Offset en sortie d'un montage à AOp

La tension d'entrée d'Offset V_{IO} [1] et les courants de polarisation I_{P+} et I_{P-} [2] d'un AOp réel sont responsables d'un Offset en sortie d'un montage utilisant cet AOp : un décalage DC car V_{IO}, I_{P+} et I_{P-} sont des grandeurs DC, puisque ces 3 grandeurs sont des paramètres au repos de l'AOp ().
Chaque partie d'un montage engendrera donc un Offset dû à son propre AOp, et transmettra ou amplifiera en outre l'Offset des parties en amont !

Etant donné que, par application du théorème de « Superposition », la tension de sortie d'un montage est la superposition des composantes dues aux différentes sources appliquées au montage, l'Offset s'ajoute simplement en sortie de l'AOp.

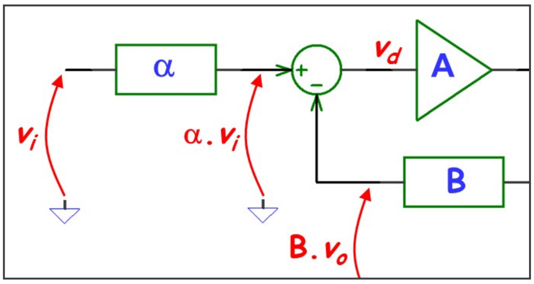
Ainsi, si dans l'application, le signal utile est continu (DC), il est alors directement impacté par l'Offset, qui engendre dans ce cas une erreur sur le signal de sortie ! Dans ce cas, le dimensionnement consiste à réduire l'Offset en sortie de l'AOp en dessous de l'erreur admissible.

Par contre, si dans l'application, le signal utile est alternatif (AC), l'Offset ne l'affecte pas directement puisqu'il ne fait que décaler le « 0 » du signal AC (point de repos). Par contre, le déplacement du point de repos engendre une diminution de la dynamique possible du signal AC, ce qui peut amener à une saturation prématurée de ce signal ou fausser le niveau de comparaison d'un comparateur. Dans ce cas, le dimensionnement consiste à réduire l'Offset en sortie de l'AOp de manière à réduire suffisamment ce désagrément.

Détermination de l'Offset

Etant donné que l'existence de l'Offset est modélisée par l'application des 3 sources V_{IO}, I_{P+} et I_{P-} à un AOp idéal, la détermination de l'Offset se réalise comme toute recherche de relations « entrée-sortie » d'un montage à AOp idéal.

Notons que l'AOp idéal du modèle d'un AOp réel n'a évidemment pas un gain infini, mais que dans le cadre d'un calcul d'Offset on peut le considérer comme tel. En effet :



Si le gain de l'amplificateur (AOp ici) du système bouclé en contre-réaction est de valeur infinie ($A=\infty$), on a :
$v_d = \frac{v_o}{A} = 0$ (tension différentielle) $\Rightarrow \alpha \cdot v_i = B \cdot v_o$ et la fonction de transfert du système est alors : $T_{A=\infty} = \frac{\alpha}{B} = T_{idéal}$

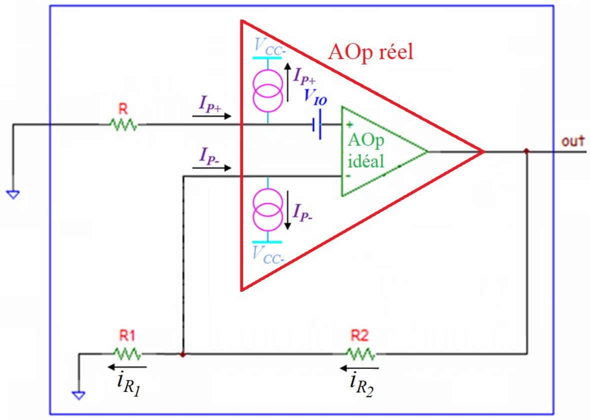
Par contre, si l'on tient compte d'un gain A [3] de valeur réelle la fonction de transfert du système devient : $T_{A\neq\infty} = \frac{T_{idéal}}{1+\frac{1}{A\cdot B}}$. En DC (c.à.d. lorsque le système est soumis à des signaux continus), on a :

[1] Voir pg 13 du document « Doc 3 AOp Caractéristiques.pdf » disponible sur e-learning.
[2] Voir pg 14 du document « Doc 3 AOp Caractéristiques.pdf » disponible sur e-learning.
[3] En réalité, l'impédance d'entrée (Z_d) et de sortie (Z_o) de l'AOp interviennent également, mais il est possible de rendre leurs effets négligeables (devant l'effet de A), par un choix judicieux des valeurs des résistances associées à l'AOp.

$A = A_{DC}$ et admettre $T = T_{idéal}$ est donc « vrai » à une erreur $e_{DC} = \frac{\Delta T}{T_{idéal}} = \frac{T_{idéal} - T}{T_{idéal}} \approx \frac{1}{A_{DC} \cdot B}$ près. Dans pratiquement tous les cas, cette erreur peut être négligée, ce qui permet dans le cadre d'un calcul d'Offset, notamment, d'admettre $A = \infty$, c.à.d. considérer l'AOp comme idéal.

Par application du théorème de « Superposition », on peut déterminer séparément la composante de tension de sortie due à l'Offset en considérant uniquement les sources V_{IO}, I_{P+} et I_{P-} de l'AOp.

Les AOp étant des amplificateurs de tensions, un courant de polarisation I_P n'engendrera de l'Offset que s'il génère une tension en entrée de l'AOp en traversant une résistance.



En guise d'exemple de détermination de l'Offset d'un montage, on traitera le cas d'un amplificateur non-inverseur, représenté ci-contre lorsqu'il est soumis uniquement aux sources responsables de l'Offset :

Etant donné que : $v_d = \frac{v_o}{A} << V_{IO}$, on peut à chaque fois admettre que $v_d \approx 0 \Rightarrow v_- \approx v_+$ [4]

Dans ce circuit on a : $V_{Offset} = v_{R_1} + v_{R_2}$ avec $\begin{cases} v_{R_1} = v_- \\ v_{R_2} = R_2 \cdot i_{R_2} \end{cases}$

En appliquant le théorème de Superposition, on trouve :

$$\Rightarrow \begin{cases} \bullet \text{ si } V_{IO} \text{ seul} : \left\{ \begin{array}{l} v_+ = V_{IO} \Rightarrow v_- \approx v_+ = V_{IO} \Rightarrow v_{R_1} = V_{IO} \\ R_1 \text{ - } R_2 \text{ forment un "pont diviseur de tension"} \end{array} \right\} \Rightarrow \left(V_{Offset}\right)_{V_{IO}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{IO} \\ \\ \bullet \text{ si } I_{P_+} \text{ seul} : \left\{ \begin{array}{l} v_+ = -R \cdot I_{P_+} \Rightarrow v_- \approx v_+ = -R \cdot I_{P_+} \Rightarrow v_{R_1} = -R \cdot I_{P_+} \\ R_1 \text{ - } R_2 \text{ forment un "pont diviseur de tension"} \end{array} \right\} \Rightarrow \left(V_{Offset}\right)_{I_{P_+}} = -\frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot R \cdot I_{P_+} \\ \\ \bullet \text{ si } I_{P_-} \text{ seul} : \left\{ \begin{array}{l} v_+ = 0 \Rightarrow v_- \approx v_+ = 0 \Rightarrow v_{R_1} = 0 \\ v_{R_1} = 0 \Rightarrow i_{R_1} = 0 \Rightarrow i_{R_2} = I_{P_-} \Rightarrow v_{R_2} = R_2 \cdot I_{P_-} \end{array} \right\} \Rightarrow \left(V_{Offset}\right)_{I_{P_-}} = R_2 \cdot I_{P_-} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{Offset} = \underbrace{G \cdot V_{IO}}_{\left(V_{Offset}\right)_{V_{IO}}} + \underbrace{R_2 \cdot I_{P_-} - G \cdot R \cdot I_{P_+}}_{\left(V_{Offset}\right)_{I_P}} \quad [5]$$

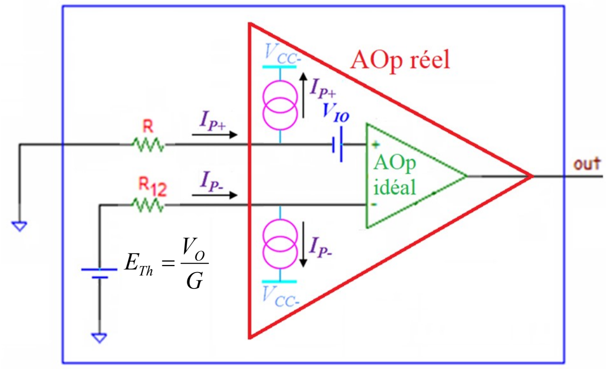
Rem. : le gain de l'amplificateur est : $G = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$

[4] La « contre-réaction » force v_- à suivre v_+ à quasi $v_d \approx 0$ près. Admettre $v_d \approx 0$ est vrai à $\frac{G}{A}$ près (Voir pg suivante).

Une autre possibilité efficace de calcul consiste à simplifier le circuit **en appliquant le théorème de Thévenin** du côté entrée de l'AOp, entre l'entrée « - » et la masse :

$$\begin{cases} E_{Th} = \dfrac{R_1}{R_1+R_2}\cdot V_O = B\cdot V_O = \dfrac{V_O}{G} \\ R_{Th} = R_1 // R_2 = R_{12} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_+ = -R\cdot I_{P_+} + V_{IO} \\ v_- = \dfrac{V_{Offset}}{G} - R_{12}\cdot I_{P_-} \\ v_- \approx v_+ \end{cases}$$



$$\Rightarrow \frac{V_{Offset}}{G} - R_{12}\cdot I_{P_-} = -R\cdot I_{P_+} + V_{IO}$$

$$\Rightarrow V_{Offset} = \underbrace{G\cdot V_{IO}}_{(V_{Offset})_{V_{IO}}} + \underbrace{R_2\cdot I_{P_-} - G\cdot R\cdot I_{P_+}}_{(V_{Offset})_{I_P}}$$

Notons que, alors que la résistance « vue » par le courant I_{P_+} est R, cette solution montre que la résistance « vue » par le courant I_{P_-} est $R_1 // R_2$. En traversant ces résistances, ces courants de polarisation engendrent des tensions en entrées de l'AOp, soit une tension différentielle, responsable de la composante de tension d'Offset $(V_{Offset})_{I_P}$ en sortie de l'AOp :

$$\left.\begin{cases} v_+ = -R\cdot I_{P_+} + V_{IO} \\ v_- = \dfrac{V_{Offset}}{G} - R_{12}\cdot I_{P_-} \\ v_d = v_+ - v_- \\ v_o = A\cdot v_d \end{cases}\right\} \Rightarrow V_{Offset} = A\cdot\left(\underbrace{v_+}_{-R\cdot I_{P_+}+V_{IO}} - \underbrace{v_-}_{\frac{V_{Offset}}{G}-R_{12}\cdot I_{P_-}}\right) = A\cdot\left(-R\cdot I_{P_+} + V_{IO} - \frac{V_{Offset}}{G} + R_{12}\cdot I_{P_-}\right)$$

$$\Rightarrow G\cdot\frac{V_{Offset}}{A} = -G\cdot R\cdot I_{P_+} + G\cdot V_{IO} - V_{Offset} + R_2\cdot I_{P_-} \qquad G\cdot R_{12} = \frac{R_1+R_2}{R_1}\cdot\frac{R_1\cdot R_2}{R_1+R_2} = R_2$$

$$\Rightarrow G\cdot\frac{V_{Offset}}{A} = -G\cdot R\cdot I_{P_+} + G\cdot V_{IO} - V_{Offset} + R_2\cdot I_{P_-}$$

$$\Rightarrow V_{Offset}\cdot\left(1+\frac{G}{A}\right) = G\cdot V_{IO} + R_2\cdot I_{P_-} - G\cdot R\cdot I_{P_+}$$

---

[5] La relation approchée est : $V_{Offset_A} = G\cdot V_{IO} + R_2\cdot I_{P_-} - G\cdot R\cdot I_{P_+}$ et la réelle : $V_{Offset_R} = \dfrac{G\cdot V_{IO} + R_2\cdot I_{P_-} - G\cdot R\cdot I_{P_+}}{1+\dfrac{G}{A}} = \dfrac{V_{Offset_A}}{1+\dfrac{G}{A}}$

$\Rightarrow$ l'erreur commise en admettant $v_d = 0$ est : $\dfrac{V_{Offset_A} - V_{Offset_R}}{V_{Offset_A}} = 1 - \dfrac{V_{Offset_R}}{V_{Offset_A}} = 1 - \dfrac{1}{1+\dfrac{G}{A}} \approx \dfrac{G}{A}$

Notons que ce résultat est immédiat en utilisant : $T = \dfrac{T_{idéal}}{1+\dfrac{1}{A\cdot B}}$ et $\dfrac{\Delta T}{T_{idéal}} = \dfrac{T_{idéal} - T}{T_{idéal}} = \dfrac{1}{1+A\cdot B} \approx \dfrac{1}{A\cdot B}$

$$\Rightarrow V_{Offset} = \frac{G \cdot V_{IO} + R_2 \cdot I_{P_-} - G \cdot R \cdot I_{P_+}}{1 + \dfrac{G}{A}} \approx G \cdot V_{IO} + R_2 \cdot I_{P_-} - G \cdot R \cdot I_{P_+}$$

Remarque : pour montrer l'intérêt d'effectuer les calculs en appliquant le théorème de « Superposition » ou de « Thévenin », voici le calcul à effectuer sinon :

$$\begin{cases} v_o = V_{o_{offset}} = v_- + R_2 \cdot i_{R_2} \\ v_d = \dfrac{v_o}{A} << V_{IO} \Rightarrow v_- \approx v_+ \\ v_+ = V_{IO} - R \cdot I_{P_+} \\ i_{R_2} = I_{P_-} + i_{R_1} \\ i_{R_1} = \dfrac{v_-}{R_1} = \dfrac{V_{IO} - R \cdot I_{P_+}}{R_1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{o_{offset}} = V_{IO} - R \cdot I_{P_+} + R_2 \cdot \left(I_{P_-} + i_{R_1}\right) \\ \quad = V_{IO} - R \cdot I_{P_+} + R_2 \cdot I_{P_-} + R_2 \cdot \dfrac{V_{IO} - R \cdot I_{P_+}}{R_1} \\ \quad = V_{IO} + R_2 \cdot \dfrac{V_{IO}}{R_1} - R \cdot I_{P_+} - R_2 \cdot \dfrac{R \cdot I_{P_+}}{R_1} + R_2 \cdot I_{P_-} \\ \Rightarrow V_{o_{offset}} = \dfrac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{IO} - \dfrac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot R \cdot I_{P_+} + R_2 \cdot I_{P_-} \end{cases}$$

En ce qui concerne les courants de polarisation, les paramètres donnés dans les « datasheets » sont les suivants : $\begin{cases} \bullet\ I_{IB} = \dfrac{I_{P_+} + I_{P_-}}{2} \text{ (Valeur moyenne)} \\ \bullet\ I_{IO} = \left|I_{P_+} - I_{P_-}\right| \text{ (Ecart ... idéalement nul)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{P_+} = I_{IB} + \dfrac{I_{IO}}{2} \\ I_{P_-} = I_{IB} - \dfrac{I_{IO}}{2} \end{cases}$

$$\Rightarrow V_{Offset} = G \cdot V_{IO} - G \cdot R \cdot \left(I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2}\right) + R_2 \cdot \left(I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2}\right) = G \cdot V_{IO} + \left(R_2 - G \cdot R\right) \cdot I_{IB} - \frac{G \cdot R + R_2}{2} \cdot I_{IO}$$

Afin d'envisager le cas le plus défavorable, d'une part les termes de la relation d'Offset qui dépendent des paramètres V_{IO} et I_{IO} doivent être pris en valeur absolue [6] car leurs signes sont inconnus [7] et, d'autre part, il faut utiliser les valeurs maximales des paramètres V_{IO}, I_{IO} et I_{IB} :

$$\Rightarrow V_{Offset} = G \cdot V_{IO} + \left(R_2 - G \cdot R\right) \cdot I_{IB} + \frac{G \cdot R + R_2}{2} \cdot I_{IO} \quad (V_{IO},\ I_{IO} \text{ et } I_{IB} \text{ positifs et de valeurs maximales})$$

Réduction de l'Offset :

Notons déjà que la relation de l'Offset en sortie de l'AOp montre d'une part que l'Offset dû à la tension d'Offset d'entrée augmente avec le gain de l'amplificateur et, d'autre part, l'intérêt de limiter la valeur des résistances pour limiter l'Offset dû aux courants de polarisation.

- Pour réduire le terme $\left(V_{Offset}\right)_{V_{IO}} = G \cdot V_{IO}$, on ne peut que choisir un AOp ayant un V_{IO} suffisamment faible [8]. Des AOps spéciaux sont conçus dans ce but (C'est le cas de l'OP07 de l'application 1).

---

6 I_{IB} est ici positif car entrant dans l'AOp. Dans le cas d'un AOp à courant I_{IB} sortant, soit prendre I_{IB} en valeur absolue également, soit le considérer entrant.

7 Notons qu'il n'est donc nullement envisageable de réduire l'Offset en tentant de « profiter » de l'effet du signe « - » !

- Pour réduire le terme $\left(V_{Offset}\right)_{I_P} = \left(R_2 - G \cdot R\right) \cdot I_{IB} + \dfrac{G \cdot R + R_2}{2} \cdot I_{IO}$:

  - Choisir un AOp ayant des courants de polarisation suffisamment faibles. Les AOps à transistors d'entrées de type FET ont des courants de polarisation particulièrement faibles, mais ils ont une tension d'Offset d'entrée V_{IO} plus élevée que celle des AOps à transistors d'entrées de type BJT, ce qui explique que les AOps « à faible V_{IO} » ont des transistors d'entrées de type BJT.

  - Limiter la valeur des résistances utilisées car il y a ici un degré de liberté pour réduire cette composante d'Offset.

  - Etant donné qu'idéalement $I_{IO} = 0$, il est judicieux, pour réduire l'Offset, d'annuler le terme dû à I_{IB} [9], en choisissant : $R = \dfrac{R_2}{G} = R_1 // R_2$. Dans ce cas, l'Offset dû aux courants de polarisation devient : $\left(V_{Offset}\right)_{I_P} = R_2 \cdot I_{IO}$ et l'Offset total est alors : $V_{Offset} = G \cdot V_{IO} + R_2 \cdot I_{IO}$

    Rem. : on parle d'« *équilibrage statique des entrées* » car l'équivalent de Thévenin du côté de l'entrée « - » montre alors que les résistances « vues » par les courants I_{P+} et I_{P-} sont alors identiques. [10]

    Notons que, si l'on désire réduire l'Offset au maximum, il est possible de rendre $\left(V_{Offset}\right)_{I_P}$ négligeable devant $\left(V_{Offset}\right)_{V_{IO}}$, en choisissant une valeur pour la résistance R_2 telle que :

    $R_2 << G \cdot \dfrac{V_{IO_{typ}}}{I_{IO_{\max}}}$ (10 fois est suffisant en pratique).

  - Si la résistance R n'existe pas, l'Offset dû aux courants de polarisation est : $\left(V_{Offset}\right)_{I_P} = R_2 \cdot I_{P\_}$ et l'Offset total : $V_{Offset} = G \cdot V_{IO} + R_2 \cdot I_{P\_}$ avec $\left(I_{P\_}\right)_{\max} = \left(I_{IB}\right)_{\max} + \dfrac{\left(I_{IO}\right)_{\max}}{2}$

    Si l'on désire réduire l'Offset au maximum, il est possible de rendre $\left(V_{Offset}\right)_{I_P}$ négligeable devant $\left(V_{Offset}\right)_{V_{IO}}$, en choisissant une valeur pour la résistance R_2 telle que : $R_2 << G \cdot \dfrac{V_{IO_{typ}}}{I_{P-_{\max}}}$ (10 fois est suffisant en pratique).

---

8 Le gain G est le gain de l'amplificateur et a donc une valeur imposée par le cahier des charges du montage.

9 Cas le plus probable.

10 Alors que la résistance « vue » par le courant I_{P_+} est R, la deuxième solution de détermination de l'Offset montre que la résistance « vue » par le courant $I_{P\_}$ est $R_1 // R_2$, ce qui met directement en évidence la notion d'« *équilibrage statiques des entrées* », puisque l'on retrouve directement que, dans l'hypothèse de courants de polarisation identiques (I_{IB}), il faut $R = R_1 // R_2$, pour que ces courants engendrent la même tension sur les 2 entrées de l'AOp, soit une tension différentielle nulle, donc une tension $\left(V_{Offset}\right)_{I_P}$ nulle.