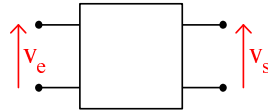


## Chapitre 5 : L'amplificateur opérationnel

### I Amplificateur de tension linéaire

#### A) Définition

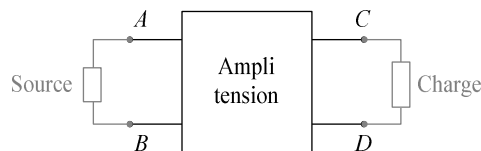
C'est un quadripôle linéaire tel que :



En RSF( $\omega$ ), en sortie ouverte,  $\underline{v}_s = \underline{\mu}(j\omega) \times \underline{v}_e$ .

$\underline{\mu}(j\omega)$  est l'amplification complexe en tension.

#### B) Modélisation

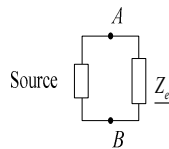


Source : dipôle actif

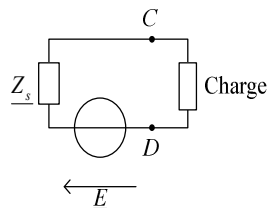
Charge : dipôle passif

- On admet que l'association {ampli + charge} des bornes A et B est un dipôle linéaire passif d'impédance  $\underline{Z}_e$  :

Schéma équivalent :



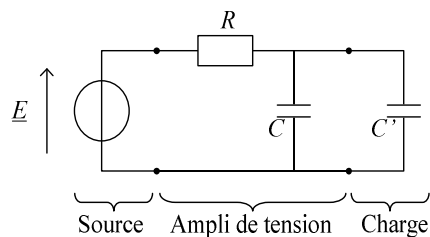
- On admet que l'association {ampli + source} des bornes C et D est un dipôle linéaire actif :



$\underline{Z}_s$  : impédance interne du quadripôle.  $\underline{E}$  : fém du dipôle linéaire actif.

$$\underline{v}_s = \underline{v}_{CD} = \underline{E} - \underline{Z}_s \times \underline{I}$$

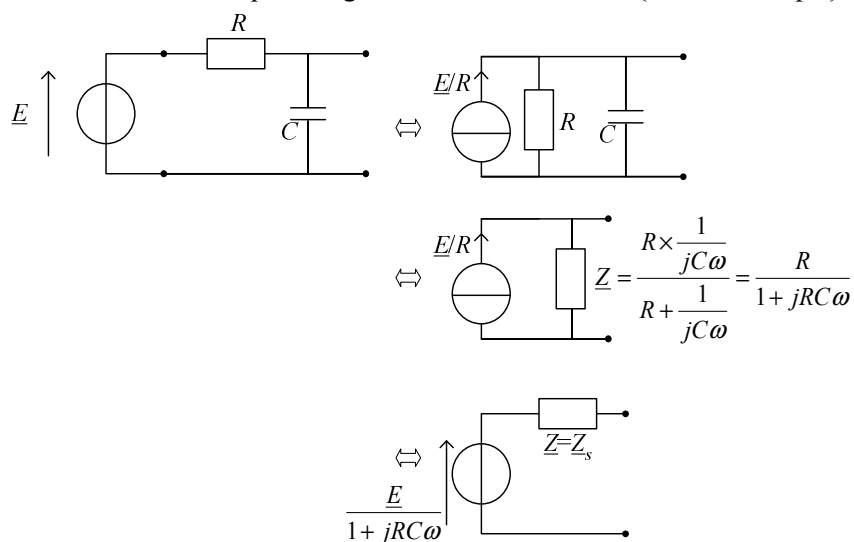
Exemple :



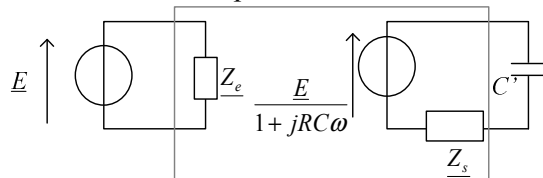
Calcul de l'impédance d'entrée du montage :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e &= \text{(Ampli + charge)} \\ &= R + \frac{1}{j(C+C')\omega} = R + \frac{1}{j(C+C')\omega} = \frac{1 + jR(C+C')\omega}{j(C+C')\omega} \end{aligned}$$

Calcul des caractéristiques du générateur de Thévenin {source + ampli}



Modélisation de l'amplificateur de tension :



Remarque :

$$\underline{\mu} = \frac{v_s}{v_e} = \frac{1}{1 + jRC\omega} \quad (\text{gain complexe en tension de l'ampli de tension})$$

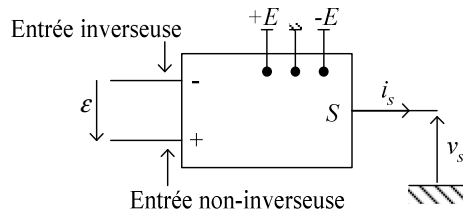
### C) Amplificateur de tension (linéaire) idéal

Un ampli est idéal si :

- $|Z_e| = \infty$ . Il n'y a pas de consommation de puissance électrique et  $\underline{V_e}$  est indépendant du circuit charge
- $\underline{Z_s} = 0$ . La sortie est un générateur de tension idéal.  $\underline{V_s}$  est indépendant de  $\underline{I_s}$ .

## II L'amplificateur opérationnel (AO)

### A) Présentation



### B) Fonctionnement linéaire et saturé de l'amplificateur opérationnel

On note  $V_{\text{sat}}$  la tension de saturation de l'amplificateur opérationnel

Si  $|v_s| < V_{\text{sat}} \approx E$ , on a un fonctionnement linéaire :

En RSF( $\omega$ ),  $\underline{v_s} = \underline{\mu} \times \underline{\varepsilon} - \underline{Z_s} \times \underline{i_s}$

Si  $v_s = +V_{\text{sat}}$ , on a une saturation positive.

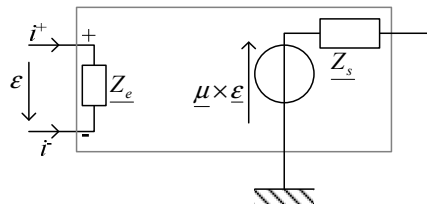
Si  $v_s = -V_{\text{sat}}$ , on a une saturation négative.

Dans les deux cas, le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel n'est pas linéaire.

Remarque : une boucle de rétroaction sur + (connexion S & borne +) rend instable le régime de fonctionnement linéaire de l'amplificateur opérationnel (il fonctionne alors en mode saturé). Sur la borne -, on peut avoir les deux types de fonctionnement.

### C) Modélisation de l'amplificateur opérationnel en régime linéaire

En RSF( $\omega$ ) :



$\underline{Z_e}$  : impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel

$i^-, i^+$  : courants de polarisation de l'amplificateur opérationnel

$Z_e$  : de  $10^5$  à  $10^{10} \Omega$ .

$\underline{\mu}$  : gain complexe de l'amplificateur opérationnel (dépend de  $\omega$ )

En basse fréquences,  $|\underline{\mu}| \approx 10^5 \gg 1$

$\underline{Z}_s$  : impédance de sortie de l'amplificateur opérationnel :  $Z_s$  de 10 à  $100 \Omega$ .

## D) Modèle de l'amplificateur opérationnel idéal, de gain infini

### 1) Régime linéaire

Un amplificateur opérationnel idéal de gain infini vérifie :

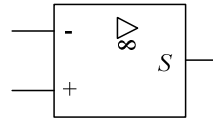
$$Z_e = \infty \Rightarrow i^- = i^+ = 0$$

$$\underline{Z}_s = 0$$

$$\mu = \infty \Rightarrow \underline{V}_s = \underline{\mu} \times \underline{\varepsilon} - \underbrace{\underline{Z}_s I_s}_{=0} \Rightarrow \underline{\varepsilon} = 0 \Rightarrow V^+ = V^- \quad (\underline{\varepsilon} = \underline{V}^+ - \underline{V}^-)$$

(valable aussi en régime variable)

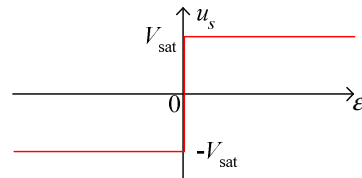
Représentation :



### 2) Régimes saturés

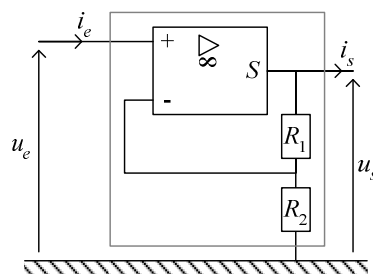
$$\varepsilon = V^+ - V^- > 0 \Rightarrow v_s = +V_{\text{sat}}$$

$$\varepsilon = V^+ - V^- < 0 \Rightarrow v_s = -V_{\text{sat}}$$



## III Montages à amplificateur opérationnel en fonctionnement linéaire

### A) Amplificateur de tension non inverseur



- Gain de l'amplificateur de tension :

$$V^- = u_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_s \text{ (diviseur de tension)}$$

$$u_e = V^+ = V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_s$$

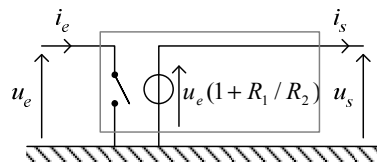
$$\text{Donc } \frac{u_s}{u_e} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

- Résistance d'entrée et de sortie :

$$R_e = \frac{u_e}{i_e} = \frac{u_e}{i^+} = +\infty$$

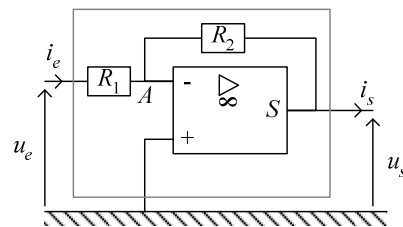
$$\underline{U_s} = \underline{\mu U_e} - \underbrace{\underline{Z_s I_s}}_{=0 \text{ car } \underline{u_s} \text{ indépendant de } \underline{i_s}}. \text{ Donc } R_s = 0$$

- Modélisation :



- On a un fonctionnement linéaire lorsque  $|u_s| < V_{\text{sat}}$ , c'est-à-dire  $|u_e| < \frac{V_{\text{sat}} R_2}{R_1 + R_2}$

## B) Amplificateur de tension inverseur



- Gain de l'amplificateur de tension :

D'après le théorème de Millman en A, on a :

$$\underline{V_A} = \frac{\frac{u_e}{R_1} + \frac{u_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}. \text{ Or, } \underline{V_A} = \underline{V^-} = \underline{V^+} = 0$$

On en tire donc que  $\frac{u_s}{u_e} = -\frac{R_2}{R_1}$  (vrai aussi en régime variable quelconque)

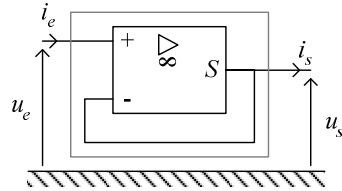
- Résistance d'entrée et de sortie :

D'après la loi des mailles  $u_e - R_1 i_e + 0 = 0$ . Donc  $R_e = \frac{u_e}{i_e} = R_1$

Ici, on a encore  $R_s = 0$

- Pour  $R_1 = R_2$ , on a ainsi  $u_s = -u_e$ .

### C) Suiveur de tension



- Gain de l'amplificateur de tension :

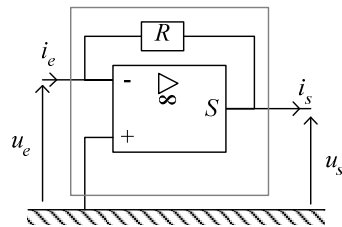
On a :  $u_e = V^+ = V^- = u_s$

$$R_e = \frac{u_e}{i_e} = \frac{u_e}{i^+} = +\infty$$

$$R_s = 0$$

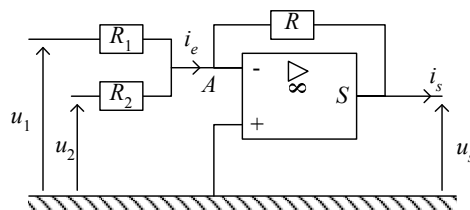
Permet ainsi la création d'un générateur linéaire avec une force électromotrice égale à la tension d'entrée sans prélever de courant au circuit source.

### D) Convertisseur courant – tension



On a, d'après la loi des mailles :  $u_s + Ri_e + 0 = 0$ . Donc  $u_s = -Ri_e$

### E) Sommateur de tension (inverseur)



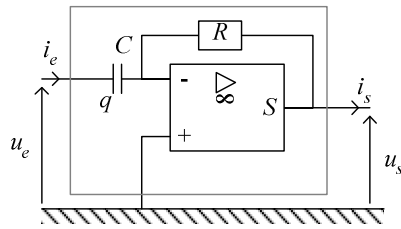
D'après le théorème de Millman en A, on a :

$$\underline{v_A} = \frac{\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_s}{R} + (-i^-)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R}}. \text{ Or, } \underline{v_A} = \underline{V^-} = \underline{V^+} = 0$$

$$\text{Donc } u_s = -\frac{R}{R_1}u_1 - \frac{R}{R_2}u_2$$

$$\text{Avec } R_1 = R_2, \text{ on a alors } u_s = -\frac{R}{R_1}(u_1 + u_2)$$

### F) Montage dérivateur

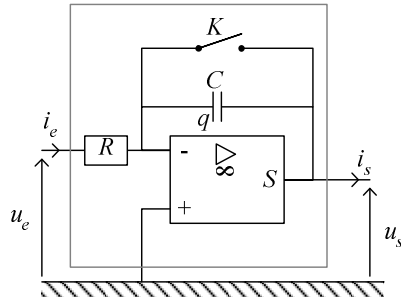


D'après la loi des mailles, on a (sachant que  $V^- = V^+ = 0$  et  $i^- = 0$ ) :

$$u_e + \frac{-q}{C} = 0 \text{ et } -Ri_e - u_s = 0. \text{ Donc } u_s = -Ri_e \text{ et } q = C \times u_e$$

$$\text{Or, } i_e = \frac{dq}{dt}. \text{ Donc } u_s = -R \frac{dq}{dt} = -RC \frac{du_e}{dt}$$

### G) Intégrateur (montage théorique)



A  $t = 0$ , on ouvre l'interrupteur  $K$ . Ainsi,  $q(0) = 0$

D'après la loi des mailles, on a :

$$u_e - Ri_e = 0 \text{ et } \frac{-q}{C} - u_s = 0. \text{ Comme } i^- = 0, i_e = \frac{dq}{dt}.$$

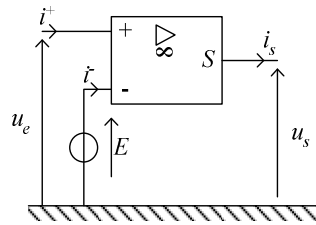
$$\text{Donc } u_e = Ri_e = R \frac{dq}{dt} = -RC \frac{du_s}{dt}$$

$$\text{Donc } u_s(t) - \underbrace{u_s(0)}_{=0} = \int_0^t du_s = \int_0^t -\frac{1}{RC} u_e(t') dt' = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_e(t') dt'$$

Le montage est un montage théorique car les courants de polarisation de l'amplificateur opérationnel ne sont pas tout à fait nuls.

## IV Montages utilisant l'AO en fonctionnement non linéaire

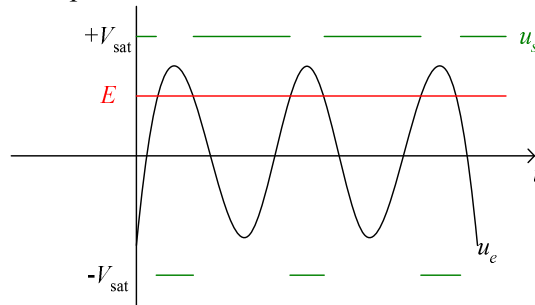
### A) Comparateur de base



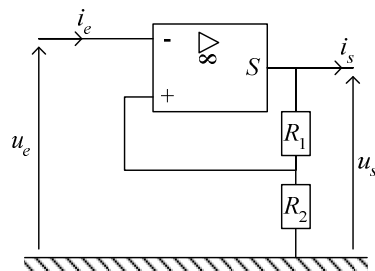
Si  $u_e < E$ , on a  $\varepsilon = u_e - E < 0$ . Donc  $u_s = -V_{\text{sat}}$

Si  $u_e > E$ , on a  $\varepsilon = u_e - E > 0$ . Donc  $u_s = +V_{\text{sat}}$

Exemple :



### B) Comparateur à hystérésis



(Bornes + et - inversées par rapport au montage amplificateur non inverseur)

$$V^+ = u_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \pm V_{\text{sat}}$$

- Si  $u_s = +V_{\text{sat}}$  : l'amplificateur opérationnel reste en saturation positive tant que

$$u_e + \varepsilon - V^+ = 0 \text{ (loi des mailles), c'est-à-dire tant que } u_e = -\varepsilon + V^+ < \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$

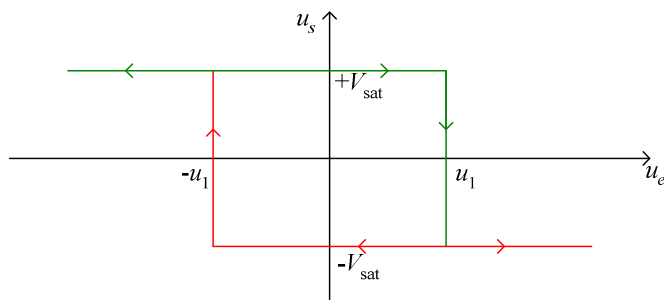
(car  $\varepsilon > 0$  en saturation positive)

- De même, si  $u_s = -V_{\text{sat}}$ , l'amplificateur opérationnel reste en saturation négative

$$\text{tant que } u_e > -\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$

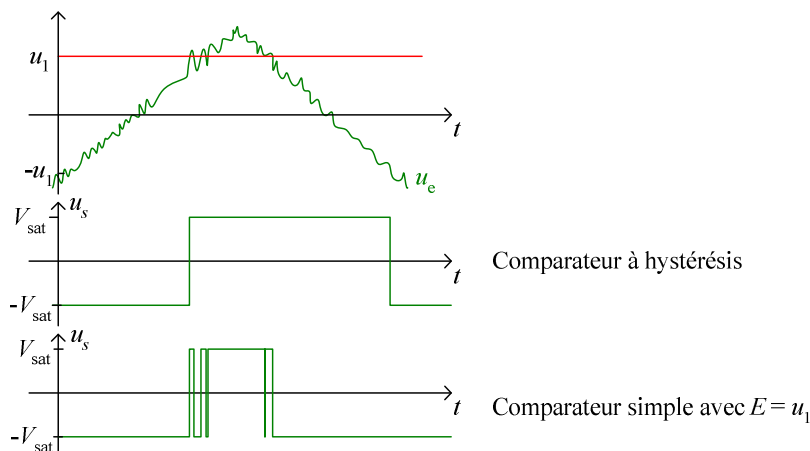
- On pose  $u_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$

Graphes de  $u_s$  en fonction de  $u_e$  :

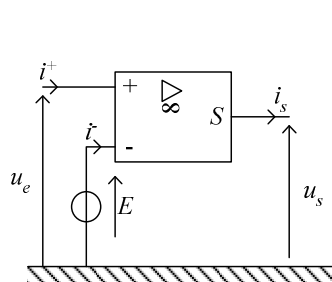


On remarque que  $u_s$  peut avoir deux valeurs différentes à certains endroits pour une valeur de  $u_e$ . La valeur de  $u_s$  dépend alors dans cette zone du dernier changement d'état de saturation de l'amplificateur opérationnel.

- Application du comparateur à hystérésis de préférence au comparateur simple : dans le cas où on a affaire à un signal peu clair, on observe qu'un seul changement d'état au lieu de plusieurs dans le cas d'un comparateur simple :



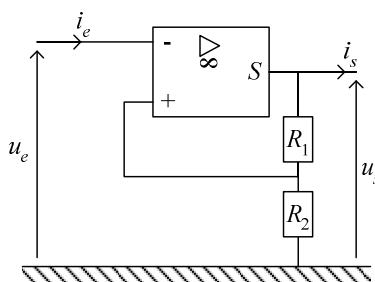
### C) Détecteur de signe



Avec  $E = 0$

On a alors  $u_s = \text{sgn}(u_e) \times V_{\text{sat}}$

ou



Avec  $R_2 \gg R_1$