

CHI : AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL EN REGIME LINEAIRE : MONTAGES DE BASE

1. Définitions

1-1 Amplificateur différentiel

Un amplificateur différentiel est un amplificateur à transistors à deux entrées e_1 et e_2 dont la tension de sortie v_s est proportionnelle à la différence entre les deux entrées.

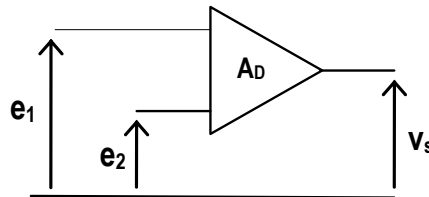


Fig. 1 Symbole

Remarque : En réalité

$$v_s = A_D(e_1 - e_2) + A_C\left(\frac{e_1 + e_2}{2}\right)$$

où A_D et A_C sont respectivement les gains différentiel et en mode commun et,

$\frac{e_1 + e_2}{2}$ la tension de mode commun.

Lorsque l'amplificateur est parfait, $A_C \approx 0$.

1-2 Amplificateur opérationnel

L'amplificateur opérationnel (AOP) ou amplificateur linéaire intégré (ALI) ou amplificateur différentiel intégré (ADI) est un amplificateur différentiel possédant des propriétés remarquables, le plus souvent utilisé dans la mise en œuvre des fonctions mathématiques.

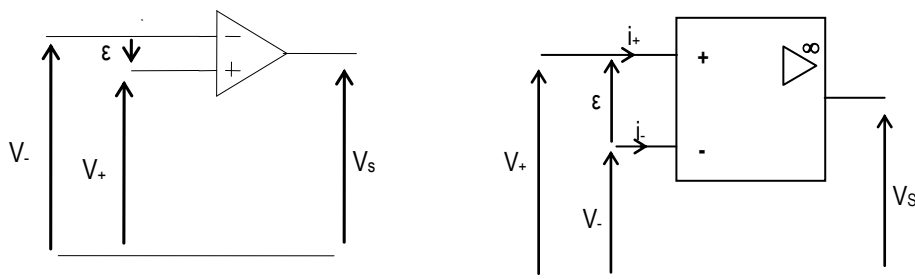


Fig. 2 Symboles

Remarque :

- L'entrée (-) est appelée entrée inverseuse et l'entrée (+), entrée non inverseuse.
 V_+ et V_- sont les potentiels aux entrées non inverseuse et inverseuse.
- $V_s = A_D(V_+ - V_-) + A_C\left(\frac{V_+ + V_-}{2}\right) + V_{s0}$

où $\varepsilon = V_+ - V_-$, est la tension différentielle d'entrée et, V_{S0} , la tension d'offset ou de décalage.

2. Régimes de fonctionnement

La caractéristique de transfert de l'AOP est la suivante :

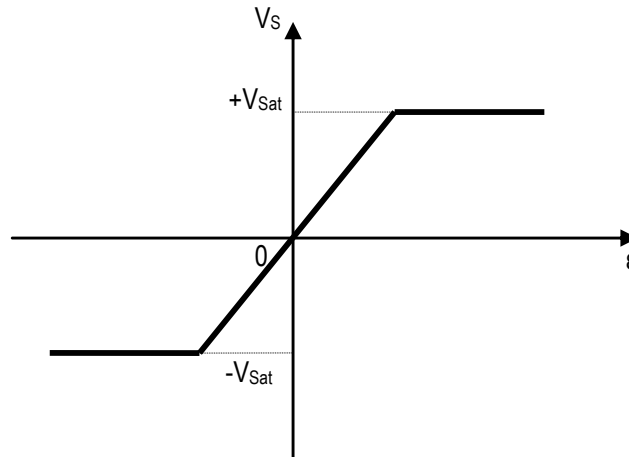


Fig. 3 Caractéristique de transfert de l'AOP réel

NB : $+V_{sat}$ et $-V_{sat}$ sont les tensions de saturation (valeurs limites de la tension de sortie V_s).

Elle présente essentiellement deux zones qui confèrent à l'AOP deux régimes de fonctionnement :

- le régime linéaire,
- et le régime non linéaire ou de saturation ou de commutation.

2-1 Régime linéaire

Ce type de fonctionnement est obtenu en effectuant une contre-réaction (réaction négative), la sortie étant reliée à l'entrée inverseuse. Dans ce cas :

- $\varepsilon = 0$ ($V_+ = V_-$),
- $-V_{sat} < V_s < V_{sat}$,
- on peut exprimer la tension de sortie en fonction des éléments extérieurs de l'AOP.

2-2 Régime non linéaire

L'AOP fonctionne en régime non linéaire lorsque :

- on effectue une réaction, la sortie étant reliée à l'entrée non inverseuse ou,
- il est en boucle ouverte.

Dans ce cas,

- $\varepsilon \neq 0$ ($V_+ \neq V_-$),
- $V_s = -V_{sat}$ ou $V_s = +V_{sat}$ respectivement pour $\varepsilon < 0$ et $\varepsilon > 0$.

3. Caractéristiques

On distingue différentes caractéristiques dont les amplifications différentielle et de mode commun, les impédances d'entrée (différentielle et de mode commun) et de sortie, des tensions et courants de décalage, la bande passante et le slew rate (vitesse maximale de variation de la tension de sortie).

Parmi celles-ci, on distingue :

- des défauts : l'offset, les courants de polarisation, le slew rate et,
- des limites : la tension de sortie, le courant de sortie, la bande passante.

L'AOP étant généralement supposé idéal, ses caractéristiques se résument essentiellement en :

- une impédance d'entrée différentielle infinie,
- une impédance de sortie nulle,
- une amplification différentielle infinie.

La caractéristique de transfert devient :

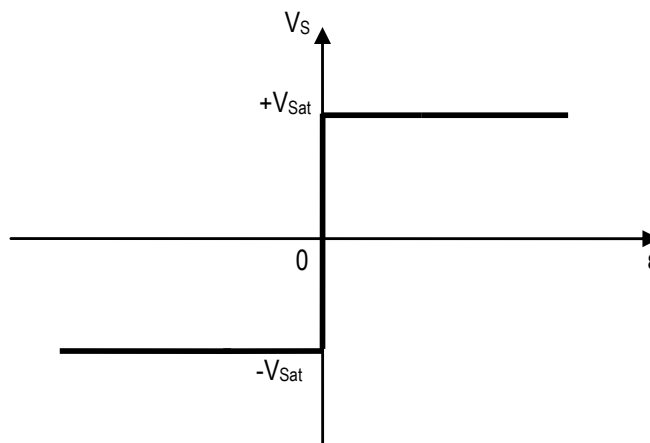


Fig. 4 Caractéristique de transfert de l'AOP idéal

4. Montages de base

4-1 Amplificateur inverseur

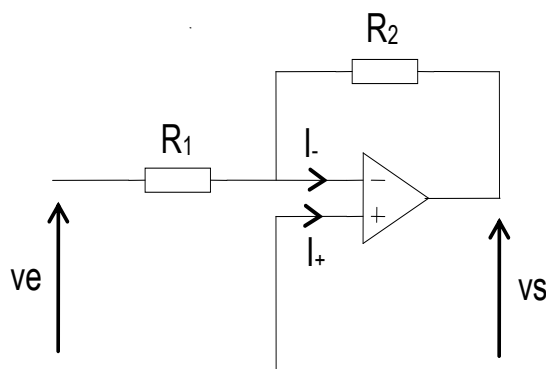


Fig. 5 Schéma de principe

L'AOP est supposé idéal, donc $I_+ = I_- = 0$.

Il fonctionne en régime linéaire, ainsi $V_+ = V_-$.

Aussi, ici $V_+ = 0$ car l'entrée non inverseuse est directement reliée à la masse.

Donc $V_+ = V_- = 0$ (Masse virtuelle en l'entrée inverseuse).

En appliquant le théorème de Millmann,

$$V_- = \frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Comme $V_- = 0$,

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e \quad \text{et} \quad A_V = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Remarque :

- L'amplification en tension A_V est du signe négatif. Donc, en régime sinusoïdal, V_e et V_s sont en opposition de phase. L'amplificateur est dit inverseur.
- Si $R_1 = R_2$, $A_V = -1$ et le montage est dit inverseur de signe.
- L'AOP ne sature pas si $-\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}} < V_e < \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$

4-2 Amplificateur non inverseur

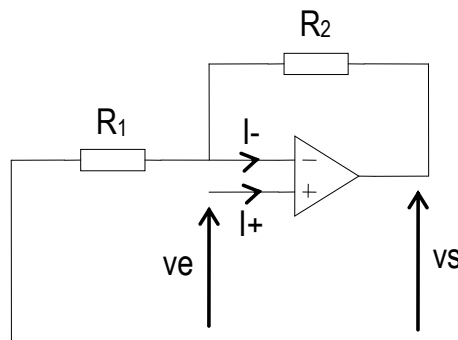


Fig.6 Schéma de principe

L'AOP est idéal donc $I_+ = I_- = 0$ et, en régime linéaire, ainsi $V_+ = V_-$.

On a

$$V_+ = V_e \quad \text{et} \quad V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$$

D'où

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e \quad \text{et} \quad A_V = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Remarque :

- L'amplification en tension A_V est du signe positif. Donc, en régime sinusoïdal, V_e et V_s sont en phase. L'amplificateur est dit non inverseur.
- L'AOP ne sature pas si $-\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}} < V_e < \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$

4-3 Sommateur

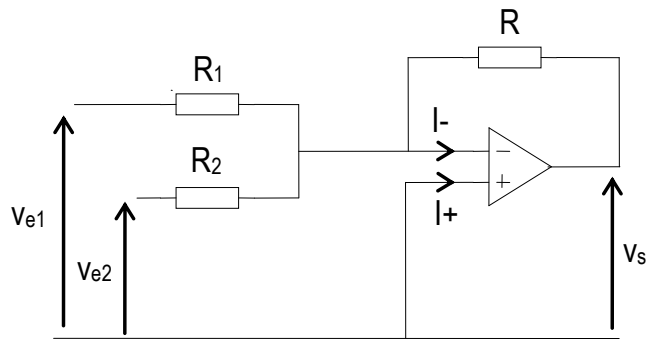


Fig. 7 Schéma de principe

L'AOP est idéal donc $I_+ = I_- = 0$.

Il est linéaire et l'entrée non inverseuse étant reliée à la masse, $V_+ = V_- = 0$ (Masse virtuelle en l'entrée inverseuse).

En appliquant le théorème de Millmann,

$$V_- = \frac{\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \frac{V_s}{R}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R}}$$

Comme $V_- = 0$,

$$V_s = -R \left(\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} \right)$$

Si $R_1 = R_2 = R'$,

$$V_s = -\frac{R}{R'} (V_{e1} + V_{e2})$$

Remarque : Ce montage fait la somme des tensions V_{e1} et V_{e2} et l'amplifie avec un coefficient d'amplification négatif. C'est un amplificateur sommateur inverseur.

4-4 Soustracteur

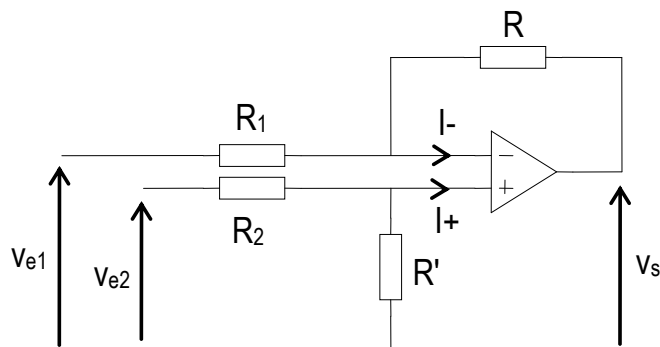


Fig. 8 Schéma de principe

L'AOP est idéal donc $I_+ = I_- = 0$.

Il est linéaire donc $V_+ = V_-$.

On a d'après le Pont diviseur de tension :

$$V_+ = \frac{R'}{R + R_2} V_{e2}$$

et d'après le Théorème de superposition :

$$V_- = \frac{R}{R + R_1} V_{e1} + \frac{R_1}{R_1 + R} V_s$$

Comme $V_- = V_+$,

$$V_s = \frac{R}{R_1} \left(\frac{1 + \frac{R_1}{R}}{1 + \frac{R_2}{R}} V_{e2} - V_{e1} \right)$$

Si on choisit $\frac{R_1}{R} = \frac{R_2}{R'}$ alors $V_s = \frac{R}{R_1} (V_{e2} - V_{e1})$

Remarque : Ce montage fait la différence des tensions V_{e2} et V_{e1} et l'amplifie. C'est un amplificateur soustracteur ou amplificateur de différence non inverseur.

4-5 Suiveur

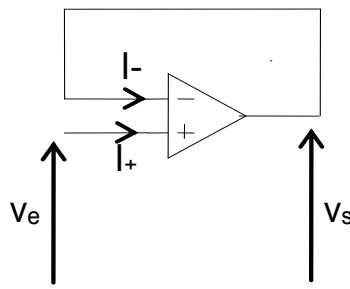


Fig. 9 Schéma de principe

L'AOP est idéal donc $I_+ = I_- = 0$.

Il est linéaire donc $V_+ = V_-$.

On a $V_+ = V_e$ et $V_- = V_s$ d'où $V_s = V_e$.

Remarque :

- La tension de sortie V_s suit les variations de la tension d'entrée V_e , d'où le nom de montage suiveur.
- Ce montage est utilisé en adaptateur d'impédance ($Z_e = \infty$).

4-6 Intégrateur

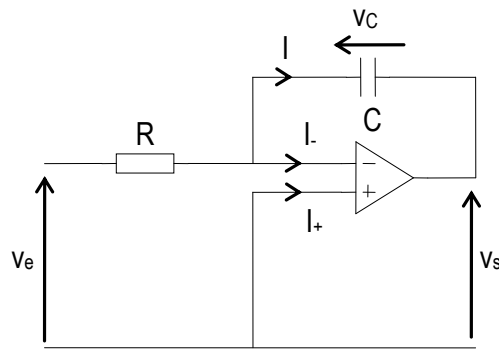


Fig. 10 Schéma de principe

L'AOP est idéal donc $I_+ = I_- = 0$.

Il est linéaire donc $V_+ = V_-$ ($\varepsilon = 0$) et ici $V_+ = V_- = 0$.

En appliquant la loi des mailles :

- en entrée : $V_e = RI$

- en sortie : $V_s = -V_C$

$$\text{Aussi } I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV_C}{dt} = -C \frac{dV_s}{dt} \quad \text{alors} \quad V_e = -RC \frac{dV_s}{dt}$$

D'où

$$V_s = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_e(\tau) d\tau$$

Remarque :

- La tension V_s est une primitive de la tension V_e avec une constante d'intégration négative : le montage est un intégrateur inverseur.
- Aux fréquences basses, le condensateur se comporte comme un circuit ouvert. Il n'y a plus de contre-réaction et l'AOP fonctionne en saturation. Pour corriger cela, on branche en parallèle sur le condensateur C une résistance R' : on obtient un pseudo-intégrateur.

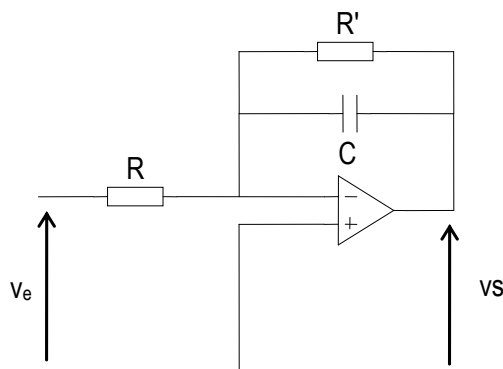
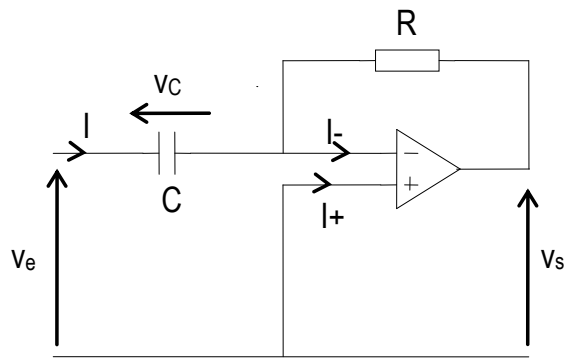


Fig. 11 Schéma du pseudo-intégrateur

4-7 Dérivateur



L'AOP est idéal donc $I_+ = I_- = 0$.

Il est linéaire donc $V_+ = V_-$ ($\epsilon = 0$) et ici $V_+ = V_- = 0$.

En appliquant la loi des mailles :

- en entrée $V_e = V_C$

- en sortie $V_s = -RI$

$$\text{Aussi } I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV_C}{dt} = C \frac{dV_e}{dt} \quad \text{alors} \quad V_s = -RC \frac{dV_e}{dt}$$

Remarque :

- La tension V_s est la dérivée de la tension V_e avec une constante de dérivation négative : le montage est un dérivateur inverseur.
- Aux fréquences hautes, le condensateur se comporte comme un court-circuit et l'AOP fonctionne en saturation. Pour éviter cela, on branche en série avec le condensateur C une résistance : on obtient un pseudo-dérivateur.

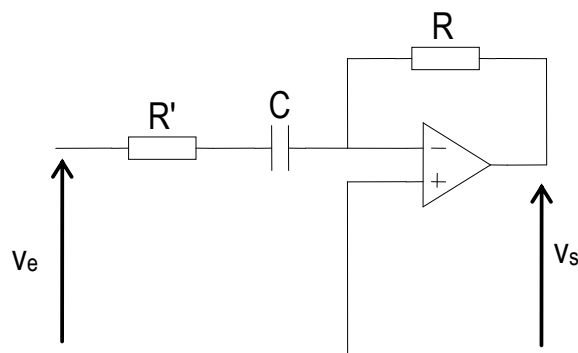
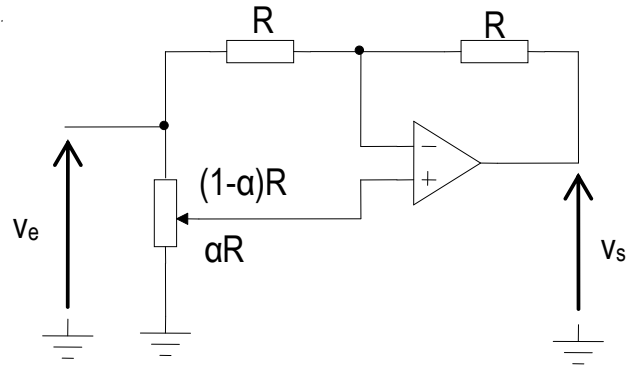


Fig. 13 Schéma du pseudo-dérivateur

TRAVAUX DIRIGES

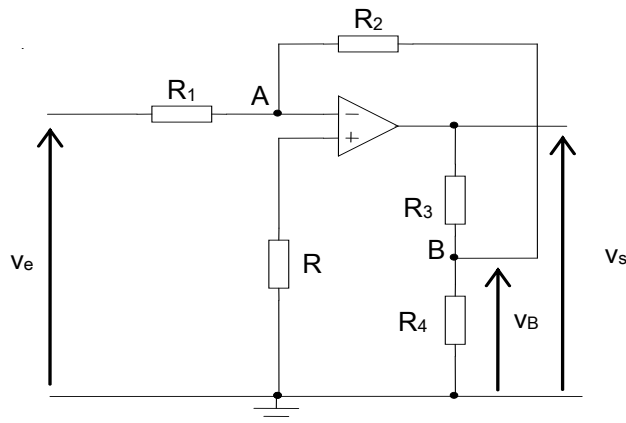
EXERCICE I

L'AOP est supposé parfait et alimenté en tensions symétriques $+15V/-15V$. La résistance variable présente une résistance αR entre le curseur et la masse, $(1-\alpha)R$ entre le curseur et l'autre extrémité.



1. Exprimez A_V en fonction de α et donnez en un encadrement.
2. Exprimez l'impédance d'entrée Z_e et donnez en un encadrement.

EXERCICE II



1. Exprimez A_V .
2. Exprimez l'impédance d'entrée Z_e .

EXERCICE III

Les AOP sont supposés idéaux.

V_1 et V_2 sont les tensions d'entrée et V_s , la tension de sortie du système.

V_A et V_B sont les potentiels respectivement des points A et B.

1. Exprimez V en fonction de V_1 et V_2 et déduisez I en fonction de V_1 , V_2 et R_2 .
2. Exprimez V_A et V_B en fonction de V_1 , V_2 , R_1 et R_2 .
3. Exprimez V_s en fonction de V_A et V_B .
4. Exprimez V_s en fonction de V_1 , V_2 , R_1 et R_2 .
5. Quelle est la fonction du montage? Justifiez votre réponse.

