

ABC des AOP

première partie du petit abécédaire des amplificateurs opérationnels

Il était temps, semble-t-il, que nous entreprissions une étude systématique — faute de la pouvoir faire exhaustive — de ces composants merveilleux que nous mettons à toutes les sauces. Nous considérons les amplificateurs opérationnels comme des composants tout simples, qui sont devenus aussi courants et aussi bon marché que les transistors. Il n'en a pas toujours été ainsi, et nous l'allons montrer tout à l'heure (écrivez-nous le nom de l'auteur, la phrase originale et le titre de la fable, vous avez gagné).

L'amplificateur opérationnel est connu sous forme de circuit **intégré**, mais c'est avant tout un circuit, et un circuit qui existait bien avant les circuits intégrés, avant même les semi-conducteurs. Toutes les fonctions remplies par nos semi-conducteurs modernes l'ont été dans le passé par les tubes électroniques, puis par les transistors. Le nom d'amplificateur opérationnel vient de ce qu'on lui confiait toutes les fonctions de calcul dans les équipements électroniques, jusqu'à ce que l'électronique numérique et les microprocesseurs viennent les détrôner. Dès que j'entends le mot calcul, je dégage mon microprocesseur. Ce remplacement de l'analogique par le numérique est justifié principalement par des considérations de coût : l'analogique n'a rien à envier au numérique en ce qui concerne la précision, au contraire.

Me voilà débarrassé de mon imparfait du subjonctif. Chaque rédacteur doit en placer un par article. S'il s'en trouve quelque autre dans le même article, ce ne peut être qu'une erreur de ma part. Si vous trouvez un article sans imparfait du subjonctif, écrivez-nous, le rédacteur a perdu.

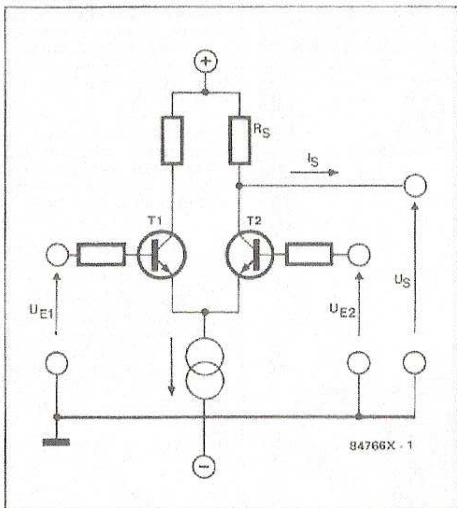
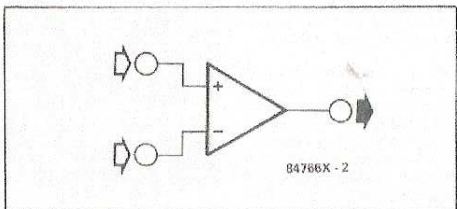


Figure 1 - L'essentiel d'un amplificateur opérationnel tient dans son étage d'entrée : deux transistors dont les émetteurs sont raccordés à la même source de courant constant. Les anglo-saxons appellent ce montage *long-tailed pair*, ou «paire à longue queue», et on dira encore que ce sont les Français qui ne pensent qu'à ça.

Malheureusement, les bons circuits analogiques sont compliqués et chers car ils mettent en œuvre un grand nombre de composants et ils ne peuvent pas se passer d'une intervention humaine de réglage et d'étalonnage.

L'électronique numérique permet de faire à moindre prix, aujourd'hui, des mesures et des calculs de précision acceptable dans la majorité des cas. Le disque compact est un exemple.

Malheureusement, les bons circuits analogiques sont compliqués et chers car ils mettent en œuvre un grand nombre de composants et ils ne peuvent pas se passer d'une intervention humaine de réglage et d'étalonnage.



mandent soit une résolution soit une rapidité extrêmes.

De la même façon la qualité lamentable des images électroniques de télévision ne peut pas rivaliser avec la qualité des images argentiques d'un film de 70 mm sur grand écran, mais ce sont pourtant, pour des raisons économiques, les caméras vidéo et les magnétoscopes qui se vendent. L'essentiel est que les spectateurs ne s'imaginent pas qu'ils ont vu le film alors qu'ils n'ont vu que des approximations sous la forme d'alignements de points.

La comparaison peut sembler abusive entre la télévision et les calculateurs numériques. Pourtant l'analogie est frappante : la télévision représente par un nombre fini de points une réalité continue. De même le calculateur numérique se représente la réalité par un nombre fini de valeurs. L'important est de connaître le nombre de points, de savoir quel intervalle les sépare, et de ne pas s'imaginer que la valeur numérique est une valeur exacte.

Le principe

Les circuits intégrés modernes ont une structure interne trop complexe pour que nous en fassions une description détaillée.

L'élément de base est ce qu'on appelle un **amplificateur différentiel**. Le montage le plus simple est la paire différentielle (figure 1) : il s'agit de deux transistors aux caractéristiques aussi proches que possible, dont les émetteurs sont connectés ensemble à une source de courant. Les deux cercles sécants symbolisent la

source de courant constant.

La source de courant fait en sorte que la somme des courants des émetteurs soit constante.

Quand la tension est égale sur la base des deux transistors, l'intensité dans les deux collecteurs est égale, égale à la moitié de l'intensité nominale de la source de courant constant. La valeur absolue de la tension, ou **tension de mode commun**, n'importe pas ici, seule compte l'égalité des tensions sur les deux bases. La tension de sortie prend alors une valeur déterminée. Viennent l'une des tensions d'entrée à prendre une valeur différente de l'autre, la répartition des courants de collecteur va changer, comme la répartition des courants d'émetteur, et comme la tension de sortie, mesurée sur la résistance de collecteur R_C .

Les différences de tension entre les entrées sont seules amplifiées et transmises à la sortie. Voilà pour le principe de l'amplificateur différentiel. Il ne s'agit que du principe, et tous les amplificateurs opérationnels intégrés, même le « simple » 741 ont une constitution interne beaucoup plus compliquée. Entre autres, il faut au moins un transistor en émetteur-suiveur pour découpler la sortie de la paire différentielle. En effet, il ne faut pas que la charge connectée en sortie vienne perturber la répartition des courants entre les transistors.

Les propriétés

La caractéristique principale des amplificateurs opérationnels découle du principe lui-même : ces amplificateurs, contrairement aux autres, ont deux entrées. C'est ce que représente le schéma, bien connu maintenant, de l'amplificateur opérationnel (figure 2). Nous reviendrons sur la dénomination des entrées.

L'autre caractéristique importante des amplificateurs opérationnels est un gain en tension, à basse fréquence et en continu,

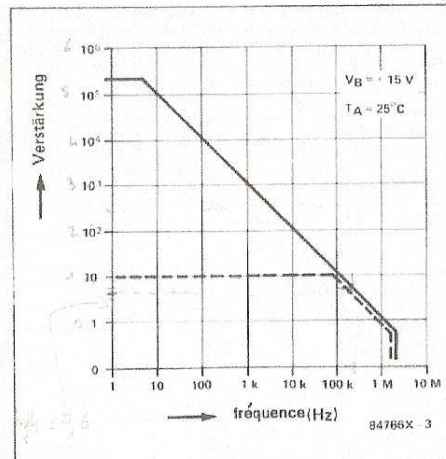


Figure 3 - Le gain en boucle ouverte du 741 en fonction de la fréquence. Le produit du nombre en abscisse par le nombre en ordonnée est constant et caractéristique d'un amplificateur donné ; on l'appelle **produit gain-bande passante**. La courbe en pointillés correspond au montage de la figure 5 (voir texte).

énorme. La figure 3 montre à 1 Hz un gain supérieur à 100 000. Elle montre aussi que le gain diminue à mesure que la fréquence augmente ; il n'est plus que de 1000 à 1 kHz, et devient inférieur à 1 quand la fréquence est de 1 MHz. C'est-à-dire qu'à 1 MHz le signal n'est pas amplifié, mais atténué. Précisons que ces caractéristiques sont relevées en « boucle ouverte », sans réseau de contre-réaction entre la sortie et les entrées.

L'impédance d'entrée mérite aussi d'être examinée : elle a une valeur de plusieurs mégohms (10^6 ohms), ce qui permet de considérer comme nulle la charge imposée au circuit raccordé à l'entrée.

Général
Nous parlons jusqu'ici de l'amplificateur opérationnel en général. En l'absence d'indication, c'est le 741 qui est pris comme exemple. Il existe un grand nombre d'autres types, possédant des caractéristiques différentes sur tel ou tel point précis, comme le souffle minimal du 357, ou l'impédance d'entrée extrêmement élevée du 356, ou le produit gain-bande passante élevé du 351. Un amplificateur idéal doit avoir une impédance d'entrée infinie, un gain en boucle ouverte infini, une impédance de sortie nulle. Toutes ces caractéristiques locales n'existent pas en pratique. Lors de la conception des circuits, on considère d'abord les amplificateurs comme par-

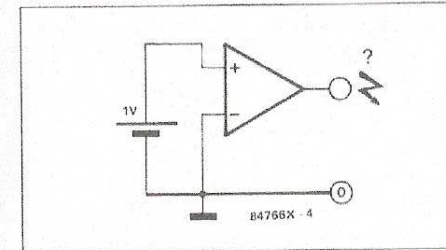


Figure 4 - Une différence de tension de 1 V entre les deux entrées de l'amplificateur opérationnel provoque une tension de sortie théoriquement infinie. En pratique, la tension de la sortie est limitée à celle de l'alimentation.

faits, puis on apporte au schéma les corrections nécessaires. D'ailleurs il est fort rare de devoir utiliser un composant aux limites de ses possibilités.

Pour le zéro, vous voyez ce que je veux dire : pour l'infini, rassurez-vous : ça fait tout de suite quinze volts ou mille mégohms, tout est relatif. Absolument !

Les applications

Les montages fondamentaux de l'amplificateur opérationnel sont en nombre limité et nous les examinerons en leur temps.

Commençons par étudier l'amplification de tension sur l'exemple de la figure 4. L'entrée inverseuse (-) est reliée à la masse, potentiel nul, l'entrée non-inverseuse (+) est soumise à un potentiel positif de 1 V.

Voici les explications attendues sur la dénomination des entrées. Reportons-nous à la figure 1 et imaginons que la tension appliquée à la base de T2 augmente. Le courant de collecteur de T2 augmente, pendant que diminue celui de T1, puisque la somme des deux courants est constante, déterminée par la source de courant constant. Le courant qui traverse R_C augmente et la tension de collecteur de T2, ou tension de sortie, diminue.

Une variation de la tension de l'entrée T2 se traduit par une variation **inverse** de la tension de sortie. Imaginons maintenant que la tension appliquée à T1 augmente et celle de T2 diminue. Autrement dit la tension de sortie augmente, elle varie dans le **même sens** que la tension de l'entrée reliée à T1. L'entrée reliée à T2 est appelée **entrée inverseuse** (-), l'entrée reliée à T1 **entrée non-inverseuse** (+).

Monsieur de cent mille volts
Revenons à notre montage de la figure 4. La différence de tension de 1 V, multipliée par le gain de 100 000, doit nous donner une tension de sortie de 100 kV. D'où l'éclair et le

point d'interrogation du schéma. Il est évident que l'amplificateur ne peut pas délivrer de telles tensions. La tension de sortie est limitée à la tension des sources d'alimentation, ici 15 V. La tension de sortie plafonne donc à 15 V : réduisons la tension d'entrée à 1 mV (0,001 V). La tension de sortie doit être maintenant :
ce :
 $0,001 \times 100\,000 = 100\text{ V}$.

C'est toujours impossible et la tension reste limitée à 15 V. Il va falloir trouver une astuce pour utiliser cet amplificateur qui **sature** avec un gain inférieur à son gain maximal.

Astuce
L'astuce s'appelle **contre-réaction**. Elle consiste à réinjecter à l'entrée **inverseuse** une fraction de la tension de sortie (c'est parce que la réaction est appliquée à l'entrée inverseuse qu'on l'appelle **contre-réaction**). Le montage pratique est celui de la **figure 5**. La fraction de tension est prélevée grâce à un diviseur à résistances, qui semble avoir été inventé spécialement pour cela.

Nous appliquons notre tension de 1 V à l'entrée non-inverseuse, la tension de sortie augmente aussi longtemps que subsiste une différence de tension entre l'entrée inverseuse et l'entrée non-inverseuse. Simultanément l'augmentation de la tension de la sortie provoque une augmentation de celle de l'entrée inverseuse. La tension de la sortie cesse d'augmenter dès que la différence de tension entre les deux entrées est nulle (rappelons que l'amplificateur différentiel amplifie les **différences** de tension). L'amplificateur opérationnel a trouvé son équilibre.

Équilibre
Puisque l'amplificateur est en équilibre, c'est que la tension est la même sur les deux entrées : $U_E = U_F = 1\text{ V}$. Le rapport du diviseur $R2/R1$ est de 9, donc la tension de sortie doit être de 10 V pour que $U_F = 1\text{ V}$. Le rapport entre tension de sortie et tension d'entrée, U_S/U_E , s'appelle le gain, désigné par A. Dans notre cas,

$$A = \frac{U_S}{U_E} = \frac{10}{1} = 10$$

La tension de sortie est égale à dix fois la tension d'entrée et elle est de même signe. Nous pouvons remplacer dans la formule U_S par $R2+R1$ puisque la tension de sortie est appliquée au diviseur ; de même puisque la tension aux bornes de $R1$ est égale à la tension d'entrée, nous pouvons remplacer U_E par $R1$. Nous avons remplacé un rapport de tensions par un rapport de résistances, et le gain de l'amplificateur non-inverseur tel qu'il est illustré par la figure 5 obéit à la formule :

$$A = \frac{R1 + R2}{R1}$$

ou encore :

gain de l'amplificateur non-inverseur

$$A = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Le contenu du petit cadre ci-dessus ne doit plus vous sortir de la tête. Pendant que vous faites un peu de rangement là-haut, prévoyez cinq petites cases supplémentaires pour les autres montages fondamentaux qui viendront à leur tour dès que nous en aurons fini avec ce montage non-inverseur.

2
3
4
5
6

Modèle des cases qu'il vous faut réserver dans votre mémoire, et qui seront remplies au fur et à mesure que progressera

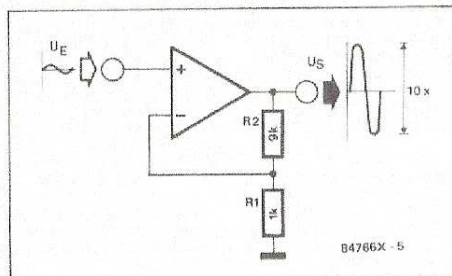


Figure 5 - Le premier des montages fondamentaux de l'amplificateur opérationnel : l'amplificateur non-inverseur. Grande impédance d'entrée, faible impédance de sortie, simplicité, faible consommation. C'est un article que nous avons au catalogue depuis très longtemps et qui est toujours très demandé. Il vous fera de l'usage, n'hésitez pas à en prendre plusieurs.

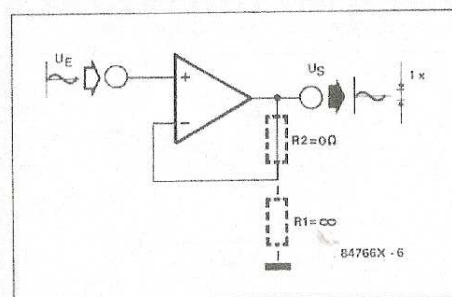


Figure 6 - Le modèle économique en composants : pas de résistance, gain unitaire garanti. Contrairement au transistor monté en suiveur, il présente une limitation de l'intensité en sortie, ce qui peut se révéler utile dans certains cas.

notre petit abécédaire, qui commence plutôt bien (autant faire soi-même les commentaires élogieux).

Nous voici en présence d'un composant dont nous pouvons faire varier le gain par l'adaptation toute simple du rapport de deux résistances. Renversons, non ? Mieux encore, la contre-réaction apporte aux caractéristiques de l'amplificateur opérationnel des améliorations non négligeables.

La **bande passante** du montage de la figure 5, amplificateur avec contre-réaction de gain 10, est représentée en pointillés sur la figure 3. Elle s'étend bravement de 0, soit le continu, jusqu'à 80 kHz. Au-delà le gain est limité par construction.

L'**impédance de sortie** de l'amplificateur est considérablement diminuée. Le 741 tout nu a une impédance de sortie voisine de 1 kΩ. Cette impédance de sortie est ramenée à une valeur négligeable (dans les limites de l'intensité que peut fournir le circuit intégré) du fait de la contre-réaction. Toute chute de tension due à l'impédance de sortie est prise en compte par le diviseur $R2/R1$ et transmise à l'entrée inverseuse. L'amplificateur réagit à cette différence de tension et corrige sa tension de sortie en conséquence. L'erreur introduite par la résistance interne est corrigée instantanément grâce à la **boucle** de contre-réaction : la sortie est **asservie** à l'entrée. Et hop ! vous échappez encore aujourd'hui à la transformée de Laplace, au lieu de Black et au diagramme de Mortimer. Merci élec.

On la boucle

Les transistors de sortie du circuit intégré en boucle fermée ne sont jamais saturés, ce qui évite la distorsion.

Suivez-moi jeune ohm

Le transistor en émetteur suiveur nous était apparu comme un moyen commode de fournir une intensité importante à partir d'une source de signal d'impédance élevée. Nous considérons alors comme constant le décalage de 0,7 V entre la ten-

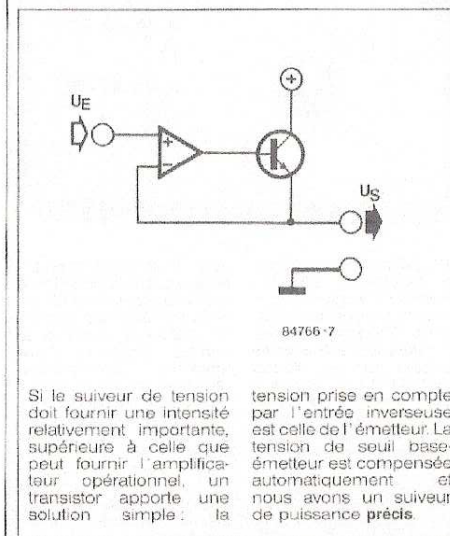
sion de la base et celle de l'émetteur. Gentils comme vous l'êtes tous, vous n'avez rien dit, tout en sachant bien que cette tension de seuil est tout sauf fixe, qu'elle varie entre 0,5 et 0,8 V, en fonction de la température, de l'intensité, de la vitesse du vent.

Supposons que nous ayons besoin d'un étage suiveur de tension de **précision**. Il devrait avoir une forte impédance d'entrée, une faible impédance de sortie et un gain positif rigoureusement unitaire. Le montage non-inverseur de l'amplificateur opérationnel que nous venons de voir possède toutes ces caractéristiques sauf une : le gain unitaire. Qu'est-ce qu'on peut faire, docteur ?

En rang par deux et retournons sans faire de bruit à l'encadré ci-dessus. Pour que A soit égal à 1, il faut et il suffit que $R2$ soit **null**.

Nous pouvons donc la remplacer ou la court-circuiter par un pont en fil. Comme $R1$ est devenue inutile dans un pont diviseur qui divise par 1, nous pouvons la supprimer (bourreau, fais ton office).

Nous venons d'inventer le suiveur de tension de la **figure 6**, cas particulier de l'amplificateur non-inverseur de la figure 5, al-



Si le suiveur de tension doit fournir une intensité relativement importante, supérieure à celle que peut fournir l'amplificateur opérationnel, un transistor apporte une solution simple : la

tension prise en compte par l'entrée inverseuse est celle de l'émetteur. La tension de seuil base-émetteur est compensée automatiquement et nous avons un suiveur de puissance **précis**.

Il nous reste à voir l'amplificateur inverseur, et le sommateur, et le différentiateur, et l'intégrateur et l'amplificateur d'intensité pour en avoir fini avec les six montages fondamentaux. Et le comparateur et les oscillateurs pour continuer. Et les filtres actifs. Et la tête, et le bec ! Le préambule de ce numéro étant passé, le rythme pourra s'accélérer un peu, ne pensez-vous pas ?

84766

84766-7

ABC des AOP

Deuxième partie du petit abécédaire des amplificateurs opérationnels

La première partie nous a permis de faire connaissance avec l'histoire des amplificateurs opérationnels, et avec le principe de l'amplificateur différentiel. Le montage **non-inverseur** occupe la première des six cases de notre aide-mémoire (voir ELEX n°16, page 16), avec le suivi de tension dans un coin. Le sujet d'aujourd'hui est l'amplificateur **inverseur**, montage le plus utilisé dans la pratique.

Rappel

La figure 1 rappelle le principe de l'amplificateur différentiel. La base de T1 constitue l'entrée non-inverseuse, celle de T2 l'entrée inverseuse. La tension de sortie est celle du collecteur de T2.

Précision

La tension de sortie est mesurée par rapport à la masse, c'est-à-dire en **mode commun**. Dans la réalité, la cuisine interne de l'amplificateur opérationnel exploite la tension **différentielle** de sortie de l'étage d'entrée. Il s'agit de la différence de tension entre les deux collecteurs. Comme ces deux tensions varient en sens inverse l'une de l'autre, notre raisonnement simplifié reste valable.

Comme vous pouvez le constater sur le schéma, l'alimentation est devenue symétrique alors qu'elle était unique dans la première partie. Nous avons maintenant deux sources de tension, l'une positive, l'autre négative par rapport à la masse. Toutes les tensions sont référencées à la masse et non par rapport aux tensions d'alimentation. Un bon amplificateur opérationnel est insensible aux variations de la tension d'alimentation ; ce critère figure dans les feuilles de caractéristiques sous le

nom de « taux de réjection des tensions d'alimentation ». La tension d'alimentation la plus courante est de ± 15 V.

Un bon amplificateur opérationnel est insensible aux variations de la tension d'alimentation

La figure 2 reprend, avec des alimentations symétriques, le schéma de l'amplificateur non-inverseur de la première partie. Les limitations imposées à la tension d'entrée par le seuil base-émetteur des transistors disparaissent. Il était impossible, avec une alimentation simple, de traiter des tensions inférieures à 0,6 V. C'est possible maintenant, et nous pouvons même traiter des tensions négatives par rapport à la masse. Appliquons une tension de -1 V à l'entrée du montage : la sortie passe à -10 V. Le fonctionnement reste identique avec des tensions positives, donc nous pouvons amplifier des tensions alternatives.

Retournement

Le montage **inverseur** de l'amplificateur opérationnel est représenté par la figure 3. Supposons que la boucle de contre-réaction R_f/R_i n'est pas encore connectée. L'entrée non-inverseuse (+) est reliée à la masse et nous appliquons une faible tension sur l'entrée inverseuse (-). La réponse de l'amplificateur est la même que dans la première partie, à l'inversion des polarités près ; si la tension de l'entrée inverseuse est positive, la tension de la sortie, fautive de pouvoir devenir infinie, prendra la valeur de la tension d'alimentation négative. Symétriquement, si la tension de l'entrée inverseuse est négative, la sor-

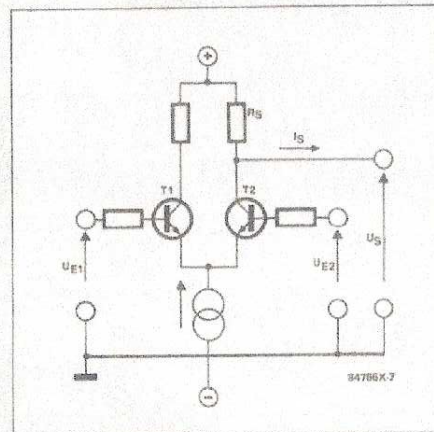


Figure 1 - Il ne s'agit pas exactement du schéma de la première partie. L'alimentation est symétrique : nous nous affranchissons ainsi du seuil de tension base-émetteur des transistors ; d'autre part l'excursion de tension de la sortie permet de traiter des tensions alternatives. Et c'est tant mieux car le continu peut devenir monotone à la longue.

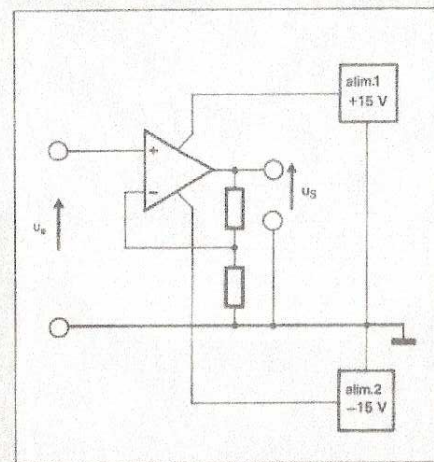


Figure 2 - L'amplificateur non-inverseur, alimenté en symétrique, permet d'amplifier des tensions positives, négatives, ou alternatives.

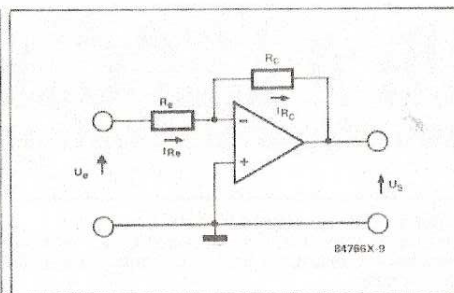


Figure 3 - L'amplificateur inverseur est le montage le plus utilisé. La tension de l'entrée non-inverseuse peut être fixée à un niveau différent de la masse, ce qui nous fait anticiper sur les montages sommateurs.

te ira en « butée » à la tension d'alimentation positive. Nous continuons de négliger les tensions de déchet des transistors qui constituent le circuit intégré : chaque fois qu'il est question de la tension d'alimentation sans autre précision, il s'agit de la tension d'alimentation diminuée de la tension collecteur-émetteur du transistor de sortie (environ 1 V).

Ce fonctionnement inversé n'est pas étonnant, puisque l'amplificateur opérationnel réagit à des différences de tension entre les entrées. La différence est la même quand on applique -1 V à l'entrée inverseuse que quand on applique $+1$ V à l'entrée non-inverseuse. Nous n'avons pas parlé des courants consommés par les entrées : c'est parce qu'ils sont nuls en théorie et négligeables en pratique. Tous les courants circulent en sortie ou **autour** des entrées. L'étage de sortie des circuits intégrés, alimenté par deux tensions symétriques et construit avec des transistors complémentaires (voir le montage *pouche-poule*, elex n°8), est capable de débiter du courant et aussi d'en consommer.

Les courants consommés par les entrées sont nuls en théorie et négligeables en pratique

Revenons au montage de la figure 3. La tension de la sortie se stabilise à une valeur telle que la différence de tension entre les entrées soit nulle.

Comme aucun courant ne circule par les entrées elles-mêmes, tout le courant qui traverse la résistance d'entrée R_i traverse aussi la résistance de contre-réaction R_f . Nous pouvons donc calculer les tensions en fonction de la loi d'Ohm. Si R_i est de 1 k Ω , R_f de 10 k Ω , le rapport entre les tensions sera de 10 . Comme la tension d'entrée U_e est de $+1$ V, que la tension de l'entrée inverseuse est égale à celle de l'entrée non-inverseuse, donc nulle, la tension aux bornes de R_i est de $+1$ V. La tension aux bornes de R_f est de $+10$ V. La tension de sortie est donc de -10 V.

Vous pouvez relire le paragraphe ci-dessus pendant que je vais répondre au téléphone.

Me revoilà. C'était Yvon qui me demandait quel serait le sujet de la prochaine BD. J'en sais rien, moi. Il m'embête ! Vous avez peut-être des idées là-dessus, vous ? Bon, passons. L'intérêt de ce montage est qu'il permet de calculer facilement le gain. Le rapport entre les tensions d'entrée et de sortie est égal au rapport entre les résistances d'entrée et de contre-réaction. C'est le moment de remplir la deuxième des petites cases que vous avez préparées la dernière fois :

Gain de l'amplificateur inverseur

$$A = -\frac{R_f}{R_i}$$

Le signe - exprime l'inversion de la tension de sortie par rapport à celle d'entrée. Le calcul de la valeur absolue du gain se résume au calcul du rapport entre les deux résistances de la boucle de contre-réaction.

L'impédance d'entrée de l'amplificateur non-inverseur est extrêmement élevée, et même infinie en théorie. Il n'en est pas de même pour l'amplificateur inverseur, dont l'impédance d'entrée est précisément égale à la valeur de la résistance d'entrée R_i . En effet, l'entrée inverseuse est considérée comme une **masse virtuelle**, puisque son potentiel est toujours nul. La source de signaux voit donc toujours R_i en parallèle entre l'entrée et la masse. Dans les montages où cette impédance d'entrée réduite est gênante, comme c'est le cas avec des sources de signaux de forte impédance interne, on peut fort bien faire précéder le montage inverseur d'un étage suiveur de tension à amplificateur opérationnel (cas particulier de l'amplificateur non-inverseur, voir premier article dans le n°16).

Continuons les comparaisons entre ces deux premiers montages, inverseur et non-inverseur : nous avons vu que le comportement du montage non-inverseur s'écarte beaucoup de l'idéal lorsque la fréquence du signal à amplifier augmente. Ce n'est pas le cas du montage inverseur, dont le gain reste constant sur une plus grande plage de fréquences.

La tension de décalage en entrée

Avant de poursuivre avec les autres montages fondamentaux de l'amplificateur opérationnel, nous ferons un petit détour par les circuits pratiques. Nous avons toujours considéré jusqu'ici des amplificateurs idéaux, d'impédance d'entrée infinie, de gain infini, d'impédance de sortie nulle... La réalité est tout autre, ma pauvre dame, et l'un des postulats de notre raisonnement est faux le plus souvent : « la tension de sortie est nulle quand la différence de tension entre les deux entrées est nulle ». Pour vous en convaincre, réalisez le montage de

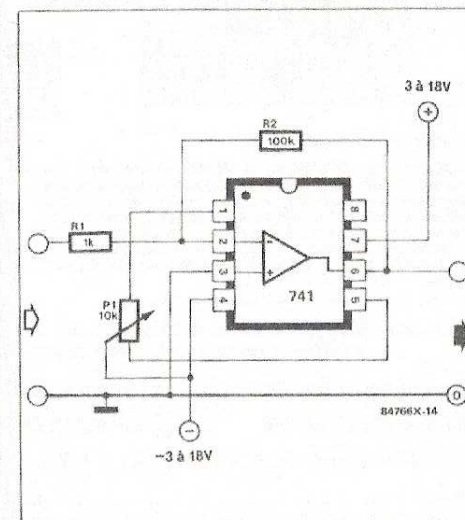


Figure 4 - Le montage pratique d'un 741. Parmi les qualités de ce circuit intégré, il faut citer la solidité. Il accepte à peu près tous les mauvais traitements, jusqu'à l'inversion des tensions d'alimentation. Pas longtemps, bien sûr, et il ne fonctionne pas dans ces conditions ; mais si l'épreuve est de courte durée, il refonctionne aussitôt refroidi. Une bénédiction pour les expérimentateurs distraits !

ABC des AOP

Troisième partie du petit abécédaire des amplificateurs opérationnels

Le montage comparateur

Le montage comparateur est en fait un comparateur de tensions. Rien de plus normal que d'utiliser l'amplificateur opérationnel pour faire des comparaisons de tensions puisque nous avons vu qu'il réagit à des différences de tension entre ses entrées. Le montage élémentaire de comparateur est représenté par la figure 1. Le potentiomètre signifie la possibilité de modifier la tension de référence appliquée à l'entrée inverseuse. Le fonctionnement est extrêmement simple : si la tension de l'entrée non-inverseuse (+) est supérieure à celle de l'entrée inverseuse (-), la sortie prend sa valeur la plus positive (égale à la tension d'alimentation positive diminuée de la tension de déchet); si la tension de l'entrée non-inverseuse (+) est inférieure à celle de l'entrée inverseuse (-), la sortie prend sa valeur la plus négative (égale à celle de l'alimentation négative...). La polarité de la tension de sortie indique donc si la tension d'entrée est supérieure ou inférieure à la tension de référence.

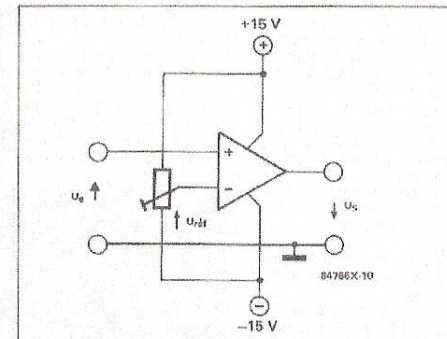


Figure 1 - L'amplificateur opérationnel dans sa fonction la plus « naturelle » : la comparaison d'une tension d'entrée U_e éventuellement variable à une tension de référence fixe (U_{ref}).

ques électrons de plus à une entrée qu'à l'autre, ne serait-ce que du fait des dissymétries de la « puce » elle-même. La sortie à tension nulle n'est pas un état stable.

Si nous voulons obtenir en sortie un signal positif pour une tension d'entrée inférieure à la tension de référence, il suffit d'inverser les rôles des deux entrées : appliquer la tension de référence à l'entrée non-inverseuse et la tension inconnue à l'entrée inverseuse.

La valeur de la tension de référence est sans importance, tant qu'elle reste dans la plage admise par l'amplificateur opérationnel. Elle est habituellement bornée par la tension des alimentations, diminuée de 1 V ou 1,5 V. Dans le cas du 741, elle s'étend de +13 V à -13 V pour une alimentation de ± 15 V. Reportons-nous à la figure 2, schéma interne de l'étage d'entrée du 741. L'explication saute aux yeux : les résistances R_1 et R_3 et les jonctions base-émetteur de Q_1 , Q_3 et Q_5 ne peuvent travailler qu'avec une tension à leurs bornes.

Comme cette limitation est gênante dans de nombreuses applications, notamment celles où l'alimentation ne peut pas être symétrique, les fabricants ont mis au point d'autres types d'amplificateurs opérationnels. Nous prendrons comme exemple le type 358, dont le schéma interne est représenté par la figure 3. Il présente la particularité de travailler jusqu'à zéro volt aussi bien en entrée qu'en sortie. Les entrées sont connectées à des bases

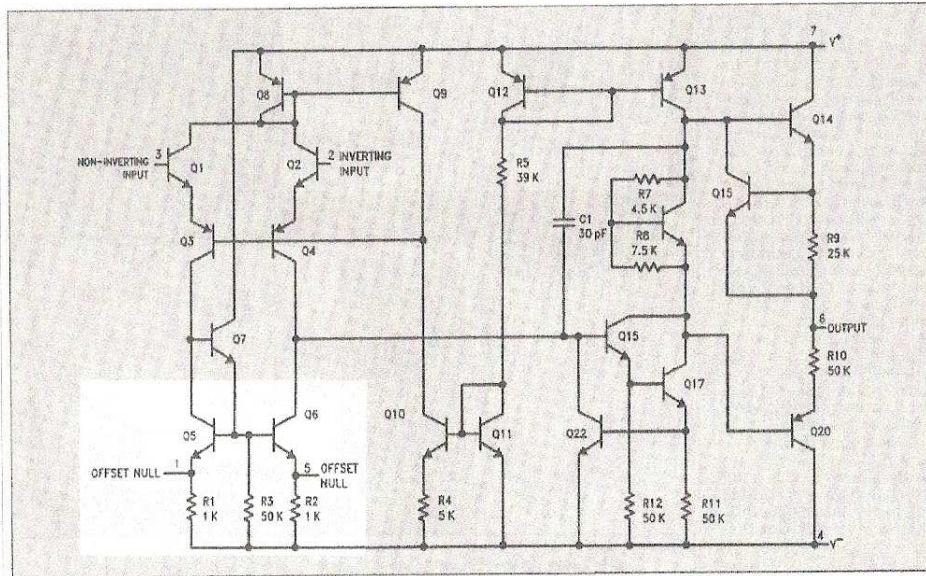


Figure 5 - Le schéma interne du 741. On y trouve des explications sur la cause du décalage de tension en entrée, mais aussi sur l'impédance de sortie et les tensions de déchet.

la figure 4. Vous pouvez utiliser pour cela l'alimentation symétrique du n°16 et le testeur d'amplificateurs opérationnels de ce numéro.

Le montage de la figure 4 est un amplificateur inverseur de gain 10, correspondant à l'exemple utilisé jusqu'ici. Ne montez pas le potentiomètre pour l'instant. Vous reliez l'entrée du montage à la masse et, armé de votre multimètre, vous constatez que... la tension en sortie n'est pas nulle. Pourtant elle devrait l'être en théorie. L'explication est simple : le circuit intégré est constitué de transistors qui ne sont pas rigoureusement identiques, entourés de résistances dont la tolérance n'est pas nulle. La tension que vous lisez en sortie est le résultat de la multiplication par 10 (le gain du montage) de la tension de décalage en entrée (offset). Ce décalage est inévitable et les fabricants ont prévu différentes façons de nous en affranchir, pour les applications où une précision extrême est recherchée.

La première est de faire un tir lors de la fabrication et de vendre sous des réfé-

rences différentes les meilleurs circuits intégrés, avec des caractéristiques garanties. Pour le tout-venant, la solution consiste à compenser le décalage par un décalage des sources de courant internes du circuit intégré. Reportons-nous à la figure 5. Il s'agit du schéma interne de notre bon vieux 741. Les transistors Q_5 et Q_6 sont deux sources de courant constant qui constituent les charges des transistors d'entrée Q_1 et Q_2 . Nous nous écartons ici du modèle d'étage différentiel du début : la source de courant constant est installée dans les collecteurs et la charge dans le circuit d'émetteur. Il ne faut pas en vouloir aux concepteurs du 741, qui n'avaient pas le *flex* : il ne faut pas nous en vouloir non plus, car le fonctionnement de notre modèle est plus facile à expliquer que celui du circuit intégré.

Si nous avions voulu faire varier, pour un même état des entrées, la tension de l'un des collecteurs de notre modèle de la figure 1, nous avions la ressource de modifier la valeur de l'une des résistances de collecteur. C'est ce que le fabricant du 741 a pensé

aussi : les charges de Q_1 et Q_2 sont des sources de courant constant caractérisées par les résistances (intégrées) R_1 et R_2 . Les bornes de ces résistances qui sont reliées aux émetteurs sont accessibles par les broches 1 et 5, les autres par la broche d'alimentation négative (4). Faute d'avoir les doigts assez fins et des outils assez précis pour remplacer les résistances par d'autres de valeur légèrement différente, nous pouvons brancher un potentiomètre entre les bornes 1, 5 et 4, comme sur la figure 4.

Ne nous en privons pas et nous constaterons qu'en manoeuvrant le curseur du potentiomètre, entrées toujours à la masse, nous faisons varier la tension de sortie de part et d'autre du zéro. En modifiant la valeur de la résistance en parallèle sur R_1 et R_2 (du circuit intégré), nous modifions l'équilibre des deux sources de courant, donc de la charge des transistors d'entrée. Ces modifications sont répercutées à la sortie par le reste du montage. Il suffit ainsi d'un simple potentiomètre pour obtenir un amplificateur parfait (ou presque) du point de vue de la tension

de décalage en entrée. Dans les montages industriels qui requièrent une précision élevée, le potentiomètre est un modèle multitoirs, souvent encadré de résistances-laions qui augmentent encore la précision du réglage.

Et les autres ?

Les autres types d'amplificateurs opérationnels permettent aussi, pour la plupart, la compensation du décalage en entrée. Suivant la constitution interne du circuit intégré, le curseur du potentiomètre doit être relié à la broche d'alimentation positive ou négative, et sa valeur change en fonction de celle des résistances internes. Tous ces renseignements figurent dans le petit tableau qui accompagne la représentation des brochages courants à la fin de l'article sur le testeur universel d'amplificateurs opérationnels. Merci *elex*.

84766

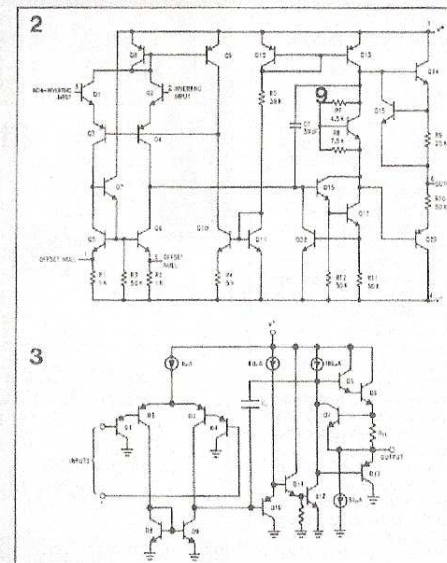
RAPPEL

gain de l'amplificateur non-inverseur

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

La valeur absolue de la tension de sortie ne dépend que des caractéristiques de l'amplificateur opérationnel et des tensions d'alimentation. Le gain de l'amplificateur n'est pas limité par une boucle de contre-réaction, on dit qu'il travaille en *boucle ouverte*. Une différence de tension infime entre les entrées provoque une excursion maximale de la tension de sortie.

En théorie, le résultat de la comparaison pourrait être aussi « égalité ». En pratique, il y a toujours quel-



Figures 2 et 3 - Rappel de la structure interne de l'amplificateur opérationnel (LM) 741 (figure 2). Les entrées sont à transistors NPN. Schéma du LM 358 (figure 3) avec ses entrées à transistors PNP.

de transistors PNP au lieu des NPN du 741. Elles peuvent donc réagir à des tensions nulles ou très proches de zéro. De même la sortie se fait directement par un émetteur de transistor PNP, sans résistance en série, ce qui permet à son potentiel de descendre jusqu'à celui de la masse, à condition que le courant absorbé reste de faible intensité. La tension d'entrée est limitée dans le sens positif par la tension des deux jonctions base-émetteur et celle de la source de courant constant, soit à environ 1,5 V. Le principe du 358, double amplificateur opérationnel, est utilisé aussi dans le 324, modèle quadripole.

Stabilité

Une différence de tension infime provoque immédiatement le basculement de la sortie du comparateur, ce qui peut être gênant quand elle commande par exemple un relais dans un thermostat. Le relais risque de battre sans arrêt lorsque la température est proche de la consigne, c'est-à-dire lorsque la tension mesurée est très proche de la tension de référence. La solution est apportée par le montage du comparateur en **trigger de Schmitt**. C'est le montage de la figure 4.

L'amplificateur opérationnel ne travaille plus en boucle ouverte comme précédemment, mais la boucle est une boucle de **réaction positive**, contrairement à la boucle de contre-réaction des montages inverseur et non-inverseur. Cette réaction positive introduit une **hystérésis** dans le fonctionnement du comparateur. La tension entre la sortie et l'entrée non-inverseuse est divisée par les résistances R_C/R_E . La fraction de cette tension disponible aux bornes de R_E est **ajoutée** (algébriquement, c'est-à-dire avec son signe) à la tension de l'entrée non-inverseuse. Si la tension de la sortie est positive, c'est une faible tension positive qui s'ajoute à celle de l'entrée du montage, augmentant la différence de tension entre les deux entrées et abaissant ainsi le seuil que devra franchir la tension d'entrée pour provoquer le basculement du comparateur en sens opposé. Avant de

provoquer le basculement de la sortie, la tension d'entrée U_E devra d'abord devenir assez négative pour compenser la tension po-

sitive présente sur R_E . Le même raisonnement s'applique, symétriquement, lorsque la tension de la sortie est négative.

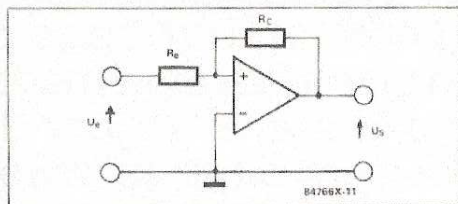


Figure 4 - Sur le circuit en trigger de Schmitt, les « mouvements » de la sortie de l'amplificateur opérationnel sont « bridés » par la résistance de réaction.

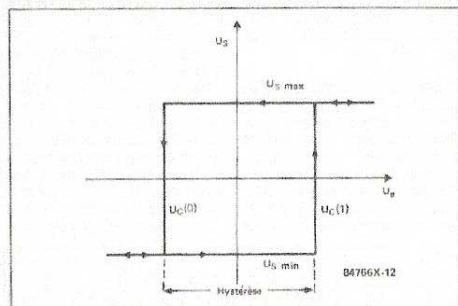


Figure 5 - Les seuils de basculement de la sortie d'un trigger de Schmitt ne sont pas les mêmes selon que la tension d'entrée monte ou descend.

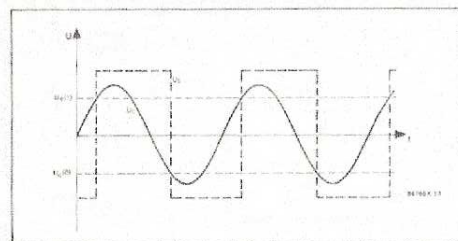


Figure 6 - La transformation d'une onde sinusoïdale en onde carrée par un trigger de Schmitt.

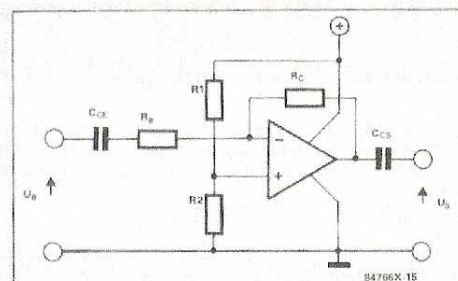


Figure 7 - Pour traiter des tensions alternatives en l'absence de tension d'alimentation symétrique, on crée un potentiel de référence (une masse artificielle) à l'aide d'un diviseur de tension.

C'est cet écart entre le seuil de basculement haut et le seuil de basculement bas qu'on appelle **hystérésis**. La figure 5 montre que les changements d'état de la sortie sont en **retard** sur les changements de tension entre les entrées. La zone « morte », dans laquelle la tension d'entrée peut évoluer sans provoquer de changement d'état de la sortie, permet d'éviter au relais de notre thermostat de vibrer en permanence. Sa largeur est déterminée par le rapport du diviseur de tension R_E/R_C .

Utilisations pratiques

Le comparateur avec trigger de Schmitt est utilisé pour remettre en forme des signaux perturbés par des parasites, ou pour transformer un signal sinusoïdal en un signal carré. Sur le diagramme de la figure 6, les traits pointillés horizontaux représentent les seuils de basculement réels, compte-tenu de l'hystérésis.

Alimentation simple

Il peut arriver qu'on ne dispose pas d'une alimentation symétrique, comme c'est souvent le cas dans les montages alimentés par des piles. On peut malgré cela utiliser des amplificateurs opérationnels pour le traitement de tensions alternatives, pourvu qu'on ait créé une **masse artificielle**. La figure 7 donne un exemple de montage de ce genre. La tension de référence qui simule le zéro volt est fixée par le diviseur de tension $R1/R2$ et appliquée à l'entrée non-inverseuse. La tension alternative est appliquée à l'entrée inverseuse par l'intermédiaire du condensateur de couplage C_{CE} ; la tension alternative de sortie est délivrée par le condensateur C_{CS} . Les condensateurs arrêtent la composante continue, mais laissent passer l'alternatif, cependant que l'amplificateur opérationnel travaille dans des plages de tension qui lui sont adaptées.

Notre prochaine causerie portera sur les montages additionneurs ou soustracteurs, les montages différentiels, et les montages soustracteurs, entre lesquels il faut faire la différence.

ABC des AOP

quatrième partie du petit abécédaire des amplificateurs opérationnels

Le montage sommateur

Le sommateur ou additionneur est représenté à la figure 1. Il comporte deux entrées, auxquelles sont appliquées les deux tensions à additionner, V_1 et V_2 . L'amplificateur opérationnel abaisse sa tension de sortie jusqu'à ce que la tension de l'entrée inverseuse (-) soit égale à celle de l'entrée non-inverseuse (+). Le point de sommation, correspondant à l'entrée inverseuse, est au même potentiel que l'entrée non-inverseuse, c'est une **masse virtuelle** (figure 2). Dans ces conditions, les résistances $R1$ et $R2$ sont traversées chacune par un courant. Comme les entrées de l'amplificateur opérationnel ne consomment aucun courant, les courants qui traversent $R1$ et $R2$ ne vont pas à la masse, mais traversent la résistance de contre-réaction R_{CR} .

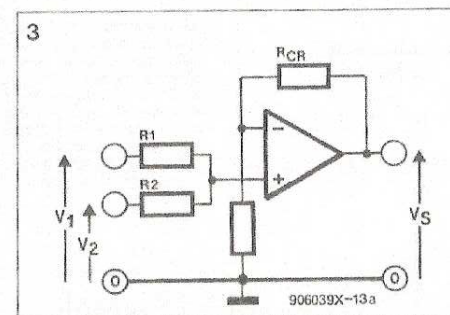
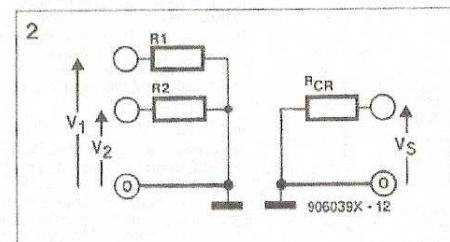
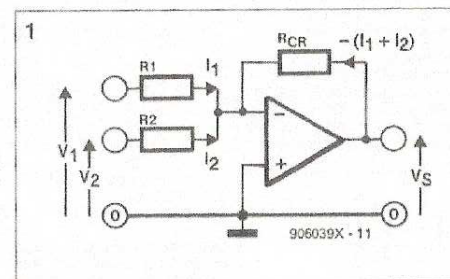
Si les tensions d'entrée sont positives, la tension de sortie doit être négative pour faire naître dans R_{CR} un courant de même sens que I_1 et I_2 . La tension de sortie se calcule, encore une fois, grâce à la loi d'Ohm :

$$-V_S = R_{CR} \times (I_1 + I_2)$$

ou, en remplaçant les courants par le rapport entre tension et résistance (nous avons l'intention de déposer le verbe *laidomer*) :

$$-V_S = R_{CR} \times \left(\frac{V_1}{R1} + \frac{V_2}{R2} \right)$$

Donnons la même valeur à $R1$, $R2$ et R_{CR} . Nous pouvons diviser les deux membres du rapport par le même nombre, autrement dit simplifier par R = $R1 = R2 = R_{CR}$.



La tension de sortie du montage sommateur est égale à :

$$-V_S = V_1 + V_2$$

Nous avons supposé jusqu'ici que les deux tensions étaient positives. C'était commode pour le raisonnement, mais ce

n'est nullement obligatoire. Les tensions d'entrée peuvent être toutes les deux négatives, ou l'une positive et l'autre négative. C'est l'amplificateur opérationnel qui fera la somme **algébrique**, en tenant compte des signes, et déterminera le signe de la tension de sortie.

Reprenons les formules ci-dessus et calculons ce que serait la tension de sortie si R_{CR} était égale à n fois $R1$:

$$V_S = -n \times (V_1 + V_2)$$

L'amplificateur opérationnel peut donc effectuer la somme de deux tensions ainsi que le produit de la somme par un facteur constant déterminé par le rapport entre la résistance d'entrée et la résistance de contre-réaction. Voilà qui nous rappelle la formule du gain de l'amplificateur inverseur.

Le montage de la figure 1 présente quelques inconvénients : d'une part la tension de sortie est de polarité opposée à celle d'entrée, d'autre part l'impédance d'entrée du montage est faible. Ces deux inconvénients sont liés à l'utilisation de l'entrée inverseuse. Le montage de la figure 3 est un additionneur non inverseur qui donne en sortie une tension égale à la somme des tensions d'entrée, sans inversion de signe. L'impédance d'entrée reste déterminée par la valeur des résistances $R1$ et $R2$, donc relativement faible.

Il est possible, comme presque toujours, de faire précéder les résistances de sommation par des étages suiveurs pour élever l'impédance des entrées, ou bien de faire suivre la sortie par un étage inverseur à gain unitaire pour rétablir la polarité initiale.

Le nombre des entrées n'est pas limité à deux : si vous ajoutez des résistances, vous obtiendrez en sortie la moyenne des tensions d'entrée, à condition, là encore, que les résistances R_{CR} , $R1$ à Rn soient égales.

Le montage soustracteur

L'addition de deux tensions, par l'additionneur inverseur de la figure 1 ou par l'additionneur non inverseur de la figure 3, se fait toujours sur une seule des entrées de l'amplificateur. Le montage de la figure 4 est un amplificateur différentiel ou montage soustracteur. Il utilise les deux entrées de l'amplificateur opérationnel, contrairement aux exemples précédents.

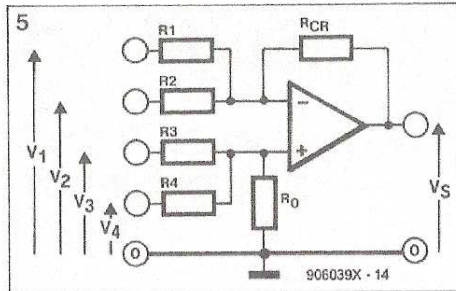
Assoyez-vous confortablement. Jetez un coup d'œil un peu plus loin, constatez que ça redevient simple et admirez ci-dessous la formule qui définit la tension de sortie du montage :

La somme de différences ou la soustraction de sommes

Prenez le circuit de la figure 4, ajoutez celui de la figure 3, puis celui de la figure 1, agitez, coupez ce qui dépasse, et vous obtenez le circuit de la figure 5.

Ce schéma est celui d'un montage soustracteur à entrées doubles. La tension de sortie est égale à :

Là encore, nous nous facilitons la tâche en considérant le cas particulier où $R_1 = R_2 = R_3 = R_0 = R_{CR}$. La formule générale de calcul de la tension de sortie est :



$$V_S = -(V_1 + V_2) + (V_3 + V_4)$$

$$V_S = (K_3V_3 + K_4V_4) - (K_1V_1 + K_2V_2)$$

où $K_1 = R_1/R_{CR}$, ou R_1/R_0 selon le cas.

Les entrées doubles pourraient tout aussi bien être multiples. Comme dans le cas du sommateur, la résistance de contre-réaction peut avoir une valeur n fois plus grande que les résistances d'entrée pour donner par exemple :

$$V_S = n(V_3 + V_4) - (V_2 + V_1)$$

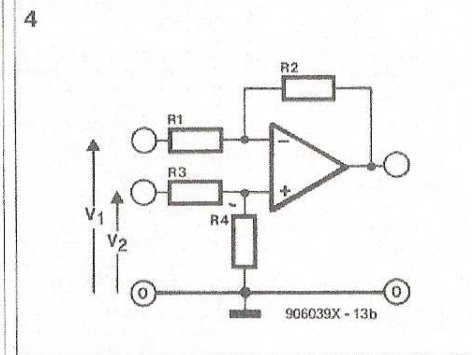
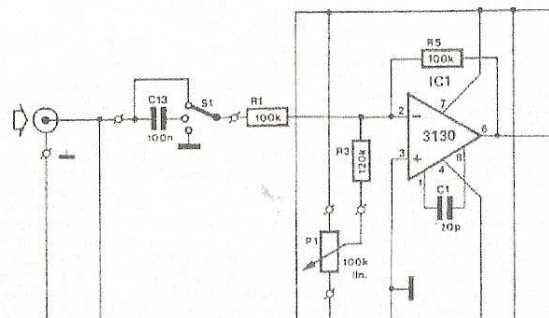
Pour le cinquième acte, nous verrons l'entrée en scène de l'amplificateur de courant et dans celui du convertisseur tension-courant, qu'il interprète à la façon du tube à vide. La location est ouverte.

906039

Exemple d'application pratique

Les plus observateurs auront reconnu un extrait d'un schéma publié dans le n°13, page 49. Il s'agit de l'étage d'entrée de l'extension double trace pour oscilloscope monovolt.

Le potentiomètre P1 est relié aux deux sources d'alimentation, +9 V et -9 V. L'amplificateur opérationnel effectue une somme : celle du signal d'entrée et de la tension du curseur du potentiomètre P1. Une rotation de P1 modifie la tension de sortie, c'est elle qui permet de décaler verticalement la trace laissée sur l'écran par le signal d'entrée. Le signal n'est pas modifié, mais un décalage positif ou négatif lui est ajouté, déplaçant ainsi la trace au-dessus ou en-dessous du milieu de l'écran.



$$V_S = -\frac{R_2}{R_1}V_1 + \frac{R_4}{R_3} \times \left(\frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_4}{R_3}} \right) \times V_2$$

Joli, mais un peu compliqué. Donnons à R2 la même valeur que R1, à R4 la même valeur que R3. Le rapport R2/R1 devient égal à 1, tout comme le rapport R4/R3. La formule devient quelque chose comme ça :

$$V_S = -V_1 + V_2$$

Ce qui est beaucoup plus sympathique et valait bien qu'on patiente jusque là. La tension de sortie est égale à la différence entre les deux tensions d'entrée. Ou encore la tension différentielle d'entrée est transposée en une tension de sortie référencée à la masse.

ABC des Aop

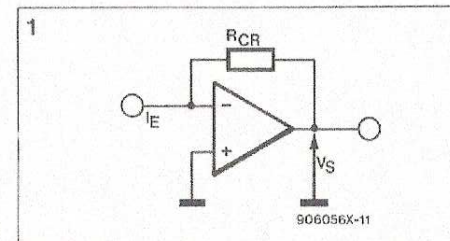
Cinquième partie du petit abécédaire des amplificateurs opérationnels

Au cours des articles précédents, nous avons fait connaissance avec les amplificateurs opérationnels dans leurs fonctions d'amplificateurs de tension et dans leurs applications de calcul, somme et différence. Nous allons examiner ici quelques applications de conversion des grandeurs électriques : courant en tension et tension en courant.

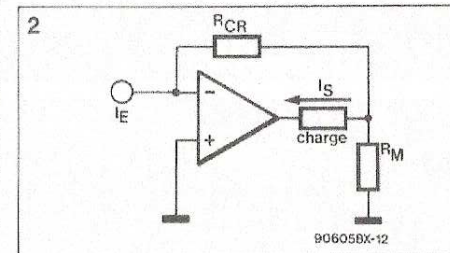
Conversion de courant en tension

Le montage de la figure 1 représente le montage convertisseur de courant en tension. Il ressemble à montage amplificateur inverseur de tension, à ceci près qu'il ne comporte pas de résistance d'entrée. L'entrée non inverseuse est reliée à la masse, potentiel nul, ce qui laisse supposer qu'il s'agit aussi d'un montage inverseur.

La grandeur d'entrée de l'amplificateur est un courant et non plus une tension comme dans les montages que nous avons vus jusqu'ici. Par définition, le potentiel des deux entrées est égal et les entrées ne consomment aucun courant. Le courant d'entrée doit donc être absorbé par la résistance de contre-réaction R_{CR} . Le courant d'entrée est transformé en une tension de



ne naissance à une tension de sortie négative.



Amplificateur de courant

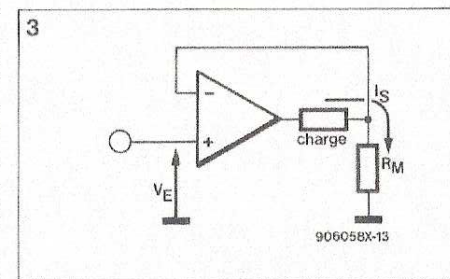
Le montage de la figure 2 ressemble fort à un convertisseur courant-tension. Il comporte en plus une résistance R_M , résistance de mesure et une charge qui est traversée par le courant de sortie. Ce montage amplificateur de courant permet de créer à travers la charge un courant dont l'intensité est déterminée par celle du courant d'entrée et par la valeur des résistances.

Le courant qui traverse la charge, ou courant de sortie de l'amplificateur, provoque une chute de tension aux bornes de R_M . Cette résistance, que nous appelons résistance de mesure, est comparable au shunt des ampèremètres. C'est la tension à ses bornes qui est utilisée pour mesurer le courant qui la traverse. Ce courant est composé du courant d'entrée et du courant qui traverse la charge.

La valeur du courant de sortie, qui traverse la charge, est :

Amplificateur de courant

$$I_S = I_E \times \frac{R_M + R_{CR}}{R_M}$$



Tension de sortie du convertisseur courant-tension

$$V_S = -I_C \times R_{CR}$$

Le signe - de la formule indique que le montage est inverseur : un courant d'entrée positif (suivant le sens conventionnel) donne

sortie, puisque le passage d'un courant dans une résistance provoque une chute de tension. Comme d'autre part les deux entrées sont au même potentiel, la tension de sortie est égale à la tension aux bornes de la résistance.

Vous pouvez sortir vos ardoises et noter :

Conversion de tension en courant

Lorsque la grandeur d'entrée est une tension, seule la commande de l'amplificateur opérationnel diffère du cas précédent. Le principe de la mesure du courant de sortie par une résistance est le même.

Puisque la tension d'entrée est appliquée à l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur (figure 3), le montage est du type non-inverseur. On peut le considérer comme une version non-inverseuse de l'amplificateur de courant. A une différence de tension entre les entrées l'amplificateur réagit par une variation de la tension de sortie dans le sens déterminé par la polarité de la différence.

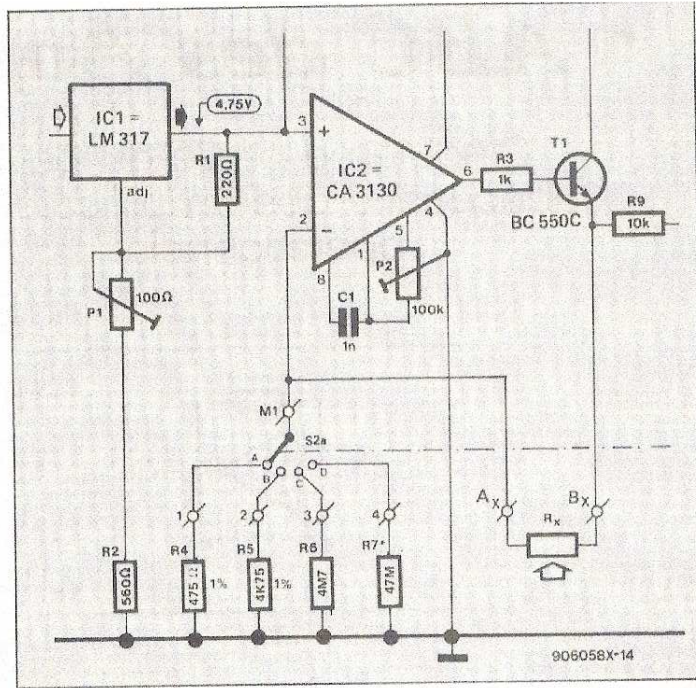
Une tension positive sur l'entrée non-inverseuse tend à faire augmenter la tension de la sortie. Le courant qui traverse alors la résistance de mesure y provoque une chute de tension, lue directement par l'entrée inverseuse. La tension de sortie cesse d'augmenter dès que la tension de l'entrée inverseuse atteint celle de l'entrée non-inverseuse. Le montage est alors dans un état stable. Toute variation de la tension de commande appliquée à l'entrée non-inverseuse se traduit par une variation du courant à travers la charge.

La loi est la suivante :

Convertisseur tension-courant

$$I_s = \frac{V_E}{R_M}$$

Il ne s'agit pas ici du gain du montage, mais de sa transconductance. Elle s'exprime en milliampères par volt, et elle est égale à l'inverse de la résistance. Cette caractéristique, la transconductance, était la caractéristique principale des tubes à vide ou lampes. Tout comme les tubes, le convertisseur tension-courant a une impédance d'entrée très élevée et une impédance de sortie relativement élevée.



Application pratique du convertisseur tension-courant

Le schéma ci-dessus représente une partie de l'ohmmètre décrit dans le n°14, page 14. La tension appliquée à l'entrée non-inverseuse est fixe, stabilisée par le régulateur LM317. L'entrée inverseuse voit la tension aux bornes de l'une des résistances \$R_4\$ à \$R_5\$. Cette tension est liée directement au courant qui la traverse ; l'amplificateur opérationnel règle sa tension de sortie de telle façon que la tension des deux entrées soit identique. Il en résulte que la tension aux bornes de la résistance de mesure est égale à la tension de sortie du régulateur IC1.

Le but du montage est de produire un courant constant à travers la résistance à mesurer (\$R_x\$) ; il est atteint puisque l'intensité est fixée par la tension de référence et la valeur de la résistance (\$R_4\$ à \$R_7\$).

L'impédance d'entrée de l'amplificateur est réputée infinie, il ne consomme donc aucun courant de la source de tension de référence. De l'autre côté, en sortie, l'impédance est relativement élevée, de l'ordre de la dizaine ou de la centaine d'ohms, selon les types de circuits intégrés. Il en résulte que l'amplificateur ne peut pas fournir à lui seul le courant nécessaire pour produire une tension égale à la tension de référence. C'est vrai surtout dans le cas où la résistance de mesure est faible. C'est la raison de la présence du transistor T1, qui fonctionne en suiveur et relaie la sortie de l'amplificateur, abaissant ainsi l'impédance de sortie du montage.

À quoi sert ce courant constant ?

En circulant à travers la résistance à mesurer, il donne naissance à une tension proportionnelle à sa valeur. Les ohmmètres classiques ont une échelle dilatée à un bout et comprimée à l'autre, du fait de la loi de variation de l'intensité :

$$I = \frac{V}{R}$$

connue des initiés sous le nom de loi d'Ohm. La courbe correspondante est un hyperbole.

Dans l'ohmmètre à courant constant, au contraire, la variation de la tension en fonction de la résistance est linéaire, c'est-à-dire représentée par une droite.

ABC des AOP

sixième partie du petit abécédaire des amplificateurs opérationnels

le multivibrateur astable

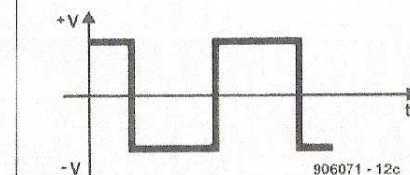
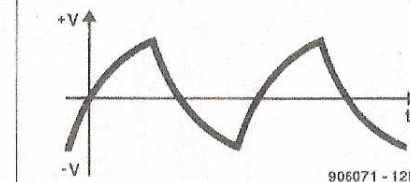
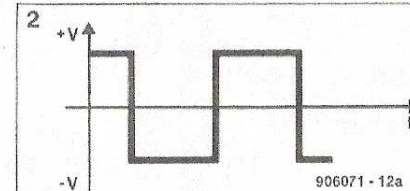
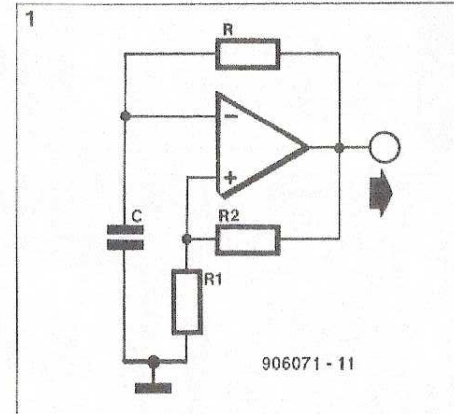
L'amplificateur opérationnel est avant tout un comparateur de tension. Le montage multivibrateur astable est un comparateur avec hystérésis et une boucle de contre-réaction comportant un condensateur (figure 1). La valeur des composants de la boucle de réaction positive (\$R_1/R_2\$) est aussi importante que celle de la boucle de contre-réaction pour la détermination de la fréquence d'oscillation.

Nous supposons, pour faciliter la description du processus, que l'alimentation est symétrique.

Au moment de la mise sous tension le condensateur C se charge à travers la résistance R. Dès que le comparateur voit sur son entrée inverseuse une tension supérieure à celle de l'entrée non-inverseuse, il inverse l'état de sa sortie. Ce changement a deux conséquences puisque le montage est muni de deux boucles de réaction : positive par \$R_1/R_2\$, et négative par R/C.

Le changement d'état de la sortie (figure 2a) provoque l'inversion du sens du courant dans R et C. C'est-à-dire que le condensateur va tout d'abord se décharger, puis commencer à se charger avec la polarité opposée. La tension du condensateur était positive au moment du basculement ; elle va s'annuler puis devenir négative (figure 2b). Voilà pour les changements dans la boucle de contre-réaction.

Dans la boucle positive, le basculement va provoquer un autre change-



ment. Les résistances \$R_1\$ et \$R_2\$ constituent un diviseur de tension qui applique à l'entrée non-inverseuse une fraction de la tension de sortie :

$$V_{E+} = V_E \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

D'où les changements de valeur du seuil du comparateur : figure 2c.

C'est cette nouvelle valeur, négative, que devra atteindre la tension du condensateur pour provoquer le basculement suivant. Plus la tension ajoutée par la boucle de réaction positive sera importante, plus long sera le temps mis par le condensateur pour l'atteindre. La fréquence sera d'autant plus basse que la tension de réaction positive sera élevée.

L'autre facteur qui influe sur la fréquence est la constante de temps du réseau de contre-réaction R/C. Plus la résistance est grande, plus la charge du condensateur est lente, donc plus la fréquence est basse.

La formule qui permet de calculer la fréquence de notre multivibrateur est :

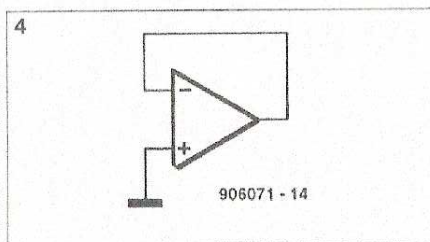
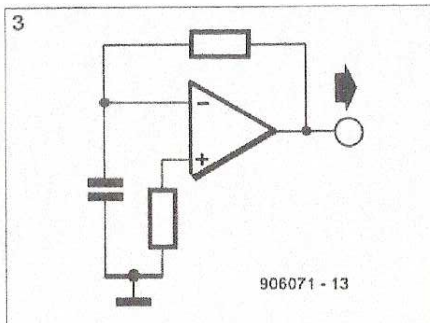
$$f = \frac{1}{2 \cdot RC \cdot \log(1 + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2})}$$

Toutes les grandeurs variables sont au dénominateur, ce qui confirme que l'augmentation du produit RC abaisse la fréquence. De même, si le rapport \$R_1/R_2\$ augmente, la tension d'hystérésis augmente, et la fréquence diminue. Le logarithme rend compte du caractère exponentiel du phénomène de charge du condensateur à travers une résistance.

La tension d'alimentation n'intervient pas, pas plus que la tension de sortie. En effet, si la tension de sortie n'est pas constante, l'hystérésis est modifiée, mais en même temps se trouve modifiée l'intensité du courant de charge du condensateur. La fréquence n'est donc déterminée que par les valeurs des composants R_1 , R_2 , R et C .

Supposons que nous n'ayons pas installé de boucle de réaction positive. La conclusion intuitive est que la fréquence sera extrêmement élevée. Le calcul est impossible, puisqu'il nous faudrait diviser par zéro. Le circuit se résu-
merait à un suiveur de tension et la sortie resterait à zéro (figure 3).

En réalité, les amplificateurs opérationnels étant tous affectés d'un certain décalage (*offset*), une oscillation à très haute fréquence se produirait, avec une amplitude faible, limitée par la bande passante finie du composant. Ces



oscillations se produisent parfois dans des montages comparateurs dotés d'une hystérésis trop faible, ou sur des circuits imprimés dont les connexions de masse sont mal dessinées, ou encore dans des amplificateurs dont les entrées sont laissées « en l'air ». Dans ce dernier cas, les capacités parasites très faibles et les résistances d'isolement très fortes constituent malgré tout un montage oscillateur car les impédances d'entrée sont très élevées elles aussi. L'amplificateur qui oscille ainsi consomme énormément de courant et perturbe l'alimentation des autres éléments du montage. Une bonne précaution consiste donc à bloquer un amplificateur inutilisé en soumettant son entrée non inverseuse à une tension déterminée (celle de la masse par exemple) et en le bouclant en suiveur (figure 4).

906071