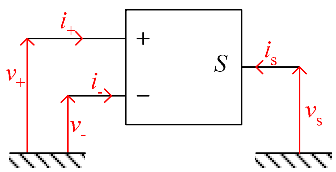
Chapitre : L'amplificateur opérationnel

I Présentation



A) Entrées et sortie

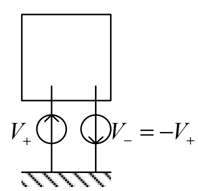
(1) E^+ : entrée non inverseuse. Potentiel v_+, intensité i_+

(2) E^- : entrée inverseuse. Potentiel v_-, intensité i_-.

$\varepsilon = v_+ - v_-$: tension différentielle d'entrée.

(3) S : sortie. Potentiel v_s, intensité i_s.

B) Alimentation

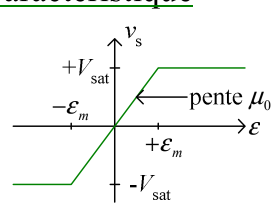


$V_+ \sim 15\text{V}$

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

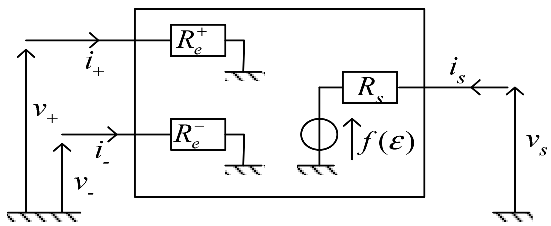
1) AO idéal

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.

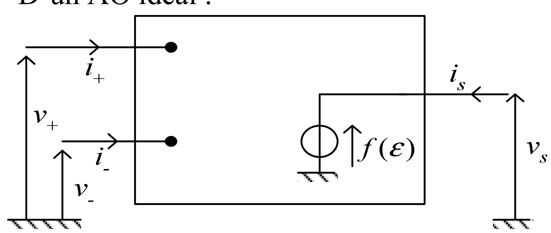
Modélisation :

- D'un AO réel :



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

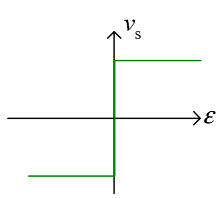
- D'un AO idéal :



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

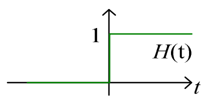
A) Relation entrée–sortie

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

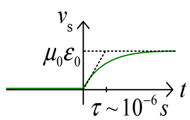
1) Modélisation

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

2) Analyse

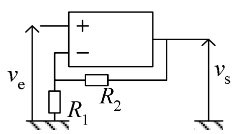


Pour $\varepsilon = \varepsilon_0 H(t)$, on a ainsi $v_s = \mu_0 \varepsilon_0 (1 - e^{-t/\tau}) H(t)$:



B) Stabilité du régime linéaire

1) Exemple 1 : amplificateur non inverseur



- AO parfait, régime statique :

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

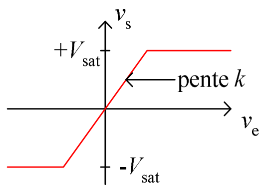
En régime linéaire :

$\varepsilon = 0$, donc $v_s = k v_e$

En régime de saturation :

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

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



- AO idéal, régime variable :

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

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

Régime linéaire :

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

Soit $\tau \dfrac{dv_s}{dt} + v_s (\underbrace{1}_{<<\frac{\mu_0}{k}} + \dfrac{\mu_0}{k}) = \mu_0 v_e$.

- Solution homogène associée : $v_s = Ae^{-\frac{t}{\tau}\frac{\mu_0}{k}}$

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

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

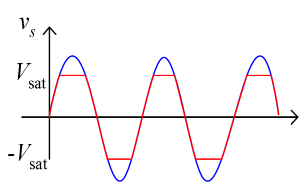
(2) Si $v_e = v_0 \cos(\omega . t)$:

Solution particulière :

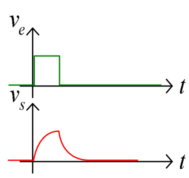
$(\tau . i\omega + \dfrac{\mu_0}{k}) \underline{v}_s = \mu_0 v_0$ Donc $\underline{v}_s = \dfrac{\mu_0 v_0}{\dfrac{\mu_0}{k} + \tau . i\omega} = \dfrac{kv_0}{1 + i\omega\tau \dfrac{k}{\mu_0}}$ $(\dfrac{k}{\mu_0} << 1)$

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

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



(3) Petite perturbation :

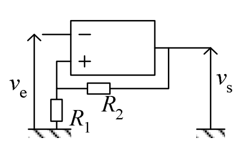


Conclusion :

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 :

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

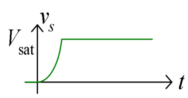
Soit $\tau \frac{dv_s}{dt} + v_s(1 - \frac{\mu_0}{k}) = -\mu_0 v_e$

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

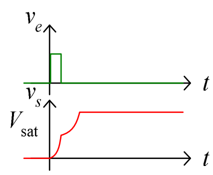
On a donc une croissance exponentielle (τ') encore plus rapide que la réaction de l'AO (τ)

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

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

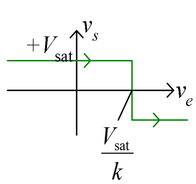
Et $v_- = v_e$

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

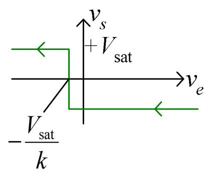
Ceci tant que ε reste positif, c'est-à-dire tant que $v_e < \frac{V_{\text{sat}}}{k}$:



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