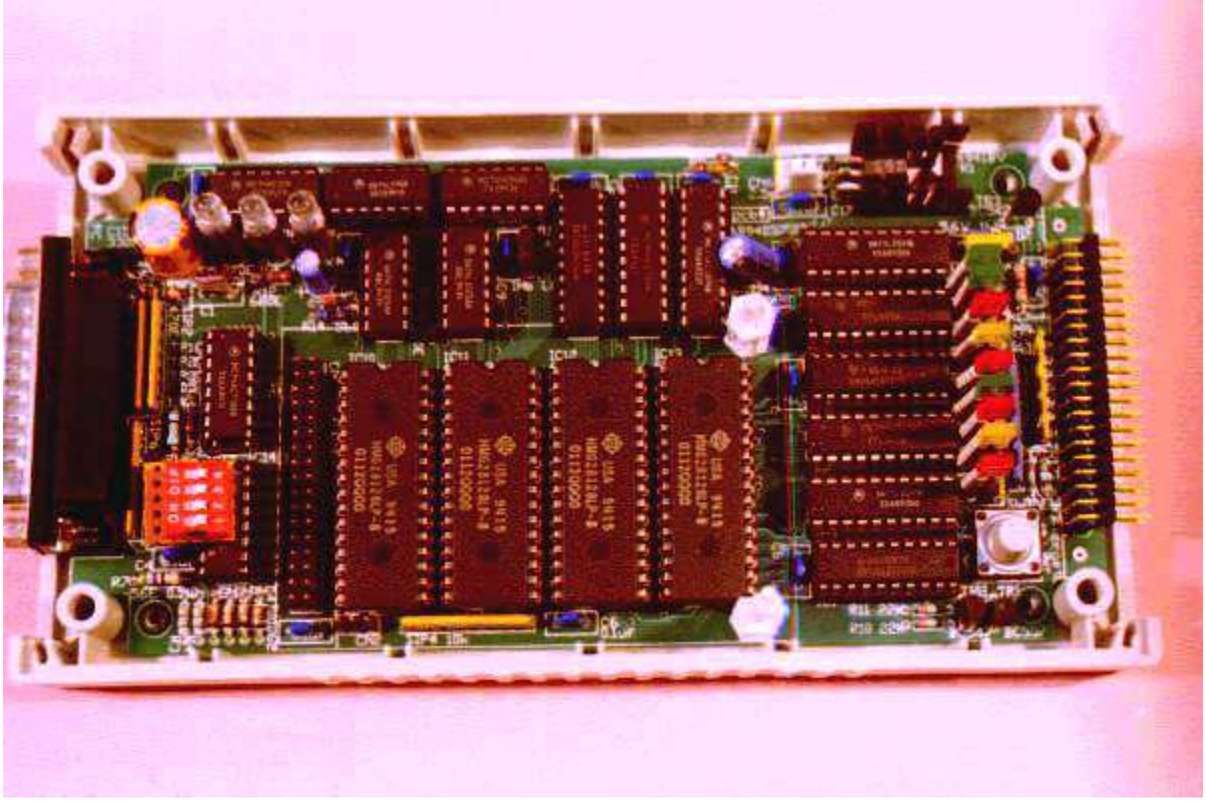
L'amplificateur opérationnel



Cours : L'Amplificateur Opérationnel (AOP)

1) Présentation

L'amplificateur opérationnel(ou amplificateur linéaire intégré: **ALI**)est un composant en technologie intégrée qui est prêt à être opérationnel, ce composant comporte:

- 2 broches d'alimentations **$+V_{cc}$** et **$-V_{cc}$**,

-2 entrées dites différentielles: E^{+} entrée non inverseuse et E^{-} entrée inverseuse,

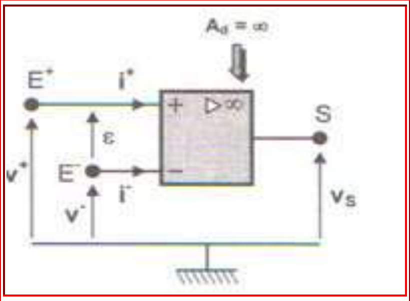
-Une sortie S .

Le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel impose une **alimentation symétrique**

(deux sources de tension + Vcc et - Vcc, qu'on ne représente pas sur les schémas).

On appelle tension différentielle (qu'on note ε), la ddp entre l'entrée v^{+}et v^{-}

$$\varepsilon = v^{+} - v^{-}$$



Symbole de l'Aop

La tension de sortie a pour expréssion : $V_s = A.\,\varepsilon$ **(A: représente l'amplification différentielle) .**

L'Aop a deux modes de fonctionnement :

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 E^{-}de l'Aop) , dans ce cas la tension ε sera négligée .

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 ε ne peut être négligée.

2) Amplificateur opérationnel parfait (ou idéal)

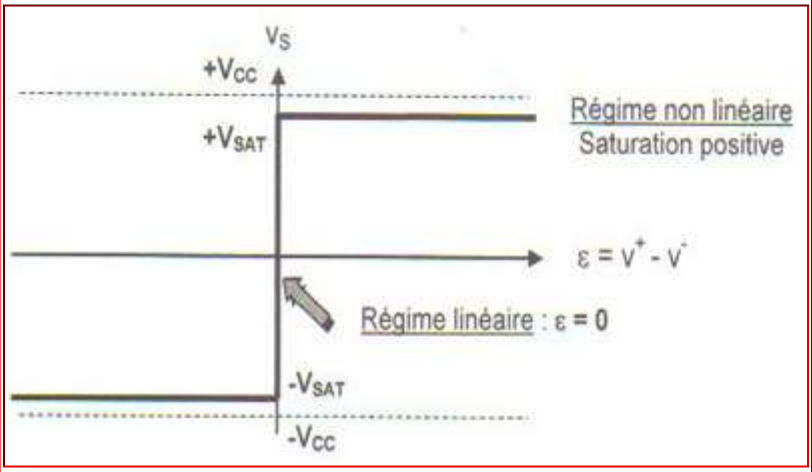
Ce modèle permet de prévoir le comportement de l'amplificateur :

Le modèle de l'AOP idéal comporte:

- Une résistance d'entrée différentielle infinie, ce qui implique ==> $i^+ = i^- = 0$.

-Une amplification différentielle(en boucle ouverte) A infinie , quele que soit la fréquence.

-On supposera qu'en **régime linéaire** : $\varepsilon = 0$. ==> $v^+ = v^-$



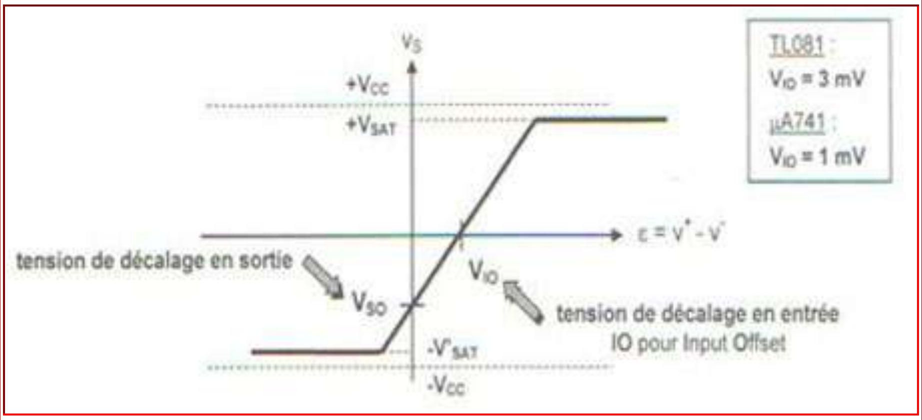
Caractéristique de transfert idéale

3) Les imperfections de l'AOP

a) Tension de décalage (tension d'offset)

Quand la tension différentielle est nulle la tension de sortie ne l'est pas, ce qui fait que l'AOP présente une tension de décalage en sortie

en absence de tout signal à l'entrée.



Caractéristique de transfert réelle

b) Le slew rate (SR)

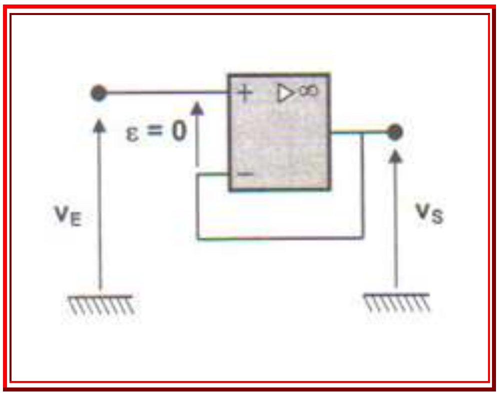
La pente en valeur absolue de dVs/dt , qui informe sur la vitesse d'évolution de la tension du signal de sortie Vs de l'AOP, est limitée par une valeur maximale: ce slew rate caractérise la rapidité de réponse de l'AOP et s'exprime en V /µs (pour l'AOP TL081 SR = 13 V/µs).

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

4) L'Amplifiacteur opérationnel en régime linéaire

En régime linéaire (il y a présence d'une contre-réaction négative) on supposera que : $i^+ = i^- = 0$. et $\varepsilon = 0$ c'est à dire $v^+ = v^-$

a) Montage suiveur

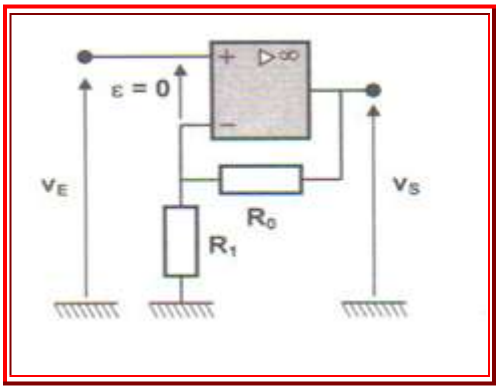


La tension diffiréentielle $\varepsilon = 0$ en apliquant la loi des mailles on peut écrire : $V_E - \varepsilon - V_S = 0$ ==> $V_S = V_E - \varepsilon$

$$\boxed{V_S = V_E}$$

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.

b) Montage non-inverseur

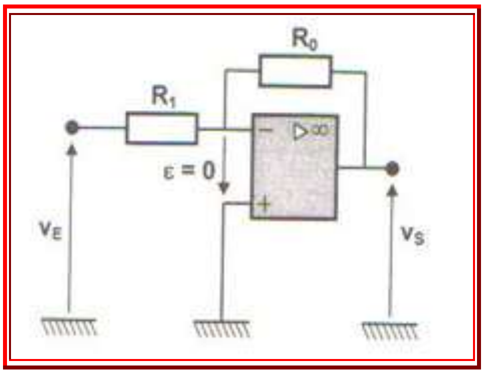


On a bien une contre réaction négative ==> $\varepsilon = 0$ ==> $V_E = v^+ = v^- = V_{R1}$ en appliquant le principe de diviseur de tension on a :

$V_E = V_S . R_1/(R_0 + R_1)$ **ce qui donne :**

$$\boxed{V_S = V_E \cdot \left(1 + \frac{R_0}{R_1}\right)}$$

c) Montage inverseur



On a bien une contre réaction négative ==> **ε** = 0 En appliquant le théorème de Millman on a :

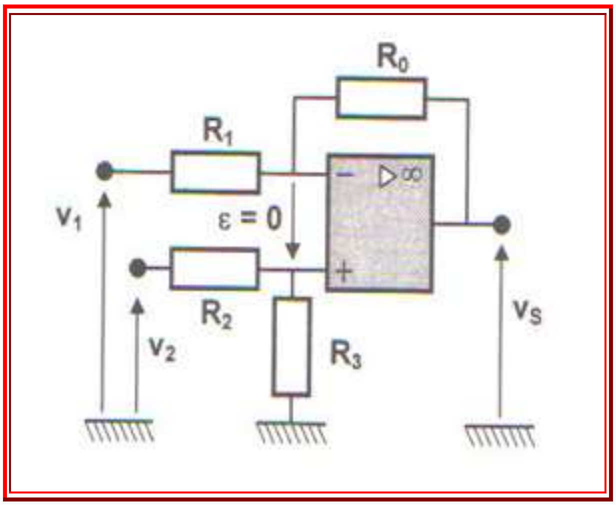
$v^- = [V_E / R_1 + V_S / R_0] / (1/R_1 + 1/R_0)$ ce qui donne :

$$\boxed{V_S = -V_E \cdot \left(\frac{R_0}{R_1}\right)}$$

Autre démonstration, On a : $V_E = R_1.I$, car le potentiel $v^-=0$ V(car $v^+ = 0V$, **et** $\varepsilon = 0$ donc $v^+ = v^- = 0$ V)

de même $V_s = -R_0.I$ ($i^- = 0$)==> $V_S/V_E = -(R_0/R_1)$.

d) Amplificateur soustracteur



On a bien une contre réaction négative ==> ε = 0==> $v^+ = v^-$ avec $v^+ = v^-$ et $V_{R3} = v^+ = v^-$.

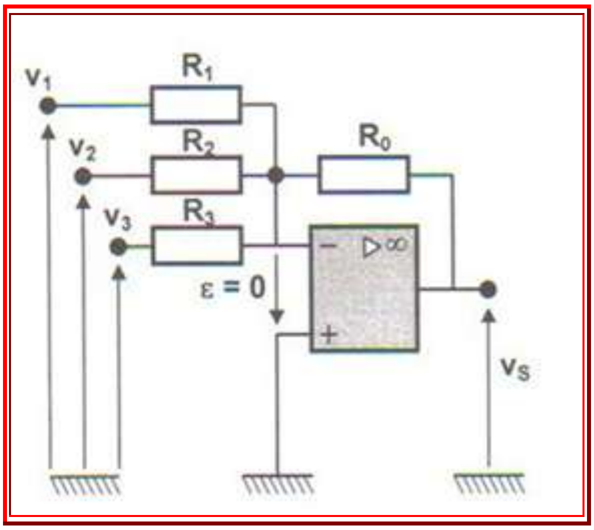
en appliquant le principe de diviseur de tension on a : $V_{R3} = V_2.R_3/(R_2 + R_3)$ **et** en appliquant le théorème de Millman on a :

$v^- = [V_1/R_1 + V_S/R_0] / (1/R_1 + 1/R_0) = V_2.R_3/(R_2 + R_3)$ (car $V_{R3} = v^-$).

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

$$V_S = \left(\frac{R_0}{R_1}\right).(V_2 - V_1)$$

e) Amplificateur sommateur Inverseur



On a bien une contre réaction négative ==> ε = 0 et $v^+ = 0V$ ==> $v^- = 0V$

en appliquant le théorème de Millman on a : $v^- = [V_1/R_1+V_2/R_2+V_3/R_3+ V_s/R_0] / [1/R_0+1/R_1+1/R_2+ 1/R_3] = 0$ ce qui donne :

$$V_S = -R0.\left(V_1/R_1 + V_2/R_2 + V_3/R_3\right)$$

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

$$V_S = -(V_1+V_2+V_3)$$

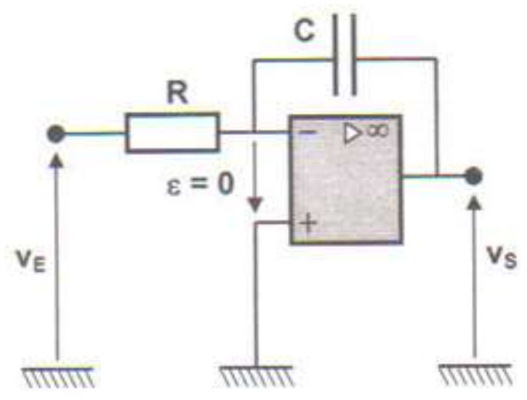
On peut éliminer le signe - en ajoutant un étage inverseur à la sortie de l'amplificateur sommateur.

5) Autres montages de bases

On a deux atres 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.

a) Montage intégrateur



On a bien une contre réaction négative ==> $\varepsilon = 0$ et $v^+ = 0V$ ==> $v^- = 0V$ et $i^+ = i^- = 0$.

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 $i(t) = - C\, dVs / dt$ ==>$V_E(t)= -R.C\, dVs / dt$** ==> : **$dVs / dt =-1/(R.C).\ V_E(t)$**

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

$$\boxed{Vs(t) = -1/(R.C).\int V_E(t).dt}$$

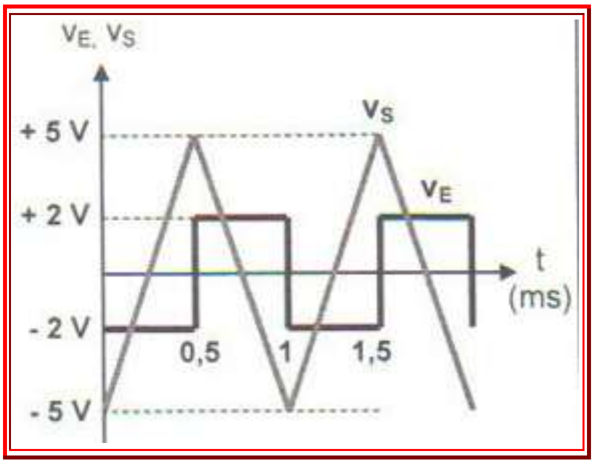
$$\boxed{Vs(t) = -1/(R.C).\int V_E(t).dt + Vs(0)}$$

En régime sinusoïdal: On utilise la notation complexe, on a **$\underline{V}_S = -\underline{V}_E(\underline{Z}_c/R) = -V_E.\ 1/ (jRC\omega)$ ($\underline{Z}_c= 1/ jC\omega$)** finalement on a :

$$\boxed{\underline{V}_S = -\underline{V}_E.\ 1/ (jRC\omega)}$$

Exemple 1: Soit une tension carrée d'amplitude 2V et de fréquence 1 kHz, avec R = 10 kΩ et C = 10 nF, on prend **Vs(0)**= -5V.

F = 1 kHz == la période du signal est T = 1/F = 1/1000 = 1 mS. ==> R.C=**10^{-4}s**



Pour 0<t< 0.5ms on a **V_E(t)= - 2V ==> Vs(t) = -1/(R.C).∫V_E(t).dt + Vs(0).**

les bornes d'intégrations sont 0 et t ce qui donne : Vs(t) = -1/(10^{-4}).∫-2.dt + (-5) = 20000t - 5 ==>

$$\boxed{Vs(t)=20000t - 5}$$

Pour 0.5 ms<t< 1 ms on a : V_E(t)= + 2V , **Vs(t) = -1/(10^{-4}).∫2.dt = - 20000t + K**

A t = 0,5 ms Vs(t) = 5 V ==> **Vs(0,0005) =- 20000x0,0005+K = -10+K**
= Vs(0,0005) lorsque 0<t< 0.5ms

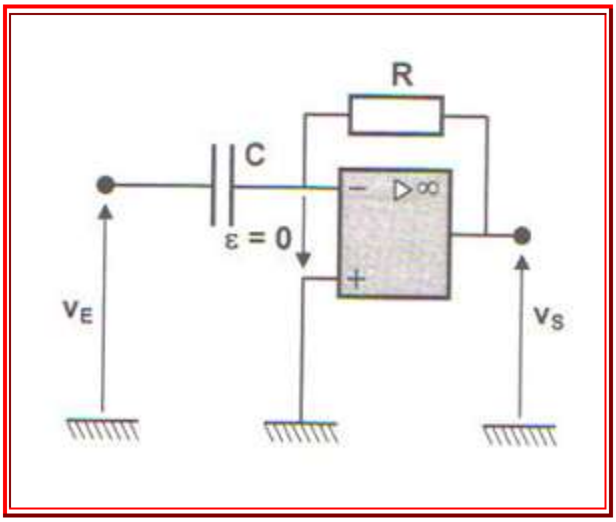
ceci par continuité de Vs(t) au point t = 0,0005 S.

Pour 0<t< 0.5ms on a Vs(0,0005)= 20000x0,0005-5 = 10- 5 = 5V = -10 + K ==> K = 15 V.

Finalement on a :

$$\boxed{Vs(t)=-20000t+15}$$

b) Montage dérivateur



AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL IDEAL

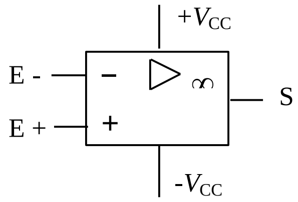
I. CARACTERISTIQUE DE L'AOP IDEAL.

On se limitera à l'étude de l'amplificateur opérationnel idéal, c'est à dire sans défaut ni limitation. La raison en est que dans les conditions où l'on utilisera l'AOP, ces défauts et limitations seront négligeables.

I.1. Symbole :

Le symbole normalisé est représenté à la *figure 1*:

Figure 1



Il comporte 5 connexions :

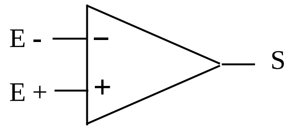
- E + et E - sont respectivement les entrées non inverseuse et inverseuse. La différence de potentielle entre ces deux entrées est appelée tension différentielle d'entrée V_d :

$$V_d = V_{E+} - V_{E-} \qquad \text{(II-1)}$$

- S est la sortie,
- $+V_{CC}$ et $-V_{CC}$ correspondent aux tensions d'alimentation de l'AOP. Le plus souvent elles sont de valeur identique (on alimente l'AOP par une alimentation symétrique) mais cela n'est pas une obligation. Enfin, elles ne sont en général pas représentées dans les montages électroniques, mais elles doivent être prises en compte si l'on veut appliquer la loi des intensités (cf. chapitre 1 § I) à l'AOP.

Le symbole anglo-saxon (*figure 2*) est utilisé dans certains ouvrages :

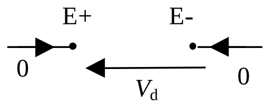
Figure 2



I.2. Caractéristique.

I.2.a. Caractéristique d'entrée.

L'impédance d'entrée est infinie. La conséquence en est qu'aucun courant n'entre ou ne sort des bornes E+ et E-.



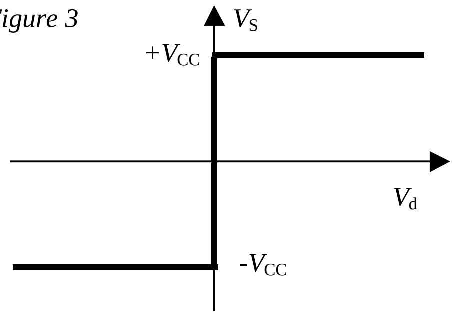
I.2.b. Caractéristique de sortie

La sortie S doit être considérée comme un pôle d'une source de tension placée entre la masse et S. C'est une source de tension liée à la tension différentielle d'entrée. La source étant idéale, l'impédance série est nulle.

I.2.c. Caractéristique de transfert.

C'est la courbe (*figure 3*) représentant la valeur de la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée différentielle.

Figure 3



Elle comporte deux domaines distincts :

- Le domaine linéaire pour lequel on à :

$$V_S = +\infty \cdot V_d \qquad \text{(II-2)}$$

- Les domaines de saturation dans lesquels V_S ne peut prendre que deux valeurs : + V_{CC} ou – V_{CC}

De cette caractéristique on peut en déduire :

- Si V_S est différente de + V_{CC} ou de – V_{CC}, alors la relation (II-2) impose $V_d = 0$.

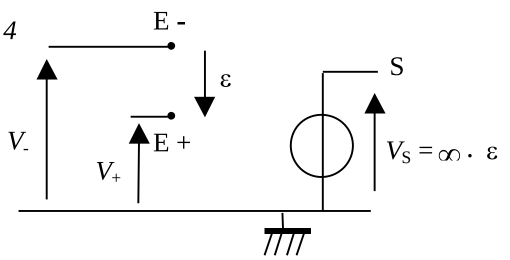
- Si $V_d \neq 0$, alors $V_S = + V_{CC}$ ou - V_{CC}

Notations : Dans la suite de ce cours :
- la tension V_d sera notée ε
- la tension V_{E+} notée V_+
- la tension V_{E-} notée V_-

I.3. Modèle équivalent.

On peut donc remplacer l'AOP par le schéma équivalent représenté *figure 4* :

Figure 4



II. CONTRE REACTION ET STABILITE

II.1. Contre réaction.

Afin de contrôler la valeur de la tension de sortie, il est nécessaire de réaliser des montages pour lesquels le coefficient l'amplification n'est pas infinie mais limitée à une valeur déterminée par le concepteur.
On réalise donc des montages qui mettent en œuvre des contre réactions négatives : on réinjecte une partie de la tension de sortie sur l'entrée inverseuse.

II.2. Stabilité

L'étude de la stabilité n'est pas au programme de la première année, et **ne fera l'objet d'aucune question à l'examen**. Ce qui suit est donné à titre d'information.

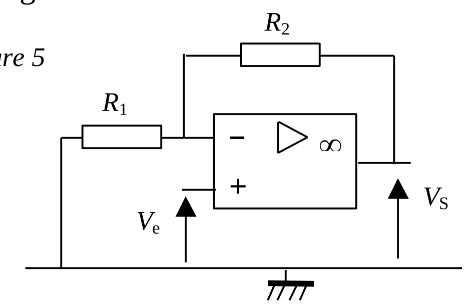
Nous considérerons, pour réaliser les calculs dans ce paragraphe, que la tension de sortie de l'AOP vaut :

$$V_S = A \cdot \varepsilon \text{ , avec } A \to +\infty$$

II.2.a. contre réaction négative

Considérons le montage représenté à la figure 5 :

Figure 5



On constate que :

$$V_+ = V_e \text{ et que : } V_- = V_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow \varepsilon = V_e - V_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_S}{A}$$

$$\Rightarrow V_S \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{A} \right) = V_e$$

Comme A tend vers l'infini, on obtient :

$$V_S = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_e$$

Stabilité :

Posons : $k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ d'où $\varepsilon = V_e - k \cdot V_S$

Une petite perturbation est susceptible de modifier très légèrement la valeur de V_S, entraînant une modification de ε :

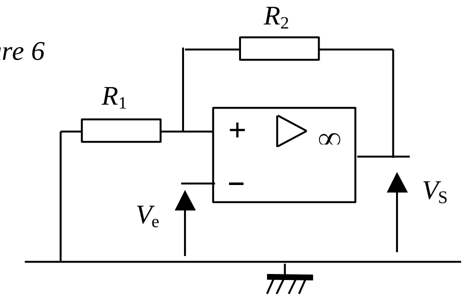
- Si V_S croît, ε diminue donc V_S décroît.
- Si V_S décroît, ε augmente donc V_S croît.

Ce montage est donc stable.

II.2.b. Contre réaction positive

Si l'on inverse les bornes + et - (*figure 6*) les expressions deviennent :

Figure 6



$$V_- = V_e \text{ et } V_+ = V_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow \varepsilon = V_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_e = \frac{V_S}{A}$$

$$\Rightarrow V_S \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{1}{A} \right) = V_e$$

$1/A$ tend vers 0, La valeur de la tension de sortie V_S devrait être la même. Mais en pratique, on n'obtient en sortie que deux valeurs : + ou - V_{CC}. Ce montage est en effet instable :

Posons : $k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ d'où $\varepsilon = k \cdot V_S - V_e$

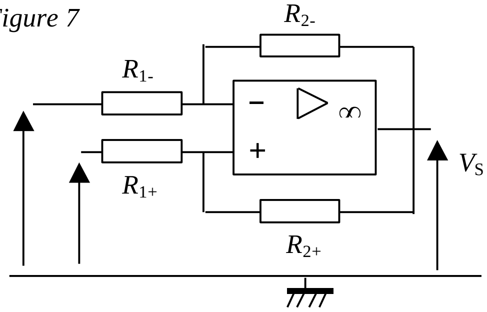
Une petite perturbation est susceptible de modifier très légèrement la valeur de V_S, entraînant une modification de ε :

- Si V_S croît, ε augmente donc V_S continue de croître et "diverge" vers + V_{CC}
- Si V_S décroît, ε diminue donc V_S continue de décroître et "diverge" vers - V_{CC}

II.2.c. Cas des montages à réaction positive et négative.

Ces montages (rarement utilisés) correspondent à la structure représentée figure 7.

Figure 7



On définit par k- le coefficient de contre réaction négative et par k+ le coefficient de contre réaction positive :

$$k-=\frac{R_{1-}}{R_{1-}+R_{2-}} \quad \text{et} \quad k+=\frac{R_{1+}}{R_{1+}+R_{2+}}$$

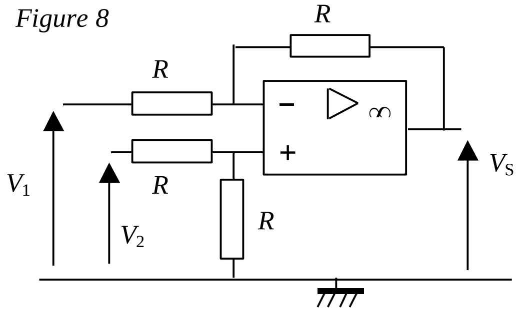
Le montage est stable lorsque *k*- est supérieur à *k*+.

III. Methode d'etude

On ne s'intéressera qu'à des montages sans contre réaction positive.

Considérons l'exemple représenté à la figure 8 :

Figure 8

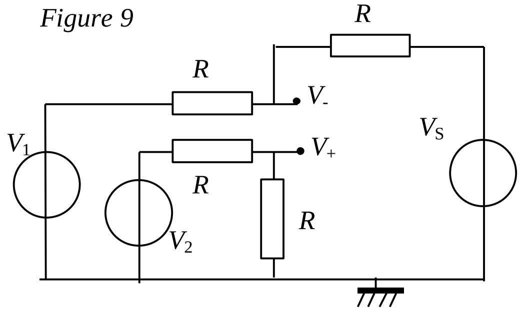


Etape 1 :

Réaliser un schéma équivalent sans l'A.Op. : supprimer l'A.Op., placer une source de tension V_S entre S et la masse (figure 9).

Tous les dipôles en parallèle avec Vs peuvent être alors éliminés le temps du calcul (cf. chapitre 1, §III.3.d).

Figure 9



Etape 2 :

A l'aide du théorème de Millman (ou du diviseur de tension) trouver les expressions des potentiels V_- et V_+ **sans les simplifier**. Pour le cas de notre exemple, on obtient :

$$V_-=\frac{\frac{V_1}{R}+\frac{V_S}{R}}{\frac{1}{R}+\frac{1}{R}} \quad \text{et} \quad V_+=\frac{\frac{V_2}{R}}{\frac{1}{R}+\frac{1}{R}}$$

Etape 3 :

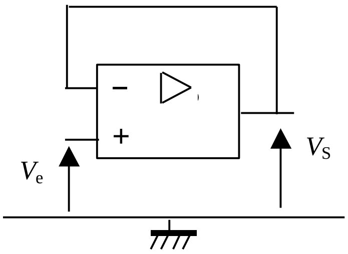
- Pour les montages avec contre réaction, Poser $V_- = V_+$, puis simplifier pour en déduire V_S.
  Pour notre exemple : $V_S=V_2-V_1$, c'est un montage « *soustracteur* ».
- Pour les montages sans contre réaction négative :
  - Si $V_+ > V_-$ alors $V_S = + V_{CC}$
  - Si $V_- > V_+$ alors $V_S = - V_{CC}$

IV. Quelques applications :

IV.1. Montage suiveur.

Pour ce montage (figure 10) on a $V_+ = V_e$ et $V_- = V_S$ donc $V_S = V_e$. Mais l'impédance de la source de tension ainsi réalisée est très faible.

Figure 10



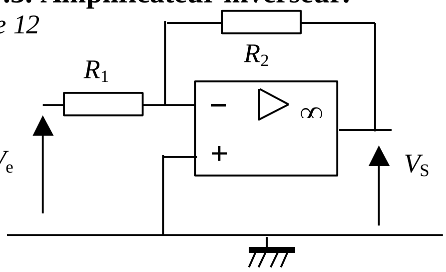
IV.2. Amplificateur non-inverseur

L'étude du montage représenté à la figure 5 (§ 2.2.a) conduit à :

$V_+ = V_e$ et $V_- = \dfrac{R_1 \cdot V_S}{R_1 + R_2}$; d'où : $V_S = \left(1 + \dfrac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_e$

IV.3. Amplificateur inverseur.

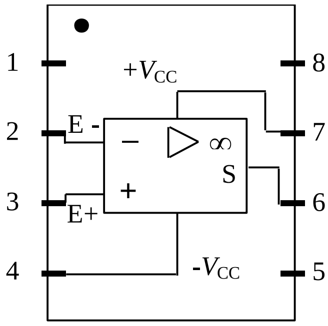
Figure 12



L'étude du montage représenté à la figure 12 conduit à :

$V_+ = 0$ et $V_- = \dfrac{\dfrac{V_e}{R_1} + \dfrac{V_S}{R_2}}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}}$; d'où : $V_S = -\dfrac{R_2}{R_1} \cdot V_e$

V. Le composant



Composant à 8 broches :

- Les broches 4 et 7 servent à l'alimentation,
- Les broches 2 et 3 sont les entrées
- La broche 6 correspond à la sortie.
- Les broches 1 et 5 sont parfois utilisables pour la correction d'offset

La broche 8 est non utilisée.

La distance entre les broches d'un même coté vaut 1/10 de pouce, celle entre les broches de chaque coté vaut 3/10 de pouces (1 pouce = 25,4 mm).