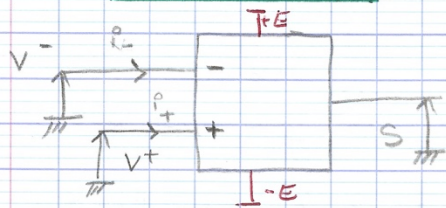


Chap 16:° Retroaction

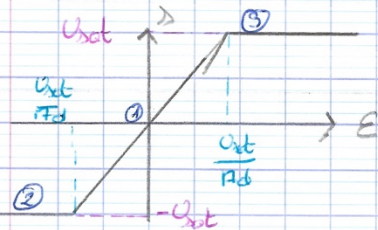
I.° Présentat° de L'ALI

1° Amplificat° de la tension différentielle et régimes de fct



$$E = V_+ - V_- \text{, tens° différentielle}$$

$$\lambda = Ad E, Ad \approx 10^5$$



Caractéristique en BO
 $V_{out} \approx E$

① régime linéaire $\lambda = Ad E$

②③ régime saturation (non linéaire) $\lambda = \pm V_{sat}$

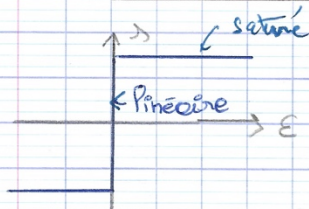
$$\text{m } |E| > \frac{V_{sat}}{Ad} \approx \frac{10}{10^5} \approx 10^{-4} \text{ V}$$

$$E > 0, \lambda = + V_{sat}$$

$$E < 0, \lambda = - V_{sat}$$

2° Modèle de l'ALI idéal

a) Gain ∞ et tension diff $E \approx 0$



$Ad \rightarrow +\infty$ de $E \rightarrow 0$
 $|E| < 10^{-4} \text{ V}$ négligeable devant
les autres termes)

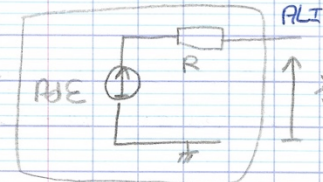
b) Résistances d'entrée et de sortie

$$i_+ = i_- \approx 10^{-10} \text{ A} \rightarrow i_+ = i_- = 0 \rightarrow R_e = +\infty$$

(réalité $R_e \approx 10 \text{ G}\Omega$)
ou plus

Résistance de sortie

$\rightarrow$ générateur idéal à la sortie

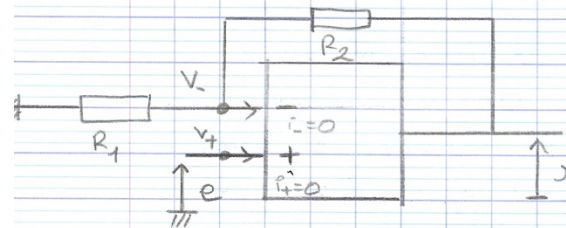


$R_s = 0$
idéal Géné. eq. on sortie est idéal

Mais limitat° du courant de sortie m l'ALI $\rightarrow i_{max} \approx 25 \text{ mA}$

II.° Effets de la rétroaction ex. montage amplificateur

non inverseur



1° Réact° de la fct en régime linéaire

ALI idéal $\rightarrow E = 0 \Leftrightarrow V_+ = V_-$

$$i_+ = i_- = 0$$

$i_- = 0 \Rightarrow$ pont diviseur

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

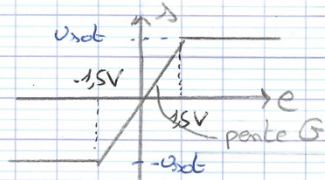
$$\text{dc } e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \lambda$$

$$\Leftrightarrow \lambda = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e = G e, G > 1$$

$\downarrow$
Gain

$R_{q0} \circ G$ demeure en régime linéaire si $|s| < U_{sat}$
 $G|e| < U_{sat}$
 $|e| < \frac{U_{sat}}{G} = \frac{15}{10}$

o Prenons $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 90k\Omega$, $G = 1+9 = 10$



Critique du modèle idéal $\Rightarrow E \neq 0$

$$\lambda = Ad E \quad \text{avec} \quad E = V_+ - V_- = e - \frac{\lambda}{G}$$

$$\lambda = Ad \left(e - \frac{\lambda}{G} \right) \Rightarrow \lambda = \frac{Ad}{1 + \frac{Ad}{G}} e \Rightarrow \lambda \approx e \quad \text{car} \quad \frac{Ad}{G} \gg 1$$

AN° $G = 10$, $Ad = 10^5$

$\lambda = 9999e$ erreur relative de 10^{-4} par le modèle idéal
 Grâce à la rétroact° et au fort gain Ad , $\lambda \approx 10e$
 le rapport entrée/sortie indep du circuit intégré lui-même (et des défauts de l'actionneur) $\lambda \approx Ge$
 boucle de rétroact°

2° Principe de la rétroact°

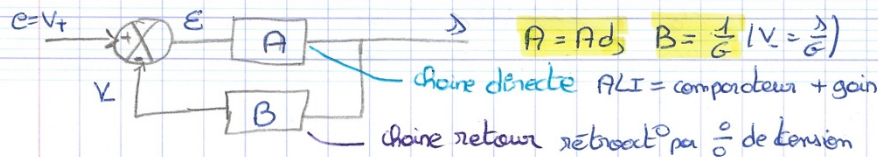
Principe de la rétroact° "feed back"

Imaginons une perturbat° de la sortie et $s \nearrow \Rightarrow V_- \nearrow \Rightarrow$

$$E = V_+ - V_- \searrow \text{ car } s \nearrow$$

$\hookrightarrow$ spontanément, le syst bouclé corrige la perturbat°

a) Mpe sous schéma bloc (en régime linéaire)



b) Act° et rétroact°

$$\begin{cases} \lambda = AE \\ E = e - B\lambda \end{cases} \Rightarrow \lambda = \frac{A}{1+AB} e \Leftrightarrow \frac{\lambda}{e} = \frac{A}{1+AB}$$

FTBF (Block)
 CFTBO

Signal d'erreur $E = \frac{1}{1+AB} e$

c) Taux de rétroact° T

$$T = 1 + AB = 1 + \frac{Ad}{G} \gg 1, T \approx 10^4$$

$$E \ll e$$

$$\lambda \approx \frac{e}{B} = Ge$$

erreur "négligeable"

Rétroact° permet de s'affranchir des défauts de l'actionneur, à dep que de la chaîne retour.

3° Prise en compte de la BP de l'ALI

Ad β signal d'entrée $\nearrow$ 2pb:

- "slow rate" limitat° de la vitesse de balayage

$$10^6 V.s^{-1} = \left| \frac{d\lambda}{dt} \right|_{max} \propto B_{max} \lambda = 10^6, B_{max} = \frac{10^6}{10} = 10^5$$

- Diminut° du gain de l'ALI et déphasage

$\hookrightarrow$ filtre PB ordre 1,

$$\tau_0 \frac{d\lambda}{dt} + \lambda(t) = A_0 E(t) \quad \text{en BO}$$

τ_0 tps de rep de l'ALI avec $B_0 = \frac{1}{\tau_0}$ la freq de coupure
 Fc de transfert correspondante

$$H = \frac{\lambda}{E} = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} = Ad(s\omega), \omega_0 = \frac{1}{\tau_0}$$

A_0 gain statique $\Rightarrow G_{BF}$

$\omega_0 = \frac{1}{\tau_0}$ la pulsat° de coupure

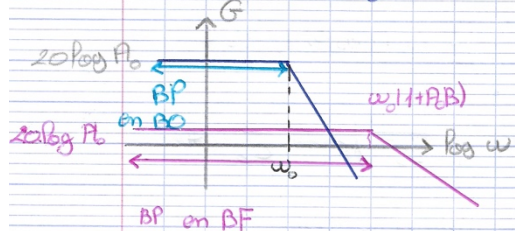
b) Bande passante du système bouclé

$$FTBF \rightarrow H = \frac{1}{e} = \frac{A_0}{1 + A_0 B} \quad (B = \frac{1}{G} \text{ i.e.})$$

Gain statique en boucle fermée

$$H = \frac{A_0}{1 + \frac{A_0 B}{1 + j\omega\omega_0}} = \frac{A_0}{1 + A_0 B + j\frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{H_0}{1 + A_0 B} \times \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0(1+A_0B)}}$$

retard en boucle fermée



→ La rétroact° permet d'augmenter la BP

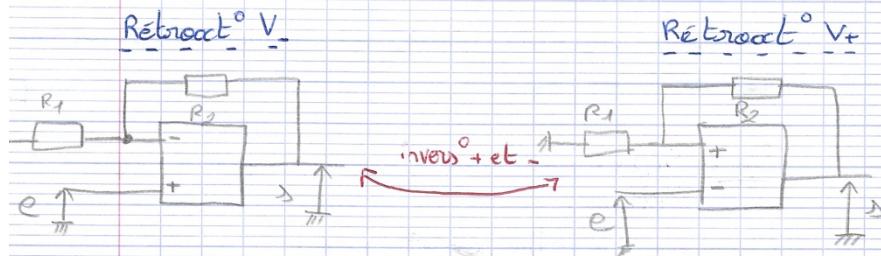
→ Mais le gain statique diminue, il faut un compromis (c) rapidité (BP élevée) et gain.

En effet, le petit gain / BP est tel

$$H_0 \times \omega_0 (1 + A_0 B) \approx \text{const} \Rightarrow H_0 \omega_0 = A_0 \omega_0$$

petit gain x BP gain statique x BP initial en BO

c) Critère de stabilité par approche temporelle



ALI en boucle ouverte $\tau_0 \frac{ds}{dt} + s = A_0 E$

Rétroact° V_-

$$E = V_+ - V_- = e - \frac{1}{G}$$

$= e - B s, B = \frac{1}{G}$ donc rétroact°

Rétroact° V_+

$$E = V_+ - V_- = \frac{1}{G} - e = B s - e$$

Syst Bouclé° $\tau_0 \frac{ds}{dt} + s = A_0 (e - B s)$

avec rétroact° sur V_- $\tau_0 \frac{ds}{dt} + (1 + A_0 B) s = A_0 e$

$$\frac{ds}{dt} + \left(\frac{1 + A_0 B}{\tau_0} \right) s = \frac{A_0}{\tau_0} e$$

Stabilité° eq diff homogène SSM

$$\frac{ds}{dt} + \underbrace{\left(\frac{1 + A_0 B}{\tau_0} \right)}_{\tau_0^{-1}} s = 0$$

si $\tau_0^{-1} > 0 \rightarrow$ syst stable

Si rétroact° sur V_+ $\tau_0 \frac{ds}{dt} + s = A_0 (B s - e)$

→ eq homogène SSM

$$\frac{ds}{dt} + \left(\frac{1 + A_0 B}{\tau_0} \right) s = 0, \tau_0^{-1} < 0 \rightarrow \text{syst instable}$$

$(A_0 B \gg 1)$

Pn avoir un syst stable, une bonne indicat° est une rétroact° sur V_- .

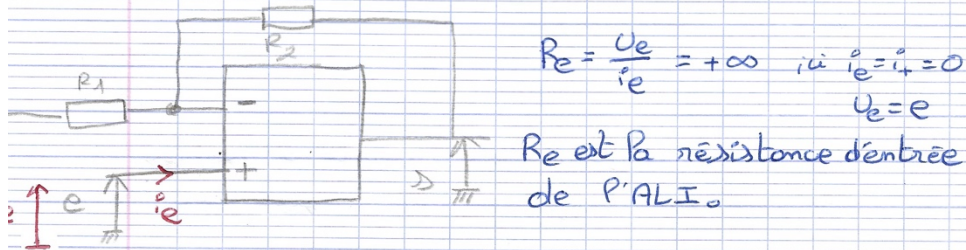
Rqe° : Si rétroact° sur V_+ et V_- , il faut en rajouter l'étude.

Reprenons le fct stable $E \neq 0$

$$\tau_0 \frac{ds}{dt} + (1 + A_0 B) s = A_0 e \Leftrightarrow \tau_0 \frac{ds}{dt} + A_0 B s = A_0 e$$

En régime "statique" + on néglige la BP $\Rightarrow$ comportement BF
 $A_o B \gg 1 \Rightarrow A_o E = A_o e \Leftrightarrow \lambda = \frac{e}{B} = G_e \rightarrow E = 0$

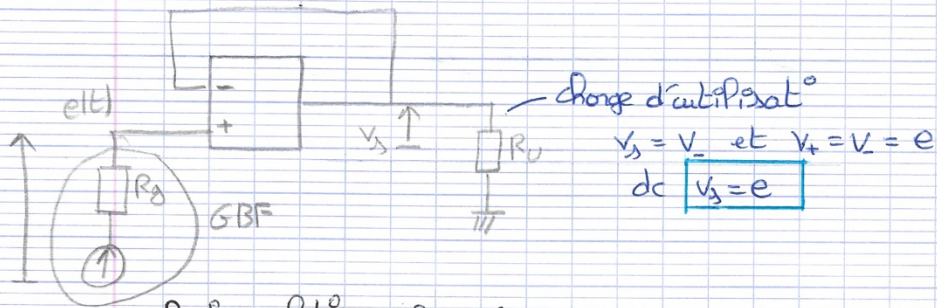
d) Re du montage



III. Exemples de montage et Bc à connaître en régime linéaire

1° Montage suiveur

a) Fonction ($E=0$)



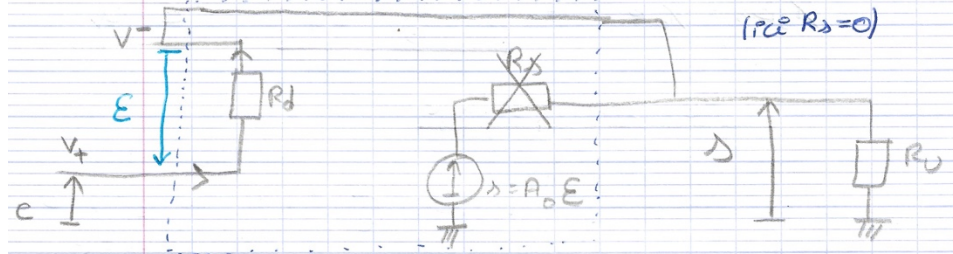
R_{q0} = résist° vraie V_{R0}

o Courant d'entrée indep de R_g car $R_e \rightarrow +\infty$
 $\rightarrow$ isolat° entre l'étage d'entrée et de sortie

b) Résistances d'entrée et de sortie

car $R_e = \frac{U_e}{i_e} = \frac{e}{i_+ \rightarrow 0} \rightarrow +\infty$ Modèle simple qui marche

Zoom sur la modélisat° de R_e :



Résistance différentielle présente à l'entrée
 $\hookrightarrow$ évaluons l'effet de la rétroact° sur R_e

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

Exprimons e en Bc de i_e par son R_e :

$$E = V_+ - V_- = R_d i_e$$

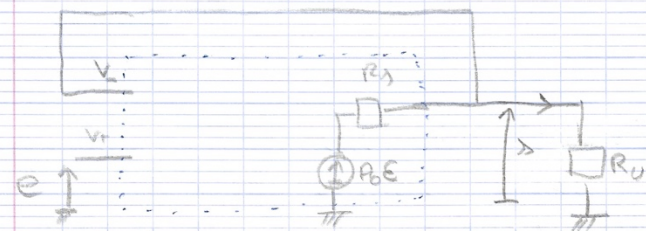
$$= e - \lambda = R_d i_e \text{ avec } \lambda = A_o E = A_o R_d i_e$$

$$\text{dc } e - A_o R_d i_e = R_d i_e$$

$$e = R_d (1 + A_o) i_e \Rightarrow R_e = R_d (1 + A_o) \approx R_d A_o$$

L'effet de la rétroact° est de $\otimes$ la R_d par A_o !

Zoom sur la modélisat° de R_s :



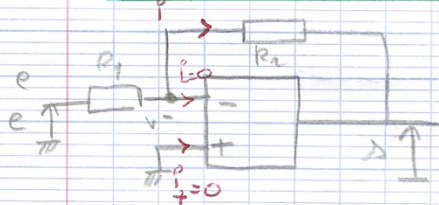
Avec i_e en entrée $i_+ = i_- = 0$

$$\lambda = \frac{A_o}{1 + A_o} e - \frac{R_s}{1 + A_o} i_s$$

$$\lambda \approx e - \frac{R_s}{A_o} i_s$$

Effet de la rétroact° à résistance sortie $\frac{R_3}{R_0}$ vs
 En sortie, PALI est comparable à un géné idéal de
 tension. Mais attent° $i_{max} \approx 10mA$

2° Montage amplificateur inverseur



a) Fonction

$$E=0 \Leftrightarrow V_+ = V_-$$

$$i_+ = i_- = 0 \text{ et } i = i_e \Rightarrow \frac{e}{R_1} = -\frac{s}{R_2}$$

$$\Leftrightarrow s = -\frac{R_2}{R_1} e = G e, \quad G < 0$$

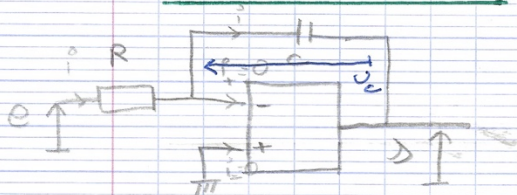
↳ amplif inverseur

b) Résistance d'entrée

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} = R_1$$

⚠ IP ne s'agit plus de la résistance d'entrée de PALI.
 La pratique IP faut un gd R_1 m isoler entrée et sortie.

3° Montage intégrateur



$$E=0 \Leftrightarrow V_+ = V_- = 0$$

"En régime Pibre" → tponel

$$i = i'$$

$$\frac{e}{R} = C \frac{ds}{dt} = -C \frac{ds}{dt} \quad \Leftrightarrow \frac{ds}{dt} = -\frac{1}{RC} e = -\omega_0 e$$

Ap intégrat° :

$$s = \omega_0 \int e(t) dt, \text{ c'est un intégrateur pur}$$

En effet, en régime sinusoïdal

$$\frac{e}{R} = -\frac{s}{Z_C} = -j\omega C s$$

$$j\omega s = -\frac{1}{RC} e \Rightarrow H = \frac{s}{e} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

$$\Leftrightarrow \frac{ds}{dt} = -\omega_0 e(t)$$

C'est l'intégrateur pur inverseur

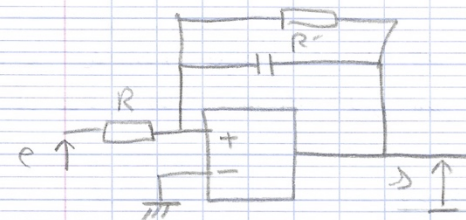
$$\Delta R_e = \frac{U_e}{I_e} = R \text{ car}$$

⚠ avec $E(t) = \langle e \rangle + \dots$

Par la val moyenne $s = \omega_0 \langle e \rangle t \rightarrow$ dérive tponelle de s
 qui va diverger

On attendra la saturat° de s.

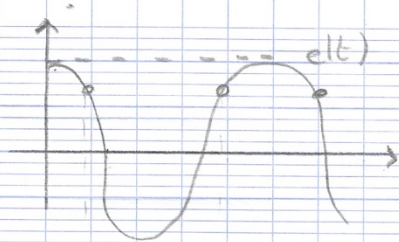
On corrige avec R' en // de C.



→ Pseudo-intégrateur
 ($H \rightarrow$ pB ordre 1)

IV. ALI en régime saturé → on Plineaire

1° Comparateur simple

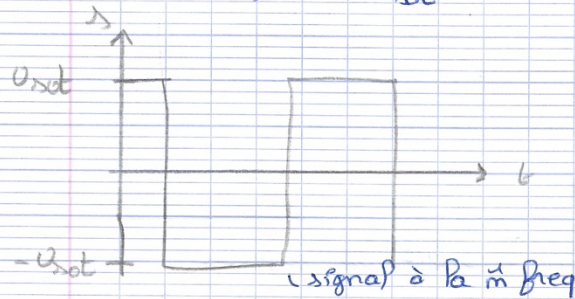


si $e(t) > E$

$$E = V_+ - V_- = e - E > 0 \text{ de } s = +U_{sat}$$

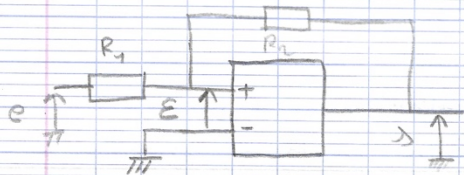
si $e(t) < E$

$$E = e - E < 0, \quad s = -U_{sat}$$



(signal à la m. freq)

2° - Comparateur à hystérésis (comparateur à seuils)



$$V_+ = V_- = 0$$

non-inverseur (entrée sur E+)

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

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

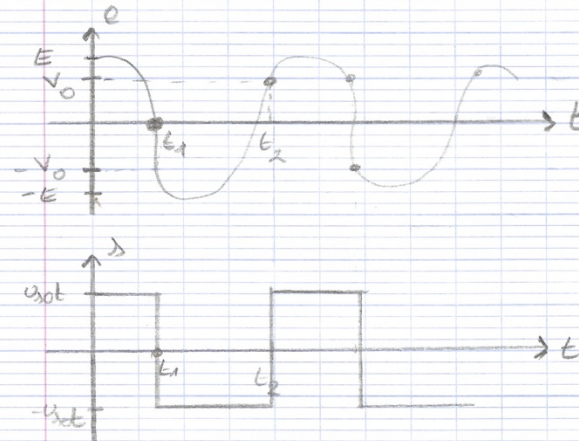
$$\Leftrightarrow V_+ = \frac{\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} e + \frac{R_1}{R_1 + R_2} s = \frac{1}{R_1 + R_2} (R_2 e + R_1 s)$$

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

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

Supposons qu'à $t=0$, $s = +U_{sat}$ "saturat° haute"

$$E > 0 \rightarrow R_2 e + R_1 U_{sat} > 0 \Leftrightarrow e > -\frac{R_1}{R_2} U_{sat} \Leftrightarrow e > -V_0$$



Jusqu'à $t < t_1$, la condit° est respectée.

Pà $t = t_1$ basculém° de s à $-U_{sat} \rightarrow$ "saturat° basse"

$$E < 0 \rightarrow R_2 e - R_1 U_{sat} < 0$$

$$\Leftrightarrow e < \frac{R_1}{R_2} U_{sat} = V_0$$

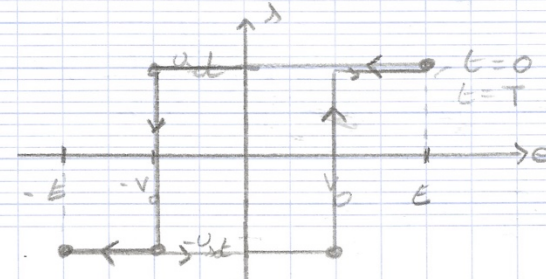
Jusqu'à $t < t_2$, condit° vérifiée.

Pà $t = t_2$ de nv basculém°, $s = +U_{sat}$

$\Rightarrow \pm V_0$ représente les 2 seuils de basculém° pà $e(t)$

Rq° Si $V_0 > E$, il n'y a pas de basculém° (1 seul E en sortie)

$\Rightarrow$ cycle d'hystérésis :



cycle parcouru dans
sens trigo
 $\rightarrow$ non-inverseur

⑥

Ces composantes à l'axe inverseur :

