L'amplificateur opérationnel et ses applications en réaction positive

1- Le comparateur simple

2- Le comparateur à seuils(la bascule de Schmitt, non inverseur et inverseur)

3- Générateur de signaux carrés (bascule astable)

4- Générateur de signaux carrés et triangulaires

1

Cette partie présente un nouveau concept (la réaction positive).

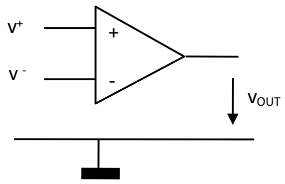
La justification de seuils dans la comparaison a déjà été introduite dans le premier cours sur les A.O. Pour rappel, ils permettent, entre autres, de détecter un signal lors de son passage par deux niveaux alternés. La séparation de ces niveaux évite de détecter du bruit.

D'autres applications spectaculaires exploitent la réaction positive, en particulier la génération de signaux carrés et triangulaires.

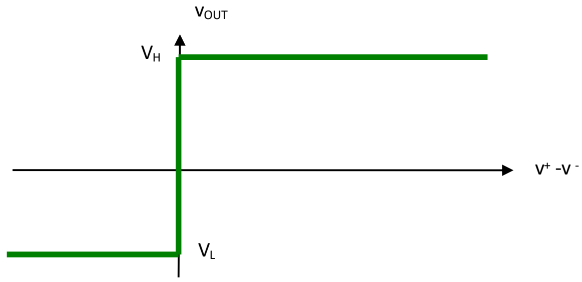
Le comparateur simple

- Très haut gain

- Extrêmement rapide



- Caractéristiques



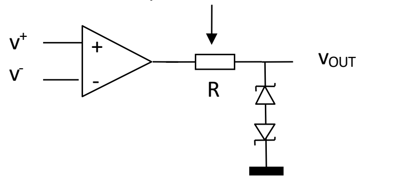
2

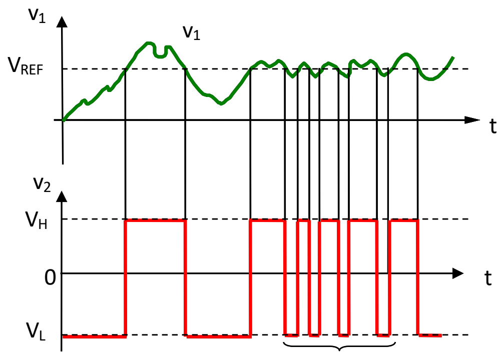
Si l'on considère l'A.O. parfait (en particulier si son gain est très élevé), le moindre écart entre v_+ et v_- fait saturer la sortie ($v_{OUT} = A(v_+ - v_-)$)

Seul "Hic", le passage de $+V_{SAT}$ à $-V_{SAT}$ (et réciproquement) est toujours centré autour de $v_+ - v_- = 0V$

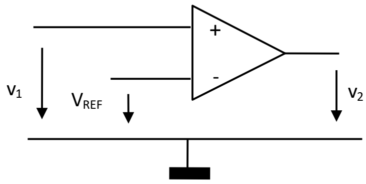
Le comparateur simple

V_H et V_L peuvent en particulier être choisis pour être compatibles avec l'entrée d'une famille de circuits logiques.





Application : détecteur de niveau



Inconvénient du simple comparateur en cas de signal instable (ou perturbé par du bruit) aux environs de V_{REF}.

3

Le principe peut être repris pour une adaptation aux circuits logiques.

Il suffit de placer des dispositifs qui ramènent les niveaux de tension à des niveaux compatibles avec ceux exigés par les familles logiques.

L'usage des zeners est parfaitement justifié, puisqu'il existe une gamme de zener couvrant les besoins.

Selon les zeners employées, les tensions de saturation seront ramenées à $Uj+V_Z$ ou $-Uj-V_Z$.

On remarque que ce "formatage" de la tension ne change rien au principal problème, qui reste le comportement du montage face au bruit.

Dans l'exemple proposé, les variations nombreuses impliquent une instabilité rendant inexploitable la sortie.

La réaction positive

Réaction positive:

Perdre les réflexes liés à la réaction négative

Le montage est instable:

Deux valeurs possibles + V_{SAT} et - V_{SAT}

v_+ différent de v_-

4

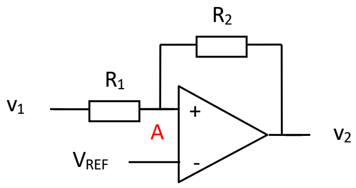
Contrairement à la réaction négative, le circuit n'est plus stable dans la version positive.

Les réflexes adoptés ne sont donc plus valables, en particulier la tension sur la borne "-" qui n'est plus égale à celle de la borne "+".

Par contre on exploitera toujours:

- les lois des courants
- i+ = i- = 0

Montage non-inverseur [1]



Tension au point A : $$v_A = v_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Faire une hypothèse: $v_2 = V_H$ ou $v_2 = V_L$

Supposons la sortie initialement au niveau haut: $v_2 = V_H$

Ceci implique que $v_+ > v_-$

5

$v_2 = A(v_+ - v_-)$ et V_A probablement différent de V_{REF}.

Si $V_A > V_{REF}$ alors

$v_+ > v_- \Rightarrow v_2 = +V_{SAT}$

sinon $v_2 = -V_{SAT}$

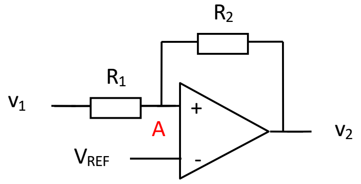
Le théorème de superposition est exploité pour calculer la tension V_A. On calcule respectivement la contribution de v_2 et de v_1.

On sait d'autre part que $v_2 = +V_{SAT}$ ou $v_2 = -V_{SAT}$

Analysons le cas où $v_2 = +V_{SAT}$ et déterminons pour quelle tension de v_1, la sortie pourra changer d'état (v_2 basculera de $+V_{SAT}$ à $-V_{SAT}$).

Montage non-inverseur [2]

Soit: $v_2 = V_H$ et $v_+ > v_-$

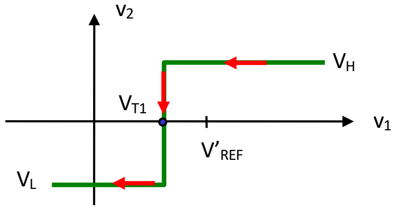


La limite de basculement aura lieu lorsque: $v_A = V_{REF} = V_{T1}\frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_H\frac{R_1}{R_1 + R_2}$

D 'où l'on tire

$$\underbrace{V_{T1} = V_{REF}\frac{R_1 + R_2}{R_2}}_{} - V_H\frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{T1} = V'_{REF} - V_H\frac{R_1}{R_2}$$



6

Nous partons donc de l'hypothèse que $v_2 = +V_{SAT}$

1) $v_2 = V_H$ (hypothèse)

2) Si v_1 diminue, V_A diminue aussi jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de V_{REF}.

3) Si v_1 diminue encore, V_A passerait sous V_{REF} et il y a donc basculement de la sortie (qui passe de $+V_{SAT}$ à $-V_{SAT}$).

4) La limite de basculement est donc obtenue lorsque $V_A = V_{REF}$.

Pour quelle tension v_1, V_A atteint-il V_{REF}, sachant que v_2 valait V_H.

Cette tension v_1 est aussi appelée seuil et nous la notons V_{T1}.

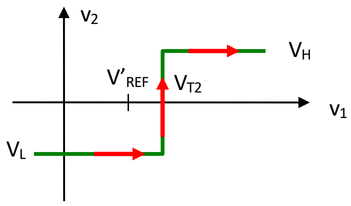
De l'expression générale, nous extrayons $V_{T1} = V_{REF}.(R_1+R_2)/R2_1 - V_H.R_1/R_2$

Montage non-inverseur [3]

La sortie est maintenant au niveau bas, V_L: Ceci implique que $v_- > v_+$

Si v_1 remonte, il y aura rebasculement de la sortie vers le haut lorsque v_1 passe par le seuil V_{T2}, tel que :

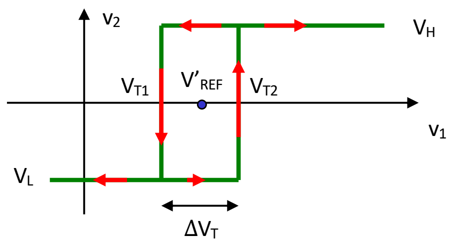
$$V_A = V_{REF} = V_{T2}\frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_L\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



D 'où l'on tire

$$V_{T2} = \underbrace{V_{REF}\frac{R_1 + R_2}{R_2}} - V_L\frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{T2} = {\color{red}V'_{REF}} - V_L\frac{R_1}{R_2}$$



En combinant les deux figures, on obtient :

$$\boxed{\Delta V_T = (V_H - V_L)\frac{R_1}{R_2}}$$

7

En changeant l'hypothèse (cette fois $v_2 = V_L = -V_{SAT}$), la démarche reste la même.

1) $v_2 = V_L$ (hypothèse)

2) Si v_1 monte, V_A monte aussi jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de V_{REF}.

3) Si v_1 monte encore, V_A dépasserait V_{REF} et il y a donc basculement de la sortie (qui passe de $-V_{SAT}$ à $+V_{SAT}$).

4) La limite de basculement est donc obtenue lorsque $V_A = V_{REF}$.

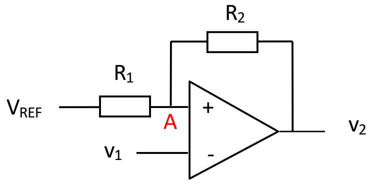
Pour quelle tension v_1, V_A atteint-il V_{REF}, sachant que v_2 valait V_L.

Cette tension v_1 est une autre tension de seuil et nous la notons V_{T2}.

De l'expression générale, nous extrayons $V_{T2} = V_{REF}.(R_1+R_2)/R2_1 - V_L.R_1/R_2$

Le chemin parcouru est différent du précédent. Le parcours complet s'appelle une hystérèse. Cette hystérèse symbolise un S propre au montage non inverseur.

Montage inverseur [1]



$$V_A = V_{REF}\frac{R_2}{R_1+R_2} + V_2\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

- Basculement vers le bas pour $v_1 = V_{T1}$, tel que:

$$V_{T1} = V_A = V_{REF}\frac{R_2}{R_1+R_2} + V_H\frac{R_1}{R_1+R_2} \qquad V_{T1} = V'_{REF} + V_H\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

- Basculement vers le haut pour $v_1 = V_{T2}$, tel que:

$$V_{T2} = V_A = V_{REF}\frac{R_2}{R_1+R_2} + V_L\frac{R_1}{R_1+R_2} \qquad V_{T2} = V'_{REF} + V_L\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

8

Le principe de l'analyse reste le même. On a permuté V_{REF} et v_1.

1) hypothèse: $v_2 = V_H$ ($v_A > v_1$)

2) Si v_1 croît et atteint V_A alors v_2 bascule à V_L.

On a directement la tension de seuil ($V_{T1} = V_A$) donnée par l'expression complète (dépend de V_H).

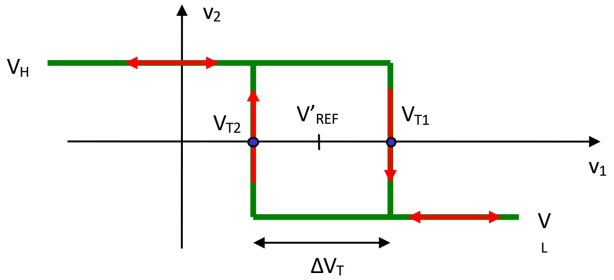
En sens inverse:

1) hypothèse: $v_2 = V_L$ ($v_A < v_1$)

2) Si v_1 décroît et atteint V_A alors v_2 bascule à V_H.

On a directement la tension de seuil ($V_{T2} = V_A$) donnée par l'expression complète (dépend de V_L).

Montage inverseur [2]



$$\boxed{\Delta V_T = (V_H - V_L)\frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

9

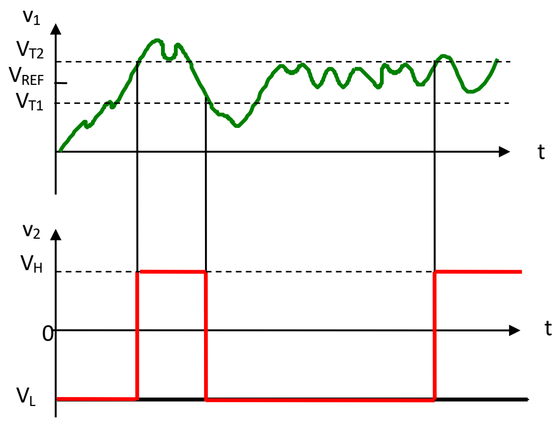
Le parcours complet emprunte deux chemins différents pour basculer de VL à VH et réciproquement.

Dans ce montage, l'allure de l'hystérèse ressemble à un Z propre au montage inverseur.

Usage de la bascule de Schmitt

Comparateur à seuil, insensible aux petites perturbations du signal.

Exemple d'utilisation d'un montage non-inverseur :

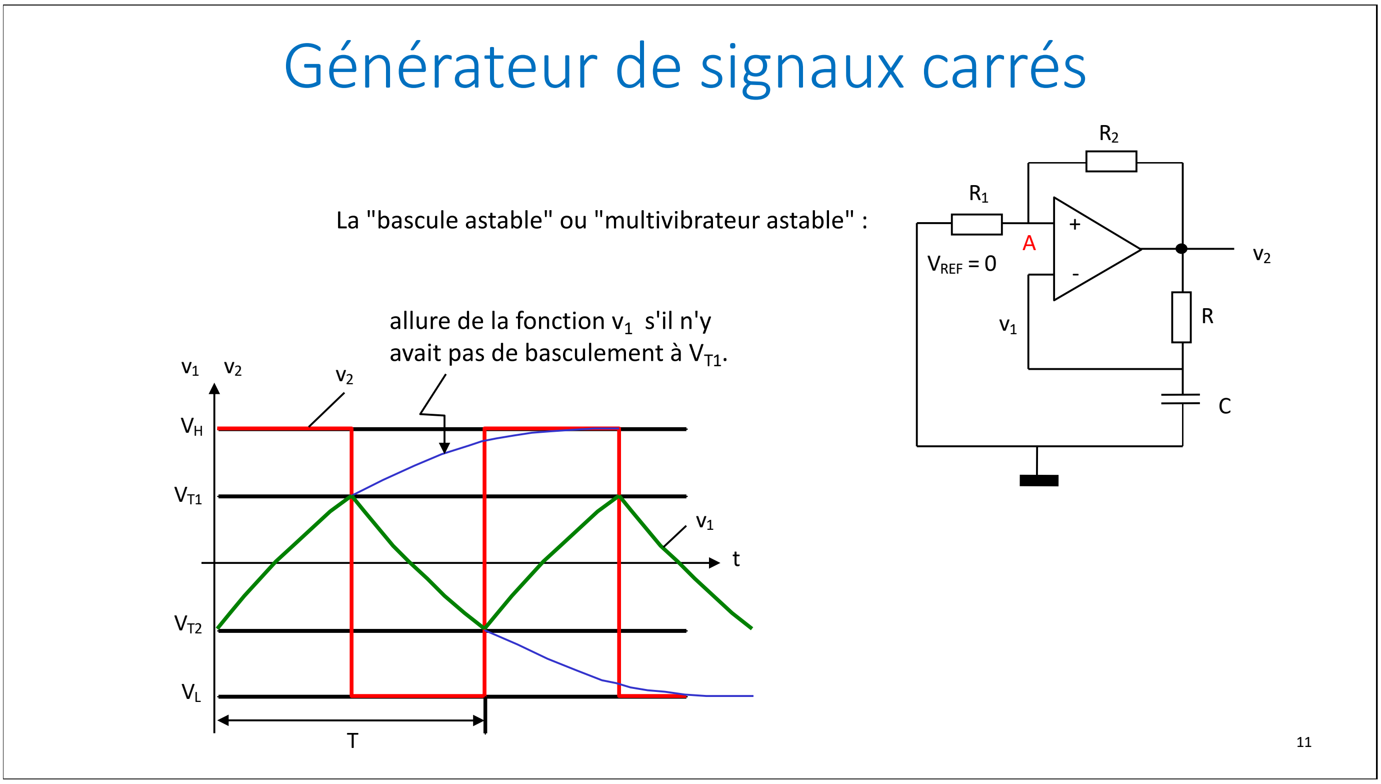


La bascule de Schmitt sera également très utilisée pour réaliser des générateurs de signaux

10

L'intérêt de la bascule de Schmitt est de montrer que celle-ci est transparente au bruit centré autour de la tension V_{REF}.

Il faudra simplement vérifier que l'amplitude du bruit est inférieure à l'écart entre les deux tensions de seuil.



Le montage proposé est de type inverseur.

La tension v_1 est forcément comprise entre $-V_{SAT}$ et $+V_{SAT}$.

Si $v_2 = +V_{SAT}$, alors v_1 augmente (charge capacitive) jusqu'à ce qu'elle atteigne $V_{T1} = V_{REF}.R_2/(R_1+R_2) + V_H.R_1/(R_1 + R_2)$.

Une fois cette valeur atteinte, v_2 bascule à $V_L = -V_{SAT}$.

Puisque $v_1 > -V_{SAT}$, la capacité va cette fois-ci se décharger. v_1 diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne V_{T2} et le cycle peut recommencer indéfiniment.

Nous avons réalisé un générateur de signaux carrés.

Générateur de signaux carrés [1]

Calcul de la période T -- > T = $t_1 + t_2 = 2\,t_1$

Soit $V_H = -V_L = +V_{SAT}$

- Type "inverseur"

- $V_{Réf} = 0$.

$$V_{T1} = V_H \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{SAT} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{T2} = V_L \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -V_{SAT} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

On veut calculer le temps nécessaire pour passer de V_{T1} à V_{T2}

Équation de la charge de la capacité: $$v_1 = v_1(0) + [v_1(\infty) - v_1(0)].\left[1 - e^{-t/RC}\right] \quad (1)$$

Avec $$v_1(0) = V_{T1} = V_{SAT} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad et \quad v_1(\infty) = V_L = -V_{SAT} \quad (2)$$

(1)+(2) => $$v_1 = V_{SAT} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \left[-V_{SAT} - V_{SAT} . \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right].\left[1 - e^{-t/RC}\right] = -V_{SAT}\left[1 - \frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2} . e^{-t/RC}\right] \quad (3)$$

Le seuil V_{T2} est atteint après un temps T/2, tel que : $$v_1(T/2) = V_{T2} = -V_{SAT} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

12

En partant de l'équation générale d'une sortie de circuit RC :
($V_{OUT}(t) = V_{OUT}(0) + [V_{OUT}(oo) - V_{OUT}(0)][1-\exp(-t/\tau)]$),
il est facile de calculer le temps nécessaire pour passer de V_{T1} à V_{T2} et réciproquement.

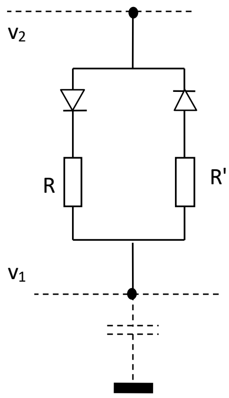
Générateur de signaux carrés [2]

(3)+(4) => $v_1(T/2) = V_{T2} = -V_{SAT}\dfrac{R_1}{R_1 + R_2} = -V_{SAT}\left[1 - \dfrac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}.e^{-t/RC}\right]$

La période T peut être extraite de cette relation

Période totale: T = 2T/2 --> $\boxed{T = 2RC.\mathrm{LN}\left(1 + \dfrac{2R_1}{R_2}\right)}$

Remarque: La sortie peut être rendue asymétrique en remplaçant la résistance R par l'ensemble suivant :



13

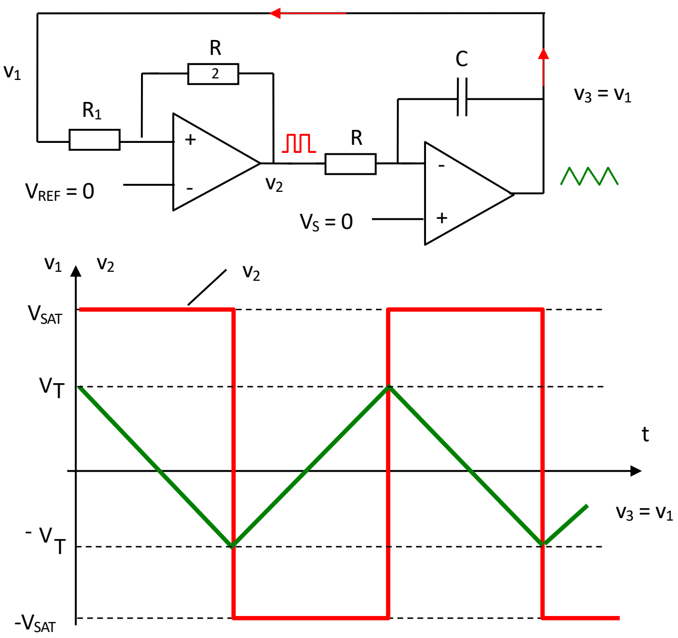
Le temps de basculement est symétrique car on charge et on décharge via les mêmes composants R et C.

Le temps dépend aussi de R1 et R2 qui influencent l'écartement de l'hystérèse. ($|V_{T2}-V_{T1}|$)

Pour obtenir une asymétrie du signal, il faudrait charger et décharger via des résistances différentes et obtenir des constantes de temps RC et R'C différentes.

Le montage à diodes permet de séparer deux chemins différents pour la charge et la décharge.

Générateur de signaux carrés et triangulaires



14

Le montage exploite deux circuits qui ont déjà été analysés.

1) Une bascule non inverseur

2) Un intégrateur. La sortie de la bascule (v_2) étant constante (V_H ou V_L), l'intégrateur transforme la constante en une pente v_3.

Lorsque v_3 monte et atteint V_{T1}, alors il y a basculement. V_H passe à V_L et l'intégration reprend mais selon une pente inverse, et ainsi de suite.

Générateur de signaux carrés et triangulaires

Calcul de la période : $T = 2\ t_1$

l'intégrateur donne: $v_1 = \pm V_{SAT} \cdot \frac{t}{RC}$

L'hystérèse du Trigger donne: $\Delta V_T = (V_H - V_L)\frac{R_1}{R_2} = 2.V_{SAT}\frac{R_1}{R_2}$

Cette largeur d'hystérèse correspond à l'excursion de tension de l'intégrateur (même chemin aller et retour)

Cette excursion de tension correspond au temps t d'une demi-période :

$$2.V_{SAT}\frac{R_1}{R_2} = V_{SAT} \cdot \frac{t}{RC} \qquad t = 2RC.\frac{R_1}{R_2}$$

et la période complète : $\boxed{T = 4RC.\frac{R_1}{R_2}}$

15

La période du signal triangulaire (ou carré) correspond au temps nécessaire pour passer de $+V_T$ à $-V_T$ et réciproquement.

Si le constantes sont identiques en valeur absolue, $+V_{SAT} = |-V_{SAT}|$ alors l'intégration étant exécutée avec le même graphe (RC) et centrée autour de 0V ($V_S = 0V$). La période correspond à 2 fois la demi période permettant à v_1 de passer de V_T à $-V_T$

L'intégration d'une constante étant une pente, il est normal de trouver une équation linéaire du temps T.

Exercices

Exercice 1 :

Calculer et dessiner les formes d'onde obtenues pour une tension $V_{REF} = 0$ à l'entrée de la bascule de Schmitt.

Exercice 2 :

Calculer et dessiner les formes d'onde obtenues pour:

$V_S = 0$ à l'entrée de l'intégrateur.

Remarque :

Un signal triangulaire peut aisément être transformé en signal sinusoïdal à l'aide d'un conformateur.

16

Dans les deux exercices qui sont proposés, on modifie V_{REF} et V_S.

L'effet du premier signifie que $V_{T1} = V_{T2}$ ne seront plus centrés autour de 0V. Ceci implique que le triangle sera décalé en hauteur.

Le second exercice a pour effet de charger et de décharger via des courants différents:

courant de charge $I_C = (V_H - V_S)/R$

courant de décharge $I_D = (V_L - V_S)/R$

Charge et décharge n'auront pas la même vitesse et on obtiendra un triangle avec des pentes différentes.