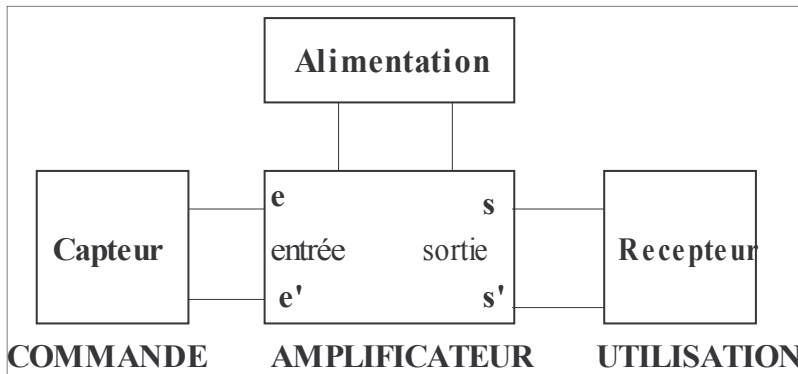


**B.T.S. C.I.M. 1 : Cours de Physique appliquée (programme 1.31 Amplification).**  
**Ch4 : Fonctions électroniques :**

**1 . FONCTION AMPLIFICATION :**

**Définition :** Un amplificateur est un ensemble de composants électroniques (transistors, résistances, condensateurs) présentant quatre bornes principales (on parle de quadripôle) :



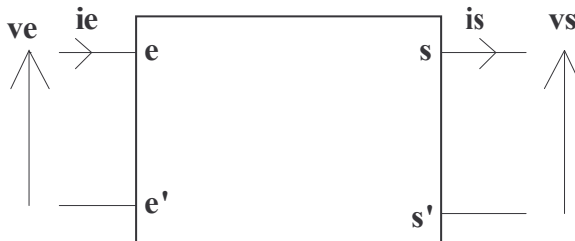
L'entrée est reliée à un **capteur** (microphone, cellule photo-électrique, capteur de vitesse ou de position, couple thermo-électrique) qui lui fournit un **signal** électrique supportant une information.  
 Le **courant** débité par le **capteur** doit être **très faible**.

La **sortie** de l'amplificateur est connectée à un **récepteur** (haut-parleur, écran de télévision, moteur électrique, appareil de mesure...) qui exige une **puissance** que le capteur est incapable de fournir directement.

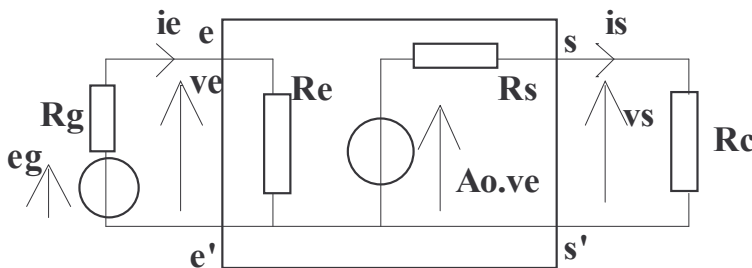
Le rôle de l'amplificateur est de délivrer au récepteur une **tension** et un **courant** qui soient ceux de l'entrée **multipliés** par des coefficients très supérieurs à 1.

La **puissance** fournie au récepteur provient de l'**alimentation** qui est souvent une **source de tension continue**.

**Modèle d'un amplificateur en régime linéaire :**



Pour des variations de  $v_e$ , pas trop rapides, on admet que  $i_e$ ,  $v_s$  et  $i_s$  sont proportionnelles à  $v_e$ :  
 Le fonctionnement est alors linéaire.  
 Le modèle de l'amplificateur est alors le suivant :



$R_e$  est la résistance d'entrée de l'amplificateur :  
 $R_e = v_e / i_e$  .  
 La sortie se comporte comme un dipôle linéaire actif, représenté par son modèle de THEVENIN de f.e.m.  $A_o.v_e$  en série avec une résistance  $R_s$  qui est la résistance de sortie de l'amplificateur.

**On distingue deux grandes catégories d'amplificateurs :**

**a) Les amplificateurs de tension :**

Propriétés :

$R_e$  très grande : donc  $v_e = e_g$  .

$A_v = v_s / v_e =$  amplification en tension très grande.

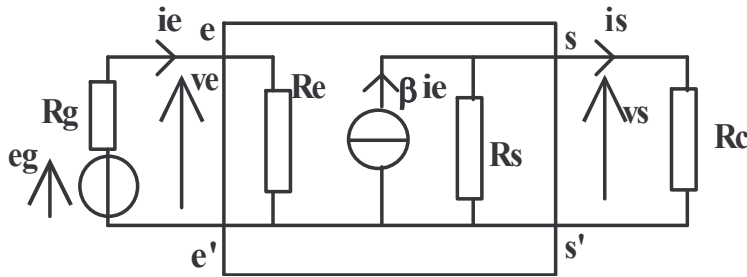
$R_s$  est très faible : donc  $v_s = A_o.v_e$  ; donc  $A_v = A_o$  .

La puissance fournie à  $R$  est faible :  $v_s$  est égale à quelques volts et  $i_s$  à quelques mA .

$A_o$  est grand . **Ex :** amplificateurs à amplificateurs opérationnels ( AOP).

**b) Les amplificateurs de courants :**

Dans de tels circuits on s'efforce de réaliser une amplification en courant  $A_i$  aussi forte que possible.  
 $A_i = i_s / i_e$  . On adopte souvent le modèle de NORTON pour un tel ampli :



On essaie d'avoir  $R_s$  très grande.  
 Alors  $i_s = \beta \cdot i_e$  ; donc  $A_i = \beta$  .

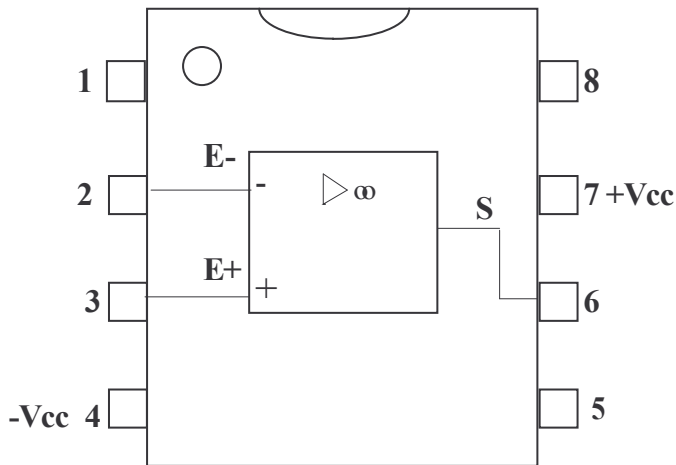
Ex : amplificateurs de courant à transistors .

**Remarque :** Dans les montages pratiques pour lesquels on doit alimenter une charge avec une tension et un courant suffisants, on emploie les deux types d'amplificateurs montés en cascade:

- . amplificateurs de tension, puis,
- . amplificateurs de courant (ou de puissance) réalisés à l'aide de circuits intégrés ou de composants discrets comme les transistors.

**2. Propriétés générales de l'Amplificateur Opérationnel (AOP) :**

L'AOP est un circuit intégré comportant plusieurs broches : Ex : le  $\mu A741$  ou le TL 081 comportent 8 broches . L'AOP porte aussi le nom d'Amplificateur Différentiel Intégré (A.D.I.)

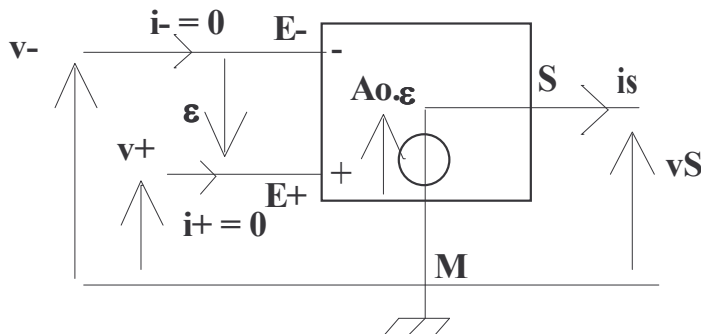


- 2. Entrée inverseuse ;
- 3. Entrée non - inverseuse ;
- 6. Sortie ;
- 4. Alimentation négative ;
- 7. Alimentation positive .

Un AOP comprend trois parties :

- . un *étage d'entrée* qui est un amplificateur différentiel : il amplifie la différence entre  $v_{E+}$  et  $v_{E-}$  :  
 $\epsilon = v_{E+} - v_{E-}$  . La résistance d'entrée de cet étage est très grande :  
 $i_+$  et  $i_-$  sont très faibles, inférieurs à  $1\mu A$ .
- . des *étages intermédiaires* amplificateurs de tension
- . un *étage de sortie* de résistance de sortie très faible.

En conséquence de quoi l'AOP peut être modélisé de la manière suivante :



$V_s = A_o \cdot \epsilon$  .  
 $A_o$  est l'amplification statique en boucle ouverte de l'AOP.  
 $A_o$  est très élevée .  
 Pour le TL 081 ,  $A_o = 3 \cdot 10^5$  .

**Remarque :** L'amplificateur opérationnel est alimenté par une alimentation continue symétrique (en général -15V , 0 , + 15V). Le zéro de cette alimentation constitue la masse du montage dans lequel est intégré l'AOP.

C'est la raison pour laquelle, la tension de sortie de l'AOP est limitée :

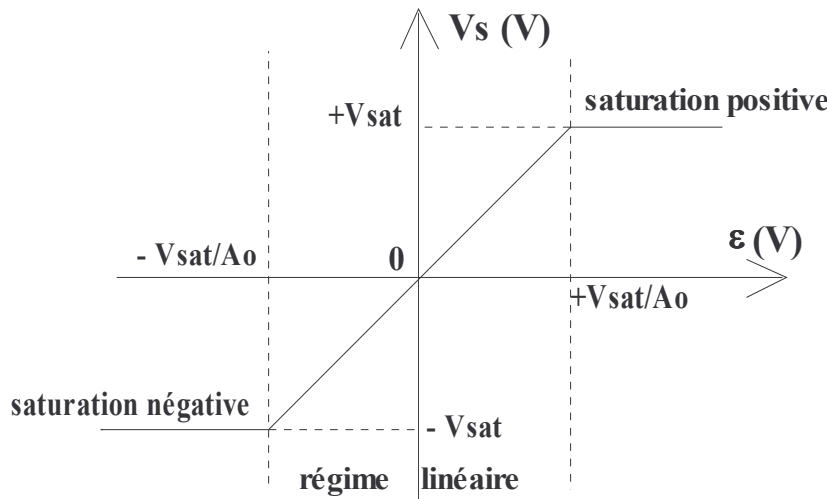
$V_L < V_s < V_H$  .  $V_H$  = tension de saturation positive ( *High voltage* ).

$V_L$  = tension de saturation négative ( *Low voltage* ).

On a souvent  $V_H = +V_{sat}$  et  $V_L = - V_{sat}$  , avec  $V_{sat} = 14 \text{ V}$  si  $V_{cc} = 15 \text{ V}$  .

**Caractéristique de transfert en boucle ouverte :**

On relève  $V_s$  en fonction de  $\epsilon$  .(régime statique ; tension continue) .



On constate que la caractéristique est une droite passant par l'origine dans un domaine étroit de variations de la tension différentielle d'entrée  $\epsilon$  .

Dans ce domaine on a bien

$$V_s = A_o \cdot \epsilon$$

Il suffit que  $\epsilon$  dépasse  $V_{sat}/A_o$  pour que l'AOP soit saturé positivement.

De même, si  $\epsilon$  devient inférieure à  $-V_{sat}/A_o$  l'AOP est saturé négativement.

**A.N. :** Pour un TL 081,  $A_o = 3 \cdot 10^5$  . Donc ,

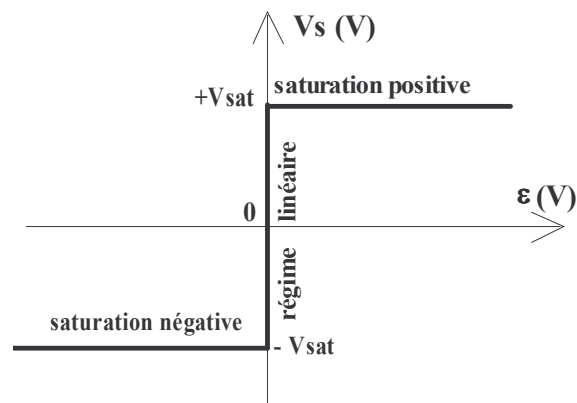
$$V_{sat} / A_o = 14 / 3 \cdot 10^5 = 47 \mu\text{V} .$$

Il suffit donc que  $|\epsilon| > 47 \mu\text{V}$  pour que l'AOP soit saturé .

Si on représentait la même caractéristique avec

la même échelle pour les deux tensions  $V_s$  et

$\epsilon$  , la caractéristique se présenterait ainsi :



**En régime sinusoïdal :**

On applique à l'entrée de petits signaux sinusoïdaux , de telle manière que :

$$\epsilon = E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \quad \text{avec} \quad E \cdot \sqrt{2} \leq \frac{V_{sat}}{A_o}$$

En basse fréquence , on a toujours :

$$V_s = A_o \cdot \epsilon \quad ; \quad A_o \text{ constant} ; V_s \text{ et } \epsilon \text{ en phase} .$$

En augmentant la fréquence, on constate que le rapport des amplitudes diminue et que  $v_s$  et  $\epsilon$  cessent d'être en phase.

En régime permanent sinusoïdal, on définit la fonction de transfert ou transmittance complexe du composant :

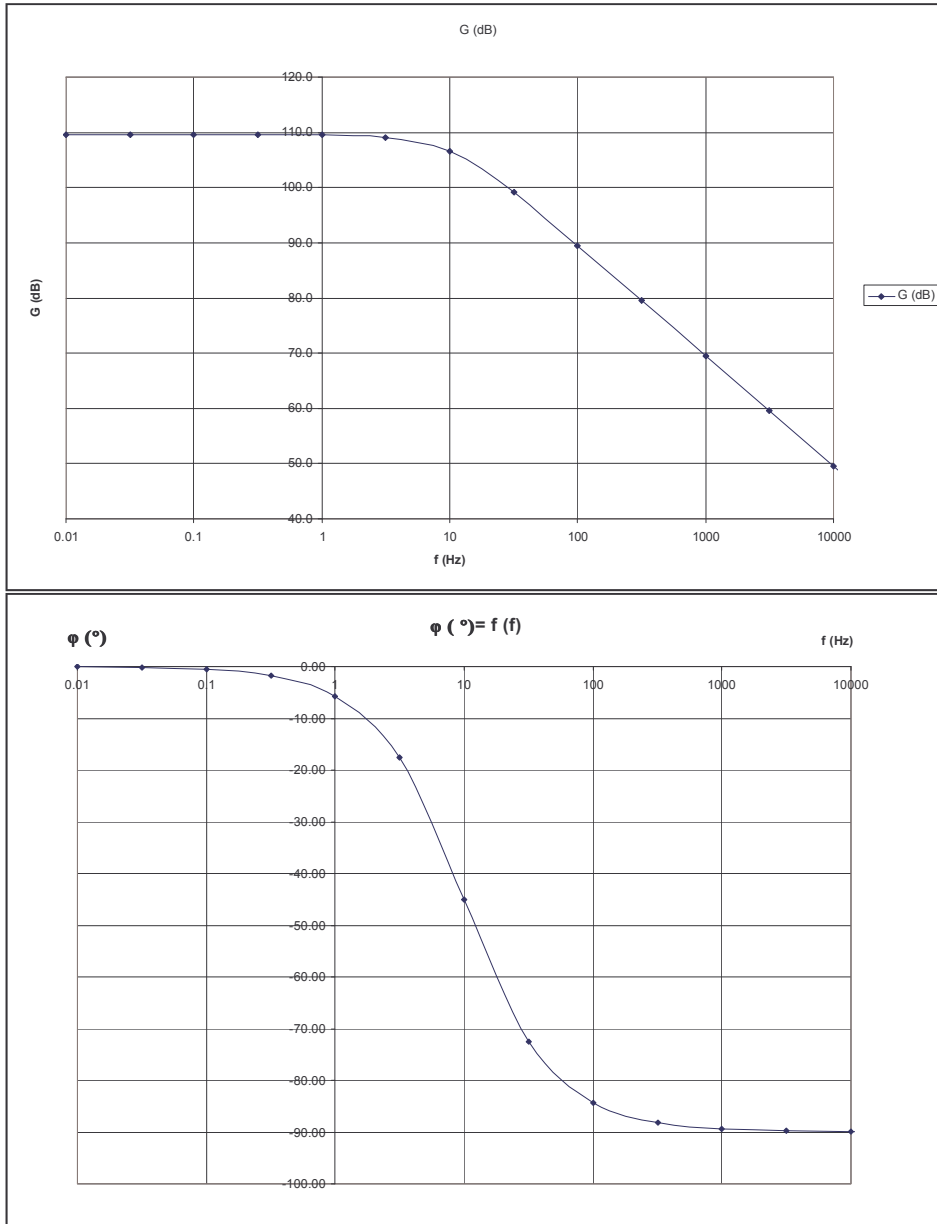
$$\boxed{A_d = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_0}}}$$

$A_o$  est l'amplification statique définie plus haut.  $f_0$  est la fréquence de coupure à 3dB de l'amplificateur opérationnel.  $f$  est la fréquence de  $\epsilon$ .

**Diagramme de Bode de l' AOP :**

C'est un ensemble de deux courbes :

- a) La courbe de gain :  $G_v = 20 \log ( | \underline{Ad} | ) = f ( f )$  , avec une échelle logarithmique pour la fréquence  $f$  .
- b) La courbe de phase :  $\varphi = \text{Arg} ( \underline{Ad} ) = f ( f )$  , avec une échelle logarithmique pour la



Dans l'exemple choisi,  $A_o = 3 \cdot 10^5$  et  $f_o = 10$  Hz .

Lorsque  $f = f_o$ , On a  $G_v = 107$  dB =  $G_v \text{ max} - 3$  . D'autre part ,  $\varphi$  est égal à  $- 45^\circ$  .

On remarque que la courbe  $G_v = f ( f )$  a une pente de  $- 20$  dB par décade lorsque  $f > f_o$ .

La réponse en fréquence de l'AOP influe sur les montages réels dans lesquels il est inséré.

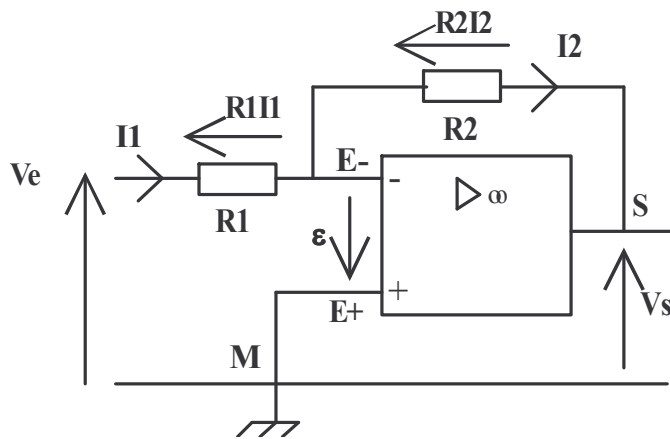
**3. Amplificateur opérationnel muni d'une boucle de réaction :**

Ainsi qu'on vient de le voir, un AOP fonctionnant en boucle ouverte est très vite saturé puisqu'une très faible tension différentielle d'entrée  $\epsilon$  suffit à le saturer .

Ainsi, un AOP fonctionnant en boucle ouverte n'est utilisé qu'en fonctionnement non-linéaire , c'est à dire en comparateur simple.

Pour obtenir un fonctionnement linéaire, il faut introduire une boucle de réaction, c'est à dire un retour de la tension de sortie du montage vers l'entrée.

**3.1 Réaction négative :**



Dans le schéma ci-contre, on observe une liaison entre la sortie S et l'entrée inverseuse E- . Montrons en quoi il s'agit d'une *réaction négative* :  
 $i- = 0$  ; on a donc :  $I1 = I2 = I$  .  
 On a :  $R1.I + R2.I = Ve - Vs$  .  
 Donc  $I = (Ve - Vs) / (R1 + R2)$  .  
 D'autre part  $Vs = Ao . \epsilon$  .  
 La tension différentielle d'entrée peut s'écrire :

$$\epsilon = R1.(Ve - Vs) / (R1 + R2) - Ve .$$

$$\epsilon = (R1.Ve - R1.Vs - R1.Ve - R2.Ve) / (R1 + R2) = (- R1.Vs - R2.Ve) / (R1 + R2) .$$

$$\epsilon = -R1 .Vs / (R1 + R2) - R2.Ve / (R1 + R2) .$$

Si on appelle  $k1$  le rapport  $R1 / (R1 + R2)$  , on a :

$$\epsilon = -k1 .Vs - R2.Ve / (R1 + R2) .(1)$$

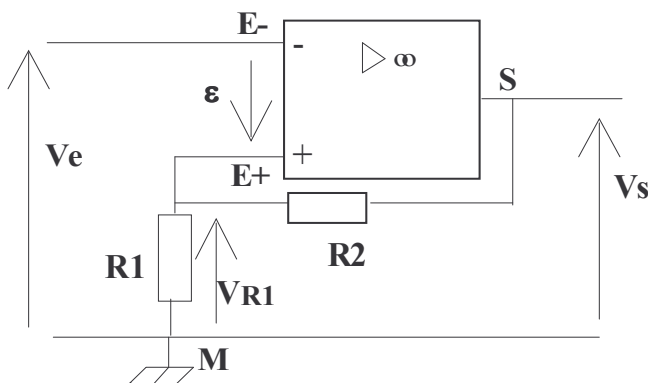
$k1$  est appelé le *taux de réaction négative* ou *taux de contre-réaction*.

L'expression (1) montre que *si Vs, tension de sortie du montage, augmente* pour une raison quelconque, *le terme -k1.Vs entraîne une diminution de  $\epsilon$*  et donc, puisque  $Vs = Ao . \epsilon$  , *une diminution de Vs . La réaction négative est donc un facteur de stabilité .*

C'est **cette réaction négative** de la sortie sur l'entrée qui **permet à l'AOP de fonctionner linéairement**.

**3.2 Réaction positive :**

Considérons maintenant un montage analogue où simplement le retour de la sortie sur l'entrée s'effectue sur la borne E+, c'est à dire l'entrée non-inverseuse :



Alors la tension différentielle d'entrée  $\epsilon$  a pour expression :

$$\epsilon = VR1 - Ve = R1 / (R1 + R2) . Vs - Ve .$$

Soit  $k2 = R1 / (R1 + R2)$  .  $k2$  est appelé *le taux de réaction positive*.

$$\epsilon = k2 . Vs - Ve .$$

Cette expression montre que si pour une raison quelconque, *Vs augmente*, alors  $\epsilon$  augmente .

Comme  $Vs = Ao . \epsilon$  , *Vs augmente encore plus* et la saturation est vite atteinte . On voit qu'*une réaction positive est un facteur d'instabilité du montage*. Un montage pourvu d'une **réaction positive** va fonctionner en **régime de saturation**, c'est à dire en **fonctionnement non-linéaire**.

**3.3 Conclusion :**

Le fonctionnement d'un montage comportant un amplificateur opérationnel, peut se résumer dans le tableau ci-dessous :

Montage comportant un AOP :	Fonctionnement :	Nom du montage :
en boucle ouverte :	non-linéaire .	comparateur simple .
avec réaction négative :	linéaire .	nombreux montages linéaires .
avec réaction positive :	non - linéaire.	comparateurs à deux seuils (triggers)

**4. Principaux montages de l'AOP fonctionnant en régime linéaire :**

**4.1 Règles à utiliser lors de l'étude des montages :**

a) Vérifier que la réaction est bien négative : retour de la sortie sur l'entrée E- .

b) On peut considérer alors que :

$$\epsilon = 0$$

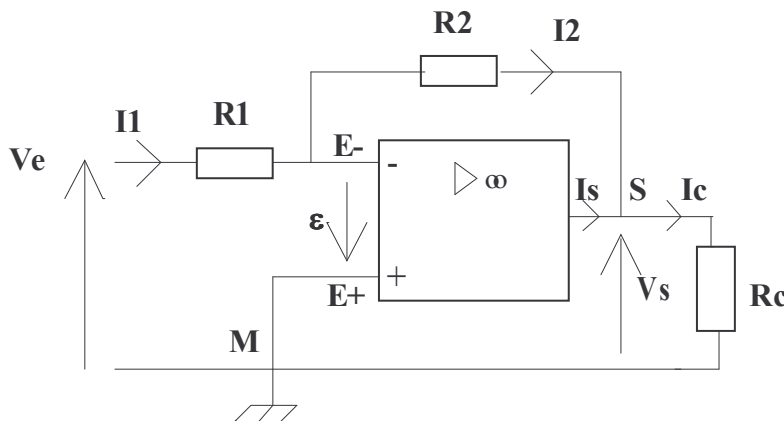
c) Dans tous les cas :  $i^- = 0$  ;  $i^+ = 0$  . (voir § 2 ) .

d) Vérifier que  $V_s$  se trouve dans les limites de la saturation :

$$V_L < V_s < V_H .$$

**4.2. Division de tension et théorème de Millman :** VOIR ANNEXE : On sera souvent amené à utiliser l'une ou l'autre formule.

**4.3 Amplificateur inverseur :**



$$\epsilon = 0 ; i^- = 0 ; i^+ = 0 .$$

$$\text{Donc } I_1 = I_2 .$$

$$V_e = R_1 . I_1 .$$

$$V_s = - R_2 . I_2 .$$

$$A_v = V_s / V_e \text{ est}$$

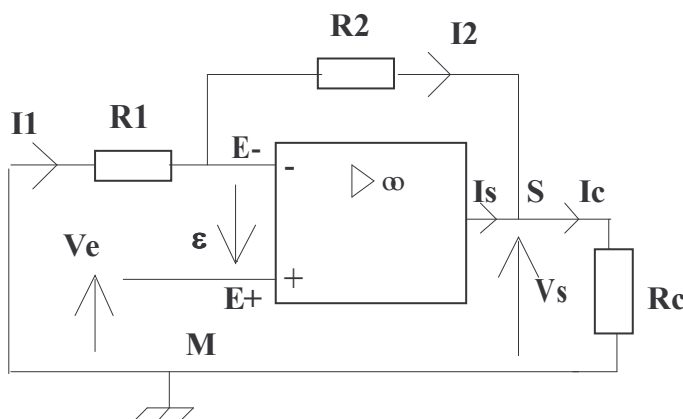
l'amplification en tension du montage .

$$A_v = (- R_2 . I_2 / R_1 . I_1) .$$

$$\text{Or } I_1 = I_2 . \text{ Donc :}$$

$$A_v = - R_2 / R_1$$

**4.4 Amplificateur non-inverseur :**



$$\epsilon = 0 ; i^- = 0 ; i^+ = 0 .$$

$$\text{Donc : } I_1 = I_2 .$$

$$V_e = - R_1 . I_1 .$$

$$V_s = - (R_1 . I_1 + R_2 . I_2) .$$

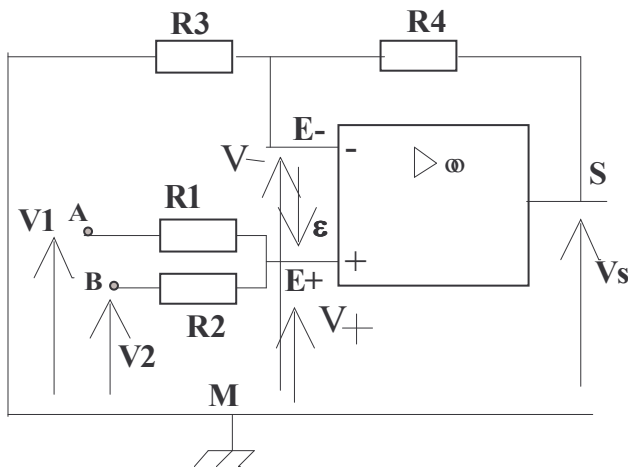
$$V_s = - (R_1 + R_2) . I_1 ,$$

$$A_v = V_s / V_e = (- (R_1 + R_2) . I_2) / (- R_1 . I_1)$$

Soit :

$$A_v = (R_1 + R_2) / R_1 = 1 + R_2 / R_1$$

**4.5. Montage sommateur :**



Pour trouver la valeur de  $V_s$ , on va utiliser la division de tension et le théorème de Millman. (à remplir en classe).  
 En effet :  $\epsilon = V_+ - V_- = 0$ . Donc  $V_+ = V_-$ .

$V_- =$

$V_+ =$

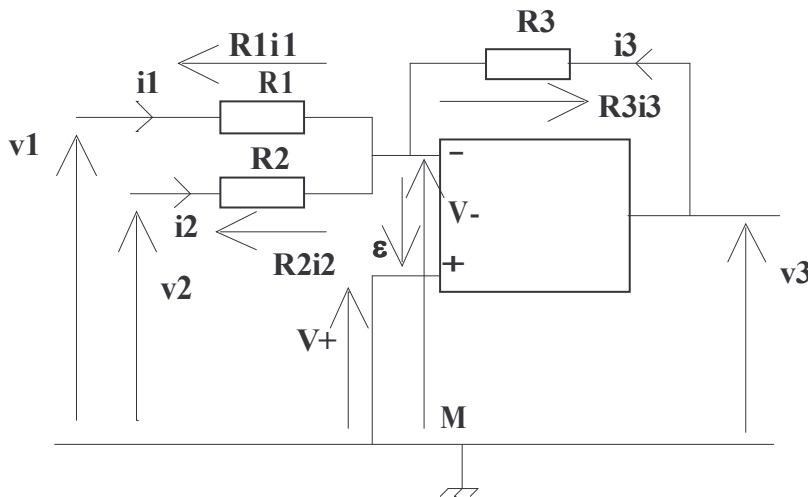
$V_+ =$

$V_+ = V_-$  . Donc :

$V_s =$

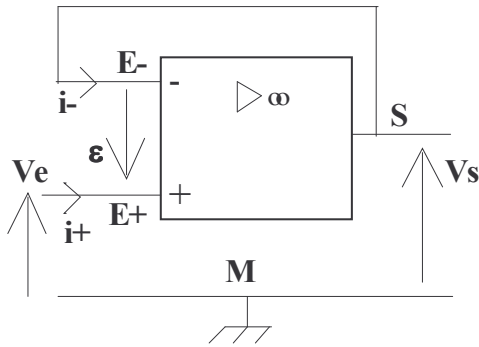
Si  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  :  $V_s =$

**4.6. Montage sommateur inverseur :**



On utilise la même méthode :

**4.7 Montage suiveur :**



Dans ce montage, on a bien une réaction négative .  
 $\epsilon = V_e - V_s$  . En régime linéaire,  $\epsilon = 0$  .

Donc :

$$V_s = V_e$$

La tension de sortie est égale à la tension d'entrée (dans les limites de la saturation) .

Le courant d'entrée  $i_+$  est très faible : la résistance

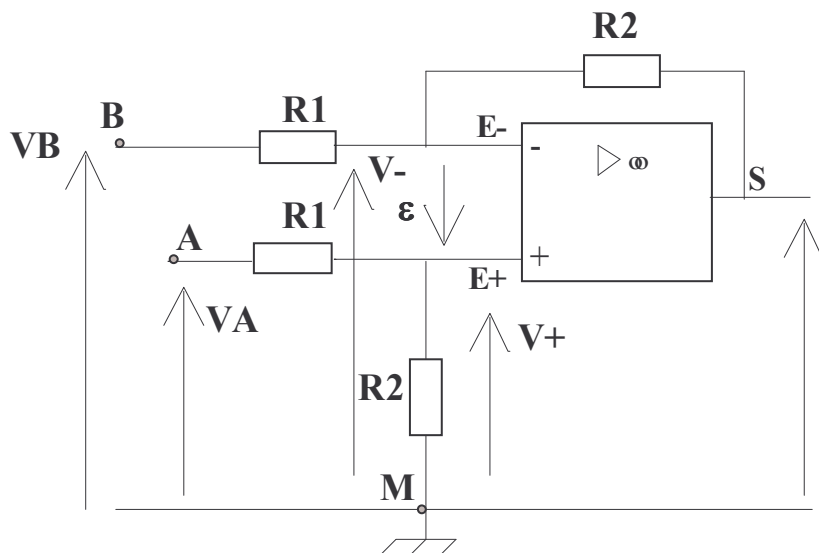
d'entrée du montage est très grande .

La résistance de sortie est très faible , le courant débité par l'AOP pouvant aller jusqu'à 10 mA pour les AOP courants.

Ce montage réalise une adaptation d'impédance .

On l'utilise pour reproduire la tension aux bornes de dispositifs ne pouvant débiter de courant ( différents capteurs ) .

**4.8. Amplificateur de différence :**



Supposons l'AOP parfait et fonctionnant en régime linéaire .

On a :

$$\epsilon = 0$$

$$i_- = 0 ; i_+ = 0$$

$$\epsilon = V_+ - V_- = 0$$

$$\text{Donc : } V_+ = V_-$$

Calculons  $V_+$  et  $V_-$  :

$i_+ = 0$  . Donc on peut utiliser les formules de la division de tension pour calculer  $V_+$  :

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_A$$

Pour calculer  $V_-$ , on utilise le théorème de Millman :

$$V_- = \frac{\frac{V_B}{R_1} + \frac{V_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{V_B.R_2 + V_S.R_1}{R_1.R_2} = \frac{V_B.R_2 + V_S.R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_+ = V_- \text{ . Donc : } \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_A = \frac{V_B.R_2 + V_S.R_1}{R_1 + R_2}$$

$$R_2.V_A = V_B.R_2 + V_S.R_1 \text{ . et}$$

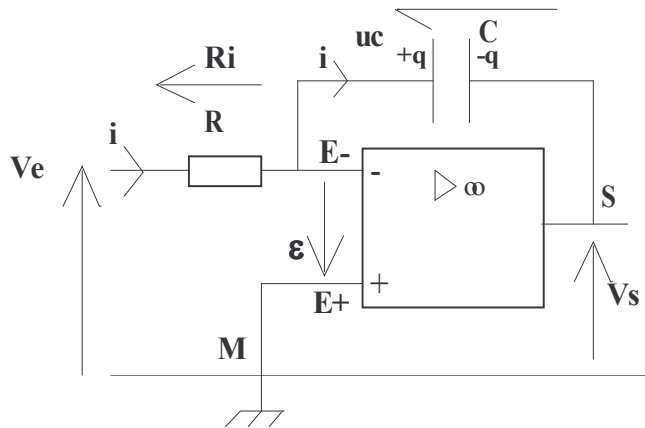
$$V_S = \frac{R_2}{R_1} (V_A - V_B)$$

D'où le nom du montage : **amplificateur de différence**

**4.9. Montages intégrateur et dérivateur :**

**4.9.1 Montage intégrateur :**

Montage de principe :



L'AOP est considéré comme parfait :  
 $i^- = 0$  ;  $i^+ = 0$  ; en régime linéaire ,  $\epsilon = 0$ .  
 C'est donc le même courant  $i$  qui passe dans la résistance  $R$  et dans le condensateur  $C$ .

On suppose qu'à l'instant  $t=0$ , le condensateur est déchargé :  $u_c = 0$ .

$$V_e = -\epsilon + Ri \quad \epsilon = 0$$

$$V_e = Ri ; i = V_e/R$$

Or  $i$  est le courant de charge du condensateur :  $i = dq/dt$ .

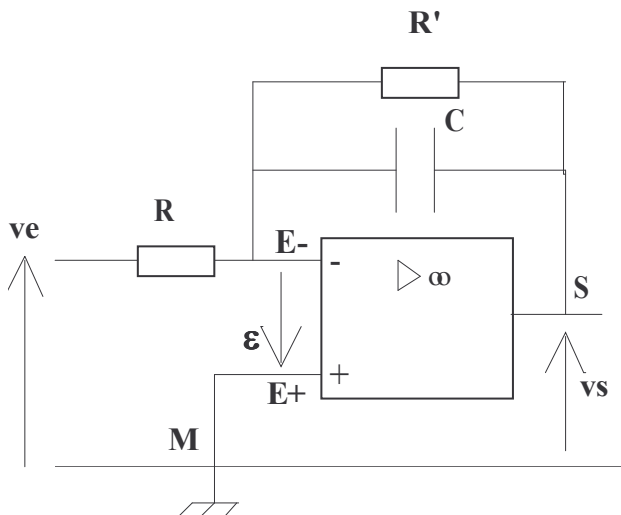
$$dq = i \cdot dt ; \text{ donc : } q = \int i \cdot dt = \int \frac{V_e}{R} \cdot dt$$

$$\text{Or } q = C \cdot u_c ; V_s + u_c + \epsilon = 0 ; \epsilon = 0 , \text{ donc } V_s = -u_c$$

$$V_s = -u_c = -\frac{q}{C} = -\frac{1}{C} \cdot \int \frac{V_e}{R} \cdot dt = -\frac{1}{RC} \cdot \int V_e \cdot dt$$

$$V_s = -\frac{1}{RC} \cdot \int V_e \cdot dt$$

d'où le nom de montage **intégrateur**.



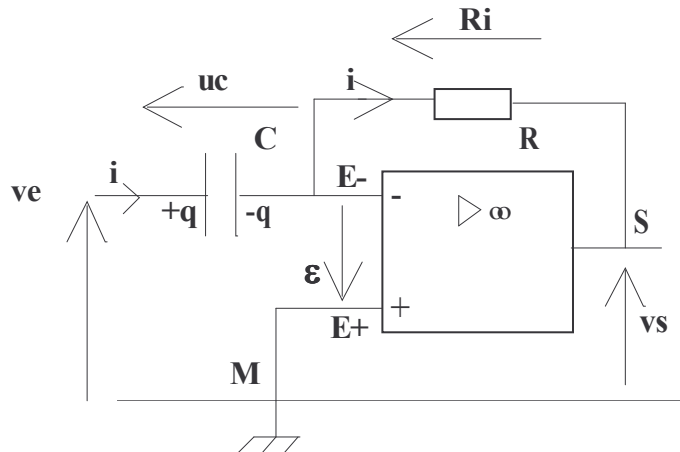
**Montage pratique:**

En pratique les défauts de l'AOP par rapport au modèle idéal impliquent une légère modification du montage de principe : on place en parallèle avec le condensateur une très grande résistance  $R'$ . Sans cette modification , l'AOP serait rapidement saturé.

Ex :  $R = 10 \text{ k}\Omega$  .  $C = 10 \text{ nF}$  .

$R' = 470 \text{ k}\Omega$  .

**4.9.2. Montage dérivateur :**



L'AOP est considéré comme parfait :  
 $i^- = 0$  ;  $i^+ = 0$  ; en régime linéaire ,  $\varepsilon = 0$ .  
 C'est donc le même courant  $i$  qui passe  
 dans la résistance  $R$  et dans le  
 condensateur  $C$  .

On suppose qu'à l'instant  $t=0$ , le  
 condensateur est déchargé :  $u_c = 0$ .

$$v_e = u_c - \varepsilon ; \varepsilon = 0 . \quad v_e = u_c .$$

$$v_s = - \varepsilon - R i ; \varepsilon = 0 . \quad v_s = -R i .$$

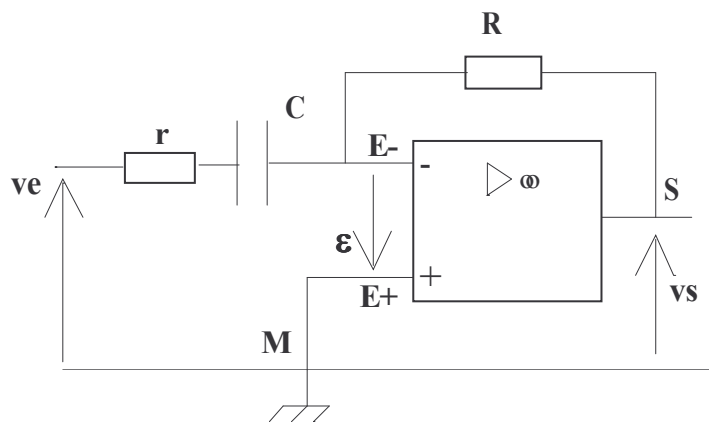
$$q = C . u_c ; \quad i = dq / dt = d(C u_c) / dt .$$

$$i = C . du_c / dt .$$

d'où le nom de montage dérivateur .

$$v_s = - R . C \, du_c / dt .$$

**Montage pratique :**

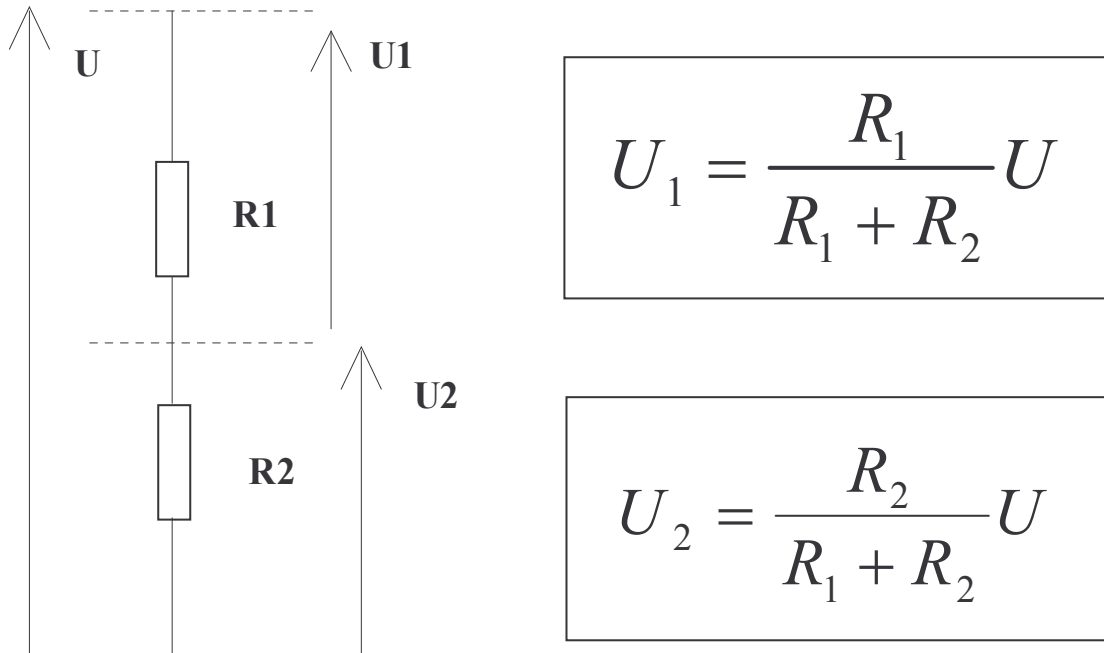


la résistance  $r$  (très faible devant  $R$ )  
 mise en série avec  $C$  permet  
 d'amortir les oscillations qui peuvent  
 apparaître en sortie si la résistance  
 de sortie du générateur qui délivre la  
 tension  $v_e$  est trop faible .

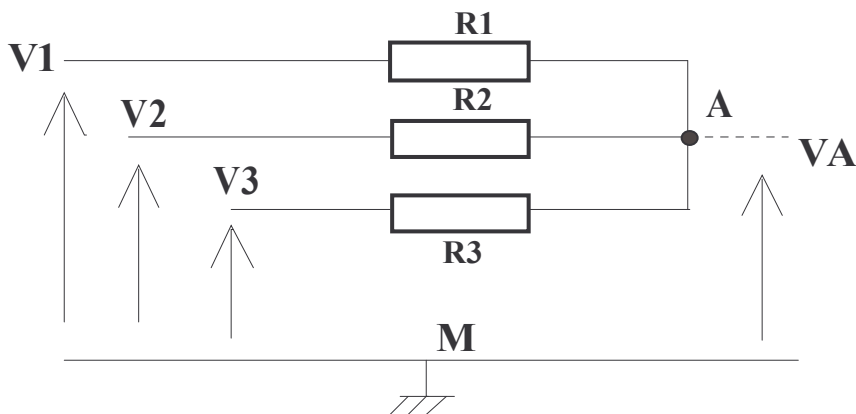
**Memento à l'usage des étudiants de B.T.S. Microtechniques  
 C.I.M.**

**DIVISION DE TENSION :**

*Nota Bene* : Les formules ci-dessous ne sont valables que si les différentes résistances montées en série sont toutes parcourues par le même courant.



**THEOREME DE MILLMAN :**



$$V_A = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$