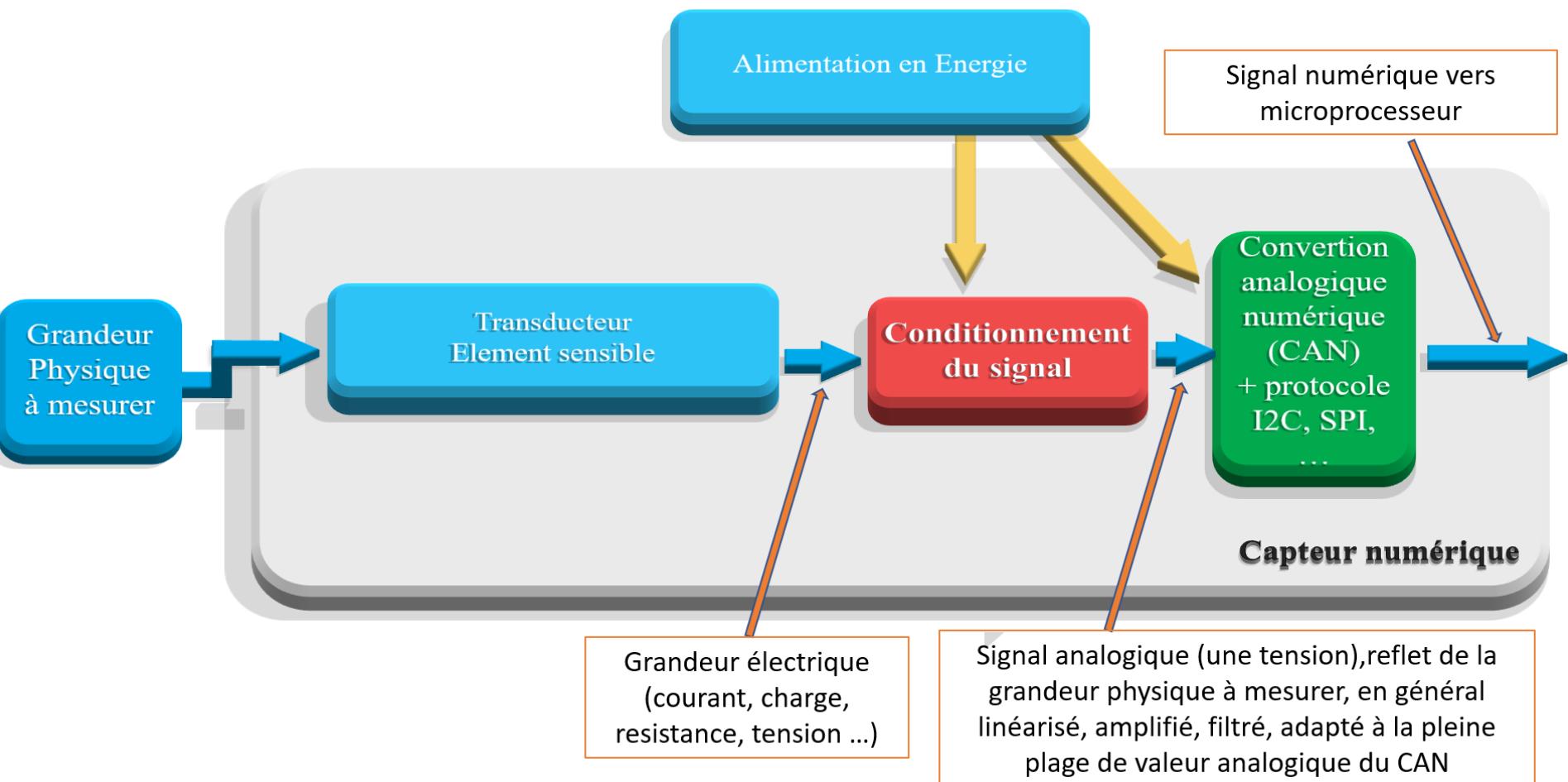


# Capteurs: le Conditionnement analogique

# Pourquoi ?

*Quel que soit le capteur: il y a toujours un circuit de conditionnement*

Cas 1: capteur numérique

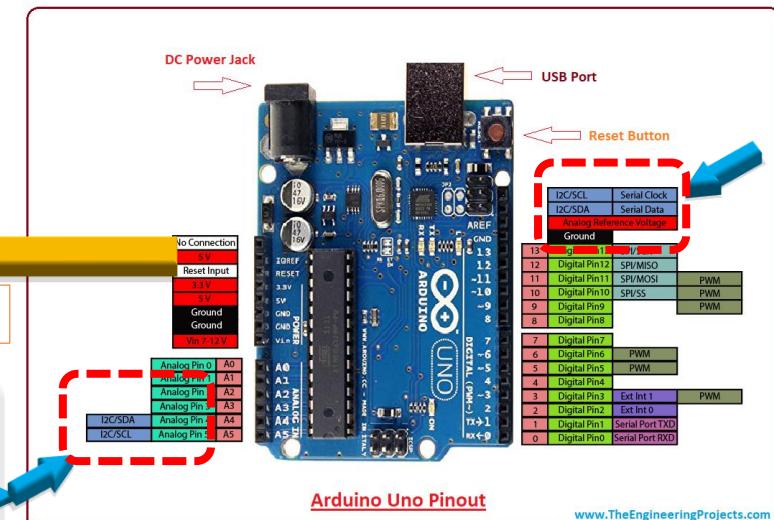
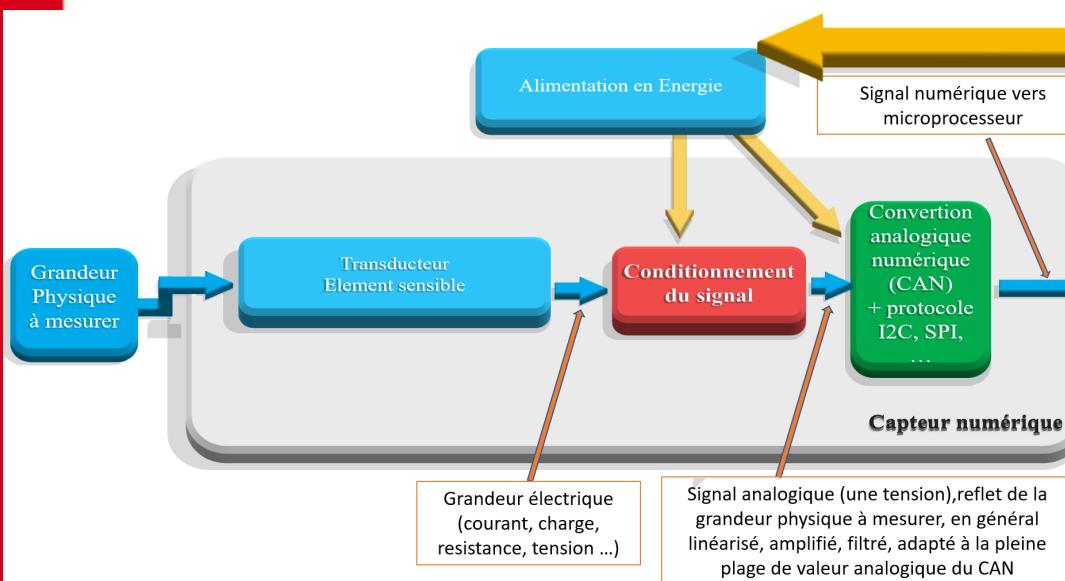


# Pourquoi ?

*Quel que soit le capteur: il y a toujours un circuit de conditionnement*

## Cas 1: capteur numérique

Le capteur numérique peut communiquer en **I2C** avec un microprocesseur, par exemple avec l'ATEMA de l'Arduino UNO.



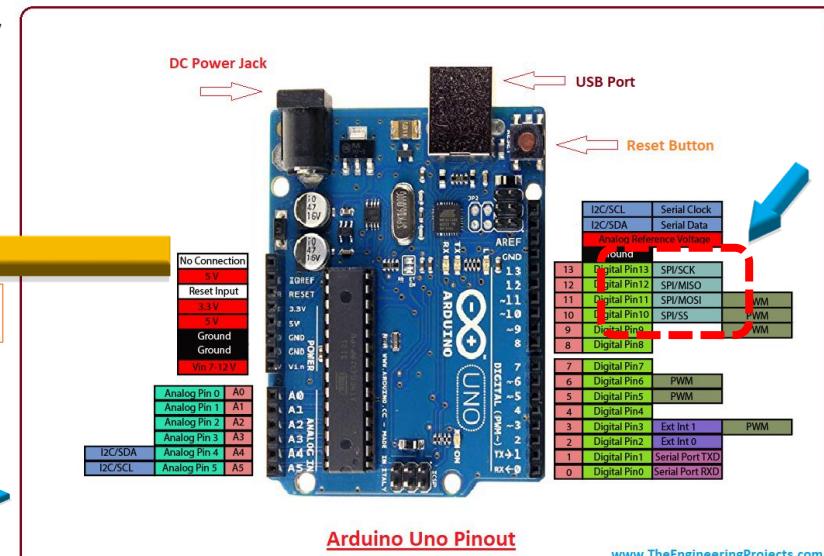
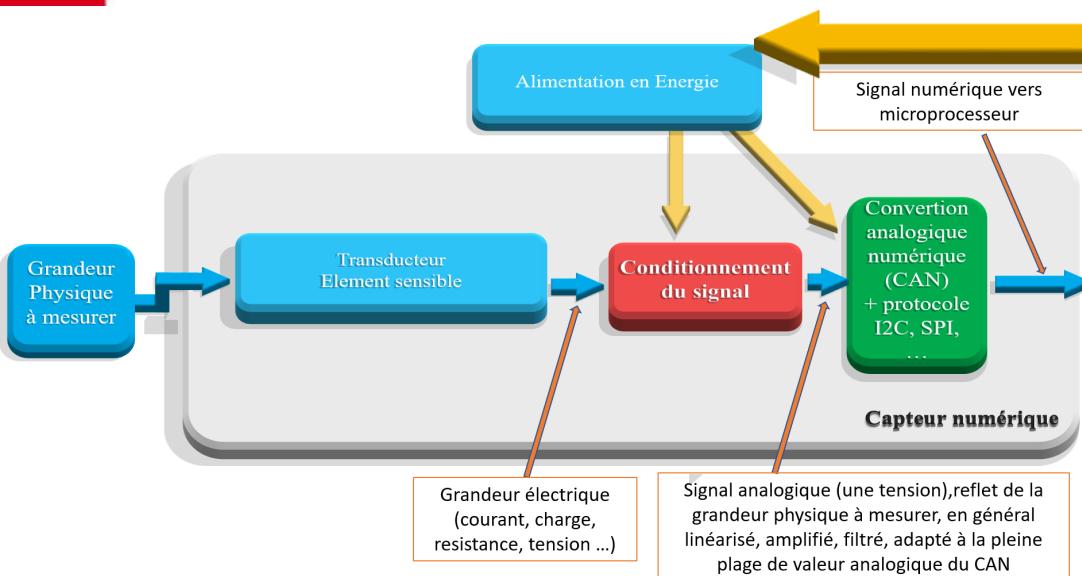
**I2C**

# Pourquoi ?

*Quel que soit le capteur: il y a toujours un circuit de conditionnement*

## Cas 1: capteur numérique

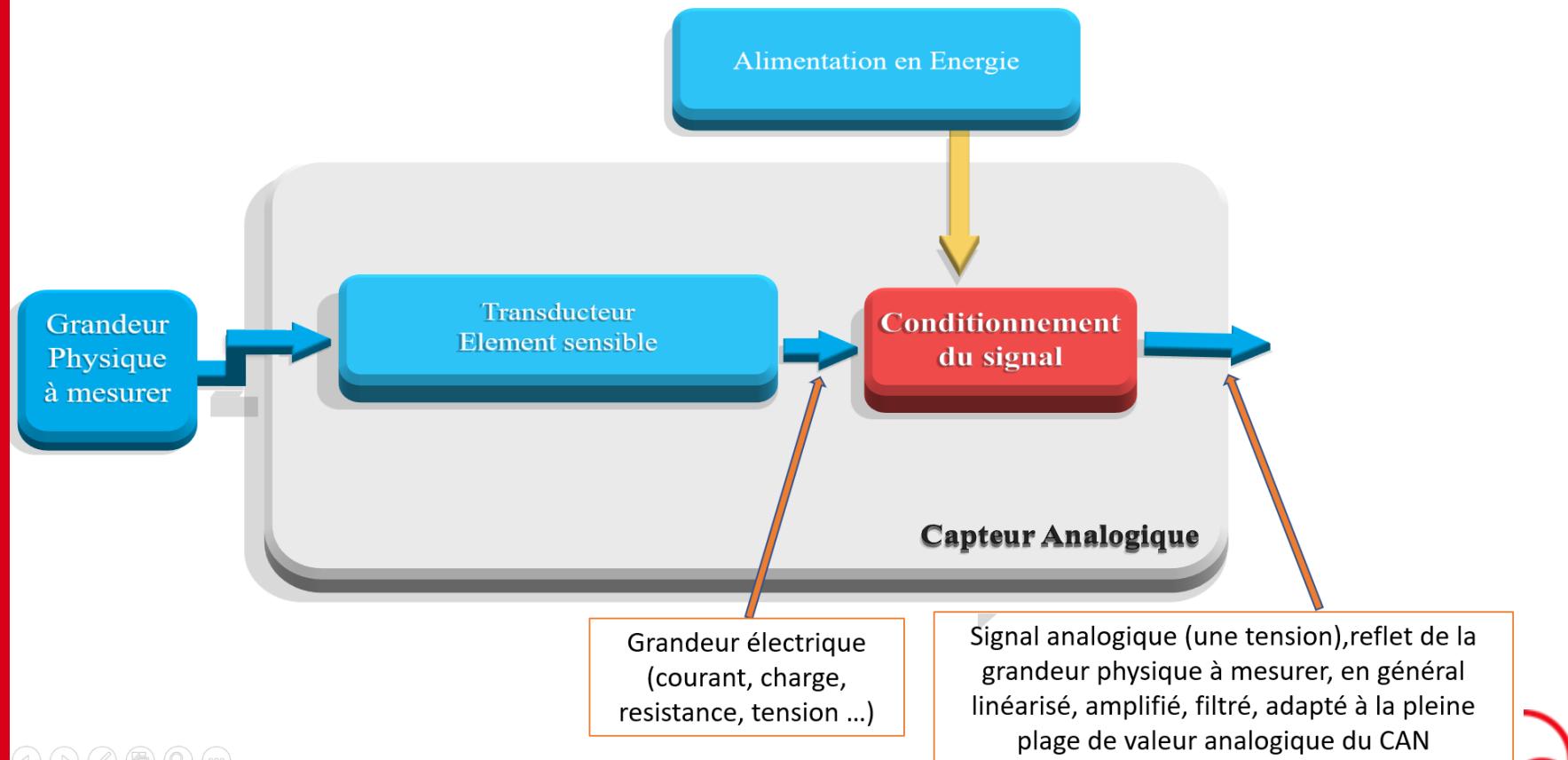
Le capteur numérique peut communiquer en **SPI** avec un microprocesseur, par exemple avec l'ATEMA de l'Arduino UNO.



# Pourquoi ?

*Quel que soit le capteur: il y a toujours un circuit de conditionnement*

Cas 2: capteur analogique

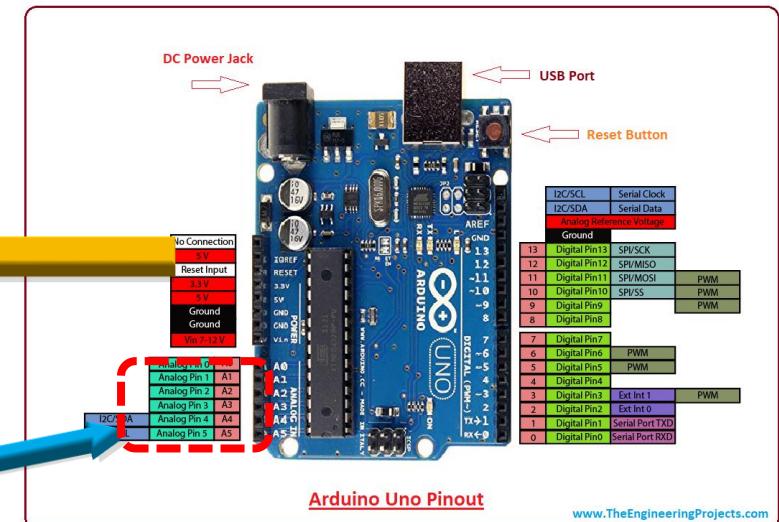
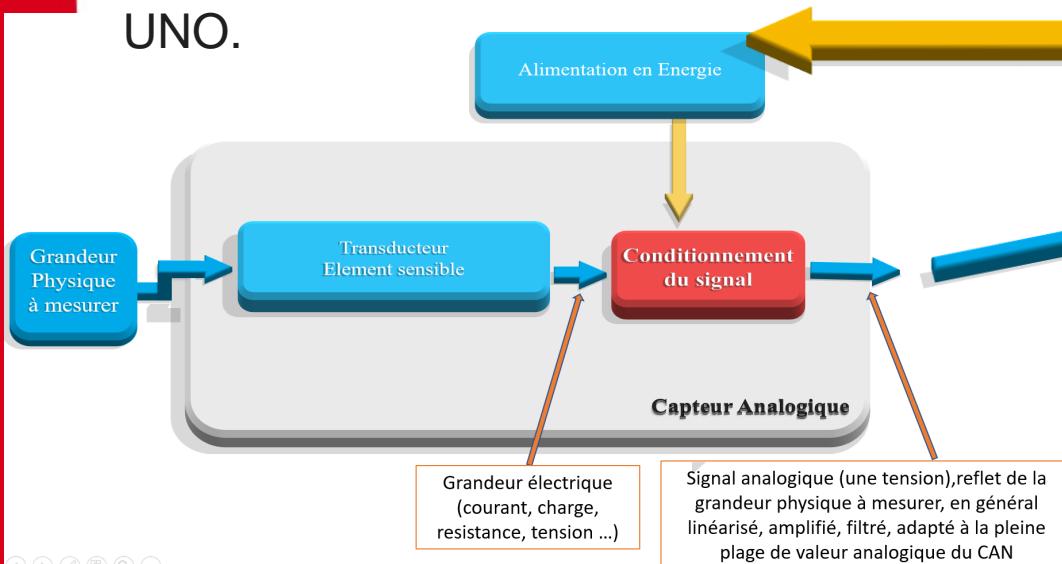


# Pourquoi ?

*Quel que soit le capteur: il y a toujours un circuit de conditionnement*

## Cas 2: capteur analogique

Le capteur analogique nécessite un conditionneur pour avoir en sortie une tension qui permette d'être numérisée dans un CAN, par exemple celui de l'Arduino UNO.



Analogique

# Pourquoi ?

*Quel que soit le capteur: il y a toujours un circuit de conditionnement*

---

## POURQUOI UN CONDITIONNEUR ?

1. Pour **convertir** la grandeur électrique de sortie du capteur **en tension**
2. Pour **amplifier** les **signaux électriques de faible niveau**
3. **Effectuer des corrections** sur le signal délivré: **minimiser l'influence de la mesure** sur le phénomène étudié, **compensation des grandeurs d'influence**, **linéarisation** ...

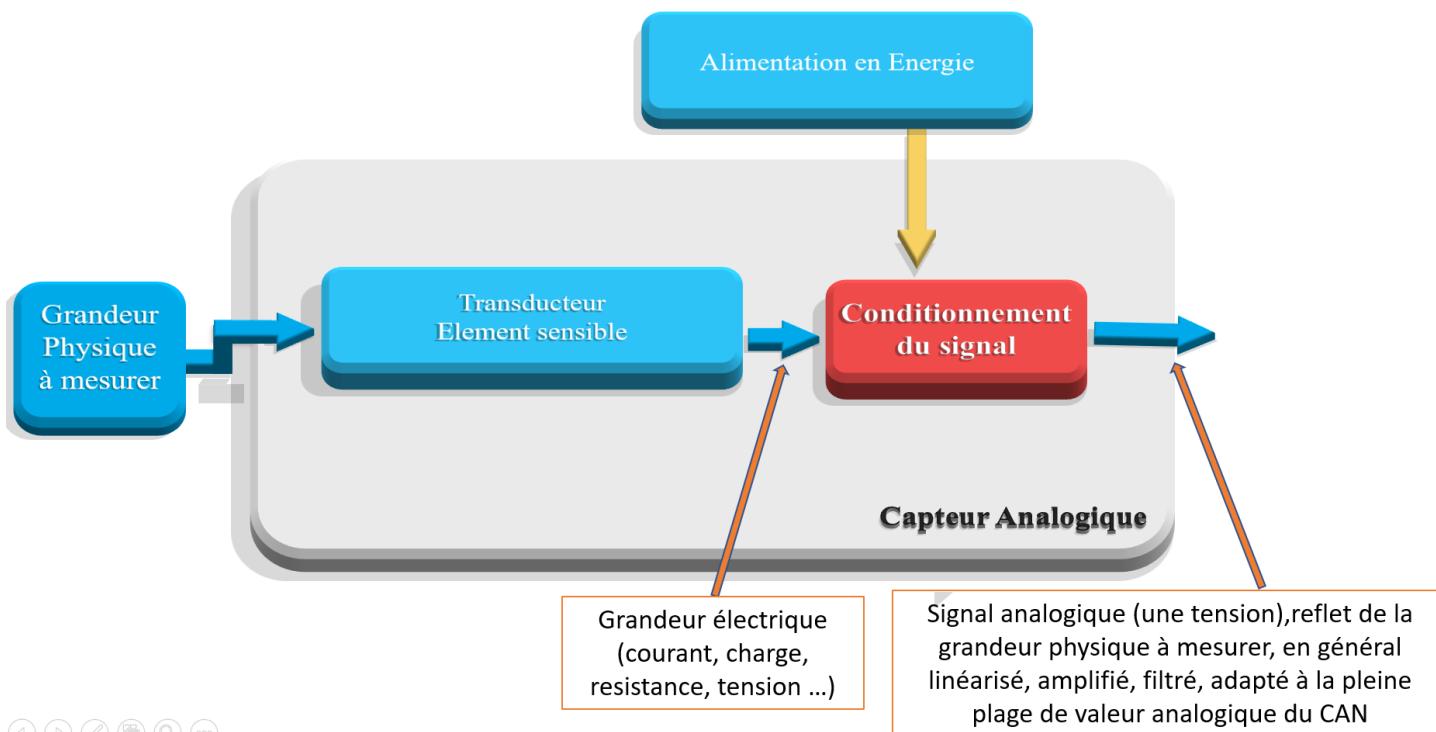
Bref : pour avoir une tension 'compréhensible et fiable' pour le convertisseur analogique numérique.

---

# Conditionnement dans le cas de capteurs passifs

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Si la grandeur électrique en sortie du transducteur est  
**une impédance variable**



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Si la grandeur électrique en sortie du transducteur est  
**une impédance variable**

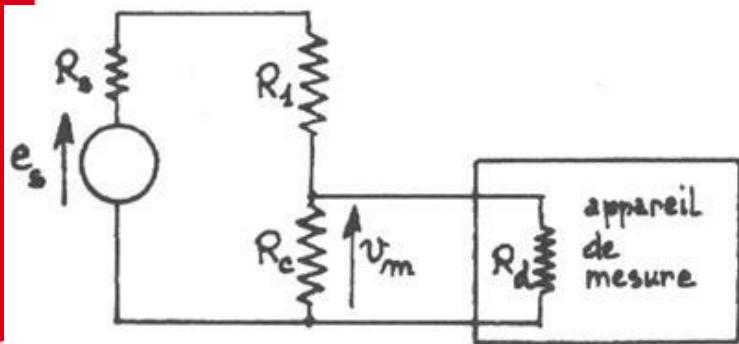
Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétiques.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, antimonure d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté, et qui est son conditionneur.

## COMMENT CONVERTIR ?

1. Le montage pont diviseur de tension ou potentiométrique: association en série d'une source, du capteur et d'une impédance en général du même type

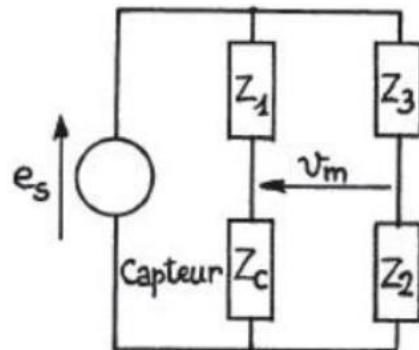


# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté, qui est son conditionneur.

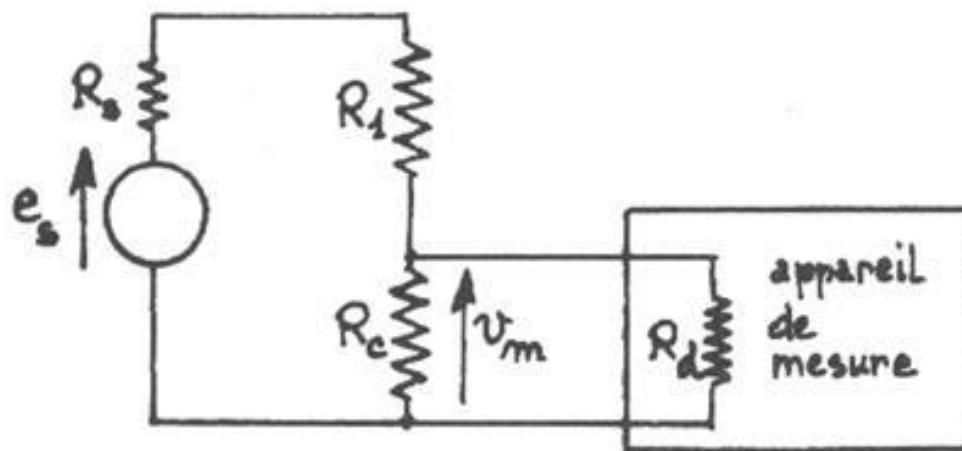
## COMMENT CONVERTIR ?

1. Le montage pont diviseur de tension ou potentiométrique: association en série d'une source, du capteur et d'une impédance en général du même type
2. Pont de Weathstone



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont diviseur de tension

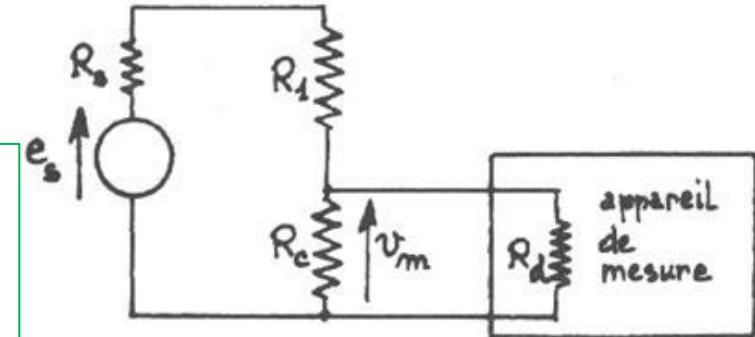


# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont diviseur de tension

Montrer que quand la résistance interne  $R_s$  de la source de tension est très faible et que l'impédance d'entrée  $R_d$  de l'appareil de mesure ou d'un ADC :

$$v_m = \frac{R_c}{R_1 + R_c} e_s$$



PROBLEME : La mesure  $v_m$  est liée à la valeur de la résistance  $R_c$  par une loi non linéaire

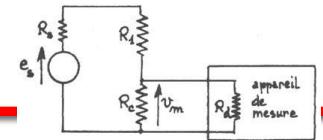
SOLUTION : On prend  $R_1 \gg R_c$ , du coup  $v_m = \frac{R_c}{R_1} e_s$  : c'est linéaire ☺

RE-PROBLEME: On perd en sensibilité car  $S = \frac{R_1}{(R_1+R_c)^2} e_s$

RE-SOLUTION: On amplifie le signal pour augmenter la sensibilité

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont diviseur de tension + AMPLIFICATION

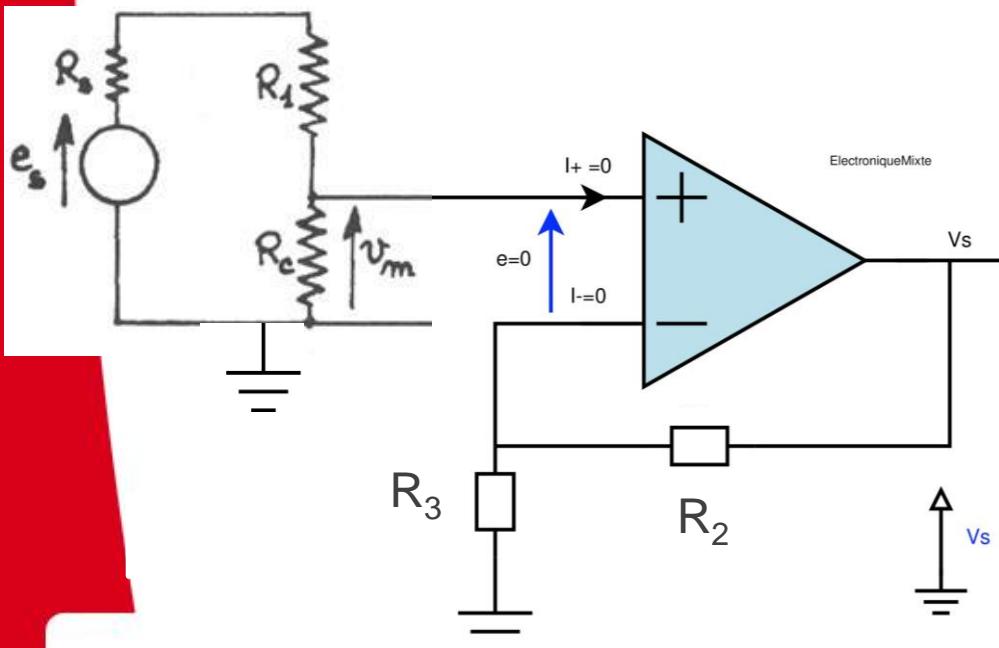


RE-SOLUTION: On amplifie le signal pour augmenter la sensibilité

COMMENT ON AMPLIFIE ? Avec un AOP

Exemple : Amplificateur de tension  
NON inverseur

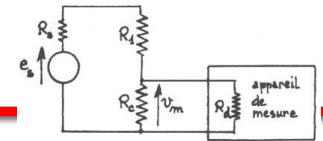
$$v_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) v_m = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \frac{e_s}{R_1} R_c$$



On a  $v_s$  proportionnel à  $R_c$  avec une sensibilité qui peut être correcte et un  $v_s$  que l'adapte au microprocesseur et ADC qui suivra. Dans le cas de l'Arduino UNO, la plage de valeurs de  $v_s$  est 0 à 5 Volts

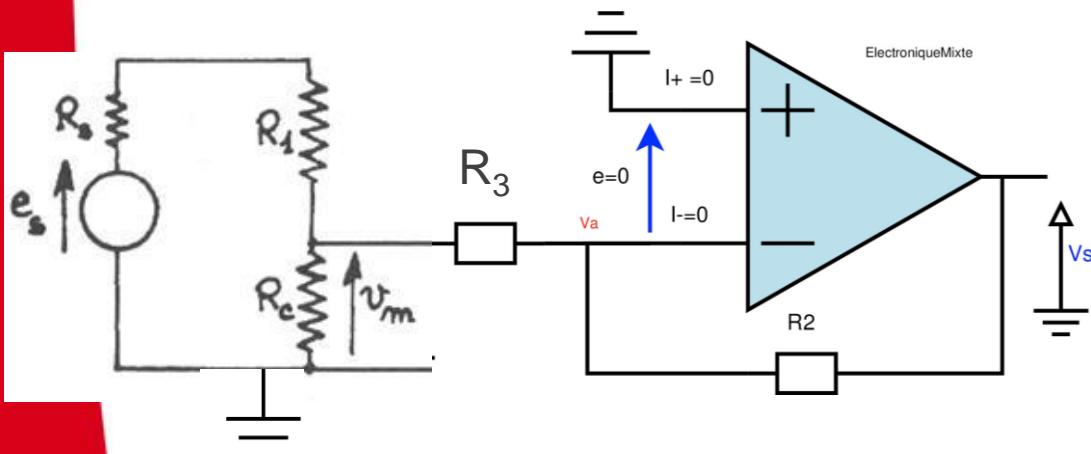
# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont diviseur de tension + AMPLIFICATION



RE-SOLUTION: On amplifie le signal pour augmenter la sensibilité

COMMENT ON AMPLIFIE ? Avec un AOP



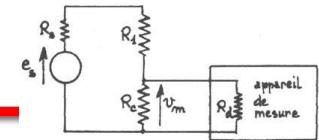
Exemple : Amplificateur de tension inverseur

$$v_s = -\frac{R_2}{R_3} v_m = -\frac{R_2}{R_3 R_1} e_s R_c$$

On a  $v_s$  proportionnel à  $R_c$  avec une sensibilité qui peut être correcte et un  $v_s$  que l'adapte au microprocesseur et ADC qui suivra. Dans le cas de l'Arduino UNO, la plage de valeurs de  $v_s$  est 0 à 5 Volts

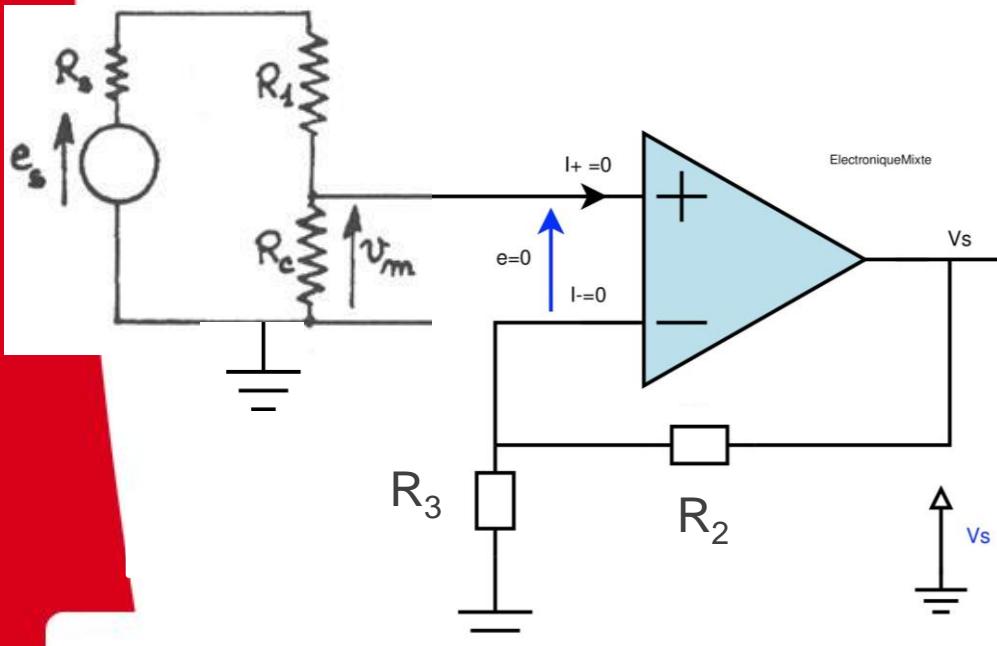
# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont diviseur de tension + AMPLIFICATION



RE-SOLUTION: On amplifie le signal pour augmenter la sensibilité

COMMENT ON AMPLIFIE ? Avec un AOP



PROBLEME:

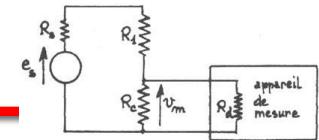
$$v_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) v_m = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \frac{e_s}{R_1} R_c$$

On a  $v_s$  proportionnel à  $R_c$ , mais en générale  $R_c$  n'est pas linéaire avec son mesurande, que ce soit les photo resistance, les thermoresistance ou autres.

Dans ce cas on peut linéariser

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont diviseur de tension + AMPLIFICATION



## DOIT ON LINEARISER ? PAS FORCEMENT

Par exemple, si thermistance varie de façon non linéaire, tel que

$$R_C(T) = R_0(1 + aT + bT^2)$$

et si  $R_1 \gg R_C$  alors

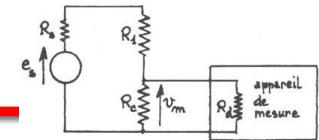
$$v_s(T) = KR_0(1 + aT + bT^2)$$

A chaque valeur de  $T$  correspond une tension  $v_s$ . Dans le code du microprocesseur après numérisation on peut faire 2 choses:

- mettre dans le code une *lookup table* ou tableau de correspondance entre la tension analogique  $v_s$  et la température  $T$ .
- si on connaît  $a$  et  $b$  mesurés par étalonnage ou donnés par le constructeur, on peut simplement rentrer dans le code la fonction réciproque  $T(v_s)$ . Cela ne marche que pour des fonctions simples à inverser.

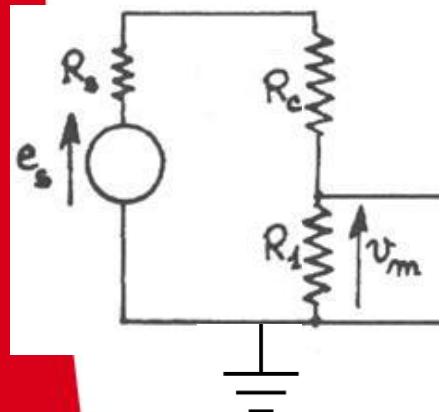
# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont diviseur de tension et LINEARISATION



### DOIT ON LINEARISER ?

Si le capteur sert pour de la régulation de température , de débit, ou autre en mode capteur analogique -10 / +10 V ou 4 / 20mA, la mesure doit être linéarisée 'ANALOGIQUEMENT', pour satisfaire à une consigne de mesure , qui est généralement linéaire aussi.



BUT DU JEU:

Trouver  $R_1$  qui fera en sorte que  $v_m$  soit le plus linéaire possible sur la plage de valeurs à mesurer. (Attention, ici  $R_c$  est en 'haut').

Dans le pont diviseur de tension on a  $v_m = \frac{R_1}{R_1 + R_c} e_s$   
Il faut trouver  $R_1$  qui satisfasse

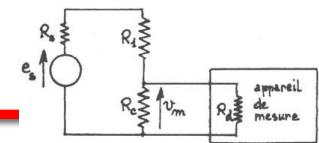
$$\frac{d^2 v_m(T)}{dT} = 0$$

Analytiquement ça peut être compliqué  
Avec un logiciel on y arrive.



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont diviseur de tension et LINEARISATION



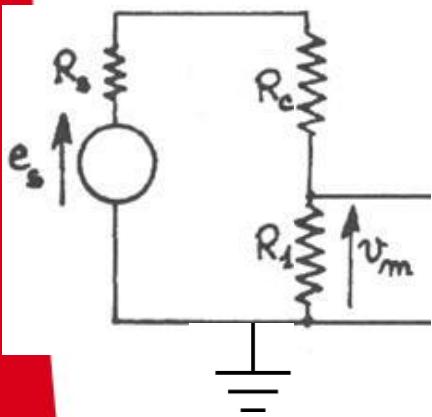
BUT DU JEU:

Par exemple, si la thermistance est une NTC d'équation :

$$R(T) = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

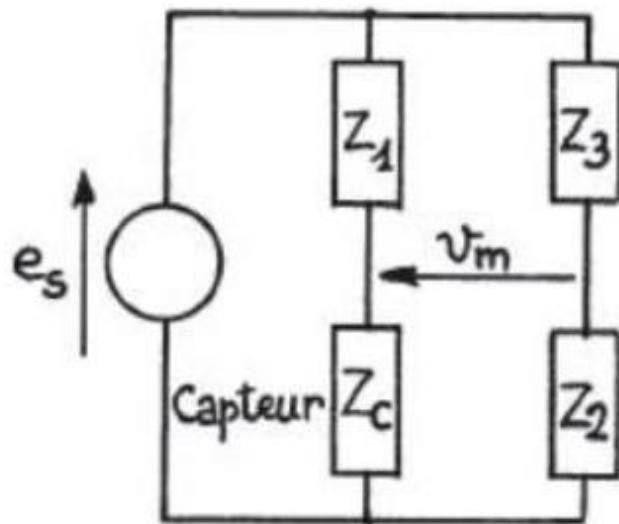
une astuce simple, qui sert dans un grand nombre de cas, c'est de prendre  $R_1 = R_0$  .

Cela permet d'avoir une tension de sortie du pont diviseur de tension à peu près linéaire autour de  $25^\circ \text{ C}$  sur une plage de valeurs de 0 à  $50^\circ \text{ C}$  . (voir TD1 thermistance et le lien digikey [ici.](#) )



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont de Wheatstone

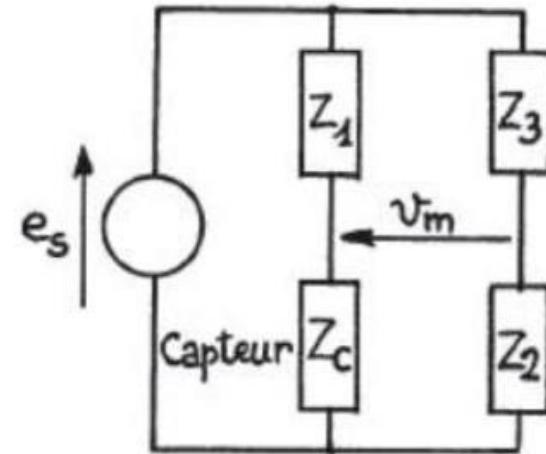


# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone

Montrer que quand les impédances sont des résistances, alors on a:

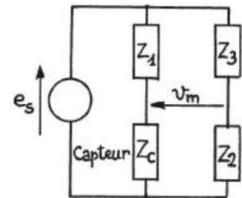
$$v_m = \left( \frac{R_c}{R_1 + R_c} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) e_s$$



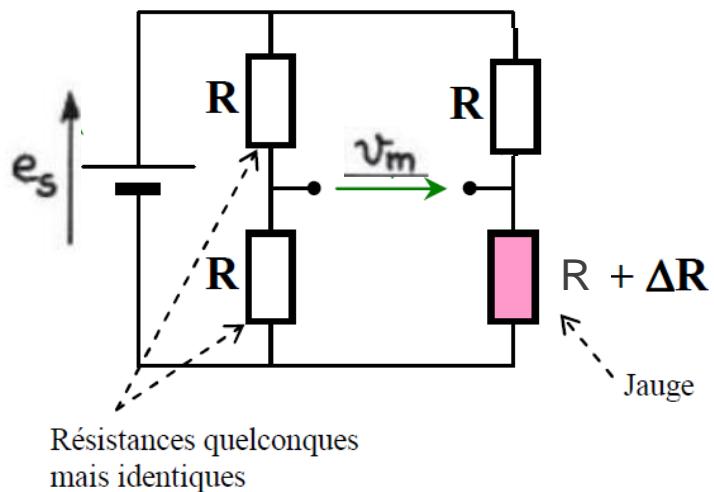
Le pont de Wheatstone est le circuit le mieux adapté pour la mesure de petites variations de résistances électriques (maximum 10%)

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

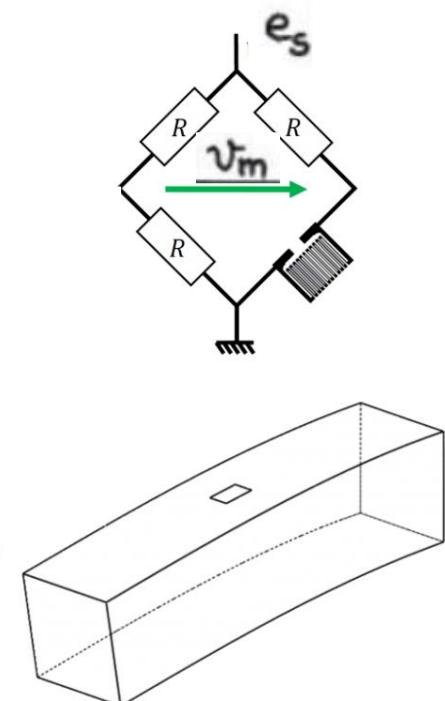
## Pont de Wheatstone



Dans le cas d'un pont 'simple', pour un capteur de type jauge de déformation, la configuration est la suivante

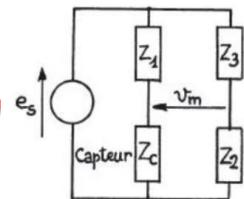


Calculer  $v_m$  en fonction de  $\Delta R$ ,  $e_s$ , et  $R$

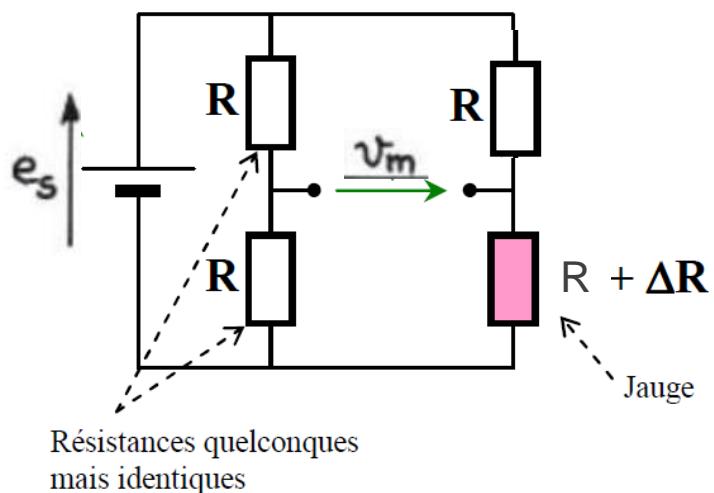


# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone

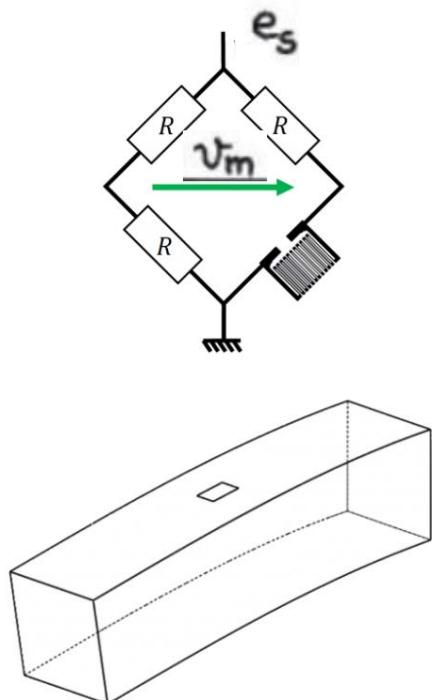


Dans le cas d'un pont 'simple', pour un capteur de type jauge de déformation, la configuration est la suivante



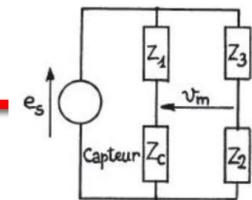
Calculer  $v_m$  en fonction de  $\Delta R$ ,  $e_s$ , et  $R$

$$v_m = \left( \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \right) e_s$$

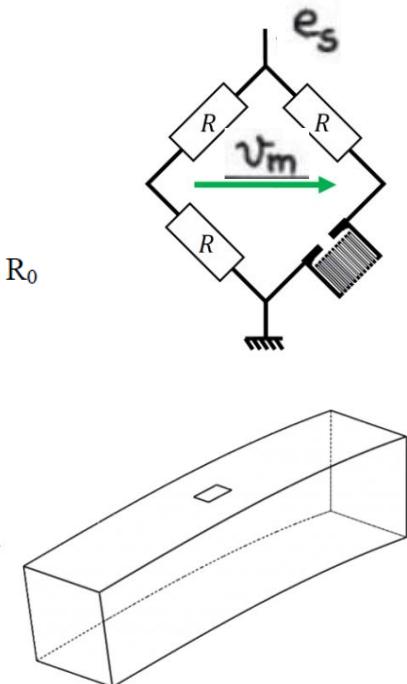
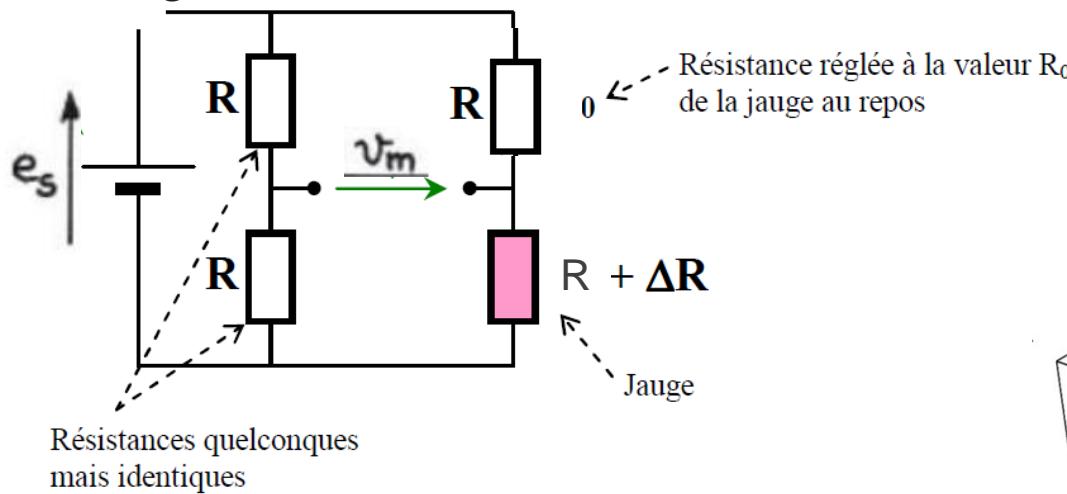


# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone



Dans le cas d'un pont 'simple' ou QUART de pont, pour un capteur de type jauge de déformation, la configuration est la suivante



Calculer  $v_m$  en fonction de  $\Delta R$ ,  $e_s$ , et

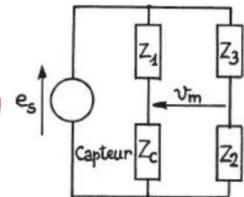
$$v_m = \left( \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \right) e_s$$

Si  $\Delta R \ll 4R_0$  ce qui est le cas en général

$$v_m \approx \left( \frac{\Delta R}{4R} \right) e_s \quad \text{LINEARITE entre } v_m \text{ et } e_s$$

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone



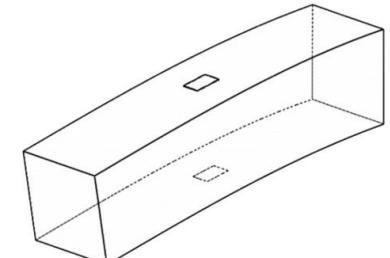
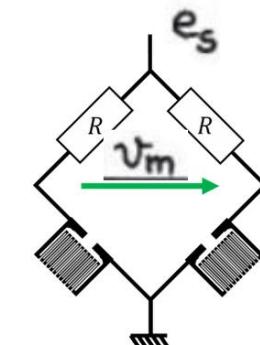
Dans le cas d'un demi-pont

En prenant une jauge qui se déforme pour donner  $R + \Delta R$  et sa symétrique qui donne  $R - \Delta R$

Montrer que si  $\Delta R \ll R$  ce qui est le cas en général, alors

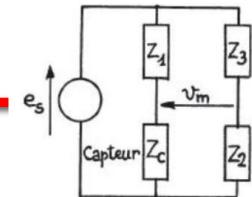
$$v_m \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} e_s \quad \text{LINEARITE entre } v_m \text{ et } e_s$$

Meilleure sensibilité



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone

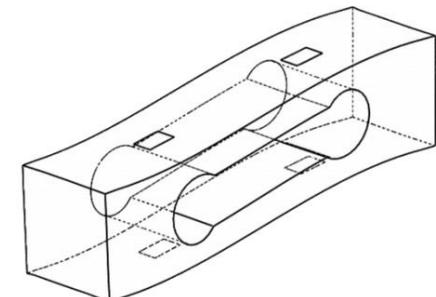
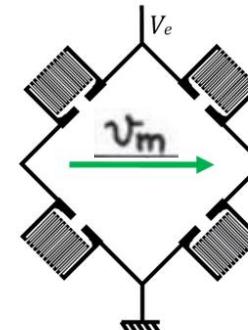


Dans le cas d'un pont ENTIER

Montrer que si  $\Delta R \ll R$  ce qui est le cas en général, alors

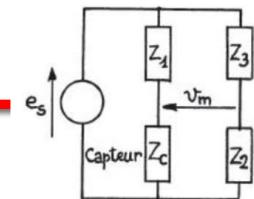
$$v_m \approx \frac{\Delta R}{R} e_s \text{ LINEARITE entre } v_m \text{ et } e_s$$

Meilleure sensibilité, linéarité 'parfaite', plus de problèmes d'influences d'autres phénomènes physiques (Température principalement)



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

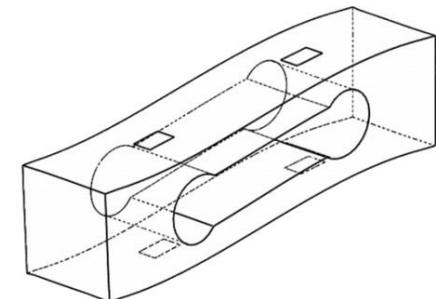
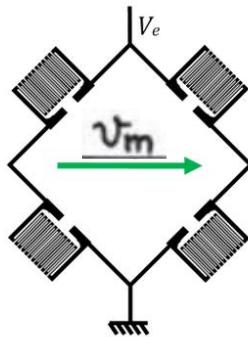
## Pont de Wheatstone



HX711 AD Converter Breakout Module



5KG Portable Electronic Kitchen Scalev



Innovateking-EU Capteur de Poids à Cellule de Charge numérique  
Module de dérivation du convertisseur HX711 AD Balance de Cuisine  
électronique Portable 5KG pour échelle Arduino  
de Innovateking-EU

★★★★★ 2 évaluations

Prix : 15,99 € prime

Tous les prix incluent la TVA.



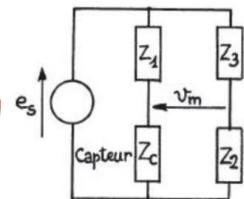
# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone

Connection:

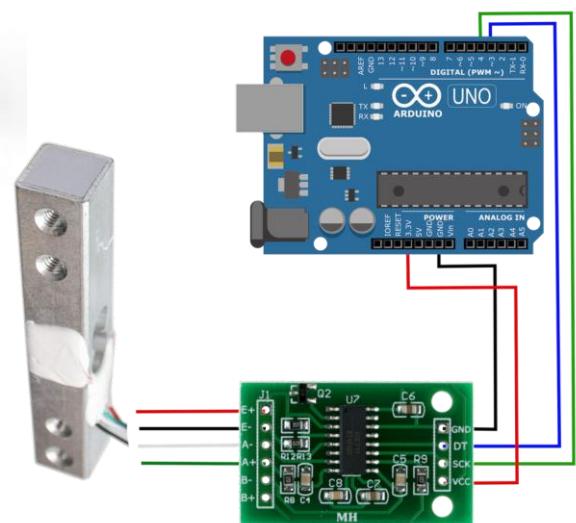
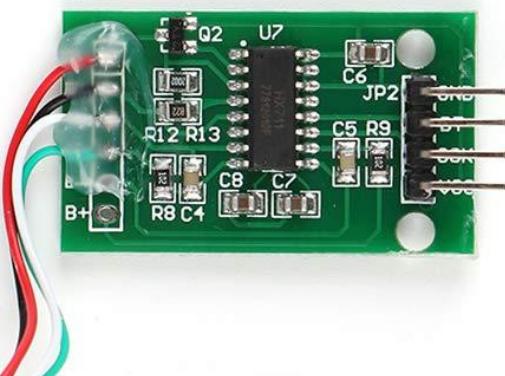
Red to E+      Green to A+

Black to E-      White to A-



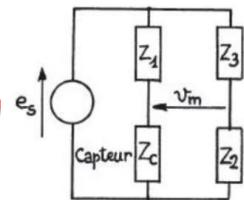
Note:

Be sure not to directly press on the white cover to prevent damage to the sensor.

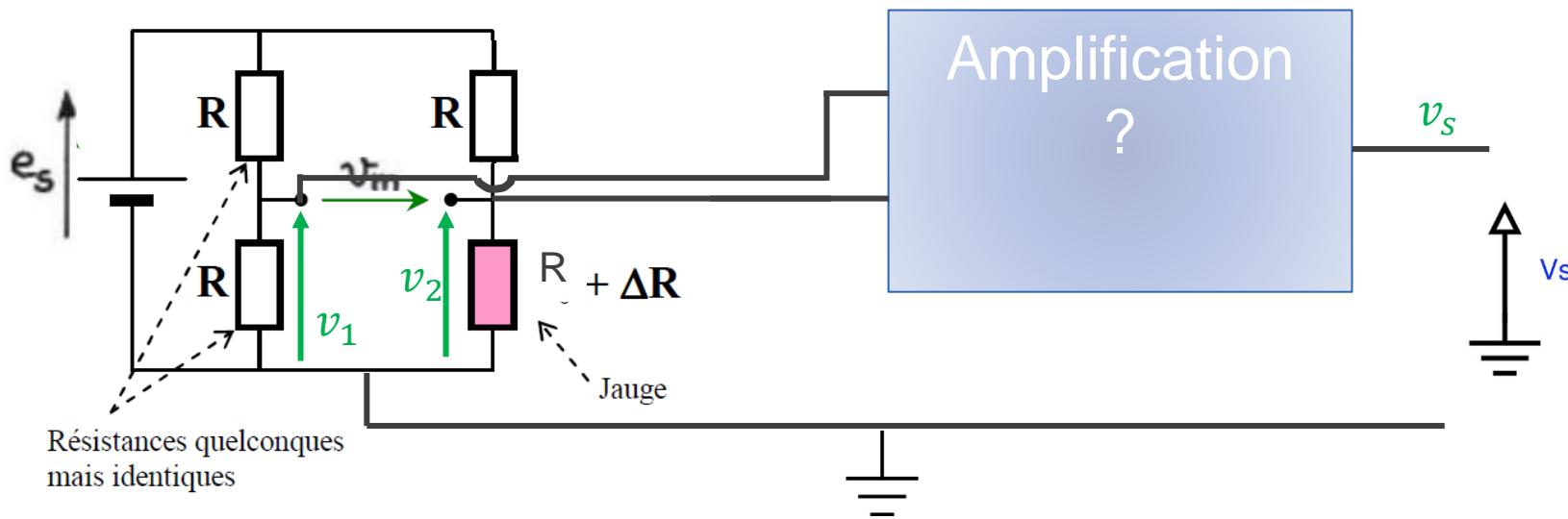


# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION

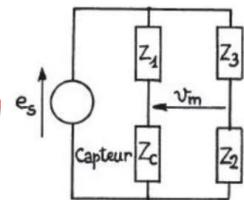


Quelle AMPLIFICATION derrière un pont de Weatstone ?

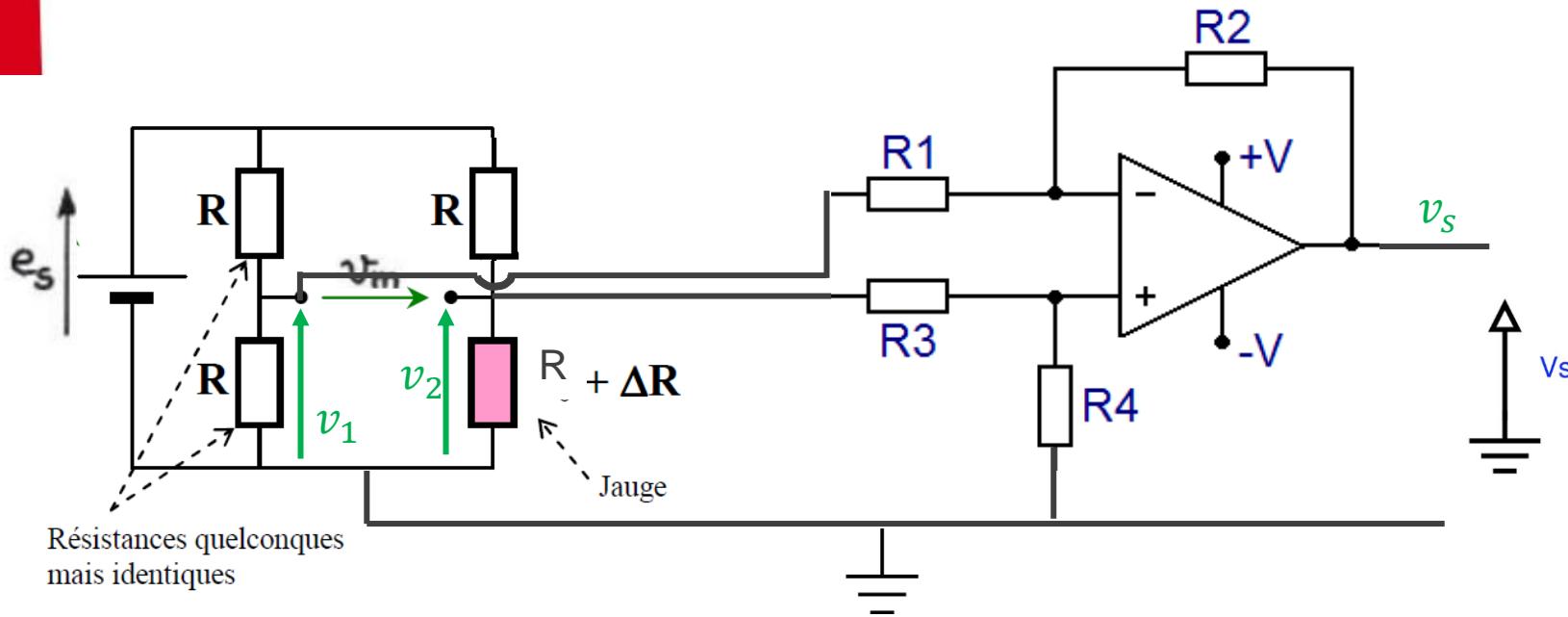


# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION

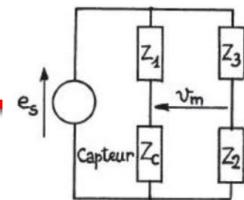


Une AMPLIFICATION DIFFÉRENTIELLE



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

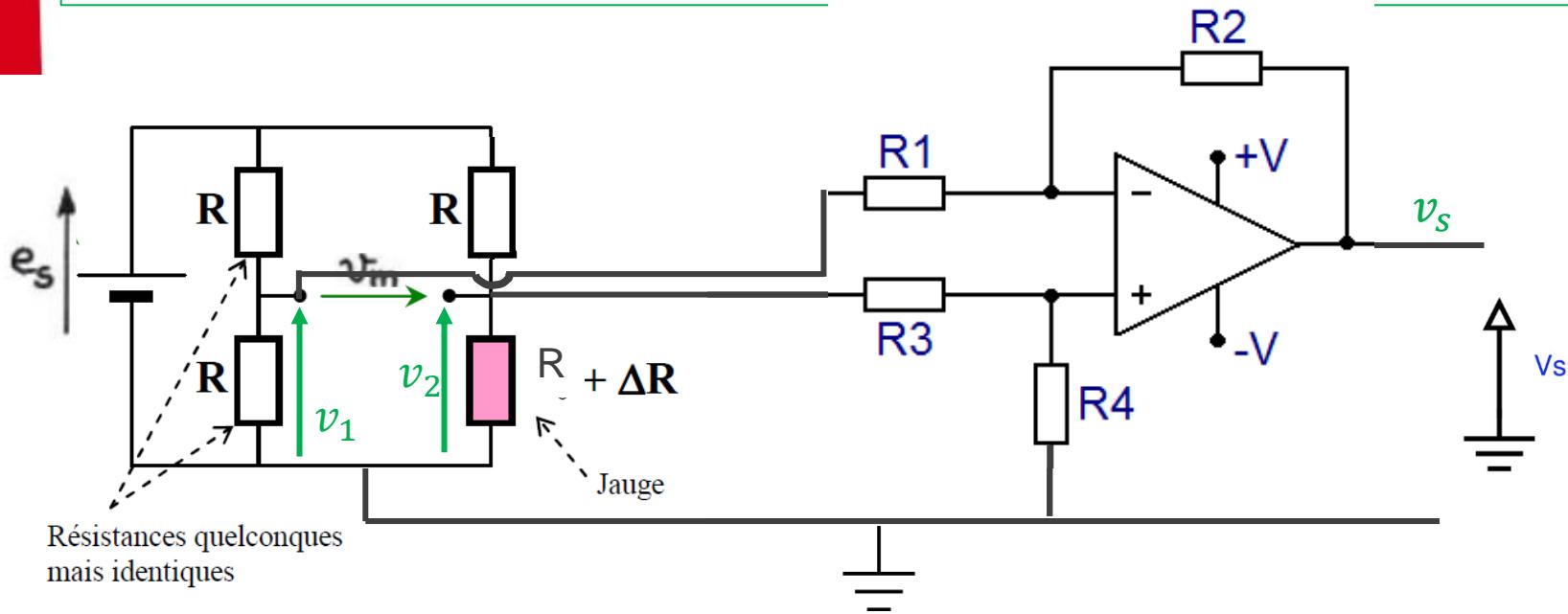
Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



## Une AMPLIFICATION DIFFÉRENTIELLE

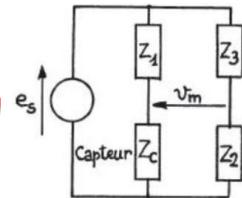
Montrer que :

$$v_s = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1$$



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

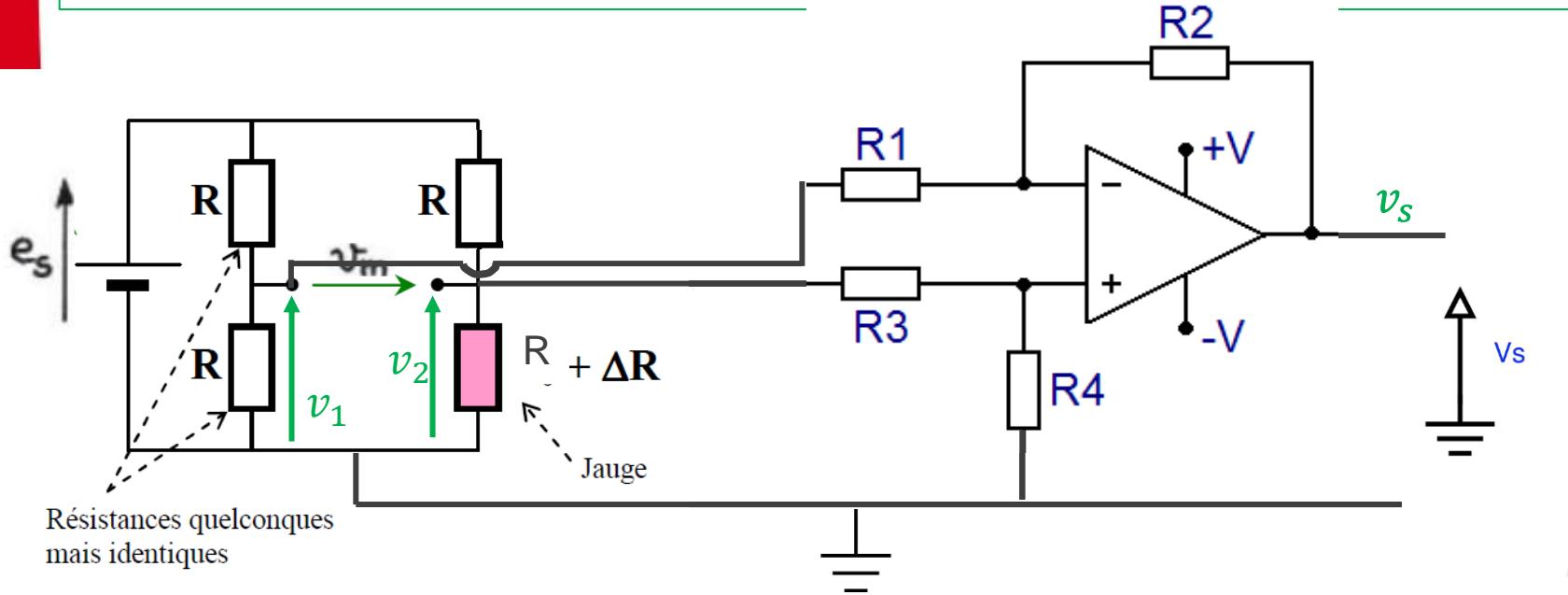
Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



## Une AMPLIFICATION DIFFÉRENTIELLE

Montrer que :

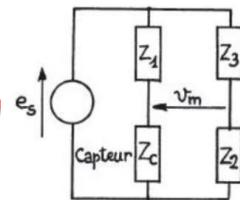
$$v_s = \frac{R2}{R1} \left[ \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) \frac{R1}{R2} \frac{R4}{(R3 + R4)} v_2 - v_1 \right]$$



On pose :  $v_m = v_2 - v_1$  et  $v_{mc} = \frac{v_2 + v_1}{2}$

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

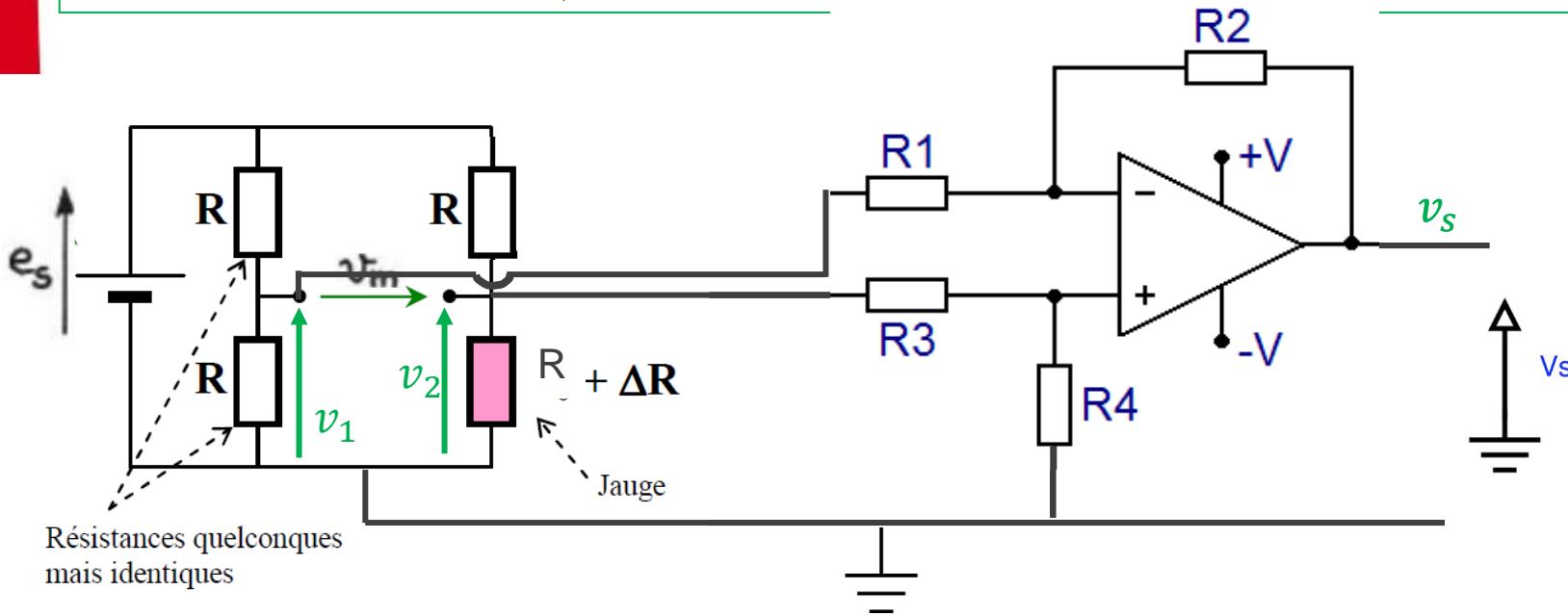
Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



## Une AMPLIFICATION DIFFÉRENTIELLE

Montrer que :

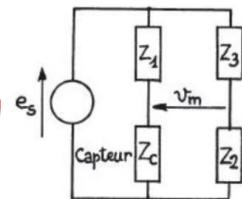
$$v_s = \frac{R2 + R1}{2R1} \left( \frac{R2}{R1 + R2} + \frac{R4}{R3 + R4} \right) v_m + \frac{R1 \cdot R4 - R2 \cdot R3}{R1(R3 + R4)} v_{mc}$$



On pose :  $v_m = v_2 - v_1$  et  $v_{mc} = \frac{v_2 + v_1}{2}$

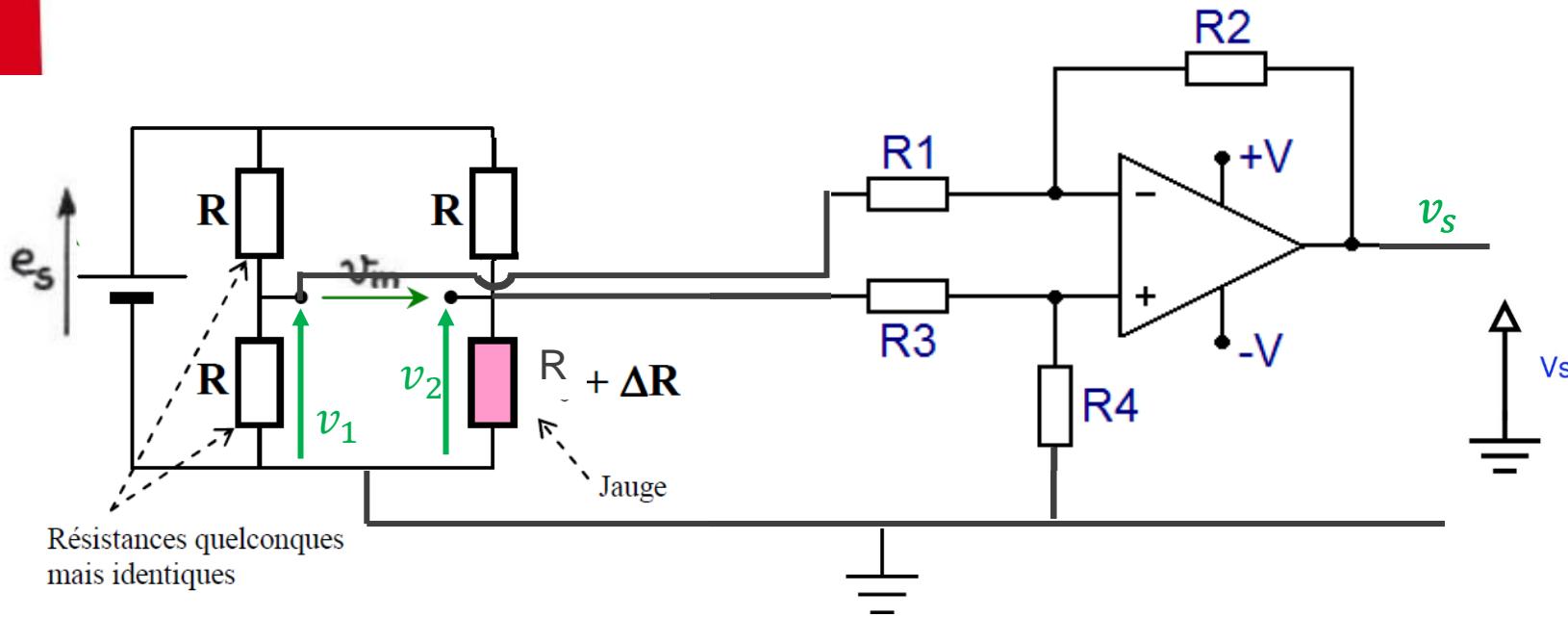
# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



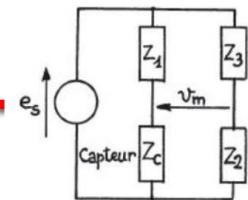
## Une AMPLIFICATION DIFFÉRENTIELLE

Quel est l'intérêt d'avoir  $R_1 = R_3$  et  $R_4 = R_2$  ?



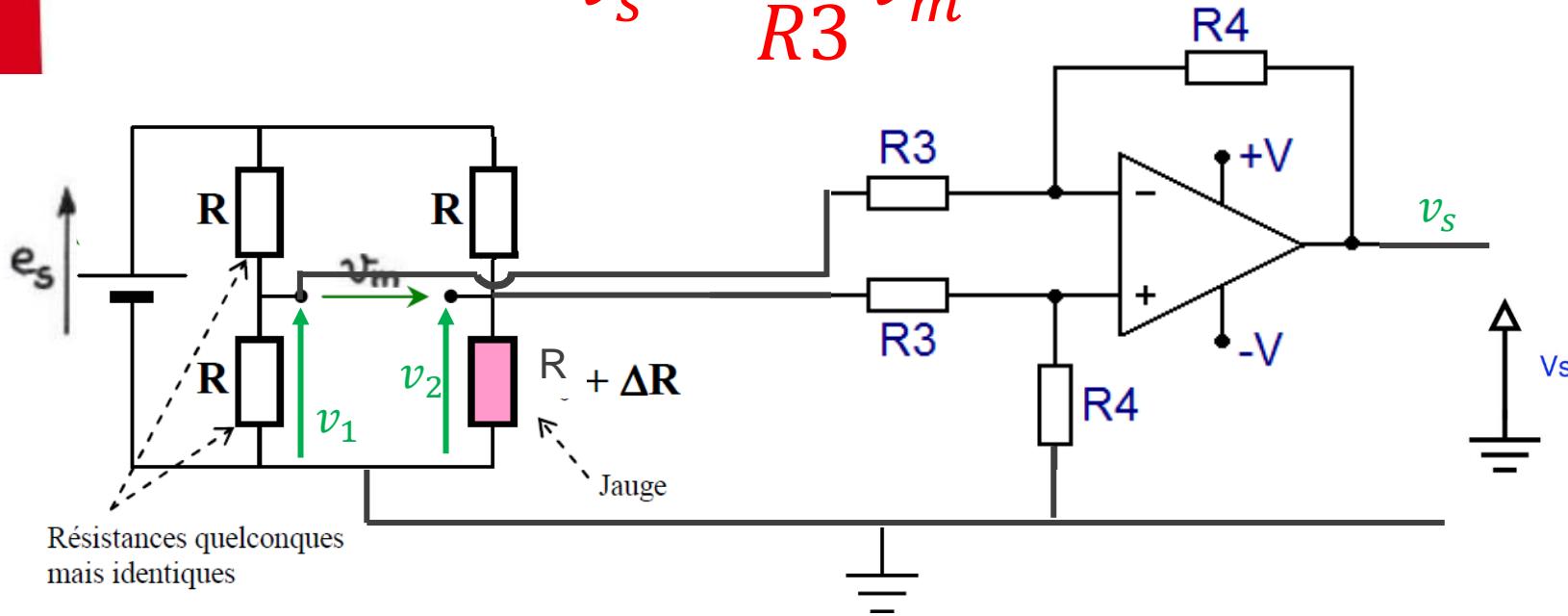
# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



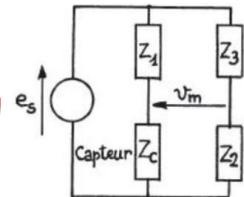
Une AMPLIFICATION DIFFÉRENTIELLE:

$$v_s = \frac{R_4}{R_3} v_m$$



# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



**ATTENTION:** En réalité, tout ne marche pas de façon aussi idéale :  
Il est quasiment impossible d'avoir exactement les mêmes résistances.

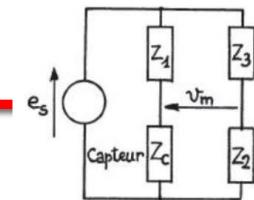
Si les résistances ne sont pas exactement les mêmes, il y a un terme non nul devant la tension  $v_{mc}$  que l'on appelle tension de mode commun.

Ce terme de tension de mode commun est également amplifié par le montage et peut créer de grosses erreurs en sortie du montage.

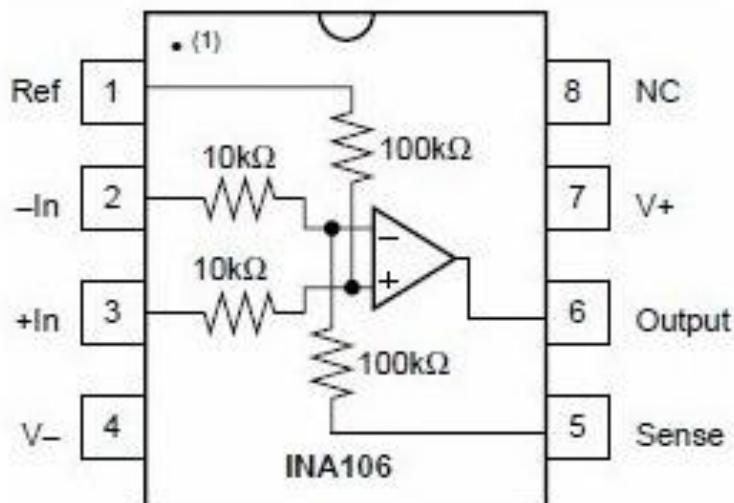
Comment y remédier ?

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



**SOLUTION 1: Amplificateur différentiel** en Circuits Intégrés tel le INA106  
Les résistances à l'intérieur sont ultra calibrées



NOTE: (1) Pin 1 identifier for SO-8 package.  
Model number identification may be abbreviated  
on SO-8 package due to limited available space.

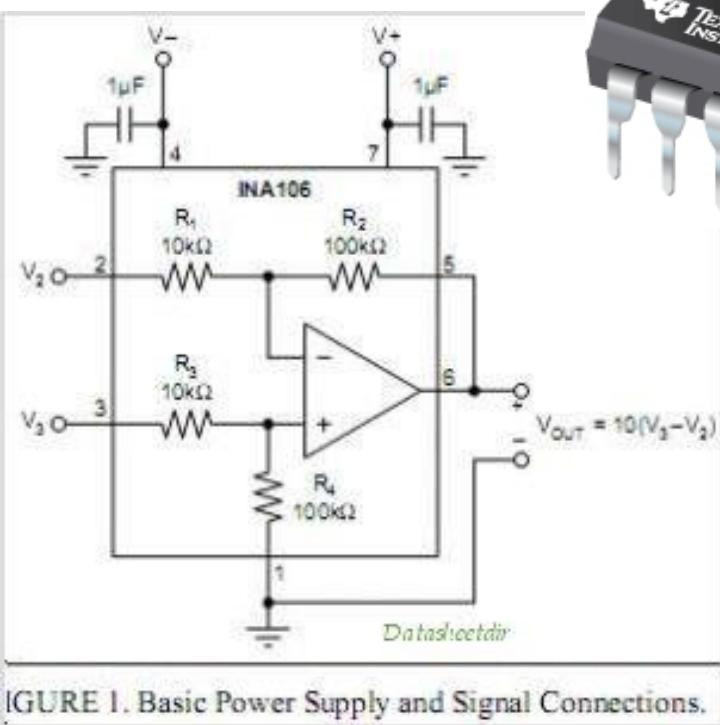
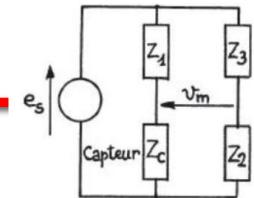


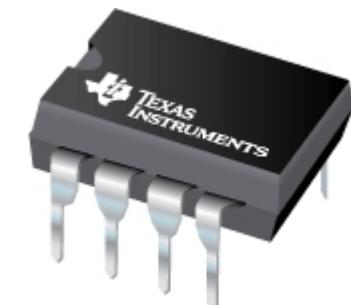
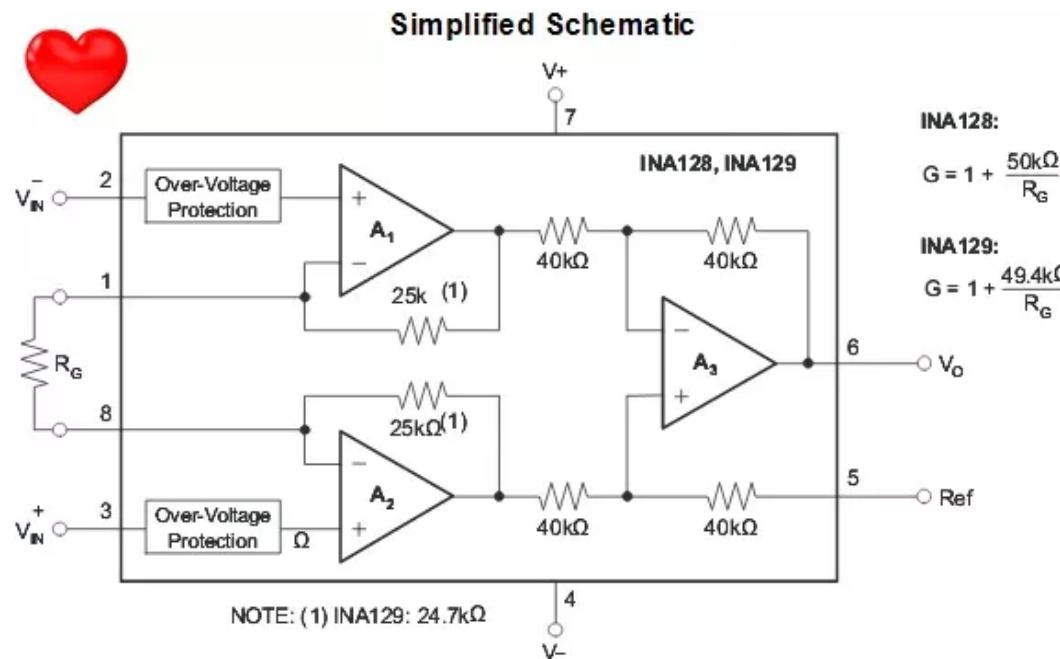
FIGURE 1. Basic Power Supply and Signal Connections.

# Conditionnement dans le cas de capteur passifs

## Pont de Wheatstone + AMPLIFICATION



**SOLUTION 2: Amplificateur d'instrumentation** en Circuits Intégrés tel le INA128 ou INA129 avec 2 montages à AOP suiveur pour régler le problème de l'impédance d'entrée, puis une amplification différentielle non amplificateur et une résistance  $R_G$  que l'on rajoute entre les broches 1 et 8 pour régler l'amplification souhaitée.



---

# Conditionnement dans le cas de capteurs actifs

# Conditionnement dans le cas de capteur actifs

Si la grandeur électrique en sortie du transducteur est  
**une tension ou un courant variable**

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

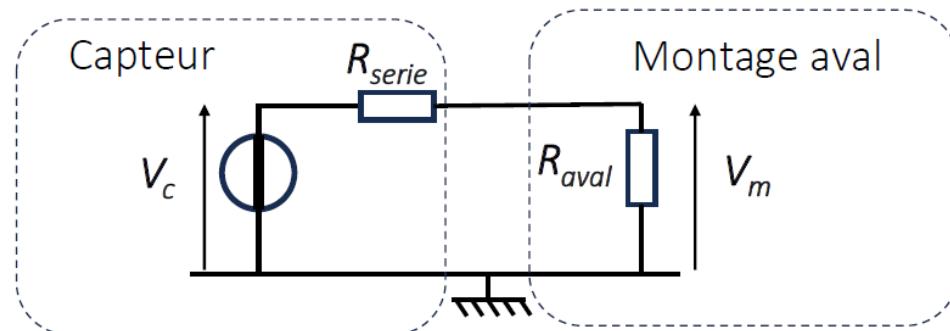


# Conditionnement dans le cas de capteur actifs

## Générateur de tension

Dans le cas des capteurs actifs qui fonctionnent en générateur de tension, on peut les modéliser comme des générateurs de tension parfaits en série avec une résistance interne qui peut être assez importante.

Lorsque l'on veut mesurer cette tension avec un appareil de mesure ou lorsqu'on veut numériser les valeurs de tension de ce capteur avec un convertisseur analogique numérique (CAN) la tension  $V_m$  mesurée vaut:



$$V_m = \left( \frac{R_{aval}}{R_{aval} + R_{serie}} \right) V_c$$

Si  $R_{serie}$  de l'ordre de grandeur de  $R_{aval}$  alors la mesure  $V_m$  est faussée:

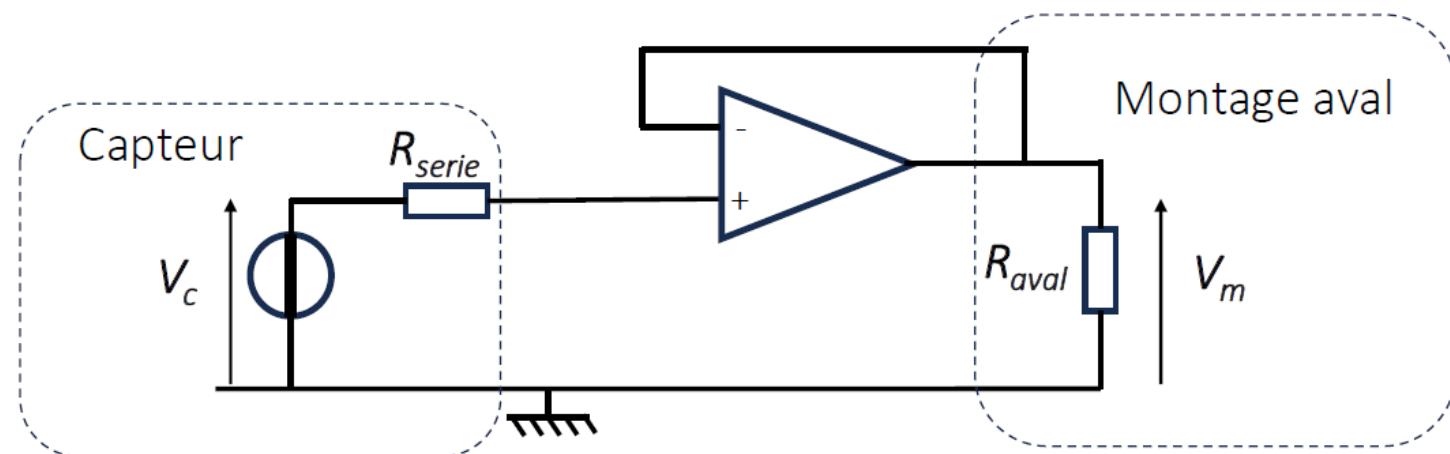
$$V_m \neq V_c$$

# Conditionnement dans le cas de capteur actifs

## Générateur de tension

Pour éviter cet inconvénient, il faut transmettre la tension du capteur sans l'influence de la résistance série: c'est le rôle du montage suiveur.

Le montage suiveur permet, quel que soit la valeur de la résistance série interne, d'avoir  $V_m = V_c$ .

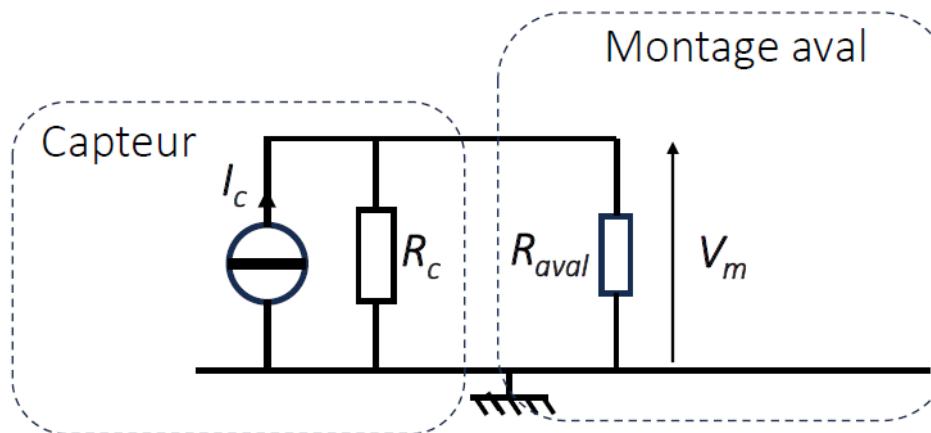


# Conditionnement dans le cas de capteur actifs

## Générateur de courant

Certains capteurs actifs ont un signal de sortie sous forme d'un courant qui varie avec le mesurande.

On peut les modéliser comme des générateurs de courant parfaits en parallèle avec une résistance interne  $R_c$  infinie.



Lorsque l'on veut mesurer ce courant avec un appareil de mesure ou lorsqu'on veut numériser les valeurs de tension de ce capteur avec un convertisseur analogique numérique (CAN) la tension  $V_m$  mesurée est faussée si  $R_c$  n'est pas infinie.

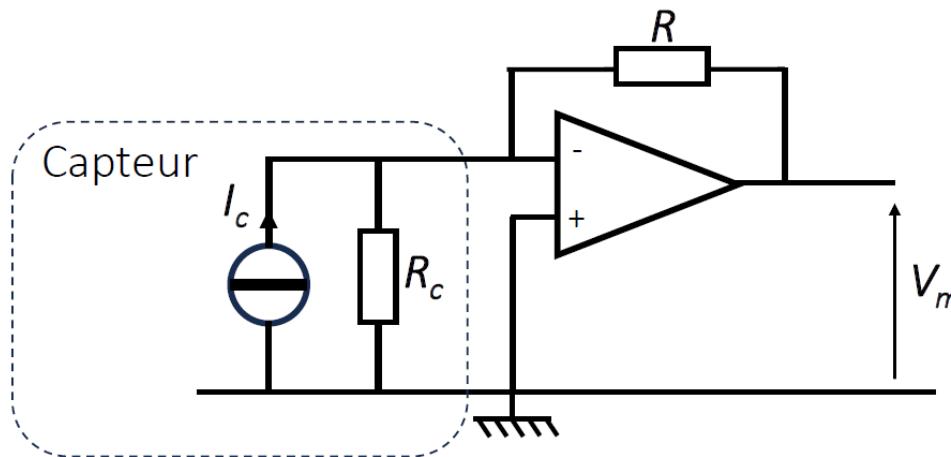
# Conditionnement dans le cas de capteur actifs

## Générateur de courant

Dans ce cas on utilise un montage en AOP appelé:

**Amplificateur transimpédance**

Dans ce cas, nous sommes en régime linéaire, aucun courant ne circule dans  $R_c$  car  $v_- = v_+$



On calcule simplement que, quel que soit la valeur de  $R_c$

$$V_m = R \cdot I_c$$