

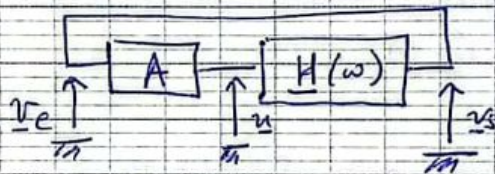
TD : Oscillateurs

1. Oscillateurs quasi-sinusoidaux

1.1. Généralités

1.1.1. Principe

1.



Les blocs sont linéaires donc $u = A v_e$ et $v_s = H(\omega) \times u$

Il est possible d'obtenir un comportement oscillant s'il existe ω tel que les 3 équations sont vérifiées :

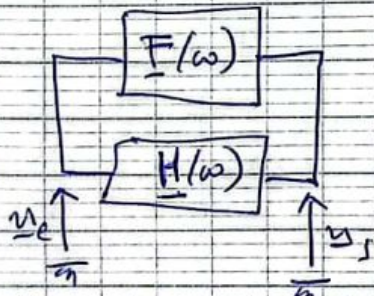
$$\begin{cases} v_s = v_e \\ u = A v_e \\ v_s = H(\omega) \times u \end{cases} \text{ donc } (1 - H(\omega) \times A) v_s = 0$$

ou si une oscillation existe $v_s \neq 0$

$$\text{donc } \boxed{H(\omega) \times A = 1}$$

1.1.2. Étude des blocs

1.

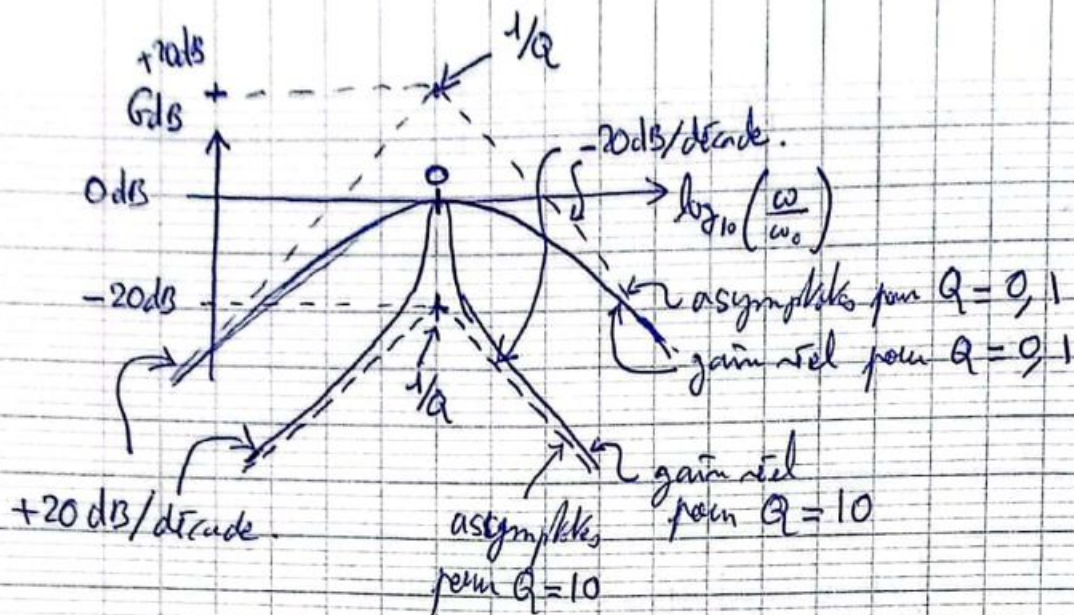


Il s'agit de la condition de Barkhausen

$$\boxed{F(\omega_0) \times H(\omega_0) = 1}$$

Si la condition est réalisée, la moindre perturbation initiale est amplifiée en régime linéaire au démarrage des oscillations.

2. (a) $F(\omega)$ est un passe-bande du 2nd ordre.



2. (b) on a des oscillations pour $F(\omega) \times H_m = 1$

$$\text{donc } F_0 H_m \times \frac{j \frac{\omega}{Q \omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{Q \omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = 1$$

$$\text{donc si on prend l'argument } 0 + \frac{\pi}{2} - \arg\left(1 + j \frac{\omega}{Q \omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right) = 0$$

$$\text{donc on a } \left(\frac{\omega/Q\omega_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \right) = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{donc } 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \xrightarrow{\omega \rightarrow \infty} 0$$

$$\text{donc } \boxed{\omega = \omega_0}$$

$$\text{et } F_0 H_m \times \frac{j \frac{\omega_0}{Q \omega_0}}{1 + j \frac{\omega_0}{Q \omega_0} - \left(\frac{\omega_0}{\omega_0}\right)^2} = F_0 H_m = 1$$

$$\text{donc } \boxed{H_m = \frac{1}{F_0}}$$

$$\underline{3.} \quad H(\omega) = \frac{u_s}{u_e}$$

$$\text{donc } H_0 = \frac{u_s}{u_e} \quad \text{donc } u_s(t) = H_0 u_e(t)$$

$$F(\omega) = \frac{u_e}{u_s} \quad \text{donc } F_0 \times \frac{j \frac{\omega}{Q \omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{Q \omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = \frac{u_e}{u_s}$$

$$\text{donc } F_0 \times j \frac{\omega}{Q \omega_0} u_s = \left(1 + j \frac{\omega}{Q \omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right) u_e$$

$$\text{donc } \frac{F_0}{Q \omega_0} \frac{du_s}{dt} = u_e + \frac{1}{Q \omega_0} \frac{du_e}{dt} + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 u_e}{dt^2}$$

$$\text{on } u_s(t) = H_0 u_e(t)$$

$$\text{donc } \frac{F_0 H_0}{Q \omega_0} \frac{du_e}{dt} = u_e + \frac{1}{Q \omega_0} \frac{du_e}{dt} + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 u_e}{dt^2}$$

$$\text{donc } \left[\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 u_e}{dt^2} + \frac{(1 - F_0 H_0)}{Q \omega_0} \frac{du_e}{dt} + u_e = 0 \right]$$

$$\text{idem pour } u_s, \left[\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 u_s}{dt^2} + \frac{(1 - F_0 H_0)}{Q \omega_0} \frac{du_s}{dt} + u_s = 0 \right]$$

si $1 - F_0 H_0 > 0 \Rightarrow \boxed{H_0 < \frac{1}{F_0}}$, alors

$$u_e(t) = \exp\left(-\frac{(1 - F_0 H_0)}{2Q \omega_0} t\right) \times (A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t))$$

$$\text{et } u_s(t) = \exp\left(-\frac{(1 - F_0 H_0)}{2Q \omega_0} t\right) \times (C \cos(\omega_n t) + D \sin(\omega_n t))$$

sont des oscillations pseudo-périodiques amorties $\left\{ \begin{array}{l} u_e(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0 \\ u_s(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0 \end{array} \right.$

si $1 - F_0 H_0 < 0 \Rightarrow \boxed{H_0 > \frac{1}{F_0}}$, alors

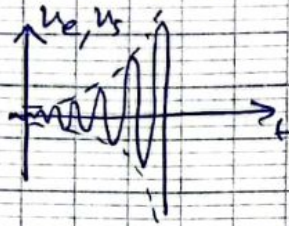
$$u_e(t) = \exp\left(\frac{H_0 F_0 - 1}{2Q \omega_0} t\right) \times (A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t))$$

$$\text{et } u_s(t) = \exp\left(\frac{H_0 F_0 - 1}{2Q \omega_0} t\right) \times (C \cos(\omega_n t) + D \sin(\omega_n t))$$

sont des oscillations pseudo-périodiques amplifiées

Pour $H_0 > \frac{1}{F_0}$, $\exp\left(\frac{H_0 F_0 - 1}{2Q \omega_0} t\right) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} +\infty$ donc les amplitudes

de $u_e(t)$ et $u_s(t)$ augmentant indéfiniment



donc il existe t_1 tel que $|u_e(t_1)| > V_{sat}$ et donc l'ALI sera saturé.

1.2. Oscillateur à pont de Wien

1. (a) ALI idéal et linéaire $\Rightarrow \varepsilon = 0, i^+ = 0$ et $i^- = 0$

donc $V^+ = e$ or $\varepsilon = 0 \Rightarrow V^- = V^+ = e$

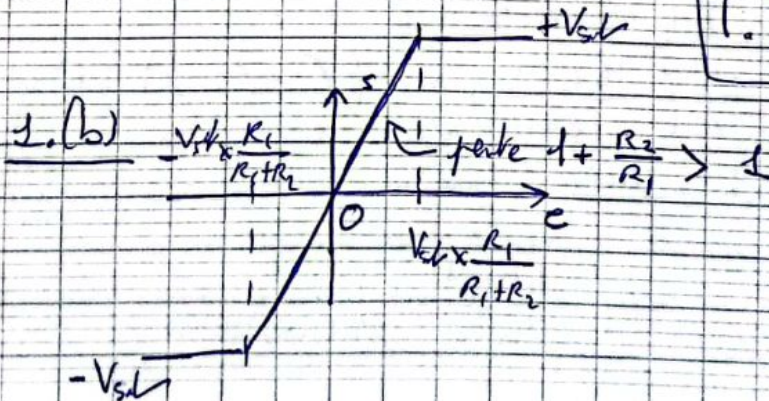
et $V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} s$ car $i^- = 0$ donc on peut appliquer le pont diviseur de tension

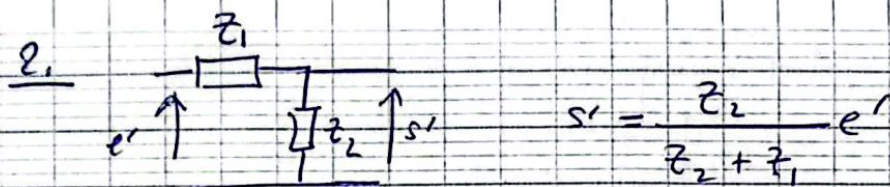
donc $e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} s$ donc $s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e$

d'où $\boxed{F = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$

En pratique on sera limité par

- les saturations de l'ALI
- le slew-rate de l'ALI
- les courants de saturation





$$\text{donc } s' = \frac{1}{1 + \frac{1}{Z_2} \times Z_1} e'$$

$$\text{or } Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}$$

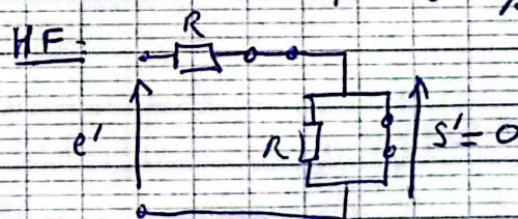
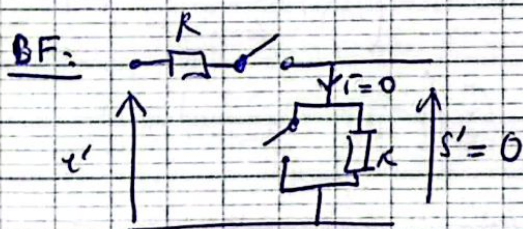
$$\text{et } \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R} + j\omega C \quad \text{donc } s' = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{R} + j\omega C\right)\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)} e'$$

$$\text{donc } s' = \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{1}{jR\omega C} + jR\omega C + 1\right)} e'$$

$$\text{donc } s' = \frac{1}{3 + jR\omega C + \frac{1}{jR\omega C}} e'$$

$$\text{donc } s' = \frac{1/3}{1 + j\frac{1}{3}\left(R\omega C - \frac{1}{R\omega C}\right)} e'$$

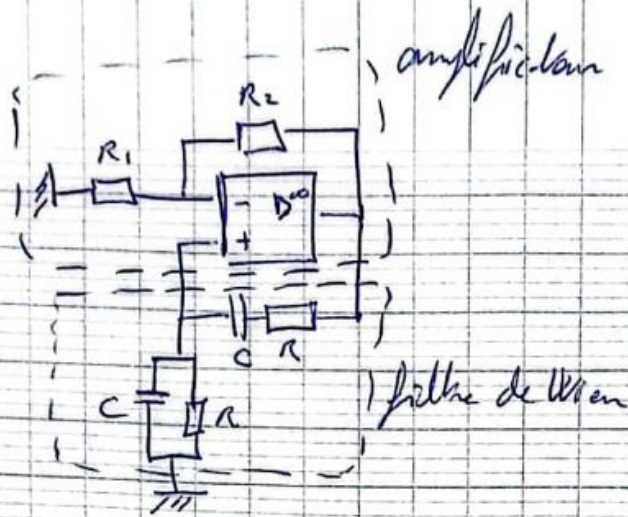
$$\begin{aligned} \text{d'où } G_0 &= \frac{1}{3} \\ Q &= \frac{1}{3} \\ \text{et } \omega_0 &= \frac{1}{RC} \end{aligned}$$



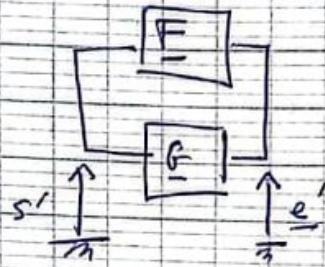
donc c'est un passe-bande

le gain maximal est atteint à la pulsation propre $\omega_0 = \frac{1}{RC}$
et vaut $G(\omega_0) = \frac{1}{3}$.

3. (a)



d'où



3. (b) $\underline{e'} = \underline{F} \underline{s'}$ et $\underline{s'} = \underline{G} \underline{e'}$

donc $\underline{e'} = \underline{F} \underline{G} \underline{e'}$ donc $(1 - \underline{F} \underline{G}) \underline{e'} = 0$

si $\underline{e'}$ existe, $\underline{e'} \neq 0$ donc $\underline{F} \underline{G}(\omega) = 1$

donc $(1+n) \times \frac{G_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = 1$

si on prend l'argument $0 + 0 - \arg\left(1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right) = 0$

donc $\arg\left(Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right) = 0$

donc $Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) = 0$

donc $\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0}{\omega}$ donc $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$

donc $f = \frac{1}{2\pi RC}$

si pour $\omega = \omega_0$, $(1+n) \times \frac{G_0}{1 + 0} = 1$ donc $n = \frac{1}{G_0} - 1$

or $G_0 = \frac{1}{3}$ donc $\boxed{n=2}$,

3.(c) $\underline{e'} = F \underline{s'} \Rightarrow e'(t) = (1+n) s'(t)$

$$\underline{s'} = G \underline{e'} \Rightarrow \underline{s'} = \frac{G_0}{1+jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \underline{e'} \Rightarrow \left[1+jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] \underline{s'} = G_0 \underline{e'}$$

$$\Rightarrow \left[j\frac{\omega}{Q\omega_0} + \left(j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1\right] \underline{s'} = j\frac{G_0\omega}{Q\omega_0} \underline{e'}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 s'}{dt^2} + \frac{1}{Q\omega_0} \frac{ds'}{dt} + s' = \frac{G_0}{Q\omega_0} \frac{de'}{dt}$$

donc $\boxed{\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 s'}{dt^2} + \frac{1 - G_0(1+n)}{Q\omega_0} \frac{ds'}{dt} + s' = 0}$

Il peut exister un s' sinusoïdal si on a un oscillateur harmonique parfait donc $1 - G_0(1+n) = 0$ (pas de terme en $\frac{ds'}{dt}$)

donc $\boxed{n = \frac{1}{G_0} - 1 = 2}$

et on obtient $\frac{d^2 s'}{dt^2} + \omega_0^2 s' = 0$ donc la fréquence des

oscillations serait $\boxed{f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}}$

3.(d)

$f = 3,3 \text{ kHz}$, le produit gain-bande $(1+n) \times f \approx 10 \text{ kHz}$ est très inférieur à celui de l'ALI $\sim 10^7 \text{ Hz}$ donc on peut ignorer la réponse fréquentielle de l'ALI.

3.(e) on a apparition de oscillations si $s'(t)$ est oscillant d'amplitude

$$\text{or } s'(t) = \exp\left(\frac{G_0(1+n)-1}{2Q\omega_0} \times t\right) \left[A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)\right]$$

donc $s'(t)$ est amplifié si $G_0(1+n) - 1 > 0$

$$\text{donc si } n > \frac{1}{G_0} - 1$$

$$\text{soit } \boxed{n > 2}$$

$$\text{si } R_2 = 10 \text{ k}\Omega \text{ alors } \frac{R_2}{R_1} > 2 \Rightarrow R_1 < \frac{R_2}{2}$$

$$\Rightarrow R_1 < 5 \text{ k}\Omega$$

$$\text{donc il faut choisir } \boxed{R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega}$$

3.(f) e' est en sortie de l'A.I. donc $\boxed{|e'(t)| < V_{\text{sat}}}$

$$\text{or } e' = (1+n)s' \text{ donc } \boxed{|s'(t)| < \frac{V_{\text{sat}}}{1+n}}$$

3.(g) si $e'(t) = \pm V_{\text{sat}} = de$, alors

$$s' = G e' \Rightarrow \frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 s'}{dt^2} + \frac{1}{Q \omega_0} \frac{ds'}{dt} + s' = \frac{G_0}{Q \omega_0} \frac{de}{dt} = 0$$

$G_0 e' = de$

$$\text{donc } \frac{d^2 s'}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{ds'}{dt} + \omega_0^2 s' = 0$$

est un oscillateur amorti

donc l'amplitude des oscillations de s' diminue

3.(h) Le fonctionnement de l'oscillateur sera donc des alternances entre amplification des oscillations en régime linéaire selon 3.(f) et amortissement en régime saturé selon 3.(g)



3.(i) La distorsion harmonique est le rapport $TDH = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} |S_n|^2}}{|S_1|}$

avec la décomposition en série de Fourier

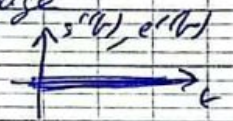
$$s'(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} S_n \cos(n\omega t + \phi_n)$$

Pour l'oscillateur de gauche, la forme ressemble quasiment à une sinusoïde donc $TDH \rightarrow 0$, on parle d'oscillateur quasi-sinusoïdal

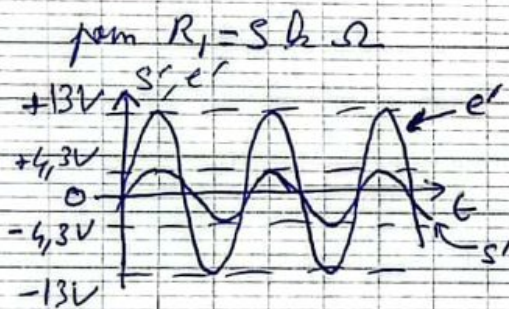
3.(ii) • Tant que $R_1 > 5k\Omega$, il n'y a pas de démarrage

donc $s'(t) = 0$

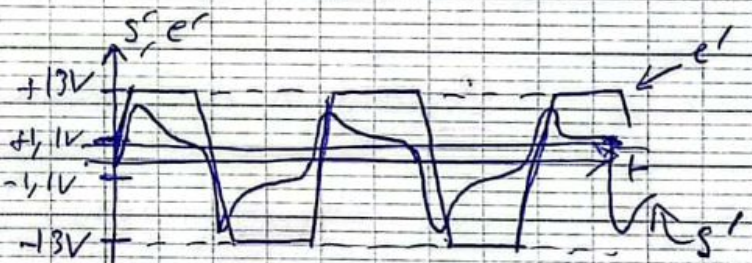
et $e'(t) = 0$



• pour $1k\Omega < R_1 < 5k\Omega$, il y a démarrage de oscillations qui sont d'autant plus distordues que $R_1 \rightarrow 1k\Omega$



pour $R_1 = 1k\Omega$, $n = 10 \Rightarrow 1+n = 11$



1.3. Oscillateur à inductance et double condensateur

$$\underline{1.} \quad \underline{\beta} = \frac{1/2}{1 + j\frac{RC}{2}\omega + \frac{R}{jL\omega}}$$

dans le bloc A, rétroaction négative $\Rightarrow$ ALI linéaire et stat $\Rightarrow u = v^+ = v^-$

$$\text{or } v^- = \frac{xR'}{xR' + (1-x)R'} v = xv \text{ donc } u = xv$$

$$\text{donc } \underline{H} = \frac{u}{v} = \frac{u}{v} \times \frac{v}{u} = \frac{1/2}{1 + j\frac{RC}{2}\omega + \frac{R}{jL\omega}} \times \frac{1}{x}$$

$$\text{donc } \underline{H} = \frac{1/(2x)}{1 + jR\sqrt{\frac{C}{2L}}\left(\sqrt{\frac{LC}{2}}\omega - \sqrt{\frac{2}{LC}}\frac{1}{\omega}\right)}$$

$$\text{on identifie } H_0 = \frac{1}{2x}, Q = R\sqrt{\frac{C}{2L}} \text{ et } \Omega = \sqrt{\frac{2}{LC}}$$

$$\text{donc } \underline{H} = \frac{H_0 \times j\frac{\omega}{Q\Omega}}{1 + j\frac{\omega}{Q\Omega} - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2}$$

$$\text{donc } \left(1 + j\frac{\omega}{Q\Omega} - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2\right) \underline{u} = H_0 \times j\frac{\omega}{Q\Omega} \underline{u}$$

$$\text{donc } \omega + \frac{1}{Q\Omega} \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{\Omega^2} \frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{H_0}{Q\Omega} \frac{d\omega}{dt}$$

$$\text{donc } \left[a = \frac{\Omega}{Q}, b = \Omega^2, c = \frac{\Omega H_0}{Q} \right]$$

2. condition de Barkhausen $\underline{H}(\omega_0) = 1$

$$\text{donc } \arg(\underline{H}(\omega_0)) = 0$$

$$\text{donc } -\arg\left(1 + jQ\left(\frac{\omega_0}{\Omega} - \frac{\Omega}{\omega_0}\right)\right) = 0$$

$$\text{donc } \arg\left(Q\left(\frac{\omega_0}{\Omega} - \frac{\Omega}{\omega_0}\right)\right) = 0$$

$$\text{donc } \frac{\omega_0}{\Omega} - \frac{\Omega}{\omega_0} = 0$$

$$\text{donc } \boxed{\omega_0 = \Omega} \text{ soit } \boxed{\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{LC}}}$$

$$\text{et } \underline{H}(\omega_0) = \underline{H}(\Omega) = H_0 = \frac{1}{2x_0} \text{ donc } \frac{1}{2x_0} = 1$$

$$\text{dnc } \boxed{x_0 = \frac{1}{2}}$$

3. $u = x v \cdot k u = w$

$$\text{et } \underline{u} = \underline{w} = \beta \underline{v} \text{ dnc } \underline{w} = \frac{1/2}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\Omega} - \frac{\Omega}{\omega}\right)} \underline{v}$$

$$\text{dnc } \frac{1}{\Omega^2} \frac{d^2 w}{dt^2} + \frac{1}{Q\Omega} \frac{dw}{dt} + \frac{1}{\Omega^2} w = \frac{1}{2Q\Omega} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2xQ\Omega} \frac{dw}{dt}$$

$$\text{dnc } \frac{1}{\Omega^2} \frac{d^2 w}{dt^2} + \frac{(1 - 1/2x)}{Q\Omega} \frac{dw}{dt} + \frac{1}{\Omega^2} w = 0$$

il y a dénominateur si $1 - \frac{1}{2x} < 0$ dnc $1 < \frac{1}{2x}$

$$\text{dnc } \boxed{x < \frac{1}{2}} \quad \boxed{|x| < x_0}$$

4. La saturation de l'ALI en tension limite l'amplitude des oscillations.

2. Oscillations de relaxation

2.1. Association comparateur + intégrateur

2.1.1. Le comparateur non-inverseur

1. rétroaction positive $\Rightarrow$ saturé

2. $\varepsilon = V^+ - V^-$ or $V^- = 0$ et $i = \frac{V_e - V^+}{R_1} = \frac{V^+ - V_s}{R_2}$

$$\text{dnc } \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} V^+ = \frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}$$

$$\text{dnc } V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_e + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$$

$$\text{dnc } \boxed{\varepsilon = \frac{R_2 V_e + R_1 V_s}{R_1 + R_2}}$$

3. si $v_s = +V_{sat}$, alors il y a basculement pour $\varepsilon < 0$

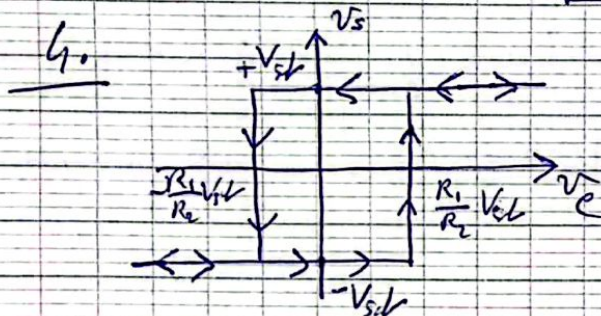
$$\text{donc } R_2 v_e + R_1 v_s < 0$$

$$\text{donc } \boxed{v_e < -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}}$$

si $v_s = -V_{sat}$, alors il y a basculement pour $\varepsilon > 0$

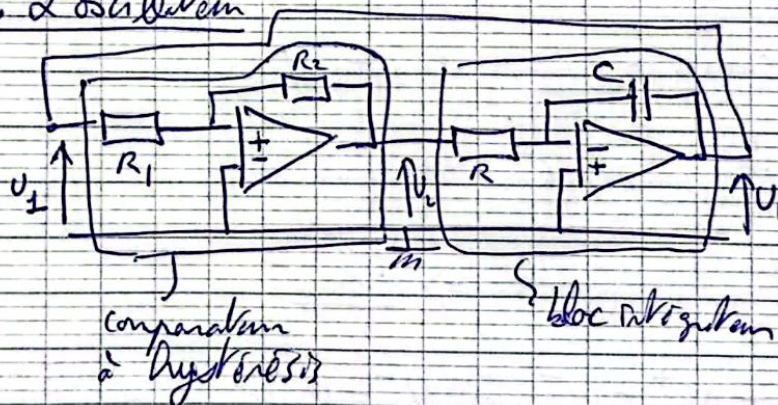
$$\text{donc } R_2 v_e + R_1 v_s > 0$$

$$\text{donc } \boxed{v_e > \frac{R_1}{R_2} V_{sat}}$$



2.1.2. Oscillateur

1.



$$2. \quad i = \frac{v_2}{R} = -\frac{v_1}{1/\omega RC} \Rightarrow v_2 = -\omega RC v_1$$

$$\Rightarrow \boxed{RC \frac{dv_1}{dt} = -v_2(t)}$$

$$3. \quad v_2(0) = +V_{sat} \Rightarrow RC \int_0^t \frac{dv_1}{dt'} dt' = - \int_0^t V_{sat} dt'$$

$$\text{donc } RC(U_1(t) - U_1(0)) = -V_{sat} \times t$$

$$\text{donc } \boxed{U_1(t) = U_1(0) - \frac{V_{sat}}{RC} t}$$

4. il y a basculement quand $U_1(t_B) = -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

$$\text{donc } U_1(0) - \frac{V_{sat}}{RC} t_B = -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

$$\text{donc } \boxed{t_B = RC \left[\frac{R_1}{R_2} + \frac{U_1(0)}{V_{sat}} \right]}$$

5. $t > t_B$, $U_2(t) = -V_{sat} \Rightarrow RC \int_{t_B}^t \frac{dU_1}{dt'} dt' = + \int_{t_B}^t V_{sat} dt'$

$$\text{donc } RC(U_1(t) - U_1(t_B)) = V_{sat}(t - t_B)$$

$$\text{on } U_1(t_B) = -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

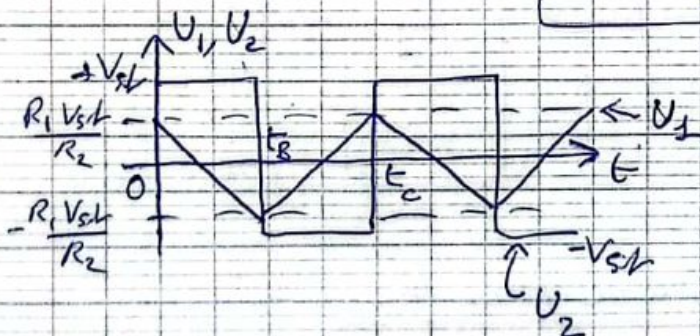
$$\text{donc } \boxed{U_1(t) = \frac{V_{sat}}{RC} (t - t_B) - \frac{R_1}{R_2} V_{sat}}$$

6. il y a à nouveau basculement qd

$$U_1(t_C) = \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

$$\frac{V_{sat}}{RC} (t_C - t_B) - \frac{R_1}{R_2} V_{sat} = \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

$$\boxed{t_C = t_B + 2 \frac{R_1}{R_2} RC}$$



7. $T = 2 \times (t_s - t_c)$

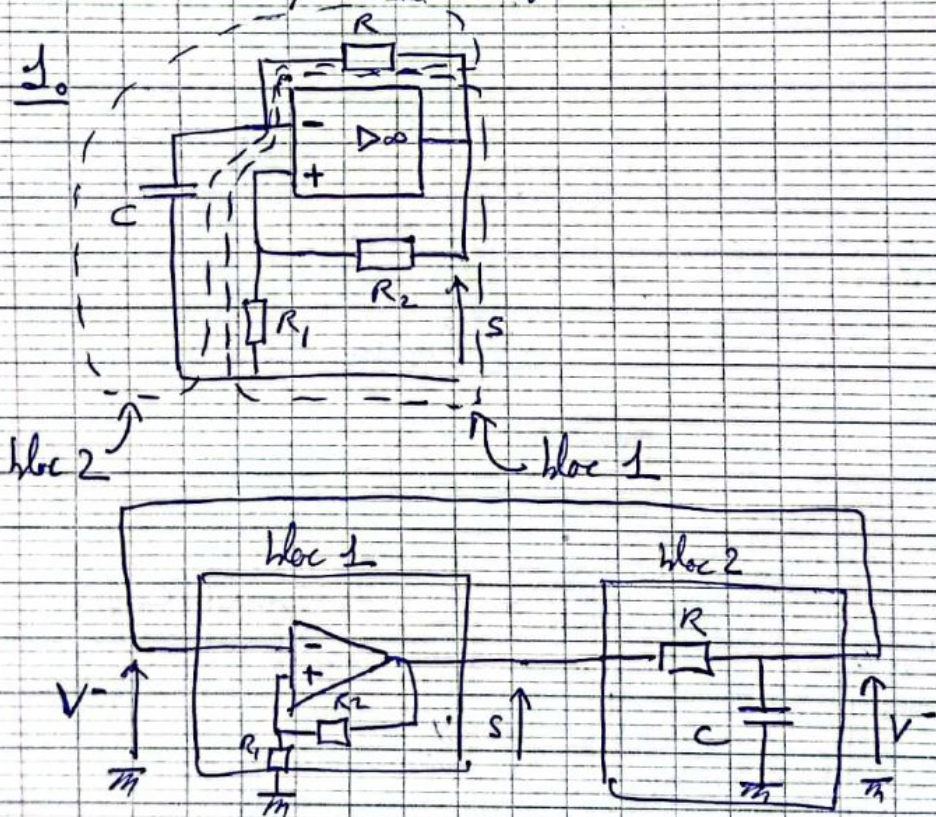
donc $T = 4 \frac{R_1}{R_2} RC$

8. Pour que le montage fonctionne il faut que U_1 puisse atteindre la tension de basculement ou $U_1(t)$ et à la suite d'un A.I. due $|U_1(t)| < V_{sat}$
donc il faut $\frac{R_1}{R_2} V_{sat} < V_{sat}$

donc $R_1 < R_2$

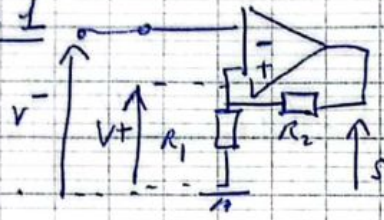
on obtient un générateur de signaux créneau et triangulaire auto-entretenu.

2.2. Astable à pseudo-intégrateur



Le bloc 2 est un R-C passe bas

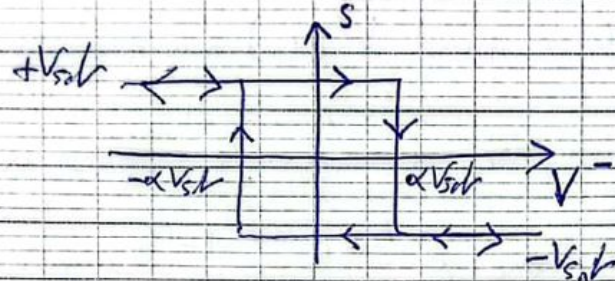
2. Bloc 1



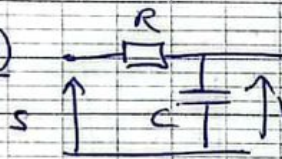
$$\varepsilon = V^+ - V^- = \alpha s - V^-$$

$$\text{si } s = +V_{sat}, \quad \varepsilon = \alpha V_{sat} - V^-$$

$$\text{si } s = -V_{sat}, \quad \varepsilon = -(\alpha V_{sat} + V^-)$$



3. (a)



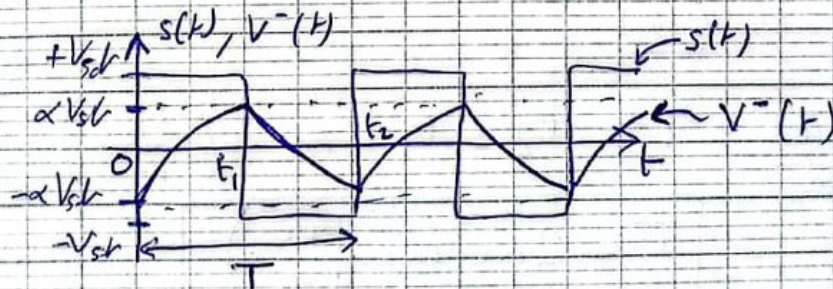
$$B = \frac{1/j\omega}{R + 1/j\omega} \Rightarrow \boxed{\beta = \frac{1}{1 + jRC\omega}}$$

pour $RC\omega \gg 1$, $\beta \approx \frac{1}{jRC\omega}$ comportement intégrateur limité à une bande de fréquence $\left[\frac{1}{2\pi RC}, +\infty \right]$

(b) $\beta = \frac{V^-}{s}$ d'où $\boxed{s(t) = V^-(t) + RC \frac{dV^-}{dt}}$

4. (a) $s(t)$ évolue en créneau entre $+V_{sat}$ et $-V_{sat}$

et $V^-(t)$ est la réponse d'un pure-las 1^{er} ordre à un échelon



4. (b) $RC \frac{dV^-}{dt} + V^- = +V_{sat} \Rightarrow V^-(t) = A e^{-t/RC} + V_{sat}$
 or $V^-(0) = A + V_{sat} = -\alpha V_{sat}$

donc $A = -(1+\alpha) V_{sat}$

donc $V^-(t) = V_{sat} \left[1 - (1+\alpha) e^{-t/RC} \right]$

il y a un seuil grand $V^-(t_1) = \alpha V_{sat}$

donc $1 - (1+\alpha) e^{-t_1/RC} = \alpha$

donc $e^{-t_1/RC} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}$

donc $t_1 = RC \ln \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)$

q.(c) pour $t_1 \leq t \leq t_2$, on aura $V^-(t) = -V_{sat} \left[1 - (1+\alpha) e^{-(t-t_1)/RC} \right]$

$V^-(t_2) = -\alpha V_{sat}$

$1 - (1+\alpha) e^{-(t_2-t_1)/RC} = -\alpha$

donc $e^{-(t_2-t_1)/RC} = \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$

donc $t_2 = t_1 + RC \ln \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)$

q.(d), cf q.(a)

q.(e) $T = t_2 - t_1 = RC \ln \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)$

$T = 2RC \ln \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)$