



Amplificateur de différence

& Amplificateur d'Instrumentation

© Fabrice Sincère ; version 2.0.1

<http://perso.orange.fr/fabrice.sincere>

Sommaire

1- L'amplificateur de différence

1-1- L'amplificateur de différence idéal

1-2- L'amplificateur de différence en pratique

1-3- Taux de réjection de mode commun

1-4- Structure de base de l'amplificateur de différence

1-5- Exemple : INA106 (Burr-Brown)

1-6- Remarque sur l'amplificateur opérationnel

2- L'amplificateur d'instrumentation

2-1- Structure à deux amplificateurs opérationnels

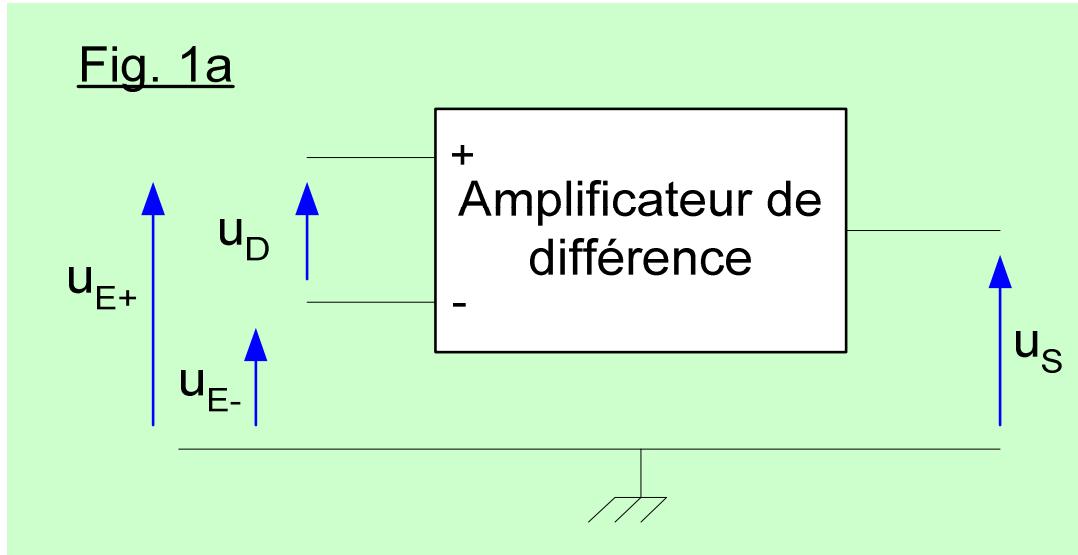
2-2- Structure à trois amplificateurs opérationnels

3- Rôle dans la chaîne de mesure

Bibliographie

1- L'amplificateur de différence (A.D.)

1-1- L'amplificateur de différence idéal



Un amplificateur de différence amplifie la tension différentielle d'entrée $u_D = u_{E+} - u_{E-}$:

$$u_S = A_D u_D$$

A_D = amplification de mode différentiel

1-2- L'amplificateur de différence en pratique

En réalité, les deux entrées ne sont jamais parfaitement symétriques et :

$$\begin{aligned} u_S &= A_+ u_{E+} - A_- u_{E-} \\ &= \underbrace{\left(\frac{A_+ + A_-}{2} \right)}_{A_D} \underbrace{(u_{E+} - u_{E-})}_{u_D} + \underbrace{(A_+ - A_-)}_{A_C} \underbrace{\left(\frac{u_{E+} + u_{E-}}{2} \right)}_{u_C} \end{aligned}$$

$$u_S = A_D u_D + A_C u_C$$

u_C = tension de mode commun

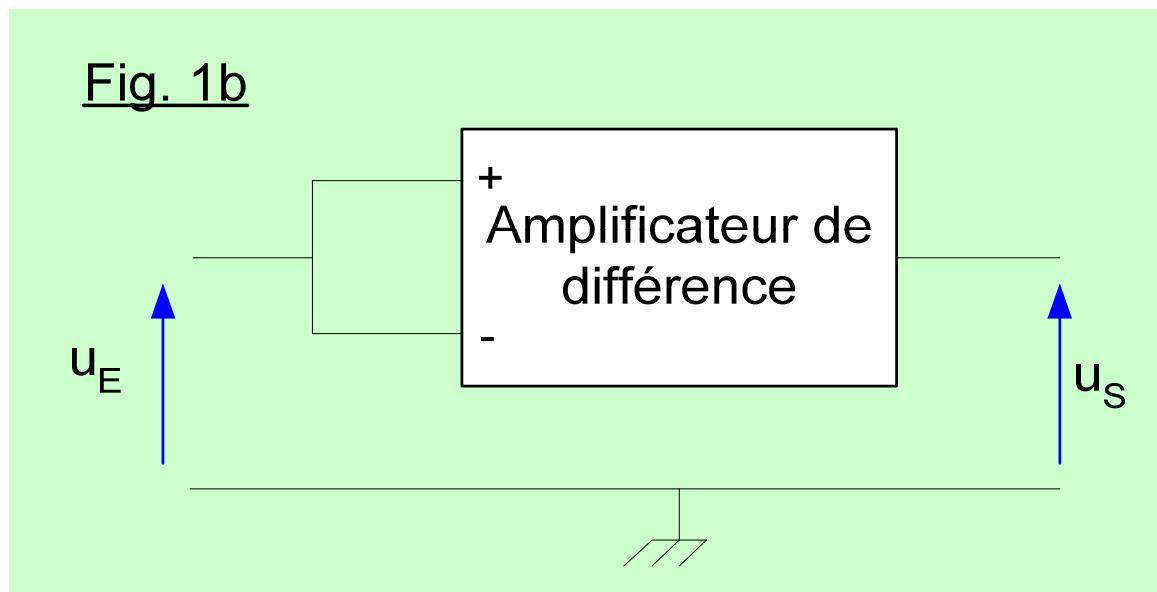
A_C = amplification de mode commun

($A_C = 0$ dans le cas idéal)

Si $u_E = u_{E+} = u_{E-}$:

$$u_S = A_C u_E = A_C u_C$$

Fig. 1b



A.N. $A_D = +10$; $A_C = +0,05$

$u_E = +500$ mV. Calculer u_S .

$$u_S = +0,05 \times (+500) = +25 \text{ mV}$$

(au lieu de 0 mV pour un A.D. idéal)

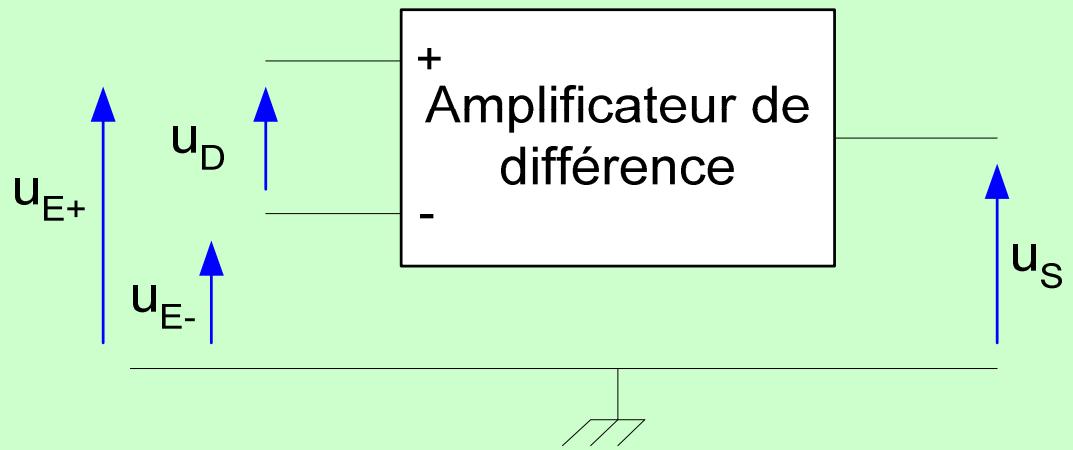
A.N.

$$u_{E+} = +490 \text{ mV}$$

$$u_{E-} = +510 \text{ mV}$$

Calculer u_S .

Fig. 1



$$u_D = -20 \text{ mV} ; u_C = +500 \text{ mV}$$

$$u_S = +10 \times (-20) + 0,05 \times (+500) = -200 + 25 = -175 \text{ mV}$$

$$\text{Cas idéal : } u_S = 10 \times (-20) \text{ mV} = -200 \text{ mV}$$

(12,5 % d'erreur)

A.N.

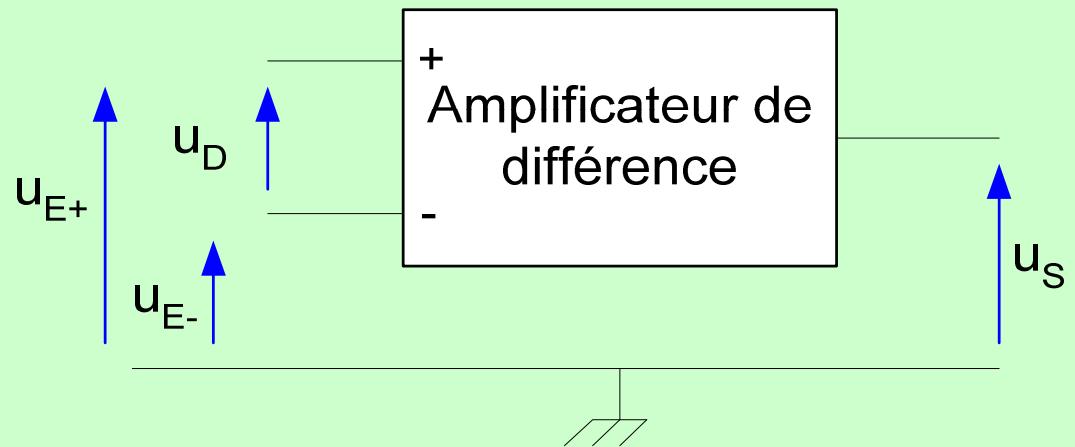
$$u_{E+} = +4,99 \text{ V}$$

$$u_{E-} = +5,01 \text{ V}$$

Calculer u_S .

Commentaire ?

Fig. 1



- $u_D = -20 \text{ mV}$; $u_C = +5,00 \text{ V}$

$$u_S = +10 \times (-0,02) + 0,05 \times (+5) = -0,2 + 0,25 = +50 \text{ mV}$$

Cas idéal : $u_S = 10 \times (-20) \text{ mV} = -200 \text{ mV}$

(125 % d'erreur)

- *Commentaire : la tension de mode commun dégrade les performances de l'A.D.*

1-3- Taux de réjection de mode commun

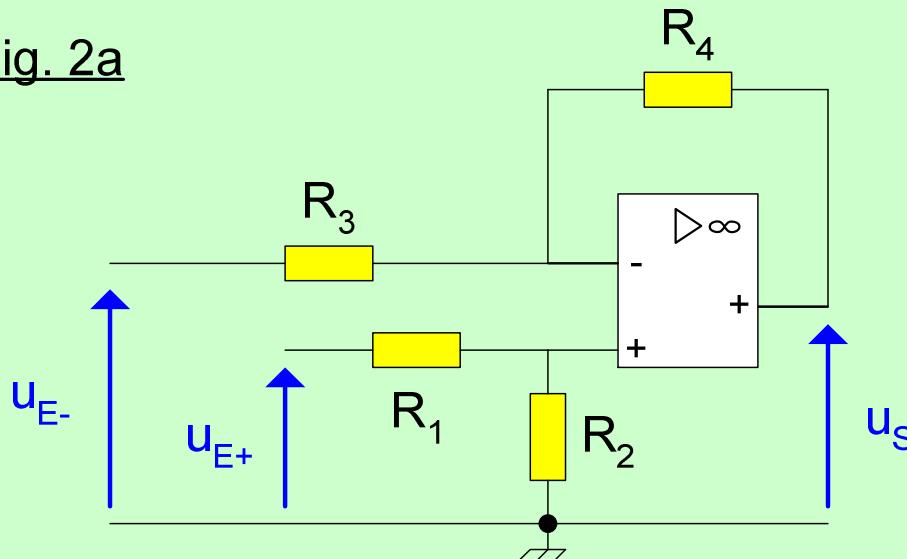
$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} \left| \frac{A_D}{A_C} \right|$$

Le CMRR (Common Mode Rejection Ratio) doit être le plus grand possible.

A.N. $\text{CMRR} = 20 \log \left(\frac{10}{0,05} \right) = 46 \text{ dB}$
(c'est mauvais)

1-4- Structure de base de l'amplificateur de différence

Fig. 2a



On montre que :

$$u_s = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) u_{E+} - \left(\frac{R_4}{R_3} \right) u_{E-}$$

- Justification

A.O. en régime linéaire.

Théorème de superposition

1) $u_{E-} = 0 \text{ V}$

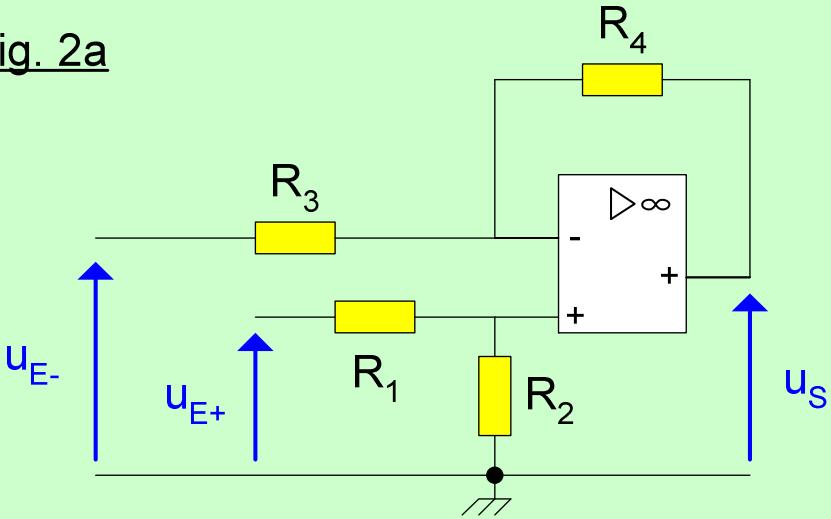
On reconnaît un amplificateur non inverseur :

$$u_{S1} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)v_+ = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) u_{E+}$$

2) $u_{E+} = 0 \text{ V}$ donc $v_+ = 0 \text{ V}$

On reconnaît un amplificateur inverseur : $u_{S2} = -\left(\frac{R_4}{R_3}\right)u_{E-}$

Fig. 2a



$$u_s = u_{S1} + u_{S2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3}\right) u_{E+} - \left(\frac{R_4}{R_3}\right) u_{E-}$$

- Autre méthode
- A.O. en régime linéaire.

$$v_+ = v_-$$

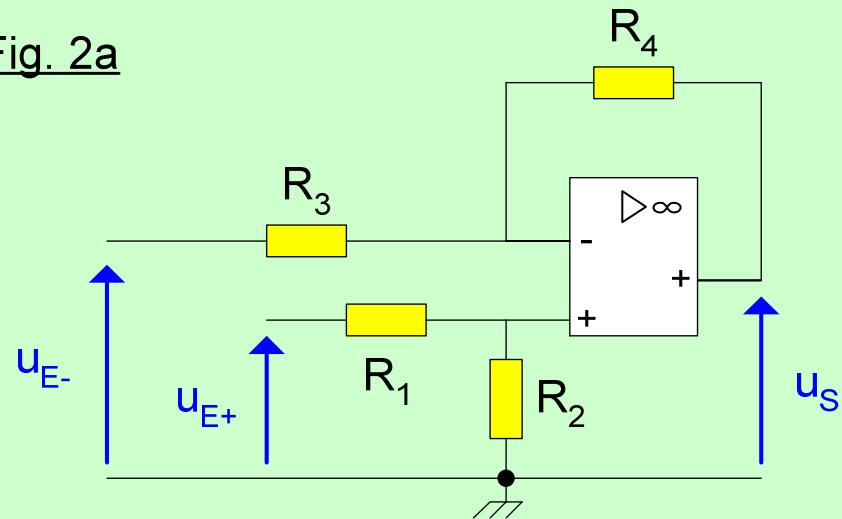
Théorème de Millman :

$$v_- = \frac{\frac{u_{E-}}{R_3} + \frac{u_s}{R_4}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_4 u_{E-} + R_3 u_s}{R_3 + R_4}$$

$$v_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{E+}$$

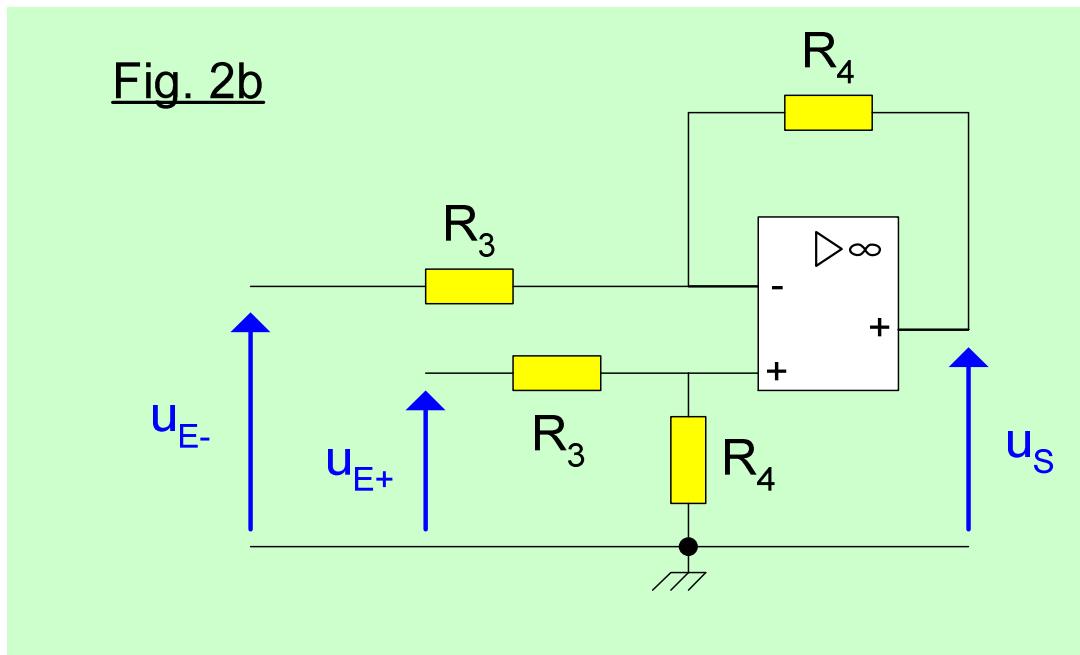
$$u_s = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) u_{E+} - \left(\frac{R_4}{R_3} \right) u_{E-}$$

Fig. 2a



- Si $R_2 = R_4$ et $R_1 = R_3$ alors :

$$u_s = \frac{R_4}{R_3} (u_{E+} - u_{E-})$$



A.N. $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 100 \text{ k}\Omega$

Calculer A_D , A_C et le CMRR.

$A_D = 100$; $A_C = 0$; $CMRR = +\infty$ (cas idéal)

- En réalité, à cause des tolérances, les résistances ne sont pas rigoureusement égales et $A_C \neq 0$.

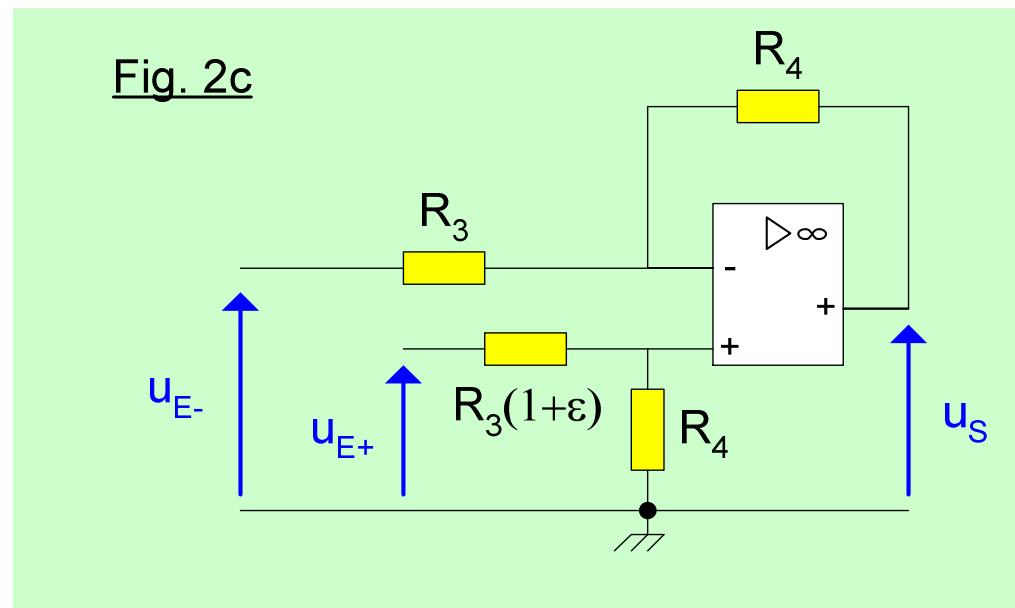
Si : $R_1 = R_3(1 + \varepsilon)$ avec $|\varepsilon| \ll 1$

et $R_2 = R_4$

Alors :

$$A_C \approx -\varepsilon \frac{A_D}{1 + A_D}$$

$$\text{CMRR} \approx 20 \log \left| \frac{1 + A_D}{\varepsilon} \right|$$



avec : $A_D \approx R_4 / R_3$

Le CMRR augmente avec l'amplification A_D .

A_D est légèrement modifiée (de l'ordre de ε).

- Justification :

Si $u_E = u_{E+} = u_{E-}$:

$$u_S = u_E \left(\frac{A_D R_3}{R_3(1+\varepsilon) + A_D R_3} \right) \left(\frac{R_3 + A_D R_3}{R_3} \right) - u_E(A_D)$$

$$= u_E A_D \left(\frac{1}{1 + \frac{\varepsilon}{1 + A_D}} - 1 \right) \approx u_E \left(-\varepsilon \frac{A_D}{1 + A_D} \right) \text{ car } \frac{1}{1+x} \approx 1-x \text{ pour } |x| \ll 1$$

$$A_C \approx -\varepsilon \frac{A_D}{1 + A_D}$$

$$CMRR \approx 20 \log \left| \frac{1 + A_D}{\varepsilon} \right|$$

A.N. Calcul du CMRR

$$R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$$

a) $R_1 = 10,5 \text{ k}\Omega$

$$A_D \approx R_4 / R_3 = 1$$

$$\varepsilon = +0,05 = +5 \%$$

$$A_C \approx -0,025$$

$$CMRR \approx 32 \text{ dB}$$

b) $R_1 = 9,99 \text{ k}\Omega$

$$\varepsilon = -0,1 \%$$

$$A_C \approx +0,0005$$

$$CMRR \approx 66 \text{ dB}$$

c) Conclusion

Le CMRR augmente quand la tolérance sur les résistances diminue.

A.N. $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 101 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$

Calculer A_D , A_C et le CMRR.

$$A_+ = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) = 10,091$$

$$A_- = \frac{R_4}{R_3} = 10,1$$

$$A_D = \frac{A_+ + A_-}{2} = 10,095$$

$$A_C = A_+ - A_- = -0,009$$

$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} \left| \frac{A_D}{A_C} \right| = 61 \text{ dB}$$

1-5- Exemple : INA106 (Burr-Brown)

- Caractéristiques :

$CMRR = 100 \text{ dB}$

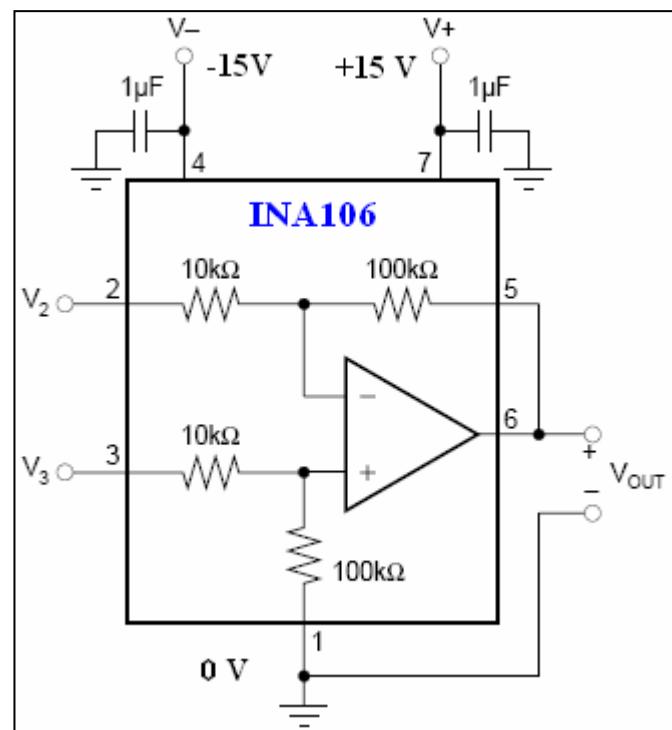
Impédance différentielle d'entrée : $10 \text{ k}\Omega$

$$A_D =$$

$$100 \text{ k}\Omega / 10 \text{ k}\Omega = 10$$



Fig. 3a



A.N. a) Estimer la tolérance sur les résistances.

$$\text{CMRR} = 20 \log \left(\frac{1 + A_D}{\epsilon} \right)$$

$$100 \text{ dB} = 20 \log \left(\frac{11}{\epsilon} \right)$$

$$\epsilon \approx 1 \cdot 10^{-4} \approx 0,01 \% \approx 100 \text{ ppm}$$

Les résistances sont ajustées par laser.

b) Estimer la tolérance sur A_D .

$$10 \pm 0,01 \%$$

(\pm 0,01 \% d'après le constructeur)

c) Influence de l'impédance de la source d'entrée

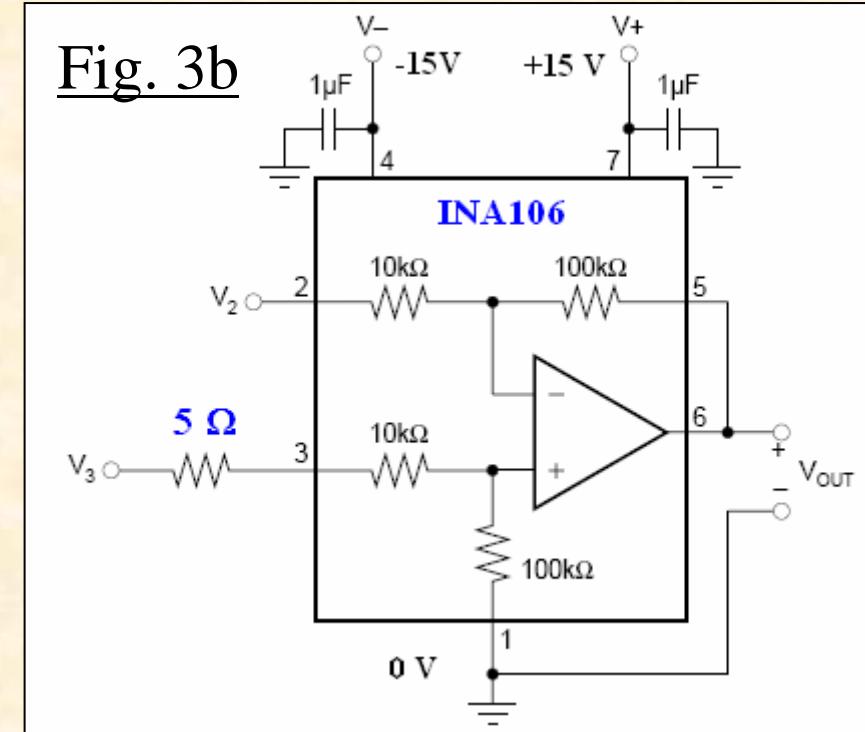
$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega + 5 \Omega = 10,005 \text{ k}\Omega$$

$$\varepsilon = 0,05 \%$$

$$\text{CMRR} \approx 20 \log \left(\frac{1+10}{0,0005} \right) \approx 87 \text{ dB}$$

(au lieu de 100 dB)

Fig. 3b



Le constructeur précise que l'impédance de la source d'entrée ne doit pas dépasser 10 Ω (soit 1/1000 de l'impédance différentielle d'entrée) pour ne pas dégrader le CMRR.

1-6- Remarque sur l'amplificateur opérationnel (A.O.)

Un A.O. est par nature un amplificateur de différence, à très forte amplification.

- Exemple : μ A741

$A_D = 200\ 000$

$CMRR = 90\ dB$

A.N. Calculer A_C .

$$|A_C| = \frac{|A_D|}{10^{\frac{CMRR}{20}}} = \frac{200000}{10^{4,5}} \approx 6$$

2- L'amplificateur d'instrumentation (A.I.)

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

La langue de Shakespeare est aussi celle de l'électronique.

- Exercice de traduction :

Should I Use a Difference Amplifier or Instrumentation Amplifier ?

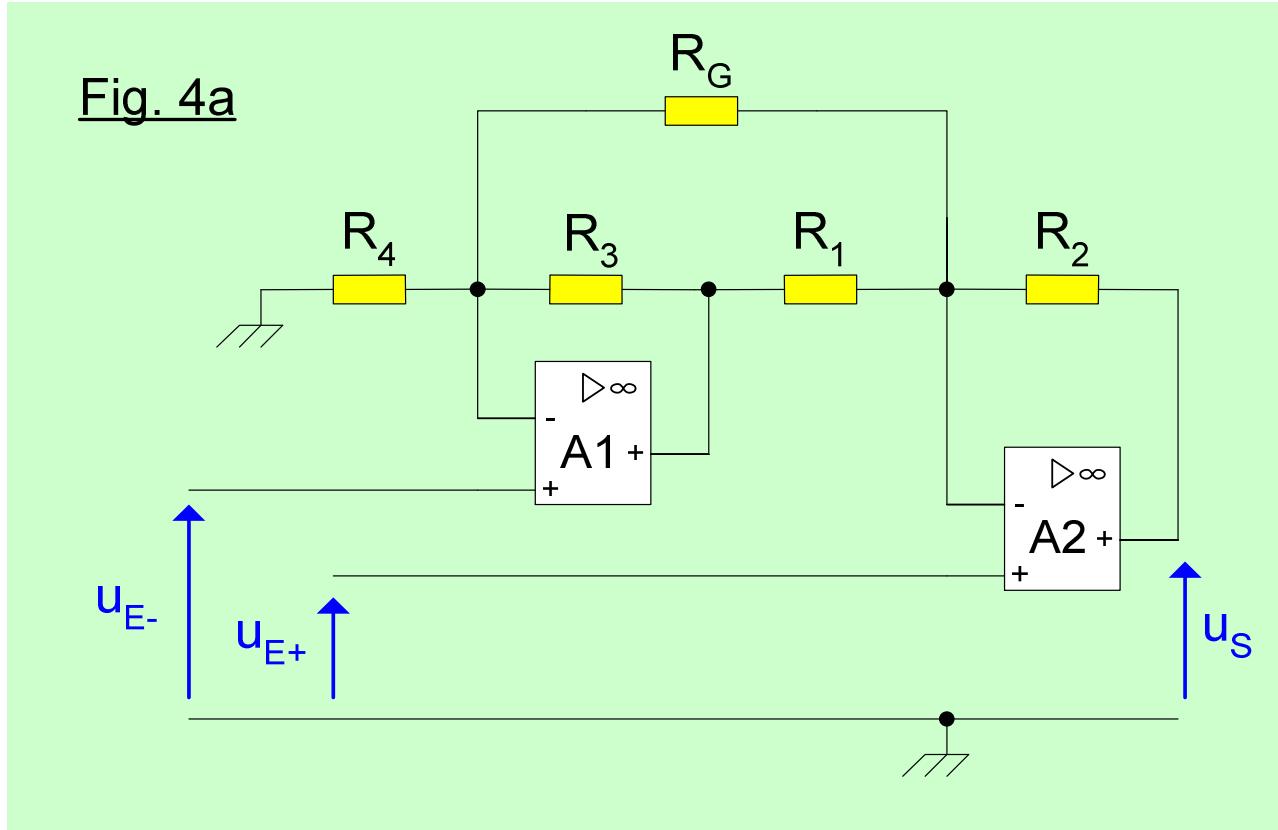
Difference amplifiers excel when measuring signals with common-mode voltages greater than the power supply rails, when there is a low power requirement, when a small package is needed, when the source impedance is low or when a low-cost differential amp is required. The difference amp is a building block of the instrumentation amp.

Instrumentation amplifiers are designed to amplify low-level differential signals where the maximum common-mode voltage is within the supply rails. Generally, using an adjustable gain block, they are well-suited to single-supply applications. The three-op-amp topology works well down to Gain = 1, with a performance advantage in AC CMR. The two-op-amp topology is appropriate for tasks requiring a small package footprint and a gain of 5 or greater. It is the best choice for low-voltage, single-supply applications.

[Source : Texas Instruments]

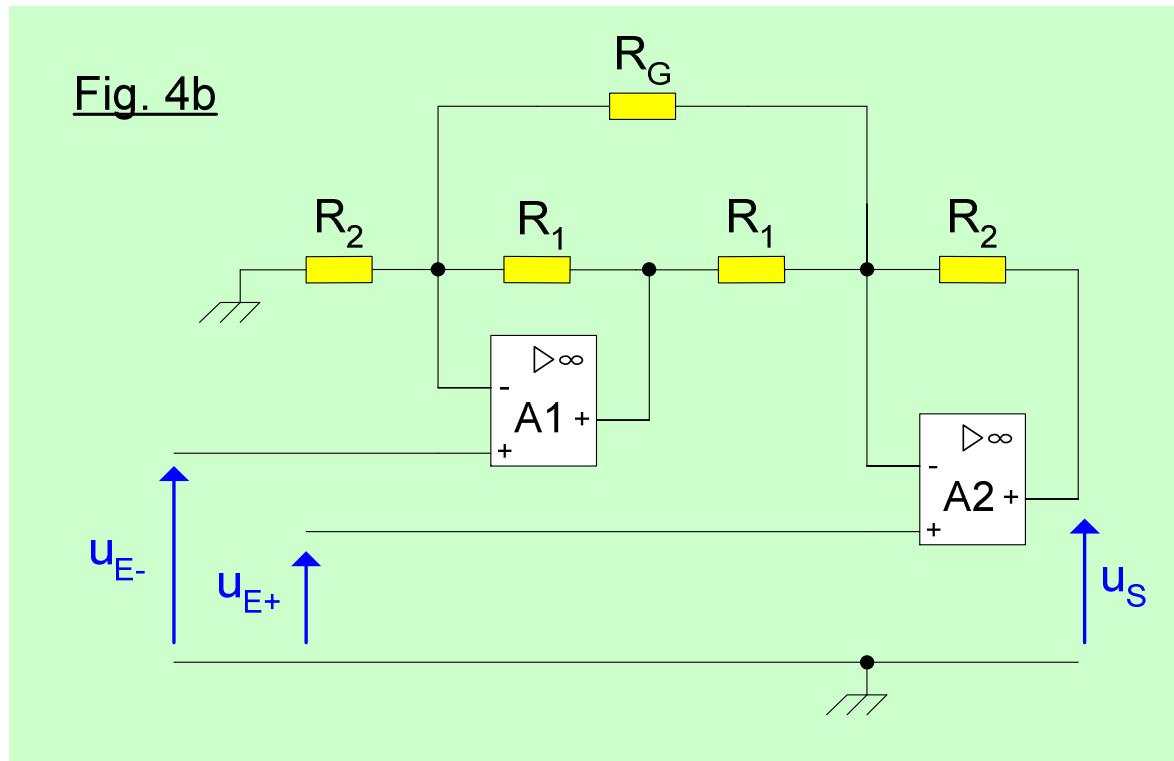
2-1- Structure à deux amplificateurs opérationnels

Fig. 4a



Si $R_2 = R_4$ et $R_1 = R_3$ alors :

$$A_D = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R_G}$$



La tolérance sur les résistances limite le CMRR.

Le CMRR augmente avec l'amplification A_D .

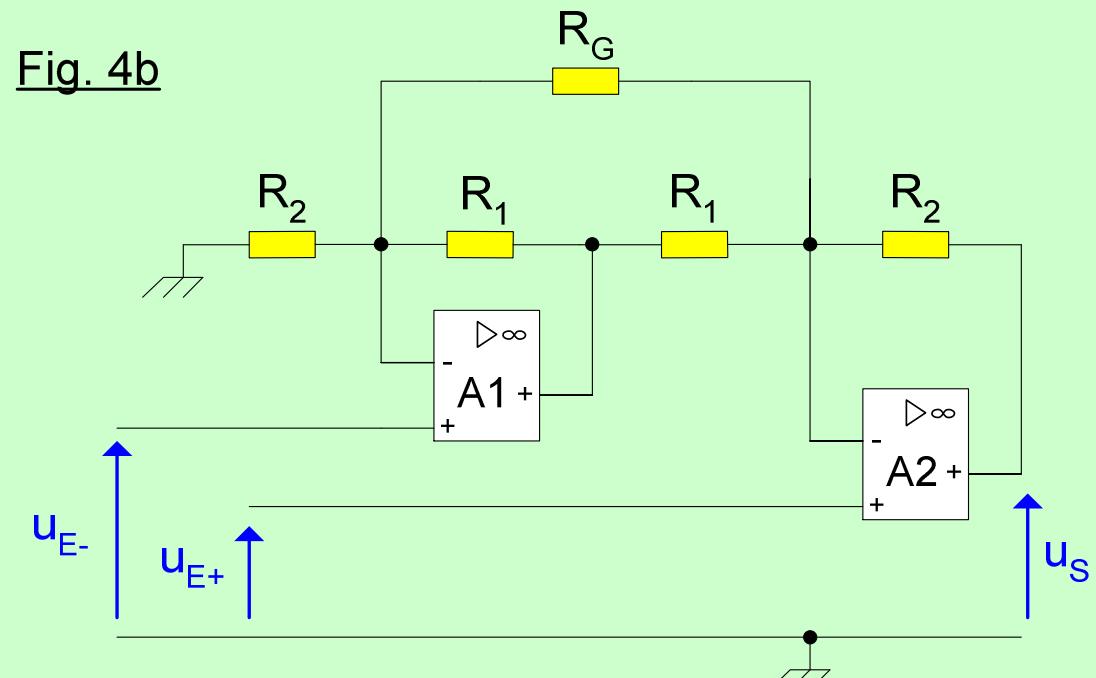
- Justification

Les A.O. sont en régime linéaire.

$$u_{E-} = v_{A1-}$$

$$u_{E+} = v_{A2-}$$

Fig. 4b



Théorème de Millman :

$$u_{E-} = \frac{\frac{V_{A1s}}{R_1} + \frac{u_{E+}}{R_G}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_G}}$$

$$u_{E+} = \frac{\frac{V_{A1s}}{R_1} + \frac{u_S}{R_2} + \frac{u_{E-}}{R_G}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_G}}$$

$$u_{E+} - u_{E-} = \frac{\left(\frac{v_{A1s}}{R_1} + \frac{u_s}{R_2} + \frac{u_{E-}}{R_G} \right) - \left(\frac{v_{A1s}}{R_1} + \frac{u_{E+}}{R_G} \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_G}} = \frac{\frac{u_s}{R_2} - \frac{u_{E+} - u_{E-}}{R_G}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_G}}$$

$$u_s = R_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{2}{R_G} \right) (u_{E+} - u_{E-}) = A_D (u_{E+} - u_{E-})$$

$$A_D = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R_G}$$

- Exemple : INA125

Impédance différentielle
d'entrée : $10^{11} \Omega$

$$R_2 = 30 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$A_D = 4 + \frac{60 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

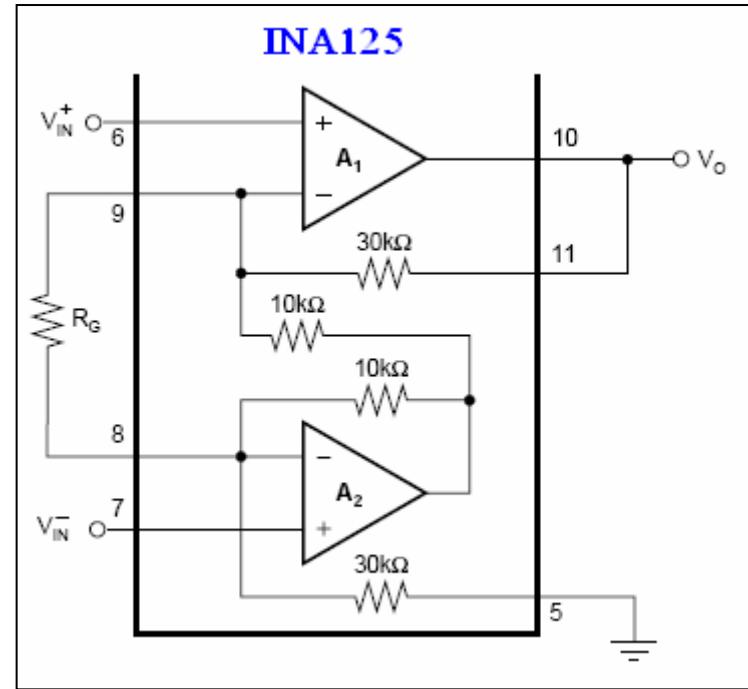


Fig. 5

R_G est une résistance externe qui permet de régler A_D .

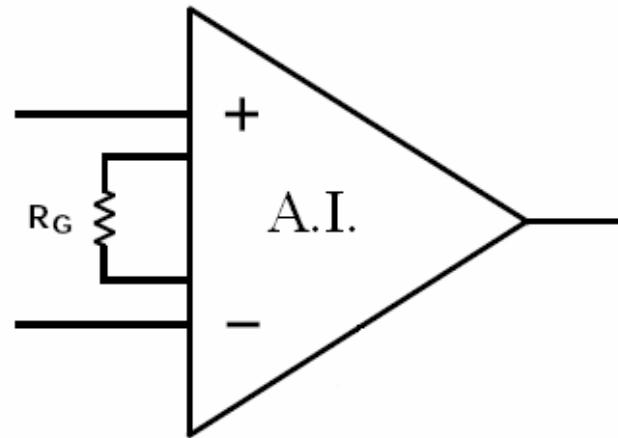
A.N. Calculer R_G pour avoir une amplification de 100.

$$625 \Omega$$

Le CMRR vaut alors 114 dB (d'après le constructeur)

- Symbole de l'amplificateur d'instrumentation

Fig. 6



- Exemples d'application

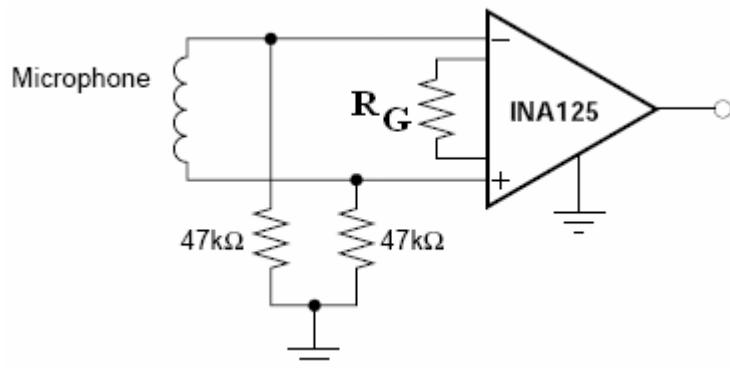


Fig. 7a

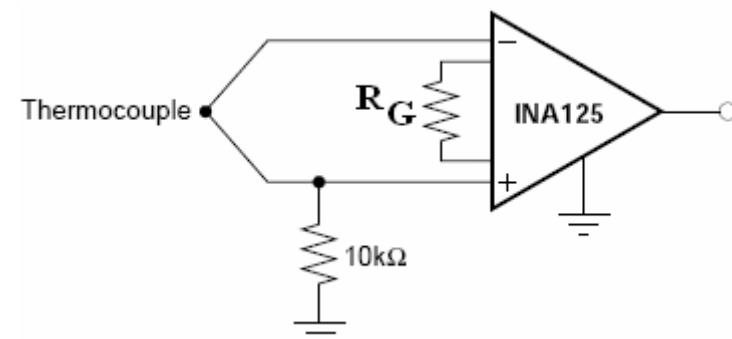


Fig. 7b

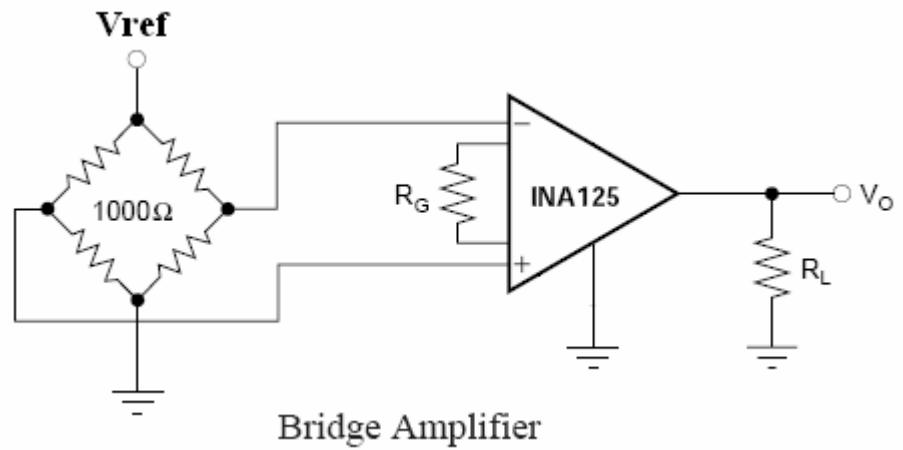
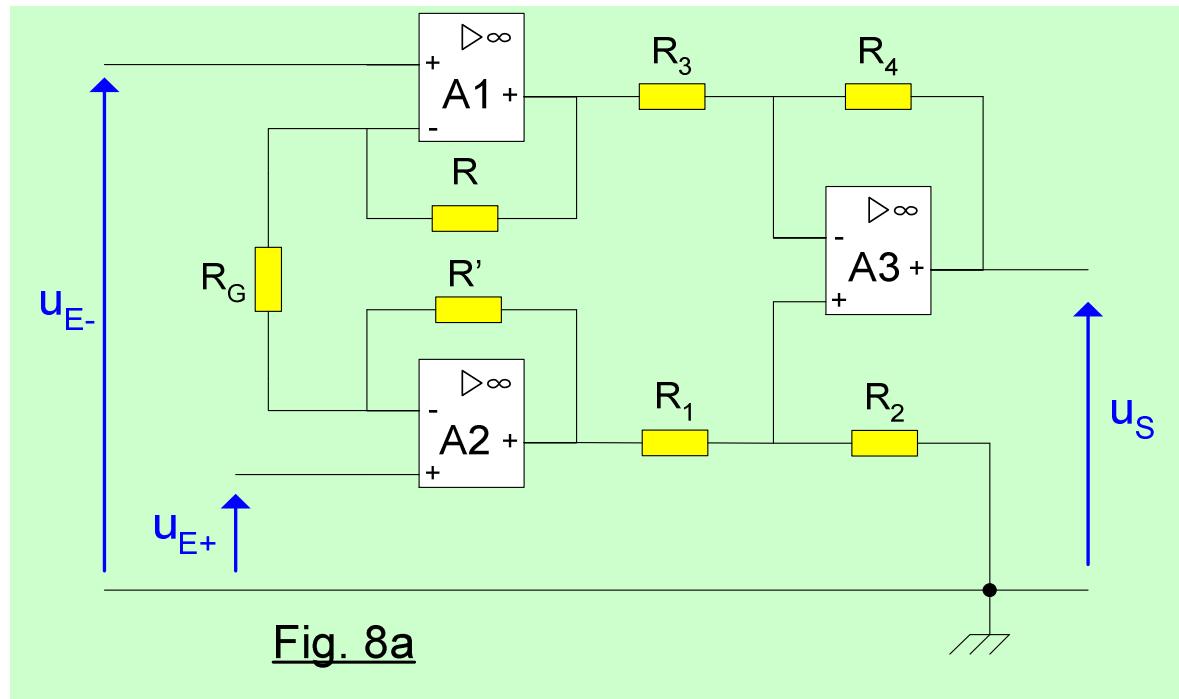


Fig. 7c

2-2- Structure à trois amplificateurs opérationnels



Si $R = R'$, $R_2 = R_4$ et $R_1 = R_3$ alors :

$$A_D = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R}{R_G} \right)$$

Le CMRR augmente avec l'amplification A_D .

- Justification

- 1) Etage d'entrée

Théorème de superposition

- $u_{E^-} = 0 \text{ V}$

On reconnaît un amplificateur non inverseur (A2) et un amplificateur inverseur (A1) :

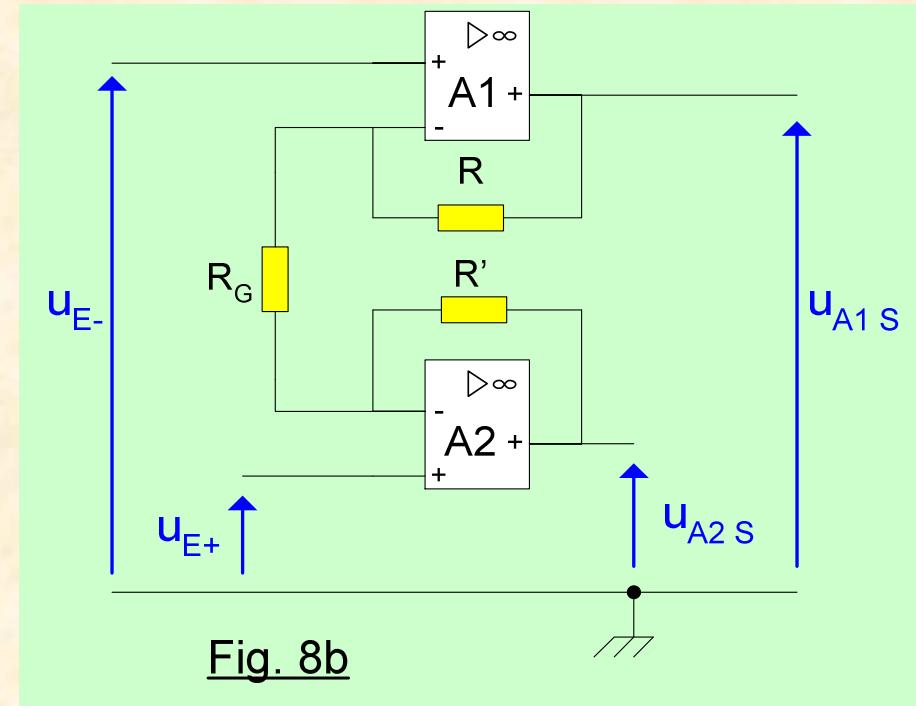
$$u_{A2S} = \left(1 + \frac{R'}{R_G} \right) u_{E+}$$

$$u_{A1S} = -\frac{R}{R_G} u_{E+}$$

- $u_{E+} = 0 \text{ V}$. On reconnaît un amplificateur non inverseur (A1) et un amplificateur inverseur (A2) :

$$u_{A1S} = \left(1 + \frac{R}{R_G} \right) u_{E-}$$

$$u_{A2S} = -\frac{R'}{R_G} u_{E-}$$



$$u_{A1S} = -\frac{R}{R_G} u_{E+} + \left(1 + \frac{R}{R_G}\right) u_{E-} = u_{E-} - \frac{R}{R_G} (u_{E+} - u_{E-})$$

$$u_{A2S} = -\frac{R'}{R_G} u_{E-} + \left(1 + \frac{R'}{R_G}\right) u_{E+} = u_{E+} + \frac{R'}{R_G} (u_{E+} - u_{E-})$$

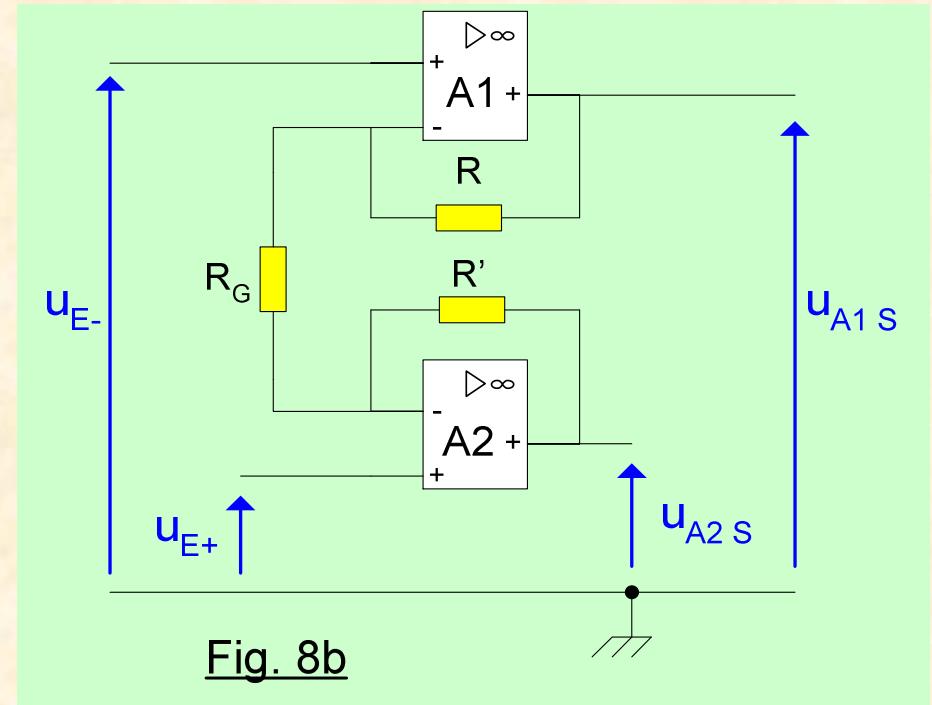
$$u_{A2S} - u_{A1S} = \left(1 + \frac{R'}{R_G} + \frac{R}{R_G}\right) (u_{E+} - u_{E-})$$

- Autre méthode
- A.O. en régime linéaire.
- Théorème de Millman :

$$u_{E^-} = \frac{\frac{u_{A1S}}{R} + \frac{u_{E^+}}{R_G}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_G}} = \frac{R_G u_{A1S} + R u_{E^+}}{R_G + R}$$

$$u_{E^+} = \frac{\frac{u_{A2S}}{R'} + \frac{u_{E^-}}{R_G}}{\frac{1}{R'} + \frac{1}{R_G}} = \frac{R_G u_{A2S} + R' u_{E^-}}{R_G + R'}$$

$$\Rightarrow u_{A2S} - u_{A1S} = \left(1 + \frac{R'}{R_G} + \frac{R}{R_G} \right) (u_{E^+} - u_{E^-})$$



- Le CMRR ne dépend pas de R et R' .

$$\text{Si } R = R' : \quad u_{A2S} - u_{A1S} = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right)(u_{E+} - u_{E-})$$

2) Etage de sortie

Il s'agit d'un amplificateur de différence.

$$\text{Si } R_2 = R_4 \text{ et } R_1 = R_3 \text{ alors : } \quad u_S = \frac{R_4}{R_3} (u_{A2S} - u_{A1S})$$

$$A_D = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right)$$

- Exemple : INA114

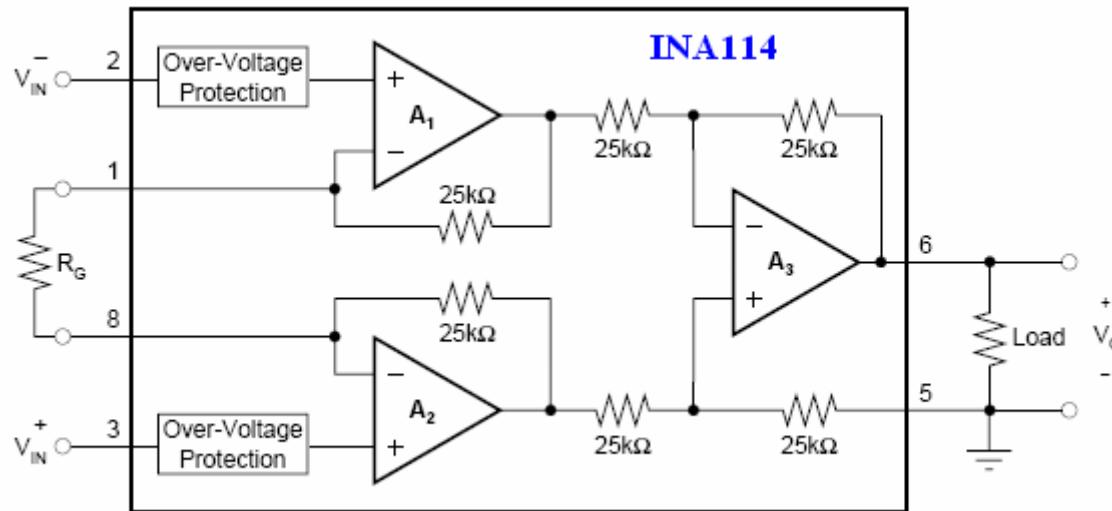


Fig. 9

$$R = R_3 = R_4 = 25 \text{ k}\Omega$$

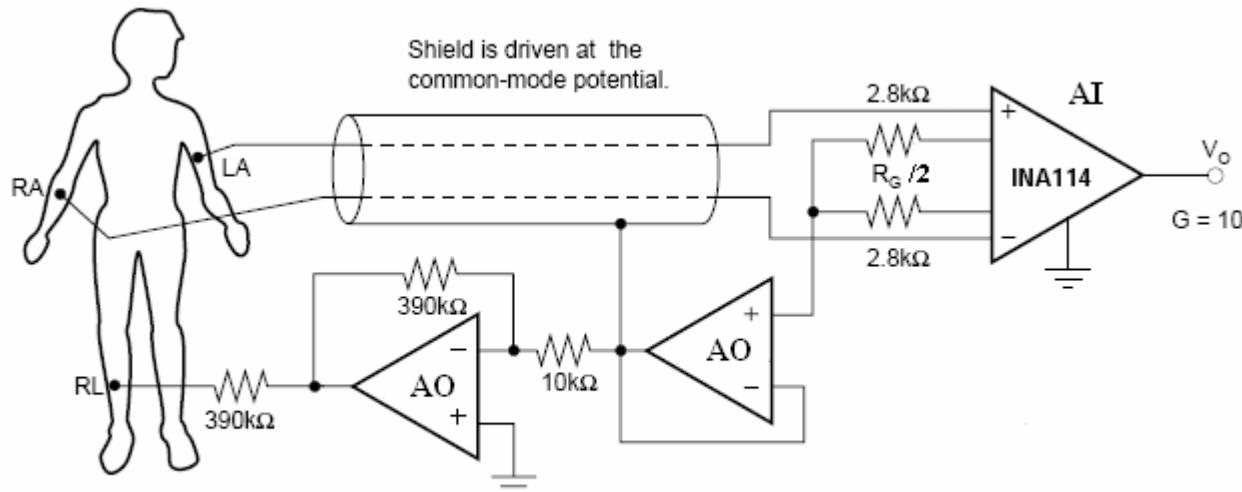
$$A_D = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

A.N. Que vaut l'amplification si on ne connecte pas de résistance R_G ?

$$R_G = \infty \quad A_D = 1$$

- Application : ECG (électrocardiographe)

On cherche à visualiser l'activité électrique du cœur (mV).
Un A.I. est nécessaire pour extraire efficacement ce signal :

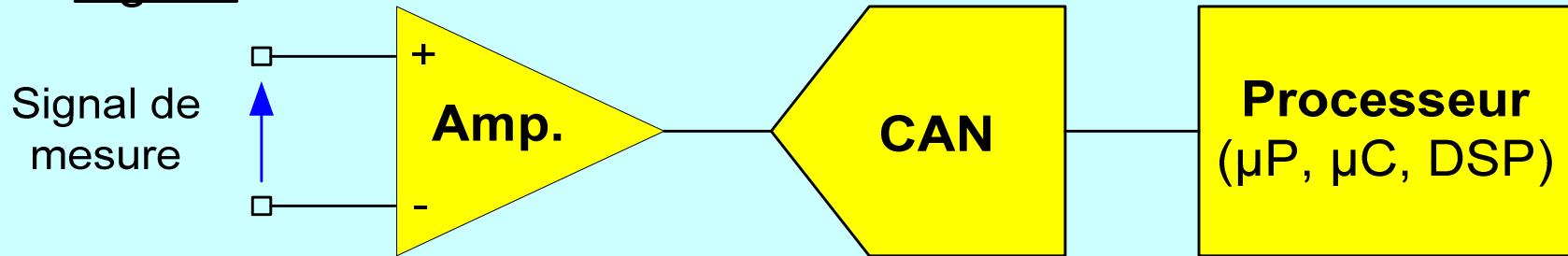


ECG Amplifier With Right-Leg Drive.

Fig. 10

3- Rôle dans la chaîne de mesure

Fig. 11



Le *signal de mesure* est un signal électrique.

Si ce n'est pas le cas, un *capteur* convertit la grandeur physique à mesurer en une grandeur électrique.

Exemple de capteurs : microphone, thermocouple, jauge d'extensométrie, photodiode ...

L'A.I. ou l'A.D. est intercalé entre le signal de mesure et le CAN (convertisseur analogique → numérique).

Bibliographie

www.analog.com

(Analog devices)

www.ti.com

(Texas Instruments)

www.burr-brown.com

(Burr-Brown)