

TP « En autonomie » : ÉTUDE DU MULTIVIBRATEUR ASTABLE

Relire les compléments d'électronique

4. TP-Cours

Multivibrateur astable

Fonctionnement d'un amplificateur opérationnel en régime linéaire ou en régime saturé (en tension).

Comparateur à hystérésis, caractéristique de transfert, bistabilité.

Multivibrateur astable : génération de signaux triangulaires, de signaux carrés. Contrôle de la fréquence et du rapport cyclique.

Génération de signaux sinusoïdaux par filtrage.

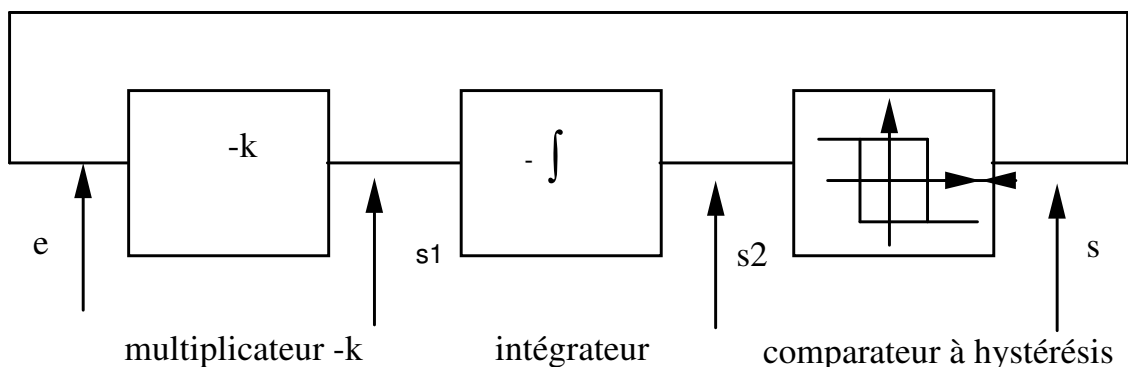
Ce TP-Cours est l'occasion de réviser le cours et les TP-Cours d'électronique de première année.

On signale la limitation en fréquence due à la "vitesse de balayage" de l'amplificateur opérationnel.

Ce TP est consacré à l'étude d'un oscillateur de relaxation ou multivibrateur instable.

1. PRINCIPE DU MONTAGE

Il correspond au schéma bloc suivant avec 3 blocs mis en **cascade bouclée** :



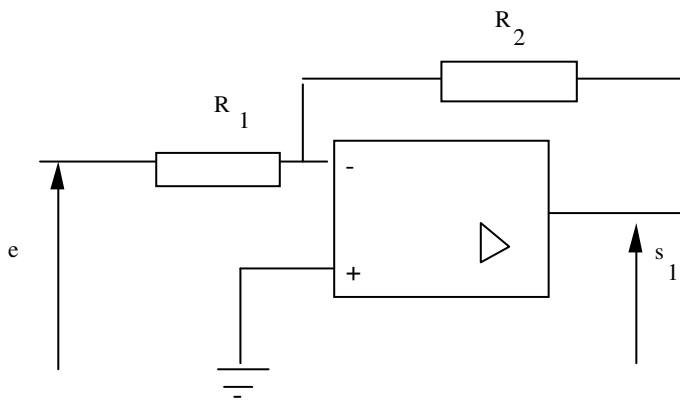
Comme la sortie d'un amplificateur opérationnel est un générateur de tension parfait, sa tension de sortie n'est pas sensible à ce qu'on dispose en aval. Cette remarque garantit que le fonctionnement de chacun des trois blocs n'est pas perturbé par leur couplage. Chacun d'eux pourra être étudié séparément. Les relations entre les différentes tensions sont :

$$s_1 = -k e \quad (\text{multiplication par une constante / amplificateur inverseur})$$

$$s_2 = \int_0^t s_1 dt \quad (\text{intégration + inversion})$$

$s = \pm V_{\text{sat}}$ (tension de saturation) selon l'état du comparateur à hystérésis, lui-même commandé par s_2 .

1) Etude du bloc (1) : multiplicateur-inverseur

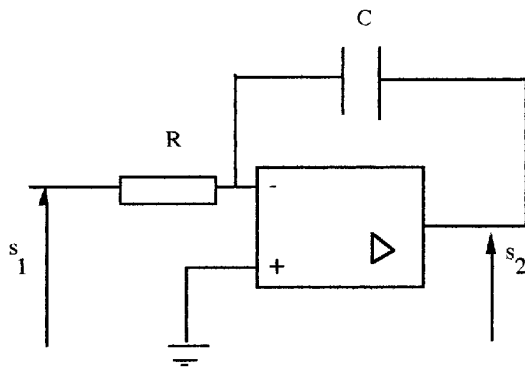


On établit par le théorème de Millman en E. :

$$\frac{e}{R_1} = -\frac{s_1}{R_2}$$

soit $k = \frac{R_2}{R_1}$

2) Etude du bloc (2) : intégrateur-inverseur



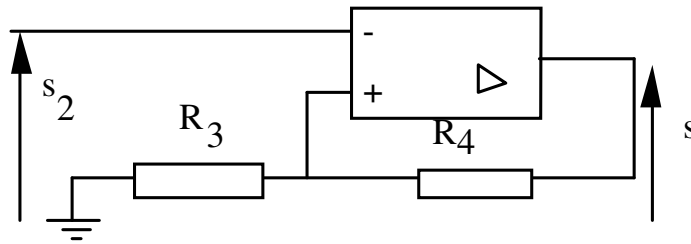
On a cette fois :

$$\frac{s_1}{R} = -C \frac{ds_2}{dt}$$

soit

$$s_2 = -\frac{1}{RC} \int_0^t s_1(t) dt + s_2(0)$$

3) Etude du bloc (3) : comparateur à hystérésis.

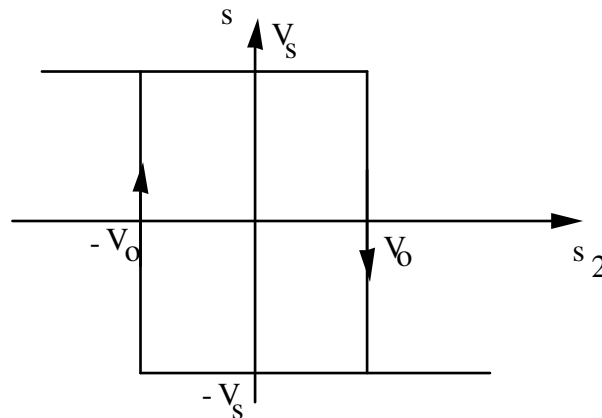


On peut montrer que ce système n'est pas stable et que s ne peut valoir que $\pm V_{\text{sat}}$. Analysons le fonctionnement: on part de $s_2 = 0$ et $s = +V_{\text{sat}}$ et on augmente s_2 .

Tant que $\varepsilon = V_+ - V_- > 0$, l'A.O. sera bloqué en régime positif, et ce jusqu'à ce que ε devienne < 0 , ce qui a lieu pour $s_2 = V_0$ en posant :

$$V_0 = V_{\text{sat}} \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \beta V_{\text{sat}}$$

Si s_2 dépasse V_0 , ε devient < 0 , et s prend brusquement la valeur $-V_{\text{sat}}$, valeur qu'il garde si on augmente s_2 . Si on diminue maintenant s_2 , il est facile de voir que s ne basculera à $+V_{\text{sat}}$ que si $\varepsilon > 0$, soit si $s_2 < -V_0$. L'augmentation de s_2 nous ramène au début, on voit donc que le point figuratif décrit un cycle d'hystérésis qui a l'allure suivante :



On peut maintenant faire l'analyse de fonctionnement du circuit complet en prenant des conditions initiales "bien choisies", ce qui ne modifie aucunement le résultat final.

4) Analyse du circuit complet.

Supposons qu'à $t = 0$ on ait $s_2 = V_0$ et $s = -V_{\text{sat}}$, alors $s_1 = k V_{\text{sat}}$. Pour $t > 0$ il viendra :

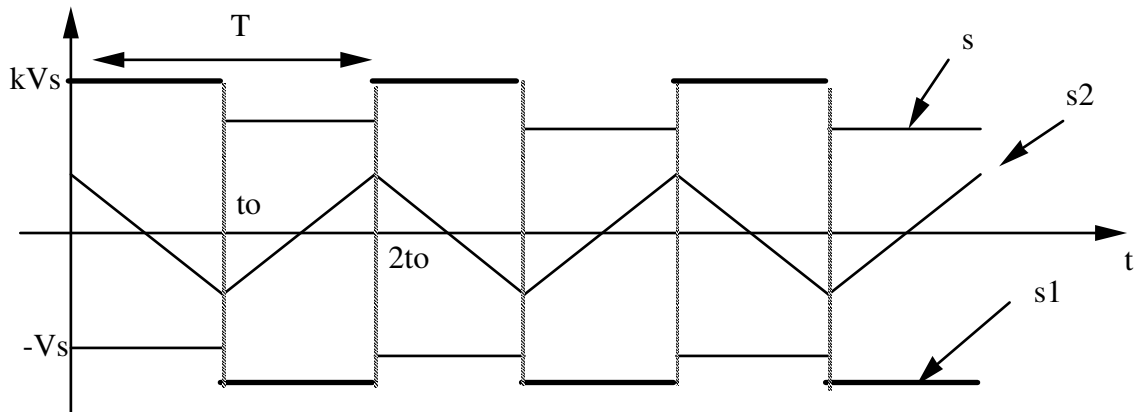
$$s_2 = -\frac{1}{RC} \int_0^t s_1 dt + V_0 = -\frac{kV_{\text{sat}}}{RC} t + V_0$$

Ceci durera tant que le comparateur ne bascule pas, c'est à dire tant que $s_2 > -V_0$. Le basculement s'effectuera à :

$$t = t_0 = \frac{2V_0 RC}{kV_{sat}}$$

Par la suite, pour $t > t_0$, on aura $s = V_{sat}$, $s_1 = -k V_{sat}$, et s_2 qui va croître de $-V_0$ à $+V_0$, ce jusqu'à $2t_0$, instant du nouveau basculement qui nous ramène aux conditions initiales de $t = 0$.

Les tensions s , s_1 et s_2 auront donc les allures suivantes :



On obtient soit des signaux triangulaires, soit des signaux crêteaux, la période T de ces oscillations valant $2t_0$ et dépend donc des valeurs des composants (R et C) :

$$T = \frac{4RCR_3}{(R_3 + R_4)}$$

Les signaux triangulaires s_2 oscillent entre $V_0 = \beta V_{sat}$ et $-V_0$ alors que les signaux crêteaux oscillent entre $\pm V_{sat}$ pour s (sortie du comparateur à hystérésis) et $\pm k V_{sat}$ pour s_1 .

On peut donc prévoir également une influence de R_3 et R_4 sur la période des signaux via les valeurs de $\pm V_0 = \pm \beta V_{sat}$ de la tension d'entrée qui font basculer le comparateur. On en déduit donc que l'on peut **contrôler la fréquence** via la valeur des composants.

5) Nom de multivibrateur astable.

Ce dispositif engendrant spontanément des signaux oscillants est qualifié de **vibrateur** et même de **multivibrateur** puisqu'il délivre à la fois des signaux crêteaux et triangulaires.

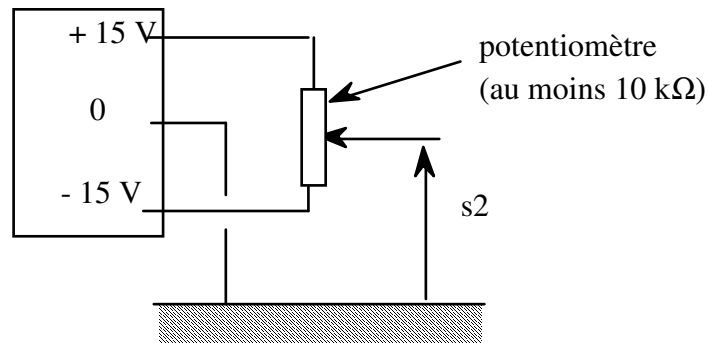
Dans l'adjectif **astable** qu'on accole au nom de ce dispositif le préfixe « a » vient du grec et signifie « privé de » : il fait donc référence au fait que ce système oscille car il ne possède pas d'état stationnaire stable.

En adoptant le point de vue de la sortie du comparateur à hystérésis, l'étude faite en cours a montré que tout état stationnaire correspondant à un **régime linéaire** est **instable**. Par ailleurs le bouclage de ce comparateur via les deux autres blocs a pour effet de rendre instable les deux états saturés, de telle sorte que finalement tous les états stationnaires sont instables : le système est bien **astable**.

2. MANIPULATION : MULTIVIBRATEUR ASTABLE

2.1. Etude du comparateur à hystérésis.

* *1^{ère} étude* : Réaliser le montage, R_3 et R_4 étant un potentiomètre de $10\text{ k}\Omega$. Sur l'entrée - de l'AO, envoyer une tension continue réglable réalisée comme ci-dessous à l'aide de l'alimentation $\pm 15\text{ V}$ des AO.



Partir de $s_2 = 0$, augmenter jusqu'à $s_2 = 10\text{ V}$, diminuer jusqu'à $s_2 = -10\text{ V}$, augmenter s_2 de nouveau jusqu'à $s_2 = 10\text{ V}$. On aura ainsi décrit un cycle complet. Mesurer la tension de sortie au voltmètre, tracer le cycle en réalisant un nombre suffisant de points de mesure.

* *2^{ème} étude* : Dans un second temps, on réalisera une visualisation du cycle à l'oscilloscope (on ne donne pas d'indication mais c'est facile !). On donnera dans le compte rendu le schéma du montage utilisé. Voit-on intervenir le phénomène de vitesse de balayage σ ?

ATTENTION: L'envoi sur une entrée + ou - d'un AO d'une tension supérieure à la tension d'alimentation (15 V en général) a de grandes chances de le détruire rapidement. On y fera donc attention. Ceci ne devrait pas arriver ici!

2.2. Etude du montage total

- Travail préparatoire : A faire avant de venir en TP.

Compléter l'étude théorique entre t_0 et $2t_0$ en s'inspirant de ce qui a été fait précédemment entre 0 et t_0 .

- Travail pratique : 1- Réaliser le montage complet en prenant comme valeurs $R = 4,7\text{ k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 1\text{ k}\Omega$, $C = 100\text{ nF}$. Mesurer la valeur de k , faire $V_0 \approx 2\text{ V}$ (à peu près). On pourra pour avoir plus de précision mesurer les valeurs exactes de toutes les résistances.

Mesurer les tensions de saturation haute et basse.

Relever l'allure des oscillogrammes des tensions s , s_1 , s_2 ; vérifier la concordance entre théorie et résultats expérimentaux pour la fréquence d'oscillation f et les amplitudes des diverses tensions. Ceci sera fait pour un couple donné de valeurs de R_3 et R_4 .

2- On fabrique un système ayant $f \approx 1 \text{ kHz}$. Qu'observe-t-on ? Voit-on intervenir le phénomène de vitesse de balayage ?

3- Déterminer un ensemble de valeurs à adopter de manière que, simultanément (d'après un problème Mines-Ponts):

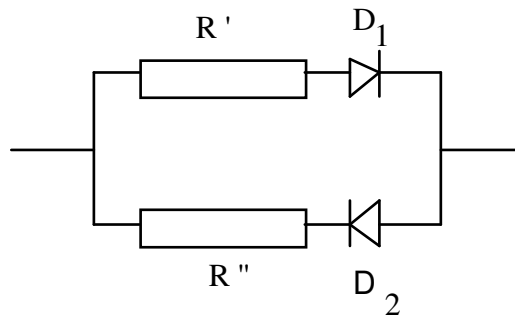
- (1) Le signal en S_2 ait une amplitude crête de 5V.
- (2) Le signal en S_1 ait une amplitude crête de 10V.
- (3) La fréquence des signaux soit voisine de 530 Hz.

* Les **calculs** donnant les différentes grandeurs seront faits **avant de venir en TP**.

* Réaliser le montage et faire constater que les conditions sont vérifiées.

2.3. Variation du rapport cyclique. Contrôle du rapport cyclique.

La tension triangulaire s_2 correspond à des charges et décharges successives de C à travers R, on peut modifier les constantes de temps de charge et de décharge, donc les pentes en s'arrangeant pour que la charge et la décharge se fassent à travers des résistances différentes. Le montage consiste à remplacer R par :



D_1 et D_2 sont deux diodes montées en sens inverse. On choisira R' , R'' et C de façon que le montage fournisse un signal en dents de scie, les durées de montée t_1 et de descente t_2 étant respectivement de 5,3 ms et de 530 μs environ.

Les **calculs** littéraux donnant les différentes grandeurs seront faits **avant de venir en TP**. On montrera que :

$$t_1 = \frac{2CR''R_3}{R_3 + R_4} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{2CR'R_3}{R_3 + R_4}$$

conduisant au **rapport cyclique** r, défini usuellement comme la fraction d'une période durant laquelle le signal $s(t)$ prend sa valeur maximale :

$$r = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{R''}{R' + R''}$$

formule montrant que le rapport cyclique peut être **commandé** via les valeurs de **R' et R''** .

On partira du dernier montage et on modifiera R' , R'' et C . Réaliser le montage et faire constater que les conditions demandées sont vérifiées.

Application : tension utilisée comme **base de temps sur un oscilloscope**

Dans ce cas, on dissymétrise au maximum les deux alternances car seule celle correspondant au déplacement du spot de la gauche vers la droite de l'écran est utile, le retour du spot de la droite vers la gauche de l'écran devant être en revanche le plus court possible.

3- GÉNÉRATION DE SIGNAUX SINUSOÏDAUX PAR FILTRAGE : FILTRAGE DES SIGNAUX CRÉNEAU OU TRIANGULAIRE

utilise les résultats du cours sur l'analyse de Fourier.

3.1- Application des séries de Fourier au multivibrateur astable

Il va s'agir d'obtenir des **signaux quasi-sinusoidaux** à partir des signaux créneaux ou triangulaires émis par le multivibrateur astable.

La démarche la plus naturelle va consister à traiter ces signaux à travers un **filtre passe-bande** de fréquence centrale f et de facteur de qualité $Q \gg 1$.

La valeur moyenne des signaux émis par le multivibrateur astable est nulle. Par ailleurs ces signaux sont invariants par translation d'une demi-période donc ne comportent que des harmoniques impaires (cf. cours analyse de Fourier). Le DSF du signal $v_e(t)$ à traiter s'écrit donc :

$$v_e(t) = \sum_{p=1}^{\infty} e_{2p+1} \cos(2\pi(2p+1)ft - \varphi_{2p+1})$$

La linéarité du filtre permet d'écrire le DSF du signal $v_s(t)$ récupéré à la sortie comme la somme des tensions de sortie associées aux composantes de Fourier de l'entrée, soit :

$$v_s(t) = \sum_{p=1}^{\infty} s_{2p+1} \cos(2\pi(2p+1)ft - \psi_{2p+1})$$

avec

$$\frac{s_{2p+1}}{e_{2p+1}} = |H(j(2p+1)\omega)| \quad \text{et} \quad \psi_{2p+1} - \varphi_{2p+1} = -\arg(H(j(2p+1)\omega))$$

Si le gain $|H(j\omega)|$ du filtre est très piqué au voisinage de la pulsation ω du fondamental, ce gain est négligeable pour les harmoniques (pulsations $3\omega, 5\omega \dots$) et on peut écrire avec une bonne approximation : $v_s(t) \approx s_1 \cos(2\pi ft - \Psi_1)$ de telle sorte qu'on a bien obtenu un générateur de signaux quasi-sinusoidaux. Notons que l'amplitude des harmoniques d'un signal triangulaire décroît en $1/n^2$ alors que celle d'un créneau décroît en $1/n$. Il **vaut** donc mieux **filtrer** la **tension triangulaire** fournie par le multivibrateur astable à la sortie de l'intégrateur que la tension créneau qu'il fournit à la sortie du comparateur à hystérésis.

Plus généralement nous retiendrons que :

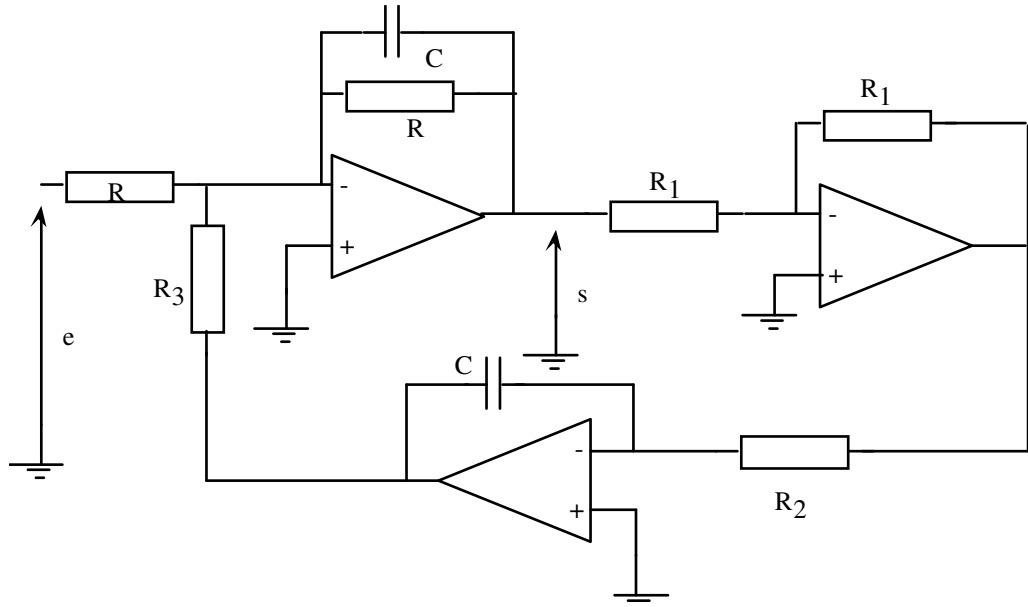
Un **filtre passe-bande** sélectif transforme un signal d'entrée périodique en un **signal de sortie quasi-sinusoidal** si la **fréquence** est égale à la **fréquence de résonance du filtre**.

3.2- Manipulation

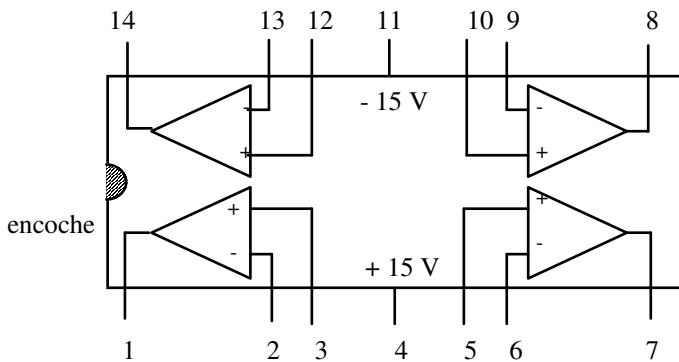
On part du montage de la fin de 4-3. Le but est de générer ici des signaux quasi-sinusoidaux à partir des signaux créneaux ou triangulaires émis par le multivibrateur astable. On pourra utiliser le **filtre passe-bande** du TP « analyse de Fourier » pour lequel :

$$\frac{s}{e} = \frac{-1}{1 + j \left(RC\omega - \frac{R}{R_2 R_3 C \omega} \right)} = \frac{-1}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

en posant : $Q = \frac{R}{\sqrt{R_2 R_3}}$ et $\omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_2 R_3}}$



1- On réalise le montage sur plaquette “Lab” en utilisant un quadruple ampli op TL084 regroupant dans un même boîtier les quatre éléments (trois seulement seront utilisés ici). Le brochage est le suivant :



AO vu de dessus

On adoptera les valeurs suivantes :

- $R = 4,7 \text{ k}\Omega$
- $R1 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R2 = R3$ à déterminer
- $C = 100 \text{ nF}$

2- Observer la courbe de réponse du filtre en utilisant la **fonction wobulation** du générateur B.F. (tension délivrée de fréquence variable). Dans ces conditions la fréquence délivrée f par le B.F. est de la forme :

$$f = f_1 + (f_2 - f_1)A(t) \text{ avec}$$

- $f_2 - f_1 =$ profondeur de modulation

• $A(t)$ est soit sinusoïdale, soit en “dent de scie”, c’est la tension de balayage qui peut être appliquée sur l’entrée “mod” du B.F., soit délivrée de façon interne ; la fréquence de $A(t)$ est réglable et la profondeur de modulation aussi. On peut récupérer la tension de balayage en sortie du B.F. On opérera en mode x-y, en envoyant sur x la tension de balayage interne du B.F. et en y la tension de sortie du filtre. Conclusion?

3- On branche les signaux issus de 4-3 sur le filtre. Que voit-on à la sortie dans le cas du triangle ? du créneau ?

Faire l’analyse de Fourier des signaux d’entrée. Commenter.

