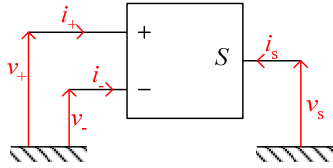


# Chapitre : L'amplificateur opérationnel

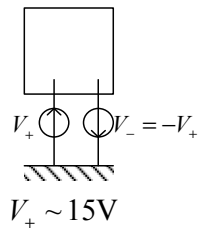
## I Présentation



### A) Entrées et sortie

- (1)  $E^+$  : entrée non inverseuse. Potentiel  $v_+$ , intensité  $i_+$
- (2)  $E^-$  : entrée inverseuse. Potentiel  $v_-$ , intensité  $i_-$ .  
 $\mathcal{E} = v_+ - v_-$  : tension différentielle d'entrée.
- (3)  $S$  : sortie. Potentiel  $v_s$ , intensité  $i_s$ .

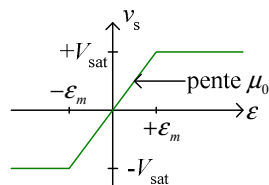
### B) Alimentation



## II Fonctionnement en régime statique

$v_+ = \text{cte}$ ,  $v_- = \text{cte}$ ,  $v_s = \text{cte}$ .

### A) Caractéristique



#### 1) Régime linéaire

C'est lorsque  $-\mathcal{E}_m < \mathcal{E} < \mathcal{E}_m$  ; on a alors  $-V_{\text{sat}} < v_s < V_{\text{sat}}$  et  $v_s = \mu_0 \mathcal{E}$   
( $\mu_0 \sim 10^5$ )

## 2) Régime de saturation

Lorsque  $\varepsilon > \varepsilon_m$ ,  $v_s = +V_{\text{sat}}$  et lorsque  $\varepsilon < -\varepsilon_m$ ,  $v_s = -V_{\text{sat}}$ .

## B) Amplificateur opérationnel parfait

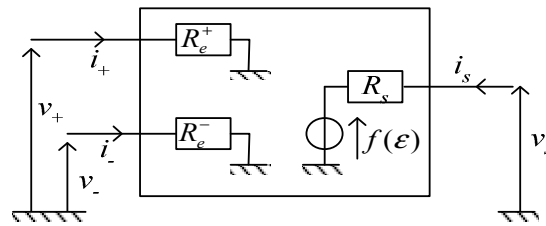
### 1) AO idéal

C'est un amplificateur opérationnel tel que :

- Les impédances d'entrée sont infinies :  $i_+ = i_- = 0$
- L'impédance de sortie est nulle :  $v_s$  est indépendant de la charge.

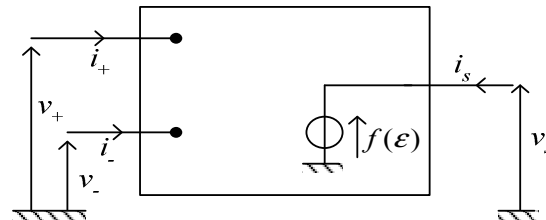
Modélisation :

- D'un AO réel :



On a  $v_+ = R_e^+ i_+$ ,  $v_- = R_e^- i_-$ ,  $v_s = f(\varepsilon) + R_s i_s$

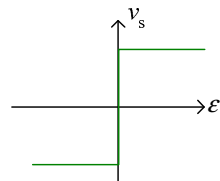
- D'un AO idéal :



On a ici  $R_e^- = +\infty$ ,  $R_e^+ = +\infty$ ,  $R_s = 0$ .

### 2) AO parfait

- C'est un AO idéal pour lequel  $\mu_0$  est infini.
- Fonctionnement :



En régime linéaire,  $\varepsilon = 0$ , et  $v_s \in ]-V_{\text{sat}}, +V_{\text{sat}}[$ .

En régime saturé, si  $\varepsilon > 0$ ,  $v_s = +V_{\text{sat}}$  et si  $\varepsilon < 0$ ,  $v_s = -V_{\text{sat}}$ .

### III Fonctionnement dynamique, stabilité

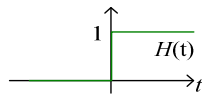
#### A) Relation entrée-sortie

$\varepsilon(t) \rightarrow v_s(t)$ . A-t-on  $v_s(t) = \mu_0 \varepsilon(t)$  ? Pas très réaliste...

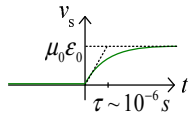
##### 1) Modélisation

$$\tau \frac{dv_s}{dt} + v_s = \mu_0 \varepsilon \text{ tant que } -V_{\text{sat}} < v_s < +V_{\text{sat}}.$$

##### 2) Analyse

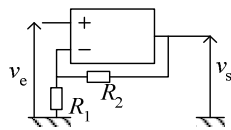


Pour  $\varepsilon = \varepsilon_0 H(t)$ , on a ainsi  $v_s = \mu_0 \varepsilon_0 (1 - e^{-t/\tau}) H(t)$  :



#### B) Stabilité du régime linéaire

##### 1) Exemple 1 : amplificateur non inverseur



- AO parfait, régime statique :

$$v_e = v^+, v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s = \frac{1}{k} v_s \quad (k > 1)$$

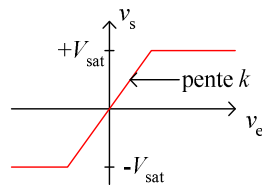
En régime linéaire :

$$\varepsilon = 0, \text{ donc } v_s = k v_e$$

En régime de saturation :

$$v_s = \pm V_{\text{sat}}, \text{ donc } v_- = \pm V_{\text{sat}}.$$

Si  $v_e < \frac{-V_{\text{sat}}}{k}$ ,  $v_s = -V_{\text{sat}}$  ; si  $v_e > \frac{V_{\text{sat}}}{k}$ ,  $v_s = +V_{\text{sat}}$



- AO idéal, régime variable :

$$v_e(t), v_s(t)$$

$$v_+ = v_e, v_- = \frac{v_s}{k} \quad (k = \frac{R_1 + R_2}{R_1})$$

Régime linéaire :

$$\tau \frac{dv_s}{dt} + v_s = \mu_0 (v_e - \frac{v_s}{k})$$

$$\text{Soit } \tau \frac{dv_s}{dt} + v_s \left( \underbrace{1}_{\ll \frac{\mu_0}{k}} + \frac{\mu_0}{k} \right) = \mu_0 v_e.$$

- Solution homogène associée :  $v_s = Ae^{-\frac{t}{\tau k}}$

Solution particulière : dépend de  $v_e(t)$ .

(1) Si  $v_e = v_0 h(t)$ , une solution particulière est  $kv_0 h(t)$

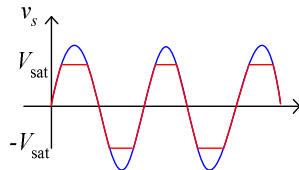
(2) Si  $v_e = v_0 \cos(\omega t)$  :

Solution particulière :

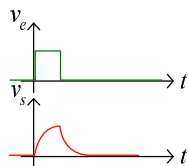
$$(\tau i \omega + \frac{\mu_0}{k}) v_s = \mu_0 v_0 \quad \text{Donc } v_s = \frac{\mu_0 v_0}{\frac{\mu_0}{k} + \tau i \omega} = \frac{kv_0}{1 + i \omega \tau \frac{k}{\mu_0}} \quad (\frac{k}{\mu_0} \ll 1)$$

$$\text{Et } v_s = \frac{kv_0}{\sqrt{1 + \omega \tau \frac{k}{\mu_0}}} \cos(\omega t + \varphi) \approx kv_0 \cos(\omega t)$$

On a toujours  $|v_s| < V_{\text{sat}}$  :



(3) Petite perturbation :

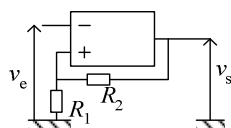


Conclusion :

Tant que  $|v_s| < V_{\text{sat}}$ , le régime linéaire est possible et stable.

Le régime ne sera saturé que si  $v_e$  est trop grand.

## 2) Exemple 2 : comparateur à hystérésis



(Même montage que précédemment en échangeant + et -)

- AO parfait, régime statique :  
En régime statique,  $v_s = kv_e$  ; en réalité, cette solution n'est pas valable (voir après)

- AO idéal, régime variable :

On a  $v_+ = \frac{v_s}{k}$ ,  $v_- = v_e$ . Donc  $\varepsilon = \frac{v_s}{k} - v_e$

L'équation différentielle s'écrit :

$$\tau \frac{dv_s}{dt} + v_s = \frac{\mu_0}{k} v_s - \mu_0 v_e$$

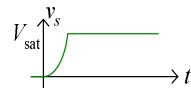
$$\text{Soit } \tau \frac{dv_s}{dt} + v_s \left(1 - \frac{\mu_0}{k}\right) = -\mu_0 v_e$$

Solution homogène :  $v_s = Ae^{t/(k\tau/\mu_0)}$ , et  $\frac{k\tau}{\mu_0} = \tau' \ll \tau$

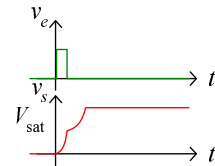
On a donc une croissance exponentielle ( $\tau'$ ) encore plus rapide que la réaction de l'AO ( $\tau$ )

Solution particulière :

(1) Pour  $v_e = v_0 h(t)$  :



(2) Pour une petite perturbation :



- Retour sur le régime statique :

Le régime linéaire n'est pas possible (la moindre perturbation entraîne le régime saturé) ; on a toujours  $v_s = \pm V_{\text{sat}}$ .

$$\text{Ainsi, } v_+ = \pm \frac{V_{\text{sat}}}{k}$$

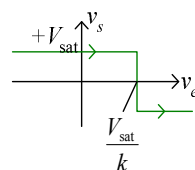
$$\text{Et } v_- = v_e$$

$$\text{Donc } \varepsilon = -v_e \pm \frac{V_{\text{sat}}}{k}$$

- Pour avoir  $\varepsilon > 0$ , il suffit (mais non nécessaire) que  $v_e < -\frac{V_{\text{sat}}}{k}$ .

Pour  $v_e < -\frac{V_{\text{sat}}}{k}$ , on a  $v_s = +V_{\text{sat}}$ , et donc  $v_+ = +\frac{V_{\text{sat}}}{k}$  :

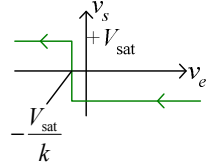
Ceci tant que  $\varepsilon$  reste positif, c'est-à-dire tant que  $v_e < \frac{V_{\text{sat}}}{k}$  :



- Pour avoir  $\varepsilon < 0$ , il suffit que  $v_e > \frac{V_{\text{sat}}}{k}$ , et on a alors  $v_s = -V_{\text{sat}}$ .

Si maintenant  $v_e$  diminue :

$v_+ = -\frac{V_{\text{sat}}}{k}$  et  $v_- = v_e$  tant que  $\varepsilon < 0$ , c'est-à-dire  $v_e < -\frac{V_{\text{sat}}}{k}$  :



### 3) Généralisation

- Premier cas : l'AO n'a pas de rétroaction sur la borne –  
La moindre perturbation fait diverger  $v_s$   
La saturation sera haute ou basse selon les bornes d'entrées.
- Deuxième cas : l'AO a une rétroaction sur la borne –  
Le régime linéaire peut être stable, selon les composants extérieurs à l'AO.  
Même si le régime linéaire est stable, l'AO peut saturer si  $v_e$  est trop grand.