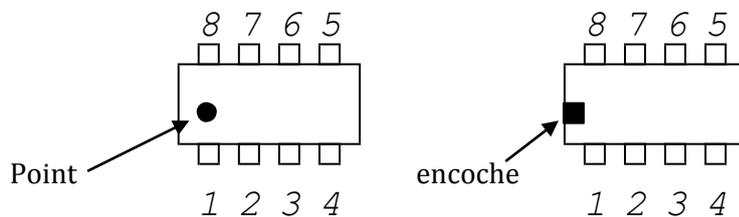


## CHAPITRE ..... : AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL EN REGIME LINEAIRE

### I°) GENERALITES ET DEFINITIONS :

L'amplificateur opérationnel (désigné par AOP) est un circuit intégré très répandu. On le trouve généralement dans une boîte plastique à double rangée de connexions (DIL : Dual In Line en Anglais) pour les applications courantes. Un boîtier contient, un, deux ou quatre AOP. Le brochage (attribution de rôle de chaque connexion) dépend du modèle utilisé. Par exemple, la figure 1 représente un AOP très courant du type 741 dans son boîtier le plus classique : DIL 8 broches. Beaucoup d'AOP simple possède le même brochage que celui-ci. La représentation est toujours vue du dessus. Le sens du boîtier est indiqué soit par un point en relief, soit par une encoche. Les broches sont numérotées comme le montre la figure. Un AOP est un circuit à deux entrées (l'une dite **inverseuse** et notés -, l'autre appelée **non inverseuse** et notée +) et une sortie. Le symbole le plus couramment utilisé (même s'il ne correspond pas au symbole normalisé) pour la représentation de l'AOP est donné sur la figure 2. Deux bornes sont prévues pour l'alimentation continue et d'autres connexions dont le rôle ne sera abordé dans ce cours existent seulement sur certains modèles.



1. Compensation du décalage
2. Entrée inverseuse
3. Entrée non inverseuse
4. Alimentation négative
5. Compensation du décalage
6. Sortie
7. Alimentation positive
8. Non connectée

Figure 1 : Brochage de nombreux AO. Simples comme le 741 ou le TL081

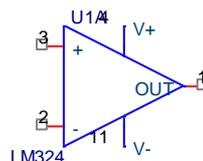


Figure 2 : Représentation de l'AOP

### 1°) Caractéristiques des amplificateurs opérationnels :

Pratiquement tous les amplificateurs opérationnels ont la même structure interne : ce sont des circuits monolithiques dont une « puce » de silicium constitue le substrat commun. Ils comportent en entrée un amplificateur différentiel suivi d'un étage adaptateur d'impédance ; l'amplificateur de sortie, de type push-pull, fonctionne en classe B. Toutes les liaisons sont directes. Ce sont des *amplificateurs différentiels* qui sont caractérisés par :

- Un gain en tension très important :  $\mu_D = \mu \approx 10^5$  à  $10^7$ .
- Une impédance d'entrée très grande :  $R_E \approx 10^5$  à  $10^{12} \Omega$ .
- Une impédance d'entrée de mode commun très grande :  $R_{EMC} \approx 10^8$  à  $10^{12} \Omega$ .
- Une impédance de sortie faible :  $R_S \approx 10$  à  $500 \Omega$ .
- La rejection du mode commun ( $\mu_D/\mu_{MC}$ ) est très grande.
- La réponse en fréquence va du continu jusqu'à des fréquences assez élevées : le produit gain-bande passante peut dépasser 100 MHz.
- Ils possèdent deux entrées notées + (l'entrée non inverseuse) et - (l'entrée inverseuse) mais ont une seule sortie.
- Ils utilisent, sauf exception, deux alimentations + U et - U, symétriques par rapport à la masse. Ces alimentations seront omises sur les schémas.

### 2°) Caractéristiques d'amplificateurs d'usage courant :

Ce sont des circuits à moyenne intégration. Le circuit équivalent du  $\mu A$  741 contient 24 transistors, 11 résistances et un condensateur.

### 3°) Alimentation :

Comme pour tout circuit amplificateur, il est nécessaire d'alimenter l'AOP afin de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du circuit. On utilise en général pour cela deux sources de tension symétriques selon le montage de la figure 3.

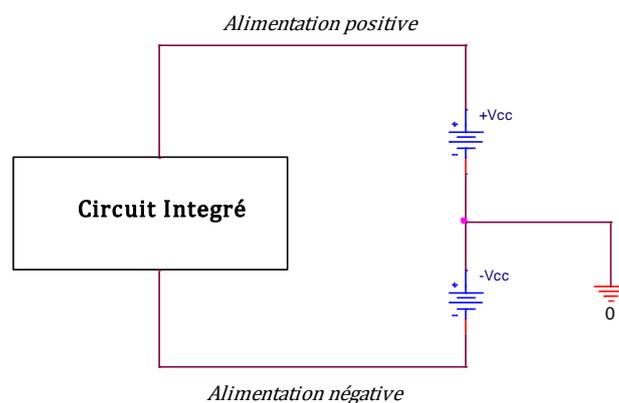


Figure 3 : Alimentation d'un AOP par deux sources de tension

En général, les alimentations ne sont pas représentées sur les schémas de principe, mais elles sont évidemment toujours présentes.

## II°) MODELE DE L'AOP IDEAL

### 1°) Définition :

Pour expliquer le fonctionnement des montages et calculer les caractéristiques principales, on utilise un modèle très simple pour décrire l'AOP en ne prenant en compte que des propriétés essentielles. Ce modèle est donc qualifié d'idéal. Il correspond au schéma de la figure 1 où  $\varepsilon = v^+ - v^-$  est la tension différentielle d'entrée et  $\pm V_{sat}$  sont les tensions de saturation de l'AOP. Pour l'AOP considéré comme idéal, on aura  $V_{cc} = +V_{sat}$ .

Sur la figure 4, on a considéré le gain A non infini de l'AOP afin de faire apparaître les tensions  $\pm \varepsilon = \frac{\pm V_{sat}}{A}$ . En pratique  $A > 10^6$  est considéré comme infini et  $\varepsilon_{sat} \approx 0$ .

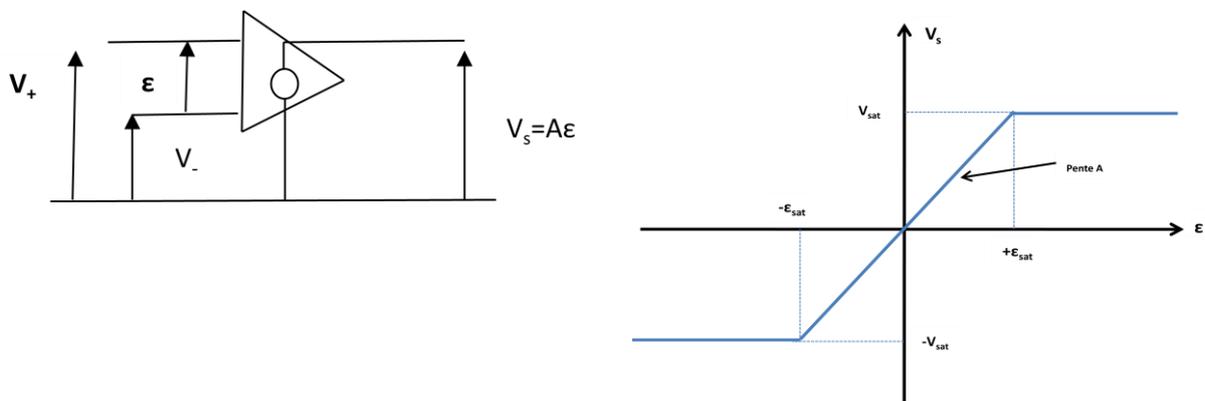


Figure 4 : Modèle de l'AO idéal

### ➤ Conséquences :

- ✓ La tension de sortie ne dépend que de la différence des tensions d'entrée
- ✓ Les courants d'entrée sont nuls
- ✓ La tension de sortie est indépendante de la charge.

### 2°) Régime de fonctionnement :

Selon la position du point de fonctionnement sur la caractéristique (figure 4) . On distingue deux types de fonctionnement :

- En Zone Linéaire  $\begin{cases} \varepsilon = 0 \\ -V_{sat} < V_s < +V_{sat} \end{cases}$
- En zone de saturation  $\begin{cases} V_s = -V_{sat} \text{ si } \varepsilon < 0 \\ V_s = +V_{sat}, \text{ si } \varepsilon > 0 \end{cases}$

Suivant le type de montage, l'AOP fonctionne soit dans sa zone linéaire, soit dans sa zone de saturation.

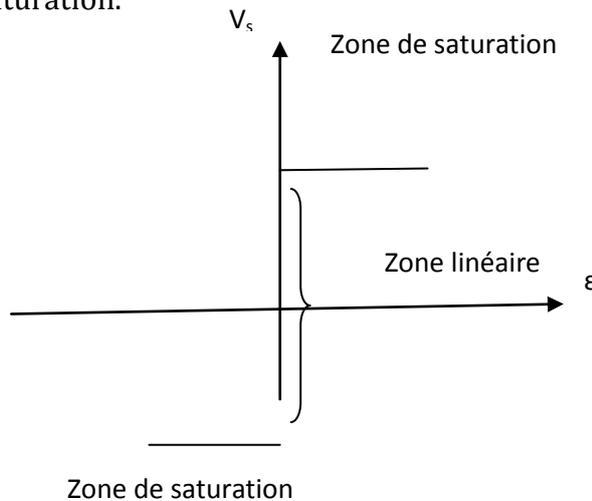


Figure 5 : Zone de fonctionnement sur la caractéristique de transfert.

a°) Fonctionnement sans contre-réaction :

Si l'AOP n'est pas associé à des composants qui relient sa sortie à l'une de ses entrées, il est en boucle ouverte. La présence de la moindre tension à l'entrée entraîne l'AOP en saturation. Le fonctionnement n'est jamais linéaire, les seuls états possibles sont  $v_s = \pm V_{sat}$ .

<p>Pour <math>\epsilon &gt; \epsilon_{sat} \Rightarrow v_s = +V_{sat}</math></p> <p>Pour <math>\epsilon &lt; -\epsilon_{sat} \Rightarrow v_s = -V_{sat}</math></p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

On dit que l'on a un fonctionnement en commutation. On réalise ainsi les comparateurs qui seront étudiés dans le prochain chapitre.

b°) Fonctionnement avec contre-réaction sur la borne -

On considère le montage de la figure 6

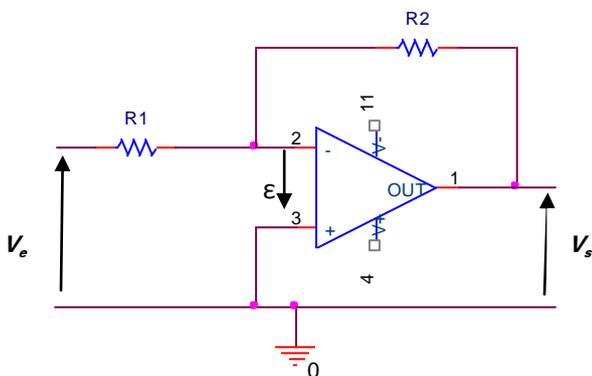


Figure 6 : Montage à contre réaction

En supposant que l'AOP fonctionne dans sa zone linéaire. On a  $\varepsilon=0$ , soit  $V_e=R_1I$  et  $V_s=-R_2I$ ,

D'où le gain en tension du montage :  $\frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} = Av$ . Cette relation reste valable tant que la tension d'entrée reste inférieure au maximum  $V_{e\max}$  conduisant à la saturation de l'AOP pour laquelle  $V_s=\pm V_{sat}$ , soit :  $|V_{e\max}| = \frac{|V_{sat}|}{Av}$ .

Un AOP est constitué principalement de trois étages qui sont :

**Etage 1** : C'est un amplificateur différentiel :

- les deux entrées sont les bases des deux transistors
- la sortie est la ddp entre les deux collecteurs  $V_{s1}=V_{c1}-V_{c2}$

**Etage 2** : C'est également un amplificateur différentiel :

- les entrées sont les bases des deux transistors, elles sont reliées aux collecteurs  $c_1$  et  $c_2$  du premier amplificateur.
- la sortie est la ddp entre un des collecteurs et la masse du montage

**Etage 3** : C'est un amplificateur de puissance permettant d'obtenir une grande amplification.

Notons qu'entre le 2ème et le 3ème étage, existe un montage supplémentaire appelé « transposeur » de tension. En effet, les tensions à amplifier appliquées à l'entrée de l'AOP sont généralement variables alternatives et le circuit intégré ne possède pas de condensateur de séparation des tensions continues et alternatives. L'étage intermédiaire c-à-d le transposeur de tension y remédie ( cf. schéma ).

Les générateurs de courant sont des montage à transistors. Afin d'assurer la polarisation de tous les transistors, il faut disposer de deux alimentations de  $\pm V_{cc} = \pm 15$  V dans le cas le plus courant. Une partie des transistors peut être constitué de NPN, l'autre de PNP (en particulier pour l'étage de puissance).

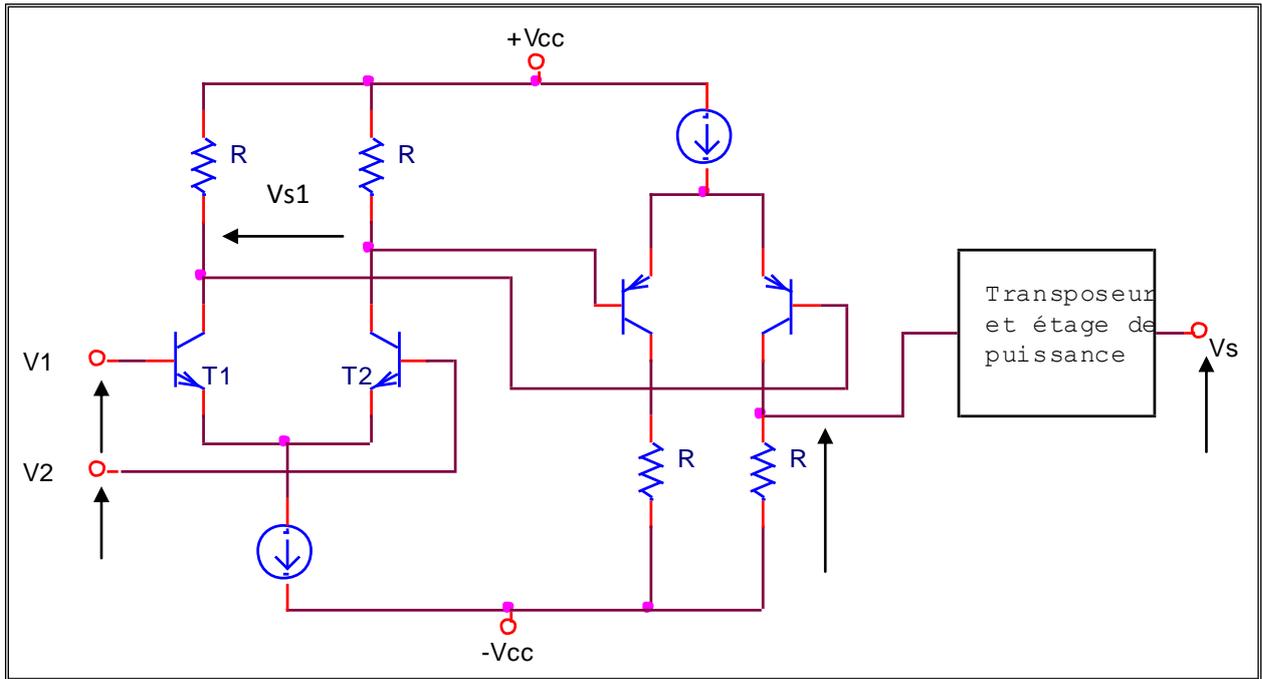


Figure 8 : Exemple d'amplificateur opérationnel (AOP intégré)

### III°) MONTAGES AMPLIFICATEURS DE BASE

#### 1°) Amplificateur inverseur :

Le montage est celui de la figure 6. Nous avons établi que  $\frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} = A_v$ .

On a un fonctionnement en amplificateur si le gain en tension « A » est supérieur à 1. Dans le cas contraire on a un atténuateur. L'amplificateur est dit « inverseur » car le gain en tension  $A_v$  est négatif.

#### 2°) Amplificateur non inverseur :

On considère le montage de la figure ci-dessous :

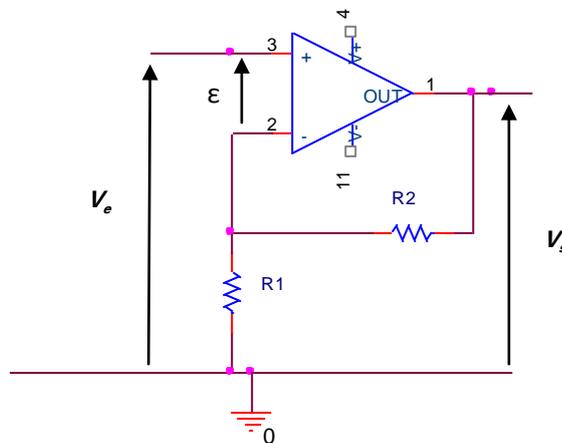


Figure 8 : Montage non inverseur

En supposant que l'AOP fonctionne dans sa zone linéaire, on a  $\varepsilon=0$ , soit  $V_e=R_1I$ , et  $V_s=(R_1+R_2)I$ , d'où le gain en tension du montage :  $\frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = Av$

Dans ce cas, le gain en tension est toujours supérieur à 1.

L'amplificateur est dit « non inverseur » car le gain en tension  $A_v$  est positif.

### Quelques remarques :

Le fonctionnement de l'AOP est dit linéaire si la tension de sortie est une fonction linéaire de la différence  $\varepsilon = V^+ - V^-$ . Un AOP ne peut délivrer une tension supérieure à la tension d'alimentation. Le fonctionnement linéaire ne pourra être réalisé que si :

$-V_{sat} < V_s < +V_{sat}$  où  $\pm V_{sat}$  sont des tensions voisines de  $\pm E$ , E étant la tension d'alimentation.

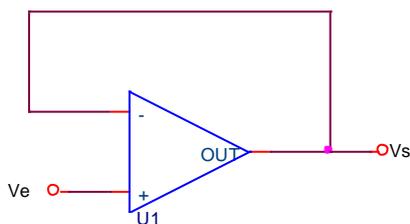
$$V_s = A\varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \frac{V_s}{A} = 0 \Leftrightarrow v^+ = v^- ; Z_E = Z_E^+ = Z_E^- = Z_E^{+-} = \infty$$

$$Z_E^+ = \frac{v^+}{i^+} = \infty \Rightarrow i^+ = 0 ; Z_E^- = \frac{v^-}{i^-} = \infty \Rightarrow i^- = 0 \text{ et } Z_s = 0$$

**Caractéristique d'un AOP parfait :** En régime linéaire, on a  $\varepsilon=0$ ,  $v^+ = v^-$  et  $i^+ = i^- = 0$

## IV°) AUTRES MONTAGES :

### 1°) Montage suiveur :

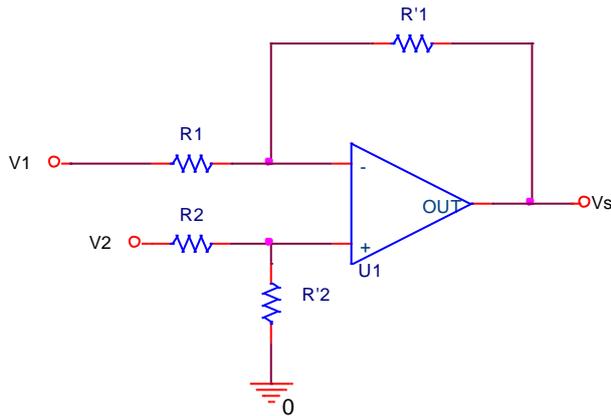


AOP parfait  $\Rightarrow V_s = V_e$  et  $A = 1$

Ce montage se caractérise par sa très grande résistance d'entrée et par sa très faible résistance de sortie. Il se comporte en entrée comme un excellent voltmètre qui ne perturbe pas le réseau sur lequel il est inséré. Il supporte en sortie des charges de résistance très faible sans que la tension de sortie soit très différente de celle se trouvant à son entrée.

### 2°) Montage soustracteur :

La sortie du montage est proportionnelle à la différence des signaux d'entrée.



AOP parfait  $\varepsilon=0$ ,  $v^+ = v^-$  et

$$i^+ = i^- = 0$$

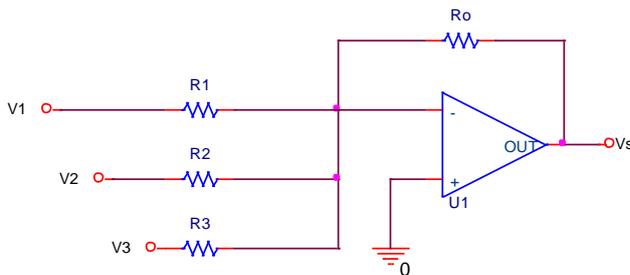
$$v^+ = \frac{R'_2}{R'_2 + R_2} V_2$$

$$v^- = \frac{R_1}{R_1 + R'_1} V_S + \frac{R'_1}{R_1 + R'_1} V_1$$

$$V_S = \left(1 + \frac{R'_1}{R_1}\right) \cdot \left\{ \frac{R'_2}{R_2 + R'_2} V_2 - \frac{R'_1}{R_1 + R'_1} V_1 \right\} = \left(1 + \frac{R'_1}{R_1}\right) \cdot \frac{R'_2}{R_2 + R'_2} V_2 - \frac{R'_1}{R_1} V_1 \quad . \text{ Si on pose } k = \frac{R'_1}{R_1} = \frac{R'_2}{R_2} \text{ alors } V_S = k \cdot (V_2 - V_1)$$

### 3°) Montage sommateur :

La sortie du montage est proportionnelle à la somme des signaux d'entrée.



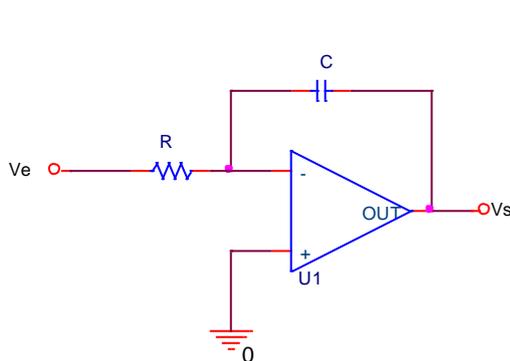
$$V_S = -R_o i$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

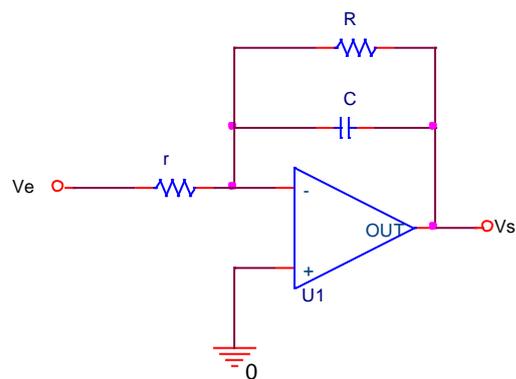
$$i = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

Dans le cas où  $R_1=R_2=R_3=R$  alors  $V_S = -\frac{R_o}{R} (V_1 + V_2 + V_3)$

### 4°) Montage intégrateur : La sortie est proportionnelle à l'intégrale du signal d'entrée.

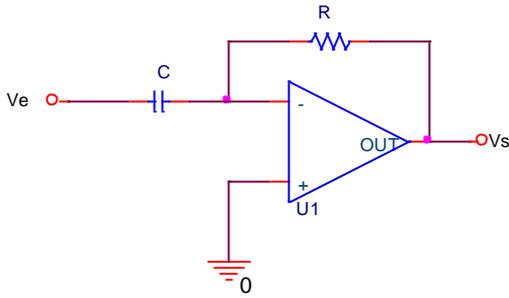


$$\frac{V_S}{V_e} = -\frac{1}{jRC\omega}$$

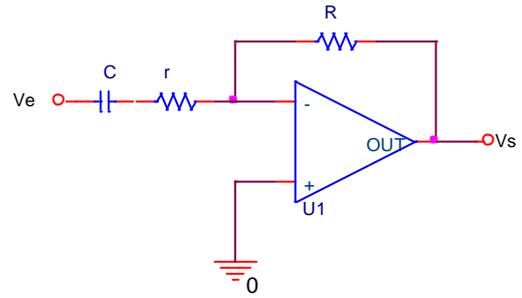


$$\frac{V_S}{V_e} = -\frac{R}{r} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_o}}$$

### 5°) Montage dérivateur : La sortie est proportionnelle à la dérivée du signal d'entrée.



$$\frac{V_S}{V_e} = -jRC\omega$$



$$\frac{V_S}{V_e} = -\frac{R}{r + \frac{1}{jC\omega}}$$

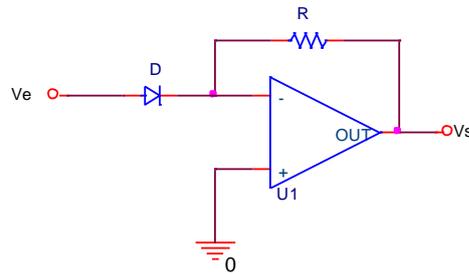
6°) Amplificateur réalisant une fonction exponentielle :

AOP parfait :

$$V_e = V_D \text{ et } I = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_D}{U_T}\right) \text{ avec } U_T = \frac{kT}{q}$$

Or  $V_S = -RI$ , donc on a :

$$V_S = -RI_S \cdot \exp\left(\frac{V_e}{U_T}\right)$$



7°) Amplificateur réalisant une fonction logarithme:

AOP parfait :

$$V_S = -V_D \text{ et } I = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_D}{U_T}\right) \text{ avec } I = \frac{V_e}{R} \text{ alors}$$

$$\text{on a : } V_D = U_T \cdot \ln\left(\frac{V_e}{RI_S}\right) \text{ et donc}$$

$$V_S = -U_T \cdot \ln\left(\frac{V_e}{RI_S}\right)$$

