



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS

2022-2023



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1	[1P] Caractéristiques et branchement des amplificateurs opérationnels	3
2	Amplification en continu et en basse fréquence	4
2.1	[1P] Amplification avec inversion	4
2.2	[1P] Amplification sans inversion	5
2.3	Le suiveur de tension	5
3	L'amplificateur opérationnel en «haute fréquence»	6
3.1	[1P] Étude de la vitesse limite de balayage	6
3.2	[1P] Variation du gain avec la fréquence	6
4	Applications de l'amplificateur opérationnel en électronique analogique	8
4.1	[1P] Intégration	8
4.2	[1P] Comparateurs	9
4.3	Le comparateur à hystérésis	9
4.4	[2P] Addition	9
5	[AP] Étude d'un filtre actif	9

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*
- 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)"

Remarques préalables :

- Dans les nouveaux programmes de CPGE (2014), l'amplificateur opérationnel (ampli op. ou AO) est appelé amplificateur linéaire intégré (ALI).
- Les expériences présentées ici constituent des prérequis pour un certain nombre de montages d'électronique. L'amplificateur opérationnel, comporte de nombreux circuits internes de compensation. Pour étudier l'amplification d'un signal, on peut envisager des circuits simples à base de transistor(s) (qui feront l'objet d'un polycopié de TP en série 2).

L'amplificateur opérationnel est un circuit électronique amplifiant la différence de potentiel entre ses entrées. Il peut être utilisé soit en boucle ouverte (pas de retour de la sortie sur l'entrée), soit en boucle fermée (le montage le plus courant). C'est un circuit complexe comportant une quinzaine de transistors, une dizaine de résistances, quelques diodes et condensateurs.

1 [1P] Caractéristiques et branchement des amplificateurs opérationnels

Généralités On utilisera un AO classique 741 qui a des performances assez modestes. On dispose également d'amplis 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	

FIGURE 1 – Caractéristiques des différents AO

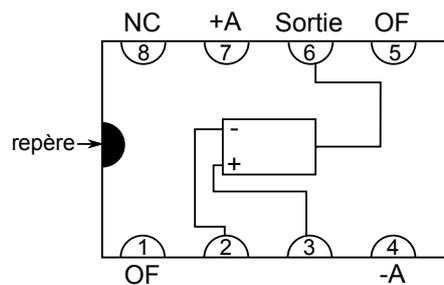


FIGURE 2 – Branchement du circuit intégré

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 pour que les montages : dans tous les montages avec AO, on connectera donc impérativement ce point milieu à la masse du circuit pour fonctionner en régime nominal.**

Avant toute utilisation, vérifier l'état de l'ampli op. en utilisant l'un des testeurs.

Réglage du décalage (offset) 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 (M. VAUCHELLES - "Travaux pratiques d'électronique, chap IX")

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 Fig. 3 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.

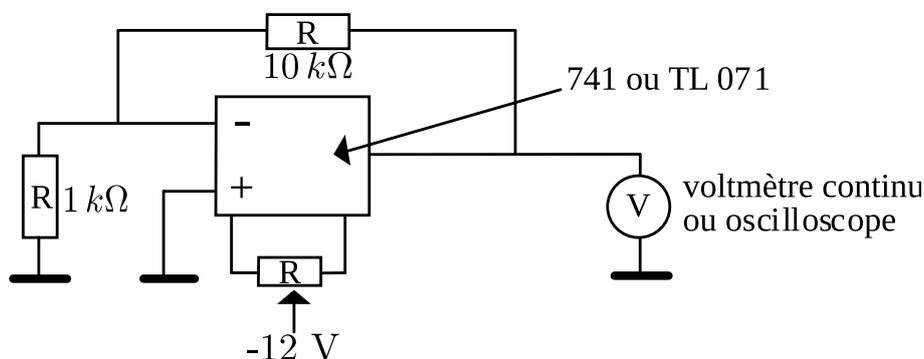


FIGURE 3 – Réglage de l'offset

Nous conseillons fortement de réaliser toutes les manipulations (sauf contre-indication précise) **avec un 741**. En effet l'utilisation d'un TL071 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.

2 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). On s'intéressera davantage dans cette partie aux limites des AO qu'à la vérification des lois de gain.

2.1 [1P] Amplification avec inversion

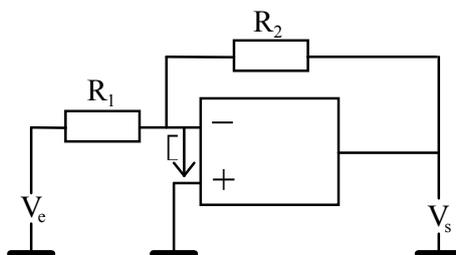


FIGURE 4 – Montage inverseur

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 linéaire¹. 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).

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 ?

2.2 [1P] Amplification sans inversion

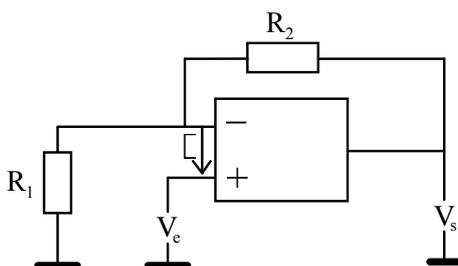


FIGURE 5 – Montage non-inverseur

Gain $G = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ (à vérifier). On pourra considérer à nouveau les conditions sur les résistances du montage pour éviter d'avoir une saturation du courant de sortie de l'ampli op. Le principal intérêt de ce montage est sa très grande résistance d'entrée illustrée dans le paragraphe «suiveur de tension».

2.3 Le suiveur de tension

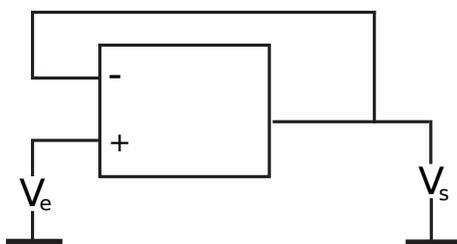


FIGURE 6 – Montage suiveur

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.

Le montage suiveur est très largement utilisé car il permet de mesurer ou de prélever une tension sans modifier le fonctionnement du circuit étudié. On donne ici un exemple, où l'on cherche à mesurer la charge portée par un condensateur.

[1P] Ampli op. idéal : Mesure de la charge portée par un condensateur Charger un condensateur de l'ordre de $1 \mu\text{F}$ (pour éviter que la charge ou la décharge soient trop violentes, mettre toujours une résistance de l'ordre de $1 \text{ k}\Omega$ en série avec le condensateur). Mesurer ensuite la tension à ses bornes avec un voltmètre pour en déduire la charge contenue dans le condensateur. Que constatez-vous ?

1. On suppose ici qu'on mesure la tension de sortie par un voltmètre, d'impédance très élevée devant R_2 . Dans la pratique, la tension de sortie sera plutôt appliquée à une charge utile R_u , qui devra être prise en compte pour éviter d'atteindre la limitation du courant de sortie de l'ampli op (voir cours d'électronique).

On améliore le montage ci-dessus en insérant un montage suiveur (figure 7) **utilisant un TL071**. Constaté que l'appareil ainsi réalisé permet cette fois de mesurer la tension aux bornes du condensateur sans le décharger. Quelle est la différence avec le voltmètre précédemment utilisé? (M. KROB - *Électronique expérimentale, chap IV (et II)*)

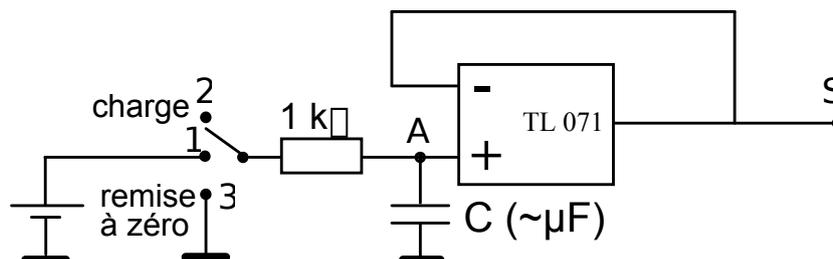


FIGURE 7 – Voltmètre électrostatique

[2P] Ampli op. non idéal : courant de polarisation 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 +). En effet, la tension varie linéairement avec le temps et non pas exponentiellement.

Pour évaluer le courant de polarisation sur le TL071, remplacer le condensateur par un autre de valeur 100 fois plus faible, puis vérifier que la courbe $V_s = f(t)$ est une droite et calculer i_+ .

Constaté que le courant de polarisation est 1000 fois plus élevé sur le uA741 en remplaçant l'ampli op. du montage précédent.

3 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 ;
- 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.

3.1 [1P] Étude de la vitesse limite de balayage

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**).

3.2 [1P] Variation du gain avec la fréquence

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-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, rendant alors le système instable (critère de Nyquist). Il en résulte que le produit $\text{GAIN} \times \text{BANDE PASSANTE}$ est constant pour le montage non inverseur : $G(f=0) \times f_c = \text{cste}$. Pour le montage inverseur la loi devient : $(1 + |G(f=0)|) \times f_c = \text{cste}$. Il vaut environ 1 MHz pour le 741.

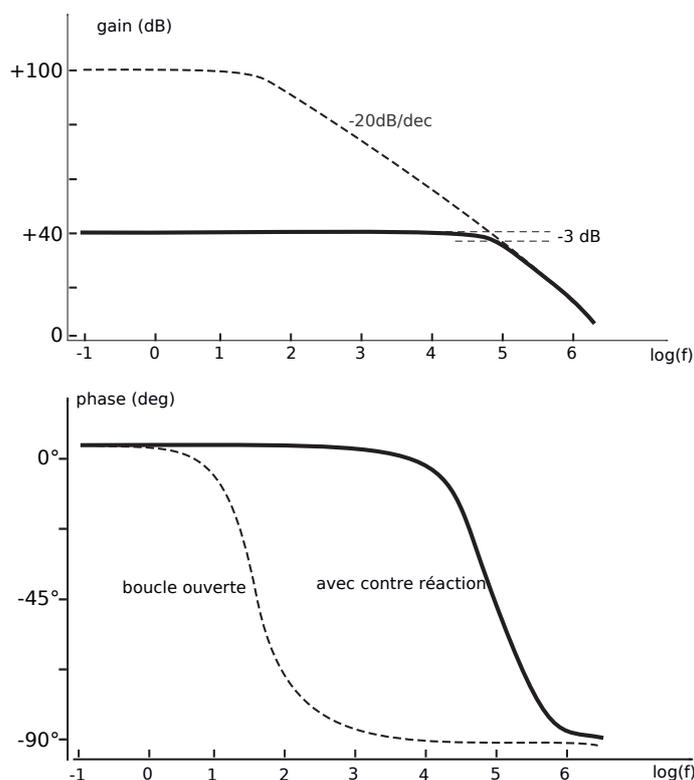


FIGURE 8 – Diagramme de Bode

Manipulation On utilisant le montage amplificateur inverseur (ou non-inverseur) (voir Krob), tracer en fonction de la fréquence la variation du gain (en log-log). Mesurer également le déphasage, en particulier au voisinage de la fréquence de coupure. En faisant varier le gain statique du montage, on pourra vérifier la loi sur le produit gain-bande.

Dans un deuxième temps, considère le montage en boucle ouverte, à savoir sans retour de la sortie sur l'entrée. 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 $G = 1000$, en commençant par les hautes fréquences (gain faible), par exemple 100 kHz. Une bonne manière d'obtenir ces mesures est de partir de la pente obtenue en boucle fermée, et la remonter progressivement en diminuant la fréquence. Cette étude est rendue difficile à grand gain par les bruits électroniques comme l'offset de l'AO qui deviennent du même ordre que la tension de consigne imposée par le GBF. 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.

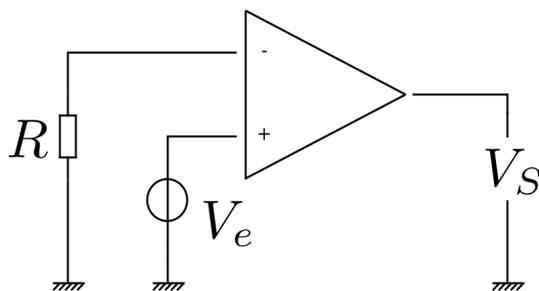


FIGURE 9 – Montage AO en boucle ouverte

4 Applications de l'amplificateur opérationnel en électronique analogique

On étudie dans cette partie quelques circuits de base qu'on peut construire à l'aide d'AO, et qui pourront vous être utiles en montage et dans d'autres TP. Ces exemples complètent les études précédentes du suiveur et des amplificateurs inverseur et non-inverseur. On notera aussi l'existence du soustracteur ou du dérivateur, qui ne sont pas présents dans ce TP. La descriptions de ces circuits peuvent se retrouver aisément dans d'anciens livre d'électronique en CPGE.

4.1 [1P] Intégration

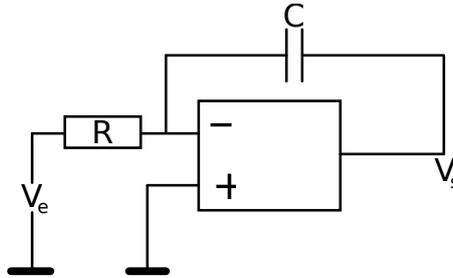


FIGURE 10 – Intégrateur

Schéma général Voir le schéma de la figure 10. On a la relation simple, à établir, $V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$, soit en régime sinusoïdal $V_s = -\frac{1}{jRC\omega} V_e$.

Schéma pratique en alternatif Voir le schéma de la figure 11.

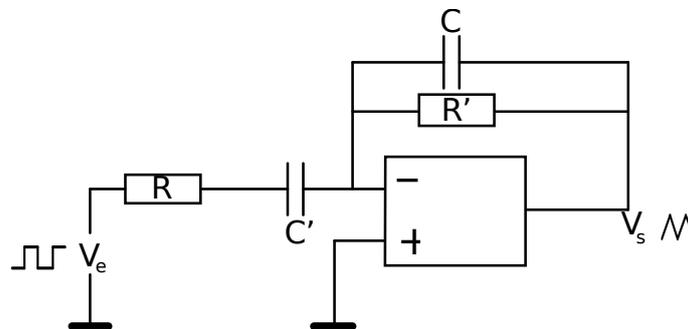


FIGURE 11 – Intégrateur en alternatif

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).

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

4.2 [1P] Comparateurs

En régime saturé, l'amplificateur opérationnel peut être utilisé afin de comparer des tensions (M. KROB - *Électronique expérimentale, chap IV et II*, et R. DUFFAIT - *Expériences d'électronique, chap IV et VII*). La sortie de l'amplificateur étant une tension continue dans ces montages, il est nécessaire d'utiliser les modes DC des oscilloscopes.

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 tension 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 : faire varier la fréquence).

Remarque : On emploie beaucoup les montages en comparateur simple dans les *Convertisseurs Analogique-Numérique*.

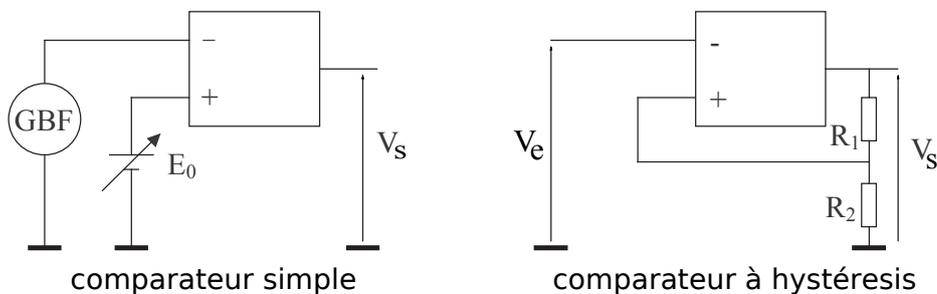


FIGURE 12 – Comparateurs

4.3 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.

On verra dans le TP "Systèmes bouclés" en série II comment utiliser ce comparateur pour réaliser un oscillateur à relaxation.

4.4 [2P] Addition

Voir le schéma de la figure 9. 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.

5 [AP] Étude d'un filtre actif

On propose l'étude d'un filtre passe-bande de type "Sallen et Key" (R. DUFFAIT - *Expériences d'électronique, chap IV et VII*, et H-PREPA - "Électronique II, Première année PCSI" (sujet entièrement traité)). Le filtre de Sallen et Key présente l'avantage sur d'autres filtres classiques (Rauch par exemple) d'avoir une réaction de la sortie sur

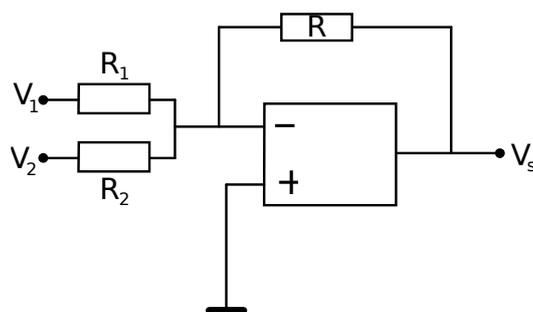


FIGURE 13 – Montage Additionneur

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.

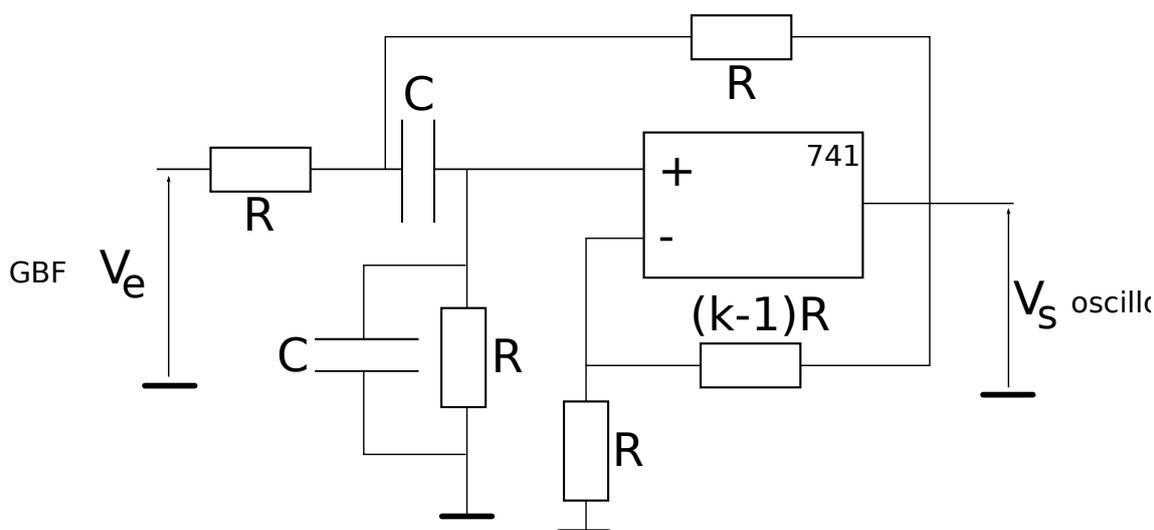


FIGURE 14 – Filtre actif de Sallen-Key

On utilisera des résistances $R = 10\text{ k}\Omega$ et capacités $C = 0,1\ \mu\text{F}$, 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

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

avec la pulsation centrale $\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC}$, le facteur de qualité $Q = \frac{\sqrt{2}}{5-k}$ et l'amplification maximale $A_0 = \frac{k}{5-k}$. Une étude exhaustive de ce filtre serait assez longue : le paramètre sur lequel on jouera principalement 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.