



Chapitre 4 : Electroniques associées aux capteurs Conditionneurs

Durée: 2h

Enseignante:

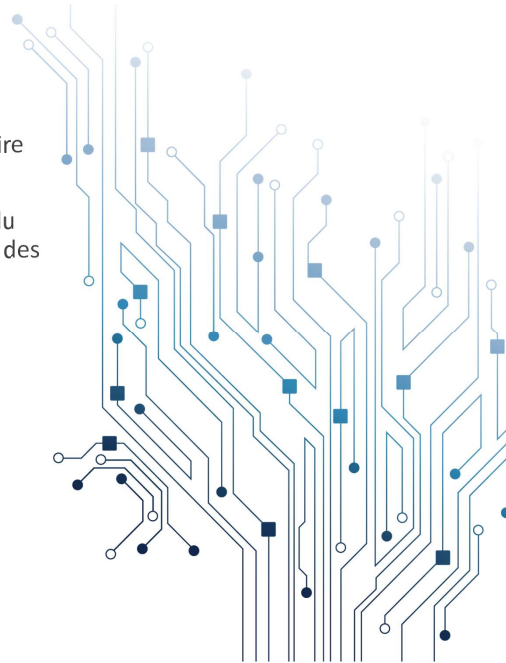
Dr. Ing. Faten Kardous

Faten.kardous@ensta.u-carthage.tn



Objectifs

- identifier le conditionnement nécessaire à un capteur
- Savoir exprimer la grandeur de sortie du circuit de conditionnement en fonction des données.
- reconnaître les circuits usuels de conditionnement



Plan du cours

Chapitre 1 – Introduction aux capteurs : Définitions et classifications

Chapitre 2 – Caractéristiques des capteurs : Comment choisir ?

Chapitre 3 – Les capteurs usuels



Chapitre 4 – Electronique Associée aux Capteurs (Conditionneurs)

Chapitre 5 – Acquisition de Données

Chapitre 6 – Acquisition de Données

Plan du chapitre

1. Conditionneurs pour les capteurs passifs

- Mesure directe 2, 3 ou 4 fils
- Montage potentiométrique simple
- Montage potentiométrique push-pull
- Pont Wheatstone : $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ pont et pont complet
- Montage potentiométrique avec amplification

2. Conditionneurs pour capteurs actifs

- Capteurs sources de tension
- Capteurs sources de courant
- Capteurs sources de charge

Introduction

Rappel : Le **conditionneur** est l'élément de **sortie du capteur** qui transforme les **variations** du **mesurande primaire** ou **secondaire** en **variations électriques exploitables** (tension, courant,).

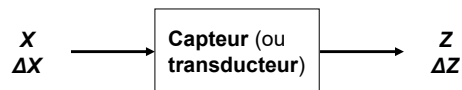


ENSTAB 2020/2021

5

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (1)

La réponse d'un **capteur passif** à la **variation** du **mesurande ΔX** se traduit comme une **variation d'impédance $\Delta R, \Delta L, \Delta C$** .



Exemples : Capteurs résistifs : jauges de contraintes, sondes température métalliques, capteurs de déplacement,

Capteurs capacitifs : microphones, capteurs de déplacement, détecteurs de proximité,

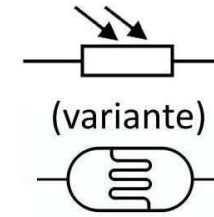
Capteurs inductifs : capteurs de déplacement, détecteurs de proximité,

ENSTAB 2020/2021

7

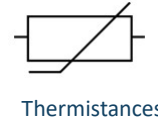


RTD - Résistances
Métalliques



Jauges
d'extensométrie

Photorésistances



Thermistances

Conditionneurs pour les capteurs passifs

PONT POTENTIOMÉTRIQUE SIMPLE

PONT POTENTIOMÉTRIQUE PUSH PULL

PONT WHEATSTONE

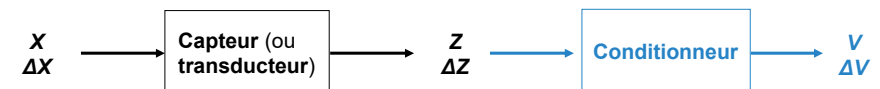
AMPLIFICATION

ENSTAB 2020/2021

6

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (2)

Nota : Pour obtenir une **sortie équivalente** à une **variation** de **tension ΔV** ou de **courant ΔI** , il sera nécessaire d'ajouter un **conditionneur de signal**.

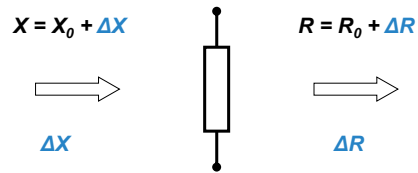


ENSTAB 2020/2021

8

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (4)

Application aux capteurs résistifs : $R = f(X)$



R_0 correspond à la **valeur à l'équilibre** (à spécifier) et ΔR à la **variation consécutive** à une **variation du mesurande ΔX** .

Nota : En général, le capteur fonctionne en **petite variation** : $\Delta R \ll R_0$

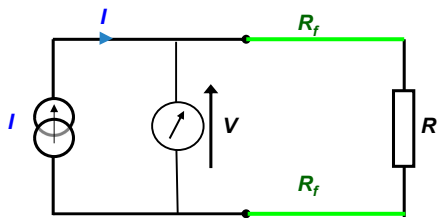
Capteur résistif : il faut l'associer à un circuit électrique pour obtenir un signal électrique

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (4)

1.1. Mesure directe 2 fils, 3 fils, 4 fils

Principe de mesure : une source de courant impose la valeur de l'**intensité I traversant le capteur** et un **voltmètre mesure la tension V à ses bornes**.

La **résistance** du capteur R est donnée par : $R = \frac{V}{I}$



On mesure la **tension V** suivante :

$$V = (R_f + R + R_f)I = (2R_f + R)I$$

La **résistance "mesurée" R_m** est donc :

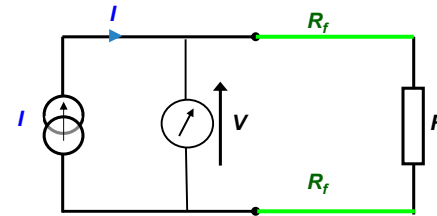
$$R_m = \frac{V}{I} = 2R_f + R$$

Inconvénient : La **résistance des conducteurs de liaison R_f** s'ajoute à la mesure de R et en réalité ce montage mesure une **résistance effective** : $R_e = R + 2R_f$

1.1. Mesure directe 2 fils, 3 fils, 4 fils

Principe de mesure : une source de courant impose la valeur de l'**intensité I traversant le capteur** et un **voltmètre mesure la tension V à ses bornes**.

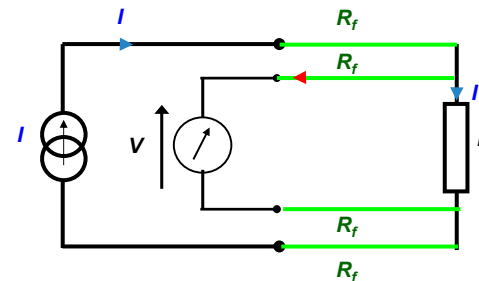
La **résistance** du capteur R est donnée par : $R = \frac{V}{I}$



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (5)

1.1. Mesure directe 2 fils, 3 fils, 4 fils

Le montage **4 fils** permet de s'**affranchir** des valeurs des **résistances des conducteurs de liaison R_f** .

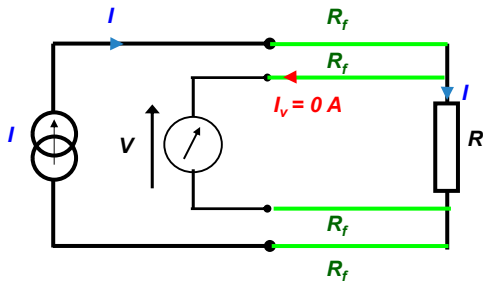


Inconvénient : Ce montage nécessite **plus de câbles** que le montage **2 fils**.

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (5)

1.1. Mesure directe 2 fils, 3 fils, 4 fils

Le montage **4 fils** permet de s'**affranchir** des valeurs des **résistances** des **conducteurs** de **liaison** R_f .



On mesure directement la **tension** $V = RI$

La **résistance "mesurée"** R_m est donc :

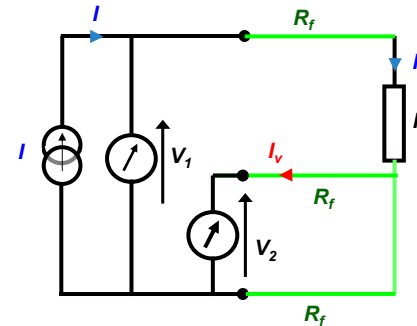
$$R_m = \frac{V}{I} = R$$

Inconvénient : Ce montage nécessite **plus** de **câbles** que le montage **2 fils**.

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (6)

1.1. Mesure directe 2 fils, 3 fils, 4 fils

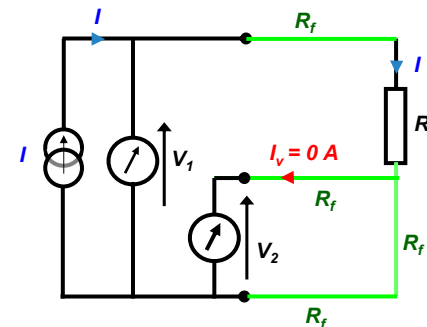
Le montage **3 fils** est un bon **compromis** (**nombre** de **câbles/résistance** de **liaison**) mais il nécessite la **mesure** de **deux tensions**.



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (6)

1.1. Mesure directe 2 fils, 3 fils, 4 fils

Le montage **3 fils** est un bon **compromis** (**nombre** de **câbles/résistance** de **liaison**) mais il nécessite la **mesure** de **deux tensions**.



On mesure la **tension** V_1

$$V_1 = (R_f + R + R_f)I = (2R_f + R)I$$

On mesure la **tension** V_2

$$V_2 = R_f I$$

La différence des tensions V_2 et V_1 nous donne

$$V_1 - V_2 = (R_f + R)I$$

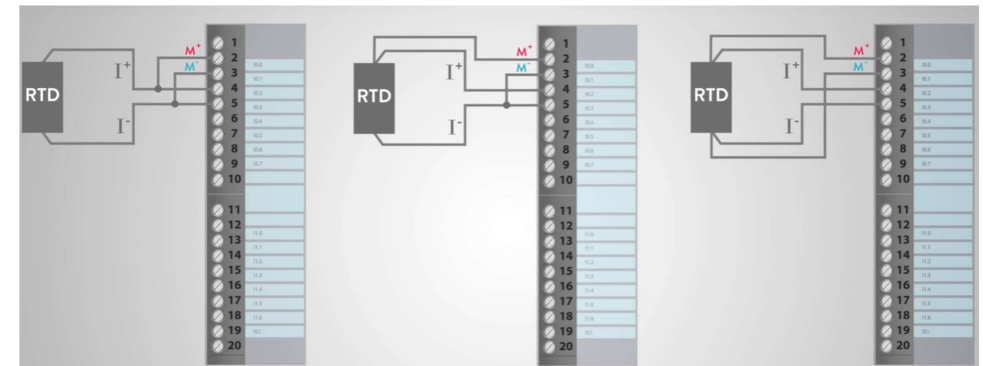
La **résistance "mesurée"** R_m est donc :

$$R_m = \frac{V_1 - V_2}{I} = R_f + R$$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (6)

1.1. Mesure directe 2 fils, 3 fils, 4 fils

Exemple : Montage d'un capteur de température résistif à une carte d'acquisition



Montage 2 fils

Montage 3 fils

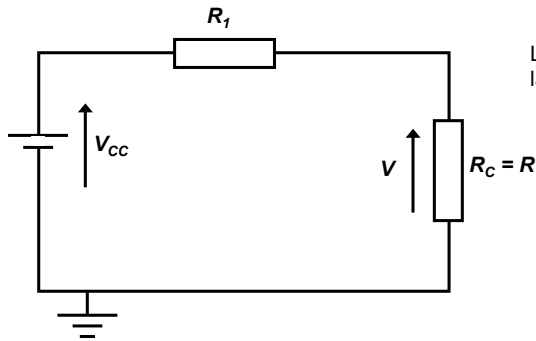
Montage 4 fils

Attention : L'application d'un courant I important induit une dissipation thermique importante qui entraîne une erreur ; le courant doit être maintenu le plus faible possible

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (8)

1.2. Montage potentiométrique simple

Principe de mesure : une source de tension alimente un pont diviseur de tension avec une résistance fixe R_1 et une autre représentant le capteur R .



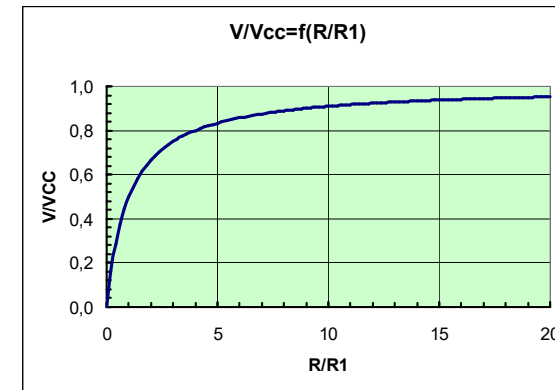
Le montage suivant nous permet d'écrire la variation de V :

$$V = \frac{R}{R_1 + R} V_{cc}$$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (9)

1.2. Montage potentiométrique simple

Nota : L'évolution de V en fonction de R n'est pas linéaire.



$$\frac{V}{V_{cc}} = \frac{R}{R_1 + R} = \frac{x}{1 + x}$$

Avec : $x = \frac{R}{R_1}$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (10)

1.2. Montage potentiométrique simple

Choix de la valeur de R_1

Si on fixe la valeur de la résistance R_1 égale à R_0 , et si $R = R_0 + \Delta R$ on obtient :

$$V = \frac{R}{R_0 + R} V_{cc} = \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} V_{cc}$$

Sensibilité du montage :

Nota : Si le capteur travaille en petits signaux ($R_0 \gg \Delta R$), la réponse du conditionneur est linéaire



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (10)

1.2. Montage potentiométrique simple

Choix de la valeur de R_1

Si on fixe la valeur de la résistance R_1 égale à R_0 , et si $R = R_0 + \Delta R$ on obtient :

$$V = \frac{R}{R_0 + R} V_{cc} = \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} V_{cc}$$

Sensibilité du montage : $k = \frac{dV}{dR} = \frac{[(R_0 + R) - R]}{(R_0 + R)^2} V_{cc} = \frac{R_0}{(R_0 + R)^2} V_{cc}$

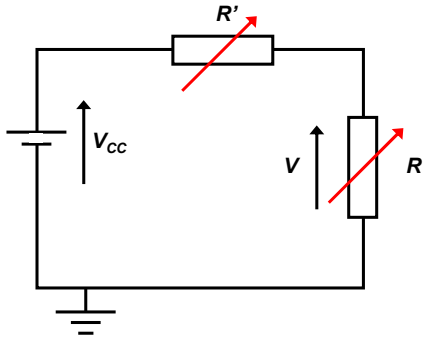
Nota : Si le capteur travaille en petits signaux ($R_0 \gg \Delta R$), la réponse du conditionneur est linéaire

$$k = \frac{dV}{dR} \bigg|_{R_0} = \frac{V_{cc}}{4R_0} \quad \Rightarrow \quad \Delta V = \frac{V_{cc}}{4R_0} \Delta R = k \Delta R$$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (9)

1.3. Montage potentiométrique push-pull

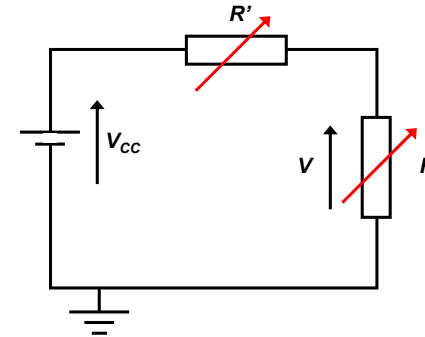
Dans ce montage, la **résistance fixe** R_1 est remplacée par un **second capteur identique** au premier mais dont la **variation** est **opposée** au **premier capteur** : $R' = R_0 - \Delta R$



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (9)

1.3. Montage potentiométrique push-pull

Dans ce montage, la **résistance fixe** R_1 est remplacée par un **second capteur identique** au premier mais dont la **variation** est **opposée** au **premier capteur** : $R' = R_0 - \Delta R$



Le montage suivant nous permet d'écrire la variation de V :

$$V = \frac{R}{R + R'} V_{cc} = \frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + \Delta R + R_0 - \Delta R} V_{cc}$$

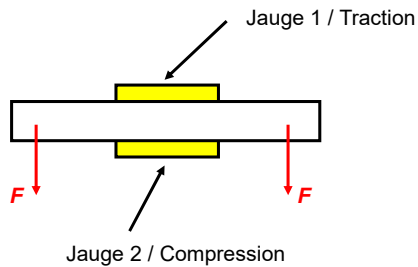
$$V = \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} V_{cc}$$

$$V = \frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{2R_0} \Delta R$$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (10)

1.3. Montage potentiométrique push-pull

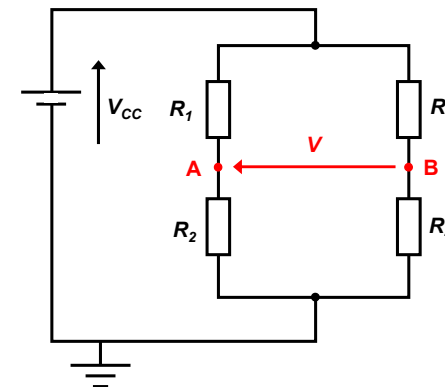
Ce type de montage est souvent utilisé dans le cas de **jauges d'extensométrie identiques** mais subissant des **déformations égales** en **module** et de **sens opposés**.



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (10)

1.4. Montage en pont Wheatstone / d'impédance :

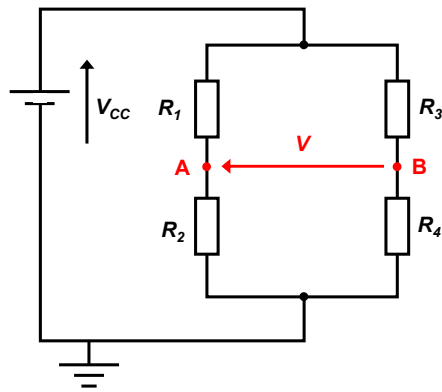
Le circuit le mieux adapté pour la mesure de petites variations de résistances électriques (maximum 10%)



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (10)

1.4. Montage en pont Wheatstone / d'impédance :

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



Le signal de sortie s'écrit de la façon suivante :

$$V = V_{AB} = V_A - V_B$$

Avec : $V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc}$

et $V_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{cc}$

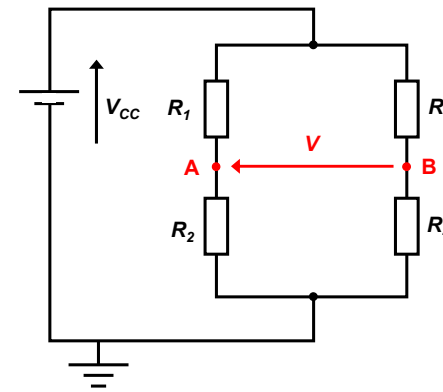
On obtient alors :

$$V = V_A - V_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{cc}$$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (10)

1.4. Montage en pont Wheatstone / d'impédance :

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



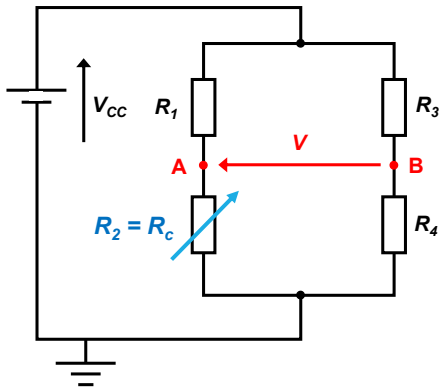
Pont équilibré ? $V = V_0 = 0$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R_2(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R_2) &= 0 \\ \Rightarrow R_2R_3 + R_2R_4 &= R_1R_4 + R_2R_4 \\ \Rightarrow \text{Fixer les valeurs de résistance} &\text{ puisque l'on doit avoir} \end{aligned}$$

$$R_2R_3 = R_1R_4$$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (11)

1.4. Montage en pont Wheatstone /impédance : Montage **quart de pont**



$$V = V_A - V_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{cc}$$

$$V = \left(\frac{R_c}{R_1 + R_c} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{cc}$$

Pont équilibré ? $R_c R_3 = R_1 R_4$

Choix pratique : $R_1 = R_2 = R_4 = R_0$, le pont sera à l'équilibre pour la valeur au repos du capteur $R = R_0$

$$V = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) V_{cc}$$

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (13)

1.4. Montage en pont d'impédance : Montage **quart de pont**

On obtient alors l'expression de V :

$$V = \frac{\Delta R}{2(2R_0 + \Delta R)} V_{cc} \approx \frac{V_{cc}}{4R_0} \Delta R \quad \text{si } \Delta R \ll R_0$$

Avantages du montage en pont :

- si $R = R_0$ alors $V = 0$,
- le **signe** de V donne le **signe** du **mesurande**,
- si $R > R_0$, V est **positif** et si $R < R_0$ alors V est **négatif**.

Inconvénient :

- Non linéarité du pont

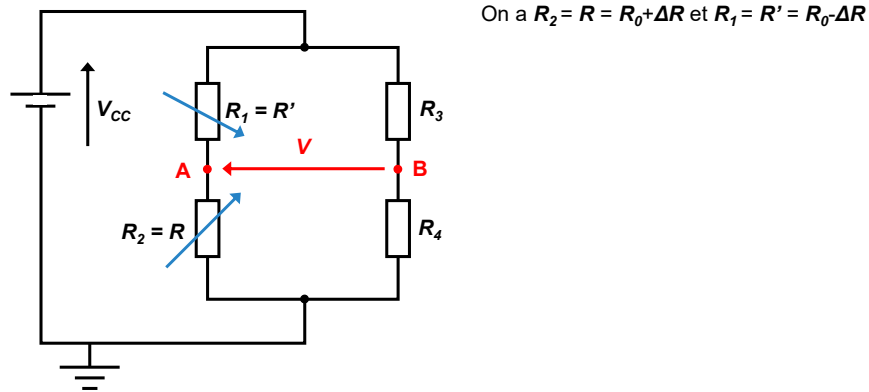
Calcul de la sensibilité du pont :

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (14)

1.4. Montage en pont d'impédance : Montage push-pull demi-pont

Remplacer la résistance fixe R_1 par un second capteur identique au premier mais de variation opposée : $R' = R_0 - \Delta R$.

⇒ 2 résistances fixes R_3 et R_4 et 2 capteurs représentés par R et R' .



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (14)

1.4. Montage en pont d'impédance : Montage push-pull demi-pont

On a $R_2 = R = R_0 + \Delta R$ et $R_1 = R' = R_0 - \Delta R$

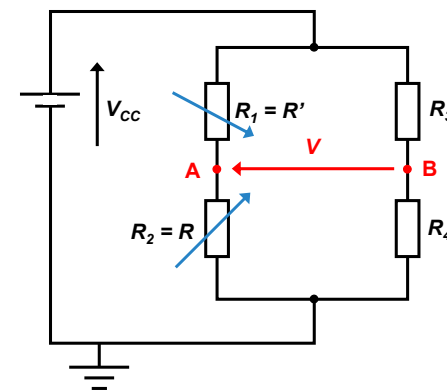
On a pour signal de sortie :

$$V = V_A - V_B = \left(\frac{R}{R' + R} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{cc}$$

En fixant $R_4 = R_3$:

$$V = V_A - V_B = \left(\frac{R}{R' + R} - \frac{1}{2} \right) V_{cc}$$

soit, $V = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{1}{2} \right) V_{cc}$



1. Conditionneurs pour capteurs passifs (15)

1.4. Montage en pont d'impédance : Montage push-pull demi-pont

On obtient alors l'expression de V :

$$V = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{1}{2} \right) V_{cc} = \frac{V_{cc}}{2R_0} \Delta R$$

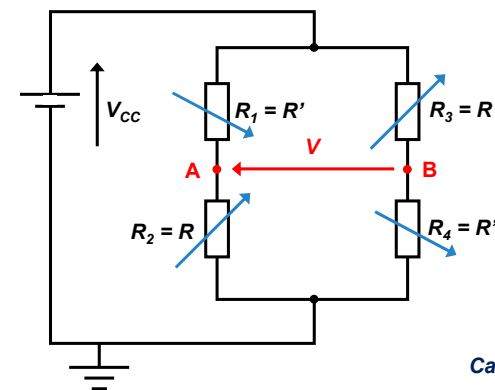
Avantages du montage push-pull demi-pont :

- La composante continue de V est annulée,
- La variation de V avec ΔR est linéaire.

Calcul de la sensibilité du pont :

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (15)

1.4. Montage en pont Wheatstone /d'impédance : Pont Complet



$$V = V_A - V_B = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{R_0 - \Delta R}{2R_0} \right) V_{cc}$$

$$V = \frac{\Delta R}{R_0} V_{cc}$$

Calcul de la sensibilité du pont :

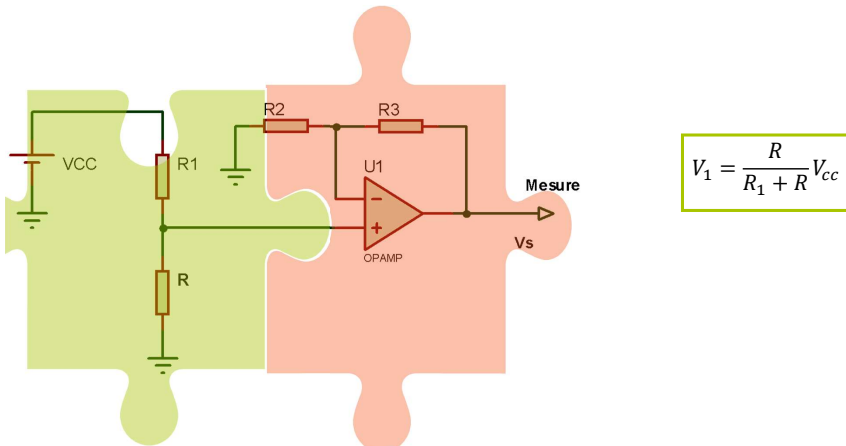
Avantages du montage pont complet :

- La variation de V avec ΔR est linéaire.

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (16)

1.4. Montage potentiométrique avec amplification du signal

Ce **conditionneur** est utilisé notamment pour les **photorésistances** ($R = f(\Phi)$)



$$V_1 = \frac{R}{R_1 + R} V_{cc}$$

Conditionneur 1 :
Montage
potentiométrique simple

Conditionneur 2 :
Montage amplificateur
non inverseur

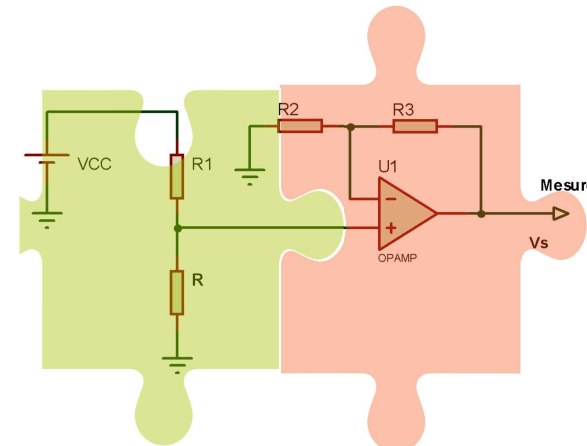
ENSTAB 2020/2021

33

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (16)

1.4. Montage potentiométrique avec amplification du signal

Ce **conditionneur** est utilisé notamment pour les **photorésistances** ($R = f(\Phi)$)



A l'entrée de l'**amplificateur opérationnel**, on a :

$$V^+ = \frac{R}{R + R_1} V_{cc}$$

$$V^- = \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_{cc}$$

Or, on a : $V^+ = V^-$

$$\text{donc : } \frac{R}{R + R_1} V_{cc} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_s$$

$$V_s = \frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot V_1$$

Conditionneur 1 :
Montage
potentiométrique simple

Conditionneur 2 :
Montage amplificateur
non inverseur

ENSTAB 2020/2021

34

1. Conditionneurs pour capteurs passifs (17)

1.4. Montage potentiométrique avec amplification du signal

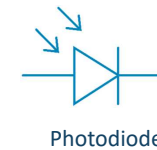
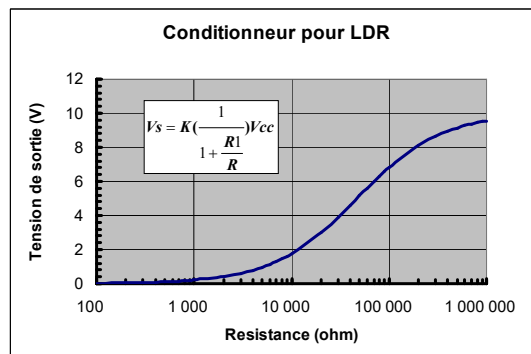
On obtient alors :

$$V_s = \frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} V_{cc}$$

Pour une photorésistance la variation $R = f(\Phi)$ est de la forme

$$R = ae^{-b\phi}$$

R diminue si l'intensité du flux lumineux augmente

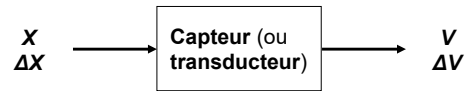


Conditionneurs pour les capteurs actifs

1. CAPTEURS SOURCES DE TENSION
2. CAPTEURS SOURCES DE COURANT
3. CAPTEURS SOURCES DE CHARGES

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (1)

La réponse d'un capteur actif à la variation du mesurande ΔX se traduit par une variation de tension : ΔV , de courant : ΔI ou de charge électrique ΔQ .



Exemples : Variation de tension : sondes température thermocouple,

Variation d'intensité : photodiode,...

Variation de charge : accéléromètre piézoélectrique

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (2)

Nota : Pour obtenir une **sortie équivalente** à une variation de tension ΔV ou de courant ΔI , en théorie, il n'est **pas nécessaire** d'ajouter un **conditionneur de signal**, cependant pour des **questions d'adaptation d'impédance**, un **conditionneur de signal** est **souvent nécessaire** au montage.

Les **capteurs piézoélectriques** requièrent un **amplificateur de charge** qui transforme la **variation ΔQ en variation ΔV** .

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (3)

2.1. Capteurs sources de tension

Exemple : Thermocouple

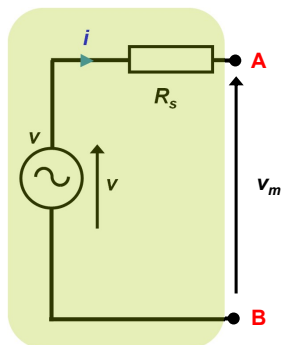


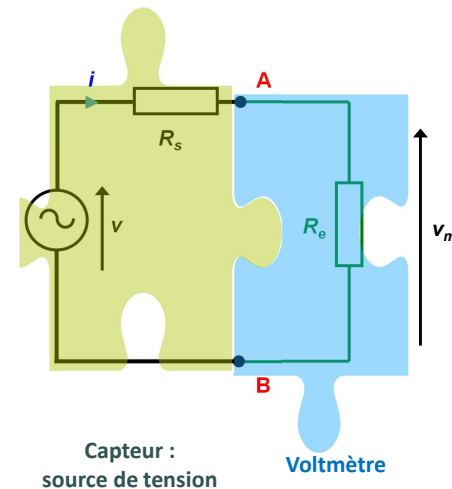
Schéma électrique équivalent du capteur

Tension de sortie: $v_m = v - R_s i$
 Tension de sortie à vide : $v_s = v$
 Impédance de sortie : R_s

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (4)

2.1. Capteurs sources de tension

Mesure de la tension de sortie : Utilisation d'un voltmètre



Impédance d'entrée du voltmètre : R_e

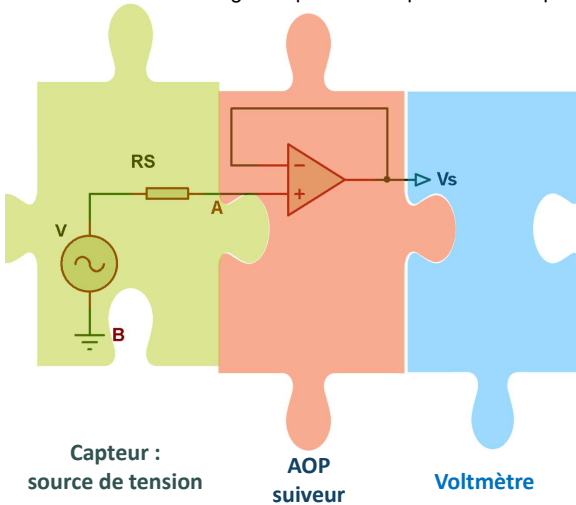
Tension mesurée : $v_m = \frac{R_e}{R_s + R_e} v$

Si R_s élevée devant R_e : $v_m \approx \frac{R_e}{R_s} v \ll v$

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (5)

2.1. Capteurs sources de tension

Utilisation d'un montage adaptateur d'impédance – Amplificateur suiveur



Impédance d'entrée de l'AO :

$$\begin{aligned} Z_e &= \infty \\ i^* &= i^* = 0 \\ v^* &= v^- \\ v^* &= v \end{aligned}$$

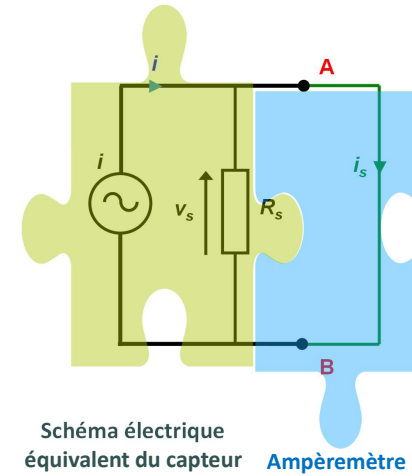
Tension sortie :

$$V_s = V$$

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (6)

2.1. Capteurs sources de courant

Exemple : Photodiode



Mesure du courant de sortie :

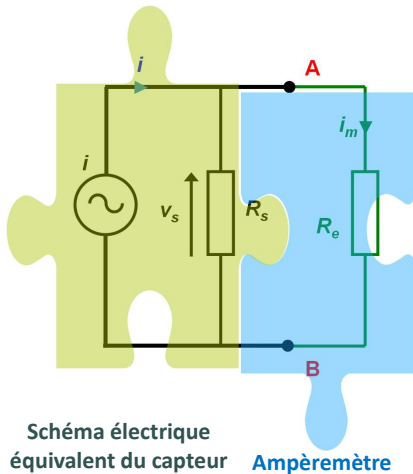
$$\text{Courant de sortie: } i_s = i - \frac{V_s}{R_s}$$

$$\text{Courant de court circuit: } I_{cc} = I$$

$$\text{Impédance de sortie: } R_s$$

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (7)

2.1. Capteurs sources de courant



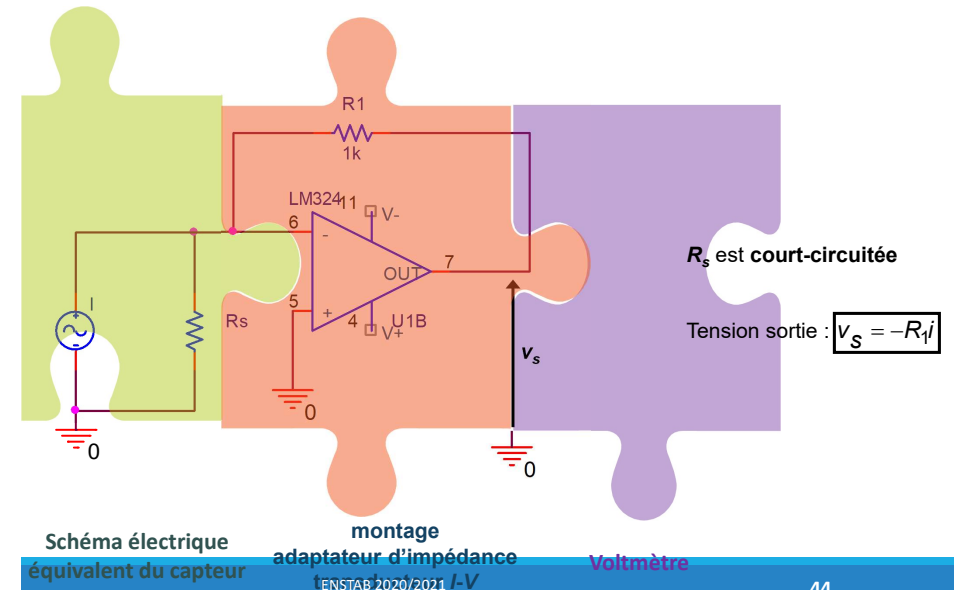
Mesure du courant de sortie :

$$\text{Courant mesuré: } i_m = \frac{R_s}{R_s + R_e} i$$

$$\text{Si } R_s \text{ faible devant } R_e \text{ alors } i_m = \frac{R_s}{R_e} i$$

2. Conditionneurs pour capteurs actifs (8)

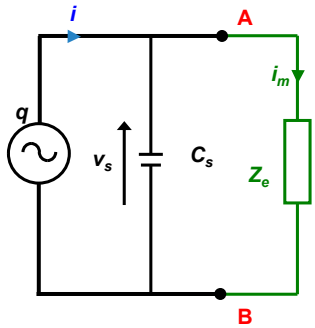
2.1. Capteurs sources de courant



2.1. Capteurs sources de charge

Exemple : accéléromètre piézoélectrique

Schéma électrique équivalent :

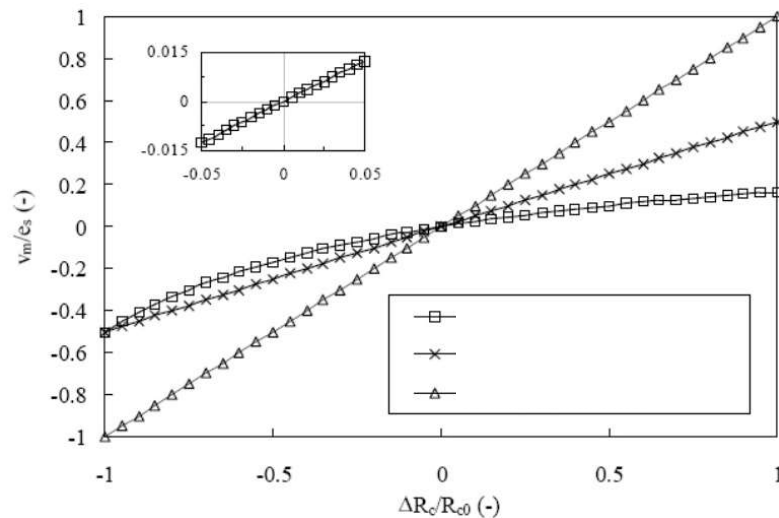


Tension sortie :

$$v_s = \frac{q}{C_s}$$

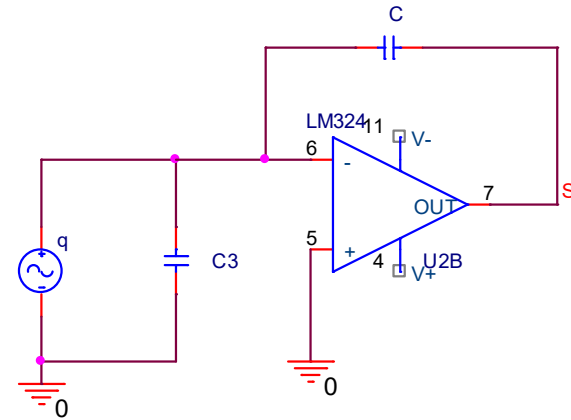
Révision

On considère les courbes caractérisant la sortie d'un pont Wheatstone V_m en fonction de ΔR . Identifier celles d'un montage en $1/4$ de pont, $1/2$ pont et pont complet.



2.1. Capteurs sources de charge

Utilisation d'un montage adaptateur d'impédance



Tension sortie :

$$v_s = \frac{q}{C}$$

QCM

QCM

Le LM335 est un capteur électronique de température.

A 0°C , le capteur fournit une tension de sortie de 2,73 V. Sachant que sa sensibilité est de $+10\text{ mV}/^\circ\text{C}$, quelle température correspond à une tension de sortie de 2,93 V ?

- a) 2°C
- b) 20°C
- c) 200°C
- d) 293°C

Le LM335 est un capteur électronique de température.

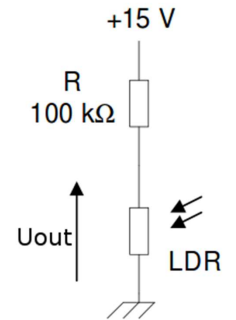
A 0°C , le capteur fournit une tension de sortie de 2,73 V. Sachant que sa sensibilité est de $+10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, quelle température correspond à une tension de sortie de 2,93 V ?

- a) 2°C
- b) **20°C**
- c) 200°C
- d) 293°C

La résistance d'une photorésistance LDR diminue quand l'éclairement lumineux augmente. Elle est alimentée comme suit :

Comment évolue la tension U_{out} quand le temps passe de nuageux à ensoleillé ?

- a) la tension augmente
- b) la tension diminue
- c) la tension reste pratiquement constante



La résistance d'une photorésistance LDR diminue quand l'éclairement lumineux augmente. Elle est alimentée comme suit :

Comment évolue la tension U_{out} quand le temps passe ensoleillé ?

- a) la tension augmente
- b) **la tension diminue**
- c) la tension reste pratiquement constante

