Département d'électronique

Filière : ELECTRONIQUE

Cours : Capteurs en instrumentation industrielle

Enseignante : Dr.DAAS

Année universitaire : 2024/2025

PLAN

Chapitre 1 : Notions sur les Capteurs

Chapitre 2 : Conditionnement des capteurs

Chapitre 3 : Exemples de capteurs industriels

Chapitre 4 : Systèmes de transmission pour capteurs

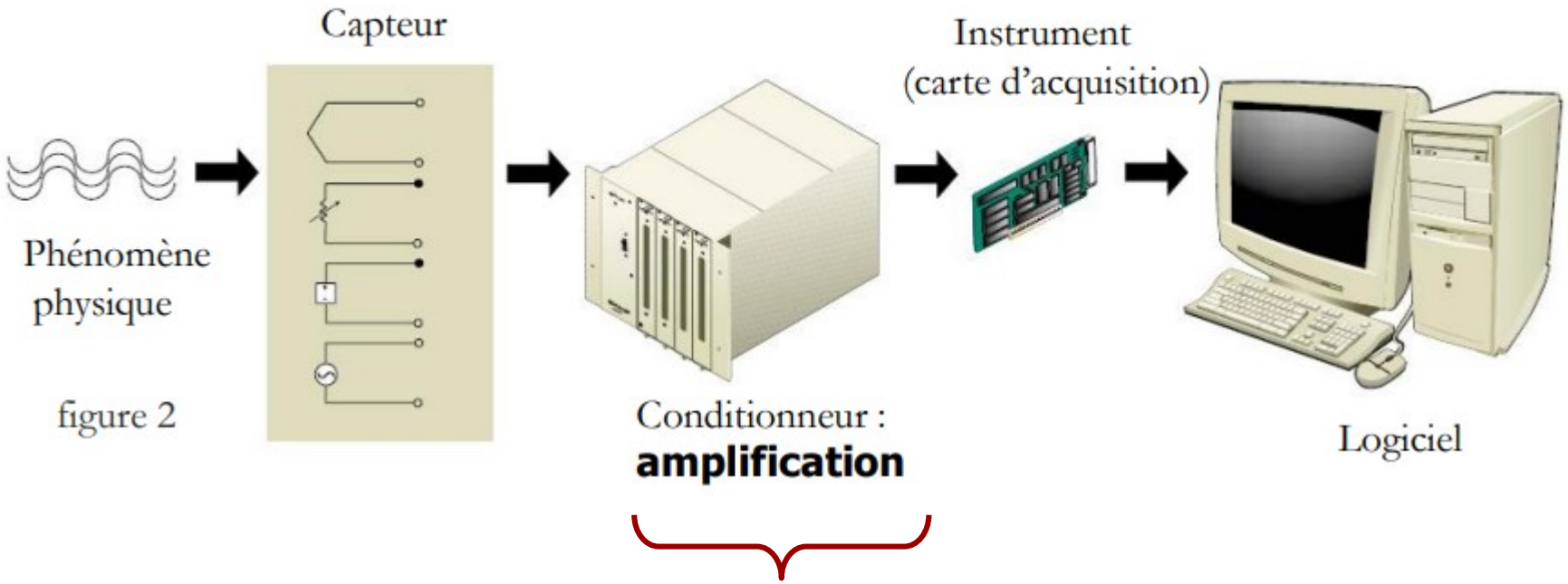
Chapitre 5 : Introduction aux capteurs intelligents

PLAN

Chapitre 2 : Conditionnement des capteurs

1. Conditionneurs de capteurs passifs
2. Conditionneurs de capteurs actifs
3. Les Amplificateurs
4. Les filtres

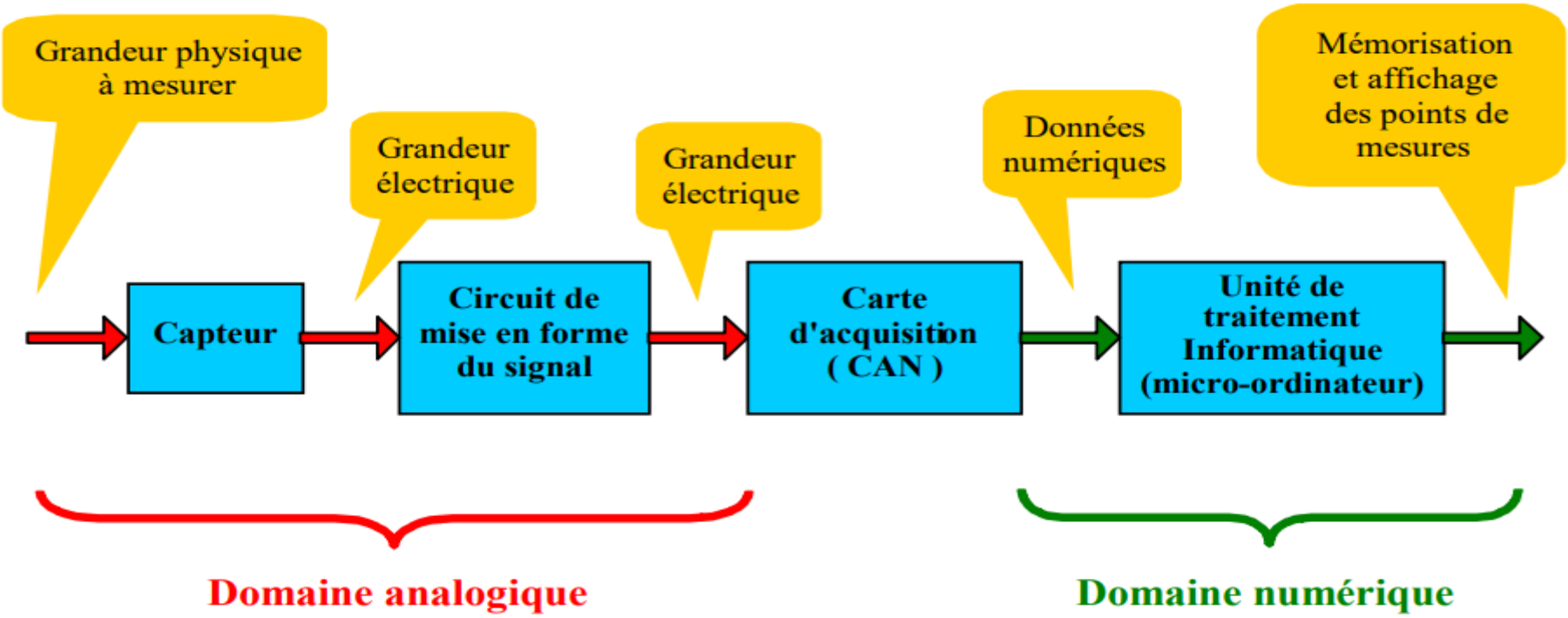
Caractéristiques d'une chaîne de mesure (rappel)



- Un conditionneur de signal dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité d numérisation; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.

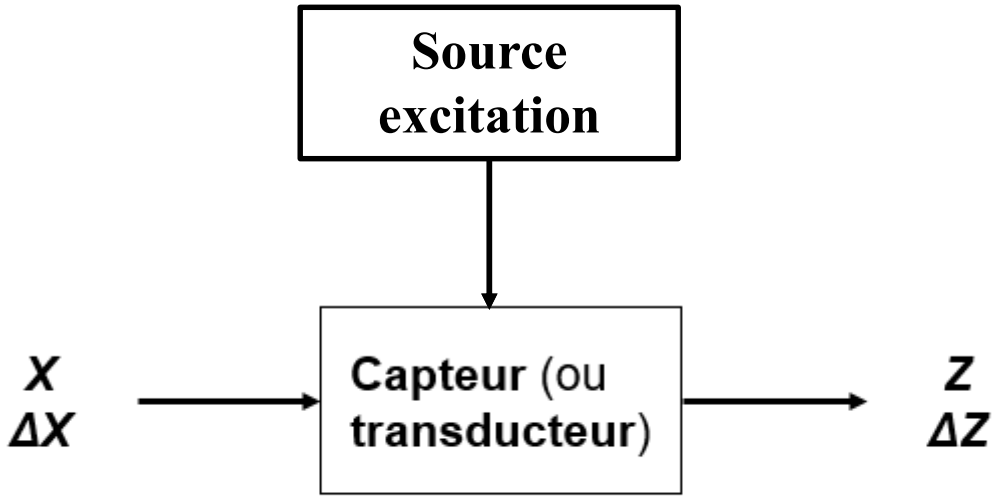
Caractéristiques d'une chaîne de mesure (rappel)

La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum quatre étages :



Conditionneurs de capteurs passifs

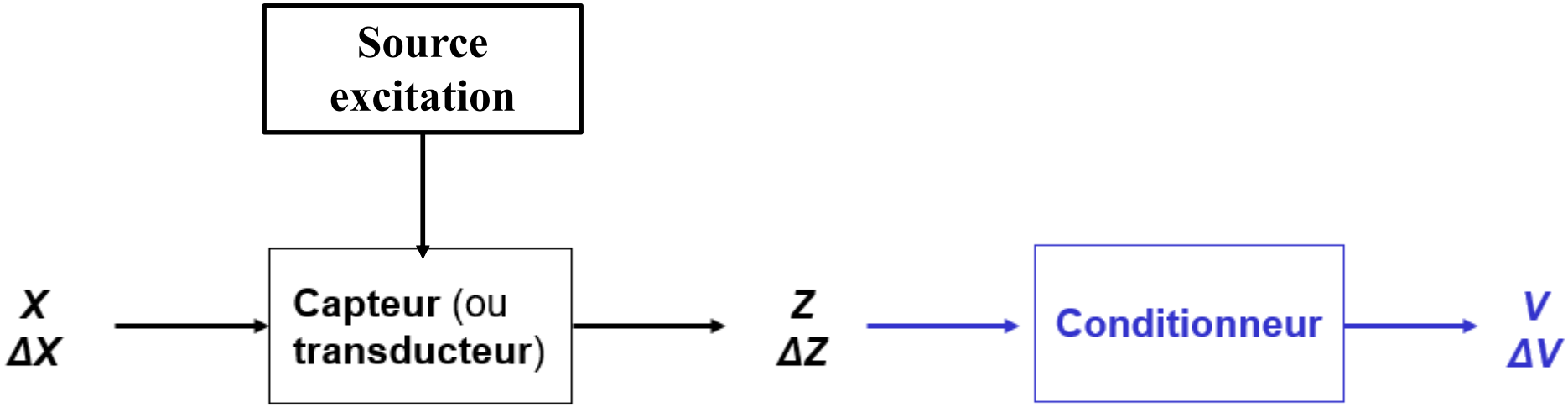
La réponse d'un **capteur passif** à la **variation** du **mesurande** ΔX se traduit comme une **variation** d'**impédance** ΔR, ΔL, ΔC.



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,

Conditionneurs de capteurs passifs

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



Conditionneurs de capteurs passifs

But: Obtenir un signal électrique représentatif de la variation de l'impédance (Z_c) sous l'influence du mesurande.

Deux types de conditionneurs de capteurs passifs:

=> $v_m = e_s\ F(Z_c, Z_1, Z_2...)$: amplitude du signal

- Montages potentiométriques
- Ponts

=> $f_m = G(Z_c, Z_1, Z_2...)$: fréquence du signal

- Oscillateurs

Pour obtenir une tension :

=> source de tension ou de courant

=> impédances supplémentaires

Conditionneurs de capteurs passifs

- Caractéristiques générales

- Sensibilité

sensibilité du capteur : $S = \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$

sensibilité du conditionneur: $S_z = \frac{\Delta v_m}{\Delta Z_c}$

=> sensibilité globale : $S_c = \frac{\Delta v_m}{\Delta m} = \frac{\Delta Z_c}{\Delta m} \frac{\Delta v_m}{\Delta Z_c}$

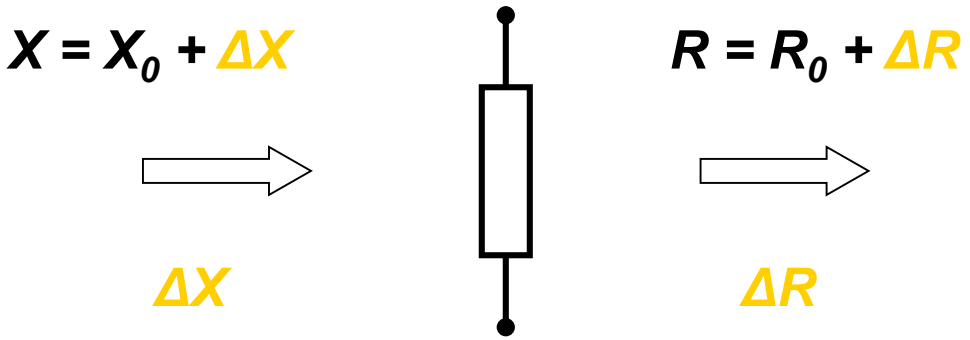
/!\ S_Z dépend des valeurs des impédances Z_1, Z_2...

- Linéarité => S_c = constante

- Compensation des grandeurs d'influence => $\frac{\Delta v_m}{\Delta g} = 0$

Conditionneurs de capteurs passifs

Application aux capteurs résistifs : $\boxed{R = f(X)}$



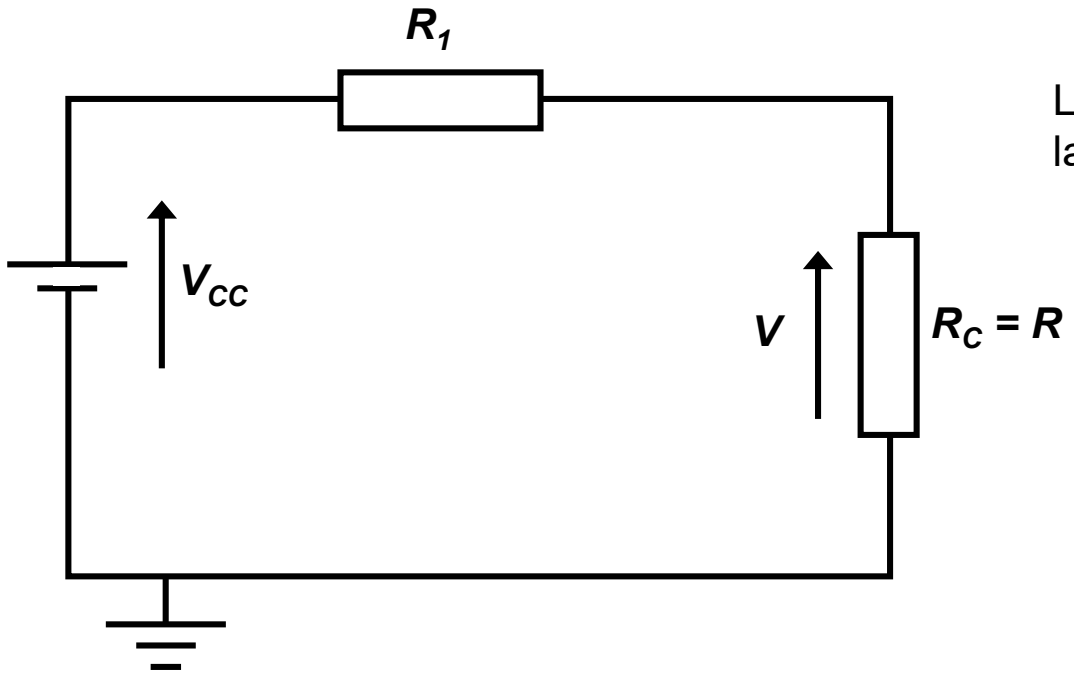
R_0 correspond à la **valeur** à l'**équilibre** (à spécifier) et ΔR à la **variation consécutive** à une **variation** du **mesurande** ΔX.

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

Conditionneurs de capteurs passifs

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.



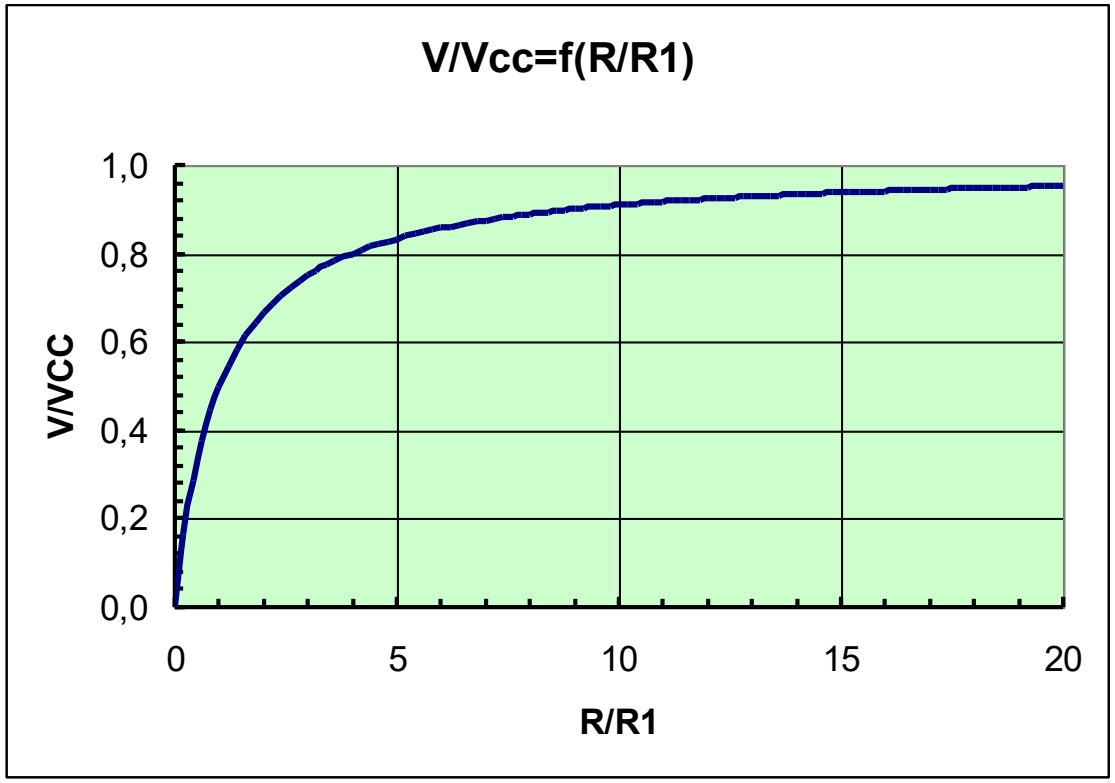
Le montage suivant nous permet d'écrire la variation de ***V :***

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

Conditionneurs de capteurs passifs

1.2. Montage potentiométrique simple

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



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

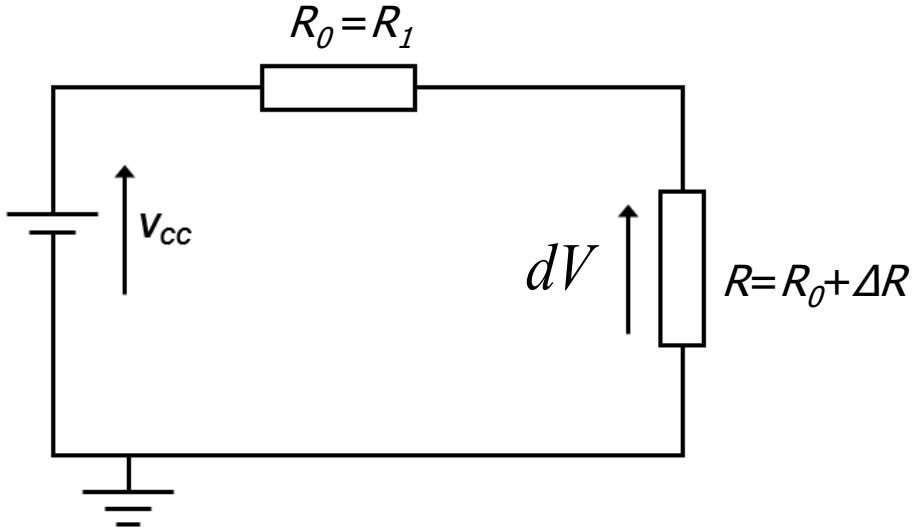
Avec : $x = \frac{R}{R_1}$

Conditionneurs de capteurs passifs

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 :



$$V = \frac{R}{Ro+R}Vcc = \frac{Ro+\Delta R}{2Ro+\Delta R}Vcc$$

Si le capteur travaille en petits si $\Delta R << R_0$

Sensibilité du montage :

$$S = \frac{dV}{dR} = \frac{[(Ro+R)-R)]}{(Ro+R)^2}Vcc = \frac{Ro}{(Ro+R)^2}Vcc \Rightarrow S = \left.\frac{dV}{dR}\right|_{R_0} = \frac{V_{cc}}{4R_0}$$

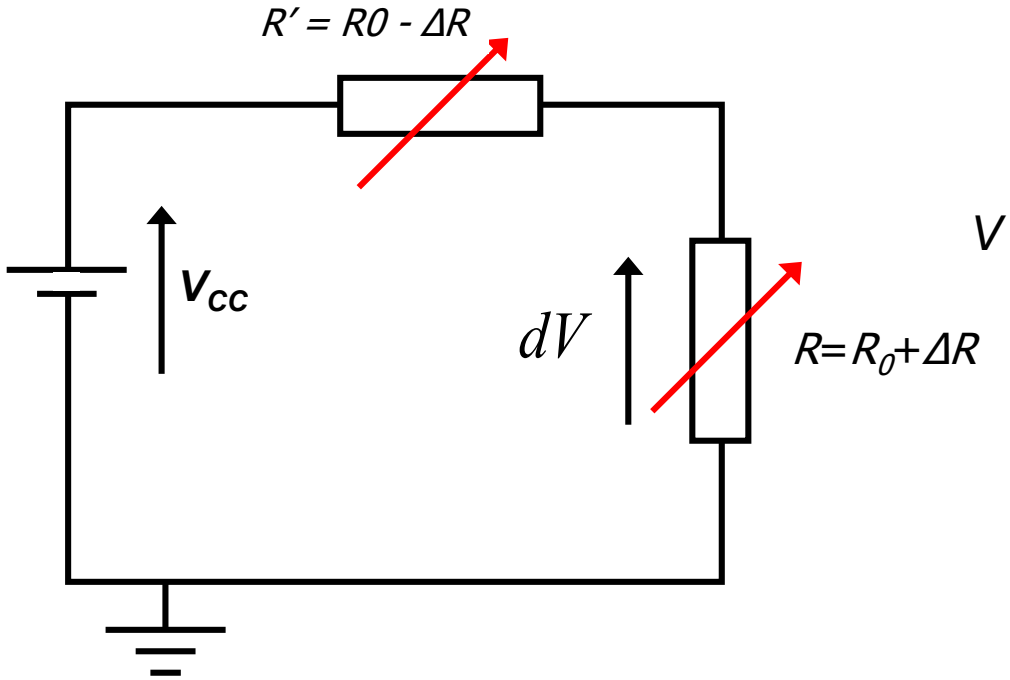
la réponse du conditionneur est linéaire

$$\Delta V = \frac{V_{cc}}{4R_0}\Delta R = S \times \Delta R$$

Conditionneurs de capteurs passifs

1.3. Montage potentiométrique push-pull si $\Delta R >> R_0$

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 :*

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

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

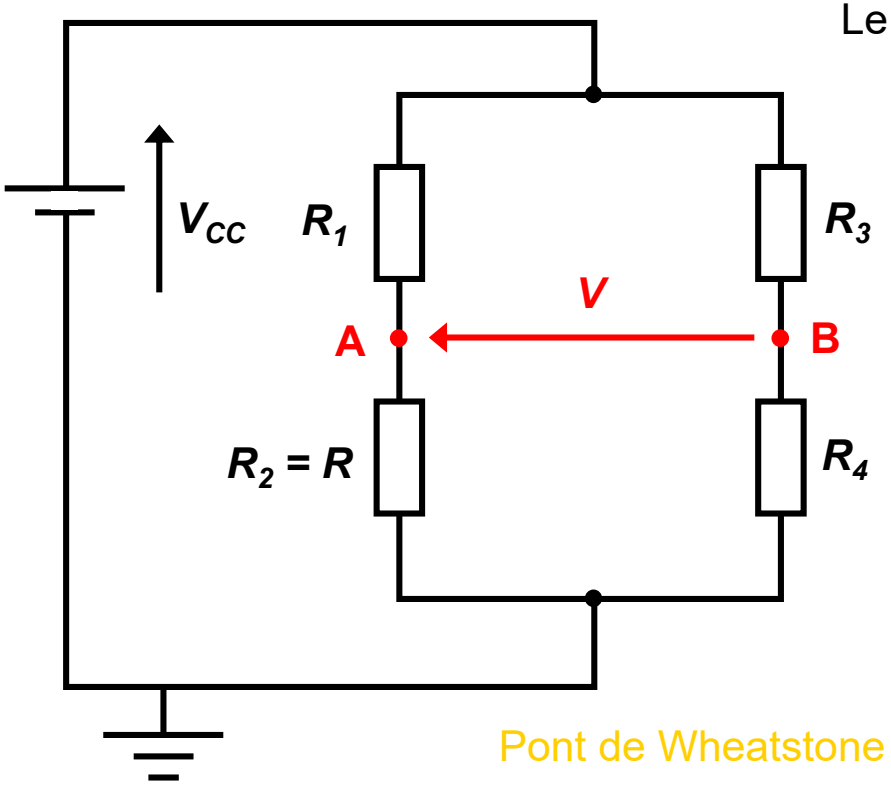
la réponse du conditionneur est linéaire

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

Conditionneurs de capteurs passifs

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

Le **capteur** constitue une **branche** du **pont**, ici $R_2 = R$



Pont de Wheatstone

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

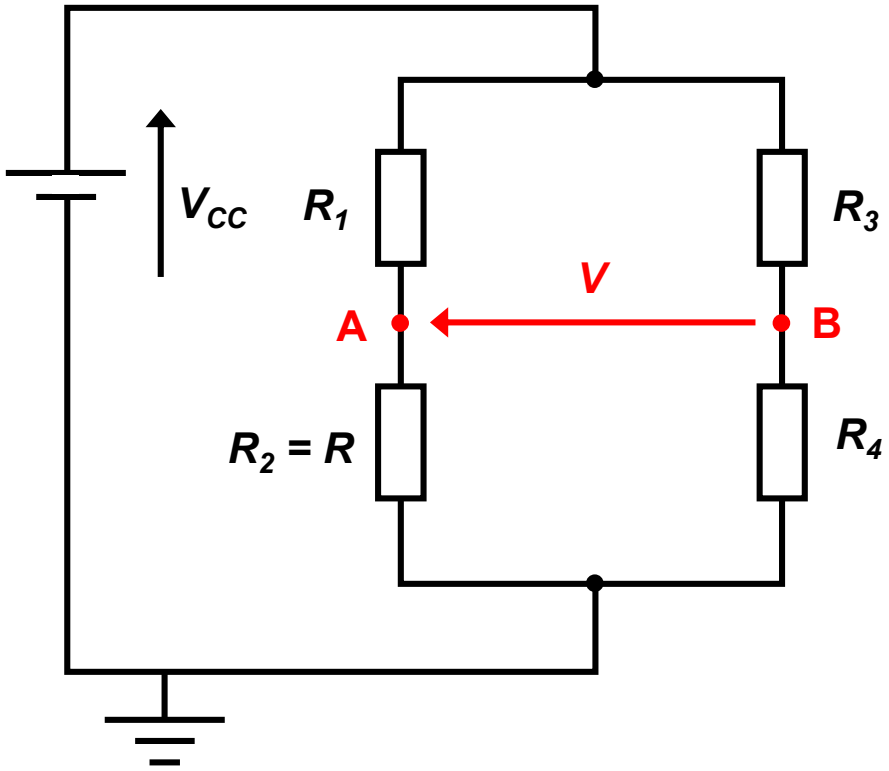
$$V = V_{AB} = V_A - V_B$$

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

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

Conditionneurs de capteurs passifs

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



Pont de Wheatstone

On obtient alors :

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

Si on considère $\boldsymbol{R_2 = R}$, alors on a :

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

Conditionneurs de capteurs passifs

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

On parle de **pont équilibré** lorsque $V = V_0 = 0$

Dans ces conditions, on a :

$$V = V_0 = 0 \Rightarrow R(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R) = 0 \quad \Rightarrow RR_3 + RR_4 = R_1R_4 + RR_4$$

Ce qui permet de fixer les valeurs de résistance puisque l'on doit avoir $RR_3 = R_1R_4$

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

Conditionneurs de capteurs passifs

1.4. Montage en pont d'impédance : Montage quart de pont si $\Delta R << R_0$

On obtient alors l'expression de ***V*** :

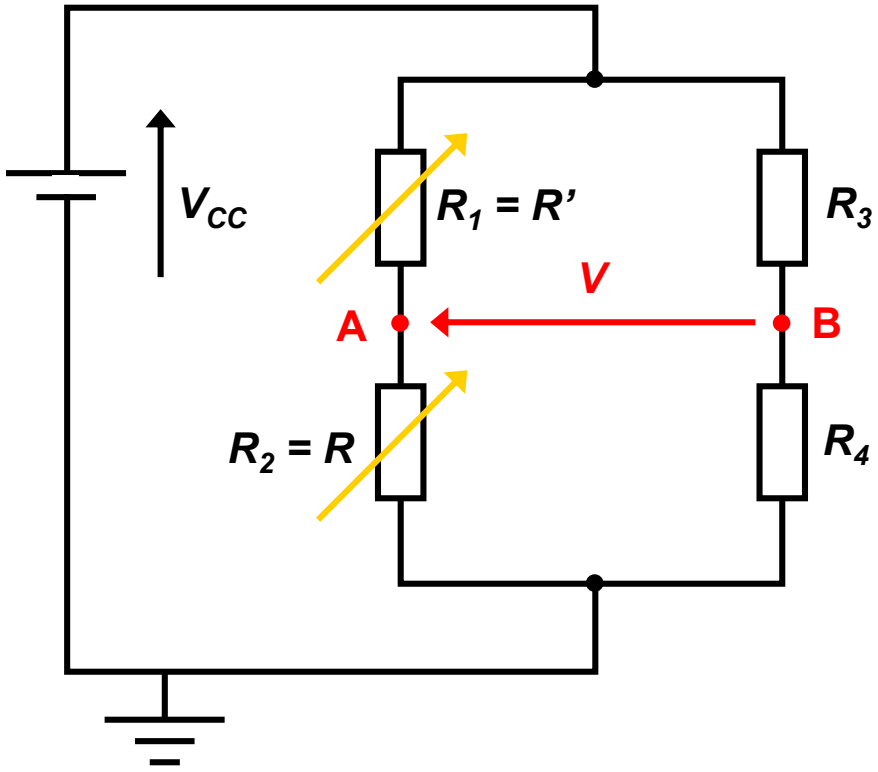
$$V = \left(\frac{R}{R_0 + R} - \frac{1}{2}\right)V_{cc} = \frac{R - R_0}{2(R + R_0)}V_{cc} = \frac{\Delta R}{2(2R_0 + \Delta R)}V_{cc} \approx \frac{V_{cc}}{4R_0}\Delta R \quad \text{si } \Delta R << R_0$$

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**.

1.4. Montage en pont d'impédance : Montage push-pull demi-pont si $\Delta R >> R_0$

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** : $R' = R_0 - \Delta R$.
On a alors 2 résistances fixes R_3 et R_4 et 2 capteurs représentés par R et R'.



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

On a pour signal de sortie :

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

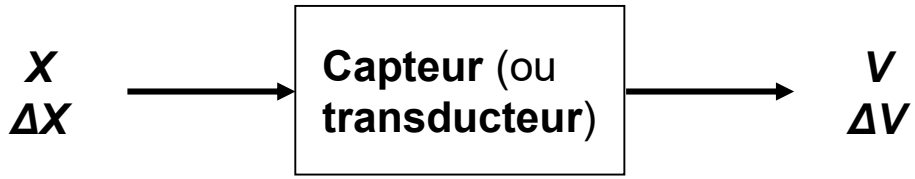
En fixant les valeurs de R_4 et R_3 égales à R_0, on a alors :

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

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

Conditionneurs de capteurs actifs

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

Conditionneurs de capteurs actifs

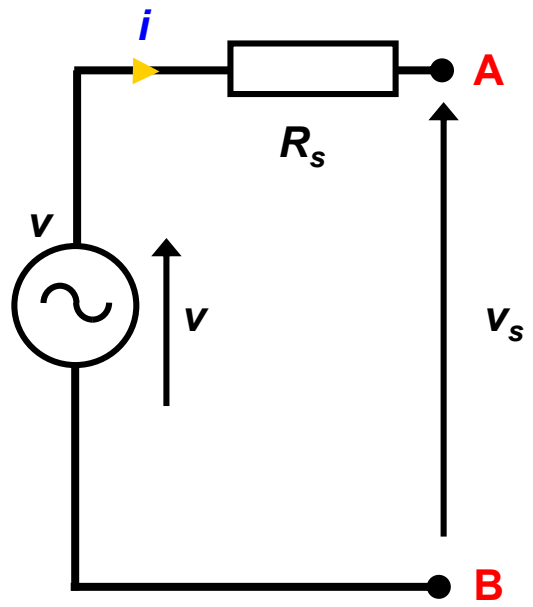
Pour obtenir une **sortie équivalente** à une **variation** de **tension** ΔV ou de **courant** ΔI, en théorie, il **n**'est **pas nécessaire** d'**ajouter** un **conditionneur** de **signal**, **cependant** pour des **questions** d'**adaptation** d'**impédance**, un **conditionneur** de **signal** est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

Conditionneurs de capteurs actifs

2.1. Capteurs sources de tension

Exemple : Thermocouple

Schéma électrique équivalent :



Tension de sortie: $v_s = v - R_s I$

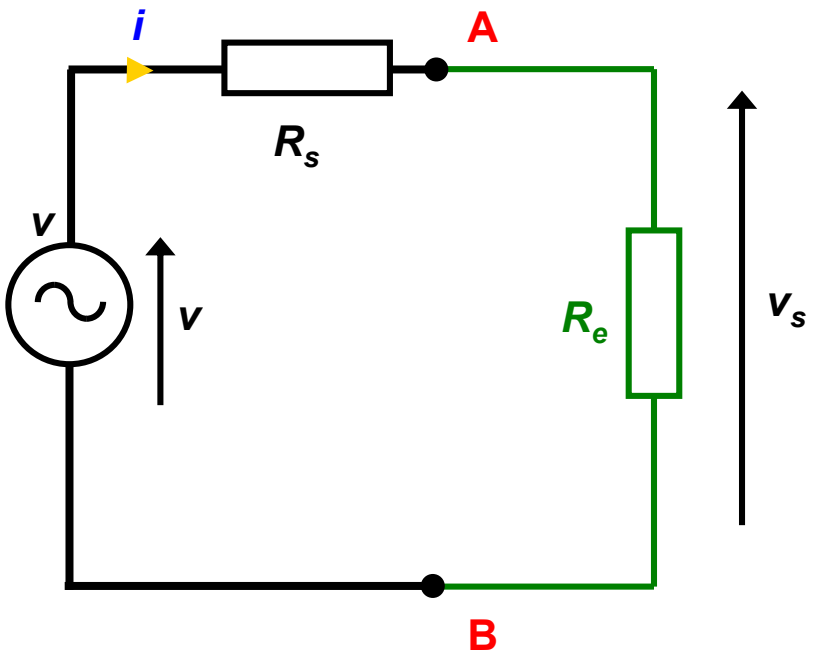
Tension de sortie à vide : $v_s = v$

Impédance de sortie : R_s

Conditionneurs de capteurs actifs

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

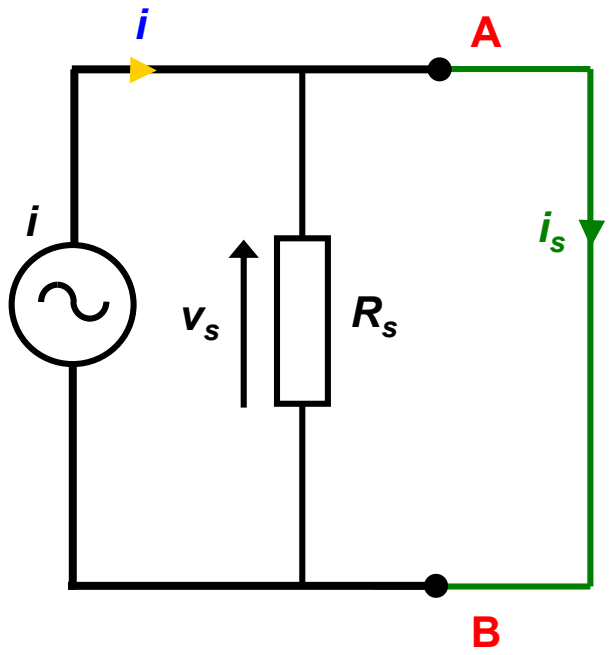
Si R_s élevée devant R_e : $v_m \approx \frac{R_e}{R_s} v << v$

Conditionneurs de capteurs actifs

2.1. Capteurs sources de courant

Exemple : Photodiode

Schéma électrique équivalent :



Courant de sortie: $i_S = i - \frac{v}{R_s}$

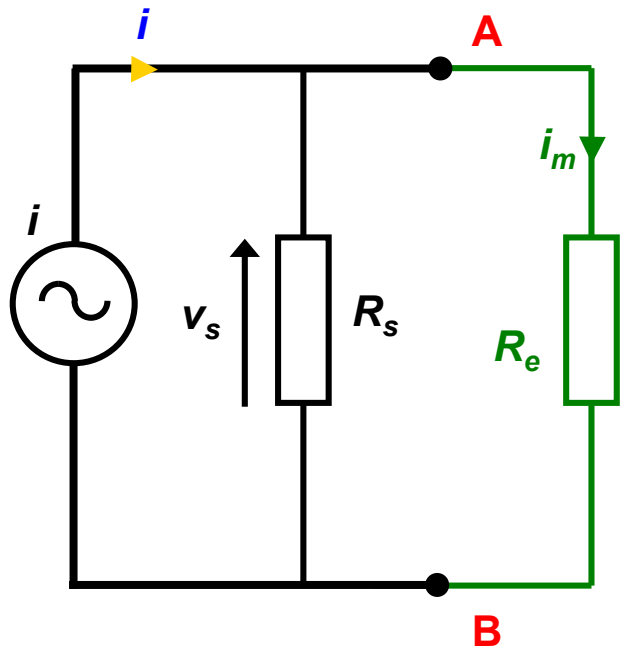
Courant de court circuit : $I_{cc} = I$

Impédance de sortie : R_s

Conditionneurs de capteurs actifs

2.1. Capteurs sources de courant

Mesure du courant de sortie :



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

Si R_s faible devant R_e alors $\boxed{i_m = \dfrac{R_s}{R_e} i}$

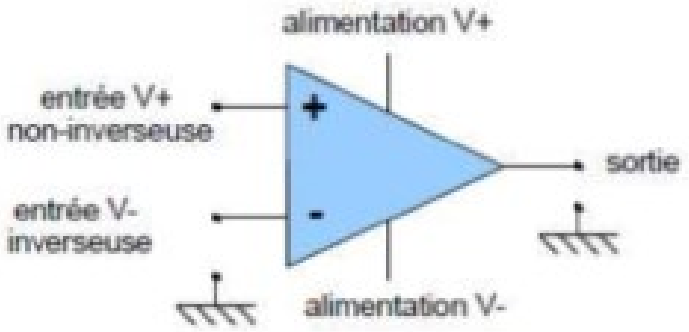
Les Amplificateurs

II. Amplificateur opérationnel

L'amplificateur opérationnel est la base du conditionneur.

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

II.1. Représentation symbolique

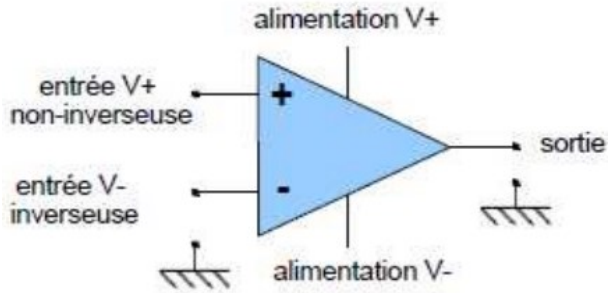


C'est un système électronique qui augmente la tension et/ou l'intensité d'un signal électrique. L'énergie nécessaire à l'amplification est tirée de l'alimentation électrique du système. Un amplificateur parfait ne déforme pas le signal d'entrée : sa sortie est une réplique exacte de l'entrée mais d'amplitude majorée

Les Amplificateurs

II. 4. 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 $Z_i \rightarrow \infty$
- 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 :

$$\varepsilon = (V_s + Z_s I_s)/\mu = 0$$

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

Les Amplificateurs

III. Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure

Le capteur, associé à son conditionneur, équivaut à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne délivrant le signal au circuit qui le charge. Afin que le signal soit obtenu dans les meilleures conditions de sensibilité et de stabilité vis à des variations éventuelles de l'impédance interne, le générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée.

III.1. Adaptation d'impédance

Lorsque l'information correspondant au mesurande m est délivrée sous la forme d'une f.é.m. $e_c(m)$ en série avec une impédance Z_c, qui peut être importante et variable, le dispositif de mesure aux bornes duquel est recueilli V_m doit être d'impédance d'entrée $\mathbf{Z_i}$ très grande devant $\mathbf{Z_e}$ de manière à minimiser l'influence de cette dernière.

$$V_m = e_c(m).\frac{z_i}{z_i+z_c} \quad si \quad z_i \gg z_c \text{ alors } V_m = e_c(m)$$

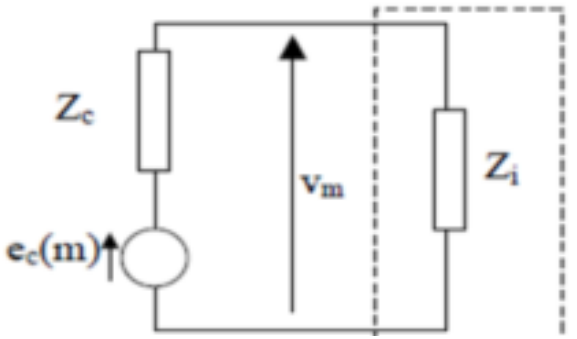


Fig. IV.2 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension :a) montage suiveur ; montage non inverseur

Les Amplificateurs

Les dispositifs à grande impédance d'entrée utilisables pour réaliser l'adaptation d'impédance sont à base :

- d'amplificateur opérationnel en montage suiveur simple ou suiveur /amplificateur,

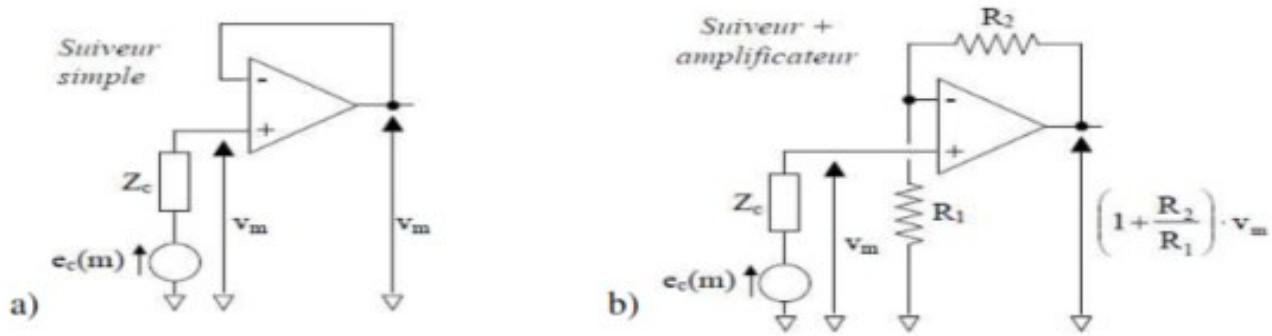


Fig. IV.2 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension :a) montage suiveur ; montage non inverseur

- d'amplificateur différentiel, en général sous la forme d'ampli d'instrumentation ou d'ampli d'isolement.

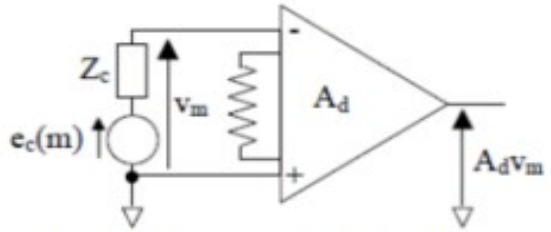


Fig. IV.3 : Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension : amplificateur d'instrumentation

Les Amplificateurs

Les signaux issus de capteurs sont 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.

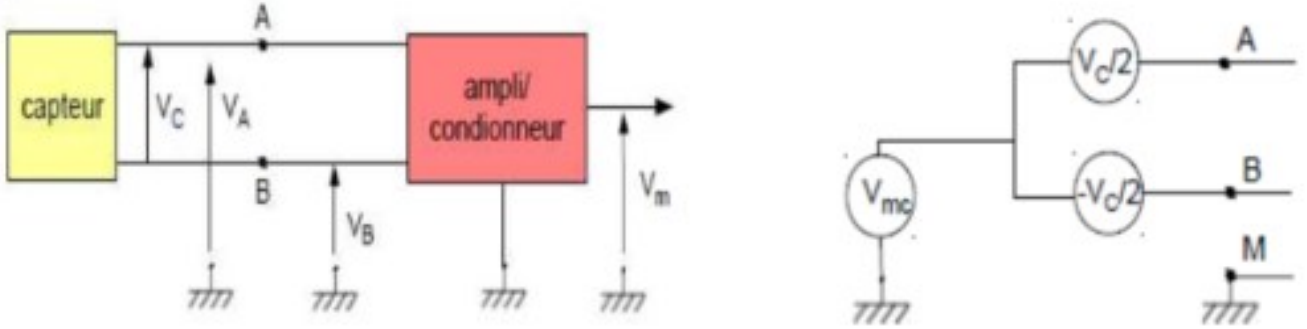
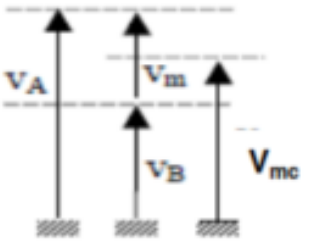


Fig. IV.9 : Définition générale des tensions différentielle et de mode commun.

❖ La tension de mesure V_c issue d'un capteur est la différence de potentiel entre les deux conducteurs A et B : $V_c = V_{diff} = V_m = V_A - V_B$

❖ 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 $V_B = V_{mc} - \frac{V_C}{2}$



N.B : La tension V_{mc} peut être très importante devant la tension de signal. Elle peut être stable, mais le plus souvent, elle est perturbée par des grandeurs externes (sources de bruits, couplages...)

Les Amplificateurs

IV.2. Amplificateur différentiel et taux de rejection du mode commun

La méthode la plus courante de mesure de potentiels est le voltmètre. Cet appareil permet d'évaluer la différence de potentiel entre ses deux points de mesure.

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

$$V_S = A_1(V_{cm} + V_{diff}/2) - A_2(V_{cm} - V_{diff}/2)$$

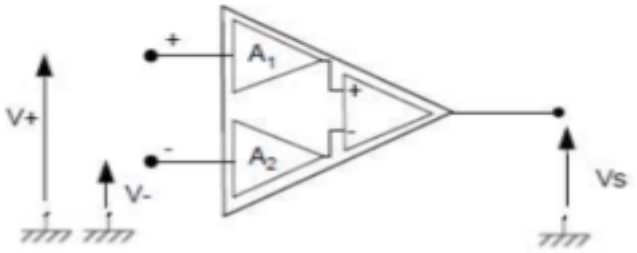


Fig. IV.10 : Structure de l'amplificateur différentiel.

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

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

Les Amplificateurs

V.4 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.
- 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.

Les Amplificateurs

IV.4.1 Montage à amplificateur opérationnel soustracteur (idéal)

$$V^+ = \frac{R_4}{R_3+R_4} Ve_1$$

$$V^- = \frac{R_2}{R_1+R_2} Ve_2 + \frac{R_1}{R_1+R_2} V_s$$

En régime linéaire : $V^+ = V^-$

d'où :

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1}\left[\frac{R_4}{R_3 + R_4} Ve_1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} Ve_2\right]$$

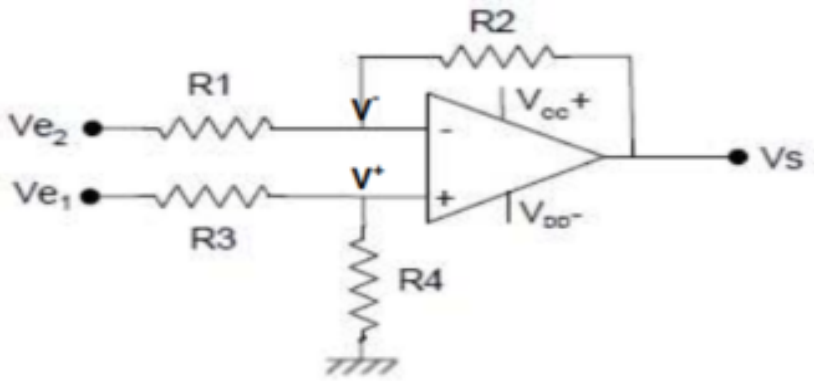


Fig. IV.11 : Montage à amplificateur opérationnel soustracteur.

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

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

Si les résistances ne sont pas strictement égales ($R_1 \neq R_3$ ou $R_2 \neq R_4$), l'amplification ne concerne pas uniquement $(Ve_1 - Ve_2)$, et on peut écrire :

$$V_s = Ad(Ve_1 - Ve_2) + Ac\frac{(Ve_1+Ve_2)}{2},$$

Ac *est l'amplification de mode commun*

-> Si Ac est non nul, la tension de mode commun est mal « rejetée» : mauvais TRMC.

Les Amplificateurs

A. Impédances d'entrée

Le montage soustracteur présente sur chacune de ses entrées une résistance finie :

$Rin_1 = Ve_1/I1 = R1 + R2$ (pour $Ve_2 = 0$)

$Rin_2 \equiv Ve_2/I2 = R_1$ (pour $Ve_1 = 0$)

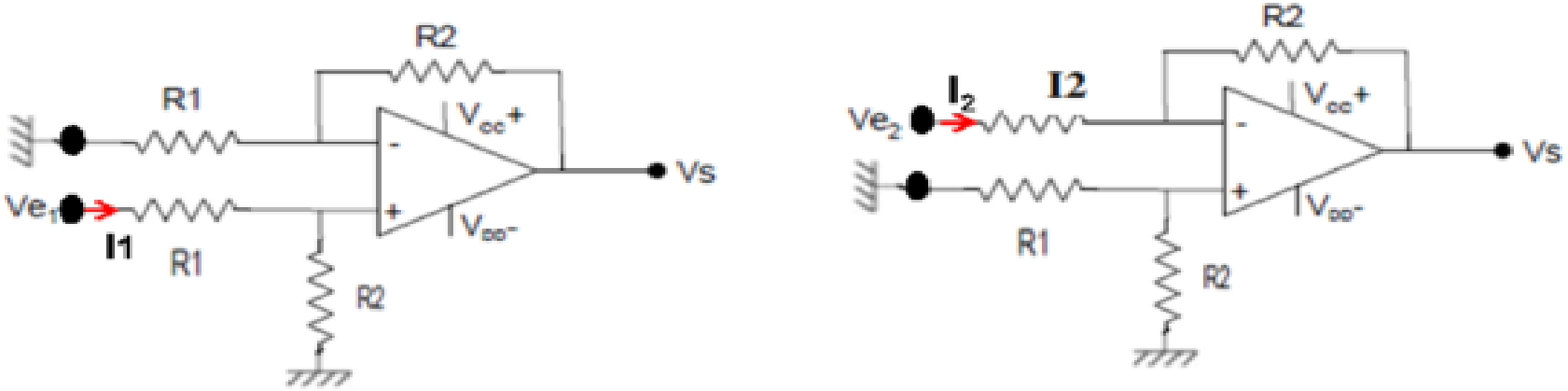


Fig. IV.12 : Impédances d'entrée d'un montage soustracteur.

Les Amplificateurs

B. L'inconvénient (Limites)

- ❑ Si on souhaite obtenir une amplification élevée, il faut R2 grande et R1 petite.
- ❑ Impédance d'entrée de l'ordre de grandeur de R1
  - ➢ Ce montage n'est donc adapté que si Ve_1 et Ve_2 sont des sorties d'autres amplis.
- ❑ Le taux de réjection du mode commun est directement lié à l'égalité des résistances.

C. Solutions

- ❖ On utilise l'impédance d'entrée « infinie » du montage non-inverseur : $Rin = Rin_{AOP} \rightarrow \infty$
- ❖ Les résistances du soustracteur sont ajustées par le constructeur.

→ Amplificateur d'instrumentation à 3 amplis

Les Amplificateurs

IV.4.2 Amplificateur d'instrumentation à 3 amplis

Le montage est le suivant :

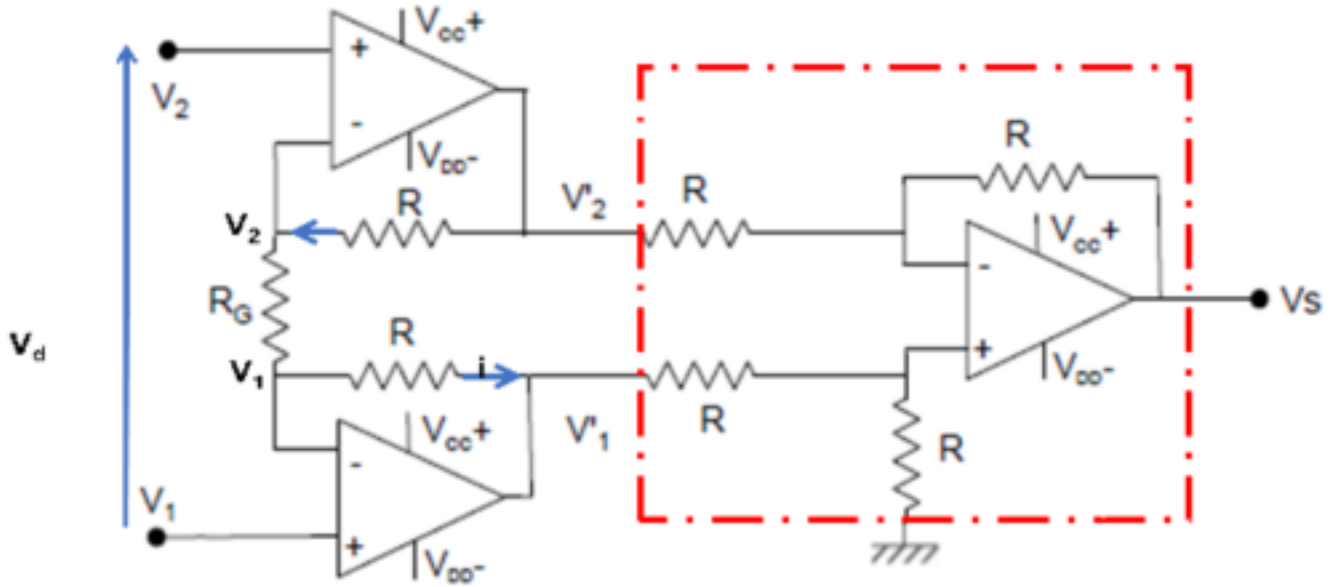


Fig. IV.13 : Amplificateur d'instrumentation à 3 amplis.

Les Amplificateurs

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

$$V'_1 = (1 + \frac{R}{R_G})V_1 - \frac{R}{R_G}V_2$$

$$V'_2 = (1 + \frac{R}{R_G})V_2 - \frac{R}{R_G}V_1$$

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

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

N.B : Le rôle de l'amplificateur d'instrumentation est le même que celui de l'amplificateur de différence.

Cependant, on choisira :

- l'amplificateur de différence si la source d'entrée est à faible impédance ;
- l'amplificateur d'instrumentation si la source d'entrée est à grande impédance.

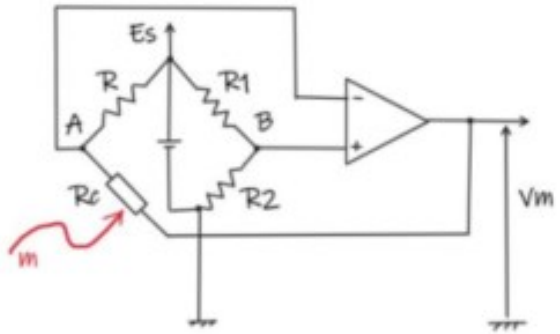
Les Amplificateurs

Le capteur est placé dans la boucle de réaction d'un ampli-op.

Lorsque le capteur est au repos, le pont est équilibré :

On a $V_A - V_B = 0$

Avec $R_{co} = R = R_1 = R_2$



Lorsque le mesurande varie, on a :

$$R_c = R_{co} + \Delta R_c$$

Le pont est déséquilibré :

$$V_B = \frac{E_s}{2}$$

L'amplificateur étant supposé idéal, la réaction négative maintient entre ses entrées + et – une différence de potentielle nulle :

$$V_A = V_B$$

$$V_A = \frac{R_c}{R_c+R} E_s + \frac{R}{R_c+R} V_m \qquad (\textit{Millmann})$$

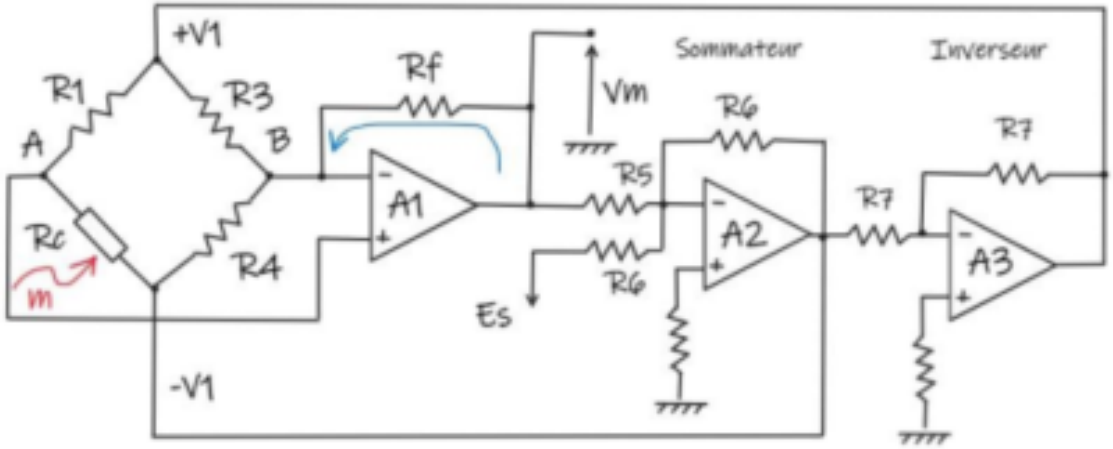
$$\Rightarrow V_A = \frac{R_{co}+\Delta R_c}{R_{co}+\Delta R_c+R} E_s + \frac{R}{R_{co}+\Delta R_c+R} V_m$$

$$\Rightarrow V_m = -\frac{E_s}{2} \times \frac{\Delta R_c}{R_{co}}$$

V_m est la tension de mesure à la sortie de l'amplificateur.

Les Amplificateurs

Le pont est représenté par le dans le schéma suivant :



Avec $R_1 = R_3 = R_4 = R_{co}$ et $R_c = R_{co} + \Delta R_c$

La réaction négative effectuée par le biais du premier étage A1 tend à annuler la tension de déséquilibre du pont, ce qui se produit lorsque la tension à la sortie de cet étage, qui est la tension de mesure, a pour valeur :

$V_m = V_1 \frac{R_{co}+2R_f}{2R_{co}+\Delta R_c} \times \frac{\Delta R_c}{R_{co}}$ (*Millmann*), lorsqu'on met V_A=V_B

Les Amplificateurs

Les tensions $\pm V_1$ d'alimentation du pont sont fournies par le sommateur A2 et l'inverseur A3 et sont telles que :

$$V_1 = \mathrm{E_s} + \frac{\mathrm{R_6}}{\mathrm{R_5}}\mathrm{V_m}$$

Lorsqu'est satisfaite la condition :

$$\frac{R_6}{R_5} = \frac{\mathrm{R_{co}}}{\mathrm{R_{co}} + 2\mathrm{R_f}}$$

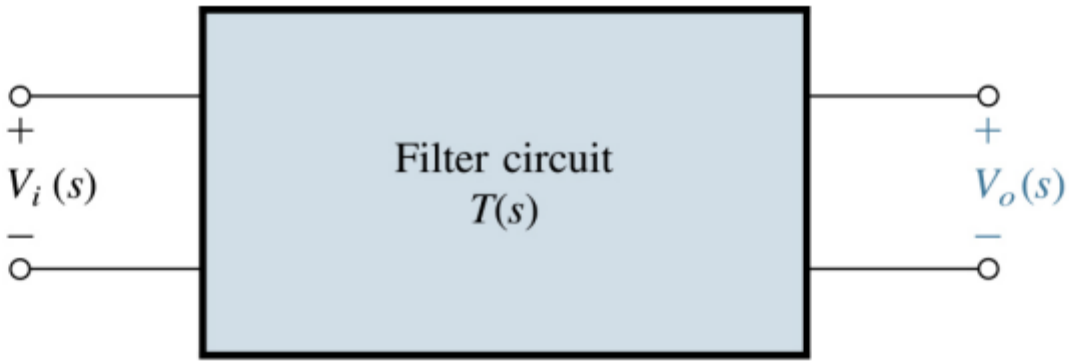
La tension de mesure a l'expression linéarisée :

$$V_m = \frac{\mathrm{E_s}}{2}\left[1 + \frac{2\mathrm{R_f}}{\mathrm{R_{co}}}\right]\frac{\Delta R_c}{R_{co}}$$

Les filtres

Rôle du filtrage Séparation des signaux utiles des signaux indésirables

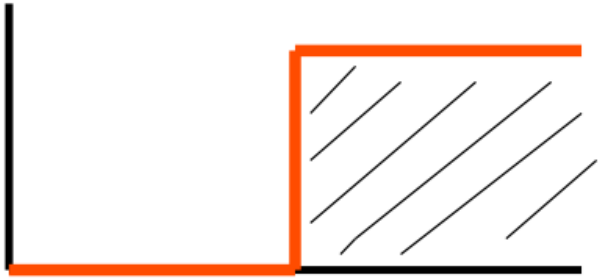
Fonction de Transfert



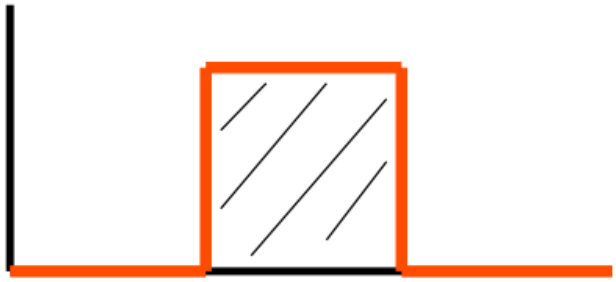
4 types de filtres - "Ideal"

Passe-bas lowpass

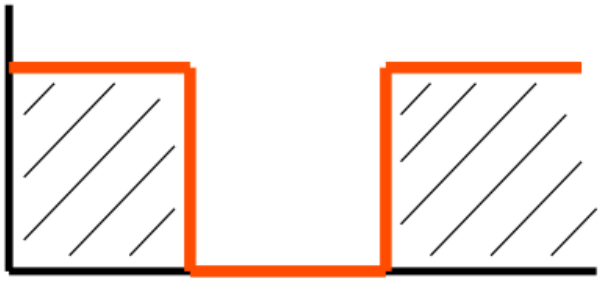
Passe-haut highpass



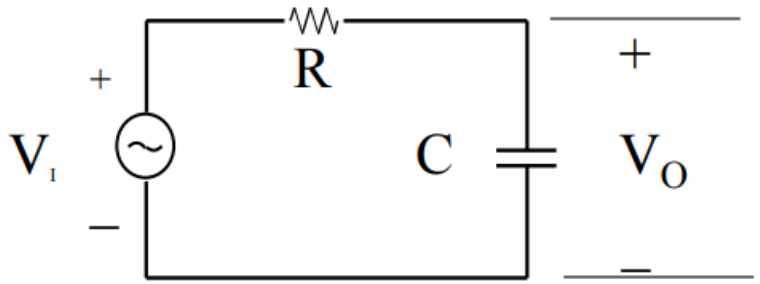
Bande passante bandpass



Filtre rejecteur bandstop



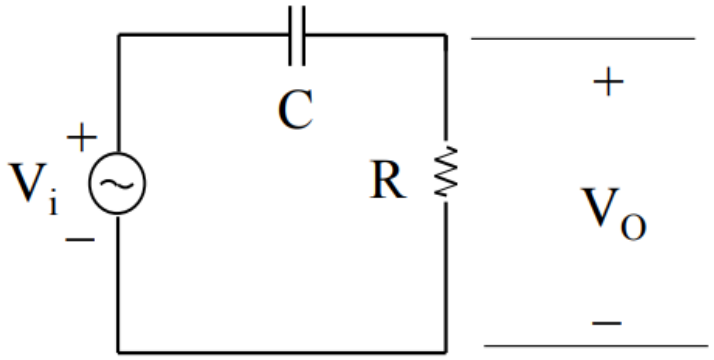
Filtre Passe-Bas Passif et Analogique



Low pass filter circuit

$$\frac{V_o(jw)}{V_i(jw)} = \frac{\frac{1}{jwC}}{R+\frac{1}{jwC}} = \frac{1}{1+jwRC}$$

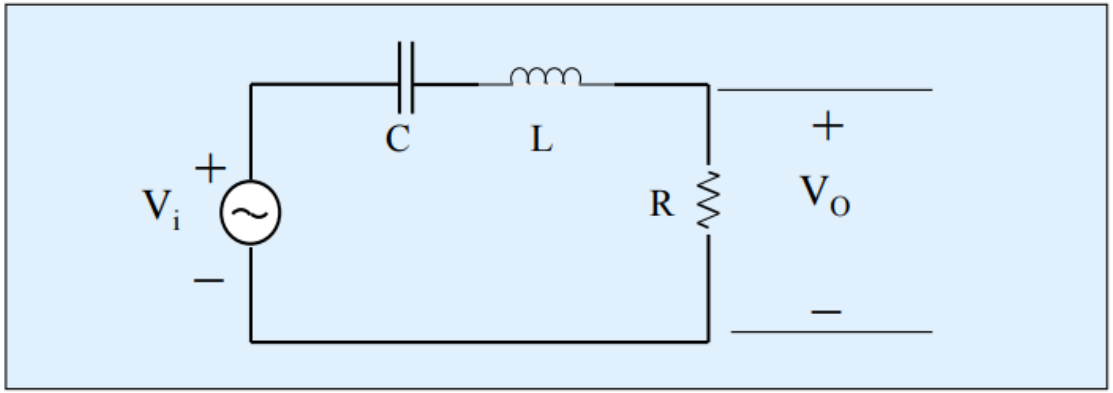
Filtre Passe-Haut Analogique Passif



En anglais
High Pass Filter

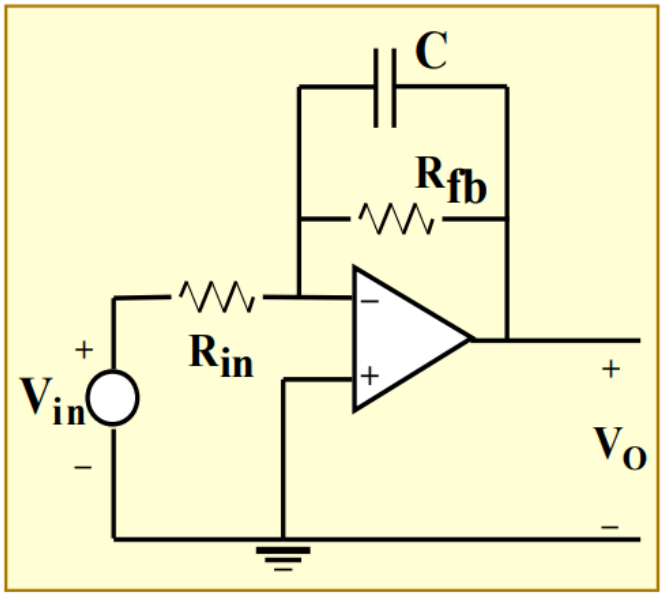
$$\frac{V_o(jw)}{V_i(jw)} = \frac{R}{R+\frac{1}{jwC}} = \frac{jwRC}{1+jwRC}$$

Filtre Passe-Bande Passif

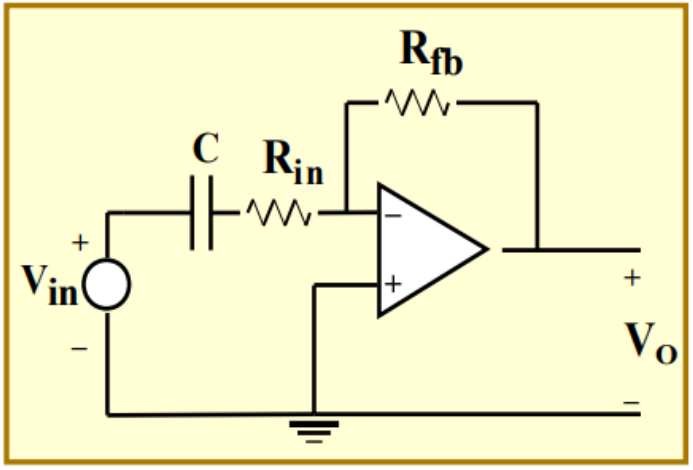


$$\frac{V_O(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{R}{L}s}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

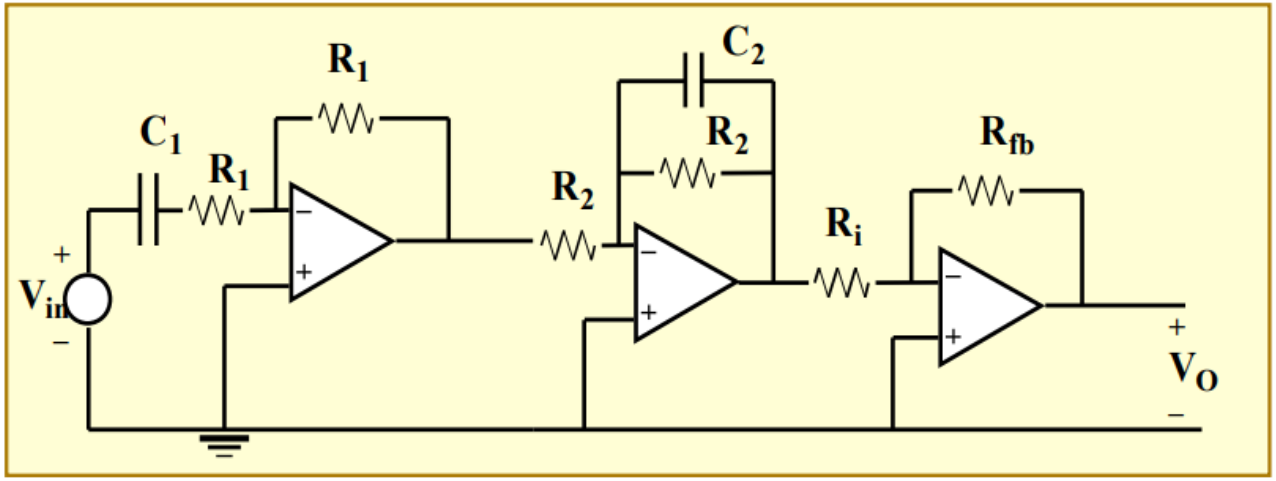
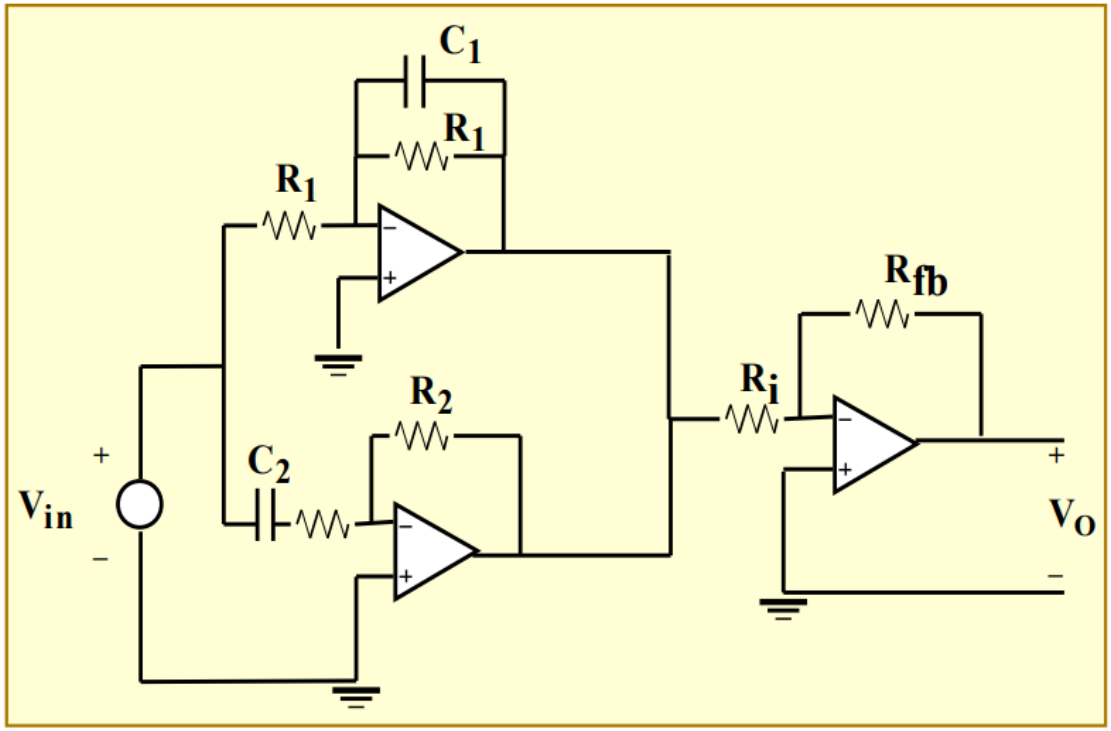
Filtre Passe-Bas Actif



Filtre Passe-Haut Actif



Filtre Passe-Bande Actif



Filtre Rejecteur