
Amplificateurs opérationnels

- M. VAUCHELLES – *Travaux pratiques d'électronique, chap IX*
M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et II*
R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
L. QUARANTA et AUBERT – *Dictionnaire de physique expérimentale, tome III*
R. JOURNEAUX – *TP de physique : électricité, électronique, optique (de Boek)*
H-PREPA – *Électronique II, Première année PCSI*
H-PREPA – *Électronique I, Deuxième année PSI*
DATTEE et DELLA MAESTRA – *Ampli Op. (Vuibert)*
R. DAMAYE – *L'amplificateur opérationnel*
MALVINO – *Principes d'électronique (p. 476 et suiv. p. 589 et suiv.)*
MASSELOT et GIRARD – *Électronique non linéaire, tome I*

Remarque préalable : dans les nouveaux programmes de CPGE (2014), l'amplificateur opérationnel (ampli op. ou AO) est appelé amplificateur linéaire intégré (ALI).

I) Caractéristiques et branchement des amplificateurs opérationnels

On utilisera un classique 741 qui a des performances assez modestes. On disposera également de l'ampli op. TL 071 (ou de son frère jumeau TL 081) plus performant mais d'emploi plus délicat. Des notices du fabricant sont jointes au matériel. Le tableau suivant compare les caractéristiques essentielles des amplis 741 et TL 071 à celles de l'ampli op. parfait.

	notation	"parfait"	741	TL 071
Gain en boucle ouverte	G_0	∞	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Résistance différentielle d'entrée	R_{ed}	∞	$2 \cdot 10^6 \Omega$	$10^{12} \Omega$
Produit gain \times bande passante		∞	1 MHz	3 MHz
Courant max. de court-circuit (output short circuit current)	i_{OS}	∞	~ 10 mA	~ 10 mA
Vitesse limite de balayage (Slew rate)	S	∞	$0,5$ V/ μ s	13 V/ μ s
Tension de décalage d'entrée (Offset)	V_d	0	≤ 6 mV	≤ 15 mV
Courant de polarisation d'entrée (input bias current)	i_p	0	~ 100 nA	~ 100 pA
Taux de réjection en mode commun	CMRR	∞	90 dB	

FIG. 1 – Caractéristiques des différents AO

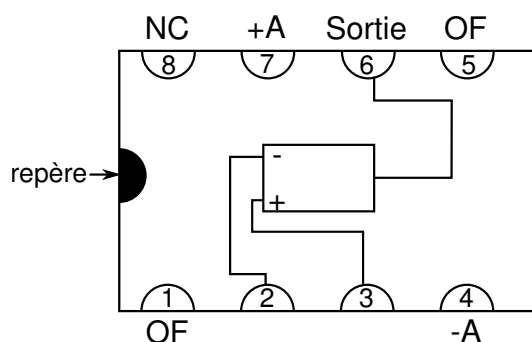


FIG. 2 – Branchement du circuit intégré

Broches :

- entrées (+, -) et sortie
- +A, -A : alimentation de l'ampli op.
- OF : deux entrées permettant la correction de la tension de décalage d'entrée (voir plus loin)
- NC : non connectée

L'ampli op. est alimenté par deux tensions continues appliquées entre +A et -A, symétriques autour d'un point milieu, relié ou non à la terre. C'est ce point milieu qui donne la tension de référence (indiquée par 0) dans les montages de l'ampli op. Noter que sur les plaquettes sur lesquelles sont installés les AO, ce point milieu n'est relié à rien (retourner la plaquette pour le constater) : c'est à vous d'en faire un potentiel de référence du circuit. **Avant toute utilisation, vérifier l'état de l'ampli op. en utilisant l'un des testeurs.**

a) Réglage de l'offset (décalage)

Bibliographie

– M. VAUCHELLES – *Travaux pratiques d'électronique, chap IX*

C'est une tension **continue** parasite interne à l'ampli op. Ramenée à l'entrée, elle est de quelques mV qui seront amplifiés au niveau de la sortie.

Pour permettre d'annuler l'offset le constructeur a prévu deux broches (notées OF sur les schémas) entre lesquelles on branche un potentiomètre de $10\text{ k}\Omega$ dont le curseur est relié au -12 V . Les plaquettes sont prévues avec ce potentiomètre connecté (petit boîtier rectangulaire dont le réglage par tournevis est très démultiplié). Le schéma ci-dessous indique une méthode de réglage. Elle est analogue aux montages amplificateurs décrits plus loin, où l'on aurait annulé la tension d'entrée. Ici l'amplification est 11. Ajuster le potentiomètre de façon à annuler approximativement la tension de sortie (à $0,01\text{ V}$ près). Ce potentiomètre de réglage ne figurera pas sur les schémas ultérieurs.

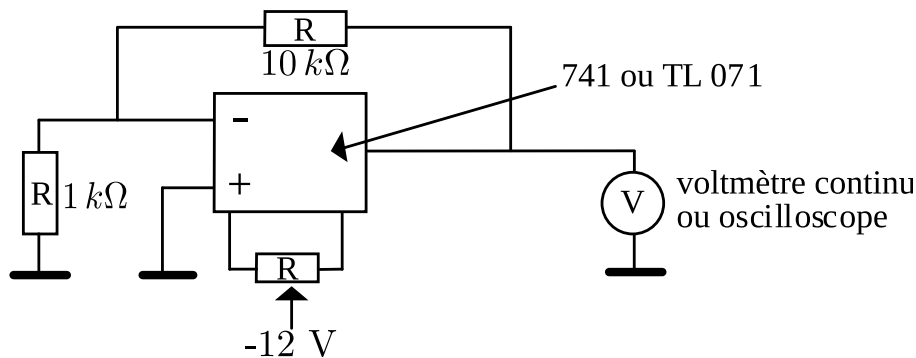


FIG. 3 – Réglage de l'offset

Nous conseillons fortement de réaliser toutes les manipulations (sauf contre-indication précise) **avec un 741**. En effet l'utilisation d'un TL71 conduit ici très souvent à des oscillations parasites dont il est difficile de se débarrasser. Ceci tient surtout au fait que l'on réalise les montages avec des fils longs.

II) Amplification en continu et en basse fréquence

Dans cette partie on se limite à $G < 100$ et $f < 1\text{ kHz}$ pour ne pas faire apparaître les limitations en fréquence de l'ampli-op. (cf III).

1) Amplification avec inversion

Bibliographie :

– M. VAUCHELLES – *Travaux pratiques d'électronique, chap IX*

– M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et II*

– R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*

– L. QUARANTA et AUBERT – *Dictionnaire de physique expérimentale, tome III*

– H-PREPA – *Électronique II, Première année PCSI*

– H-PREPA. – *Électronique I, Deuxième année PSI*

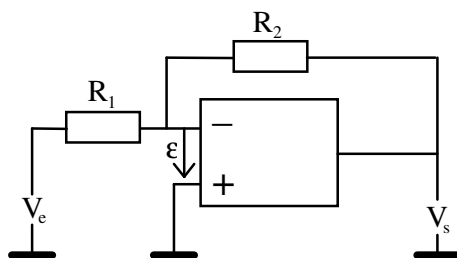


FIG. 4 – Montage inverseur

a) Ampli op. idéal

Le gain est $G = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$ (à établir). Pour le choix des résistances : la sortie de l'ampli op. débite le courant $i = V_s/R_2$ qui ne doit pas dépasser 10 mA pour rester dans un régime linéaire. La tension de sortie ne pouvant dépasser $\pm 15V$, on prendra $R_2 > 1\text{ k}\Omega$. Choisir R_1 pour avoir un gain assez faible. Il ne faut cependant pas prendre R_2 trop grand car d'autres défauts commencent à apparaître : tension d'offset, capacités parasites, etc (cf Dattée p. 98). Injecter un signal sinusoïdal de faible fréquence et vérifier la loi du gain (amplitude et phase).

b) Ampli op. non idéal

Saturation en tension : faire croître la tension d'entrée, interpréter.

Limitation en courant : faire débiter l'ampli op. sur une faible résistance, branchée entre la sortie et la masse. En déduire le courant maximum qu'il peut débiter. Ce montage peut-il alimenter un haut-parleur ?

2) Amplification sans inversion

Bibliographie

- M. VAUCHELLES – *Travaux pratiques d'électronique, chap IX*
- M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et II*
- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
- H-PREPA – *Électronique II, Première année PCSI*
- H-PREPA – *Électronique I, Deuxième année PSI*

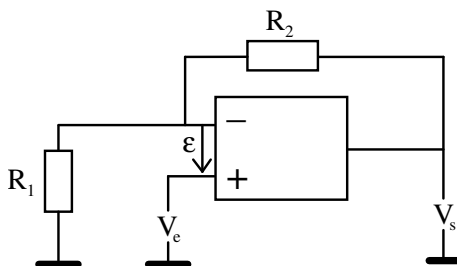


FIG. 5 – Montage non-inverseur

Gain $G = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ (à vérifier) Choix des résistances : quelle est la résistance vue par la sortie de l'ampli op. (en tant que composant électronique) ? Que devient la condition sur les

résistances pour rester en régime linéaire ? Le principal intérêt de ce montage est sa très grande résistance d'entrée illustrée dans le paragraphe « suiveur de tension ».

3) Le suiveur de tension (important)

Bibliographie

- M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et II*
- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
- H-PREPA – *Électronique II, Première année PCSI*
- H-PREPA – *Électronique I, Deuxième année PSI*

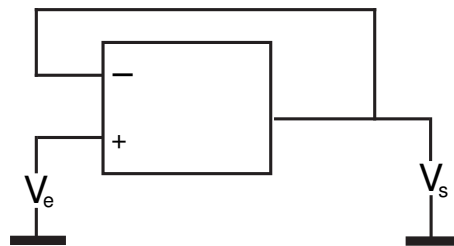


FIG. 6 – Montage suiveur

C'est un cas particulier de l'amplificateur sans inversion, il n'amplifie pas en tension : $V_s = V_e$ mais possède une très grande résistance d'entrée et une très faible résistance de sortie. On présente ici une application :

a) Application : le Voltmètre électrostatique

Bibliographie :

- M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et (II)*

Charger un condensateur de l'ordre de $1 \mu F$ (pour éviter que la charge ou la décharge soient trop violentes, mettre toujours une résistance de l'ordre de $1 k\Omega$ en série avec le condensateur). Mesurer la tension à ses bornes avec un voltmètre. Que constatez-vous ? Réaliser le montage de la figure 7 (avec un TL071), et constater que l'appareil ainsi réalisé permet de mesurer la tension aux bornes du condensateur sans le décharger. En réalité il y a une variation de charge très lente due non pas à la résistance d'entrée du montage qui est très grande mais au courant de polarisation d'entrée de l'ampli op. i_+ (courant continu qui provient de l'entrée +) (cf Dattée p. 98 et 103). En effet, la tension varie linéairement avec le temps et non pas exponentiellement. Pour le montrer et mesurer ce courant, remplacer le condensateur par un autre de valeur 100 fois plus faible, le décharger initialement et vérifier que la courbe $V_s = f(t)$ est une droite. En déduire i_+ . Que faut-il faire pour réaliser cette expérience avec un 741 dont le courant de polarisation est environ 1000 fois plus grand ?

III) L'amplificateur opérationnel en « haute fréquence »

Deux phénomènes se superposent de façon indépendante :

- le gain diminue avec la fréquence, et il y a rotation de phase de V_s par rapport à V_e .

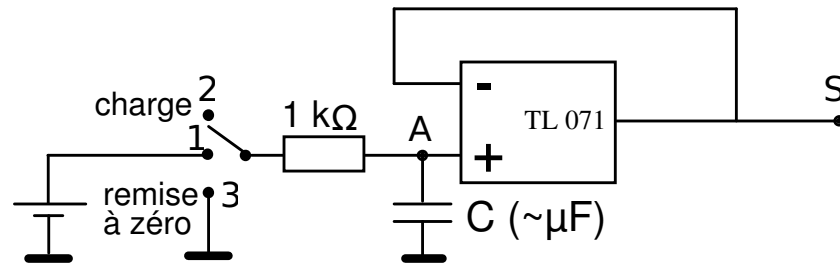


FIG. 7 – Voltmètre électrostatique

- la vitesse de variation de la tension de sortie dV_s/dt est limitée : $dV_s/dt < S$ (vitesse de balayage = slew rate); cela entraîne une limitation du gain à haute fréquence (réf. DAMAYE p.15; MALVINO p.482 et 512).

1) Étude de la vitesse limite de balayage

Bibliographie :

- M. VAUCHELLES – *Travaux pratiques d'électronique, chap IX*
- M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et II*
- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
- R. DAMAYE – *L'amplificateur opérationnel*
- MALVINO – *Principes d'électronique (p. 476 et suiv. p. 589 et suiv.)*

La vitesse limite de balayage ($S = 0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$ pour le 741) ne dépend pas du gain. Pour la mettre en évidence, il faut la dissocier de la variation du gain avec la fréquence (paragraphe suivant) : choisir le montage amplificateur non-inverseur par exemple et un gain faible (1 à 10), et utiliser des signaux de grande amplitude. Injecter un signal sinusoïdal et vérifier qu'il se déforme lorsque $\omega V_s > S$ où V_s est l'amplitude du signal de sortie. Montrer qu'on obtient progressivement un signal triangulaire lorsqu'on augmente l'amplitude ou la pulsation (ce qui permet de détecter l'effet de **cette limitation non linéaire**).

2) Variation du gain avec la fréquence (important)

Bibliographie :

- M. VAUCHELLES – *Travaux pratiques d'électronique, chap IX*
- M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et II*
- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
- R. DAMAYE – *L'amplificateur opérationnel*
- MALVINO – *Principes d'électronique (p. 476 et suiv. p. 589 et suiv.)*

a) Rappels :

Le diagramme de Bode représente la variation du gain et du déphasage avec la fréquence (les valeurs correspondent au 741 sur les figures suivantes).

La phase initiale est 0 ou π selon qu'on considère l'amplification sans ou avec inversion. La fréquence de coupure f_c est définie pour le gain linéaire par $G(f_c) = G(f = 0)/\sqrt{2}$ (soit pour le gain en dB : $G_{\text{dB}}(f = 0) - G_{\text{dB}}(f_c) = 3\text{dB}$). Au-delà de f_c , la pente est toujours réglée à -20

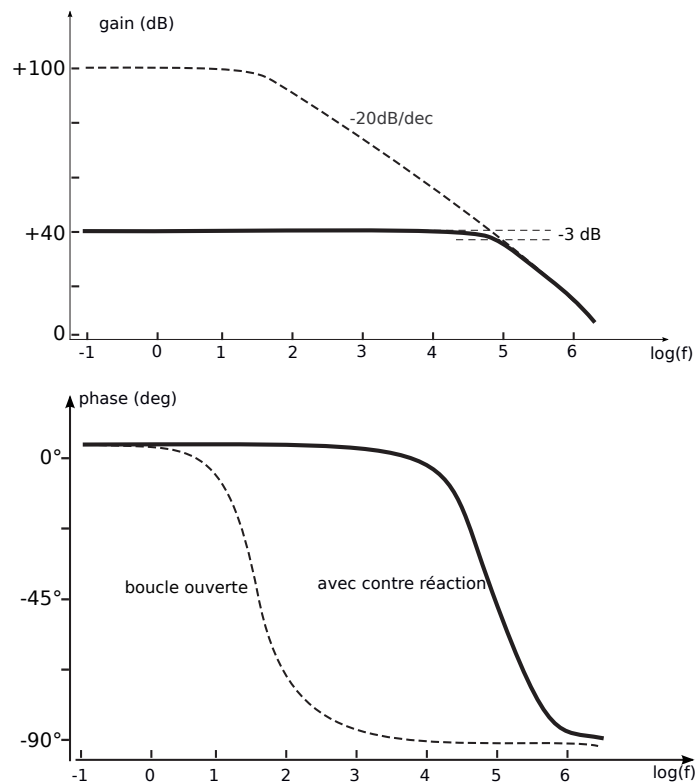


FIG. 8 – Diagramme de Bode

dB/décade, soit un gain linéaire $G(f)$ proportionnel à $1/f$. Cette compensation est réalisée par un condensateur interne, pour éviter qu'un déphasage de π à haute fréquence, ne transforme la contre-réaction en réaction, d'où instabilité (critère de Nyquist). Il en résulte que le produit GAIN-BANDE PASSANTE est constant pour le montage non inverseur : $G(f = 0) \times f_c = cste$. Pour le montage inverseur la loi devient : $(1 + |G(f = 0)|) \times f_c = cste$. Il vaut environ 1 MHz pour le 741.

b) Manipulation

On enverra ici un petit signal d'entrée sinusoïdal afin d'éviter la limite de vitesse de balayage (vérifier que le signal de sortie est sinusoïdal). La mesure du gain en boucle ouverte étant difficile, on se limitera à deux ou trois valeurs du gain entre $G = 10$ et $G = 1000$. Il est courant qu'au voisinage de 0 dB ($G = 1$) la courbe de gain devienne un peu plus verticale que -20 dB/déc donc que la loi étudiée ici ne soit plus bien vérifiée. C'est parce que la compensation en fréquence n'est plus nécessaire au-delà de 0 dB. Tracer en fonction de la fréquence la variation du gain (en $\log - \log$). Mesurer le déphasage, en particulier au voisinage de la fréquence de coupure. Pour la mesure avec contre-réaction, on utilisera le montage amplificateur inverseur (ou non-inverseur) (voir Krob) ou le montage décrit dans le Duffait et le Vauchelles.

IV) Applications de l'amplificateur opérationnel en électronique analogique

On n'en donne ici que les circuits de base et quelques exemples simples qui pourront vous être utiles en montage et dans d'autres TP.

1) Addition

Bibliographie

- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
- H-PREPA – *Électronique I, Deuxième année PSI*

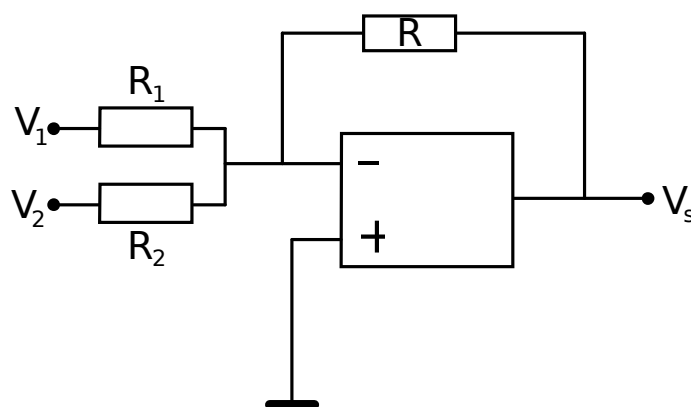


FIG. 9 – Montage Additionneur

Établir que $V_s = -R \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$. Prendre pour V_1 une tension sinusoïdale et pour V_2 une tension continue. On réalise ainsi la fonction décalage ou « offset » des générateurs BF.

2) Intégration

Bibliographie

- M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et (II)*
- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
- L. QUARANTA et AUBERT – *Dictionnaire de physique expérimentale, tome III*
- R. JOURNEAUX – *TP de physique : électricité, électronique, optique (de Boek)*

a) Schéma général

Voir le schéma de la figure 10. On a la relation simple à établir :

$$V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt, \text{ en sinusoïdal } V_s = -\frac{1}{jRC\omega} V_e$$

b) Schéma pratique en alternatif

Voir la figure 11.

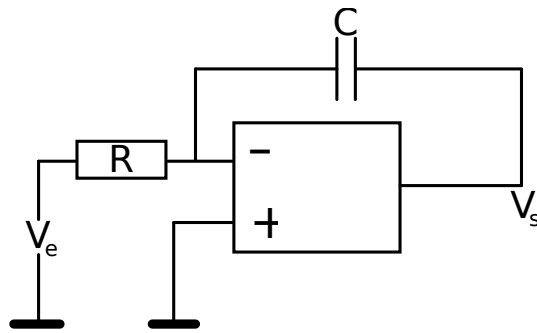


FIG. 10 – Intégrateur

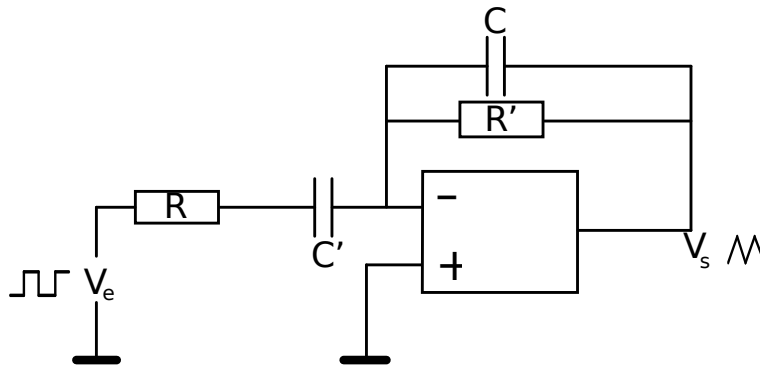


FIG. 11 – Intégrateur en alternatif

c) Manipulation proposée

Le premier montage intègre aussi bien les signaux alternatifs que continus, ces derniers donnant une rampe de tension qui ne s'arrête qu'à la saturation (si vous voulez intégrer un tel signal il faut initialement décharger le condensateur en court-circuitant ses bornes au moyen d'un strap ou d'un interrupteur). Utiliser plutôt le second montage. Le condensateur C' sert à arrêter une composante continue éventuelle donnée par le GBF, son impédance doit être faible devant R à la fréquence fondamentale du signal. Cette précaution ne suffit pas car le courant de polarisation d'entrée et l'offset peuvent provoquer une charge lente du condensateur C ; la résistance R' dont l'impédance doit être grande devant celle de C sert à décharger ce condensateur. Choisir R et C tels que $RC\omega_0 \simeq 1$, ω_0 étant la pulsation fondamentale du signal (ce choix n'est pas critique ici mais donne un signal de sortie dont l'amplitude est voisine de celle du signal d'entrée); attention l'impédance vue par le GBF est R .

- Injecter des signaux carrés (la fréquence n'est pas critique).
- Injecter des signaux sinusoïdaux et montrer que ce montage réalise un filtre passe-bas du premier ordre (dans le domaine où C' joue un rôle négligeable).

d) Applications

Fluxmètre (mesure de champ magnétique) et oscillateur à relaxation.

3) Étude d'un filtre actif

Bibliographie :

- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*
- H-PREPA – *Électronique II, Première année PCSI* (sujet entièrement traité)

On propose l'étude d'un filtre passe-bande de type "Sallen et Key". Il présente l'avantage sur d'autres filtres classiques (Rauch par exemple) d'avoir une réaction de la sortie sur l'entrée +, ce qui permet une étude directe de la stabilité. Réaliser le montage ci-dessous. Les performances de l'ampli op étant modestes, choisir les composants de façon à opérer à une fréquence ne dépassant pas 1 kHz.

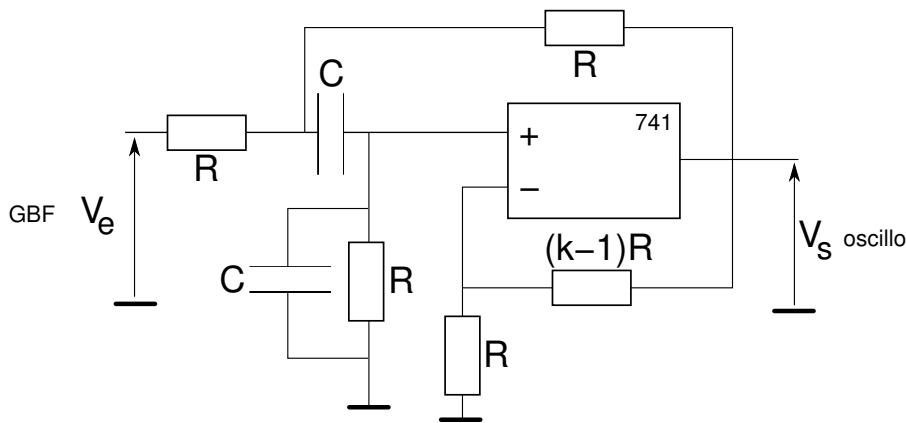


FIG. 12 – Filtre actif de Sallen-Key

On utilisera des résistances $R = 10\text{ k}\Omega$ et capacités $C = 0,1\text{ }\mu\text{F}$, montées sur plaquettes et pour la résistance variable une boîte AOIP $\times 10^4\ \Omega$. On montre que la fonction de transfert de ce filtre peut se mettre sous la forme normalisée :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{A_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

avec la pulsation centrale $\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC}$, le facteur de qualité $Q = \frac{\sqrt{2}}{5-k}$ et l'amplification maximale $A_0 = \frac{k}{5-k}$.

a) Expérience :

Ne pas faire en TP une étude exhaustive de ce filtre, il faudrait y consacrer plusieurs heures. Le seul paramètre sur lequel on jouera ici est k .

Étude de la fonction de transfert : choisir par exemple $k = 4$ (plus k est proche de 5, plus le filtre est sélectif mais plus les défauts de l'ampli op et la dispersion des valeurs des résistances et condensateurs jouent un rôle) et vérifier en régime sinusoïdal les formules donnant ω_0 , Q et A_0 . Application qualitative : visualiser l'effet du filtre sur un signal carré à la pulsation ω_0 .

Étude de la stabilité : régler la tension de sortie du GBF sur zéro (ou remplacer le GBF par un court-circuit) et vérifier que le filtre devient instable lorsque $k \geq 5$.

Réponse à un échelon de tension : injecter un signal carré de longue période et visualiser le comportement du filtre. Vérifier que lorsque k augmente, le temps de réponse augmente.

V) L'amplificateur opérationnel en régime saturé

Bibliographie :

- M. KROB – *Électronique expérimentale, chap IV et II*
- R. DUFFAIT – *Expériences d'électronique, chap IV et VII*

En régime non-linéaire, l'amplificateur opérationnel peut être utilisé afin de comparer des tensions. La sortie de l'amplificateur étant une tension continue dans ces montages, il est nécessaire d'utiliser les modes DC des oscilloscopes.

1) Le comparateur simple

Réaliser le montage comparateur simple. Prendre pour E_0 une tension continue (éventuellement variable) dont la valeur est inférieure à la valeur d'alimentation de l'amplificateur opérationnel. Sur l'entrée $-$ de l'amplificateur brancher un générateur. Observer les tensions V_- et V_s à l'oscilloscope. Interpréter. Prendre une tension sinusoïdale alternative pour V_- , visualiser la sortie V_s en fonction de la valeur de E_0 (faire varier cette valeur). On peut passer en XY et visualiser sur l'écran de l'oscilloscope la caractéristique de transfert du montage. Influence de la vitesse de balayage (Slew Rate – i.e. faire varier la fréquence). Remarque : On emploie beaucoup les montages en comparateur simple dans les *Convertisseurs Analogique-Numérique*

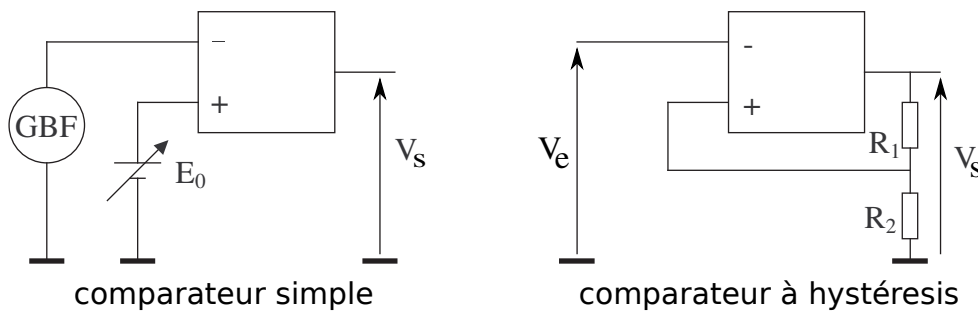


FIG. 13 – Comparateurs

2) Le comparateur à hystérésis

Réaliser le montage comparateur à hystérésis. On applique une tension sinusoïdale sur l'entrée $-$ de l'amplificateur. Montrer qu'il est nécessaire que l'amplitude V_m de la tension sinusoïdale soit supérieure à $R_2 V_{sat} / (R_1 + R_2)$ pour observer un basculement en sortie de l'amplificateur. Justifier cette observation. En mode XY, observer la caractéristique du montage (cycle d'hystérésis). Expliquer cette caractéristique. Observer l'influence de la vitesse de balayage sur la forme de cette caractéristique. Comparer le montage *comparateur à hystérésis* avec le montage *amplificateur non-inverseur*. Commentaires.

3) Régime saturé : principe du GBF

Un autre exemple classique et important d'utilisation d'un AO en régime saturé est celui du multivibrateur astable. Le montage est présenté page 189 du Duffait d'électronique (fig 36).

L'idée est de faire osciller l'AO entre ses deux points de saturation, puis d'intégrer ce signal pour obtenir un signal quasi-triangulaire. Réaliser le montage proposé. Faites varier le rapport $R_2/(R_1 + R_2)$, et observer l'effet sur le signal de sortie.

La fréquence de ce signal peut être commandé par une tension externe. Si le temps le permet, réaliser le montage p.192 du Duffait pour observer cette commande de la fréquence. On a ainsi réalisé un oscillateur de fréquence choisie par l'expérimentateur : c'est le principe d'un V.C.O. (Voltage Controlled Oscillator), à la base d'un GBF. Afin d'obtenir un signal quasi-sinusoidal, on pourrait intégrer le signal quasi-triangulaire pour obtenir des arches de paraboles, ou ajouter un montage à diodes pour découper le triangle en fonction affine par morceaux.