

Amplificateur Opérationnel

V.1. Définitions:

Un amplificateur opérationnel (AOP) est un circuit intégré dont la fonction de base est l'amplification. Il est en outre "opérationnel" en ce sens qu'il permet de réaliser des fonctions de type "arithmétique" (inversion, addition, soustraction...). C'est un système amplificateur différentiel. Amplificateur et différentiel car il simplifie la différence des tensions appliquées sur ses deux entrées, souvent notées e^+ (entrée dite "non inverseuse") et e^- (entrée dite "inverseuse"). Le facteur d'amplification est appelé le gain.

L'amplificateur opérationnel est un composant électronique qui résulte de l'intégration de plusieurs étages amplificateur dans un même boîtier. Il comporte généralement deux entrées, appelées respectivement entrée inverseuse (-) et non inverseuse (+), et une seule sortie. L'amplificateur opérationnel permet d'amplifier la différence de potentiel entre les deux entrées.

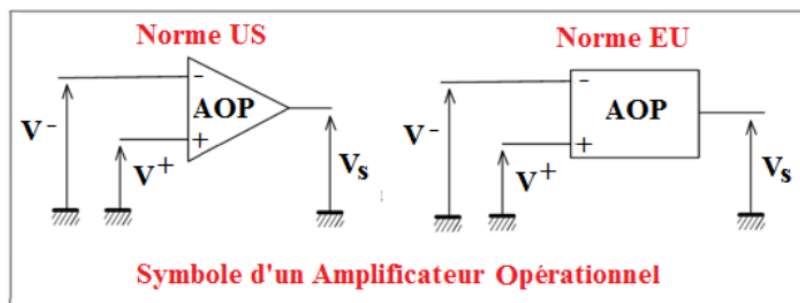


Figure. V.1. Structure, symbole d'un Amplificateur opérationnel [4,8]

Du point de vue fonctionnel, la tension est proportionnelle à la différence de potentiel qui existe entre les deux bornes d'entrée, ce qui s'exprime par l'équation suivante :

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

Avec A_d : amplification différentielle.

Notebook :

- Si l'une des entrées sert de référence de potentiel, la sortie est en phase.
- Le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel impose une **alimentation symétrique** deux sources de tension $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$, qu'on ne représente pas sur les schémas).
- On appelle tension différentielle (qu'on note e), la ddp entre l'entrée V^+ et V^-
 $e = V^+ - V^-$

V.2. Principe et mode de fonctionnement d'un Amplificateur opérationnel :

L'amplificateur opérationnel (Amplificateur idéal) est constitué de trois étages:

- 1^{er} étage a une structure différentielle chargé d'amplifier une différence de potentiel entre deux entrées (V^+ et V^-), c'est-à-dire qu'il délivre en sortie une grandeur proportionnelle à la différence des potentiels.
- 2^{ème} étage amplifie et adapte en impédance la grandeur fournie par le premier étage et impose une tension V_s nulle lorsque l'écart ($V^+ - V^-$) est nul.
- 3^{ème} étage de sortie permet de fournir V_s avec une impédance de sortie faible.

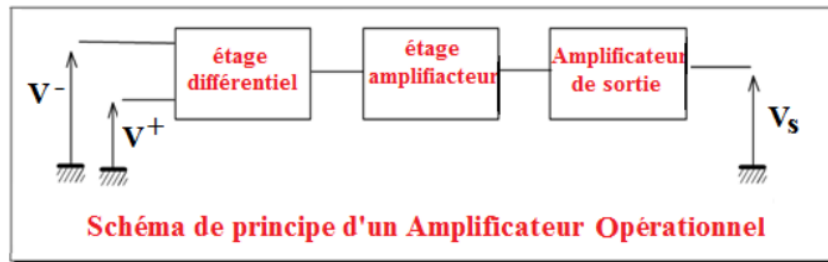


Figure. V.2. Schéma et constituants d'un Amplificateur opérationnel [4,8]

L'AOP a deux modes de fonctionnement :

- a. **Mode ou régime linéaire** : on a forcément une contre-réaction négative (liaison par composant ou un simple fil entre la sortie S et l'entrée V^- de l'AOP), dans ce cas la tension e sera négligée.

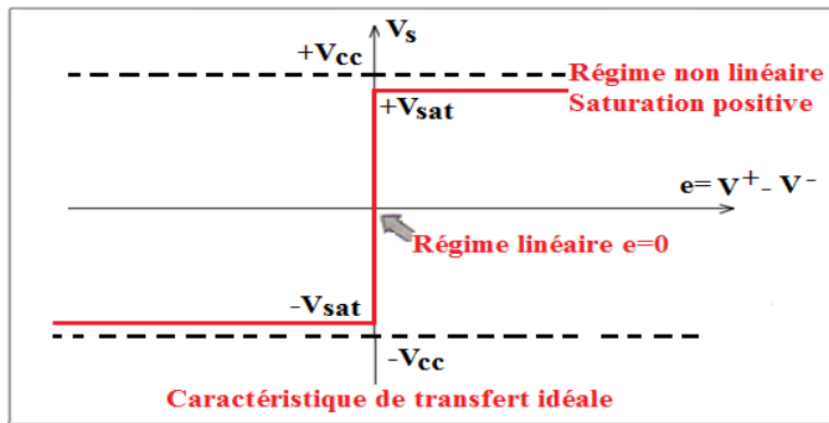


Figure. V.3.1. Caractéristique de transfert d'un Amplificateur opérationnel [4,8]

- b. **Mode ou régime non linéaire** : il y a pas de contre réaction négative, dans ce cas l'AOP fonctionne en saturation. La sortie ne peut prendre que deux valeurs : $+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$, la tension e ne peut être négligée.

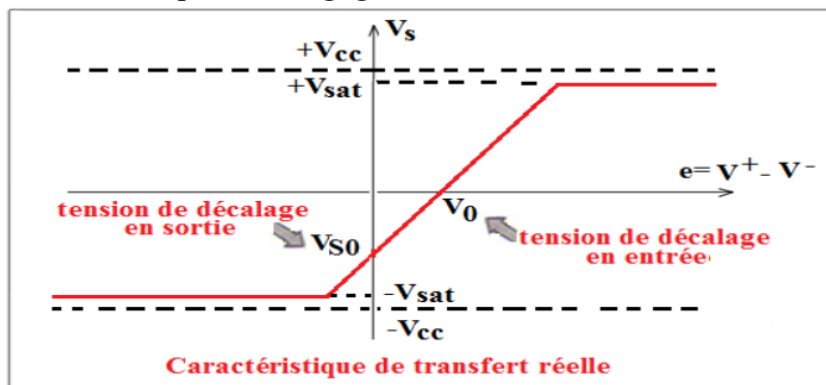


Figure. V.3.2. Caractéristique de transfert d'un Amplificateur opérationnel [4,8]

Les imperfections de l'AOP :

- a) Tension de décalage (tension d'offset) : Quand la tension différentielle est nulle tension de sortie ne l'est pas, ce qui fait que l'AOP présente une tension de décalage sortie en absence de tout signal à l'entrée.
- b) **Le slew rate (SR):**

La pente en valeur absolue de dV_s/dt , qui informe sur la vitesse d'évolution de tension du signal de sortie V_s de l'AOP, est limitée par une valeur maximale: ce sle rate caractérise la rapidité de réponse de l'AOP et s'exprime en $V/\mu s$ (pour l'AO TL081 $SR = 13 V/\mu s$).

Donc pour augmenter la rapidité de réponse de l'AOP, il faut réduire l'amplitude des tensions d'entrées.

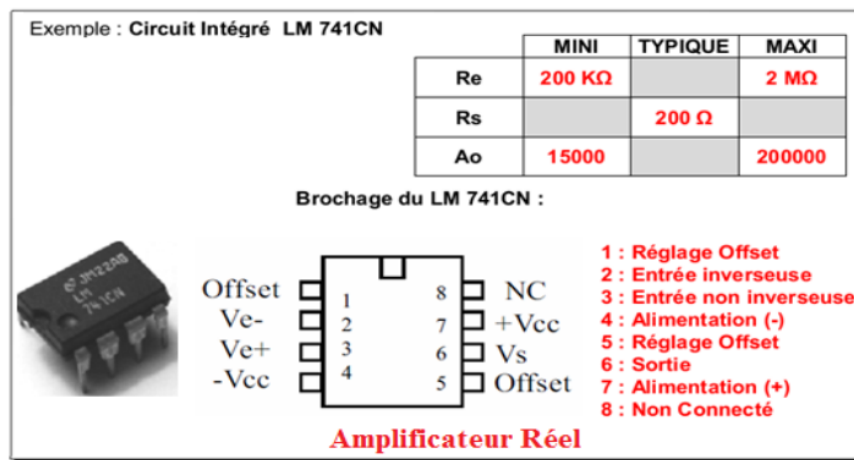


Figure. V.3.3. Référence, boîtier d'un Amplificateur opérationnel réel [4,8]

V.3. Caractéristiques d'un Amplificateur opérationnel :

- V^- : tension entre l'entrée inverseuse et le potentiel de référence ;
- V^+ : tension entre l'entrée positive et le potentiel de référence ;
- ϵ ou e : Tension d'entrée différentielle ($V^+ - V^-$) : $e = (V^+ - V^-)$.

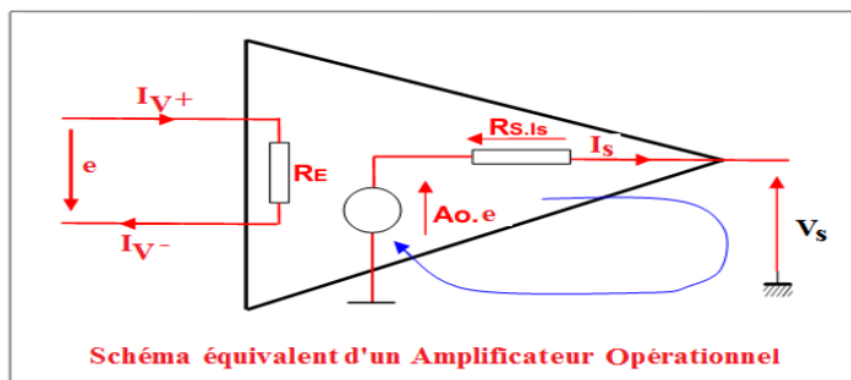


Figure. V.4. Schéma équivalent d'un Amplificateur opérationnel réel [4,8]

On a :

$$A_o \cdot e - R_s I_s - V_s = 0 \Rightarrow V_s = A_o e - R_s I_s \quad (V-1)$$

Les caractéristiques d'un AOP dit idéal sont :

- R_E : résistance d'entrée de l'AOP $\approx \infty$, donc $I_{V^+} = I_{V^-} \approx 0$;

Donc on admet :

$$e = R_E I_e \approx 0 \quad (V-2)$$

Son impédance d'entrée est très élevée de ($1M\Omega$) :

$$\Rightarrow Z_{in} = R_E = \frac{(V^+ - V^-)}{I^+} \quad (V-3)$$

R_S : résistance de sortie de l'AOP ≈ 0 , donc

$$R_s I_s \approx 0 \quad (V-4)$$

- Son impédance de sortie R_S (Z_{out}) est très faible (au maximum quelques $K\Omega$)

Donc on admet :

$$V_s = A_o \cdot e \Rightarrow A_o = \frac{V_s}{e} = \frac{V_s}{(V^+ - V^-)} \quad (V-5)$$

Où A_o : gain en boucle ouverte de l'AOP, on l'admet $\approx \infty$

Donc on conclut :

- Gain en tension différentiel infini : $A_o = \infty$
- Impédance d'entrée infinie $Z_E = \infty$;
- Impédance de sortie nulle $Z_S = 0$;
- Une bande Passante infinie $BP = \infty$;
- Branchement des alimentations doit prendre des valeurs positives et négatives donc L'AO doit être alimenté par des tensions positives et négatives.

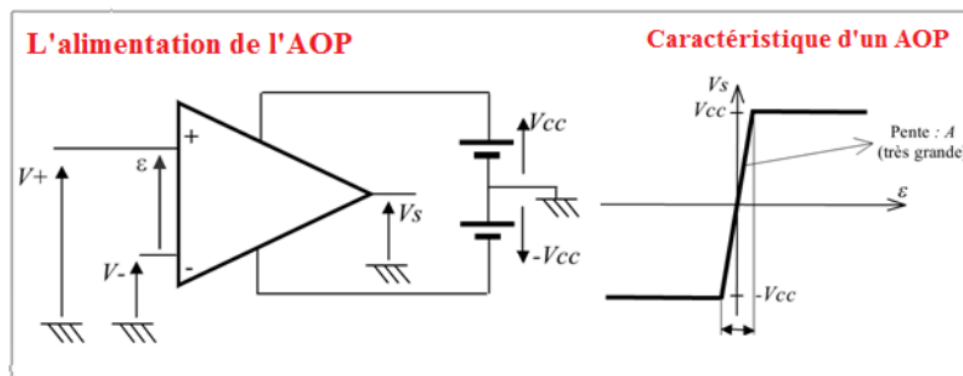


Figure. V.5.1. Bornes, caractéristique d'un Amplificateur opérationnel réel [4,8]

Tableau.V.1. Comparaison entre AOP idéal et AOP réel [4,8]

Constituant d'un AOP	AO Réel	AOP Idéal
Amplification en boucle ouverte	$A_0 = 20 \cdot 10^4$ à $20 \cdot 10^6$	Infini
Impédance d'entrée	$Z_{in} = 1M\Omega$ à $20 M\Omega$	infinie
Impédance de sortie	$Z_{out} = 10\Omega$	0Ω
Slew rate	$0.5V/\mu S$ à $100V/\mu S$	infini

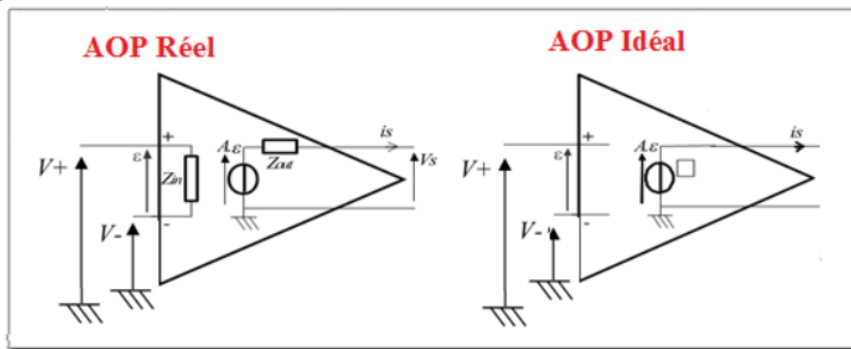


Figure. V.5.2. Schéma équivalent d'un AOP idéal et AOP réel [4,8]

Idéalement, on considère que :

- * **Gain en tension (A) infini** $V_S = A \cdot (V^+ - V^-)$.
- * **Impédance d'entrée infinie**, ce qui entraîne que les courants d'entrée sont nuls
- * **Impédance de sortie nulle**, ce qui conduit à considérer la sortie comme une source de tension indépendante du courant i_S .

IV.4. Principe de la contre-réaction :

On vient de le voir, le gain de l'AOP diminue quand la fréquence augmente. Si on désire augmenter la bande passante, il faut donc (hélas) réduire le gain. C'est dommage.

On y parvient grâce à la technique de la contre-réaction, qui consiste à réinjecter une fraction de la tension de sortie V_{out} sur l'entrée inverseuse e^- , comme le montre la figure ci-dessous. On a alors un retour du signal en opposition de phase par rapport au signal d'entrée. Le signal de sortie viendra se soustraire au signal d'entrée de manière à faire travailler l'amplificateur dans sa partie linéaire. En faisant varier le ratio de la tension réinjectée par rapport à la tension de sortie, on peut aisément contrôler le gain de l'AOP. Lorsqu'on utilise un AOP avec une contre-réaction, on dit qu'il fonctionne en boucle fermée.

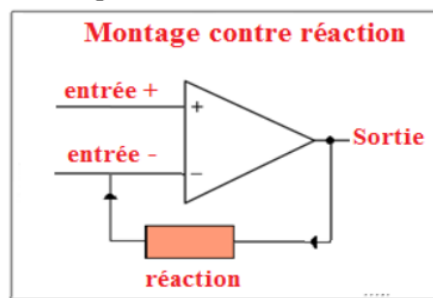


Figure. V.6. Montage illustrant la contre réaction [8]

V.5. Montages de base de l'amplificateur opérationnel en régime linéaire :

En régime linéaire (il y a présence d'une contre-réaction négative).

Amplificateur opérationnel (idéal) : on supposera que :

$$i^+ = i^- = 0 \text{ et } e = 0 \Rightarrow V^+ = V^- \quad (\text{V-6})$$

V.5.1. Montage suiveur :

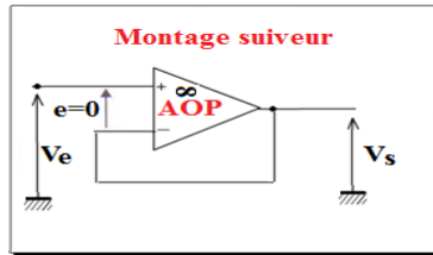


Figure. V.7.1. Montage suiveur [4,8]

La tension différentielle $e = 0$ en appliquant la loi des mailles on peut écrire :

$$V_e - e - V_s = 0 \Rightarrow V_s = V_e - e \Rightarrow V_e = V_s \quad (V-7)$$

L'intérêt de ce montage réside dans sa résistance d'entrée infinie et sa résistance de sortie nulle, on l'utilise souvent pour adapter deux étages.

V.5.2. Montage non inverseur :

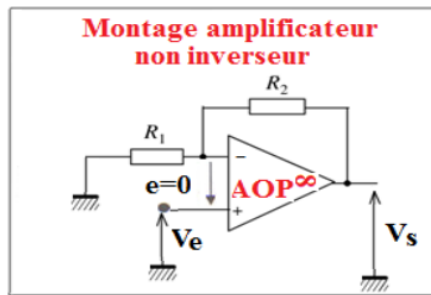


Figure. V.7.2. Montage amplificateur non inverseur [4,8]

On a bien une contre réaction négative AOP idéal : $\implies e = 0 \implies$

$$V_e = V^+ = V^- = V_{R1} \quad (V-8)$$

En appliquant le principe de diviseur de tension on a :

$$V_e = V_{R1} = V_s \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_s = V_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (V-9)$$

Remarques :

$$\triangleright \text{Si } \frac{R_2}{R_1} \gg 1 \Rightarrow A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{et} \quad V_s = V_e \frac{R_2}{R_1} \quad (V-10)$$

$$\triangleright \text{Si } R_2 = R_1 \Rightarrow A_v = 1 \quad \text{donc} \quad V_s = V_e \quad (V-11)$$

C'est un montage suiveur de tension : son rôle est d'adapter les impédances.

V.5.3. Montage inverseur :

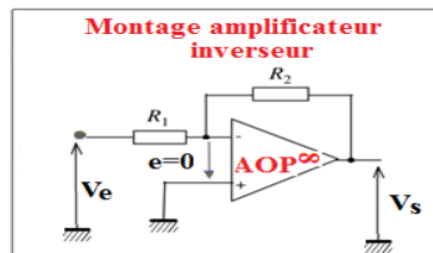


Figure. V.7.3. Montage amplificateur inverseur [4,8]

On a bien une contre réaction négative (**AOP idéal**) $\implies e = 0$ En appliquant le théorème de Millman on a :

$$V^- = \frac{\left(\frac{V_e + V_s}{R_1 + R_2}\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \Rightarrow V_s = -V_e \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (\text{V-12})$$

Ou bien : $V_e = R_1 I$ car le potentiel $V^- = e + V^+$ avec $e = 0$ et $V^+ = 0 \Rightarrow V^- = 0V$

De même on $V_s = -R_2 I$ car le potentiel $i^- = 0 \Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$

$$\Rightarrow V_s = -V_e \left(\frac{R_2}{R_1}\right) = A_v(-V_e) \quad (\text{V-13})$$

Donc on conclut que le signal de sortie est donc au gain près l'inverse du signal d'entrée.

V.5.4. Montage amplificateur soustracteur :

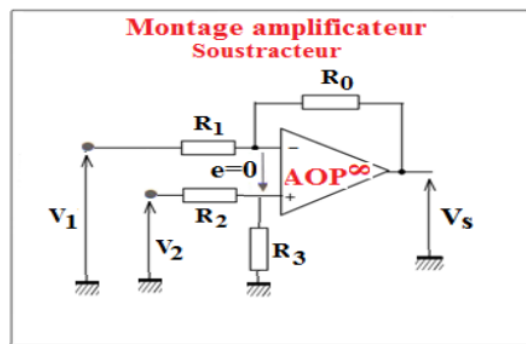


Figure. V.7.4. Montage amplificateur soustracteur [4,8]

On a bien une contre réaction négative (AOP idéal) $\implies e = 0$

le potentiel $V^- = e + V^+$ avec $e = 0$ donc $V^+ = V^- = V_{R3} = \frac{V_2 R_3}{(R_2 + R_3)}$

en appliquant le principe de diviseur de tension on a :

$$\Rightarrow V_{R3} = \frac{V_2 R_3}{(R_2 + R_3)} \quad (\text{V-14})$$

$$V^- = \frac{\frac{V_1 + V_s}{R_1 + R_0}}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_0}\right)} = V_2 \frac{R_3}{(R_2 + R_3)} \quad (\text{V-15})$$

Si $R_1 = R_2$ et $R_0 = R_3$ on a :

$$\Rightarrow V_s = (V_2 - V_1) \left(\frac{R_0}{R_1}\right) \quad (\text{V-16})$$

V.5.5. Montage sommateur inverseur :

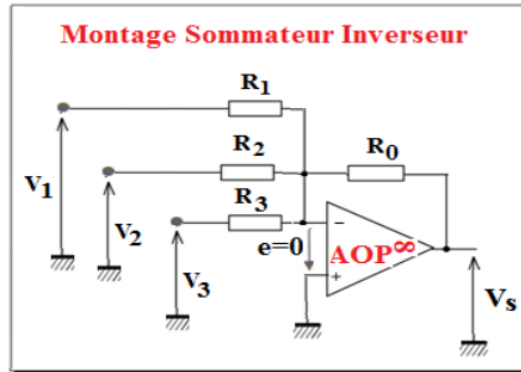


Figure. V.7.5. Montage amplificateur sommateur inverseur [4,8]

On a bien une contre réaction négative (AOP idéal) $\implies e = 0$
 le potentiel $V^- = e + V^+$ avec $e = 0$ donc $V^+ = V^- = 0$

$$V^- = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_s}{R_0}}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_0}\right)} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_s = -R_0 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \quad (\text{V-17})$$

Et si on prend $R_0 = R_1 = R_2 = R_3$ on a :

$$\Rightarrow V_s = -(V_1 + V_2 + V_3) \quad (\text{V-18})$$

On peut éliminer le signe - en ajoutant un étage inverseur à la sortie de l'amplificateur sommateur.

V.6. Autres montages :

On a deux autres montages de base : le montage intégrateur et dérivateur, ces circuits agissent sur le spectre des signaux, Car leur réponse ne sera pas la même selon la fréquence des signaux.

V.6.1. Montage intégrateur

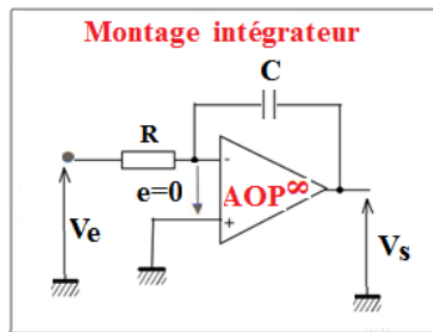


Figure. V.8.1. Montage amplificateur integrateur [4,8]

On a bien une contre réaction négative (AOP idéal) $\implies e = 0$

le potentiel $V^- = e + V^+$ avec $e = 0$ et $V^+ = 0 \Rightarrow V^- = 0V$

De même on a : $i^+ = i^- = 0A$

Ce qui fait que la résistance et le condensateur C sont parcourus par le même courant i.

En régime variable : on a $V_e(t) = R * i(t)$ et $i(t) = -C \frac{dV_s}{dt} \Rightarrow V_e(t) = -RC \frac{dV_s}{dt}$

$$\Rightarrow \frac{dV_s}{dt} = -\frac{1}{RC} V_e(t)$$

On constate que le condensateur est alimenté par le courant i indépendant de C , le circuit réalise une intégration parfaite.

$$\Rightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e(t) dt = -\frac{1}{RC} \int V_e(t) dt + V_s(0)$$

En régime sinusoïdal: On utilise la notation complexe, on a :

$$\underline{V_s} = -\underline{V_e} \frac{Z_c}{R} = -\underline{V_e} \frac{1}{jRC\omega} \text{ avec } Z_c = \frac{1}{jC\omega}$$

Finalement on a :

$$\underline{V_s} = -\underline{V_e} \frac{1}{jRC\omega} \quad (V-19)$$

Exemple 1: Soit une tension carrée d'amplitude 2V et de fréquence $f=1$ kHz, avec $R = 10$ k Ω et $C = 10$ nF, on prend $V_s(0) = -5V$.

$f = 1$ kHz donc la période du signal est $T = 1/f = 1/1000 = 1$ ms. $\Rightarrow R.C=10^{-4}$ s

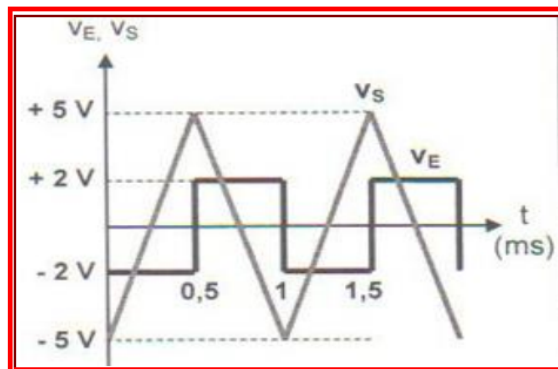


Figure. V.8.2. Signaux d'entrée et de sortie [4,8]

Pour $0 < t < 0.5$ ms on a :

$$V_e(t) = -2V \Rightarrow V_s(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_e(t) dt + V_s(0)$$

$$\Rightarrow V_s(t) = -\frac{1}{10^{-4}} \int_0^t -2 dt + (-5) = 20000t - 5 \Rightarrow V_s(t) = 20000t - 5$$

Pour 0.5 ms $< t < 1$ ms on a :

$$V_e(t) = +2V \Rightarrow V_s(t) = -\frac{1}{10^{-4}} \int_0^t -2 dt = -20000t + K$$

A $t = 0,5$ ms :

$$V_s(t) = +5V \Rightarrow V_s(0.0005) = -20000 * 0.0005 + K = -10 + K$$

Lorsque $0 < t < 0.5$ ms ceci par continuité de $V_s(t)$ au point $t = 0,0005$ S.

Pour $0 < t < 0.5\text{ms}$ on a : $V_s(0.0005) = -20000 * 0.0005 - 5 = 10 - 5 = 5V \Rightarrow K = 15V$

Finalement on a : $V_s(t) = -20000t + 15$

V.6.2. Montage dérivateur

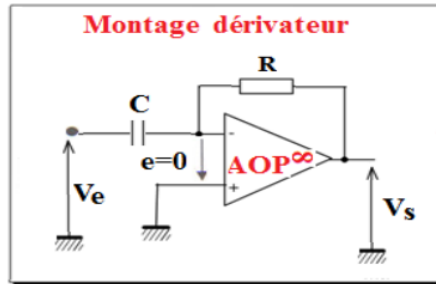
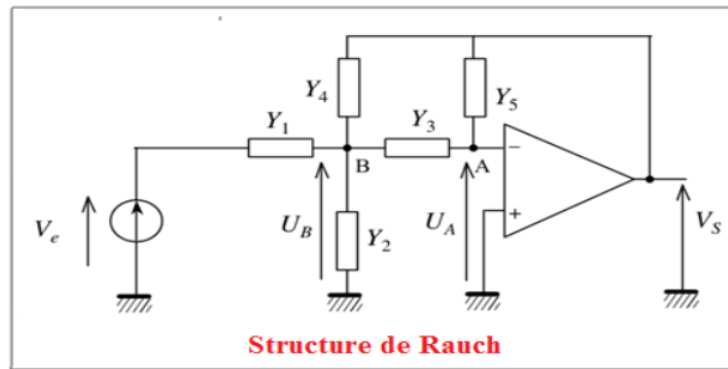


Figure. V.8.3. Montage amplificateur dérivateur [4,8]

Nous procédons de la même façon que le montage intégrateur on aura :

$$V_s = -RC \frac{dV_e}{dt} \quad (\text{V-20})$$

Exemple d'application1: circuit à réactions multiples (**structure de Rauch**) :



En appliquant le théorème de Millman au nœud B, on aura :

$$V_B = \frac{V_e Y_1 + V_s Y_4 + V_A Y_3 + 0 * Y_2}{(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)} \quad \text{equ. 1.}$$

$$\text{On a : } V_A = 0 = \frac{V_s Y_5 + V_B Y_3}{(Y_2 + Y_5)} \Rightarrow V_B = -\frac{V_s Y_5}{(Y_3)} \quad \text{equ. 2.}$$

$$\text{equ. 2. dans equ. 1} \Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = \frac{Y_1 Y_3}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$

Exemple d'application2 :

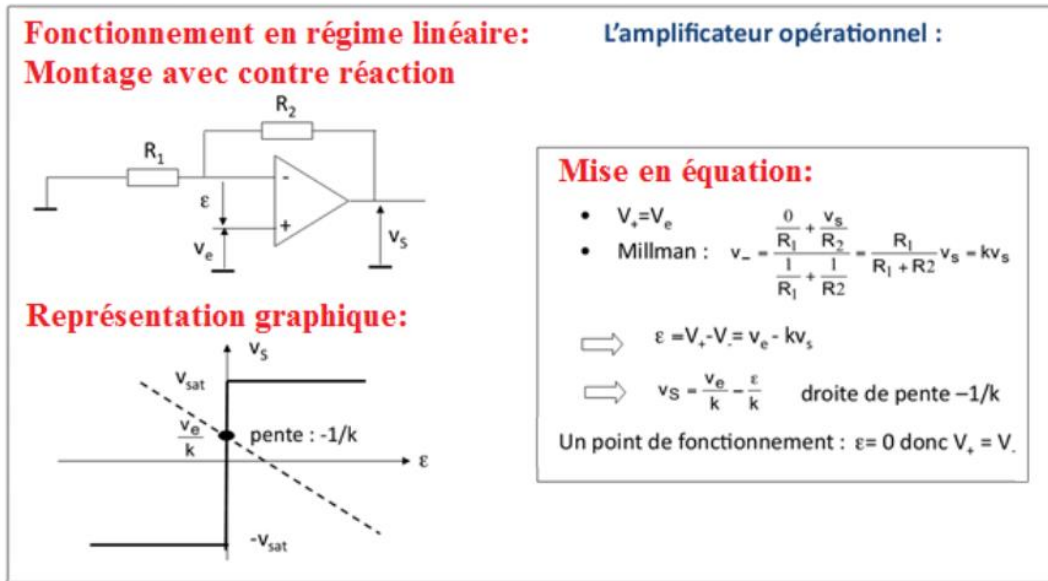


Figure. V.9.1. Mode de fonctionnement en régime linéaire d'un AOP [4,8]

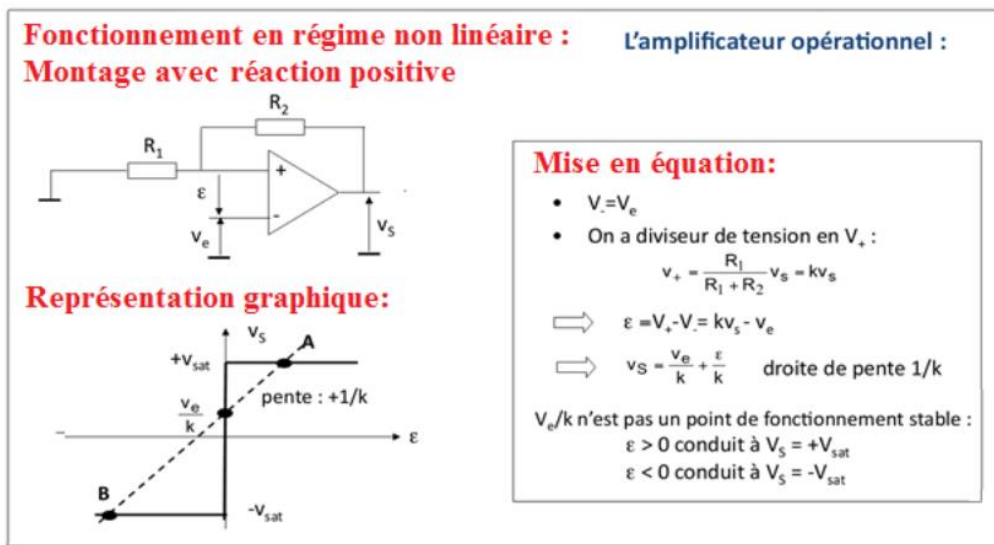
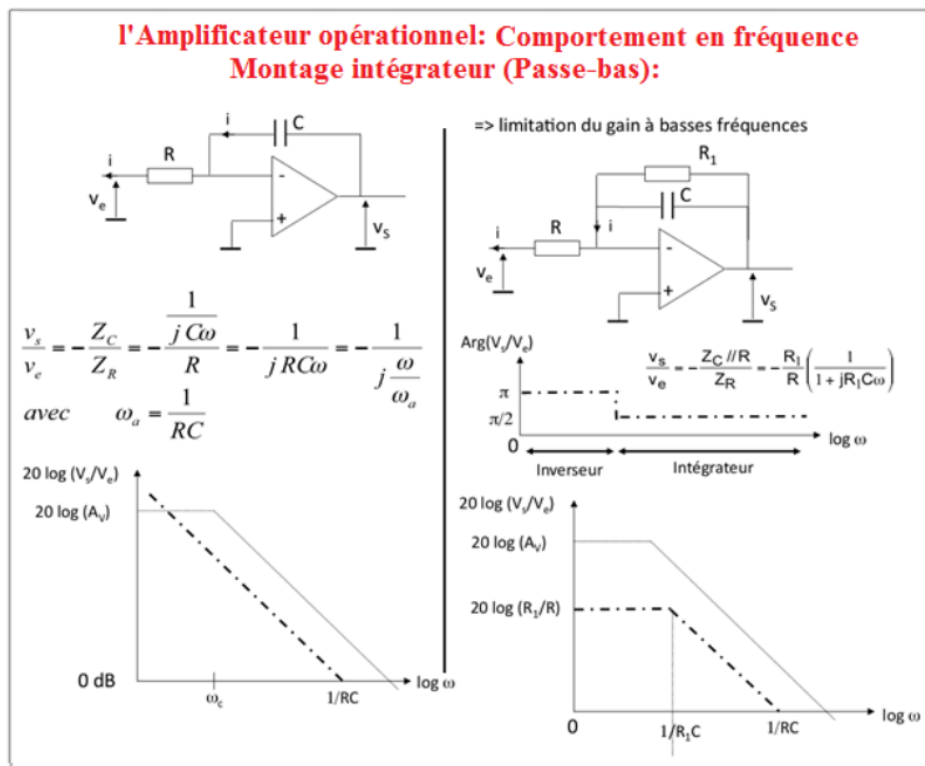


Figure. V.9.2. Mode de fonctionnement en régime non linéaire d'un AOP [4,8]



Figure. V.9.3. Mode de fonctionnement en régime linéaire d'un AOP (inverseur et non inverseur) [4,8]



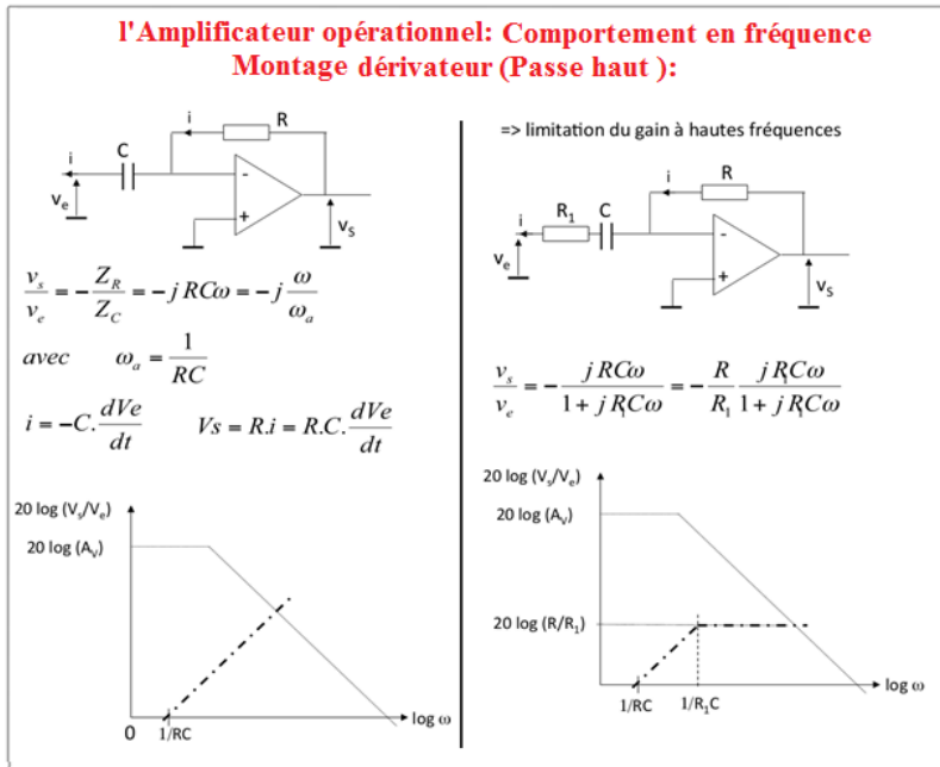


Figure. V.9.5. Comportement en fréquence d'un AOP dérivateur [4,8]

V.7. Etude des caractéristiques d'un AOP :

V.7.1. Gain de mode commun :

Soient V_1 et V_2 deux générateurs de tension, appliqués en l'entrée de l'amplificateur opérationnel.

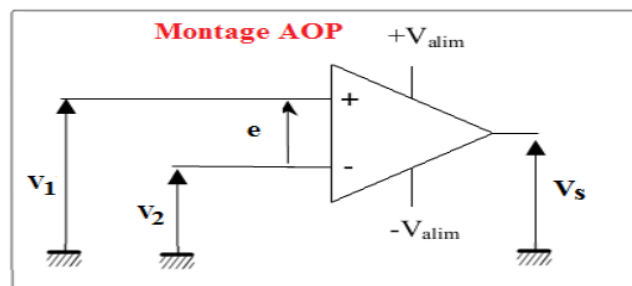


Figure. V.10. Structure d'un AOP [4,8]

On définit e , tension différentielle d'entrée du système par la relation :

$$\text{le potentiel } e = V^+ - V^- = V_1 - V_2$$

On peut définir aussi V_{MC} , tension de mode commun du système par la relation :

$$V_{MC} = \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{V-21}$$

La tension de sortie V_S varie selon l'équation :

$$V_S = G \left(e + \frac{1}{\tau} V_{MC} \right) \tag{V-22}$$