

Chapitre 13 - L'amplificateur opérationnel

Un amplificateur opérationnel, appelé ampli-op ou AOP, est un amplificateur différentiel qui **amplifie la différence de potentiel existant entre ses deux entrées**. Initialement conçu en 1947 pour effectuer des opérations mathématiques (d'où son nom) dans des calculateurs analogiques, ce circuit s'est imposé dans de nombreux domaines, essentiellement l'amplification de signaux analogiques (audio ou vidéo), mais aussi dans le domaine des signaux numériques. Il existe aujourd'hui sous forme de circuits intégrés bon marché et sa polyvalence en fait, une fois de plus, un des CI les plus utilisés.

À quoi sert un ampli-op ?

En modélisme ferroviaire, un ampli-op nous servira à **comparer des signaux** pour obtenir une tension positive (signal HIGH) dès qu'une différence existera entre ces signaux d'entrée. Nous sommes donc dans le domaine des signaux numériques et nous verrons que l'AOP peut servir à fabriquer très simplement des fonctions que nous avons déjà utilisées auparavant telles que oscillateurs, triggers de Schmitt, monostable, bascule bistable, fonctions logiques. L'ampli-op peut aussi servir à amplifier un signal trop faible, ou le mettre en forme, pour que celui-ci soit traité en aval par un circuit électronique. Enfin, l'ampli-op, initialement prévu pour réaliser des opérations mathématiques, peut effectuer des additions, intégrer ou dériver une fonction, et de ce fait, générer des formes d'ondes (signal triangulaire, carré, sinusoïdal). La polyvalence de l'ampli-op fait que vous allez l'adorer au même titre que le NE555.

Présentation

Un AOP est constitué de deux broches d'alimentation, deux entrées et une sortie, plus parfois d'autres broches ayant des fonctions particulières. La figure 13.1 montre les symboles de l'AOP ; généralement, on ne fait pas figurer les broches d'alimentation comme on peut le voir sur les deux symboles de droite.

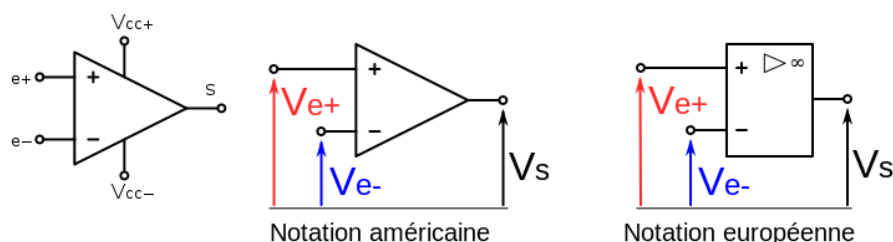


Figure 13. 1

Les AOP sont prévus pour être alimentés avec une alimentation symétrique, c'est-à-dire une tension positive sur la broche Vcc+ et une tension négative sur la broche Vcc- ; cette alimentation symétrique est nécessaire parce que l'ampli-op est prévu pour amplifier des signaux qui peuvent être alternatifs. Nous verrons pourtant qu'il est tout à fait possible d'alimenter nos AOP avec une alimentation asymétrique constituée d'une masse et d'une tension positive mais que dans ce cas, le signal de sortie est forcément à tension positive. Ceci n'est pas un problème dans le domaine du modélisme ferroviaire où nos AOP nous serviront à traiter des signaux numériques de tension comprise entre 0 et Vcc.

L'entrée e+ est dite **non inverseuse** alors que l'entrée e- est dite **inverseuse** ; la différence de potentiel entre les deux entrées e+ et e- est appelée **tension différentielle d'entrée** $V_d = V_{e+} - V_{e-}$.

On appelle **tension de mode commun** la tension moyenne aux bornes e+ et e- : $V_{mc} = (V_{e+} + V_{e-})/2$

La tension sur la borne de sortie de l'AOP est :

$$V_s = A_d \times (V_{e+} - V_{e-}) + A_{mc} \times (V_{e+} + V_{e-})/2 \text{ ou encore } V_s = A_d \times V_d + A_{mc} \times V_{mc}$$

A_d est l'**amplification différentielle** (encore appelée gain différentiel) et A_{mc} est l'**amplification de mode commun**. On cherche à avoir A_d la **plus élevée possible** et A_{mc} **réduite au maximum** car c'est un terme parasite dû à l'imperfection des AOP. Dans la majorité des cas, on pourra retenir que $A_{mc} \neq 0$ et que **$V_s = A_d \times V_d$** .

L'amplificateur opérationnel parfait

Un AOP parfait aurait une impédance d'entrée infinie (aucun courant ne rentre dans l'AOP), un gain en mode différentiel infini et par contre une résistance de sortie nulle et un gain en mode commun nul.

$$A_d = \infty ; R_e = \infty ; R_s = 0 \text{ et } A_{mc} = 0.$$

L'amplificateur opérationnel réel

On sait que rien n'est parfait ; par exemple, le gain en mode différentiel infini n'est pas obtenu puisque la tension de sortie est limitée à la tension d'alimentation. À la moindre différence de tension entre $e+$ et $e-$, la tension de sortie devient égale à $+V_{cc}$ ou $-V_{cc}$, ou plutôt V_{sat} , la tension de saturation qui est égale à V_{cc} moins 1,5 à 2 V approximativement. Ceci est montré par la figure 13.2.

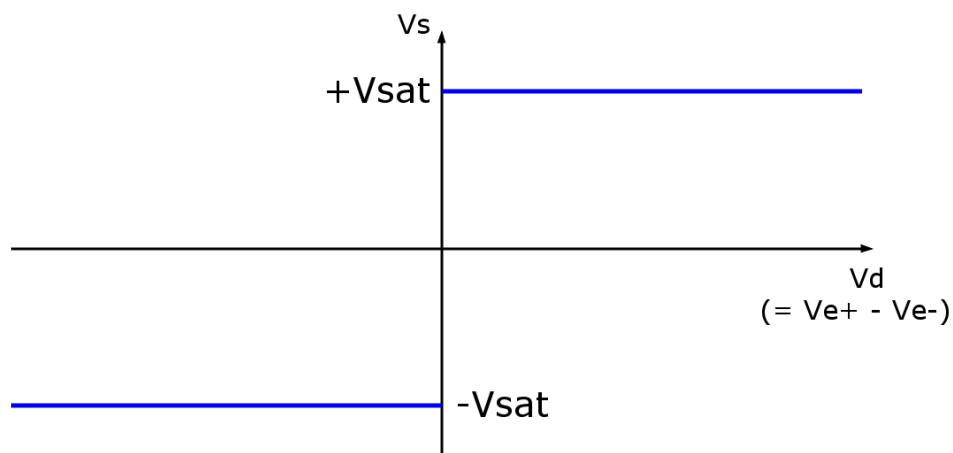


Figure 13. 2

La différence entre tension d'alimentation et V_{sat} est appelée **tension de déchet** ; elle est due à la chute de tension dans les transistors de sortie.

$$V_s = A_d \times V_d \text{ ou encore } V_d = V_s / A_d \text{ (cette formule reste vraie tant qu'on n'a pas atteint } V_{sat})$$

Pour une tension de saturation de l'ordre de 13 V et un gain de 100000 (c'est assez courant pour un AOP), on voit que V_d doit rester inférieur à 130 μV en valeur absolue pour que le régime d'amplification soit linéaire et non saturé. Le domaine de linéarité est donc très restreint et compris entre deux domaines non linéaires, comme le montre la figure 13.3.

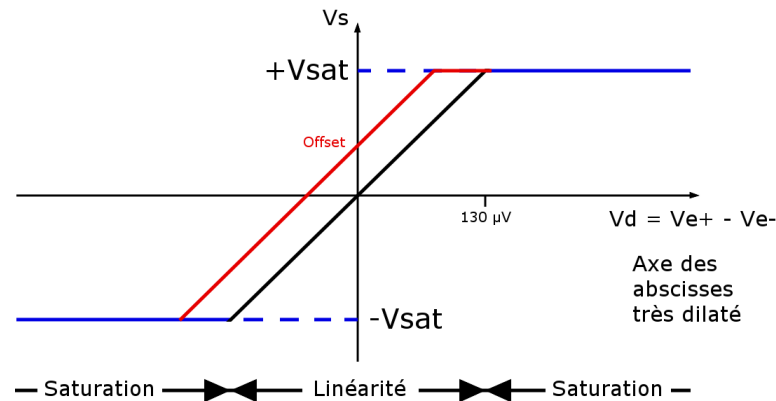


Figure 13. 3

En fait, en raison de dissymétrie dans les caractéristiques des transistors, la courbe réelle (en rouge sur la figure 13.3) est décalée de la courbe théorique et lorsque la tension différentielle est nulle, il reste une tension encore appelée **offset** ; cette tension d'offset peut être gênante pour certaines applications, pour cette raison, les AOP ont des broches qui permettent de régler cet offset à zéro grâce à un potentiomètre monté entre ces broches.

Bien que rien ne soit parfait, on peut considérer les AOP comme **pratiquement parfaits** : leur gain énorme (de l'ordre de 100000) peut être considéré en première approximation comme infini. La résistance de sortie, à défaut d'être nulle, est comprise entre 50 et 200 Ohms, parfois moins (quelques Ohms pour l'AOP TL081), ce qui est très peu. Le courant qui rentre dans un AOP est quasi nul (200 nA (nano-ampères, je ne me suis pas trompé de touche sur le clavier !) pour un μ A741 et 30 pA (pico-ampères !) pour un TL081), ce qui donne une impédance d'entrée de l'ordre du million d'Ohms ! Toutes ces valeurs en font un très bon composant quasi-parfait.

Le fait de considérer nos AOP comme parfaits permet de simplifier les hypothèses de calcul. Par exemple, l'impédance d'entrée étant infinie, on peut considérer qu'aucun courant n'entre dans l'AOP. De même, la résistance de sortie étant nulle, la chute de tension est négligeable (de plus, les courants de sortie sont faibles).

Contre réaction

La figure 13.2 nous montre que la moindre différence de potentiel entre les deux entrées amène l'AOP à saturation. Une contre réaction est donc obligatoire ; elle consiste à prélever une partie de la tension de sortie pour la réinjecter sur une des entrées, comme le montre la figure 13.4.

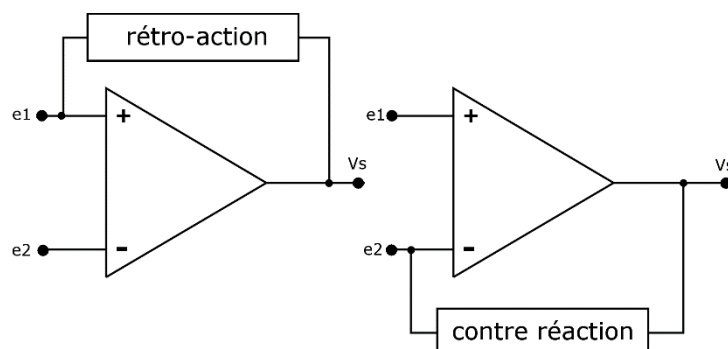


Figure 13. 4

Si on l'injecte sur l'entrée inverseuse, on obtient une contre réaction négative qui permet de soustraire une partie du signal de sortie au signal d'entrée de l'AOP ; **ceci permet de garder une tension différentielle V_d nulle entre les entrées $e+$ et $e-$.**

Si on l'injecte sur l'entrée non inverseuse, on obtient une rétro-action positive ; l'AOP est en saturation positive ou négative suivant le signal d'entrée et fonctionne comme un comparateur.

Amplificateur inverseur

La figure 13.5 montre un AOP en amplificateur inverseur ; on effectue une contre réaction sur l'entrée inverseuse. La sortie non inverseuse est reliée à la masse.

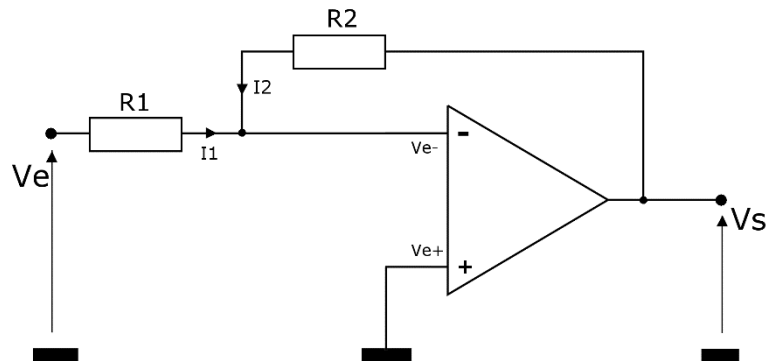


Figure 13. 5

La contre réaction et le fait que A_d est infini, nous permettent de dire que la tension différentielle est nulle. Comme l'entrée $e+$ est à la masse, $V_{e+} = 0$ donc $V_{e-} = 0$

Si E est la tension d'entrée :

$$E - V_{e-} = R1 \times I1 \text{ ou encore } E = R1 \times I1$$

$$V_s - V_{e-} = R2 \times I2 \text{ ou encore } V_s = R2 \times I2$$

Aucun courant n'entre dans l'AOP, donc $I1 = - I2$ (loi des nœuds, vous vous rappelez ?)

$$I1 = E / R1 = - V_s / R2$$

$$V_s / E = - (R2 / R1)$$

Le gain obtenu est égal à $R2 / R1$ et le signe $-$ est là pour nous rappeler que le signal est inversé.

On peut donc régler le gain d'un ampli opérationnel grâce à deux résistances.

Amplificateur non inverseur

La figure 13.6 montre un AOP en amplificateur non inverseur. Cette fois, la tension E est appliquée à l'entrée non inverseuse. Nous raisonnerons de la même façon ; la contre réaction force la tension différentielle à 0. La tension E se retrouve aux bornes de la résistance $R1$. Comme aucun courant n'entre dans l'AOP, les résistances $R1$ et $R2$ forment un diviseur de tension et par application de la loi d'Ohm, on a la relation :

$$E / R1 = V_s / (R1 + R2) \text{ ou encore } V_s / E = (R1 + R2) / R1$$

$$V_s / E = 1 + R2 / R1$$

Le gain obtenu est égal à $1 + R2 / R1$ et est positif (signal de sortie non inversé).

Une fois de plus, le gain dans ce montage a été réglé par deux résistances.

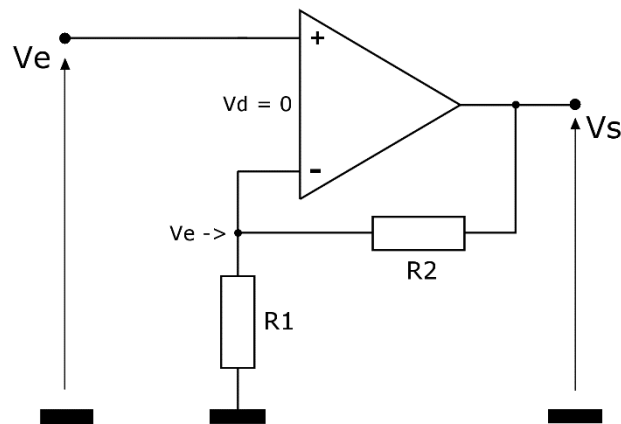


Figure 13. 6

Amplificateur suiveur

Le montage de la figure 13.7 est encore plus simple : on reconnaît le montage précédent avec une résistance R1 infini (pas de liaison) et une résistance R2 nulle (un simple fil).

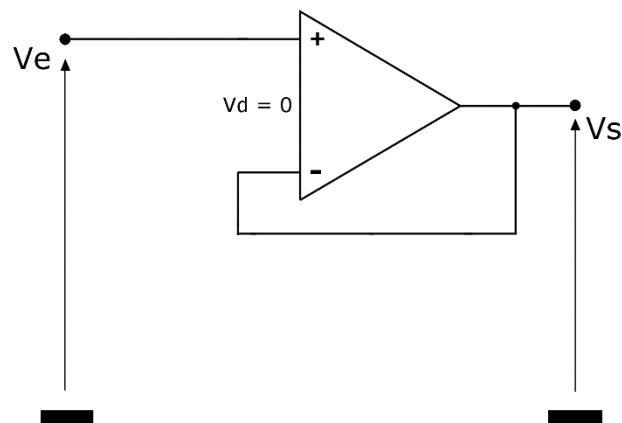


Figure 13. 7

Dans ce cas, $Vs / E = 1$

Le signal de sortie est égal au signal d'entrée (le gain est égal à 1). Quel intérêt direz-vous ?

Cela permet de fabriquer un **adaptateur d'impédance** utilisé chaque fois que la charge d'un montage risque de réduire la tension délivrée par ce montage.

Vitesse de balayage

En mode comparateur, la moindre différence de potentiel entre les entrées e+ et e- fait que la sortie bascule à + ou - Vsat ; la vitesse à laquelle se fait la transition s'appelle vitesse de balayage ou taux d'augmentation (en anglais slew rate ou SR). Pour un AOP parfait, cette vitesse de balayage est infinie. Pour un AOP μA 741, cette vitesse de balayage est égale à $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$; pour que Vs passe de -15 V à +15 V, il faut donc $60 \mu\text{s}$. Le retour à -15 V prend le même temps soit un total de $120 \mu\text{s}$. Un signal de

fréquence supérieure à 8 kHz ne pourrait pas être traité correctement par cet AOP qui déformerait le signal transformant des signaux carrés en signaux trapézoïdaux. Un vrai comparateur peut traiter des signaux de plusieurs MHz de fréquence. Dans notre hobby, on ne se préoccupera pas de ce genre de limitations.

Les amplificateurs opérationnels μA 741 et TL 081

Le circuit μA 741 est un amplificateur opérationnel très populaire et bon marché, dont les caractéristiques seront très suffisantes pour nos montages. Il a été décliné par de nombreux constructeurs sous les dénominations LM 741, MC 1741, SN 72741 ou encore TBA 221. Son brochage est indiqué par la figure 13.8. La broche 8 n'est pas connectée, l'alimentation symétrique est sur les broches 4 et 7, la sortie est sur la broche 6, les deux entrées sont sur les broches 2 (e-) et 3 (e+). Enfin, les broches 1 et 5 servent à annuler la tension d'offset.

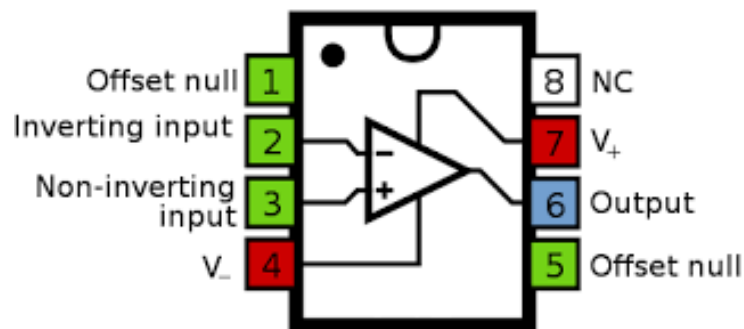


Figure 13. 8

Le circuit TL 081 est un amplificateur opérationnel de conception plus récente, faisant appel à des transistors à effet de champ, et présentant de ce fait de meilleures performances. Son brochage est identique à celui du μA 741 (voir figure 13.8). Sa vitesse de balayage est de 13 V/ μ s (à comparer au 0,5 du μA 741 !) et son courant de repos d'entrée est de 30 pA (pico-ampères, à comparer aux 80 nA (nano-ampères) du μA 741).

Les deux amplificateurs opérationnels cités sont utilisables en modélisme ferroviaire : reste un autre critère qui a aussi son importance, le prix ! Et le TL 081 est actuellement moins cher que le μA 741 (ou équivalent).

Alimentation des AOP

La façon la plus simple et la plus logique d'alimenter un AOP est de lui fournir deux tensions symétriques ; ceci peut être réalisé par l'emploi de deux simples piles électriques comme le montre la figure 13.9.

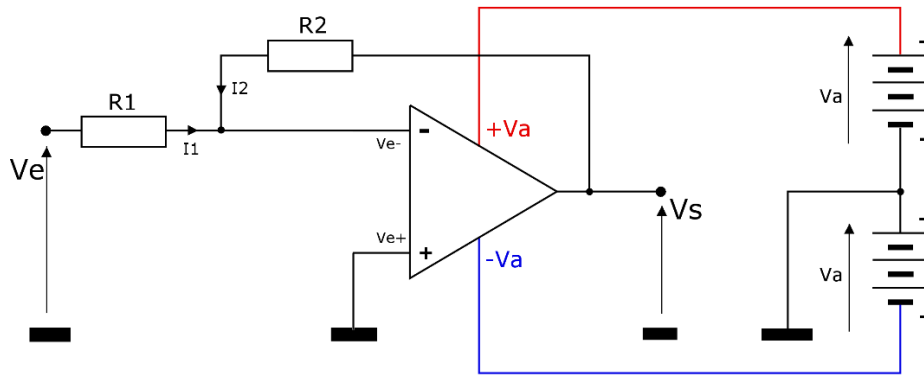


Figure 13. 9

Le point milieu des deux piles montées en série est la masse commune. Avec un tel montage à tensions symétriques, la tension sur la broche de sortie de l'AOP, lorsque celui-ci est à l'équilibre, est égale à la moitié de la tension d'alimentation totale, soit 0V. Hors équilibre, cette tension peut évoluer de V_{cc+} à V_{cc-} .

On peut remarquer que cette masse commune n'est pas appliquée à l'AOP qui ne dispose pour son alimentation que de deux broches, une recevant la tension positive, l'autre la tension négative. Dans le modélisme ferroviaire, on dispose de l'alimentation accessoire en alternatif qui peut être redressé en continu, mais qui ne donnera qu'une tension positive. Certains AOP spécialement prévus pour cela pourront fonctionner avec cette tension positive, mais pas les AOP plus classiques.

La solution pour alimenter un AOP avec une tension positive uniquement est donnée par la figure 13.10.

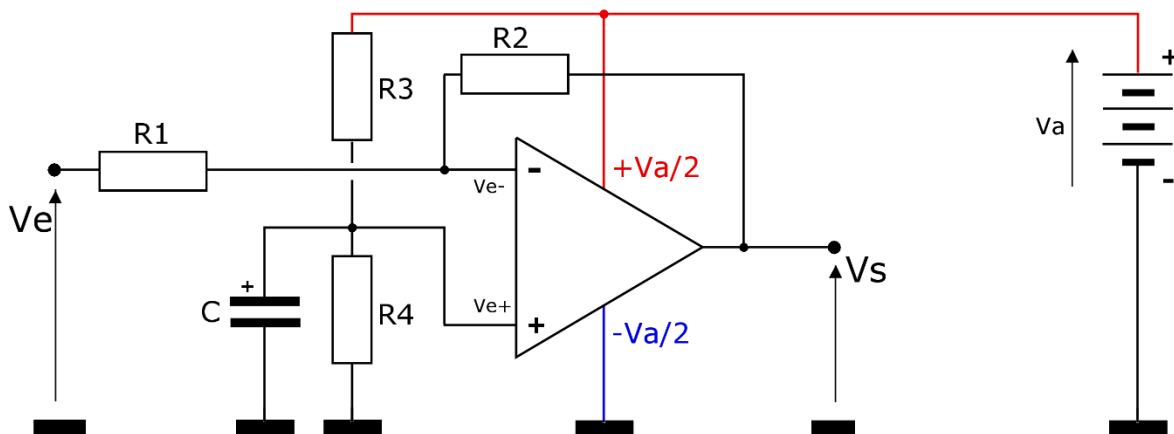


Figure 13. 10

Ce montage correspond à un amplificateur inverseur à alimentation symétrique dont les tensions seraient $+V_a/2$ et $-V_a/2$ par rapport à une masse commune fictive fixée à la moitié de la tension d'alimentation totale V_a . Pour ce faire, l'entrée non inverseuse de l'AOP (qui retourne à la masse dans un montage classique) doit donc aboutir sur cette masse fictive qui est créée grâce au diviseur de tension $R3$ - $R4$ où les deux résistances sont bien entendu égales pour avoir $V_a/2$ sur l'entrée non inverseuse. Le condensateur C assure un filtrage des tensions pour éliminer diverses perturbations : sa valeur peut être choisie entre 4,7 et 47 μF .

Le schéma de la figure 13.11 (tiré du journal Génération électronique de novembre 1994) est encore plus intéressant puisqu'il permet de rendre symétrique une alimentation qui ne l'est pas, ce qui permet ensuite d'alimenter de façon normale nos autres AOP du montage (le courant de sortie est de quelques dizaines de milliampères).

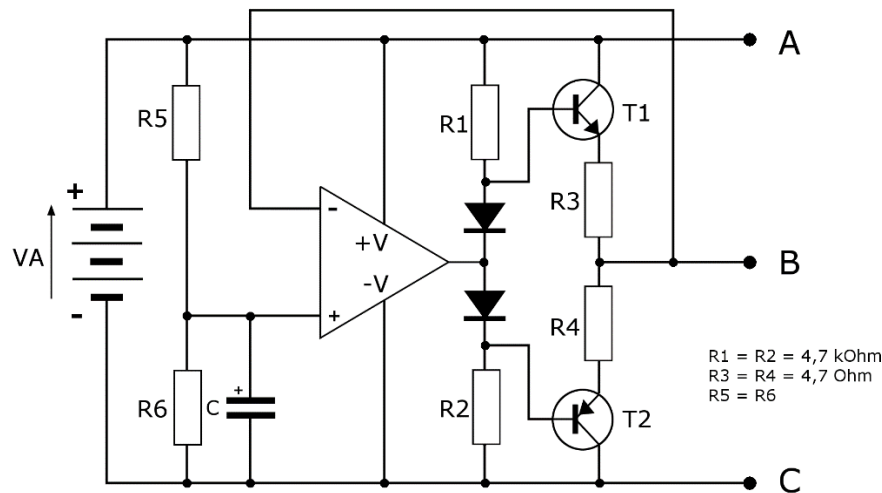


Figure 13. 11

Au point A, la tension est égale à VA , au point C elle est égale à 0 V : au point B, elle est égale à $VA/2$ puisque c'est le point milieu d'un montage symétrique utilisant la sortie de l'AOP. Rien ne nous interdit de définir la tension au point B comme nouvelle référence (nouvelle masse) et dans ce cas, la tension au point A est égale à $+VA/2$ et la tension au point C est égale à $-VA/2$. Le condensateur C joue le même rôle que dans le montage de la figure 13.10. Encore un schéma à inclure dans votre schémathèque !

À retenir des amplificateurs opérationnels :

- L'amplificateur opérationnel ou AOP est un amplificateur différentiel qui amplifie la différence de potentiel entre ses deux entrées.
- L'AOP dispose d'une entrée inverseuse et d'une entrée non inverseuse, ainsi que d'une sortie.
- L'AOP a besoin de tensions d'alimentation symétriques ; en modélisme ferroviaire, il est possible d'alimenter un AOP avec une seule tension positive.
- Le gain de l'AOP en mode comparateur est très important, ce qui nécessite d'introduire une réaction en bouclant la sortie sur une des entrées. On obtient alors un amplificateur inverseur ou non dont le gain dépend de la valeur de deux résistances.
- L'AOP peut être considéré comme un composant quasiment parfait ; avec cette hypothèse, les calculs sont extrêmement simples mais jamais éloignés de la réalité.
- Malgré cela, les AOP ont des petits défauts mais qui ne nous gênent pas dans la pratique du modélisme ferroviaire (tension de déchet, vitesse de balayage, bande passante, offset).

Applications des AOP en modélisme ferroviaire

Comme nous l'avons vu, l'AOP est avant tout un amplificateur de signaux analogiques dont on peut régler le gain avec deux résistances. Il apparaît donc sur les schémas d'alimentation pour train électriques, donnant plus de réalisme à la conduite de nos petits trains en introduisant l'inertie au freinage ou à l'accélération. Tous ces schémas existent dans la littérature déjà mentionnée et vous êtes maintenant capables de les comprendre, au moins dans les grandes lignes.

Mais l'AOP excelle aussi dans le domaine des signaux numériques qui sont essentiellement ceux qui nous intéressent pour constituer des automatismes. Les principales fonctions électroniques que nous avons décrites dans les chapitres précédents (astable, monostable, bistable, trigger de Schmitt) peuvent être reproduites avec des AOP.

Sur nos réseaux, les AOP sont surtout utilisés comme comparateurs et permettent de réaliser des détecteurs d'occupation de la voie. Le montage de la figure 13.12 est celui d'un déclencheur photosensible qui permet d'automatiser une animation en fonction de l'éclairage d'une LDR (Light Dependent Resistor ou encore cellule photoconductrice). On peut ainsi commander l'éclairage des bâtiments en fonction de la tombée de la nuit, mais on peut aussi utiliser ce montage pour localiser un train sur un réseau et déclencher un automate. Il suffit dans ce cas de mettre la LDR sous la voie (et ne pas la recouvrir avec du ballast !); comme le réseau est généralement éclairé par le dessus, la LDR réagira lorsqu'un train passera au-dessus. Ce système remplace avantageusement l'ILS puisqu'il remplit la même fonction **sans que les locomotives aient besoin d'être équipées d'un aimant**. Placé un peu avant la sortie d'une boucle de retournement, la LDR de ce montage peut ainsi commander l'inversion du courant au bon moment pour éviter le court-circuit (voir le chapitre 4 sur les diodes et les ponts de diodes où il est question des boucles de retournement). On peut aussi localiser les trains dans une gare cachée ou bien commander les manœuvres d'un passage à niveau en fonction de l'arrivée d'un train.

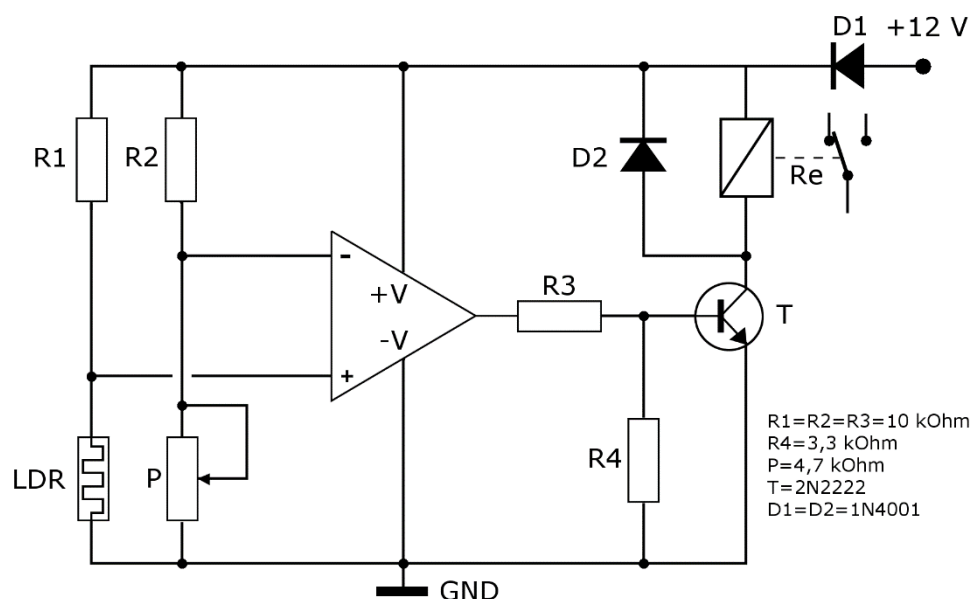


Figure 13. 12

Le montage de la figure 13.12 peut servir chaque fois qu'il faut comparer deux signaux. Chaque entrée de l'AOP $\mu A741$ est connectée à un diviseur de tension constitué de deux résistances, une fixe et une variable; le potentiomètre P est monté en résistance ajustable ce qui permet de régler le seuil de déclenchement et la LDR a sa résistance qui augmente lorsque la luminosité diminue, ce qui fait augmenter V_{e+} . Lorsque V_{e+} devient supérieur à V_{e-} , le comparateur bascule et sa sortie passe de 0V à 12 V, ce qui sature le transistor T qui devient passant et commande le relais 12 V Re. Vous avez reconnu la diode D1 en entrée de schéma pour protéger des erreurs de polarité et la diode D2 qui protège le transistor (diode de roue libre). Avouez que ce n'est pas compliqué de repérer la position de vos trains sur votre réseau.

Liste des composants nécessaires pour :

L'alimentation symétrique pour AOP :

Un AOP 741

Deux diodes (ex 1N4001)

Deux résistances de $4,7\ \Omega$ et deux de $4,7\ k\Omega$

Deux résistances identiques (de 10 à $22\ k\Omega$)

Un condensateur électrochimique (de $4,7$ à $47\ \mu F$)

Un transistor NPN et un PNP

Déclencheur photoélectrique :

Un AOP 741

Une résistance de $3,3\ k\Omega$ et trois de $10\ k\Omega$

Un potentiomètre de $4,7\ k\Omega$

Un transistor NPN (2N2222)

Deux diodes 1N4001

Une LDR (Light dependant resistor)

Un relais 1 RT