

1.3 Conditionnement des capteurs

Le conditionnement est l'opération du domaine de l'acquisition de données, dans laquelle les signaux provenant du capteur doit être normalisé et filtré à des niveaux qui les rendent compatibles pour la conversion analogique-numérique, et ainsi deviennent exploitables pour les circuits et les étages en aval du système de mesure. La figure suivante montre l'évolution du signal provenant du capteur via le système de mesure vers les autres étages d'exploitation et le système de commande.

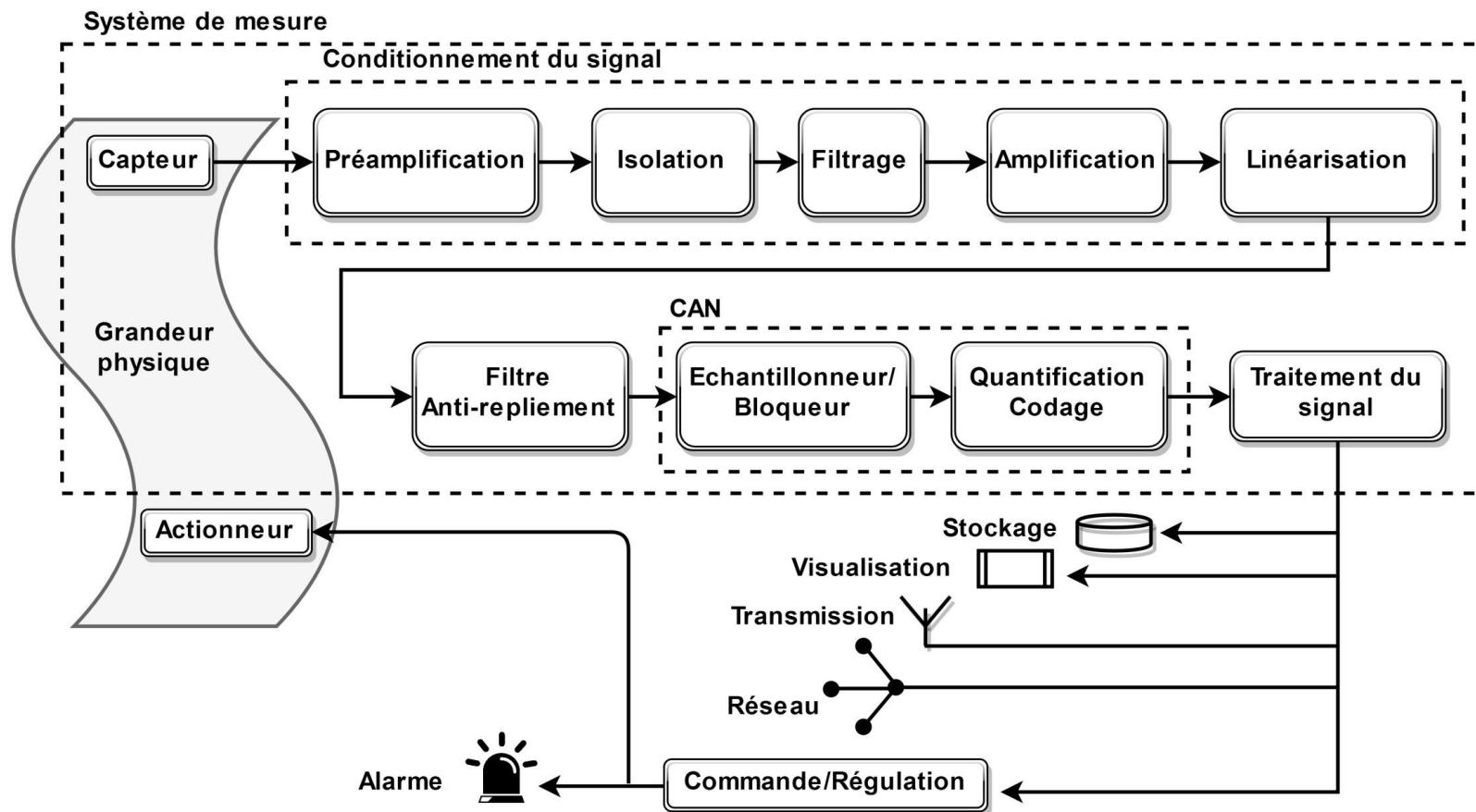


Figure 1.22 – Place du conditionneur dans le système de mesure.

1.3.1 Fonctions du conditionneur

1.3.1.1 Filtrage

Les filtres rejettent les bruits parasites dans une certaine gamme de fréquences. Souvent, on utilise des filtres passe-bas ou coupe-bande pour rejeter le bruit dû à l'alimentation électrique (50 Hz). Le filtrage peut également être utilisé pour éviter le repliement de spectre de signaux hautes fréquences. Cela est possible en utilisant un filtre anti-repliement pour atténuer les signaux supérieurs à la fréquence de Nyquist. Il s'agit d'une forme de filtre passe-bas qui se caractérise par une largeur de bande plate et une pente raide. Étant donné que les mesures d'accéléromètres et de microphones sont généralement analysées dans le domaine fréquentiel, les filtres anti-repliement sont idéaux pour les applications de son et de vibrations.

50

1.3.1.2 Amplification

Les amplificateurs augmentent le niveau de tension pour s'adapter à la gamme du convertisseur analogique/numérique (C A/N), ce qui augmente la résolution et la sensibilité de la mesure. De plus, il est possible d'améliorer le rapport signal/bruit en rapprochant les conditionneurs de la source du signal, ce qui amplifie le niveau de tension avant qu'il ne soit affecté par le bruit ambiant. Les capteurs qui nécessitent une amplification sont typiquement les thermocouples et les jauge de déformation.

1.3.1.3 Isolation

Les signaux de tension qui se situent hors de la gamme du numériseur peuvent endommager le système de mesure et porter atteinte à la sécurité de l'opérateur. C'est la raison pour laquelle l'isolation est généralement indissociable de l'atténuation, afin de protéger le système et l'utilisateur des tensions dangereuses ou des hausses brusques de tension. L'isolation peut également s'avérer utile lorsque le capteur est placé sur un plan de masse différent du capteur de mesure, tel qu'un thermocouple monté sur un moteur.

1.3.1.4 Excitation

Plusieurs types de capteurs nécessitent une excitation. Les jauge de déformation, les accéléromètres, les thermistances et les détecteurs de température à résistance (RTD), notamment, requièrent une tension externe ou un courant d'excitation. Les mesures par RTD et par thermistances sont effectuées avec une source de courant qui convertit la variation de la résistance en une tension mesurable. Les accéléromètres ont souvent un amplificateur intégré, qui nécessite un courant d'excitation fourni par le matériel de mesure. Les jauge de déformation, qui sont des matériaux très basse tension, sont généralement utilisées dans une configuration en pont de Wheatstone avec une source de tension d'excitation.

51

1.3.1.5 Linéarisation

La linéarisation est nécessaire lorsque les capteurs génèrent des signaux de tension qui n'ont pas de rapport linéaire avec les mesures physiques. Ce processus d'interprétation du signal à partir du capteur peut être implémenté soit par le conditionnement du signal, soit par voie logicielle. L'exemple classique de capteur requérant une linéarisation est le thermocouple.

1.3.1.6 Compensation de soudure froide

La compensation de soudure froide (CSF) est indispensable pour garantir l'exactitude des mesures par thermocouple. Le principe des thermocouples est de mesurer une température à partir de la différence de tension entre deux métaux différents. À cause de cela, une autre tension est générée au niveau de la connexion entre le thermocouple et le terminal du matériel d'acquisition de données. La CSF améliore l'exactitude de la mesure en informant de la température au niveau de cette jonction et en apportant une correction appropriée.

1.3.1.7 Complément de pont

Le complément de pont est indispensable pour que les capteurs en demi-pont et en quart de pont forment un pont de Wheatstone à quatre résistances. Les conditionneurs de signaux de jauge de déformation fournissent généralement des montages en demi-pont composés de résistances haute précision. Les résistances de complément constituent une référence fixe pour détecter les légères variations de tension au niveau des différents capteurs actifs.

1.3.2 Conditionnement du signal spécifique aux capteurs

Pour effectuer des mesures optimales, il est indispensable de comprendre les besoins de chaque type de mesure en termes de conditionnement du signal. En fonction des capteurs requis pour le fonctionnement de l'application, On doit prendre en compte certains types de conditionnement de signal pour garantir la meilleure mesure possible. Le tableau ci-dessous contient un résumé des types de conditionnement de signal correspondant aux différents capteurs et mesures.

	Amplification	Atténuation	Isolation	Filtrage	Excitation	Linéarisation	CSF	Complément de pont
Thermocouple	✓	-	✓	✓		✓	✓	-
Thermistance	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
RTD	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Jauge de déformation	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
Charge, pression, couple	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Accéléromètre	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Microphone	✓	-		✓	✓	✓	-	-
LVDT/RVDT	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Haute tension	-	✓	✓	-	-	-	-	-

Tableau 1.6 – Spécifications propres aux mesures par capteurs.

1.3.3 Conditionneurs de capteurs passifs

1.3.3.1 Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs

1.3.3.1.1 Principaux types de conditionneurs

- Les variations de l'impédance Z_c d'un capteur passif liées au mesurande m ne peuvent fournir une sortie électrique, sans que le capteur soit associé à une source de tension e_s ou une source de courant i_s , ou même à d'autres impédances Z_k formant ainsi le **conditionnement** du capteur.
- Deux principaux groupes de conditionneurs peuvent être distingués, suivant que les conditionneurs transfèrent l'information liée aux variations d'impédance du capteur soit :

1. sur **l'amplitude** du signal de mesure : (cas des **montages potentiométriques** et des **ponts**)

$$v_m = e_s \cdot F(Z_k, Z_c)$$

2. sur **la fréquence** du signal de mesure : (cas des **oscillateurs**)

$$f_m = G(Z_k, Z_c)$$

Conditionneurs de capteurs passifs	Caractéristiques
Montage potentiométrique (Fig. 1.23)	Avantages : simplicité Inconvénients : sensibilité aux parasites (l'alimentation par source de courant (Fig. 1.23.a) avec ($Z_1 \gg Z_c$) peut améliorer la protection vis à vis de ces parasites)

A circuit diagram showing a voltage source e_s connected in series with a sensor labeled "Capteur" with impedance Z_c . The output voltage v_m is measured across the sensor.

a)

A circuit diagram showing a current source i_s connected in parallel with a sensor labeled "Capteur" with impedance Z_c . The output voltage v_m is measured across the sensor.

b)

Figure 1.23 – Conditionneurs de capteurs passifs de type montage potentiométrique :
 a) capteur alimenté par une source de tension ; b) capteur alimenté par une source de courant.

54

Génie Biomédical

Abdelmoudjib BENKADA

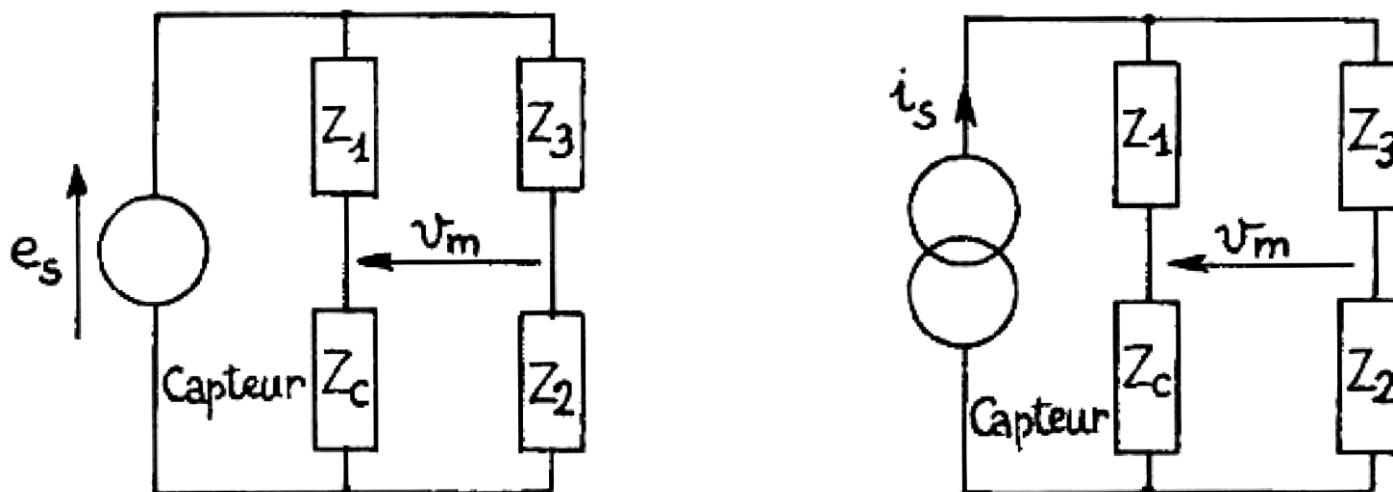
Conditionneurs de capteurs passifs	Caractéristiques
Montage en pont (Fig. 1.24)	<p>Avantages : permet une mesure différentielle réduisant de façon importante l'influence des parasites.</p> 

Figure 1.24 – Conditionneurs de capteurs passifs de type montage en pont.

Conditionneurs de capteurs passifs	Caractéristiques
Conditionneur avec source de tension	<ul style="list-style-type: none"> ■ lorsque la source de tension est sinusoïdale, le signal de mesure résulte d'une modulation d'amplitude de e_s par les variations de Z_c. ■ pour retrouver l'information il faut démoduler puis filtrer le signal de mesure et pour que cette opération soit facilement réalisable la fréquence de la source doit être très supérieure, de l'ordre de 5 fois au moins, à la fréquence maximale des variations du mesurande. ■ D'autre part, une fréquence de source relativement élevée rend non négligeable l'impédance des capacités et inductances parasites dont il faut alors tenir compte dans la mesure.
Conditionneur avec source de courant	<ul style="list-style-type: none"> ■ lorsque le capteur et le conditionneur sont purement résistifs on utilise de préférence une source de courant ou tension continu puisqu'alors aucune démodulation n'est nécessaire et que les réactances parasites ne jouent plus aucun rôle. ■ Il faut cependant dans ce cas veiller à ce que le circuit ne soit le siège d'aucune force électromotrice thermoélectrique et que ses composants ne présentent aucune dérive.

Conditionneurs de capteurs passifs	Caractéristiques
Oscillateur (Fig. 1.25)	<ul style="list-style-type: none"> ■ ces oscillateurs utilisés en conditionneurs peuvent être de type sinusoïdal ou de relaxation. ■ ils délivrent un signal dont la fréquence est modulée par l'information ce qui lui assure une bonne protection contre les parasites, en particulier dans le cas de télémesures. ■ en outre la conversion de l'information sous forme numérique est facilitée puisqu'il suffit de faire un comptage de périodes.

The diagram illustrates a sinusoidal oscillator circuit. It starts with an input signal entering an amplifier (labeled "ampli."). The output of the amplifier is connected to a series capacitor C_o . This is followed by a shunt branch containing a variable capacitor X_c . The circuit then splits into two parallel paths: one path goes through an inductor L_o , and the other path goes through a magnetic core with a moment M . The outputs of these two paths are connected back to the input of the amplifier.

Figure 1.25 – Conditionneurs de capteurs passifs de type oscillateur sinusoïdal.

1.3.3.2 Montage potentiométrique

1.3.3.2.1 Mesure des résistances

Le capteur de résistance R_c en série avec une résistance R_1 est alimenté par une source de résistance interne R_s et de f.e.m. en continue ou alternative (Fig. 1.27). La tension v_m est mesurée aux bornes du capteur par un appareil de résistance d'entrée R_d ; on établit immédiatement :

$$v_m = e_s \cdot (R_c || R_d) / ((R_s + R_1 + R_c || R_d))$$

ou

$$v_m = e_s \cdot \frac{R_c R_d}{R_c (R_s + R_1) + R_d (R_s + R_1 + R_c)}$$

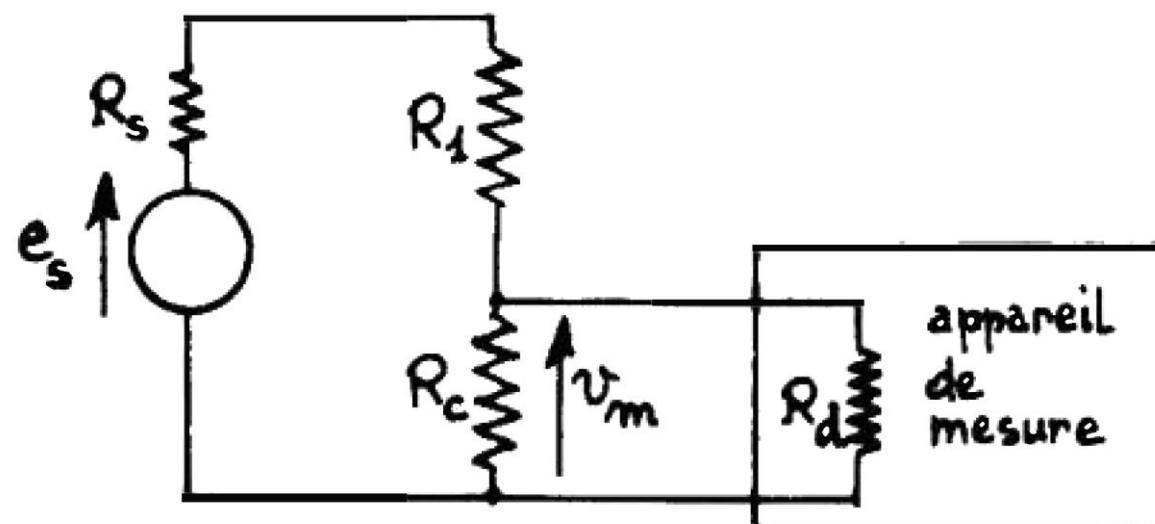


Figure 1.27 – Mesure de la tension aux bornes d'un capteur résistif dans un montage potentiométrique.

La tension aux bornes du capteur est indépendante de l'appareil de mesure utilisé à condition que $R_d \gg R_c$; dans ce cas :

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

On peut remarquer aisément que la tension R_c n'est pas une fonction linéaire de R_c .

1.3.3.3 Les ponts

■ Intérêt :

Le montage en pont peut être décrit comme un double montage potentiométrique. Cela peut donner lieu à une similitude dans l'étude des ponts concernant les méthodes de linéarisation et de compensation de grandeurs d'influence avec celles utilisées dans les montages potentiométriques.

L'intérêt des ponts résulte de la **nature différentielle** de la mesure qui la rend moins sensible aux bruits et aux dérives de la source.

■ Exemple : Pont résistif (Fig. 1.27)

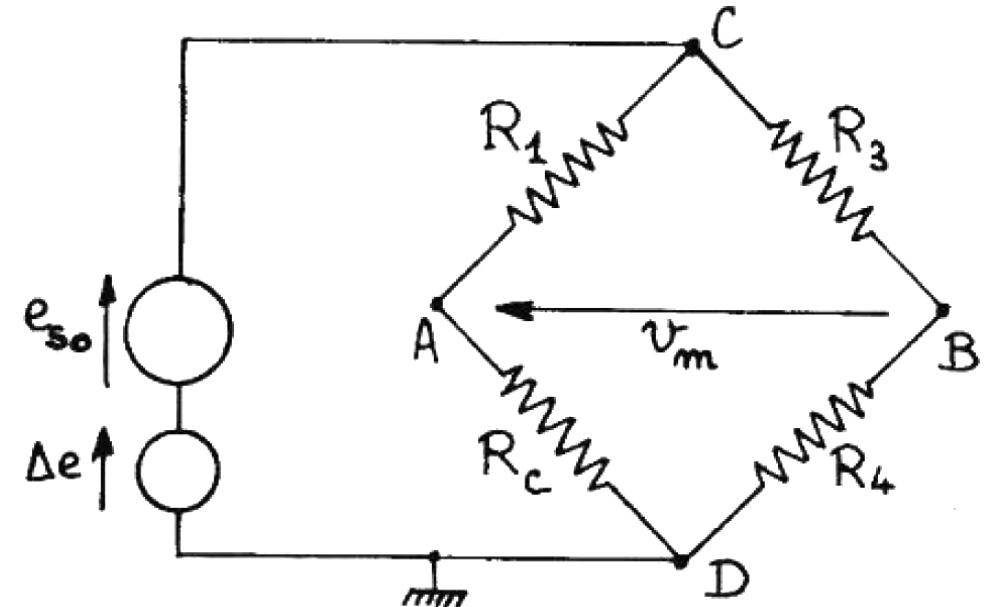


Figure 1.27 – Pont résistif : influence des fluctuations de la tension d'alimentation.

60

Si une fluctuation Δe vient s'ajouter à la f.é.m. de la source e_{s0} , alors les potentiels en A et B sont respectivement égaux à :

$$v_A = e_{s0} \cdot \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_1 + R_{c0} + \Delta R_c} + \Delta e \cdot \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_1 + R_{c0} + \Delta R_c}$$

$$v_B = e_{s0} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \Delta e \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Le pont est initialement équilibré ($v_m=0$, ainsi $v_A = v_B$ et $\Delta R_c = 0$),

$$\frac{R_{c0}}{R_1 + R_{c0}} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

La tension de mesure v_m qui est la tension différentielle $v_A - v_B$ a pour expression :

$$v_m = e_{s0} \left(1 + \frac{\Delta e}{e_{s0}} \right) \cdot \frac{R_1 \cdot \Delta R_c}{(R_1 + R_{c0} + \Delta R_c)(R_1 + R_{c0})}$$

La comparaison avec le montage potentiométrique (§1.3.3.2.2) montre que l'influence de la fluctuation Δe sur la tension de mesure est considérablement réduite ($\Delta e / e_{s0}$) dans le montage en pont dès lors que $\Delta R_c \ll R_{c0}$.

1.3.3.3.1 Mesure des résistances - pont de Wheatstone

a. Équation générale. Condition d'équilibre

La structure générale du pont de Wheatstone (**Fig. 1.28**); e_s et R_s caractérisent la source, R_d est la résistance du dispositif de détection de l'équilibre du pont ou de mesure de son déséquilibre. Les équations de Kirchhoff permettent de calculer le courant i_d :

$$i_d = e_s \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{[R_1 R_4(R_2 + R_3) + R_2 R_3(R_1 + R_4) + R_s(R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + R_d(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_s R_d(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)]}$$

62

Le pont est dit **équilibré** lorsque $v_A = v_B$; i_d est alors nul

ce qui correspond à la condition classique :

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

La condition d'équilibre ne dépend que des résistances du pont : elle est indépendante des résistances de la source et du détecteur de déséquilibre.

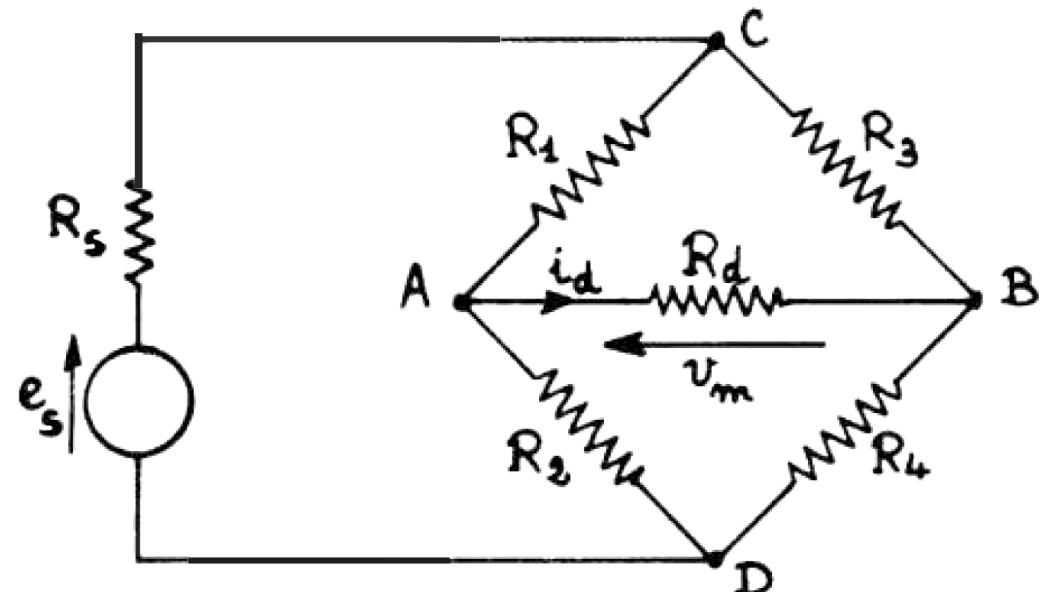


Figure 1.28 – Pont de Wheatstone : structure générale.

b. Tension de déséquilibre

Le pont est généralement alimenté par une source dont la résistance R_s est faible :

$$R_s \ll R_1, R_2, R_3, R_4, R_d.$$

Dans ces conditions, en faisant $R_s = 0$ dans l'expression de i_d , celle-ci se simplifie :

$$i_d = e_s \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 R_4 (R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_4) + R_d (R_1 + R_2) (R_3 + R_4)}$$

63

Lorsque le dispositif de mesure est à grande impédance d'entrée : oscilloscophe, voltmètre ou amplificateur on a :

$$R_d \gg R_1, R_2, R_3, R_4.$$

Ainsi :

$$i_d = e_s \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_d (R_1 + R_2) (R_3 + R_4)}$$

et avec $v_m = R_d \cdot i_d$, on a :

$$v_m = e_s \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2) (R_3 + R_4)}$$

■ Simplification de l'expression de v_m :

- on supposera toujours la résistance R_d très supérieure à celles du pont.
- le pont de Wheatstone étant un double potentiomètre sa sensibilité est maximale, comme pour ce dernier, lorsqu'à l'équilibre :

$$R_1 = R_2 \quad \text{et} \quad R_3 = R_4 \quad (v_m = 0)$$

- et pour simplifier plus encore, on choisit très souvent les résistances pour qu'à l'équilibre elles soient toutes égales :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

- si l'on considère le cas le plus général où les quatre résistances du pont peuvent varier simultanément autour de leur valeur d'équilibre :

$$\begin{array}{ll} R_1 = R_0 + \Delta R_1, & R_2 = R_0 + \Delta R_2 \\ R_3 = R_0 + \Delta R_3, & R_4 = R_0 + \Delta R_4 \end{array}$$

l'expression de la tension de déséquilibre devient :

$$v_m = e_s \cdot \frac{R_0(\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) + \Delta R_2 \Delta R_3 - \Delta R_1 \Delta R_4}{4R_0^2 + 2R_0(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4) + (\Delta R_1 + \Delta R_2)(\Delta R_3 + \Delta R_4)}$$

La tension de déséquilibre n'est pas une fonction linéaire des variations des résistances du pont. Si une seule des résistances est variable, R_2 par exemple, on a :

$$v_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_2}{R_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_2}{2R_0}}$$

- Sur la **Fig. 1.29**, le rapport v_m/e_s est représenté en fonction de la variation relative $\Delta R/R_0$ de l'une des résistances du pont, initialement équilibré : on y observe la plage de variation qui est quasi linéaire de part et d'autre de l'équilibre.

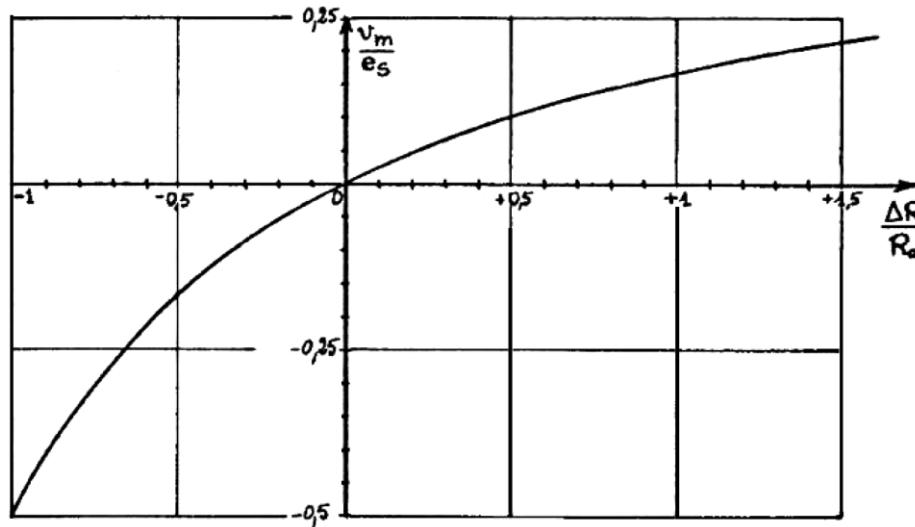
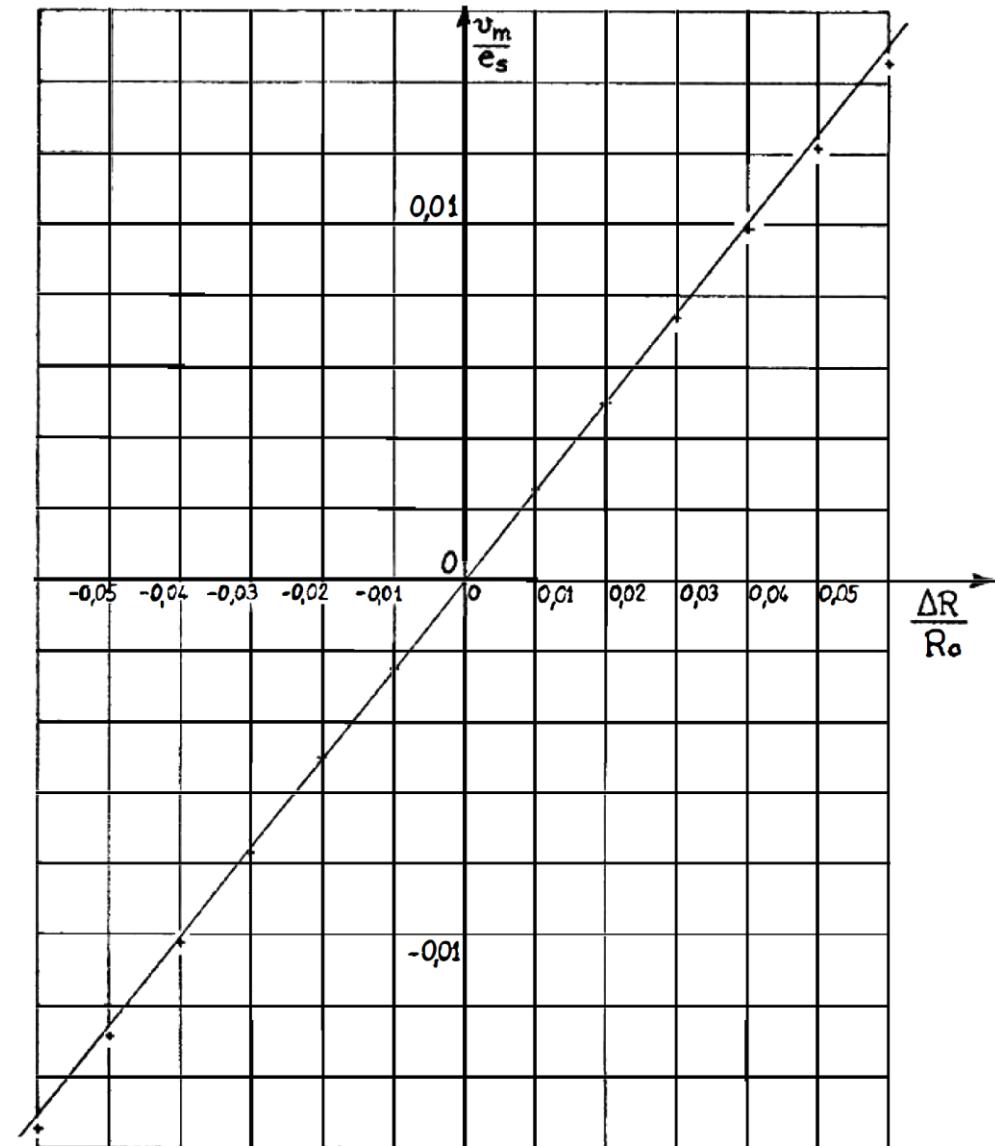


Figure 1.29 – Représentation du déséquilibre du pont en fonction de la variation relative de l'une de ses résistances (R_2 ou R_4) et son agrandissement au voisinage de l'équilibre.



1.3.1.4 Les oscillateurs

■ **Définition :** Un oscillateur est un circuit électronique produisant un signal électronique oscillant périodique, souvent une onde sinusoïdale ou une onde carrée. Ils sont largement utilisés dans de nombreux systèmes électroniques. Des exemples courants de signaux générés par des oscillateurs comprennent des signaux diffusés par les émetteurs radio et de télévision, des signaux d'horloge qui régulent les montres à quartz et tous les systèmes à microprocesseur (ordinateurs, calculateurs, microcontrôleurs, etc.). Les oscillateurs sont caractérisés par la fréquence de leur signal de sortie (la fréquence d'oscillation F_0).

a. Oscillateurs sinusoïdaux

■ La fréquence d'un oscillateur sinusoïdal peut être fixée, en particulier, par la résonance d'un circuit constitué d'une bobine d'inductance L_0 et d'un condensateur de capacité C_0 associés en série ou en parallèle ; le circuit présente une impédance purement résistive à la fréquence F_0 de résonance dont l'expression est :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$

■ Lorsqu'un capteur inductif ou capacitif est l'un des éléments du circuit résonnant, ses variations de réactance entraînent un changement de la fréquence des oscillations.

Selon le type de capteur, et en supposant faible l'amplitude de variation de sa réactance, on a pour la variation de fréquence ΔF correspondante :

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta L}{2L_0} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta C}{2C_0}$$

$$\text{soit} \quad F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta L}{2L_0}\right) \quad \text{ou} \quad F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_0}\right)$$

Si le mesurande varie sinusoïdalement autour d'une valeur m_0 et si dans cette plage de variation le capteur peut être considéré comme linéaire, de sensibilité S , on a :

$$m(t) = m_0 + m_1 \cos \omega t$$

et ΔL ou $\Delta C = S \cdot m_1 \cos \omega t$

La fréquence instantanée de l'oscillateur devient ainsi :

$$F(t) = F_0(1 - km_1 \cos \omega t) \quad \text{avec } k = \frac{S}{2L_0} \text{ ou } \frac{S}{2C_0} \text{ selon le type de capteur}$$

■ La fréquence de l'oscillateur est modulée par l'information physique à traduire. De façon générale, la tension délivrée est donnée par :

$$v_m = E \cdot \sin 2\pi F_0 \left(t - \frac{km_1}{\omega} \cdot \sin \omega t \right)$$

Lorsqu'il s'agit de transmettre les informations issues de plusieurs capteurs dont l'impédance est réactive, chacun de ceux-ci module une fréquence qui lui est propre (sous-porteuse). L'ensemble des sous-porteuses ainsi modulées, module ensuite en fréquence l'onde porteuse (**Fig. 1.30**).

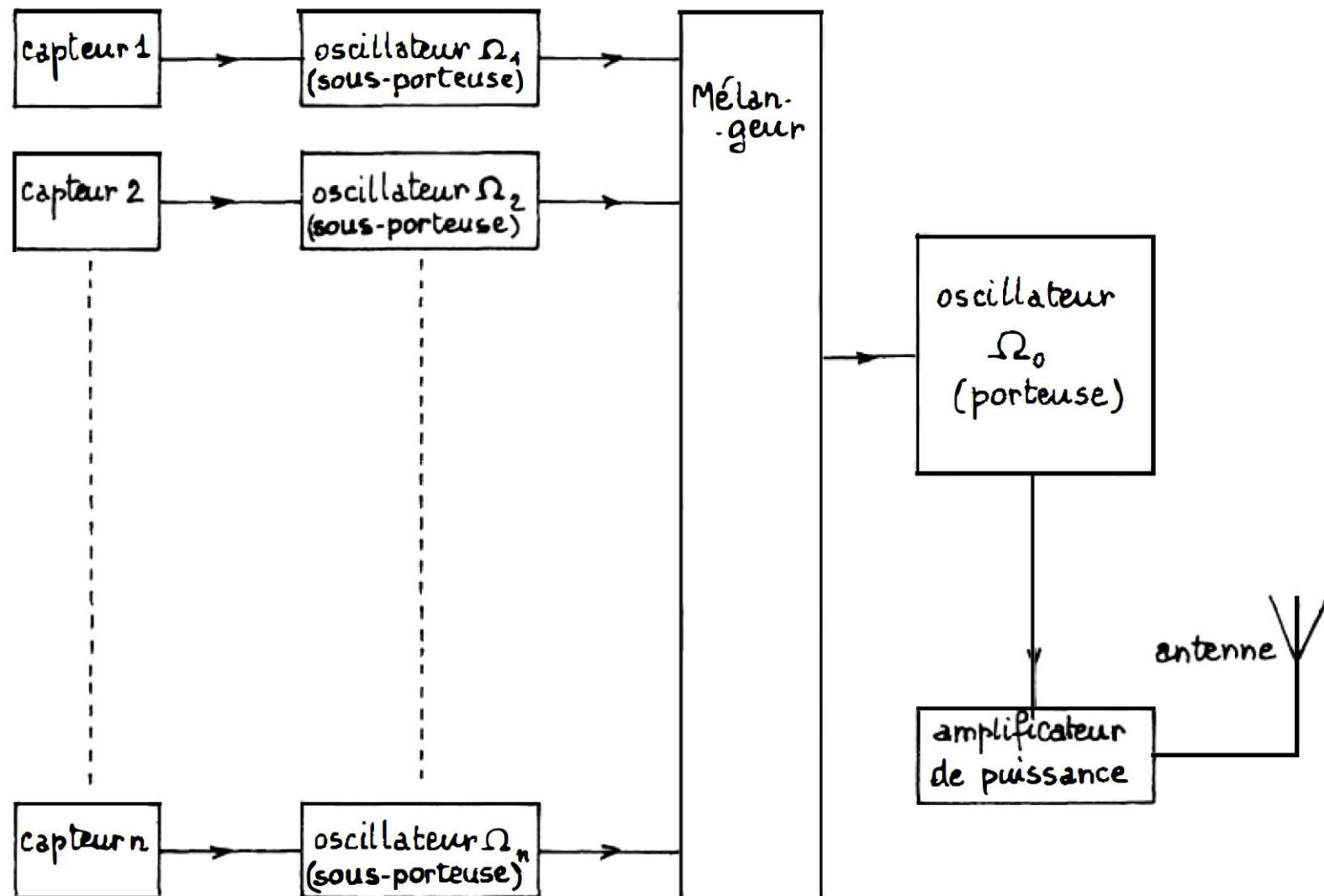


Figure 1.30 – Schéma synoptique d'un émetteur de télémesure à plusieurs voies, en modulation de fréquence.

b. Oscillateurs de relaxation

Le dispositif de ce type le plus couramment employé est le multivibrateur astable (**Fig. 1.31**) qui est un générateur de signaux rectangulaires ; la fréquence F de ces signaux est liée à la valeur des composants par une relation de la forme :

$$F \sim \frac{a}{RC}$$

la constante a dépendant du montage particulier.

La capacité C ou la résistance R qui sont variables sont celles du capteur :

$$C = C_0 + \Delta C \quad \text{ou} \quad R = R_0 + \Delta R$$

on a alors

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta C}{C_0} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta R}{R_0}$$

$$\text{soit} \quad F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{C_0} \right) \quad \text{ou} \quad F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta R}{R_0} \right)$$

Comme pour l'oscillateur sinusoïdal, la fréquence du multivibrateur est modulée par les variations de l'impédance du capteur

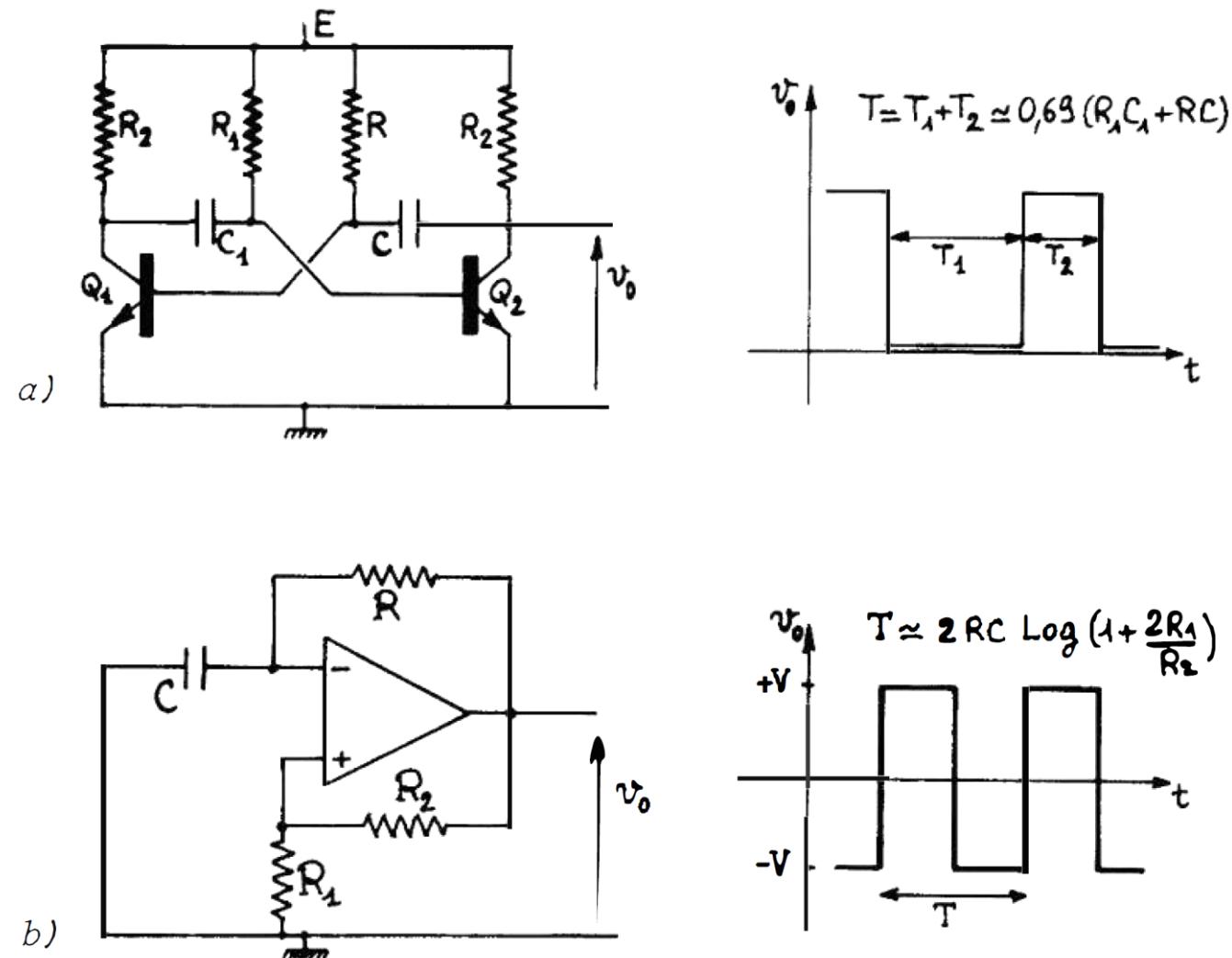


Figure 1.31 – Montages multivibrateurs astables :
a) à deux transistors avec couplage de collecteur ; **b)** à amplificateur opérationnel.

1.3.2 Conditionneurs de capteurs actifs

1.3.2.1 Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure

Objectif : Un capteur passif associé à son conditionneur est équivalent à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne, et délivrant le signal au circuit qui le charge.

Ce générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée, afin que le signal soit obtenu dans les meilleures conditions (sensibilité et stabilité vis-à-vis des variations éventuelles de l'impédance interne)

72

a. Capteur source de tension

Les dispositifs d'impédance d'entrée Z_i destinés à recueillir le signal v_m à la sortie d'un capteur délivrant une f.e.m. $e_c(m)$ en série avec une impédance Z_c qui peut être importante et variable (thermocouple avec liaison longue, capteur résistif monté dans un pont de Wheatstone), doit être très supérieure à Z_c de façon à minimiser l'influence de cette dernière (Fig. 1.32) :

$$v_m = e_c \cdot \frac{Z_i}{Z_i + Z_c} \cong e_c \quad \text{pour} \quad Z_i \gg Z_c$$

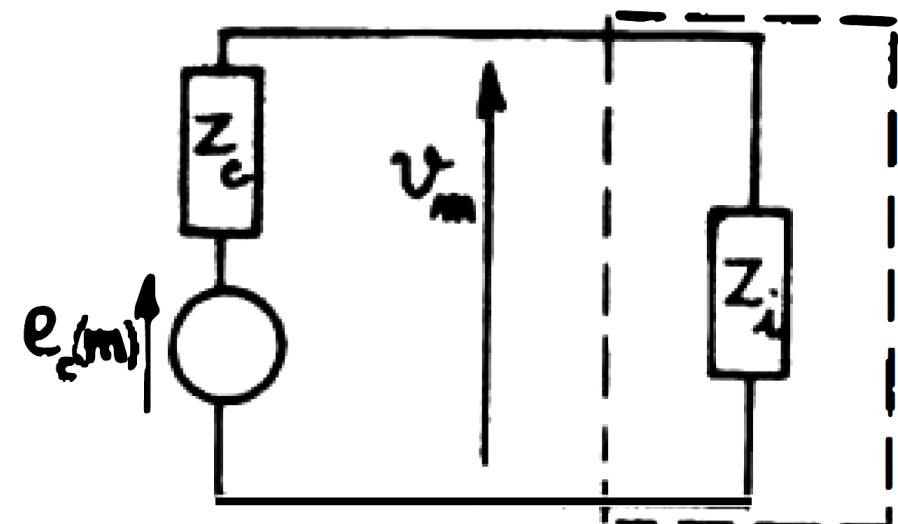


Figure 1.32 – schéma électrique équivalent lors de l'adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension.

■ Les dispositifs à grande impédance d'entrée utilisables dans ce cas sont :

1. l'amplificateur opérationnel en montage suiveur ou non inverseur (**Fig. 1.33 a et b**) ;
2. l'amplificateur différentiel, en général sous la forme de l'amplificateur d'instrumentation ou d'isolement (**Fig. 1.33 c**).

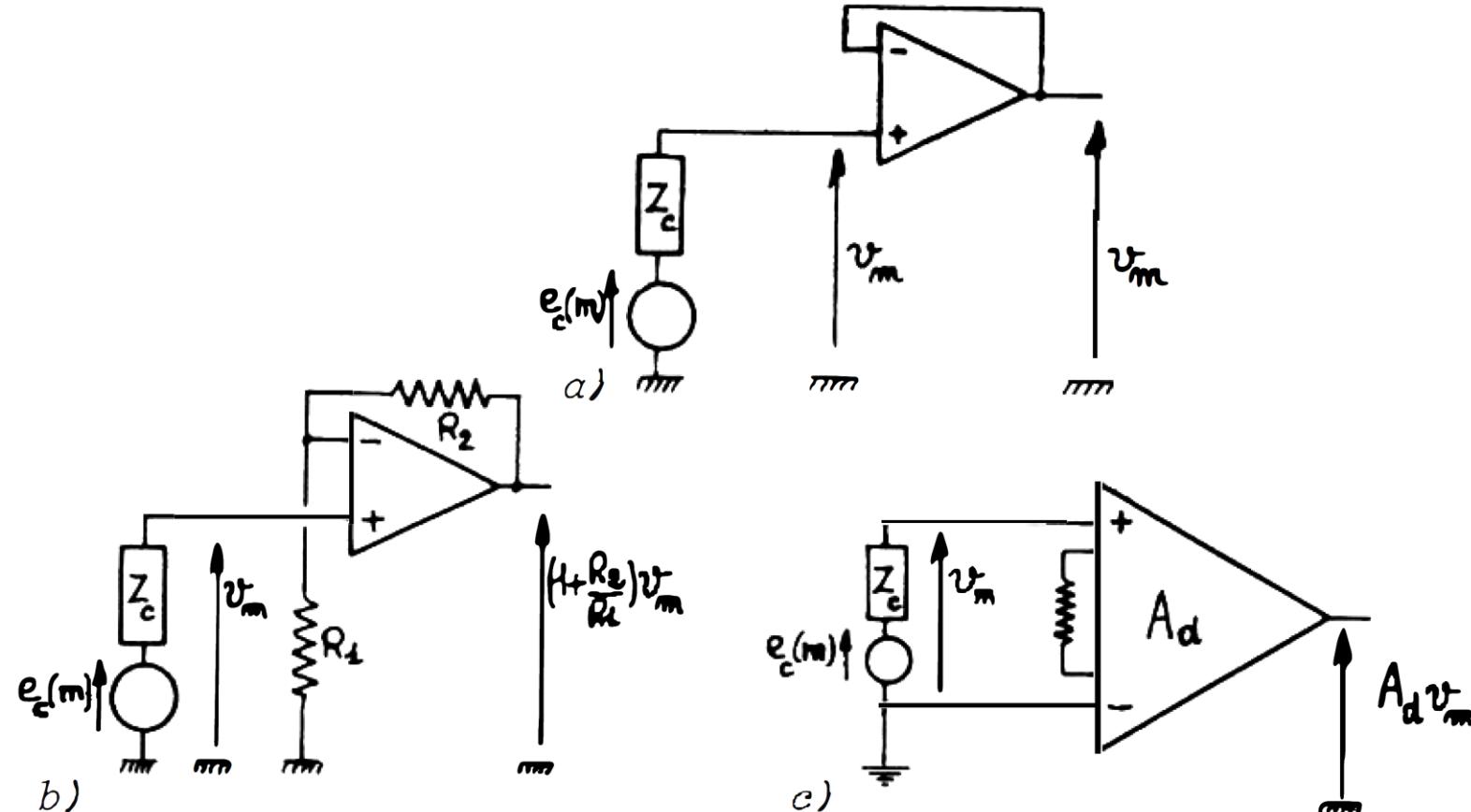


Figure 1.33 – Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension :
a) montage suiveur ; b) montage non-inverseur ; c) amplificateur d'instrumentation.

b. Capteur source de courant

Quand le capteur est électriquement équivalent à une source de courant $i_c(m)$ en parallèle avec une impédance interne Z_c (photodiode ou photomultiplicateur par exemple), il faut que l'impédance d'entrée Z_i du circuit de mesure soit très inférieure à Z_c pour que le signal recueilli, i_m , soit pratiquement égal à i_c et indépendant de Z_c (**Fig. 1.34 a**) :

$$i_m = i_c \cdot \frac{Z_c}{Z_i + Z_c} \cong i_c \quad \text{pour} \quad Z_i \ll Z_c$$

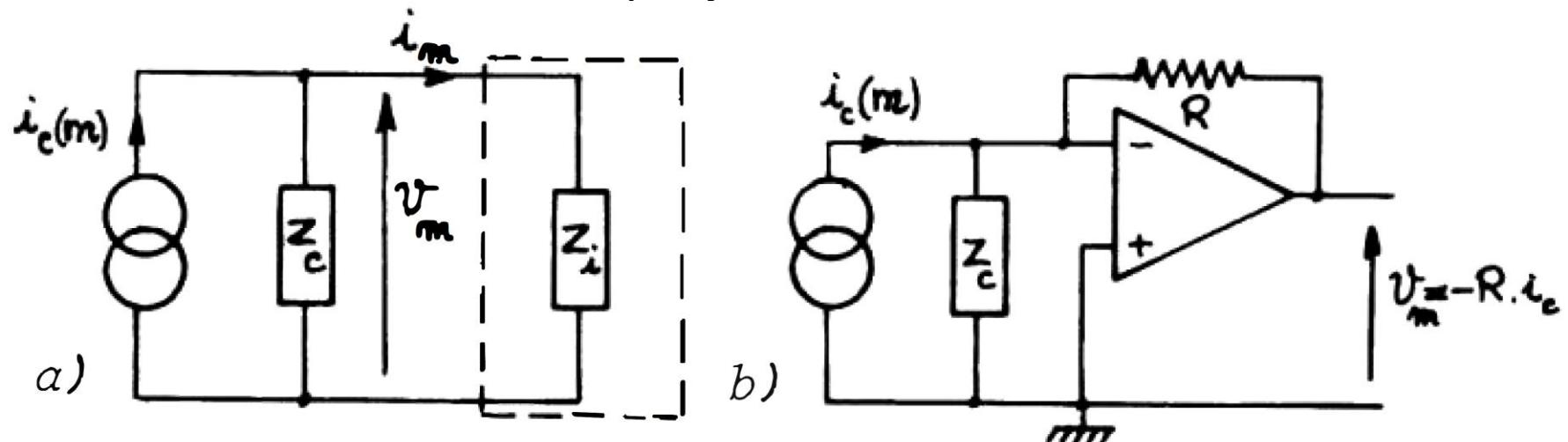


Figure 1.34 – Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de courant :
a) schéma électrique équivalent ; b) convertisseur courant-tension.

- Cependant, la tension v_m aux bornes de Z_i risque dans ce cas d'être elle-même très faible. L'emploi d'un convertisseur courant-tension permet à la fois de réduire l'influence de Z_c et d'obtenir une tension v_m importante (**Fig. 1.34 b**).

c. Capteur source de charge

Dans le cas, enfin, où le capteur est un générateur de charge $q_c(m)$, d'impédance interne capacitive (C_c , cristal piezoélectrique par exemple, il n'est en général pas possible de placer à ses bornes un circuit dont l'impédance d'entrée serait résistive : en effet, d'une part la décharge de la capacité risquerait d'être trop rapide pour permettre l'exploitation du signal et d'autre part, la tension recueillie qui dépend de l'ensemble des capacités (C_p) du montage, capacités des câbles par exemple, serait sensible à leurs variations erratiques (Fig. 1.35a).

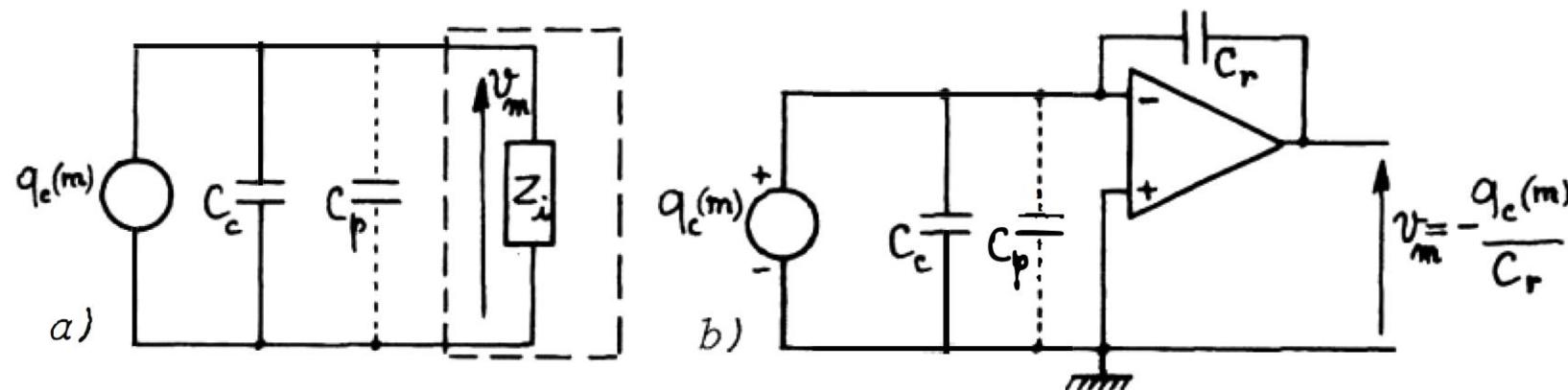


Figure 1.35 – Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de charge :

a) schéma électrique équivalent ; b) amplificateur de charge.

- Le dispositif à utiliser dans ce cas est l'amplificateur de charge (Fig. 1.35b) qui délivre une tension proportionnelle à la charge et indépendante de la capacité du capteur et des câbles de liaison.

1.3.2.3 Amplification du signal et réduction de la tension de mode commun

1.3.2.3.1 La tension de mode commun

Dans un circuit où la tension de mesure v_m est la tension différentielle entre deux conducteurs : $v_m = v_A - v_B$ (**Fig. 1.36**), la tension de mode commun v_{MC} représente la valeur de tension commune à v_A et v_B et qui n'est support d'aucune information ; en posant :

$$v_{MC} = \frac{v_A + v_B}{2}$$

76

on peut écrire :

$$v_A = v_{MC} + \frac{v_m}{2} \quad v_B = v_{MC} - \frac{v_m}{2}$$

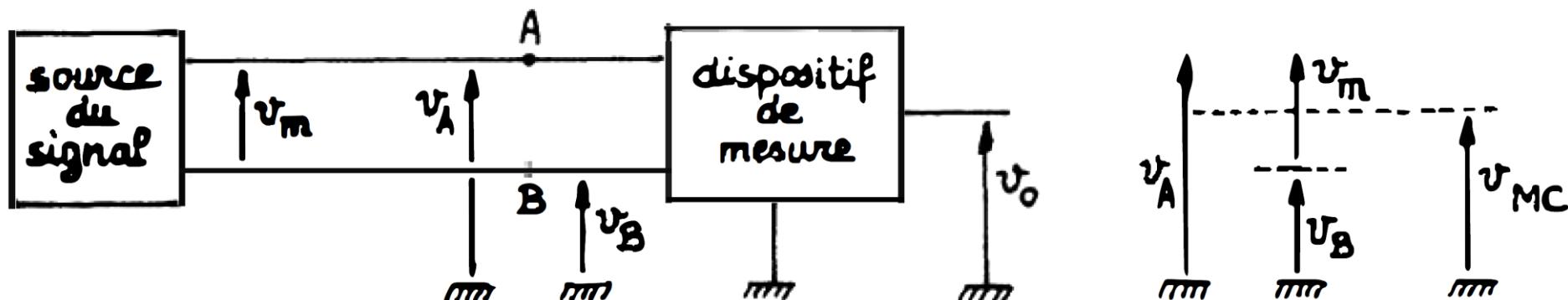


Figure 1.36 – Définition générale des tensions différentielle et de mode commun.

- La tension de mode commun v_{MC} peut être très supérieure au signal v_m et dans certains cas, l'expérimentateur ne la connaît pas avec précision. Un des problèmes les plus importants en instrumentation est l'élimination ou **réjection du mode commun** afin d'obtenir et pouvoir traiter dans l'installation de mesure un signal proportionnel à v_m et donc indépendant de v_{MC} .

a. Tension de mode commun due à l'alimentation

Le cas se présente lorsque la tension de mesure est la tension différentielle entre deux points dont le potentiel comporte un terme commun déterminé par la valeur de la tension d'alimentation.

Ainsi pour un pont de Wheatstone (Fig. 1.37) constitué de 3 résistances fixes R_0 et d'un capteur de résistance $R_c = R_0 + \Delta R_c$, on a, lorsque $\Delta R_c \ll R_0$:

$$v_A = \frac{E_s}{2} + \frac{E_s}{4} \frac{\Delta R_c}{R_0}, \quad v_B = \frac{E_s}{2};$$

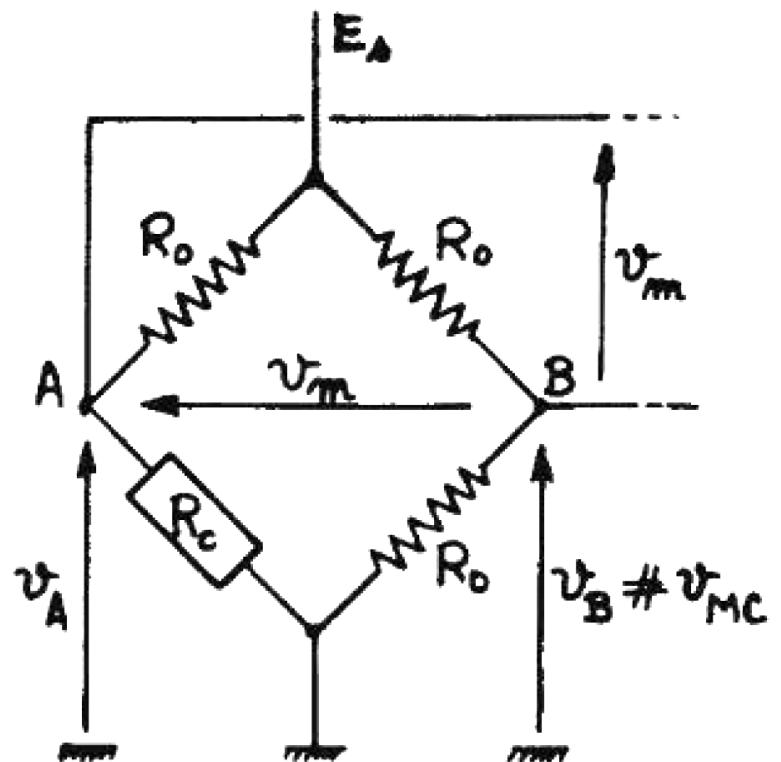


Figure 1.37 – Tensions différentielle et de mode commun dans le cas du pont de Wheatstone.

■ Si par exemple :

$$E_s = 20 \text{ V} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta R_c}{R_0} = 10^{-2}$$

la tension de mode commun v_{MC} est pratiquement égale à : $\frac{E_s}{2} = 10 \text{ V}$,

et la tension de mesure, tension différentielle, est :

$$v_m = \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_0} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ V.}$$

78

b. Tension de mode commun de masse

■ Entre deux points de mise à la masse éloignés existent en général :

1. une impédance de masse Z_M de l'ordre de l'Ohm ;
2. une f.é.m. de masse e_M qui a pour origines principales les inductions électromagnétiques (50 Hz) et la circulation de courants de retour des diverses installations. Les distances entre points de mise à la masse pouvant atteindre des centaines de mètres dans les installations industrielles, la f.é.m. de masse peut être supérieure à plusieurs dizaines de volts.

■ Lorsque la source du signal (e_c , R_c) qui est reliée à la masse au point M_c est distante de l'installation de mesure dont la masse est fixée en M_i , la f.é.m. de masse e_M entre M_c et M_i établit pour l'installation de mesure une tension de mode commun (Fig. 1.38).

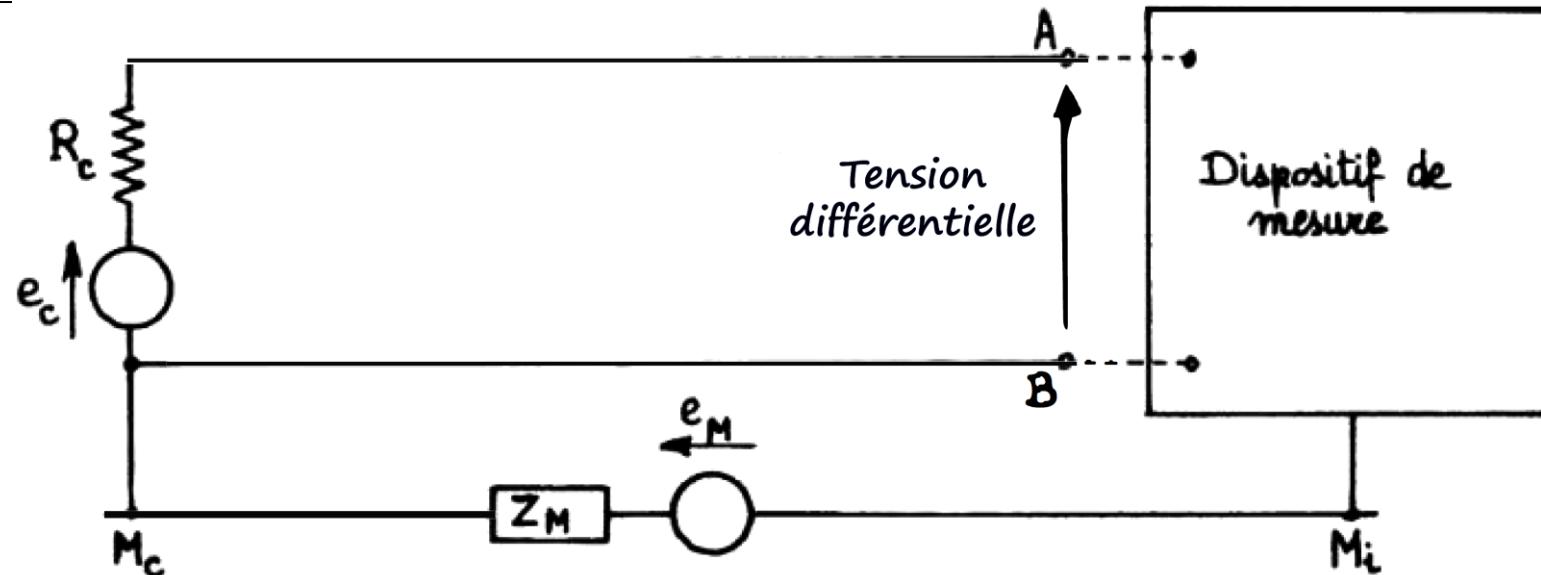


Figure 1.38 – Schéma électrique équivalent du circuit de mesure en présence d'une f.e.m. de masse.

Aux extrémités A et B de la liaison on a, en circuit ouvert, par rapport à la masse M_i de l'installation de mesure :

$$v_B = e_M \quad , \quad v_A = e_M + e_c$$

avec habituellement

$$e_c \ll e_M$$

soit :

$$v_{MC} = e_M \quad \text{et} \quad v_m = e_c$$

1.3.2.3.2 Amplificateur différentiel et taux de réjection du mode commun

■ **Intérêt :** Le recours à un amplificateur différentiel s'impose lorsque le signal aux extrémités d'une liaison apparaît comme une tension différentielle.

■ **Constitution :** Un amplificateur différentiel (Fig. 1.39) est constitué :

1. de deux voies amplificatrices, une voie inverseuse de gain $-A_1$ dont l'entrée est marquée $-$; et une voie non inverseuse de gain A_2 dont l'entrée est marquée $+$ (les valeurs A_1 et A_2 devant être aussi proches que possible l'une de l'autre) ;
2. d'un sommateur additionnant les tensions fournies par chacune des voies précédentes et dont la sortie est celle de l'amplificateur différentiel.

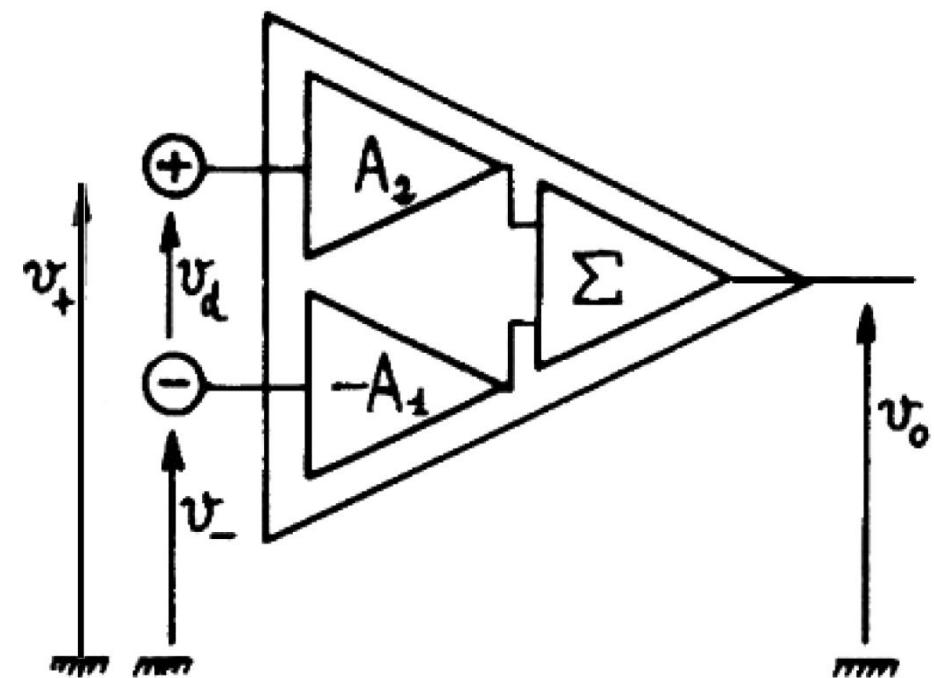


Figure 1.39 – Structure de l'amplificateur différentiel.

La tension de sortie v_0 de l'amplificateur différentiel a pour expression en fonction des tensions v_+ et v_- appliquées respectivement à ses entrées + et -

$$v_0 = A_2 v_+ - A_1 v_-$$

soit, en fonction de $v_{MC} = \frac{v_+ + v_-}{2}$ et $v_d = v_+ - v_-$,

$$v_0 = \frac{A_1 + A_2}{2} \cdot v_d + (A_2 - A_1) \cdot v_{MC}$$

Le gain différentiel est :

$$A_d = \frac{A_1 + A_2}{2},$$

le gain de mode commun est :

$$A_{MC} = A_2 - A_1,$$

- Plus les gains des deux voies sont, au signe près, très voisins, moins est la dépendance de la tension de sortie de l'amplificateur différentiel vis-à-vis de la tension de mode commun.

La tension de sortie peut être écrite sous la forme :

$$v_0 = A_d \left(v_d + \frac{A_{MC}}{A_d} \cdot v_{MC} \right)$$

soit en posant : $\tau_r = A_d/A_{MC}$, taux de réjection du mode commun (Common-mode rejection ratio, CMRR)

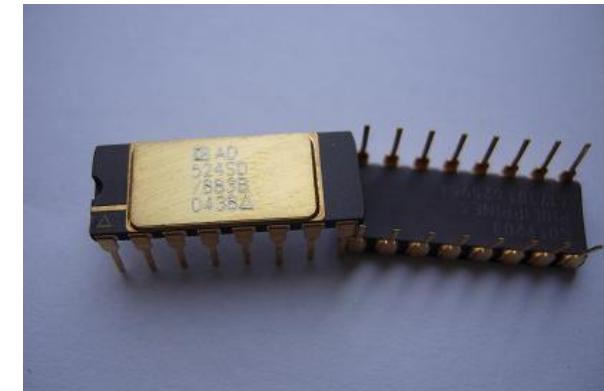
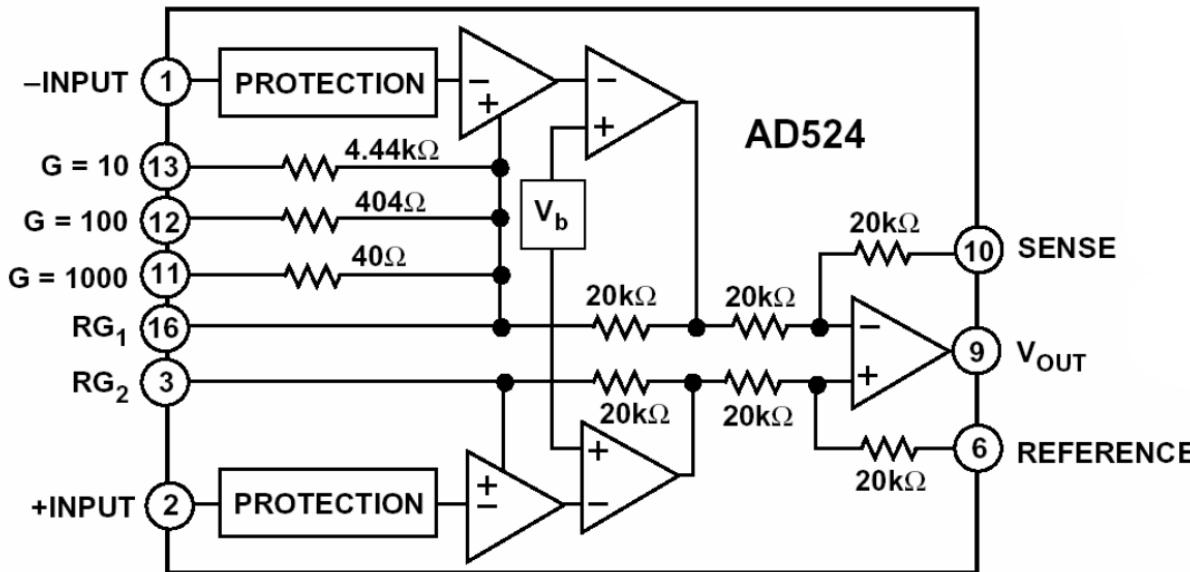
82

$$v_0 = A_d \left(v_d + \frac{1}{\tau_r} \cdot v_{MC} \right)$$

$$\tau_r = \frac{A_d}{A_{MC}} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_d}{A_{MC}} \right) \text{ (dB)}$$

La réduction en sortie de l'influence de la tension de mode commun est d'autant mieux assurée que le taux de réjection τ_r , est plus important.

Exemple : Amplificateur d'instrumentation commercial : AD524



83

Caractéristiques:

Faible bruit : 0,3 µVp-p 0,1 Hz à 10 Hz

Faible non-linéarité : 0,03 % (G = 1)

Grand TRMC : 120 dB (G = 1000)

Faible offset de tension: 50 µV

Produit gain-bande passante: 25 MHz

Gain programmable de 1, 10, 100, 1000

L'équation du gain donnée par le fabricant :

$$G = \left(1 + \frac{40000}{R_g} \right) \pm 20\%$$

Avec $R_g = 40 ; 404 ; 4,44 \text{ k}\Omega$ ou une résistance externe pour d'autres valeurs du gain (relier: RG1 - RG2)

Amplificateur d'instrumentation commercial : AD524

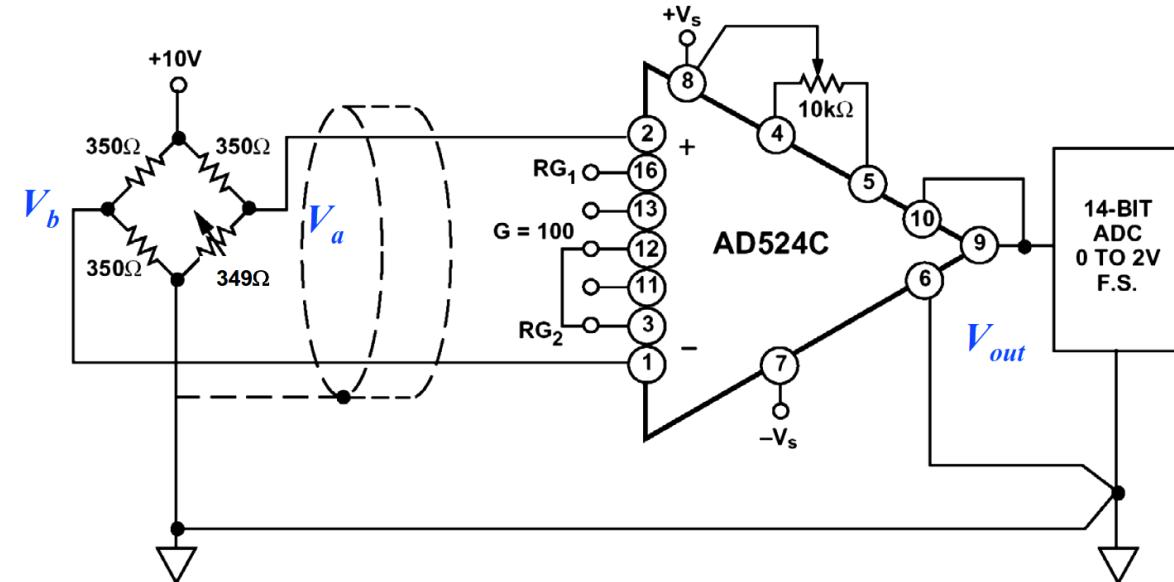
Q : Pour le circuit, calculer V_a , V_b et V_{out} ainsi que l'effet de la tension de MC de 5 V sur la sortie (CMRR= 100 dB avec G=100).

- En appliquant le diviseur de tension :

$$V_b = \frac{1}{2} V_{\text{supply}} = 5 \text{ V}$$

$$V_a = \left(\frac{349\Omega}{350\Omega + 349\Omega} \right) 10 \text{ V} = 4.99285 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= G(V_a - V_b) \\ &= 100(4.99285 \text{ V} - 5 \text{ V}) = -715 \text{ mV} \end{aligned}$$



84

Pour un gain de 100, le CMRR = 100 dB

$$CMRR = 20 \log \frac{G_{dm}}{G_{cm}} \rightarrow G_{cm} = 0.001$$

$$G_{cm} V_{cm} = 0.001 \times 5 \text{ V} = 5 \text{ mV}$$

L'erreur de MC est

$$\frac{5 \text{ mV}}{715 \text{ mV}} \times 100\% = 0.7\%$$

1.4 Critères de choix d'un capteur

Le choix d'un capteur dépend des critères suivants :

1. Critères fondamentaux

- Grandeur physique à acquérir : température, pression, niveau, position, rayonnement, onde sonore,....
- Configuration et installation : Un système de conditionnement du signal doit être simple à utiliser. Le système de conditionnement de signal idéal interroge le matériel, fait un rapport de présence de l'équipement et fournit une interface logicielle pour attribuer tous les paramètres. De plus, on doit être en mesure d'utiliser l'environnement logiciel pour configurer et modifier au besoin le nombre de voies.
- Étalonnage : La plupart des systèmes de mesure sont étalonnés à l'usine, mais ils perdent en exactitude au fil du temps. Un grand nombre de systèmes ont des signaux de référence internes qui permettent au système de mesure d'être ajusté pour compenser les variations de température. Il faut savoir que même ces valeurs de références intégrées peuvent aussi s'altérer, ainsi il faut s'assurer de la possibilité de la réalisation d'un étalonnage externe.
- Consommation
- Robustesse
- Encombrement : géométrie et dimensions
- Isolation : Lorsque le signal mesuré présente soit une tension élevée, soit une tension soumise à de brusques variations, il doit être isolé du reste du système. Une isolation insuffisante peut compromettre la sécurité de l'opérateur, ainsi que l'intégrité de l'ensemble du système d'acquisition de données.
- Maintenance : Facilité et disponibilité des schémas de câblage et de connectivité.
- Prix : est fonction des différents critères

2. Critère métrologiques

- Etendue de mesure : dépend de l'amplitude du mesurande
- Plage de restitution : variation possible de la grandeur électrique à la sortie du capteur, dépend des gammes d'entrée des étages en aval
- Sensibilité : dépend de l'amplitude du mesurande et du mode de conditionnement prévu
- Linéarité : obligatoire si aucune solution de linéarisation n'est prévue
- Exactitude (fidélité + justesse) : dépend de l'application du capteur
- Résolution : dépend de la variabilité du mesurande et de la qualité de la mesure souhaitée
- Limites d'utilisation du capteur
- Rapidité
- Bande passante : Lors de la conception et de la définition des spécifications d'un système d'acquisition de données, il faut s'assurer que la bande passante du système est suffisamment large pour traiter le débit de signaux dont on a besoin et pour supporter une éventuelle augmentation du nombre de voies. Pour déterminer la bande passante minimale nécessaire, on multiplie le nombre total de voies prévu par la fréquence d'échantillonnage maximale par voie.

Bibliographie

- Asch G., *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 7^{ème} édition, Dunod, 2010.
- Dunn W. C., *Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control*, Artech House, Inc., 2006.
- Fraden J., *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*, 5th ed., Springer, 2015.
- Webster J. G., *The Measurement, Instrumentation, and Sensors : Handbook*, Springer Science & Business Media, CRC Press LLC, 1999.
- David Ashlock D., Warren A., *Guide du conditionnement du signal pour les ingénieurs*, National Instruments, 2015.