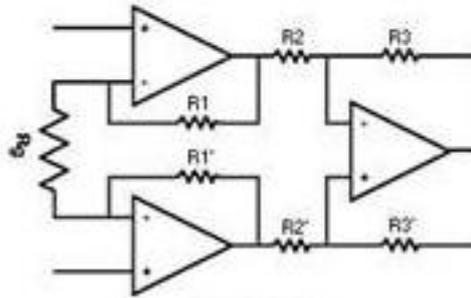
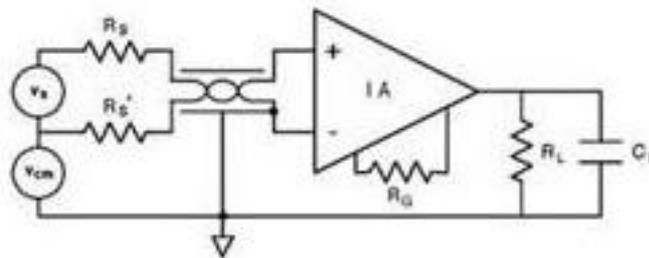


CHAPITRE III

Amplificateur d'instrumentation



SOMMAIRE

I NOTION DE TENSION DE MODE COMMUN ET D'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL.....	3
I.1 DÉFINITION DE LA TENSION DE MODE COMMUN	3
I.1.1 <i>Tension de mode commun due à l'alimentation : cas du montage en pont</i>	4
I.2 AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL ET TAUX DE RÉJECTION DE MODE COMMUN	5
II RAPPEL SUR L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL.....	6
II.1 CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES.....	6
II.2 MODÉLISATION CLASSIQUE DES DÉFAUTS	7
II.2.1 <i>Défauts statiques</i>	7
II.2.2 <i>Défauts Dynamiques</i>	7
I.3 SPÉCIFICATIONS DES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES.....	8
III L'AMPLIFICATEUR D'INSTRUMENTATION	8
III.1 CARACTÉRISTIQUES IDÉALES D'UN AMPLIFICATEUR D'INSTRUMENTATION	8
III.2 MONTAGE 1 : L'AMPLIFICATEUR DE DIFFÉRENCE.....	9
III.2.1 <i>Calcul des performances dans le cas parfait</i>	9
III.2.2 <i>Influence des résistances sur les performances</i>	9
II.2.3 <i>Influence de l'A.OP.</i>	10
II.2.4 <i>Impédance d'entrée</i>	11
II.3 MONTAGE 2 : AMPLIFICATEUR D'INSTRUMENTATION À DEUX ÉTAGES	11
II.3.1 <i>Cas parfait</i>	11
II.3.2 <i>Influence des résistances</i>	12
II.3.3 <i>Impédance d'entrée</i>	12
II.3.4 <i>Astuce de contrôle de gain</i>	13
II.4 MONTAGE 3 : L'AMPLIFICATEUR D'INSTRUMENTATION À TROIS ÉTAGES	13
II.4.1 <i>Cas parfait</i>	13
II.4.2 <i>Défaut du à l'A.Op de sortie</i>	14
IV AMPLIFICATEUR D'ISOLEMENTS	14

Amplificateur d'instrumentation

Amplification de la mesure – Tension de mode commun

Les signaux électriques issus de capteurs (thermocouple, ponts de mesure) sont généralement de faible niveau. Si l'on souhaite travailler avec une bonne précision, il est nécessaire de les amplifier. Mais cette amplification ne doit concerner que le signal utile. Or ce dernier côtoie bien souvent une tension parasite (souvent du même ordre de grandeur que le signal utile) ainsi qu'une tension de mode commun due au conditionneur associé au capteur (cas d'un pont de Wheatstone). Il faut donc faire une amplification « sélective » qui élimine ou atténue fortement tout signal ne contenant pas d'information pour ne garder que le signal capteur.

On fait appel pour cela à l'amplificateur d'instrumentation qui adapte le signal utile à la chaîne d'acquisition de manière la plus précise. C'est un amplificateur différentiel à fort taux de réjection de mode commun.

I Notion de tension de mode commun et d'amplificateur différentiel

I.1 Définition de la tension de mode commun

La tension de mesure (V_m) issue d'un capteur est une tension différentielle entre deux conducteurs (a et b) : $V_m = V_a - V_b$.

On définit la tension de mode commun V_{mc} comme étant la tension commune à V_a et V_b et qui ne contient pas d'information. Ainsi en posant :

$$V_{mc} = \frac{V_a + V_b}{2}$$

on obtient ainsi les tensions :

$$V_a = V_{mc} + \frac{V_m}{2} \quad \text{et} \quad V_b = V_{mc} - \frac{V_m}{2}$$

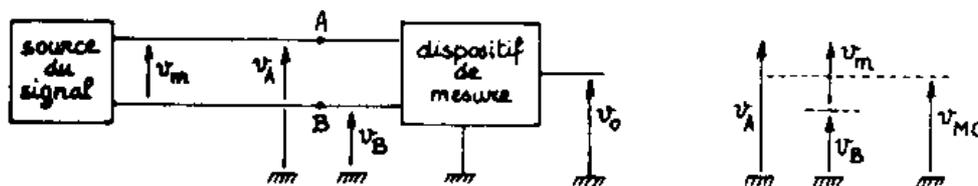


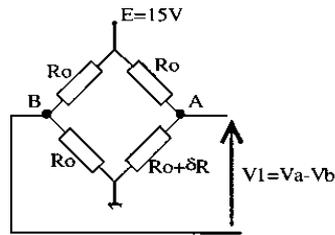
Figure 1 : représentation des tensions issues d'un capteur

La tension V_{mc} est commune à V_a et V_b . Elle peut être très supérieure à V_m . Faire une mesure de bonne précision revient à éliminer ou rejeter cette tension de mode commun de manière à extraire la tension V_m (tension différentielle de mesure) tout en étant indépendant de V_{mc} (tension de mode commun).

Cette tension de mode commun V_{mc} peut avoir plusieurs origines comme nous allons le voir.

I.1.1 Tension de mode commun due à l'alimentation : cas du montage en pont

Soit un capteur résistif placé dans un montage en pont de Wheatstone :



Avec $V_a \approx E/2 + E\delta R/4R_0$ et $V_b = E/2$

Figure 2 : Montage en pont de wheatstone

On a dans ce montage une tension de mode commun (V_{mc}) qui vaut :

$$V_{mc} = E/2$$

Ainsi qu'une tension différentielle (V_d) qui vaut :

$$V_d = E\delta R / 4R_0$$

On peut ainsi adopter une représentation permettant de faire apparaître la tension de mode commun V_{mc} et la tension différentielle V_d vis à vis des deux tensions V_a et V_b :

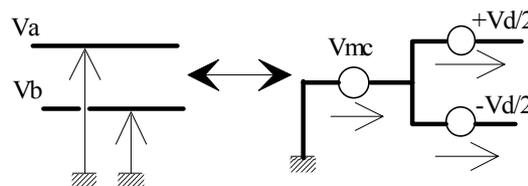


Figure 3 : Modèle équivalent d'une tension différentielle

Ici, la tension de mode commun est liée à l'alimentation du montage en pont, la tension différentielle est l'information issue du capteur.

I.1.2 Tension de mode commun de masse (transmission unifilaire)

Lors de la transmission du signal capteur, si celui-ci se fait sur un fil, la présence d'un courant de masse peut entraîner une f.e.m. de masse qui va se superposer à la tension capteur. Cette tension de masse sera amplifiée de la même manière que le signal capteur sans possibilité de l'éliminer.

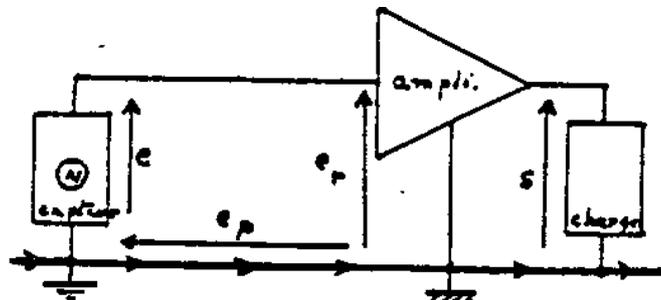


Figure 4 : Capteur à sortie unifilaire

C'est pour cette raison que l'on cherche la plupart du temps à transmettre un signal capteur de manière différentielle afin de s'affranchir de cette tension de masse. (On pourra se référer aux cours de Compatibilité Electromagnétique pour plus d'informations).

I.1.3 Tension de mode commun de perturbations (transmission bifilaire)

La transmission de l'information sur deux fils, donc de manière différentielle, permet de limiter très fortement le problème lié à la f.e.m. de masse vue précédemment. De plus si des signaux parasites se superposent au signal utile durant la transmission, l'amplification différentielle aura pour effet de les éliminer. A noter, que les deux fils de transmission sont les plus proches l'un de l'autre de manière à obtenir la même tension de mode commun due aux perturbations sur les deux fils.

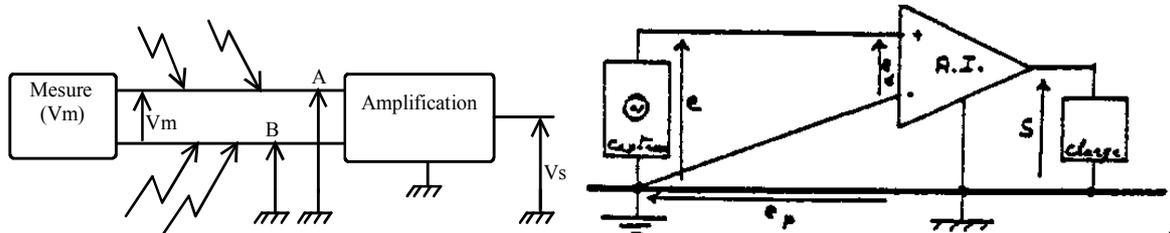


Figure 5 : Transmission bifilaire

La tension de mesure est une tension différentielle entre deux points de sortie (d1 et d2) du capteur : $V_m = V_{d1} - V_{d2}$.

La transmission engendre des tensions parasites qui se retrouvent de manière commune sur les deux fils de transmission, on appelle V_{mc} cette tension de perturbation. Ainsi en entrée de l'amplificateur on retrouve :

$$V_a = V_{d1} + V_{mc} \quad V_b = V_{d2} + V_{mc}$$

Avec V_{d1} et V_{d2} de l'ordre de (μV au mV). Pour V_{mc} , cela peut aller de ($0 - 200V$) en DC ou bien alternatif (50 Hz) dans le cas d'un couplage avec le réseau.

I.2 Amplificateur différentiel et Taux de Réjection de Mode Commun

L'utilisation d'un amplificateur différentiel est souvent rendu nécessaire lors de la présence d'une tension de mode commun. Son rôle est de fournir en sortie, une tension proportionnelle à la différence des deux tensions d'entrée.

On peut le représenter selon la figure suivante :

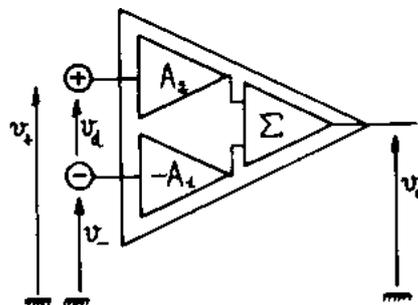


Figure 6 : Structure élémentaire de l'amplificateur différentiel

On dispose de deux entrées :

Entrée inverseuse de gain A_1 et Entrée non-inverseuse de gain A_2

La sortie est un sommateur.

Ainsi la tension de sortie s'écrit : $V_0 = A_2 V^+ - A_1 V^-$.

En posant : $V_{mc} = \frac{V^+ + V^-}{2}$ et $V_d = V^+ - V^-$. On peut réécrire V_o sous la forme :

$$V_o = A_d.V_d + A_{mc}.V_{mc}$$

Où A_d est le gain différentiel et A_{mc} le gain de mode commun avec

$$A_d = \frac{A_1 + A_2}{2} \text{ et } A_{mc} = A_2 - A_1$$

On caractérise un amplificateur différentiel par son taux de réjection de mode commun τ avec :

$$\tau = \frac{A_d}{A_{mc}}$$

Ainsi l'expression de la tension de sortie d'un amplificateur différentiel s'écrit :

$$V_o = A_d \left(V_d + \frac{1}{\tau} V_{mc} \right)$$

On peut alors le représenter selon la figure qui suit :

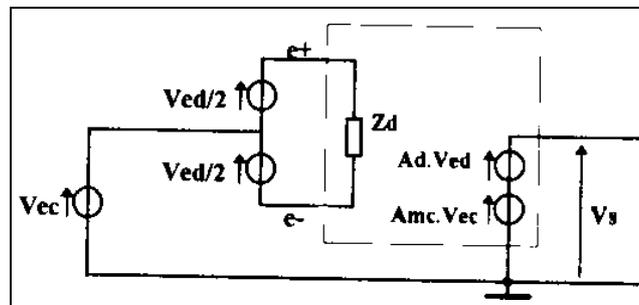


Figure 7 : Modèle équivalent de l'amplificateur d'instrumentation (Ampli. Différentiel)

On retrouve sur cette figure des notions déjà rencontrées dans les amplificateurs opérationnels qui sont (ni plus ni moins) des amplificateurs différentiels.

II Rappel sur l'amplificateur opérationnel

C'est un amplificateur différentiel de très fort gain qui, utilisé sans contre-réaction, est inexploitable pour un montage linéaire (instabilité, gain trop important (saturation)).

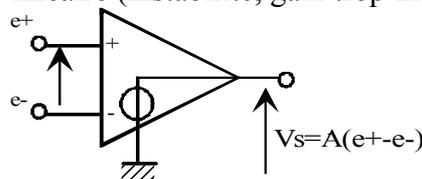


Figure 8 : représentation de l'amplificateur opérationnel

II.1 Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales des A.Op. sont résumées dans le tableau suivant :

property	Ideal case	Real case
Gain voltage : $V_s/e=A_d$	Infinity	$>10^4$
Input impedance	Infinity	$> 10 \text{ M}\Omega$
Output impedance	Null	$< 500 \Omega$
Gain width	Infinity	$\cong 10 \text{ Hz}$
Input bias current	Null	$< 500 \text{ nA}$
Input Offset voltage	Null	$< 10 \text{ mV}$
CMMR	Infinity	$> 70 \text{ dB}$

II.2 Modélisation classique des défauts

De manière à prendre en compte les défauts des A.Op., on fait appel à des représentations équivalentes.

II.2.1 Défauts statiques

Dans les défauts statiques on prend en compte les courants de polarisation et la tension d'offset de l'étage d'entrée de l'A.Op.

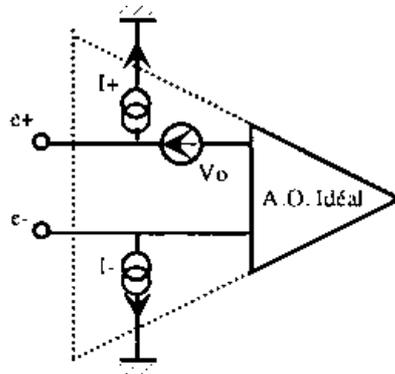


Figure 9 : représentation des défauts statiques

II.2.2 Défauts Dynamiques

Les défauts dynamiques caractérisent les limitations de fonctionnement de l'A.Op. On y retrouve les impédances d'entrée et de sortie de l'A.Op, le taux de réjection de mode commun ainsi que le comportement fréquentiel.

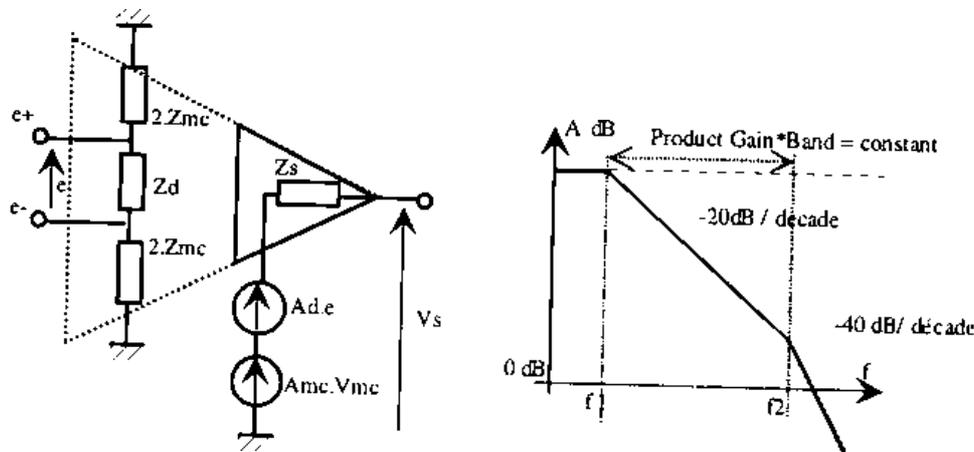


Figure 10 : Défauts dynamiques de l'A.Op.

II.2.3 Définition du Taux de réjection de mode commun (TRMC)

Il caractérise le rapport entre l'amplification différentielle et l'amplification du mode commun d'un amplificateur différentiel :

$$V_s = A_d(V^+ - V^-) + A_{mc}\left(\frac{V^+ + V^-}{2}\right)$$

On définit le TRMC (en dB) par l'expression :

$$\tau_{dB} = 20 \log\left(\frac{A_d}{A_{mc}}\right)$$

L'expression de la tension de sortie devient :

$$V_s = Ad \left((V^+ - V^-) + \frac{1}{\tau} \left(\frac{V^+ + V^-}{2} \right) \right)$$

La quantité $\frac{1}{\tau} \left(\frac{V^+ + V^-}{2} \right)$ est aussi appelée tension de Mode Commun ramenée en entrée différentielle. Cette tension introduit une erreur sur l'amplification différentielle.

1.3 Spécifications des différentes technologies

Suivant la technologie de fabrication de l'A.Op. on obtiendra des performances différentes. Les caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

	Bipolaire	Jfet	Bimos	Cmos
	LM741	TL081	CA3140	LMC603 5
I _p	80 nA	30pA	10pA	0.02pA
I _d	20 nA	5pA	0.5pA	0.01pA
V _d	1 mV	3mV	8mV	.5mV
Ad	10 ⁵	2.10 ⁵	10 ⁵	10 ⁶
TRMC (dB)	90	86		96
Red (Ω)	2M	10 ⁶ M	1.5.10 ⁶ M	>10T
R _{mc} (Ω)	100 M			
R _s (Ω)	75	100		
GBW	1M	3M		
SR (V/μs)	.5	13		1.5
Bruit (V/sqr(Hz))	20	25		50

Elles reprennent le fait que la technologie bipolaire offre une meilleure bande passante et peu de bruit, la technologie Jfet donne de très faible courant d'entrée et de grande impédance d'entrée. Il est en de même pour la technologie CMOS.

III L'amplificateur d'instrumentation

III.1 Caractéristiques idéales d'un amplificateur d'instrumentation

Il doit réaliser la fonction :

$$V_s = G_d (V^+ - V^-)$$

Avec comme caractéristique :

- une impédance d'entrée infinie
- une impédance de sortie nulle
- un TRMC infinie
- un Gain différentiel G_d réglable.

La réalisation d'amplificateur d'instrumentation se base sur l'utilisation de l'amplificateur opérationnel. Il existe différents montages.

III.2 Montage 1 : l'amplificateur de différence

Le montage est représenté ci dessous :

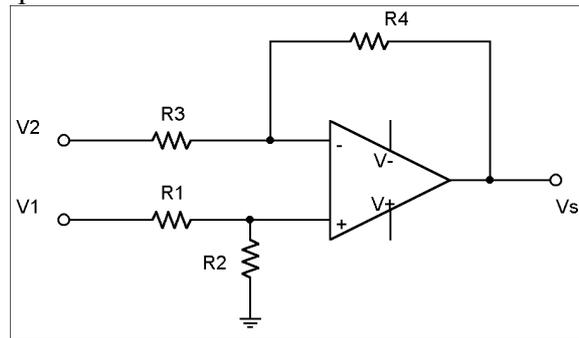


Figure 11 : L'amplificateur de différence

III.2.1 Calcul des performances dans le cas parfait

Dans le cas où l'on considère l'A.Op. comme parfait, nous pouvons écrire, au niveau des tensions d'entrée de l'A.Op. :

$$V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 \text{ et } V^- = \frac{R_4 V_2 + R_3 V_S}{R_3 + R_4}$$

Comme l'A.Op. est en contre réaction négative (régime non saturé) :

$$V^+ = V^-$$

Soit pour la tension de sortie :

$$V_S = \frac{1}{R_3} \left[\frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} R_2 V_1 - R_4 V_2 \right]$$

Ainsi si l'on souhaite avoir un amplificateur différentiel « parfait », en prenant $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$, on obtient :

$$V_S = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

donc un gain différentiel : $G_d = \frac{R_2}{R_1}$

Mais il faut noter que le réglage du gain n'est pas possible directement car il nécessite la modification de deux résistances qui doivent rester rigoureusement identiques.

III.2.2 Influence des résistances sur les performances

Pour voir l'influence de l'incertitude des résistances sur le TRMC du montage, on se place dans le cas le plus défavorable vis à vis des résistances, (cas où les gains associés à chaque entrée sont les plus éloignés) :

Pour calculer l'influence sur la tension de mode commun, on va prendre comme tension d'entrée $V_1 = V_2 = V$.

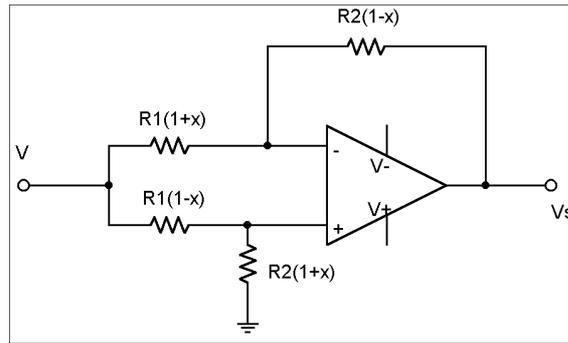


Figure 12 : Influence des résistances

Dans ce cas, la tension de sortie vaut :

$$V_s = \frac{1}{(1+x)} \frac{4R_2 x}{R_1(1-x) + R_2(1+x)} V$$

Pour x petit : $V_s \approx 4x \frac{G_d}{G_d + 1} V$

Nous obtenons donc un Gain de mode commun non nul :

$$G_{mc} = 4x \frac{G_d}{G_d + 1}$$

En considérant que les résistances n'influent pas sur le gain différentiel, nous obtenons alors un TRMC :

$$\tau_{diff} = \frac{G_d + 1}{4x}$$

Nous voyons donc que plus les résistances seront précises plus le TRMC sera important. Ce qui est logique.

II.2.3 Influence de l'A.Op.

On considère l'A.Op. comme non parfait en prenant en compte son taux de réjection de mode commun, ainsi la sortie de l'A.Op. s'écrit :

$$V_s = A_d(V^+ - V^-) + A_{mc} \left(\frac{V^+ + V^-}{2} \right)$$

On obtient, après calcul, pour l'amplificateur de différence une tension de sortie :

$$V_s = \frac{A_d K_2}{1 + (A_d - A_{mc}/2)K_1} (V_1 - V_2) + \frac{A_{mc} K_2 / 2}{1 + (A_d - A_{mc}/2)K_1} \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

$$\text{avec } K_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \text{ et } K_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

En considérant que $A_d \gg A_{mc}$, on aboutit finalement à :

$$V_s \approx G_d \left((V_1 - V_2) + \frac{A_{mc}}{2A_d} (V_1 + V_2) \right)$$

On obtient donc pour le montage différentiel un taux de réjection de mode commun :

$$\tau_{\text{diff}} = \frac{2A_d}{A_{mc}} = \tau_{A.Op.}$$

Les performances en terme de TRMC de ce type d'amplificateur de différence vis à vis de l'A.Op sont identiques. Le défaut de l'A.Op se retrouve directement dans le montage, et ceci quelque soit le gain Gd du montage.

Ex : $A_d=10^6$ $V_1-V_2=.1\text{mV}$ $V_s=100\text{mV} + 50\text{mV} !$
 $A_{mc}=10$ $V_1+V_2=10\text{V}$
 $G_d=1000$

Ce type de montage ne convient pas pour des tensions de mesures très faibles (<mV).

II.2.4 Impédance d'entrée

Chaque voie d'entrée voit une impédance différente :

Entrée non inverseuse : $Z_{e1} = R_1 + R_2$.

Entrée inverseuse : $Z_{e2}=R_1$.

L'impédance d'entrée n'est pas symétrique, de plus elle dépend de la valeur des résistances employées, qui pour des limitations de bruit thermique et de réponse en fréquence sont en général de valeurs bien inférieures au MΩ.

II.3 Montage 2 : amplificateur d'instrumentation à deux étages

Le montage est représenté ci dessous :

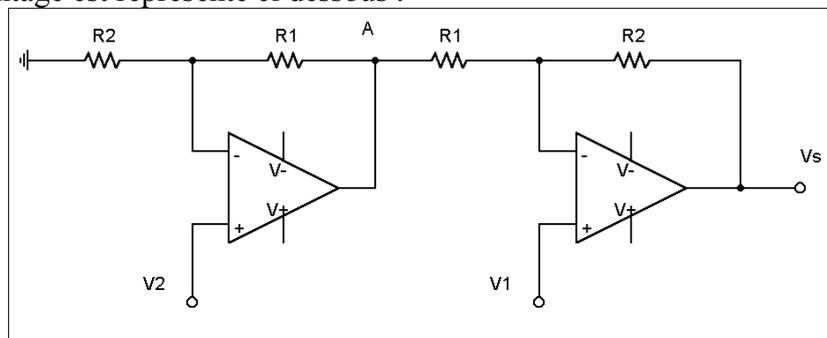


Figure 13 : L'amplificateur d'instrumentation à deux étages

II.3.1 Cas parfait

On considère tous les éléments comme parfait, ainsi :

$$V_a = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)V_2 \quad V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_a$$

D'où :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(V_1 - V_2)$$

Le gain différentiel est donc :
$$G_d = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

On obtient une amplification différentielle mais dont le gain est lié à quatre résistances (identiques deux à deux). Par contre, les impédances d'entrées sont ici très grandes et uniquement liées aux A.Op.

II.3.2 Influence des résistances

Pour l'étude sur la précision des résistances, on utilise le schéma suivant, où x représente la précision des résistances :

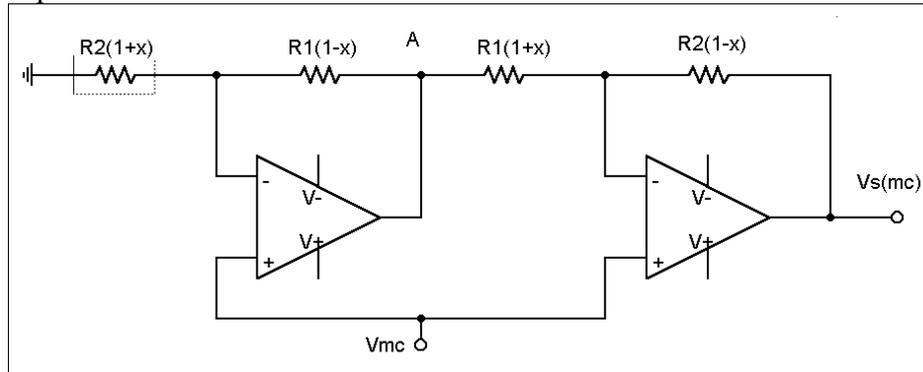


Figure 14 : Influence des résistances sur le taux de réjection de mode commun (TRMC)

On se place en tension de mode commun ($V_1=V_2=V_{mc}$)

Ainsi le potentiel en A vaut :

$$V_a = \frac{R_2(1+x) + R_1(1-x)}{R_2(1+x)} V_{mc}$$

La tension de sortie devient :

$$V_{s_{mc}} = \left(1 - \left(\frac{1-x}{1+x} \right)^2 \right) V_{mc}$$

En considérant que $x \ll 1$ on aboutit à : $V_{s_{mc}} \approx 4x V_{mc}$

Soit un TRMC :
$$\tau \approx \frac{G_d}{4x}$$

où G_d est le Gain différentiel.

II.3.3 Impédance d'entrée

Elle est ici infinie. C'est la principale amélioration vis à vis du montage précédent. Par contre, le gain n'est toujours pas réglable directement.

II.3.4 Astuce de contrôle de gain

Le montage est représenté ci dessous :

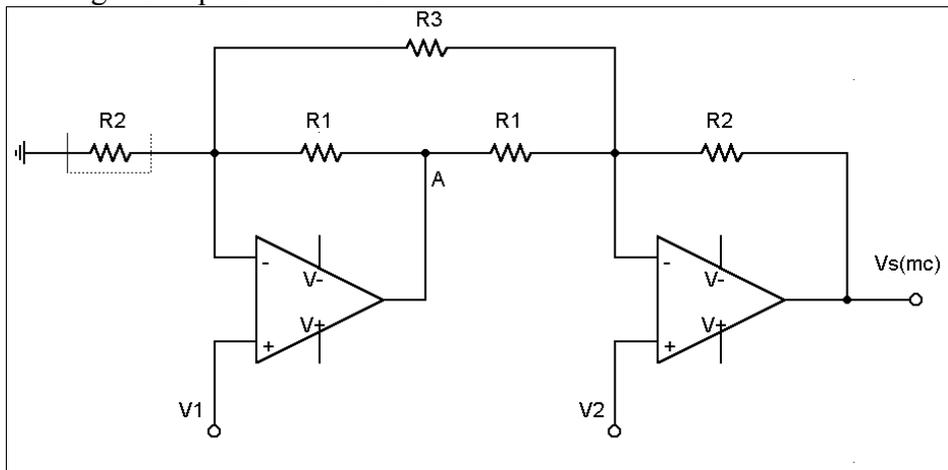


Figure 15 : Contrôle du gain à un seul paramètre

En faisant appel au montage ci-dessus, on obtient une tension de sortie V_s :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + 2 \frac{R_2}{R_3}\right)$$

On peut ainsi agir sur le gain différentiel à partir d'une seule résistance (R_3). Par contre l'évolution du gain n'est pas linéaire avec la résistance.

II.4 Montage 3 : L'Amplificateur d'instrumentation à trois étages

Le montage est représenté ci dessous :

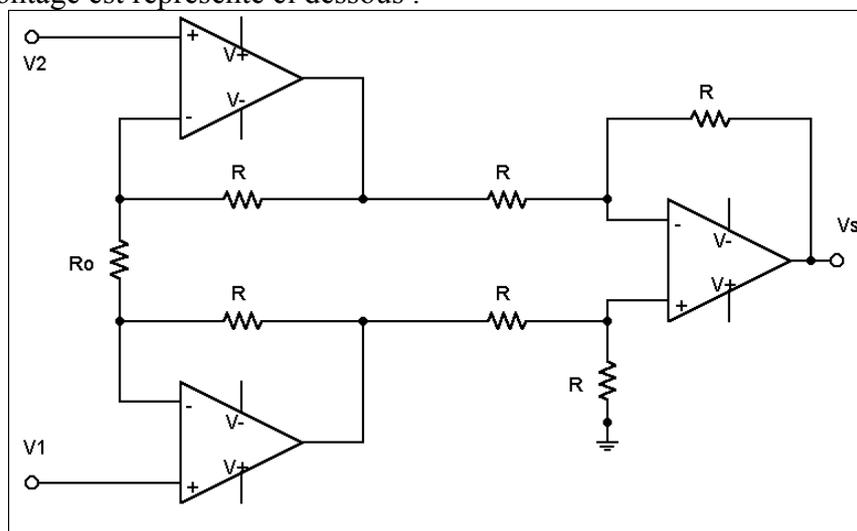


Figure 16 : L'Amplificateur d'instrumentation à trois étages

II.4.1 Cas parfait

Il associe un amplificateur de différence (en général de gain 1) à un étage d'entrée différentiel symétrique.

En faisant une étude du circuit, par superposition, on obtient :

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

On a donc un gain réglable à l'aide d'une seule résistance (R_o). Ce circuit est réalisé de manière intégrée permettant ainsi une très grande précision sur les résistances R ainsi qu'une très bonne stabilité thermique.

Le gain est réglé par l'intermédiaire de la résistance R_o qui peut venir se connecter aux bornes du C.I. ou bien être intégrée.

On remarquera que le premier étage de l'A.I. ne génère pas d'erreur de mode commun de par sa symétrie. Si $V_1=V_2=V$, on retrouve V en entrée de l'amplificateur de différence (cas A.Op parfait).

II.4.2 Défaut du à l'A.Op de sortie

Si on prend en compte le défaut de l'A.Op. au niveau de l'amplificateur de différence, la tension de sortie devient :

$$V_s = (1 + 2 \frac{R}{R_o})(V_1 - V_2) + \frac{1}{\tau_{A.Op.}}(V_1 + V_2)$$

Cette fois le taux de réjection de l'A.I. est amélioré vis à vis du TRMC de l'A.Op.

$$\tau_{AI} = \tau_{A.Op.} \left(1 + 2 \frac{R}{R_o}\right)$$

Cela permet d'obtenir des taux de réjection de mode commun supérieurs à 100dB, contrairement aux montages précédents.

IV amplificateur d'isolements

Dans le cas de très fortes tensions de mode commun ($>2kV$) ou de tensions de mesure très faibles ($<\mu V$), on est amené à utiliser des amplificateurs d'isolement qui présentent des TRMC supérieurs à 160dB :

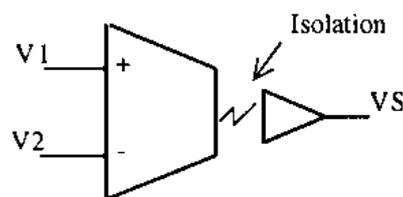


Figure 17 : l'amplificateur d'isolement

Une isolation « physique » est réalisée entre l'entrée différentielle et la sortie. La réalisation de cette isolation peut être de différent type :

- isolation par transformateur : Basse fréquence ($<20kHz$) et haute tension (10kV),
- isolation optique : Haute fréquence (100kHz) et basse tension (1kV),
- isolation capacitive : entre les deux !