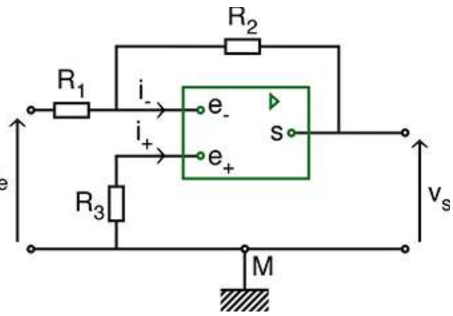
AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL “RÉEL” - corrigé des exercices

I. Compensation de l'effet des courants de polarisation

1. • On peut considérer : $v_+ = v_e - R_3\, i_+$.
• En notant $i_1 = \frac{v_s - v_-}{R_1}$ et $i_2 = \frac{v_-}{R_2} = i_1 - i_-$ (dans les résistances correspondantes) et $H = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ (gain pour l'A.O. idéal), on obtient : $v_- = \frac{1}{H}\,(v_s - R_1\, i_-)$.
• En considérant : $v_+ \approx v_-$ on obtient : $v_e - R_3\, i_+ = \frac{1}{H}\,(v_s - R_1\, i_-)$ puis : $v_s = H\, v_e + R_1\, i_- - H\, R_3\, i_+$.

2. • La simplification donne : $v_s = H\, v_e + \left(\frac{R_1\, R_2}{R_1 + R_2} - R_3\right) H\, i_\pm$.
• Il est possible de compenser en utilisant $R_3 = \frac{R_1\, R_2}{R_1 + R_2}$; ceci redonne : $v_s = H\, v_e$.

3. • Pour un montage amplificateur inverseur, on peut proposer le schéma analogue ci-contre.



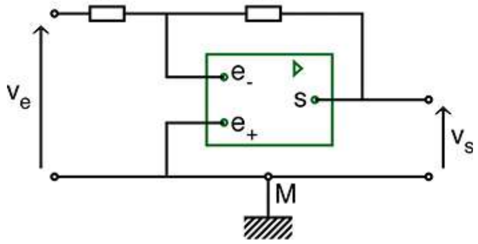
• Avec $i_1 = \frac{v_e - v_-}{R_1}$ et $i_2 = \frac{v_- - v_s}{R_2} = i_1 - i_-$ on obtient :
$$v_- = \frac{R_1\, R_2}{R_1 + R_2}\left(\frac{v_e}{R_1} + \frac{v_s}{R_2} - i_-\right) .$$
• En considérant : $v_+ = -R_3\, i_+ \approx v_-$ on obtient :
$$-R_3\, i_+ = \frac{R_1\, R_2}{R_1 + R_2}\left(\frac{v_e}{R_1} + \frac{v_s}{R_2} - i_-\right) .$$
• Avec $H = -\frac{R_2}{R_1}$ (gain pour l'A.O. idéal), la simplification donne : $v_s = H\, v_e + \left(\frac{R_1\, R_2}{R_1 + R_2} - R_3\right)(1 - H)\, i_\pm$.
• Il est possible de compenser en utilisant $R_3 = \frac{R_1\, R_2}{R_1 + R_2}$; ceci redonne : $v_s = H\, v_e$.

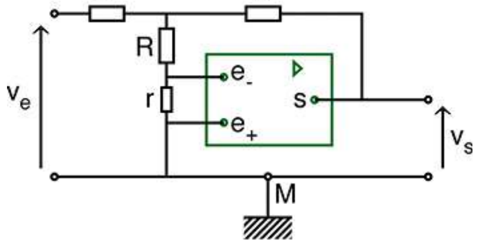
II. Mesure du gain différentiel de l'A.O.

1.a. • On peut écrire : $\frac{v_e - v_s}{r + R} = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{v_s}{\mu\, r}$.

1.b. • On peut en déduire : $\mu = \frac{v_s}{v_e - v_s}\,\frac{r + R}{r} \approx \frac{v_s}{v_e - v_s}\,\frac{R}{r}$.

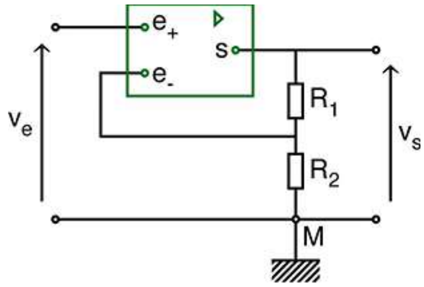
2. • Le montage amplificateur inverseur de gain -1 (réalisé avec deux résistances $R' = 1\ \mathrm{k\Omega}$) correspond au premier des schémas suivants ; le montage modifié correspond au second (par analogie, on insère R sur la branche de rétroaction et r entre les deux entrées).





◊ remarque : en notant A le point entre les deux résistances R' ; $(2\, G' + G)\, v_A = G'\, v_e + G'\, v_s + G\, v_-$ (avec les conductances) ; $(g + G)\, v_- = G\, v_A$; $v_+ = 0$; $v_s = \mu\, \varepsilon = -\mu\, v_-$; la mesure de v_e et v_s donne : $\mu = -\frac{v_s}{v_e + v_s}\,\frac{(2\,R + R')(R + r) + r\, R'}{r\, R} \approx -\frac{v_s}{v_e + v_s}\,\frac{2\,R + R'}{r}$.

III. Rôle stabilisateur de la rétroaction



1.a. • Avec un A.O. idéal, le principe du pont diviseur de tension donne : $v_e = v_+ = v_- = v_s \, \frac{R_2}{R_1+R_2}$.

• Le gain est donc : $H = \frac{v_s}{v_e} = \frac{R_1+R_2}{R_2}$.

1.b. • Expérimentalement, si on intervertit les deux entrées e_+ et e_- (rétroaction sur e_+) on constate le montage devient inopérant en tant qu'amplificateur non inverseur car il se comporte en comparateur inverseur (régime saturé).
• Cela se déduit pas des équations précédentes car le changement de signe de $\varepsilon \approx 0$ y est sans effet. Intuitivement, on peut deviner que le régime devient instable : la moindre perturbation est amplifiée puis réinjectée en entrée avec le même signe... et ainsi de suite, d'où une inévitable divergence.

2.a. • Le montage correspond à : $\varepsilon = v_e - \frac{R_2}{R_1+R_2} \, v_s$ d'où on déduit : $\tau \, \frac{dv_s}{dt} + \left(1 + \frac{\mu}{H}\right) v_s = \mu \, v_e$.
• Pour $v_e(t)$ constant par morceaux, les solutions sont de la forme : $v_s = \frac{H\,\mu}{H+\mu} \, v_e + U \, \mathrm{e}^{-t/T}$ avec $T = \frac{H}{H+\mu} \, \tau$ et où U est une constante d'intégration à déterminer.
• Pour $t < 0$ la seule solution raisonnable est $v_s(t) = 0$.
• Pour $t > 0$ la continuité du signal de sortie (dans l'équation la dérivée $\frac{dv_s}{dt}$ ne peut pas être infinie) impose : $0 = \frac{H\,\mu}{H+\mu} \, E + U$ d'où $v_s = \frac{H\,\mu}{H+\mu} \, E \, .\left(1 - \mathrm{e}^{-t/T}\right)$.
• La tension $v_s(t)$ tend donc exponentiellement vers $\frac{H\,\mu}{H+\mu} \, E \approx H \, E$, valeur proche de celle correspondant à l'A.O. idéal mais tenant compte du gain fini ($\mu \gg H$).

2.b. • L'interversion des deux entrées e_+ et e_- (rétroaction sur e_+) correspond à : $\varepsilon = \frac{R_2}{R_1+R_2} \, v_s - v_e$ d'où on déduit : $\tau \, \frac{dv_s}{dt} + \left(1 - \frac{\mu}{H}\right) v_s = -\mu \, v_e$.
• Pour $v_e(t)$ constant par morceaux, les solutions sont de la forme : $v_s = \frac{\mu\,H}{\mu-H} \, v_e + U \, \mathrm{e}^{t/T}$ avec $T = \frac{H}{\mu-H} \, \tau$ et où U est une constante d'intégration à déterminer.
• Pour $t < 0$ la seule solution raisonnable est $v_s(t) = 0$.
• Pour $t > 0$ la continuité du signal de sortie impose : $0 = \frac{\mu\,H}{\mu-H} \, E + U$ d'où $v_s = \frac{\mu\,H}{\mu-H} \, E \, .\left(1 - \mathrm{e}^{t/T}\right)$.
• La tension $v_s(t)$ diverge donc exponentiellement en s'éloignant de $\frac{\mu\,H}{\mu-H} \, E \approx H \, E$, valeur proche de celle correspondant à l'A.O. idéal mais tenant compte du gain fini ($\mu \gg H$).
• Cette divergence aboutit à la saturation, avec un signe contraire à E (celui du terme exponentiel), d'où un comportement de comparateur inverseur.

IV. Gain en mode commun

• La relation $v_s = \mu_+ \, v_+ - \mu_- \, v_-$ peut s'écrire avec $\mu = \frac{\mu_+ + \mu_-}{2}$ (gain moyen) et $\mu_{mc} = \mu_+ - \mu_-$; ainsi : $v_s = \mu \, .(v_+ - v_-) + \mu_{mc} \, \frac{v_+ + v_-}{2}$ où le second terme décrit l'effet du potentiel moyen. On souhaite que l'A.O. soit un “amplificateur différentiel”, seulement sensible à $v_+ - v_-$ et sans le second terme.