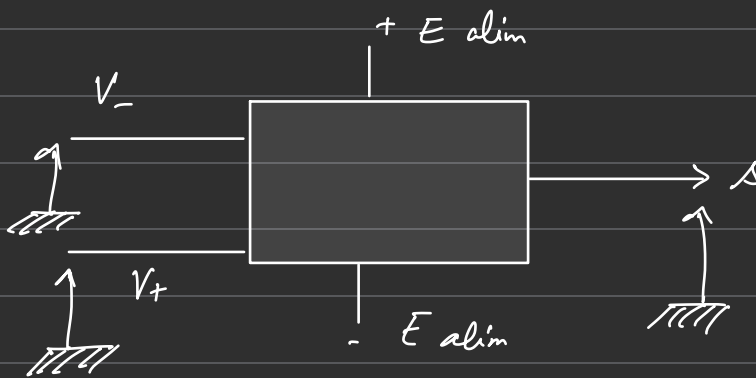




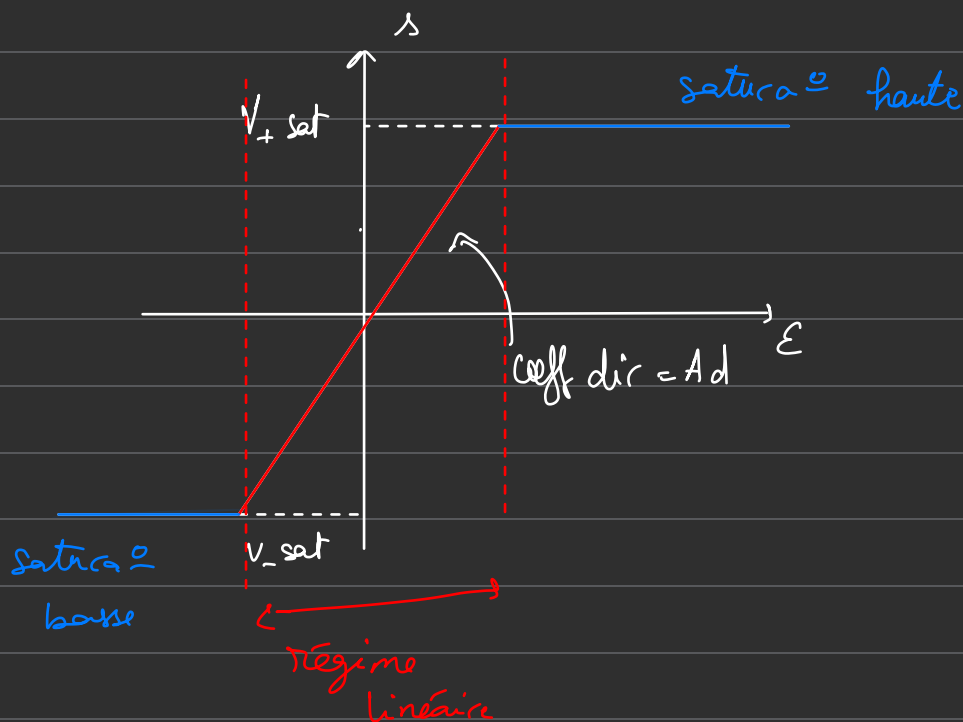
I / Présentation de l'ALT :

1) Amplificateur de la tension \neq lb et régime de fermeture :



$$E = V_+ - V_- \text{ tens } \neq \text{ lb}$$

$$S = Ad \times E \text{ avec } Ad \approx 10^5$$



• régime linéaire $\Rightarrow S = Ad E$

• régime saturé :

$$\text{si } E = V_+ - V_- > 0 \Rightarrow S = +V_{sat}$$

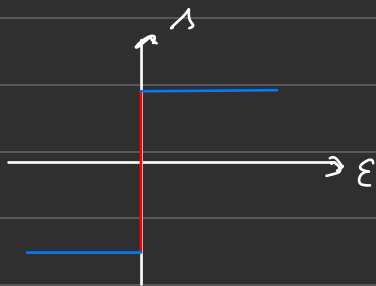
$$\text{si } E = V_+ - V_- < 0 \Rightarrow S = -V_{sat}$$

Pour atteindre la saturation :

$$|\epsilon| \geq \frac{V_{sat}}{A_d} \approx \frac{15}{10^5} \approx 10^{-4} V$$

2) Premiers éléments du modèle de l'Alu idéal :

a) Gain différentiel ∞ :



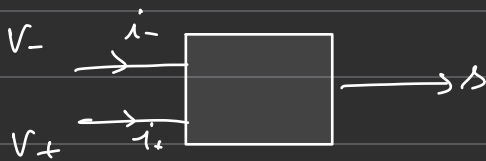
$$A_d \rightarrow +\infty \quad \epsilon \rightarrow 0$$

Conséquence

En régime linéaire :

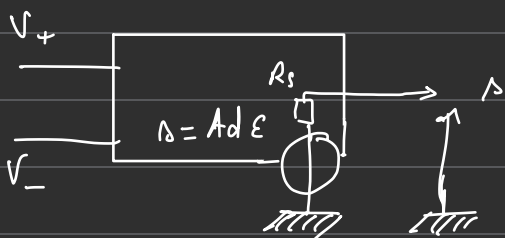
$$\epsilon \approx 0 \text{ et } V_+ = V_-$$

b) Résistance e/s :



$$i_+ = i_- \approx 0$$

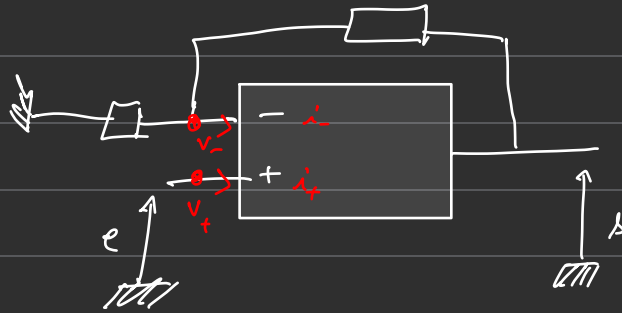
Résistance très grande $\rightarrow +\infty$ en réalité $R_e \gg 10 \text{ G}\Omega$ et $i_+ \approx i_- \approx nA$.
(résistance de sortie)



Si $R_s = 0 \Rightarrow$ générateur idéal de tension

Cependant $i_{max} \approx 25 \text{ mA}$ (pas mal haut)
limité du courant de sortie.

II / Effet de la rétroac^o exemple montage ampli-non inverseur:



1) réalis^o de la g^t en régime linéaire:

$$\rightarrow \text{ALI idéal} \Rightarrow i_+ = i_- = 0 \\ \Rightarrow v_+ = v_-$$

$$\text{ici } v_+ = e$$

$$\text{et pond diviseurs } v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} s$$

$$\text{Donc } v_+ = v_- \Rightarrow e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} s$$

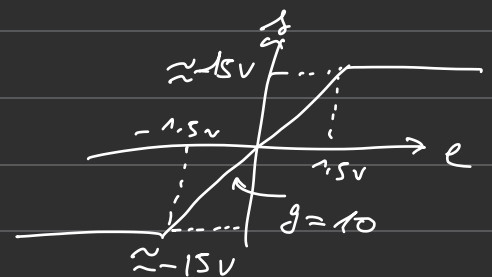
$$s = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) e = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) e = g e \quad \text{avec } g > 1 \Rightarrow \text{ampli non inverseur}$$

$$\text{et } v_- = \frac{s}{g}$$

Rq) Pour obtenir $g = 10$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega \quad \text{et } R_2 = 9 \text{ k}\Omega$$

$$g = 1 + 9 = 10$$



⚠ pour $|e| > 1,5 \text{ V}$, il y a sat

→ Critique du modèle idéal:

$$s = A_d \varepsilon = A_d (v_+ - v_-)$$

avec $\begin{cases} v_+ = e \\ v_- = \frac{s}{g} \end{cases} \Rightarrow s = Ad \left(e - \frac{s}{g} \right)$

$$s = \frac{Adg}{Ad+g} e = \frac{Ad}{\frac{Ad}{g} + 1} e \quad Ad \gg g \Rightarrow s \approx ge$$

A.N sans approx:

avec $g = 10 \Rightarrow s = 9,999e$
 erreur relative de 10^{-4} !

La rétroac^o et le fort gain Ad , rendent le rapport entrée/sortie indpt du circuit (et défauts de l'actionneur)

$s \approx ge$ grâce à rétroac^o

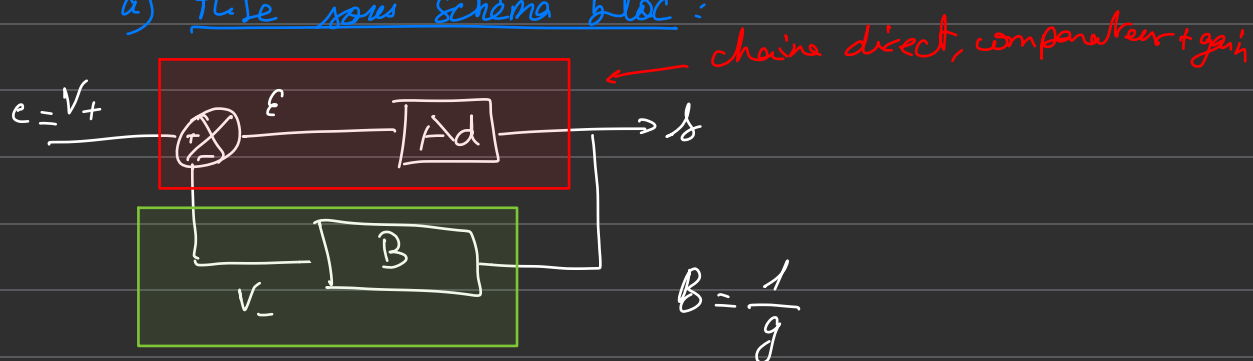
2) Principe de la rétroaction :

Imaginons une perturba^o de la sortie s qui \uparrow .

Alors $v_- = \frac{s}{g} \uparrow$ et $\epsilon = v_+ - v_- \downarrow$ et $s = Ad\epsilon \downarrow$ la perturbation

est corrigée par le syst. bouclé

a) Mise sous schéma bloc :



chaîne retour
 \hookrightarrow rétroac^o

b) A_c^e et rétroac^e :

$$\begin{cases} s = Ad E \\ e = e - B s \end{cases} \Rightarrow s = \frac{Ad}{1 + AdB} e$$
$$\Rightarrow \frac{s}{e} = \frac{Ad}{1 + AdB} \quad \text{FTBO} \quad \text{FTBF}$$

signal d'erreur :

$$e = \frac{1}{1 + AdB} e$$

c) Taux de rétroaction :

$$T = 1 + AdB \approx 10^4 \gg 1$$

$e \ll e \Rightarrow$ erreur négligeable et $\frac{s}{e} \approx \frac{1}{B} = g$

$\frac{s}{e}$ ne dépendent que de la chaîne retour, les défauts de l'actionneur sont supp.

3) Prise en compte de la BP de l'ALI :

a) limita^e temporelle/fréquentielle de l'ALI :

Qd fréq de $e(t) \uparrow$, il existe 2 pb :

- limitation par le slew rate (vitesse de balayage)

$$\left| \frac{ds}{dt} \right|_{\max} \approx 10^6 \text{ V.s}^{-1}$$

$$\approx 1 \text{ V} \times f$$
$$\approx 10 \text{ V} \times f$$

$$f_{\max} \approx \frac{10^6}{10} = 10^5$$

$$f_{\max} \approx 100 \text{ kHz}$$

- diminution de l'amplitude de s et déphasage \rightarrow modélisation par filtre PB du 1^{er} ordre

\downarrow
ajout de : $\tau_0 \frac{ds}{dt} + s(t) = A_0 \varepsilon$

$$\tau_0 = \frac{1}{\omega_0} \rightarrow \text{temps de réponse de l'ALI en BO. } A_0 \text{ gain statique.}$$

\hookrightarrow gain BF

Fct^e de transfert:

$$\underline{H} = \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_0}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

b) Bande passante du système bouclé:

FTBF:

$$\underline{H} = \frac{A_d(j\omega)}{1 + A_d(j\omega)B} \quad B = \frac{1}{g}$$

$$\underline{H} = \frac{A_0 / (1 + j\omega/\omega_0)}{1 + \frac{A_0 B}{1 + j\omega/\omega_0}}$$

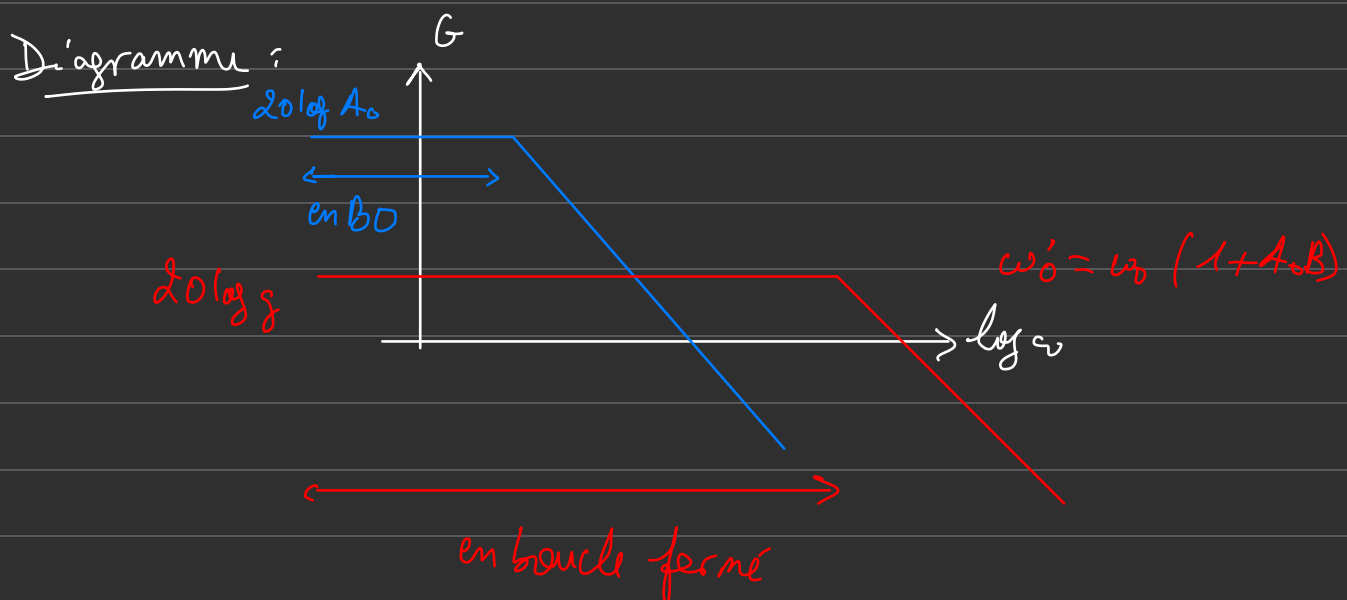
$$\underline{H} = \frac{A_0}{1 + A_0 B + j\omega/\omega_0} = \frac{A_0 / (1 + A_0 B)}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0 (1 + A_0 B)}}$$

$$\underline{H} = \frac{H_0'}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0'}}$$

$$H_0' = \frac{A_0}{1 + A_0 B}, \quad \omega_0' = \omega_0 (1 + A_0 B)$$

en boucle fermé

$$\left. \begin{array}{l} H_0 = A_0 \\ \omega_0 \end{array} \right\} \text{ en BO}$$



La rétroaction permet d'augmenter la BP mais le gain statique en BF ↓.

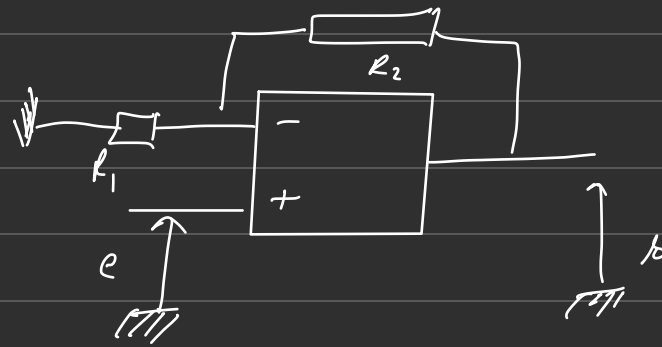
Le produit gain statique \times BP est cst! ♡

En effet:

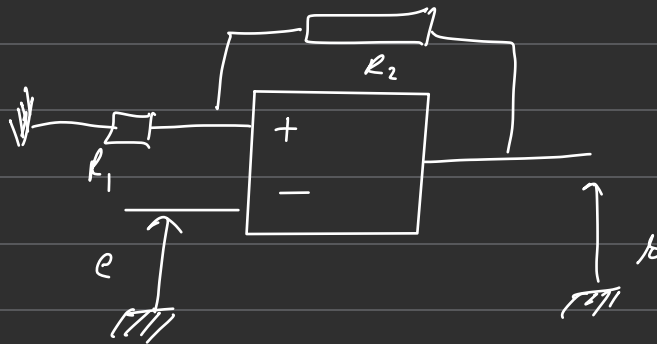
$$\begin{aligned} H_0' \times \omega_0' &= \frac{A_0}{1 + A_0 B} \times \omega_0 (1 + A_0 B) \\ &= \underbrace{A_0 \times \omega_0}_{\text{m produit en BO}} \end{aligned}$$

c) critère de stabilité par approche temporelle :

Rétroac^o sur V₋ :



Rétroac^o sur V₊ :



→ ALI en BO $\tau_0 \frac{ds}{dt} + b = A_0 \epsilon$

<u>Rétroac^o sur V₋</u>	<u>Rétroac^o sur V₊</u>
$\epsilon = v_+ - v_-$	$\epsilon = \frac{b}{g} - e$
$\epsilon = e - \frac{s}{g}$	$\epsilon = bs - e$
$\epsilon = e - bs$	

→ Système bouclé avec rétroac^o sur V_- :

$$\tau_0 \frac{dV_-}{dt} + V_- = A_0 (e - B V_-)$$

$$\tau_0 \frac{dV_-}{dt} + (1 + A_0 B) V_- = A_0 e$$

Eq homogène sst^s:

$$\tau_0 \frac{dV_-}{dt} + (1 + A_0 B) V_- = 0$$

$$\frac{dV_-}{dt} + \left(\frac{1 + A_0 B}{\tau_0} \right) V_- = 0$$

coeff^s m^e signe → système stable

→ Syst. bouclé avec rétroac^o V_+ :

$$\tau_0 \frac{dV_+}{dt} + (1 - A_0 B) V_+ = A_0 e$$

Eq homogènes

$$\frac{dV_+}{dt} + \frac{1 - A_0 B}{\tau_0} V_+ = 0$$

$|A_0| \approx 10^4$ donc les coeff ne sont pas de m^e signe → syst. instable

$V_+ \propto e^{-\frac{t}{\tau'}}$ avec $\tau' = \frac{\tau_0}{1 - A_0 B}$ $\tau_0 < 0$
↑
"varie comme"

Donc $V_+ \nearrow$ au cours des tps exponentiellement, i.e très rapidement
↳ régime saturé

Pour avoir un syst. stable et la possibilité d'un régime linéaire, une bonne indica^o est une rétroac^o unique sur V_- .

⚠ Si rétroac^o sur V_+ et V_- , il faut réaliser le calcul complet pour étudier la stabilité.

Résumé ALI idéal:

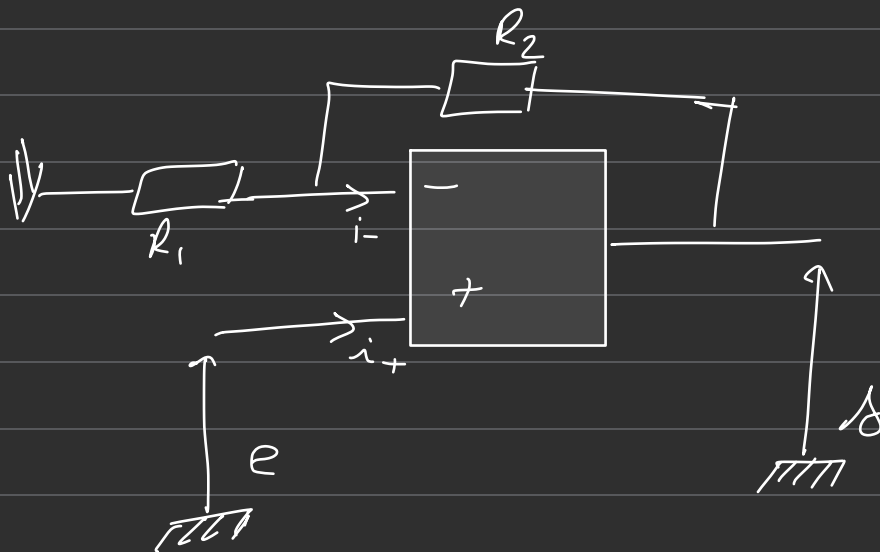
→ $A_d \rightarrow +\infty$ ($\varepsilon \rightarrow 0$)

→ $R_e \rightarrow +\infty$ avec $i_+ = i_- = 0$

→ $R_s \rightarrow 0$ générateur idéal

→ Pas de limita^o fréquentielle : $BP \rightarrow +\infty$

d) R_e du montage ampli non-inverseur



$$R_e = \frac{U_e}{i_e} = \frac{e}{i_+}$$

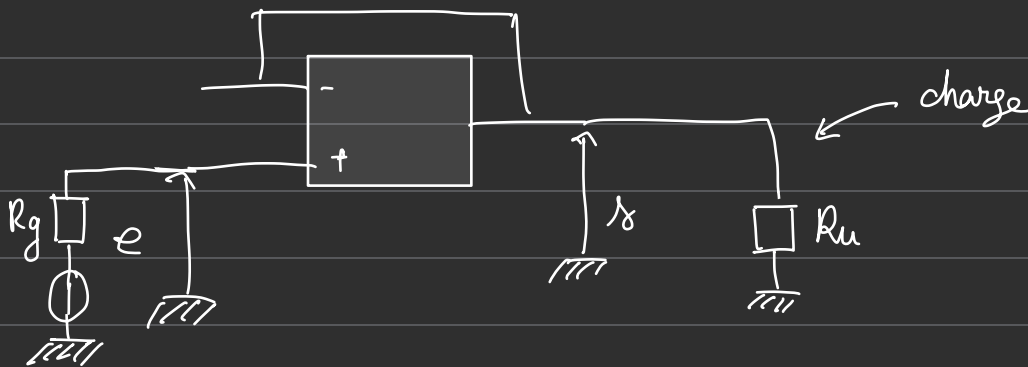
$$R_c \rightarrow +\infty \quad \text{car } i_+ \rightarrow 0$$

Dans ce montage R_e est la résistance de l'ALI seul mais cela dépend de chaque montage.

III) Exemples de montage et f° à connaître en régime linéaire :

1) Montage suiveur :

a) Fonction : $s = e$



Régime linéaire avec ALI idéal :

$$\varepsilon = 0 \rightarrow V_+ = V_-$$

$$e = s$$

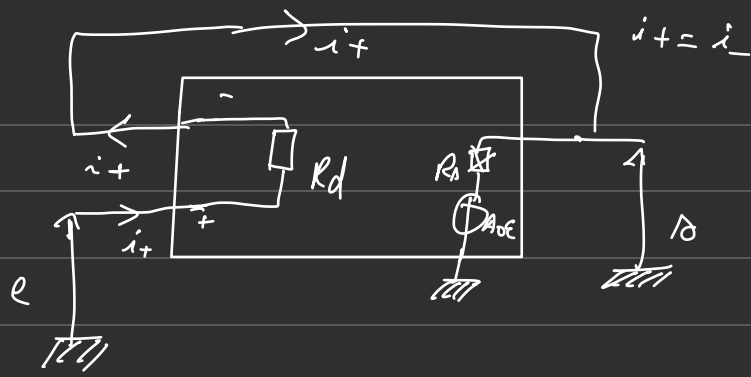
Rq) $s = e$ est vraie ($\forall R_u$)

- courant d'entrée est indpt de R_g car $R_e \gg R_g$

$F^\circ \Rightarrow$ isolation entre l'étage d'entrée et l'étage de sortie β

b) Résistance d'entrée et de sortie :

Zoom sur la modélis^e de R_e (régime statique \rightarrow ALI idéal avec $R_s = 0$ et pas de faut de BP....)



R_d : résistance différentielle

$$s = A_0 \epsilon$$

Evaluons l'influence de la rétroaction sur R_e du montage suiveur

$$R_e = \frac{U_e}{i_+} = \frac{e}{i_+}$$

À l'entrée

$$\epsilon = V_+ - V_- = R_d i_+$$

$$\epsilon = e - s = R_d i_+$$

$$i_+ = \frac{e - s}{R_d}$$

À la sortie : $s = A_0 \epsilon = A_0 (e - s)$

$$s = \frac{A_0}{1 + A_0} e$$

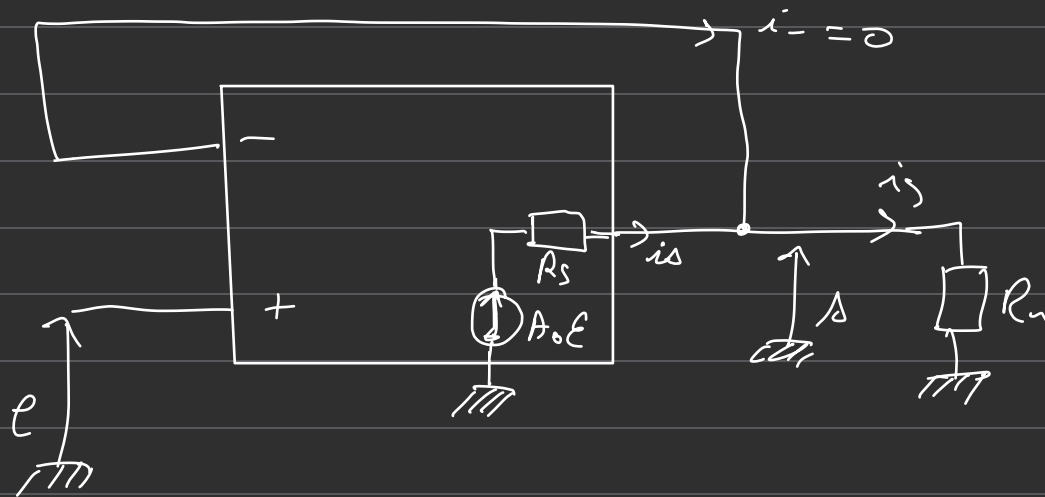
$$\text{Donc } i_+ = \frac{e}{R_d} \left(\frac{1}{1 + A_0} \right)$$

$$R_e = R_d (1 + A_0)$$

La résistance d'entrée de l'AL I seul, appelée R_d , est $\otimes A_0$! avec $A_0 \approx 10^5$. R_e du suiveur est quasiment.

effet de rétroaction :

Zoom sur la modélisation de R_s :



- En entrée: $i_+ = i_- = 0$

$$E = V_+ - V_- = e - v$$

- En sortie:

$$v = R_L i_s = A_0 E - R_s i_s$$

$$v = A_0 (e - v) - R_s i_s$$

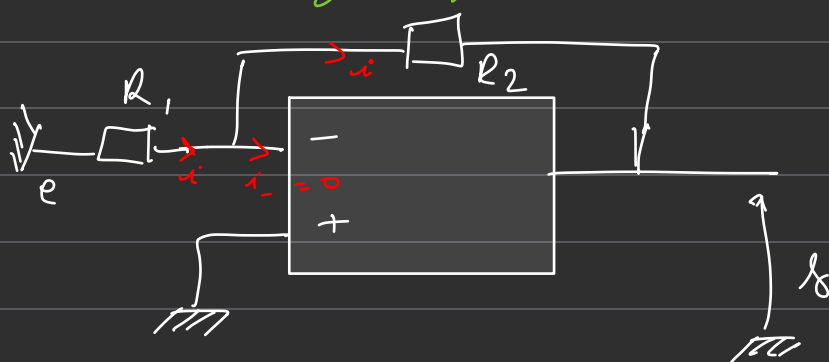
$$v \approx e - \frac{R_s}{A_0} i_s$$

donc $v \approx e \Rightarrow$ générateur quasi-idéal car $\frac{R_s}{A_0}$ très petit

$$(A_0 \approx 10^5)$$

⚠ Balance tout limitée par courant de sortie

2) Montage ampli inverseur:



a) Fonction:

$$V_+ = V_-$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} V_+ = 0 \\ \text{pont diviseur car } i_- = 0 \end{array} \right.$

$$V_- - e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (v_s - e)$$

Autre méthode:

$$i = i \Rightarrow \frac{e - V_-}{R_1} = \frac{V_- - v_s}{R_2}$$

Loi des nœuds en terme de potentiel:

$$V_- = \frac{v_s/R_2 + e/R_1}{1/R_1 + 1/R_2}$$

$$v_s = \frac{-R_2}{R_1} e = g e$$

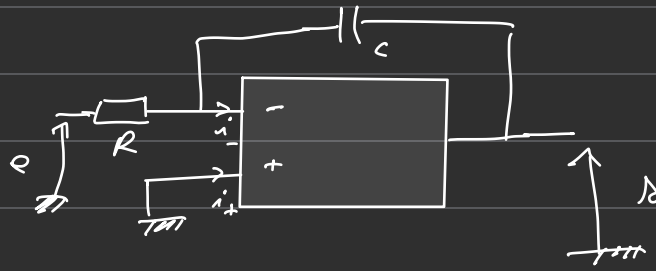
avec $g < 0 \rightarrow$ inverseur

b) Résistance d'entrée:

$$R_e = \frac{u_e}{i_e} = \frac{e}{i}$$

$$e - V_- = R_1 i \Rightarrow e = R_1 i \Rightarrow R_e = R_1$$

3) Montage intégrateur



Régime linéaire avec ALI idéal: $\mathcal{E} = 0 \rightarrow v_+ = v_- = 0$
 $i_+ = i_-$

• Dans le domaine temporel

$$i = i \Rightarrow \frac{e - v_-}{R} = \frac{e}{R} = C \frac{d}{dt} (v_- - s)$$

$$\frac{e}{R} = -C \frac{ds}{dt}$$

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{e}{RC} = -\frac{e}{\tau}$$

intégrer

$$s(t) - s(t=0) = -\frac{1}{\tau} \int_{t=0}^t e(t) dt$$

C'est un intégrateur pur

• En régime (A):

$$\underline{i} = \underline{i} \Rightarrow \frac{\underline{e}}{R} = -\frac{\underline{s}}{\underline{Z}_c}$$

$$\frac{\underline{e}}{R} = -jC\omega \underline{s}$$

$$\underline{e} = -jRC\omega \underline{s}$$

$$\underline{e} = -j\omega \tau \underline{s} \xrightarrow{\text{temporel}} \tau \frac{ds}{dt} = -e(t)$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{e}{T}$$

Rq) résistance d'entrée :

$$R_e = \frac{V_e}{i_e} = \frac{e}{i} = R$$

$R_e \neq +\infty$! Ce n'est pas la résistance d'entrée de l'ALI

• dérivée du signal de sortie et saturation !

$$e(t) = \langle e \rangle + \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k)$$

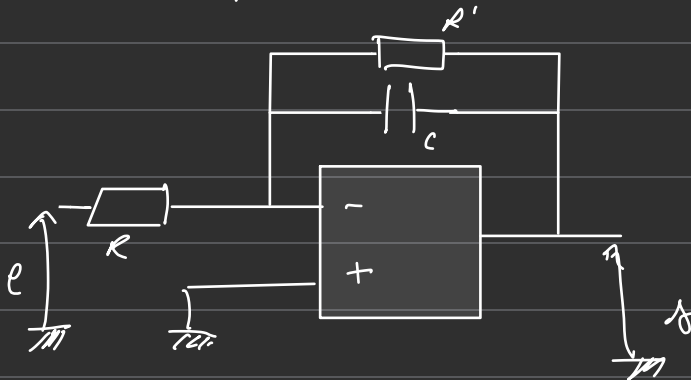
Si le signal a une valeur moy. $\neq 0$

$$\int e(t) dt \propto \langle e \rangle t \quad \text{diverge qd } t \rightarrow +\infty$$

De tte manière m' si $e(t) = 0$ il \exists une tension de polarisa^o à l'entrée de l'ALI et $\neq 0$!

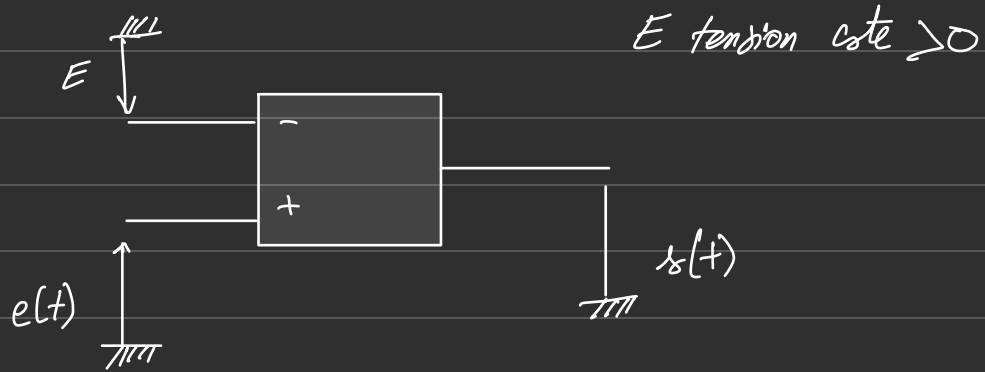
\exists tjr cette dérivée du signal qui conduit à la saturation !

Solu^o , éviter le pb avec un pseudo-intégrateur

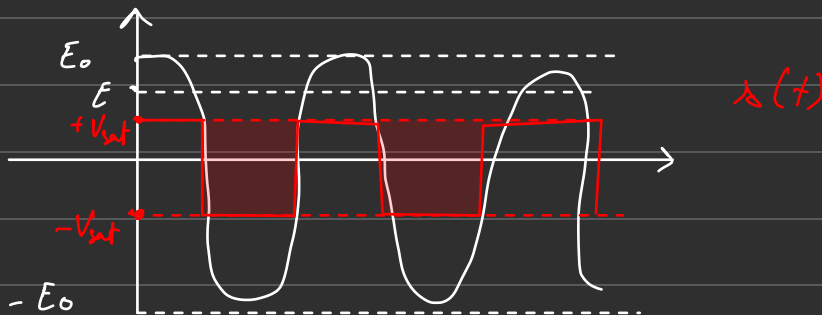


IV) ALI en régime saturé (non-linéaire):

1) Comparateur simple:



Graphes : $e(t) = E_0 \cos \omega t$ avec $E_0 > E$



• Satura^o haute $E > 0$ et $s = +V_{sat}$.

$$V_+ - V_- > 0 \Rightarrow e(t) - E > 0 \\ e(t) > E$$

• Satura^o basse $E < 0$ et $s = -V_{sat}$:

$$V_+ - V_- < 0 \Rightarrow e(t) - E < 0 \\ e(t) < E$$

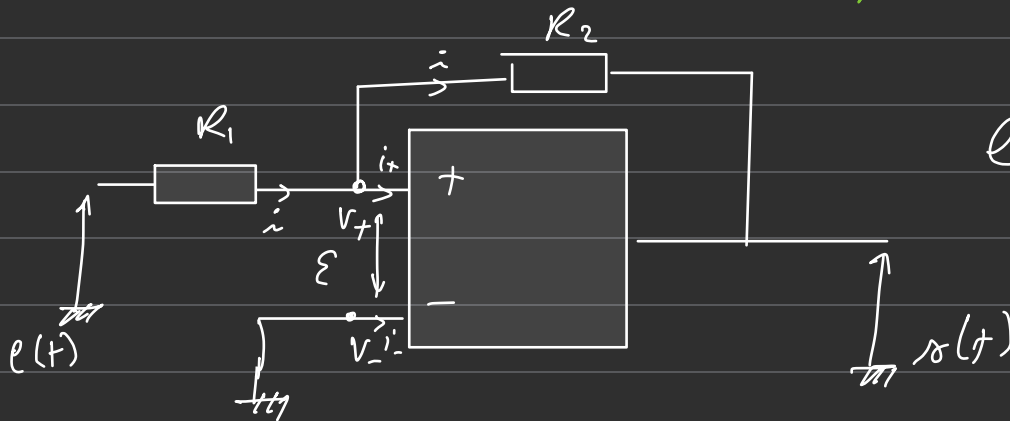
On compare le signal $e(t)$ à la valeur de E qui provoque le basculement
 \Rightarrow comparateur simple

Rq) $s(t)$ et $e(t)$ m période
 ↳ mesure de fréquence

△ commutée et interprétée car comparaison simple

2) Comparateur à hystérésis

↳ comparateurs à 2 seuils



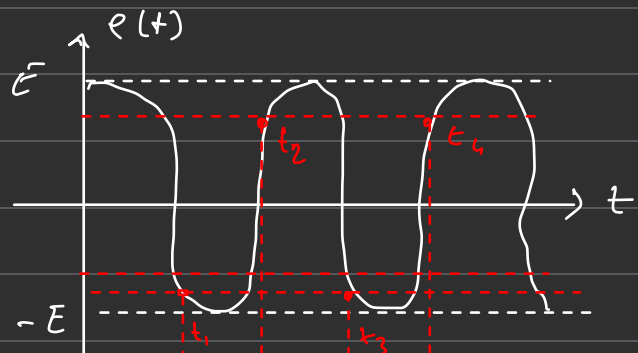
$$e - V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (e - s)$$

ALI idéal → $i_+ = i_- = 0$ et ici $V_- = 0$

$$E = V_+ - V_- = V_+$$

$$E = \frac{1}{R_1 + R_2} (R_2 e + R_1 s)$$

$$\frac{e - V_+}{R_1} = \frac{V_+ - s}{R_2}$$



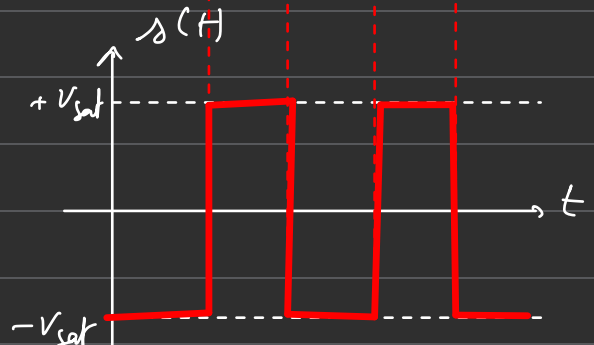
$$R_2(e - V_+) = R_1(V_+ - s)$$

$$R_2 e - R_2 V_+ = R_1 V_+ - R_1 s$$

$$-R_2 V_+ - R_1 V_+ = -R_2 e - R_1 s$$

$$V_+ (R_2 + R_1) = R_2 e + R_1 s$$

$$E = \frac{1}{R_2 + R_1} (R_2 e + R_1 s)$$



$$e(t) = E \cos \omega t$$

supposons qu'à $t=0$, saturation haute :

$$E > 0 \text{ et } v_s = +V_{\text{sat}}$$

$$R_2 e + R_1 V_{\text{sat}} > 0$$

$$e > -\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}} = -U_{\text{seuil}}$$

$$e > -U_{\text{seuil}}$$

condition

$$U_{\text{seuil}} = \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$$

• saturation basse

$$E < 0 \text{ et } v_s = -V_{\text{sat}}$$

$$R_2 e - R_1 V_{\text{sat}} < 0$$

$$e < \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}} = U_{\text{seuil}}$$

$$e < U_{\text{seuil}}$$

condition

• à $t=0$, saturation haute jusqu'à $t=t_1$, où $e > -U_{\text{seuil}}$ non respecté

• à partir de $t_1 \rightarrow$ saturation haute jusqu'au basculement en $t_2 \dots$

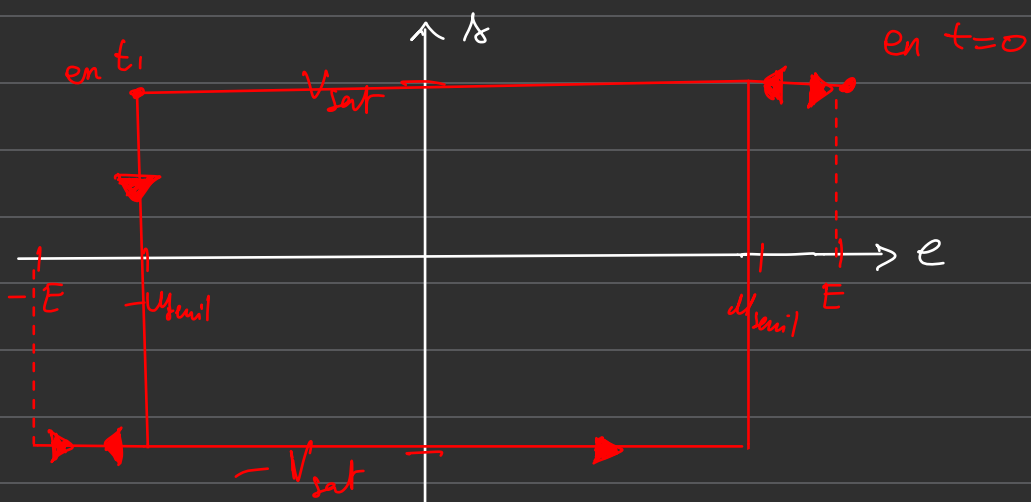
Ici \exists 2 seuils de basculement $\pm U_{\text{seuil}}$

\hookrightarrow comparateur double

\hookrightarrow on élimine le pb de commutation intempestives

Rq) si $U_{\text{seuil}} > E$, il n'y a pas de basculement.

Cycle d'hystérésis :



parcour sens trigo
↳ non-inverseur

parcour sens horaire
↳ inverseur