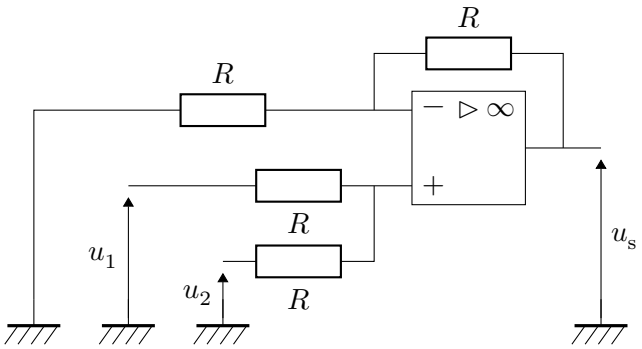
Électronique – Chapitre 2

Rétroaction d'un amplificateur linéaire intégré – TD

Exercice 1 : Montage sommateur

On considère le montage sommateur ci-dessous, où on suppose l'ALI idéal.



1. Quel est le régime de fonctionnement de l'ALI ?
2. Exprimer la tension en sortie u_s en fonction des tensions u_1 et u_2.

Correction :

1. Comme la rétroaction est sur l'entrée inverseuse, l'ALI fonctionne en régime linéaire.
2. Comme l'ALI est idéal, on a : $v_+ = v_-$ et $i_+ = i_- = 0$.

   Pour la branche supérieure, le pont diviseur de tension donne : $v_- = \dfrac{R}{R+R}\,u_s = \dfrac{u_s}{2}$.

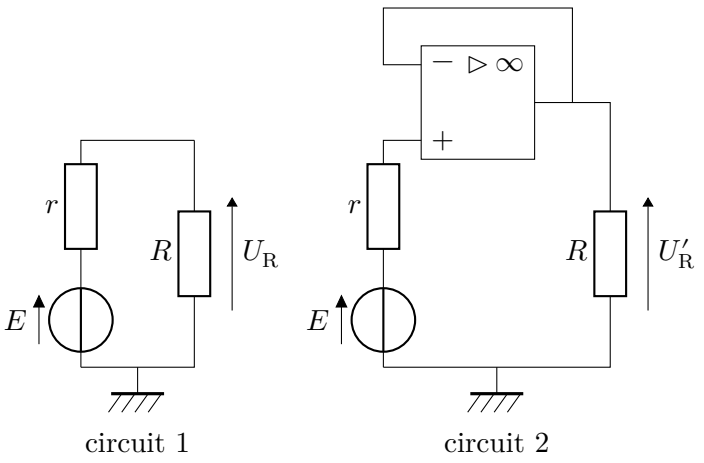
   Pour les branches inférieures, comme $i_+ = 0$, la loi des nœuds donne : $i_1 + i_2 = 0$, soit : $\dfrac{u_1 - v_+}{R} + \dfrac{u_2 - v_+}{R} = 0$, d'où : $v_+ = \dfrac{u_1 + u_2}{2}$.

   On obtient finalement : $u_s = 2\,v_- = 2\,v_+ = u_1 + u_2$.

Exercice 2 : Adaptation d'impédance d'un montage suiveur

On considère un générateur réel, constitué d'une force électromotrice E en série avec une résistance interne r.

1. Déterminer la tension U_R aux bornes de la résistance R si celle-ci est alimenté directement par le générateur (circuit 1).
2. Déterminer la tension U'_R aux bornes de la résistance R si un montage suiveur est placé entre le générateur et la résistance (circuit 2), en supposant que l'ALI est idéal.
3. Conclure sur l'intérêt d'un montage suiveur en sortie d'un générateur réel.



circuit 1 circuit 2

Correction :

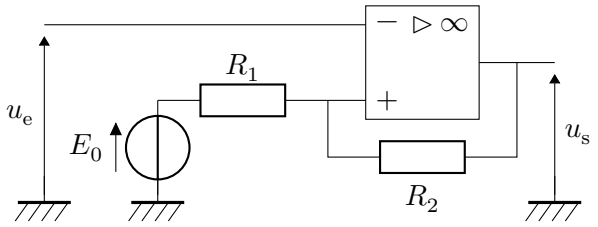
1. Le pont diviseur de tension donne : $U_R = \dfrac{R}{r+R}\,E$.
2. Comme la rétroaction est sur l'entrée inverseuse, l'ALI fonctionne en régime linéaire, d'où : $V_+ = V_- = U'_R$.

Comme $I_+ = 0$, on en déduit que : $V_+ = E$, d'où : $U'_R = E$.

3. Le montage suiveur permet d'obtenir un générateur avec une impédance de sortie nulle, la résistance R est alors soumise à une différence de potentiel E sans perte dans la résistance interne.

Exercice 3 : Comparateur à hystérésis avec tension de décalage

On suppose que l'ALI du montage ci-dessous est idéal et sature à la tension $V_{sat} = 12\,\text{V}$.



On donne les valeurs : $R_1 = 1\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\,\text{k}\Omega$ et $E_0 = 3\,\text{V}$.

1. Justifier que l'ALI fonctionne en régime saturé.

2. Exprimer le potentiel v_+ de l'entrée non-inverseuse en fonction de R_1, R_2, E_0 et u_s.

3. Le comparateur est-il inverseur ou non-inverseur ?

4. Déterminer la tension u_e où l'ALI bascule de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$, puis celle où l'ALI bascule de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$.

5. Représenter la caractéristique entrée-sortie $u_s = f(u_e)$ du montage.

Correction :

1. Comme la rétroaction est sur l'entrée non-inverseuse, l'ALI fonctionne en régime saturé.

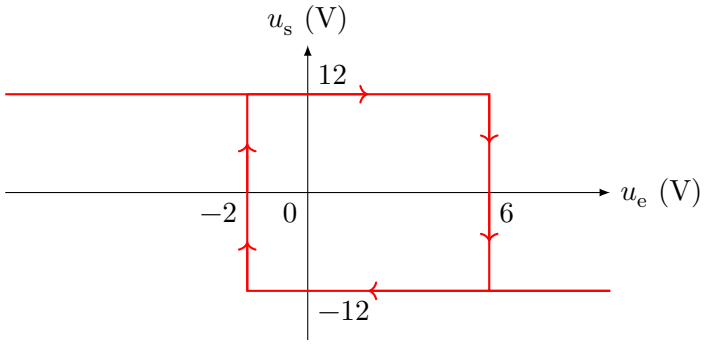
2. Comme $i_+ = 0$, le pont diviseur appliqué à la résistance R_1 donne : $(E_0 - v_+) = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2}(E_0 - u_s)$, d'où : $v_+ = \dfrac{R_2\,E_0 + R_1\,u_s}{R_1 + R_2}$.

3. La tension d'entrée est reliée à l'entrée inverseuse de l'ALI, le comparateur est donc inverseur.

4. Si $u_s = +V_{sat}$, l'ALI bascule à $-V_{sat}$ lorsque $v_+ = v_- = u_e$, d'où on en déduit la tension de basculement : $u_e = \dfrac{R_2\,E_0 + R_1\,V_{sat}}{R_1 + R_2} = 6\,\text{V}$.

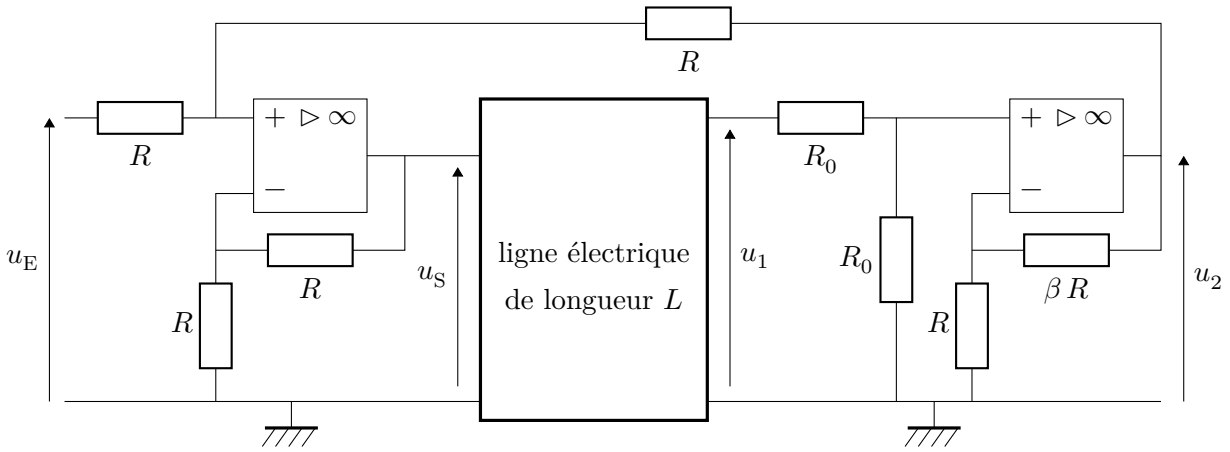
Si $u_s = -V_{sat}$, l'ALI bascule à $+V_{sat}$ lorsque $v_+ = v_- = u_e$, d'où on en déduit la tension de basculement : $u_e = \dfrac{R_2\,E_0 - R_1\,V_{sat}}{R_1 + R_2} = -2\,\text{V}$.

5. On représente la caractéristique entrée-sortie du montage qui présente un hystérésis :



Exercice 4 : Filtre en peigne

On considère le montage ci-dessous, où les deux ALI sont idéaux et fonctionnent en régime linéaire, avec le coefficient $0 < \beta < 1$.



Une ligne électrique de longueur L sépare les tensions u_S et u_1, et sa fonction de transfert est :

$$\underline{H}_L = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_S} = e^{-j\omega\tau}$$

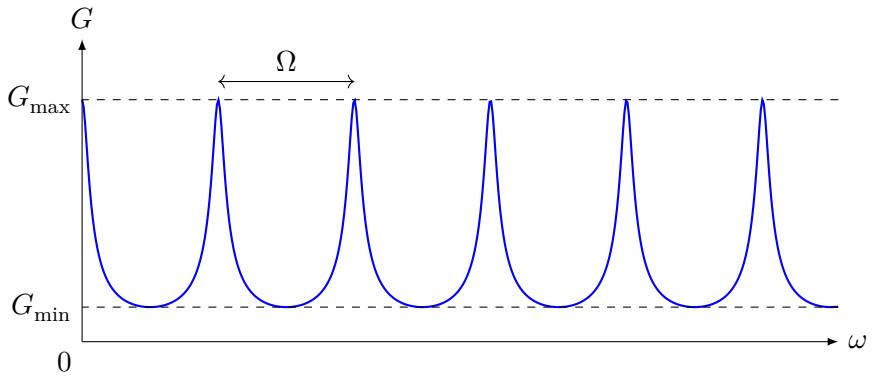
avec τ une constante, et on note c la célérité des ondes électriques dans la ligne.

1. Justifier qualitativement l'expression de la fonction de transfert de la ligne, puis en déduire l'expression de la constante τ.

2. Exprimer la fonction de transfert $\underline{H}_{12} = \dfrac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1}$ en fonction du coefficient β.

3. En déduire l'expression de la fonction de transfert du filtre $\underline{H} = \dfrac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E}$.

On représente ci-dessous l'évolution du gain $G = |\underline{H}|$ en fonction de la pulsation ω.



4. Déterminer l'expression des grandeurs G_{max}, G_{min} et Ω.

La tension $u_E(t)$ à l'entrée du filtre est constituée de la superposition d'un signal périodique $u_0(t)$ de période T_0, et d'un bruit modélisé par un ensemble de signaux périodiques $v_i(t)$ de période $T_i \neq T_0$.

5. Déterminer la longueur L de la ligne électrique à utiliser pour filtrer le bruit et obtenir uniquement le signal de période T_0 en sortie.

Correction :

1. La fonction de transfert correspond à la propagation du signal le long de la ligne électrique, sans atténuation. Le signal en sortie est alors retardé d'un temps $\tau = \dfrac{L}{c}$ par rapport au signal en entrée.

2. Comme le second ALI fonctionne en régime linéaire, on a : $\underline{V}_+ = \underline{V}_-$, où les potentiels s'expriment avec les ponts diviseurs de tension : $\underline{V}_+ = \dfrac{R_0}{R_0 + R_0}\underline{U}_1 = \dfrac{\underline{U}_1}{2}$ et $\underline{V}_- = \dfrac{R}{R + \beta R}\underline{U}_2 = \dfrac{\underline{U}_2}{1+\beta}$.
On obtient : $\dfrac{\underline{U}_1}{2} = \dfrac{\underline{U}_2}{1+\beta}$, d'où la fonction de transfert : $\underline{H}_{12} = \dfrac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \dfrac{1+\beta}{2}$.

3. Comme le premier ALI fonctionne en régime linéaire, on a : $\underline{V}_+ = \underline{V}_-$, avec le potentiel de l'entrée

inverseuse qui est donné par le pont diviseur de tension : $\underline{V}_- = \dfrac{R}{R+R}\,\underline{U}_\mathrm{S} = \dfrac{\underline{U}_\mathrm{S}}{2}$.

Comme $i_+ = 0$, la loi des nœuds appliquée à l'entrée non-inverseuse donne : $\dfrac{\underline{U}_\mathrm{E} - \underline{V}_+}{R} + \dfrac{\underline{U}_2 - \underline{V}_+}{R} = 0$, soit : $\underline{V}_+ = \dfrac{\underline{U}_\mathrm{E} + \underline{U}_2}{2}$.

On obtient : $\dfrac{\underline{U}_\mathrm{E} + \underline{U}_2}{2} = \dfrac{\underline{U}_\mathrm{S}}{2}$, soit : $\underline{U}_\mathrm{E} + \underline{U}_2 = \underline{U}_\mathrm{S}$.

À l'aide des fonctions de transfert précédentes, on peut exprimer : $\underline{U}_2 = \underline{H}_{12}\,\underline{U}_1 = \underline{H}_{12}\,\underline{H}_\mathrm{L}\,\underline{U}_\mathrm{S} = \dfrac{1+\beta}{2}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,\omega\,\tau}\,\underline{U}_\mathrm{S}$, et on obtient : $\underline{U}_\mathrm{E} + \dfrac{1+\beta}{2}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,\omega\,\tau}\,\underline{U}_\mathrm{S} = \underline{U}_\mathrm{S}$, d'où la fonction de transfert du filtre : $\underline{H} = \dfrac{\underline{U}_\mathrm{S}}{\underline{U}_\mathrm{E}} = \dfrac{1}{1 - \frac{1+\beta}{2}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,\omega\,\tau}}$.

4. Le gain s'exprime : $G = |\underline{H}| = \left|\dfrac{1}{1 - \frac{1+\beta}{2}\left[\cos(-\omega\,\tau) + \mathrm{j}\sin(-\omega\,\tau)\right]}\right| = \dfrac{1}{\sqrt{\left[1 - \frac{1+\beta}{2}\cos(\omega\,\tau)\right]^2 + \left[\frac{1+\beta}{2}\sin(\omega\,\tau)\right]^2}}$,

soit : $G = \dfrac{1}{\sqrt{1 - (1+\beta)\cos(\omega\,\tau) + \left(\frac{1+\beta}{2}\right)^2\cos^2(\omega\,\tau) + \left(\frac{1+\beta}{2}\right)^2\sin^2(\omega\,\tau)}} = \dfrac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1+\beta}{2}\right)^2 - (1+\beta)\cos(\omega\,\tau)}}$.

Le gain est maximal lorsque $\cos(\omega\,\tau) = 1$, d'où : $G_\mathrm{max} = \dfrac{1}{\sqrt{\left(\frac{1+\beta}{2}\right)^2 - \beta}} = \dfrac{1}{\sqrt{\frac{1+\beta^2-2\,\beta}{4}}} = \dfrac{2}{1-\beta}$.

Le gain est minimal lorsque $\cos(\omega\,\tau) = -1$, d'où : $G_\mathrm{min} = \dfrac{1}{\sqrt{2 + \beta + \left(\frac{1+\beta}{2}\right)^2}} = \dfrac{1}{\sqrt{\frac{\beta^2+6\,\beta+9}{4}}} = \dfrac{2}{\beta+3}$.

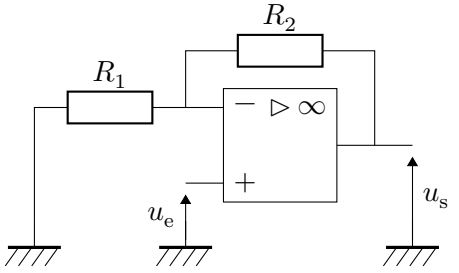
La différence de pulsation Ω entre deux maximums est telle que : $\Omega\,\tau = 2\,\pi$, d'où : $\Omega = \dfrac{2\,\pi}{\tau} = \dfrac{2\,\pi\,c}{L}$.

5. La courbe de gain indique que le filtre ne laisse passer que les harmoniques de pulsation $\omega = n\,\Omega$, avec n un entier.

Comme le signal $u_0(t)$ de période T_0 ne contient que des harmoniques de pulsation $\omega = n\,\dfrac{2\,\pi}{T_0}$, le bruit est filtré en sortie si : $\Omega = \dfrac{2\,\pi}{T_0}$, soit : $\dfrac{2\,\pi\,c}{L} = \dfrac{2\,\pi}{T_0}$, ce qui nécessite une ligne de longueur : $L = c\,T_0$.

Exercice 5 : Limitations en sortie d'un ALI

On considère le montage ci-dessous, où l'ALI supposé idéal présente une tension de saturation $V_\mathrm{sat} = 13\,\mathrm{V}$ et une vitesse limite de balayage $\sigma = 1\,\mathrm{V/\mu s}$.



1. En supposant que l'ALI fonctionne en régime linéaire, établir l'expression du rapport $G = \dfrac{u_\mathrm{s}}{u_\mathrm{e}}$ en fonction de R_1 et R_2.

2. Quel est le nom de ce montage ?

On suppose dans la suite que $R_1 = 1\,\mathrm{k\Omega}$ et $R_2 = 9\,\mathrm{k\Omega}$.

3. Déterminer l'allure de la tension u_s dans ces différents cas :

- si la tension u_e est une sinusoïde d'amplitude $1\,\mathrm{V}$ et de fréquence $1\,\mathrm{kHz}$;
- si la tension u_e est une sinusoïde d'amplitude $2\,\mathrm{V}$ et de fréquence $1\,\mathrm{kHz}$;
- si la tension u_e est une sinusoïde d'amplitude $1\,\mathrm{V}$ et de fréquence $100\,\mathrm{kHz}$.

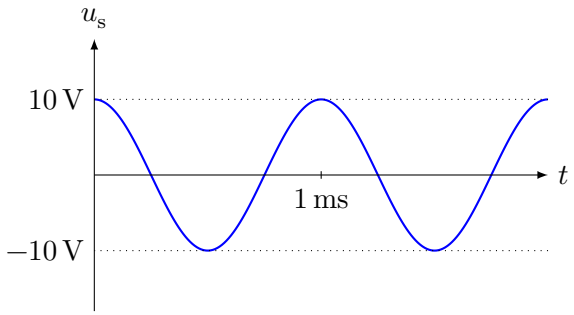
Correction :

1. En supposant que l'ALI fonctionne en régime linéaire, on obtient : $v_- = v_+ = u_e$. Le pont diviseur de tension donne : $v_- = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2}\, u_s$, d'où le rapport : $G = \dfrac{u_s}{u_s} = \dfrac{R_1 + R_2}{R_1}$.

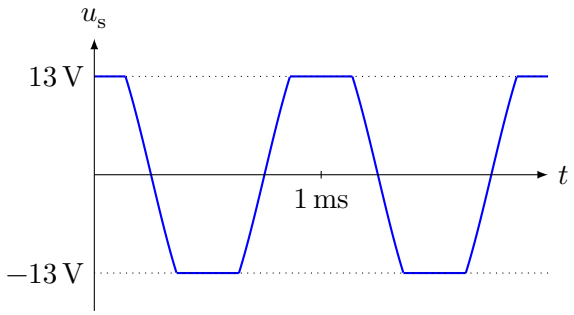
2. Il s'agit d'un montage amplificateur non-inverseur.

3. On étudie les différents cas :

- si la tension u_e est une sinusoïde d'amplitude 1 V et de fréquence 1 kHz, on obtient en sortie une tension sinusoïdale d'amplitude $G \times U_e = 10\,\text{V}$:



- si la tension u_e est une sinusoïde d'amplitude 2 V et de fréquence 1 kHz, la sortie de l'ALI sature à partir de $V_{sat} = 13\,\text{V}$ et ne permet pas d'atteindre une amplitude $G \times U_e = 20\,\text{V}$, on obtient alors en sortie une tension qui est écrêtée :



- si la tension u_e est une sinusoïde d'amplitude 1 V et de fréquence 100 kHz, la vitesse limite de balayage de l'ALI est atteinte car : $\max\left|\dfrac{\mathrm{d}u_s}{\mathrm{d}t}\right| = \omega U_s = 2\,\pi\, f\, G\, U_e = 6\,\text{V/µs} > \sigma$, elle ne permet pas d'atteindre une amplitude $G \times U_e = 10\,\text{V}$, on obtient alors en sortie une tension triangulaire d'amplitude inférieure :

