



Janvier 2001

Projet d'électronique P1 n°1 :

Générateur de signaux à Amplificateurs Opérationnels

Formalités de déroulement

- Durée : 3 séances (dont une de validation finale de la maquette)
- Rapport à remettre à l'issue (voir informations utiles pour la rédaction du rapport en annexe du guide de TP)
- Les 2 premières séances donneront lieu à des validations partielles (validation de certains modules)
- Le petit matériel nécessaire au travail sur le projet en dehors des séances encadrées sera prêté jusqu'à la fin de l'année (voir la liste dans le guide). Ce matériel comportera entre autres une plaquette à contacts neuve et une ayant déjà servi. Pour diminuer le risque de faux contacts avec les neuves, il vous est demandé de ne pas enfoncer la pointe de la sonde dans ces contacts : un embout sera distribué avec chaque sonde, permettant d'utiliser des petits fils dénudés pour les contacts.
- Les barèmes de notation seront fixés à l'avance (le nombre de points affecté à chaque question sera indiqué)

Quantité de travail nécessaire à l'aboutissement des projets

Les projets comportent :

- une partie de travail *encadré*, correspondant aux séances qui se déroulent en présence des enseignants
- une partie de travail *non-encadré*, autonome, le labo rouge (et les labos C11-C12 sur demande) étant en libre accès en permanence

Les proportions de la quantité de travail prévue sont : 3/4 pour la partie encadrée et 1/4 pour la partie non-encadrée, ce qui représente pour cette dernière l'équivalent d'une séance de 4 heures pour un projet de 3 séances.

La quantité de travail que comportent les projets correspondent à cette répartition.

Objectif de ce 1^{er} projet

Un des objectifs de ce projet est de générer des signaux périodiques de différentes formes (carré, rectangulaire avec rapport cyclique variable, triangulaire, en dents de scie), à l'aide d'Amplificateurs Opérationnels (AO). L'AO est également utilisé pour le filtrage (passe-bas) de ces signaux, ainsi que comme tampon (montage suiveur).

Un autre objectif est la compréhension du lien existant entre l'*aspect temporel* des signaux (forme à l'oscilloscope), leur *aspect fréquentiel* (contenu en harmoniques) et leur *perception auditive* (écoute des sons produits avec un haut-parleur).

Informations pratiques

Tensions d'alimentation

Les AO seront alimentés en $\pm V_{cc}$ avec $V_{cc}=5V$.

Composants nécessaires

- AO TL081, TL082 ou TL084
- transistors 2N2222
- Haut-parleur
- résistances et condensateurs en valeurs normalisées

Documentations techniques

Les fiches techniques des composants utilisés sont disponibles sur la page web-élec.

1^{ère} séance (/3) Travail à effectuer

Ce travail comporte :

- Un compte-rendu à remettre à l'issue de la séance (sur 15 points)
- Une validation des modules suivants :
 - 1) Montage suiveur (1 point)
 - 2) Montage amplificateur (2 points)
 - 3) Oscillateur carré-triangle (2 points)

Remarque importante

L'annexe comporte de nombreuses informations utiles facilitant la réponse aux questions.

Montages de base à AO

AO seul

Q1 (pratique). Connecter l'entrée + de l'AO à la masse. Appliquer sur l'entrée – une tension continue ajustable obtenue à l'aide de la commande offset du générateur de fonction (et en annulant la tension alternative). Décrire ce qu'il se passe quand on fait varier cette tension continue autour de 0V, en visualisant simultanément cette tension à l'oscilloscope et la tension de sortie de l'AO. (1 point)

Q2 (p). Même chose mais en intervertissant les entrées + et -. Conclure de ces 2 questions sur l'influence des 2 entrées de l'AO sur sa sortie, et sur la stabilité de l'AO en boucle ouverte. (1 point)

Q3 (p). Indiquer les valeurs (mesurées) de saturation positive et négative de l'AO (en justifiant la réponse). (0,5 point)

Montage suiveur

Q4 (p). Réaliser un montage suiveur. Lui appliquer en entrée un signal alternatif d'amplitude environ 1V et de fréquence environ 1kHz. Visualiser (et décrire) la tension d'entrée et la tension de sortie à l'oscilloscope et en déduire l'expression de l'amplification en tension du montage. (1 point)

Q5 (p). Augmenter la fréquence du signal d'entrée progressivement jusqu'aux limites du générateur, et décrire la forme observée de la tension de sortie pour les fréquences supérieures à 1 MHz. A partir de la valeur du produit gain-bande indiquée sur la fiche technique de l'AO (*Typ.* Signifie *typical*, valeur moyenne), donner la valeur théorique de la fréquence limite de fonctionnement. (1 point)

Montage amplificateur-inverseur

Q6 (p). Réaliser un montage amplificateur inverseur à AO dont le rapport d'amplification est 100 (avec $R_1=1k\Omega$ par rapport au schéma de l'annexe). Le tester avec un signal sinusoïdal en entrée, d'amplitude 100mV et de fréquence 1kHz. Que se passe-t-il quand on augmente l'amplitude de la tension d'entrée ? Donner les 2 valeurs de saturation de la tension de sortie. (0,5 point)

Q7 (p). Quand on augmente la fréquence de la tension d'entrée, à partir de quelles fréquences l'amplitude de sortie :

- commence-t-elle à diminuer ?
- a-t-elle diminuer de 30% (ce qui correspond à une chute de 3dB) ?

Comparer avec le produit gain-bande indiqué sur la fiche technique. (1 point)

Q8 (p). Par une petite expérience que vous décrierez, à l'aide du même montage que la celui de la question précédente (et de la commande offset du générateur de fonctions), montrer qu'avec les AO on peut réaliser un amplificateur continu. Retrouver la valeur d'amplification de la question précédente. (1 point)

Etude d'un montage intégrateur

Q9 (p). Câbler le montage intégrateur de base utilisant un AO, une résistance R et un condensateur C (on prendra $R=10k\Omega$ et $C=220nF$). Appliquer en entrée de ce montage un

signal carré compris entre $-4V$ et $+4V$, de fréquence égale à quelques kHz. Relever les signaux d'entrée et de sortie en précisant bien les paramètres des signaux. (2 points)

Q10 (p). Rajouter une résistance environ 50 fois supérieure à R en parallèle avec le condensateur. Recommencer le test de la question précédente avec le même signal carré, un signal rectangulaire puis un signal sinusoïdal. En décrivant la forme des différents signaux de sortie observés, montrer que ce montage est un intégrateur. Préciser l'intérêt de la résistance rajoutée. (1 point)

Etude d'un comparateur à hystérésis

Q11 (p). Réaliser un comparateur à hystérésis (voir annexe). Réaliser ce circuit avec $R_1=10k\Omega$ et $R_2=24k\Omega$, puis lui appliquer en entrée un signal triangulaire variant de $-4V$ à $+4V$, issu du générateur de fonctions. Relever la tension d'entrée et la tension de sortie sur un même repère temporel. Commenter ces chronogrammes. Préciser les valeurs de V_{sat+} et V_{sat-} . (1,5 points)

Q12 (théorique). Calculer les 2 seuils de basculement du comparateur à hystérésis en utilisant les valeurs expérimentales de V_{sat+} et V_{sat-} . Comparer avec les résultats obtenus à la question précédente. (1 point)

Etude du fonctionnement global d'un intégrateur et d'un comparateur bouclés

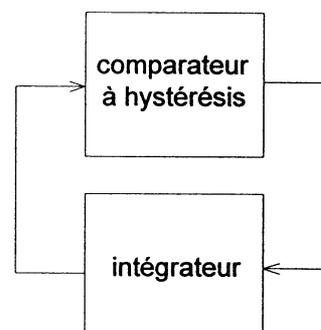
Q13 (th). A partir du résultat des questions précédentes, montrer que l'association d'un comparateur à hystérésis et d'un intégrateur comme sur la figure ci-dessous permet d'obtenir un oscillateur fournissant simultanément (sur 2 sorties différentes) un signal carré et un signal triangulaire. Décrire le fonctionnement global de l'ensemble de ces deux montages. (1,5 point)

Q14 (p). Réaliser ce bouclage en pratique et relever les 2 signaux de sortie, en précisant bien leurs paramètres (périodes et amplitudes maximales). (1 point)

Remarques importantes :

- 1) Ce montage est un oscillateur, ce qui signifie qu'il est autonome et donc ne nécessite plus le générateur de fonctions.
- 2) Il est rappelé que pour visualiser la phase correcte entre 2 signaux il faut utiliser 2 sondes (donc emprunter une sonde "labo").

Montage intégrateur et montage comparateur à hystérésis (Trigger de Schmitt) bouclés : la sortie de chacun des deux modules est appliquée à l'entrée de l'autre.



ANNEXE

Utilisation de l'Amplificateur Opérationnel

Introduction

Dans le régime de fonctionnement linéaire, selon les composants du montage et le schéma de connexion, l'AO peut réaliser des opérations mathématiques (somme, soustraction, dérivation, intégration). De là vient sa dénomination.

L'AO est un amplificateur *différentiel*, c'est à dire qu'il possède deux entrées et, qu'en mode de fonctionnement linéaire, il amplifie la différence de potentiel existant entre ces deux entrées.

Relation entrées/sortie

Un AO possède deux bornes d'entrées + et -, et une borne de sortie S (figure 1.a). L'entrée - est l'entrée inverseuse, car pour une tension d'un signe donné (positive ou négative) appliquée sur cette entrée, la tension de sortie possède le signe opposé. L'entrée + est l'entrée non-inverseuse (entrée et sortie de même signe).



Figure 1. Symboles de l'Amplificateur Opérationnel.
(a) Norme française. (b) Norme anglo-saxonne (la plus répandue).

La tension de sortie de l'AO ne peut pas dépasser des valeurs, légèrement inférieures en valeur absolue, aux tensions d'alimentation $-V_{CC}$ et $+V_{CC}$. Ces tensions sont appelées tensions de saturation : $+V_{sat}$ et $-V_{sat}$. (Par exemple, pour certains modèles, si l'AO est alimenté avec $\pm V_{CC}=12V$, V_{sat} pourra être égal à $\pm 11V$).

La sortie de l'AO est définie par:

$$v_s = A_d(v^+ - v^-) = A_d v_d$$

v_d est la tension différentielle d'entrée. A_d est l'amplification différentielle (figure 2). Elle est en général très grande, de l'ordre de 10^5 à 10^7 .

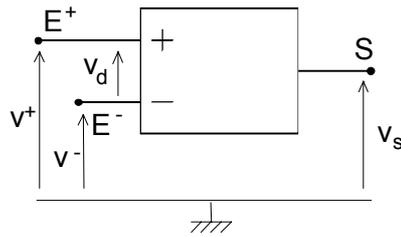


Figure 2. Tensions d'entrée v^+ et v^- et entrée différentielle v^d .

On voit bien que le régime linéaire correspond à une tension différentielle très faible ; en effet, l'amplification en tension est très grande et les valeurs $\pm V_{sat}$ sont obtenues en sortie pour une entrée $\pm v_d = \pm V_{sat}/A_d$. Pour des valeurs supérieures de v_d , l'AO entrera dans le régime non-linéaire (figure 3). On parle alors de saturation.

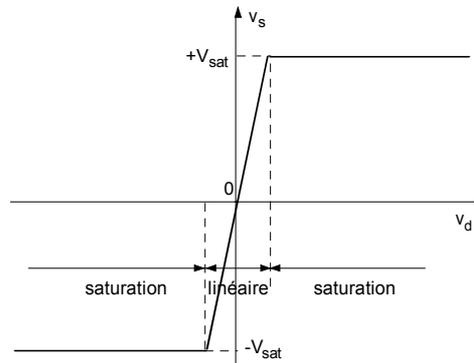


Figure 3. Caractéristique de transfert de l'AO. Il est important de noter que les échelles utilisées pour les axes des abscisses et des ordonnées sont très différentes.

Utilisation en quadripôle

L'AO est un amplificateur différentiel : il possède 2 entrées symbolisées par $-$ et $+$. L'entrée $-$ est appelée entrée inverseuse et l'entrée $+$ entrée non-inverseuse. En fait on verra que dans de nombreux montages l'une des 2 entrées est reliée à la masse, et donc que ces montages se ramènent à des quadripôles : 1 tension d'entrée et 1 tension de sortie, toutes 2 référencées par rapport à la même masse.

Circuits intégrés

Un AO se présente le plus souvent sous forme de circuit intégré. Contrairement aux circuits intégrés logiques qui ne travaillent qu'avec 2 valeurs de tensions différentes, correspondant aux niveaux logique 0 (0V) et 1 (par exemple 5V), il s'agit ici d'un circuit intégré *analogique* : les tensions d'entrée et de sortie peuvent prendre toutes les valeurs possibles entre une limite inférieure et une limite supérieure.

Alimentation

L'utilisation normale d'un AO est avec une double alimentation (figure 4), symétrique par rapport à 0 (par exemple $-9V$ et $+9V$ ou $-15V$ et $+15V$, etc). La plupart du temps on note ces 2 tensions $-V_{cc}$ et $+V_{cc}$. Le $0V$ de cette alimentation doit constituer la masse générale : celle du montage, des appareils de mesure et du générateur de fonctions. L'AO n'est pas lui-même relié à la masse, mais les tensions d'entrée et de sortie sont référencées par rapport à elle.

Le point commun M des deux alimentations constitue la masse du montage. Ces deux alimentations sont nécessaires à la polarisation des transistors qui composent l'AO. Elles constituent l'apport d'énergie nécessaire pour obtenir une amplification. Cependant, selon les besoins, l'AO peut être alimenté avec n'importe quelles tensions situées dans la limite acceptable définie par le constructeur. Les tensions d'alimentations ne sont pas toujours représentées, afin d'alléger les schémas.

Mais il est également possible d'utiliser un AO avec une seule alimentation (moyennant quelques modifications des montages). Cela peut s'avérer très utile lorsque l'on souhaite mettre au point un montage alimenté par une pile.

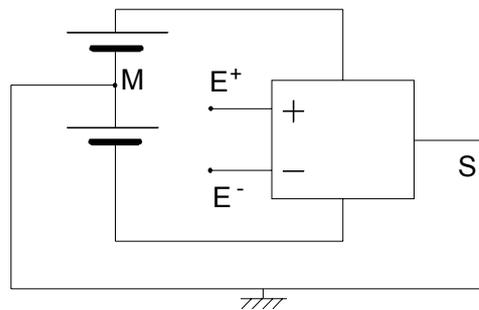


Figure 4. Alimentation de l'AO en mode symétrique.

Produit gain-bande

Une des principales caractéristiques de l'AO est son produit gain-bande : en fait il s'agit du produit de l'amplification en tension (v_s/v_e) et de la bande passante. Ce produit est constant. Il s'exprime en Hertz.

Par exemple, avec un AO possédant un produit gain-bande égal à 3 MHz , à la fréquence de 10 kHz , l'amplification maximale sera égale à 300 , et à 100 kHz elle ne sera plus que de 30 . Si l'on essaie d'obtenir une amplification supérieure à la valeur maximale (par exemple en jouant sur la valeur des résistances dans un montage amplificateur-inverseur), l'amplitude de la tension de sortie n'augmentera pas. Si l'on cherche à obtenir une valeur d'amplification très supérieure à la valeur maximale, le signal de sortie subira une distorsion.

Imperfections de l'AO et limitations physiques

Tension de décalage d'entrée

Lorsque les entrées $+$ et $-$ sont connectées à la masse, on peut mesurer une tension de sortie différente de zéro (alors que v_d est nulle, et donc que v_s est théoriquement nulle). Tout se passe comme si une petite tension était appliquée en entrée.

Slew rate

Lorsque l'AO est utilisé en comparateur (voir plus bas) et que sa sortie passe de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$ ou l'inverse, ce passage est très rapide, mais il possède néanmoins une durée non négligeable. C'est le *slew rate*. Cette durée limite l'utilisation de l'AO en haute fréquence.

Approximations

L'impédance d'entrée de l'AO est supposée infiniment grande. L'impédance de sortie peut être considérée comme nulle dans un grand nombre d'applications. Les intensités des courants d'entrée peuvent être négligées devant les autres intensités du montage : $i^+ = i^- = 0$. La tension qui existe entre les deux bornes + et - peut être négligée devant les autres tensions du montage (figure 5).

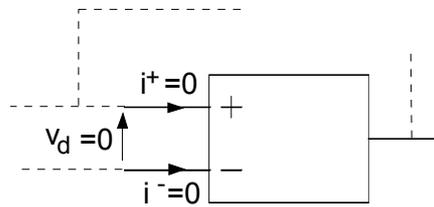


Figure 5. Les deux principales approximations pour l'étude de l'AO lorsqu'il est utilisé dans un circuit.

Modèle équivalent

Le modèle équivalent de l'AO est celui d'un quadripôle (fig. 6.a) : il comporte en entrée une résistance d'entrée, et en sortie un générateur de f.é.m. $A_d v_d$ (tension de sortie à vide de l'AO), et de résistance interne R_s (résistance de sortie de l'AO). Dans de nombreuses applications, la résistance d'entrée différentielle peut être considérée comme infinie, et la résistance de sortie nulle. Le modèle équivalent se réduit alors à celui de la figure 6.b.

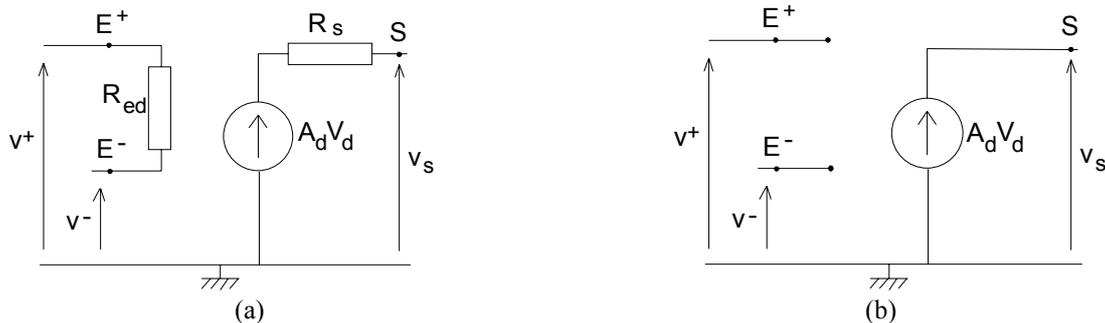


Figure 6. Modèle équivalent de l'AO. (a) AO réel ; (b) AO parfait.

Constitution interne

Un AO est constitué par la mise en cascade d'au moins trois étages : 1°) un étage d'entrée, amplificateur différentiel possédant une très grande impédance d'entrée ; 2°) un étage intermédiaire, amplificateur de tensions ; 3°) un étage de sortie, amplificateur de puissance possédant une faible impédance de sortie.

Il n'existe pas de capacités entre ces différents étages : l'intérêt est que l'AO peut amplifier des tensions continues.

Régime linéaire : amplification, filtres et opérations mathématiques

Amplificateur non-inverseur

L'amplification en tension du montage non-inverseur (figure 7) est $A_v = 1 + R_1/R_2$.

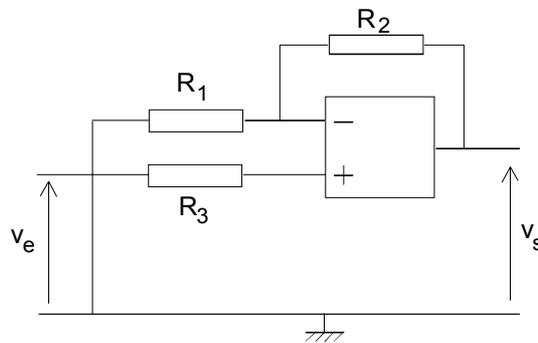


Figure 7. AO utilisé en amplificateur non-inverseur

Amplificateur inverseur

L'amplification en tension du montage inverseur (figure 8) est $A_v = -R_2/R_1$.

La caractéristique de transfert de l'amplificateur est inversée par rapport à celle du montage non-inverseur (symétrique à celle-ci par rapport à l'axe des ordonnées).

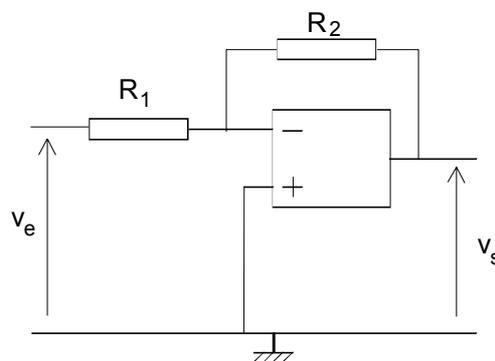


Figure 8. AO utilisé en amplificateur inverseur

Le taux d'amplification de ce montage est : $\frac{v_s}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1}$

Le choix de R_2 doit respecter un compromis :

- le courant maximal que peut débiter l'AO est d'environ 20mA, cela impose une valeur minimale pour R_2 : lorsque v_s est mesurée à vide (pas de charge en sortie), le courant passant dans R_2 provient uniquement de la sortie de l'AO. Connaissant la valeur maximale de v_s , et sachant que la différence de potentiel entre les entrées + et - de l'AO est nulle, on peut en déduire la valeur minimale de R_2 .
- à l'opposé, R_2 ne peut pas être trop grande car alors le courant serait faible et le bruit ne serait plus négligeable par rapport à lui.

Filtres actifs

Avec l'AO, il est également possible de réaliser des filtres actifs, de tous types (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande), du premier ordre ou d'ordres supérieurs, à l'aide de résistances R et condensateurs C . Un avantage des filtres à AO, par rapport aux filtres passifs à éléments RC, est qu'ils permettent d'avoir des montages à très grande impédance d'entrée et faible impédance de sortie.

Opérations mathématiques

Avec un AO, il est possible de réaliser des opérations mathématiques sur des tensions. Avec les quatre montages de la figure 9, il est facile, par application de la loi des mailles et de la loi des noeuds, de démontrer des relations entrées-sortie suivantes :

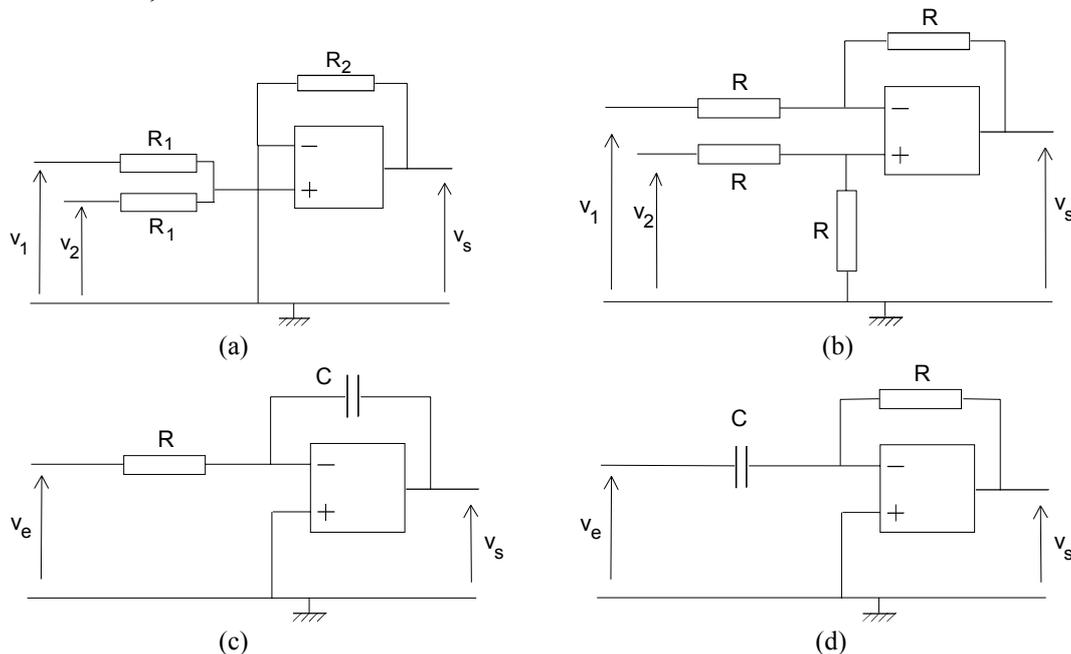


Figure 9. Opérations mathématiques réalisées par des montages à AO.
(a) Addition ; (b) Soustraction ; (c) Intégration ; (d) Dérivation.

sommateur (fig. 9.a) : $v_s = v_1 + v_2$

soustracteur (fig. 9.b) : $v_s = v_2 - v_1$

intégrateur (fig. 9.c) : $v_s = -\frac{1}{RC} \int v_e dt$

dérivateur (fig. 9.d) : $v_s = -RC \frac{dv_e}{dt}$

Régime non-linéaire : comparateurs

Un comparateur fonctionne en régime non-linéaire, alors que les montages réalisant des opérations mathématiques, une amplification ou un filtrage fonctionnent en régime linéaire.

- régime *linéaire* : bouclage de la sortie de l'AO sur son entrée –
→ montage **stable**
- régime *non-linéaire* : bouclage de la sortie sur l'entrée + ou pas de bouclage
→ montage **instable**

Comparateur à seuil unique

Un comparateur compare une tension d'entrée avec une tension-seuil. Il possède deux états de sortie, selon que la tension d'entrée est supérieure ou inférieure au seuil.

Puisque l'AO est un système instable en boucle ouverte, pour réaliser un comparateur à AO, il suffit d'appliquer sur l'une de ses entrées la tension à comparer, et sur l'autre la tension de seuil (fixe).

Selon les entrées de l'AO utilisées pour ces deux tensions, en cas de résultat positif de la comparaison la sortie sera soit $+V_{sat}$ soit $-V_{sat}$ (si $v^+ > v^-$, $v_s = +V_{sat}$, sinon $v_s = -V_{sat}$)

Comparateur à 2 seuils : Trigger de Schmitt (ou comparateur à hystérésis)

Un Trigger de Schmitt est un comparateur à hystérésis, c'est à dire possédant deux seuils de basculement, selon que la tension d'entrée augmente ou diminue. La figure 10 représente deux montages comparateurs à hystérésis. Le tension d'hystérésis v_h est définie par la différence entre les deux seuils de basculement du comparateur.

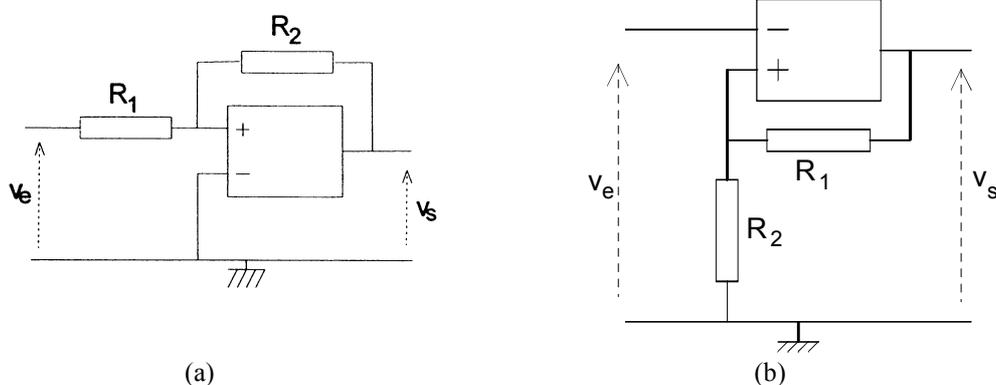


Figure 10.2 montages comparateurs à hystérésis

Le comparateur de la figure 10(a) fonctionne de la façon suivante :

1) exprimons la tension v^+ en fonction de v_e et v_s à l'aide du théorème de superposition :

$$v^+ = \frac{R_2 \cdot v_e + R_1 \cdot v_s}{R_1 + R_2}$$

et $v_d = v^+$

car $v^- = 0$;

or v_s ne peut avoir que 2 valeurs possibles : $v_s = \pm V_{sat}$, car le montage est instable (bouclage de la sortie sur l'entrée +).

2) le basculement d'une valeur de sortie à l'autre interviendra si $v^+ = v^-$, donc si $v^+ = 0$, soit si

$v_e = -\frac{R_1}{R_2} v_s$. Il y aura donc 2 seuils de basculement :

- si $v_s = +V_{sat}$:
$$v_e = -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

- si $v_s = -V_{sat}$:
$$v_e = \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

3) il reste à voir si le basculement intervient lorsque v_e augmente ou diminue pour chacun des 2 seuils. A une augmentation de v_d en fonction du temps correspond une augmentation de v_s ; v_s va donc passer de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$, quand v_e va passer le seuil $R_1 \cdot V_{sat} / R_2$. Le raisonnement est le même pour une diminution de v_e : v_s passera de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$ en franchissant le seuil $-R_1 \cdot V_{sat} / R_2$.

Pour résumer :

- Si v_e croît : lorsque v_e franchira le seuil $R_1 \cdot V_{sat} / R_2$, v_s passera de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$
- Si v_e décroît : lorsque v_e franchira le seuil $-R_1 \cdot V_{sat} / R_2$, v_s passera de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$

En comparaison, dans les montages en régime linéaire (bouclage sur l'entrée -), la variation de v_s est inversée par rapport à celle de v_d : par exemple, une augmentation de v_d provoque une diminution de v_s , qui est répercutée sur l'entrée - par le bouclage, et s'oppose à son augmentation initiale, rendant le système stable.



Janvier 2001

Projet d'électronique P1 n°1 : Générateur de signaux à Amplificateurs Opérationnels

2^e séance (/5)

Rattrapage de validation

Exceptionnellement, du fait du démarrage du projet, le travail prévu à la première séance mais non terminé pourra être terminé lors de la 2^e séance.

Il est rappelé que les projets comportent 1/4 de travail non-encadré. Il sera possible de compléter le travail prévu pour cette séance mais non terminé, avant la séance suivante. S'il s'agit d'un complément de compte-rendu, il doit être remis en tout début de la séance suivante. S'il s'agit d'un module électronique à faire valider, il pourra être validé en tout début de séance également.

Dans tous les cas, ces compléments de travail seront notés avec un coefficient inférieur à 1 :

- Travail complété avant la séance suivante : coefficient 3/4
- Travail complété durant la séance suivante : coefficient 1/2

Validations partielles

Cette séance donnera lieu à la validation des modules suivants :

- Oscillateur Commandé en Tension (4 points)
- Générateur de signal en dents de scie (3 points)

Questions pour le compte-rendu

Intérêt du montage suiveur

On souhaite appliquer ces signaux à un haut-parleur (HP). Pour éviter que la faible impédance de ce dernier (8Ω) ne vienne perturber le fonctionnement du montage, on utilise un montage suiveur à AO comme montage tampon. Si le son est trop fort, on pourra n'utiliser qu'une fraction de l'amplitude du signal au moyen d'un pont diviseur de tension à 2 résistances. On pourra également utiliser un casque, sachant que l'impédance de celui-ci est de 32Ω et sa puissance maximale admissible environ 100mW.

Q1(pratique). Connecter le HP directement en sortie des AO générateurs de signaux carré et triangle, puis par l'intermédiaire du montage suiveur. Décrire les différences observées à l'oscilloscope sur les signaux. Conclure sur l'intérêt du montage suiveur. (1 point)

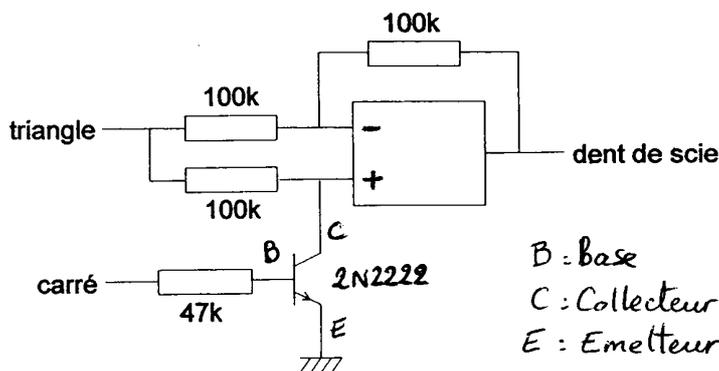
Génération d'un signal en dents de scie

Un signal en dents de scie peut être généré à partir du signal triangulaire : il suffit d'utiliser le signal triangulaire tel quel lors de sa montée, et de l'inverser lors de sa descente. Pour réaliser ceci, on utilise un AO fonctionnant successivement en inverseur et en suiveur.

L'entrée + de l'AO est reliée à un transistor fonctionnant en bloqué-saturé (voir schéma ci-dessous). Lorsque vous étudierez le transistor plus tard dans l'année, vous verrez qu'il y a 2 grand modes d'utilisation possibles :

- Fonctionnement *linéaire*, pour faire des amplificateurs réalisant la fonction $v_s = k.v_e$, avec $k > 1$ (comme l'amplificateur à AO déjà étudié).
 - Fonctionnement *non-linéaire*, ou *tout-ou-rien* : c'est ce fonctionnement qu'on utilise ici :
- quand $carré \gg 0$, on dit que le transistor est saturé, c'est à dire qu'entre son point C et son point E il se comporte comme un fil ;
 - quand $carré < 0$, le transistor est bloqué, c'est à dire que le courant ne passe plus entre les points C et E (ce qui équivaut à une déconnexion physique du transistor du montage).

Le transistor est commandé par le signal carré disponible à la sortie du comparateur à hystérésis.



Montage permettant de générer un signal en dent de scie à partir du générateur carré-triangle de la question précédente.

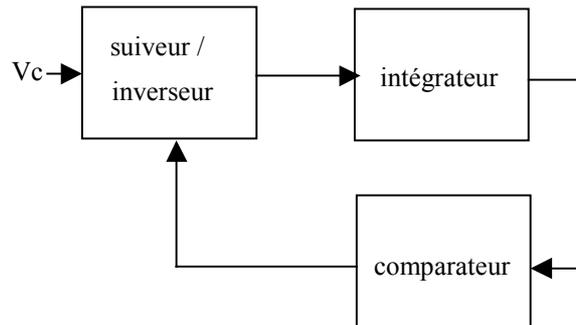
Q2(théorique). Décrire le fonctionnement de ce générateur de signal en dents de scie. (2 points)

Modification de l'oscillateur pour obtenir un oscillateur commandé en tension (OCT)

Un OCT (Oscillateur Commandé en Tension) est un oscillateur dont la fréquence de sortie est proportionnelle à une tension (continue) d'entrée.

En anglais, un OCT est appelé VCO, pour Voltage Controlled Oscillator.

En utilisant un deuxième exemplaire du montage suiveur-inverseur utilisé pour générer le signal en dents de scie, connecté entre la sortie du comparateur et l'entrée de l'intégrateur (voir schéma ci-dessous), il est possible de faire varier la fréquence de signal carré (et donc celle du signal triangulaire). Le schéma de l'oscillateur devient alors :



V_c est une tension de commande appliquée à la place de l'entrée triangle du premier exemplaire de ce module (générateur de dents de scie). La sortie du comparateur vient à la place de l'entrée carrée. Si l'on utilise un comparateur-inverseur (comme celui utilisé lors de la séance précédente), alors la tension de commande doit être négative. Pour qu'elle soit positive, il faudrait utiliser le comparateur non-inverseur (voir annexe du sujet de la 1^{ère} séance).

L'intérêt du module ajouté est que maintenant on peut faire varier la fréquence du signal généré par notre circuit, à partir d'une tension de commande.

Q3(th). En représentant le chronogramme des différents signaux, décrire le fonctionnement du montage. Montrer notamment que c'est bien un OCT, et qu'avec un comparateur non-inverseur la tension de commande pourrait être positive. (1,5 point)

Q4(p). Mesurer les valeurs extrémales de la fréquence des signaux (triangulaire et rectangulaire) quand on fait varier V_c . (Attention à ne pas dépasser $\pm V_{cc}$!) (1,5 point)

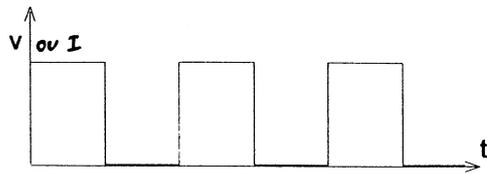
Q5(th). Représenter le schéma structurel de cet OCT (avec tous les composants). (2 points)

Q6(p). Représenter sous forme graphique la relation entre la tension de commande et la fréquence des signaux (prendre au moins 4 points de mesure, clairement indiqués). Conclure sur cette relation. (1,5 point)

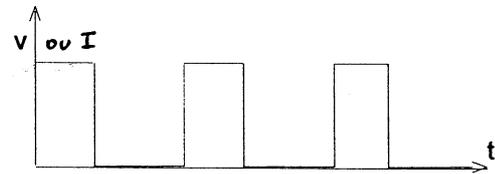
Q7(p). Appliquer une tension de commande sinusoïdale issue du générateur de fonctions, à basse fréquence (quelques Hertz), dont l'amplitude varie sur toute la plage d'entrée utile de V_c . Ecouter le son produit sur haut-parleur. Décrire le lien existant entre le son entendu et le signal observé à l'oscilloscope. (1,5 point)

Signal rectangulaire à rapport cyclique variable

On utilise souvent l'expression "signal carré" pour désigner un signal dont le rapport cyclique est 1/2, et "rectangulaire" dans les autres cas :



(a) Signal carré



(b) Signal rectangulaire

Un signal rectangulaire comporte beaucoup d'harmoniques, comme un signal carré, mais d'amplitudes très différentes. Quand on décompose un signal carré de rapport cyclique 1/2 en série de Fourier, on s'aperçoit qu'il est composé d'harmoniques dont les amplitudes décroissent en $1/n$, où n est le multiple de la fréquence du fondamental, alors que si le rapport cyclique est différent de 1/2, cette décroissance est pondérée par un cosinus. La sensation sonore est donc forcément différente en fonction du rapport cyclique.

Pour mettre en évidence cette différence, une solution consiste à faire varier ce rapport cyclique périodiquement, plus ou moins rapidement.

Le principe utilisé ici pour la génération d'un signal rectangulaire à rapport cyclique variable est la comparaison entre le signal en dents de scie généré par le système précédemment réalisé et un signal triangulaire à fréquence très basse ($<20\text{Hz}$). Un comparateur à seuil unique peut être utilisé pour cette fonction.

Q8(th). Donner le schéma d'un montage à AO permettant d'obtenir ce résultat, et expliquer son fonctionnement au moyen d'un chronogramme des signaux d'entrée et de sortie. (1 point)

Q9(p). Tester le montage en appliquant sur l'une des deux entrées le signal en dents de scie généré par le montage réalisé précédemment, et un signal triangulaire issu du générateur de fonctions réglé sur une fréquence très basse (quelques Hz). Décrire le son produit. (1 point)



Projet d'électronique P1 :
"Générateur de fonctions à amplificateurs opérationnels"
Programme de la 3^e séance (/3)

Programme

- Validation du montage complet, comprenant les modules suivants :
 - Oscillateur commandé en tension (OCT), délivrant un signal carré et un signal triangulaire
 - Générateur de signal en dents de scie
 - Générateur de signal rectangulaire à rapport cyclique variable
 - Filtre passe-bas du second ordre

- Compte-rendu avec réponses aux questions ci-dessous

Remarque

Rapport de projet (longueur indicative : 10 pages) à remettre en tout début de la séance suivante (voir informations utiles pour la rédaction du rapport en annexe du guide de TP). Ce rapport devra comporter notamment le schéma fonctionnel (schéma-blocs) et le schéma structurel (tous les composants) du montage complet (avec un commutateur permettant de sélectionner le signal appliqué en sortie).

Filtrage passe-bas des signaux

Dans les générateurs de fonctions, en général il n'existe pas de fonction de filtrage. A titre pédagogique, nous allons pour notre part étudier un module de filtrage passe-bas du 2nd ordre, du même type que celui étudié lors du TP sur Pspice.

Q1(pratique). Câbler le filtre passe-bas du 2^e ordre étudié lors de la séance sur Pspice. Utiliser une résistance variable de 120Ω pour R (voir le guide de TP pour son utilisation). Appliquer ce filtre au signal carré généré par le circuit, et relever sur papier le signal de sortie du filtre dans 2 cas : lorsque le phénomène de pseudo-oscillations se produit, et lorsqu'il ne se produit pas (on passe d'un cas à l'autre en faisant varier la résistance).

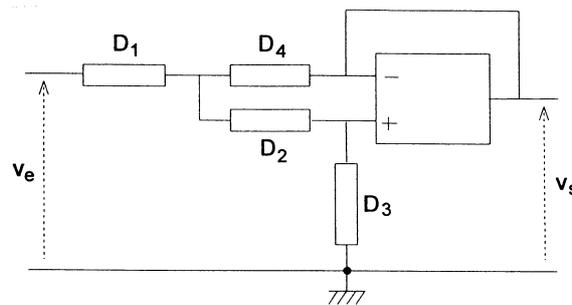
Q2(p). Le premier montage étudié est un filtre passif : le filtre passe-bas du 2^e ordre étudié lors de la séance précédente. Utiliser une résistance variable de 120Ω pour R (voir le guide de TP pour son utilisation). A l'aide d'un petit tournevis, faire varier cette résistance et expliquer l'effet produit sur le son (ne pas oublier le montage suiveur entre le filtre et le haut-parleur, pour ne pas que ce dernier perturbe le filtre).

Q3(théorique). Le deuxième montage étudié est un filtre actif. A l'aide de la loi d'ohm, la loi des mailles et la loi des nœuds, montrer que le montage de la figure ci-dessous, dans lequel D_1 et D_2 sont des résistances de mêmes valeurs R, D_3 et D_4 des condensateurs de mêmes

capacités C, est un filtre passe-bas du second ordre sans résonance. Pour ce faire on mettra sa fonction de transfert sous la forme :

$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{1}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Exprimer sa fréquence de coupure en fonction de R et de C. Indiquer un moyen de faire varier cette fréquence.



Q4(p). Câbler ce montage. Choisir R et C pour que la fréquence de coupure soit égale à 100Hz. Appliquer ce filtre aux différents signaux générés par le reste du montage (carré, triangulaire, dents de scie, rectangulaire), la fréquence de l'OCT étant réglée sur la fréquence de coupure du filtre. Décrire (en donnant une ébauche) la forme du signal observé en sortie de ce filtre pour chacun des signaux d'entrée. Expliquer ce résultat en raisonnant avec les séries de Fourier.

Q5(p). En mesurant le gain du montage (en dB) pour 2 valeurs de la fréquence judicieusement choisies, montrer que ce filtre est bien du 2^e ordre (détailler la mesure et les calculs associés).

Q6(th). Proposer un schéma de sommateur-mixeur à résistances fixes, résistances variables et AO, permettant de combiner plusieurs signaux générés entre eux (ne pas le réaliser).

Pour en savoir plus : autre application de ce type de montage

Si vous avez bien compris comment fonctionne ce générateur de fonctions, vous avez également compris comment fonctionne un **synthétiseur de musique électronique**. Ces synthétiseurs de musique sont en effet toujours basés sur les mêmes principes : des oscillateurs fournissent des signaux carré, en dents de scie ou triangulaire. La fréquence de ces oscillateurs est commandée par les touches d'un clavier. Les signaux passent ensuite dans des filtres, passe-bas, passe-haut ou passe-bande. Différents paramètres peuvent être modulés par d'autres signaux à basses fréquences : amplitude et fréquence des signaux sonores, fréquence de coupure et surtension des filtres, etc. Par combinaison d'un certain nombre d'oscillateurs, de filtres et de modulateurs, les sons générés peuvent avoir un contenu en harmoniques riche et variable dans le temps.

Un autre module indispensable, mais que l'on n'a pas étudié dans le cas du générateur de fonctions, est le générateur d'enveloppe : celui-ci permet de déclencher une note quand on appuie sur une touche du clavier, puis de faire décroître l'amplitude sonore de cette note plus ou moins rapidement dans le temps.



Janvier 2001

Projet d'électronique P1 n°1 : Générateur de signaux à Amplificateurs Opérationnels

3^e séance (/3)

Erratum

Sur le sujet de la séance précédente, il était indiqué "2^e séance /5". C'est une erreur bien sûr. Comme indiqué sur le sujet initial (1^{ère} séance), ce projet dure 3 séances.

Programme

- Validation du montage complet, comprenant les modules suivants (sur 10 points) :
 - Oscillateur commandé en tension (OCT), délivrant un signal carré et un signal triangulaire
 - Générateur de signal en dents de scie
 - Générateur de signal rectangulaire à rapport cyclique variable
 - Filtre passe-bas du second ordre
- Compte-rendu avec réponses aux questions ci-dessous (10 points)

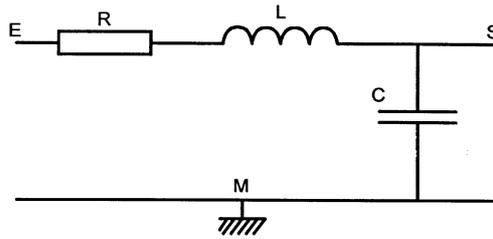
Rapport de projet

Un rapport de projet (longueur indicative : 10 pages) est à remettre en tout début de la séance suivante (voir informations utiles pour la rédaction du rapport en annexe du guide de TP). Ce rapport devra comporter notamment le schéma fonctionnel (schéma-blocs) et le schéma structurel (tous les composants) du montage complet. Dans ces schémas on représentera par un commutateur la possibilité de sélectionner le signal appliqué en sortie.

Questions pour le compte-rendu

Filtrage passe-bas des signaux

Dans les générateurs de fonctions, en général il n'existe pas de fonction de filtrage. A titre pédagogique, nous allons pour notre part étudier un module de filtrage passe-bas du 2nd ordre, du même type que celui étudié lors du TP sur Pspice :



avec $L=560\mu\text{H}$, $C=22\text{nF}$.

Fonction de transfert :

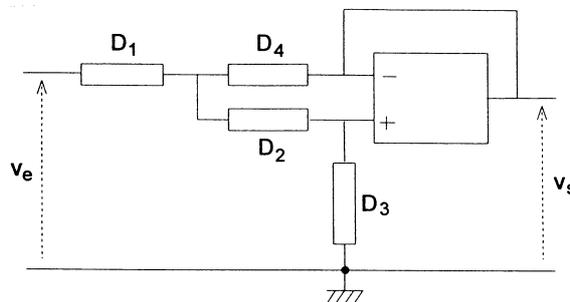
$$\frac{v_{SM}}{v_{EM}} = \frac{1}{1 + 2\xi j \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad \text{avec } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ et } \xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

ω_0 est appelée fréquence de coupure et ξ facteur d'amortissement.

Q1(théorique). Le schéma ci-dessus représente un filtre passe-bas du 2^e ordre déjà étudié lors de la séance sur Pspice. On souhaite faire varier l'importance du phénomène de dépassement de la tension de sortie de ce filtre par rapport à sa tension d'entrée (par l'intermédiaire du coefficient d'amortissement ξ). Montrer que le fait de faire varier R fait varier ξ et donc le dépassement. Montrer qu'en faisant varier R sur toute sa course, on peut passer d'un phénomène de dépassement nul à un dépassement tendant vers l'infini ($\Leftrightarrow \xi \rightarrow 0$). Justifier la réponse et préciser la valeur de ξ pour la valeur maximale de R. (1,5 point)

Q2 (pratique). Utiliser une résistance variable de 200Ω pour R (voir le guide de TP pour son utilisation). Appliquer le filtre au signal carré généré par le circuit, faire varier la résistance et relever sur papier le signal de sortie du filtre dans 2 cas : lorsque le phénomène de pseudo-oscillations se produit (on choisira une fréquence de l'OCT telle qu'elle permette de visualiser les pseudo-oscillations de manière optimale), et lorsqu'il ne se produit pas. Ecouter l'effet produit sur le son et l'expliquer (ne pas oublier le montage suiveur entre le filtre et le haut-parleur, pour que ce dernier ne perturbe pas le filtre). (3 points)

Le deuxième montage étudié est un filtre actif à AO :



Les D_i symbolisent des composants passifs R, L ou C. On peut montrer que la fonction de transfert de ce circuit peut se mettre sous la forme :

$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{Y_1 \cdot Y_2}{Y_1 \cdot Y_2 + Y_1 \cdot Y_3 + Y_2 \cdot Y_3 + Y_3 \cdot Y_4}$$

où les Y_i sont les admittances complexes des composants.

Q3(th). A l'aide de la loi d'ohm, la loi des mailles et la loi des nœuds, montrer que le montage de la figure ci-dessus, dans lequel D_1 et D_2 sont des résistances de mêmes valeurs R , D_3 et D_4 des condensateurs de mêmes capacités C , est un filtre passe-bas du second ordre sans résonance. Pour ce faire on mettra sa fonction de transfert sous la forme :

$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{1}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Exprimer sa fréquence de coupure en fonction de R et de C . (1,5 point)

Q4(p). Câbler ce montage. Choisir R et C pour que la fréquence de coupure soit égale à 100Hz. Appliquer ce filtre aux différents signaux générés par le reste du montage (carré, triangulaire, dents de scie, rectangulaire), la fréquence de l'OCT étant réglée sur la fréquence de coupure du filtre. Décrire (en donnant une ébauche) la forme du signal observé en sortie de ce filtre pour chacun des signaux d'entrée. Expliquer ce résultat en raisonnant avec les séries de Fourier. (2 points)

Q5(p). En mesurant le gain du montage (en dB) pour 2 valeurs de la fréquence judicieusement choisies (avec éventuellement un signal issu du générateur si la fréquence de l'OCT ne peut pas monter suffisamment haut), montrer que ce filtre est bien du 2^e ordre (détailler la mesure et les calculs associés). (1 point)

Q6(th). Proposer un schéma de sommateur-mixeur à résistances fixes, résistances variables et AO, permettant de combiner entre eux les différents signaux générés (ne pas le réaliser en pratique). (1 point)

Pour en savoir plus : autre application de ce type de montage

Si vous avez bien compris comment fonctionne ce générateur de fonctions, vous avez également compris comment fonctionne un **synthétiseur de musique électronique**. Ces synthétiseurs de musique sont en effet toujours basés sur les mêmes principes : des oscillateurs fournissent des signaux carré, en dents de scie ou triangulaire. La fréquence de ces oscillateurs est commandée par les touches d'un clavier. Les signaux passent ensuite dans des filtres, passe-bas, passe-haut ou passe-bande. Différents paramètres peuvent être modulés par d'autres signaux basses fréquences : amplitude et fréquence des signaux sonores, fréquence de coupure et dépassement des filtres, etc. Par combinaison d'un certain nombre d'oscillateurs, de filtres et de modulateurs, les sons générés peuvent avoir un contenu en harmoniques riche et variable dans le temps.

Un autre module indispensable, mais que l'on n'a pas étudié dans le cas du générateur de fonctions, est le générateur d'enveloppe : celui-ci permet de déclencher une note quand on appuie sur une touche du clavier, puis de faire décroître l'amplitude sonore de cette note plus ou moins rapidement dans le temps.



Projet d'électronique P1 :
"Générateur de fonctions à amplificateurs opérationnels"
Feuille de validation

Date :

Groupe (A, B, C, D, E ou F) :

Numéros plaquettes :

Noms élèves :

.....

Modules à valider

oui non

Oscillateur commandé en tension (OCT),
délivrant un signal carré et un signal triangulaire

Convertisseur triangle - dents de scie

Générateur de signal rectangulaire à
rapport cyclique variable

Filtre passe-bas du second ordre

Ecoute des différents signaux sur haut-parleur
(ce qui implique l'utilisation d'un montage
suiveur réalisant une isolation d'impédances)

Composants récupérés

Remarques



Projet d'électronique P1 :
"Générateur de fonctions à amplificateurs opérationnels"

- barème validation finale -

Modules à valider

Oscillateur commandé en tension (OCT), délivrant un signal carré et un signal triangulaire	4 points
Convertisseur triangle - dents de scie	2 points
Générateur de signal rectangulaire à rapport cyclique variable	1,5 point
Filtre passe-bas du second ordre	1,5 point
Ecoute des différents signaux sur haut-parleur (ce qui implique l'utilisation d'un montage suiveur réalisant une isolation d'impédances)	1 point