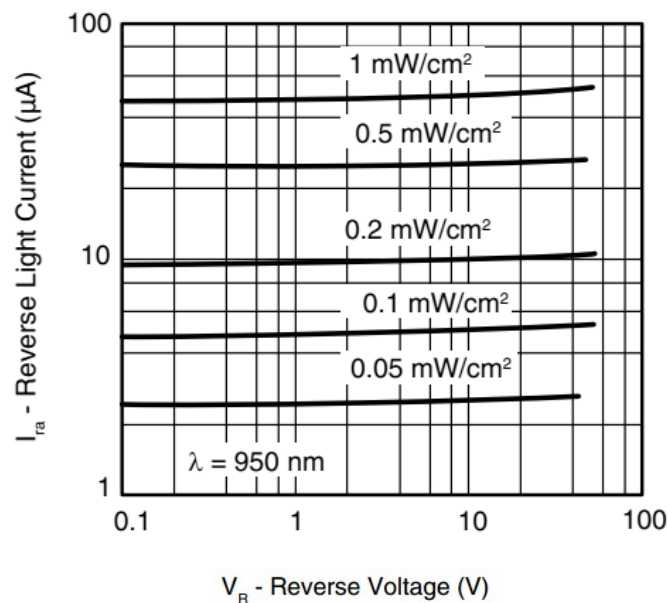
La diode peut être utilisée en deux modes :

- en générateur photovoltaïque
- en source de courant, la diode étant polarisée en inverse

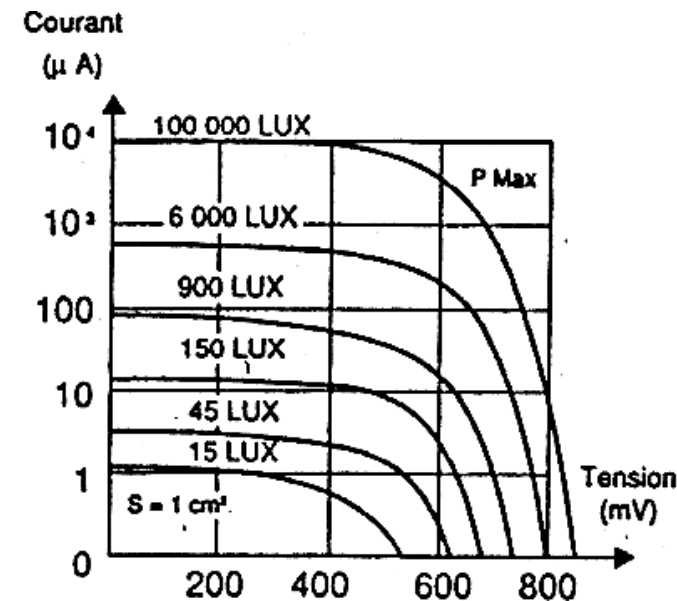
La tension en générateur étant peu dépendante de l'éclairement, seul le montage en courant est utilisable une mesure de lumière.



Photocurrent $I_P = f(E_V)$, $V_R = 5\text{ V}$
 Open-circuit voltage $V_O = f(E_V)$



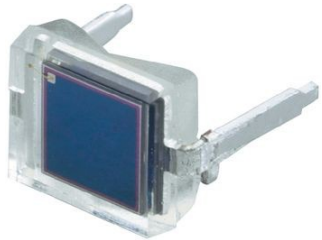
Reverse Light Current vs. Reverse Voltage



Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

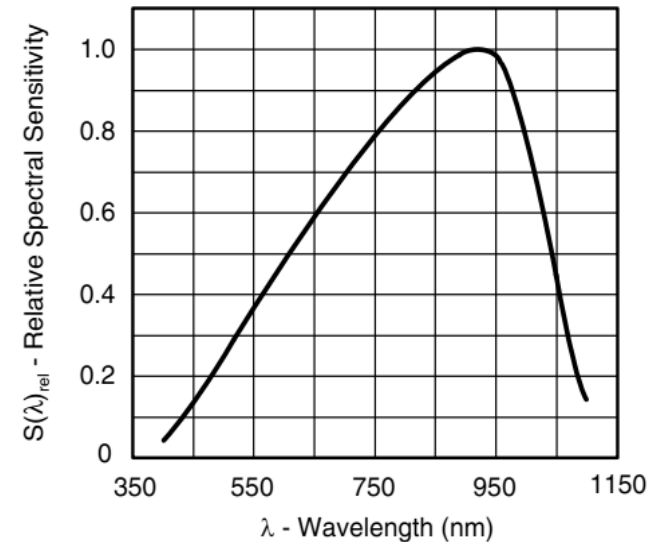
● Capteur de luminance



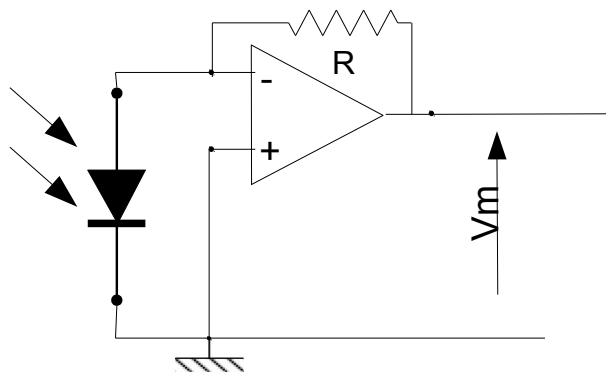
BPW34

Les caractéristiques essentielles pour le mesure sont :

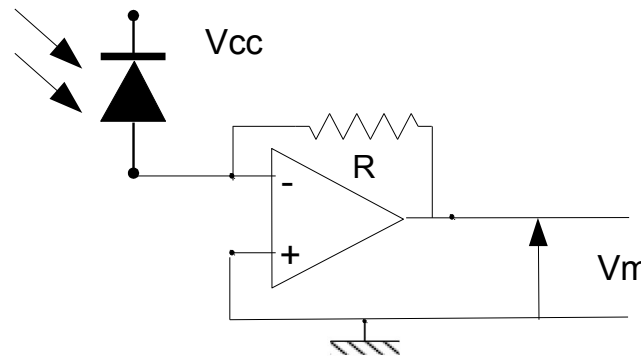
- la sensibilité spectrale, spécifique à chaque type de capteur ; généralement différente de la courbe CIE
- le courant d'obscurité, fonction directe de la température .



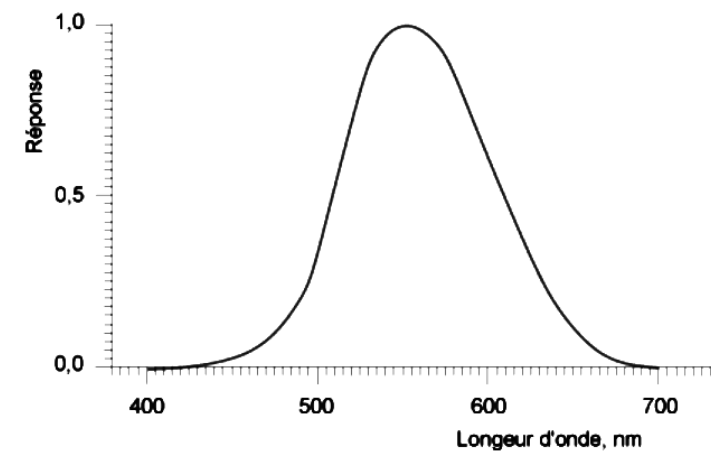
Relative Spectral Sensitivity vs. Wavelength



Montage en photo-générateur à tension nulle avec amplificateur de trans-impédance (ampli de courant)



Montage en polarisation inverse avec mesure du courant de fuite inverse



courbe CIE de sensibilité spectrale de l'oeil

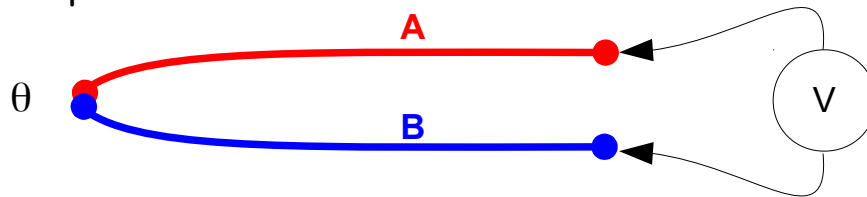
Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

● Mesure de température par thermocouple

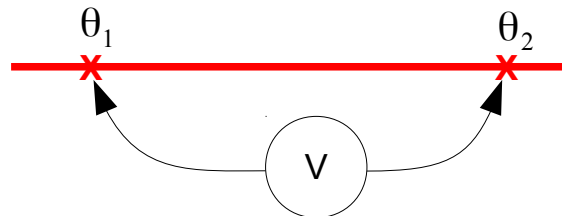
Un thermocouple est une jonction entre deux matériaux conducteurs de nature différente porté à une température θ non-nulle. Ce couple est le siège d'une tension ayant deux origines distinctes qui se superposent.

- La soudure produit une tension liée à la nature des conducteurs et à la température absolue. C'est l'effet **thermoélectrique** découvert par **Seebeck** en 1821.



- L'effet inverse de l'effet Seebeck est l'effet **Peltier** : le passage d'un courant dans une jonction de deux matériaux provoque la diminution ou l'augmentation de température de cette jonction.

- l'effet **Thomson** est l'apparition d'une fem le long d'un conducteur lorsque celui-ci est soumis à un gradient de température.



L'effet thermoélectrique est la somme des tensions de Seebeck et de Thomson. La sensibilité globale est entre 1 et 70 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ pour des combinaisons de métaux standards.

Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

● Mesure de température par thermocouple

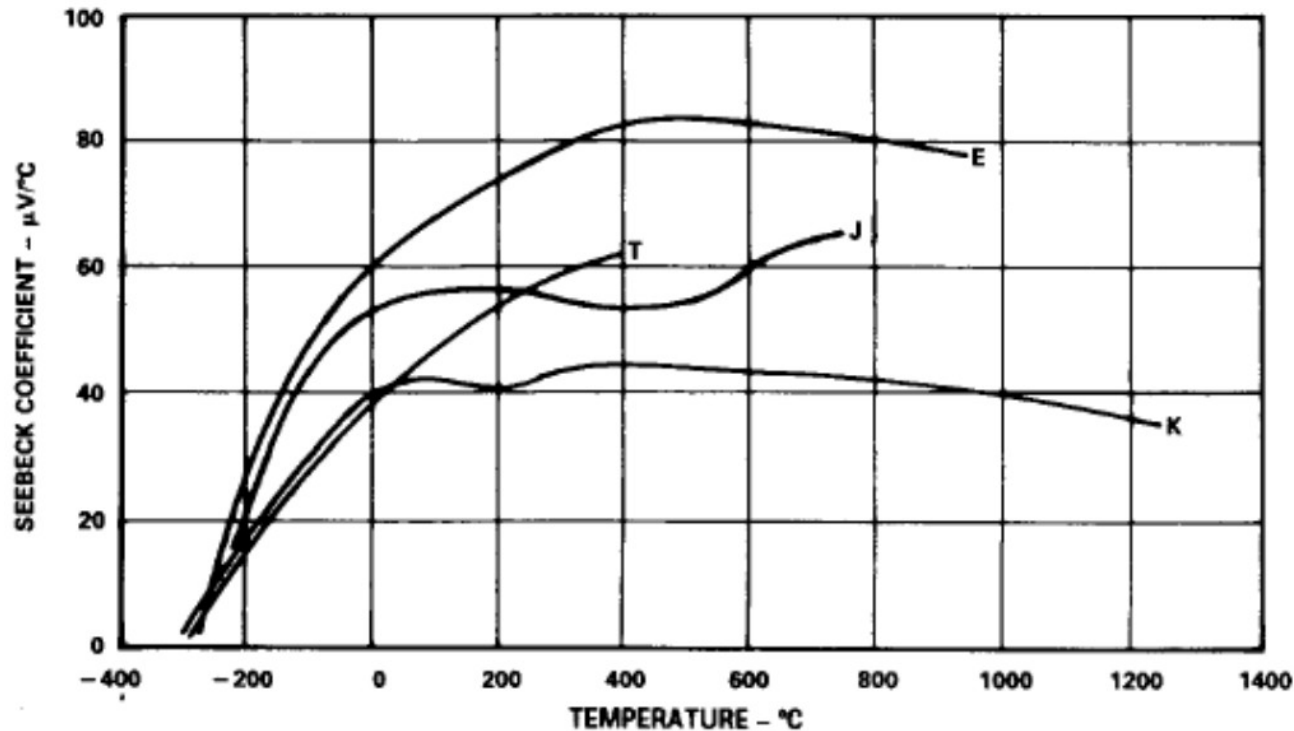
Type	Temperature range °C (continuous)	Temperature range °C (short term)	Tolerance class one (°C)	Tolerance class two (°C)	IEC Color code	BS Color code	ANSI Color code
K	0 to +1100	-180 to +1300	±1.5 between -40 °C and 375 °C ±0.004×T between 375 °C and 1000 °C	±2.5 between -40 °C and 333 °C ±0.0075×T between 333 °C and 1200 °C			
J	0 to +750	-180 to +800	±1.5 between -40 °C and 375 °C ±0.004×T between 375 °C and 750 °C	±2.5 between -40 °C and 333 °C ±0.0075×T between 333 °C and 750 °C			
N	0 to +1100	-270 to +1300	±1.5 between -40 °C and 375 °C ±0.004×T between 375 °C and 1000 °C	±2.5 between -40 °C and 333 °C ±0.0075×T between 333 °C and 1200 °C			
R	0 to +1600	-50 to +1700	±1.0 between 0 °C and 1100 °C ±[1 + 0.003×(T - 1100)] between 1100 °C and 1600 °C	±1.5 between 0 °C and 600 °C ±0.0025×T between 600 °C and 1600 °C			Not defined.
S	0 to 1600	-50 to +1750	±1.0 between 0 °C and 1100 °C ±[1 + 0.003×(T - 1100)] between 1100 °C and 1600 °C	±1.5 between 0 °C and 600 °C ±0.0025×T between 600 °C and 1600 °C			Not defined.
B	+200 to +1700	0 to +1820	Not Available	±0.0025×T between 600 °C and 1700 °C	No standard use copper wire	No standard use copper wire	Not defined.
T	-185 to +300	-250 to +400	±0.5 between -40 °C and 125 °C ±0.004×T between 125 °C and 350 °C	±1.0 between -40 °C and 133 °C ±0.0075×T between 133 °C and 350 °C			
E	0 to +800	-40 to +900	±1.5 between -40 °C and 375 °C ±0.004×T between 375 °C and 800 °C	±2.5 between -40 °C and 333 °C ±0.0075×T between 333 °C and 900 °C			
Chromel/AuFe	-272 to +300	n/a	Reproducibility 0.2% of the voltage; each sensor needs individual calibration.				

source : Wikipédia

Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

- Mesure de température par thermocouple



Source : ??????

Coefficients de sensibilité des thermocouples usuels

La sensibilité d'un thermocouple n'est pas constante : la courbe de réponse n'est donc pas linéaire .
Il faudra donc corriger la mesure électrique pour exploiter correctement un thermocouple sur une large gamme de température.

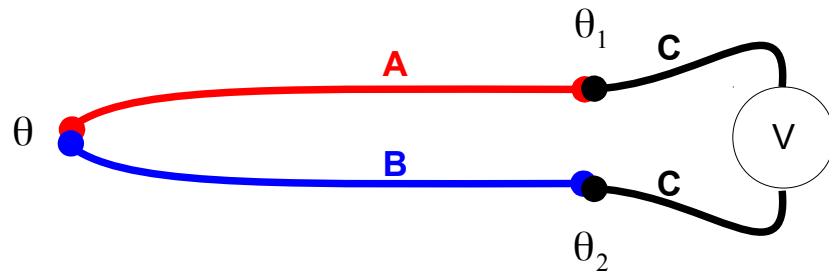
Pour les types J et K , les plus courants industriellement, la variation de sensibilité est souvent négligée.

Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

- Mesure de température par thermocouple

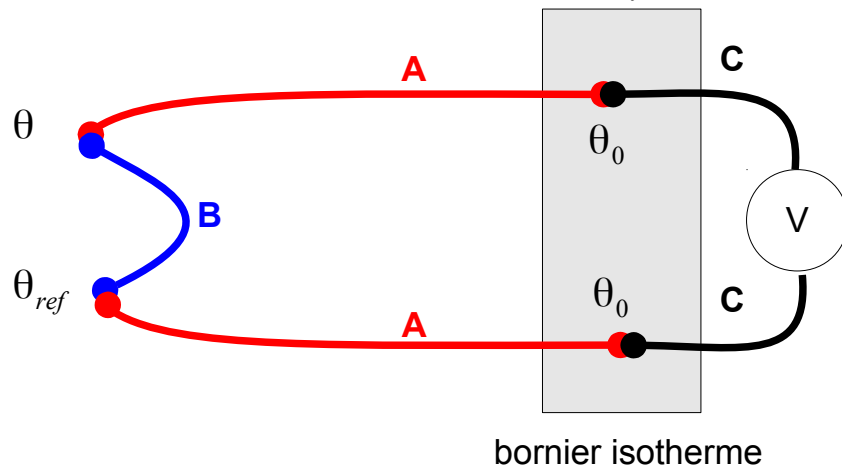
La mesure directe de la tension thermoélectrique ne permet pas d'évaluer θ . En effet, les sources secondaires à la température θ_1 et θ_2 s'ajoutent à la tension principale.



$$V = V_{CA}(\theta_1) + V_{AB}(\theta) + V_{BC}(\theta_2)$$

Pour $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0$ (jonction isotherme), on peut montrer que la tension mesurée est fonction de l'écart ($\theta - \theta_0$) quel que soit le matériau C utilisé.

- Montage avec soudure froide θ_{ref}



$$\begin{aligned} V &= V_{CA}(\theta_0) + V_{AB}(\theta) + V_{BA}(\theta_{ref}) + V_{AC}(\theta_0) \\ &= V_{AB}(\theta) + V_{BA}(\theta_{ref}) \\ &= V_{AB}(\theta) - V_{AB}(\theta_{ref}) \end{aligned}$$

En supposant la réponse linéaire (petits écarts) :

$$V = V_{AB}(\theta - \theta_{ref})$$

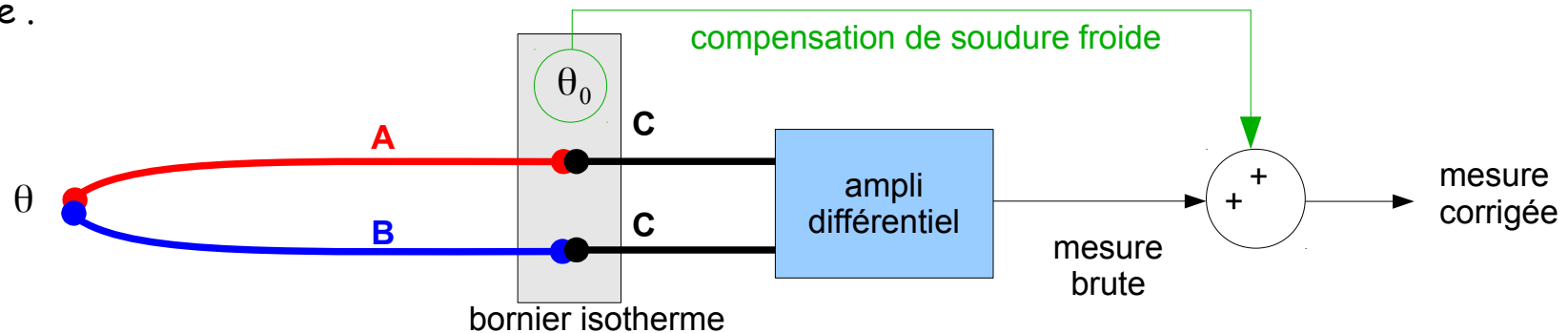
Ce montage est peu employé de nos jours, car il est difficile de disposer d'une source de température de référence. elle nécessite un contrôle de température

Conditionnement et Electronique de mesure

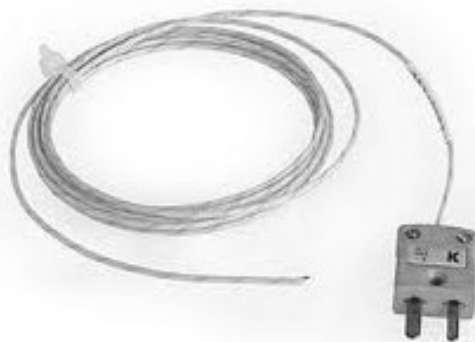
Exemples de montages

● Mesure de température par thermocouple

La mesure moderne de la tension thermoélectrique fait appel à un couplage direct isotherme avec l'appareil de mesure .



La température de bornier étant dans un domaine restreint, il est possible d'employer un moyen simple de son évaluation : semi-conducteur, diode, PT100...



thermocouple "nu"



thermocouple protégé



mini-connecteurs isothermes



module de mesure rail DIN

Conditionnement et Electronique de mesure

Exemples de montages

- Mesure de température par thermocouple

Exemple commercial :

Prend en charge tout type de thermocouple , avec correction de la linéarité (DSP intégré)

Analog Input Channels		
Number of Channels		1
Differential Channels		1
Bandwidth		5.24Hz
Speed/Bandwidth Details		Bandwidth at -3dB.
Cold Junction Compensation		Independent input channel for CJC
Accuracy	Relative Accuracy	±0.2% of full range
	Temperature Drift	±2°C
	Accuracy Details	CJC offset is adjustable from -25.6deg. C to +25.4 deg. C via a switch.
Noise	CMRR (Common Mode Rejection Ratio)	<86dB
	NMRR (Normal Mode Rejection Ratio)	<60dB @ 60Hz, min.
Input Protection		Protected against field voltages to 240Vrms, max.
Isolation, Field-to-Logic		3000VDC
Isolation, Channel-to-Channel		3000VDC
Isolation Details		3000VDC optical isolation on input, output, and power lines.
Analog Output Channels		
Number of Analog Output (D/A) Channels		1
Unipolar Output Ranges		0 to +10V
Current Output Ranges		0 to 20mA
Output Range Selection		Switch
Accuracy	Relative Accuracy	+/-0.2% full range.
Output Impedance		50Ω