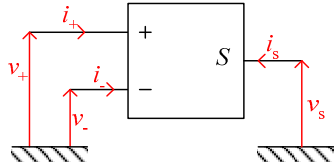


Chapitre : L'amplificateur opérationnel

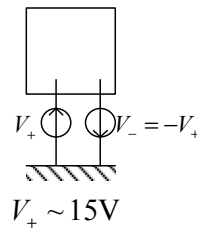
I Présentation



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 .

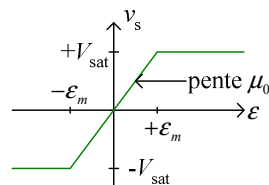
B) Alimentation



II Fonctionnement en régime statique

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

A) Caractéristique



1) Régime linéaire

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

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

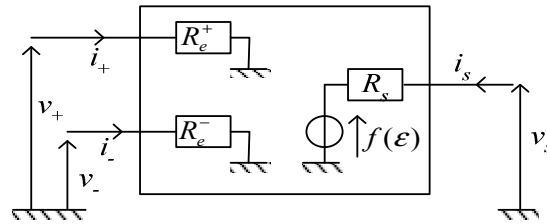
1) AO idéal

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.

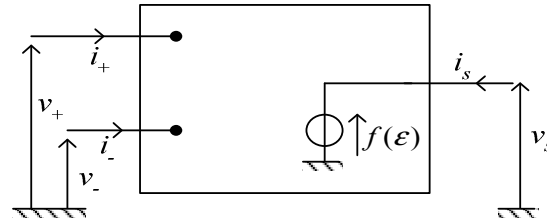
Modélisation :

- D'un AO réel :



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

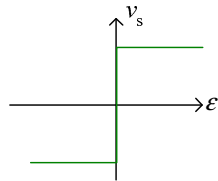
- D'un AO idéal :



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

2) AO parfait

- C'est un AO idéal pour lequel μ_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

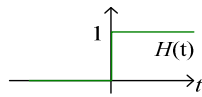
A) Relation entrée-sortie

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

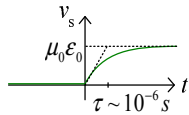
1) Modélisation

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

2) Analyse

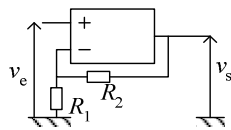


Pour $\varepsilon = \varepsilon_0 H(t)$, on a ainsi $v_s = \mu_0 \varepsilon_0 (1 - e^{-t/\tau}) H(t)$:



B) Stabilité du régime linéaire

1) Exemple 1 : amplificateur non inverseur



- AO parfait, régime statique :

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

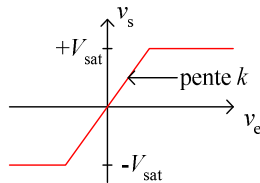
En régime linéaire :

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

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 :

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

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

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 : $v_s = A e^{-\frac{t}{\tau} \frac{\mu_0}{k}}$

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

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

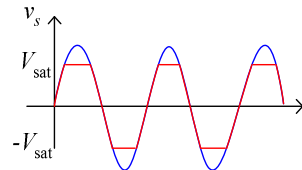
(2) Si $v_e = v_0 \cos(\omega t)$:

Solution particulière :

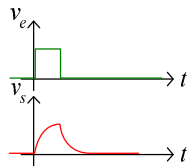
$$(\tau i \omega + \frac{\mu_0}{k}) v_s = \mu_0 v_0 \quad \text{Donc } v_s = \frac{\mu_0 v_0}{\frac{\mu_0}{k} + \tau i \omega} = \frac{kv_0}{1 + i \omega \tau \frac{k}{\mu_0}} \quad (\frac{k}{\mu_0} \ll 1)$$

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

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



(3) Petite perturbation :

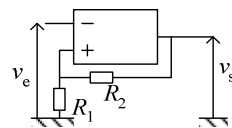


Conclusion :

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 :

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

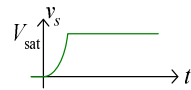
$$\text{Soit } \tau \frac{dv_s}{dt} + v_s \left(1 - \frac{\mu_0}{k}\right) = -\mu_0 v_e$$

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

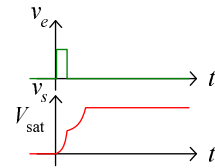
On a donc une croissance exponentielle (τ') encore plus rapide que la réaction de l'AO (τ)

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 $v_s = \pm V_{\text{sat}}$.

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

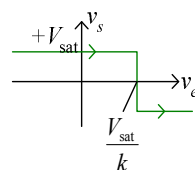
$$\text{Et } v_- = v_e$$

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

- 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 $v_+ = +\frac{V_{\text{sat}}}{k}$:

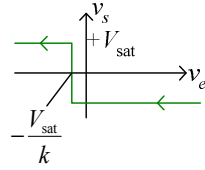
Ceci tant que ε reste positif, c'est-à-dire tant que $v_e < \frac{V_{\text{sat}}}{k}$:



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

Si maintenant v_e diminue :

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



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.