

3. Les oscillateurs

3.1 Introduction

La plupart des appareils électroniques contiennent un oscillateur capable de créer une référence de temps, des états périodiques ou répétitifs (soit des signaux de forme sinusoïdale (générateur de signaux pour tests, récepteurs ou émetteurs radio, ...), soit des signaux de forme rectangulaire (horloge d'un circuit numérique : multimètres, ordinateurs et leurs périphériques, de manière générale tout appareil comportant des circuits numériques, ...), des signaux de forme triangulaire (balayage horizontal d'un oscilloscope (base de temps) (signal en dents de scie), ...).

Tous les oscillateurs sont des systèmes bouclés en réaction positive, dont le signal d'entrée provient de la sortie du montage lui-même, via la boucle de réaction. L'oscillation est rendue possible par l'existence d'un retard dans la boucle du système ^[1].

3.2 Oscillateur pour signaux rectangulaires (oscillateur à relaxation)

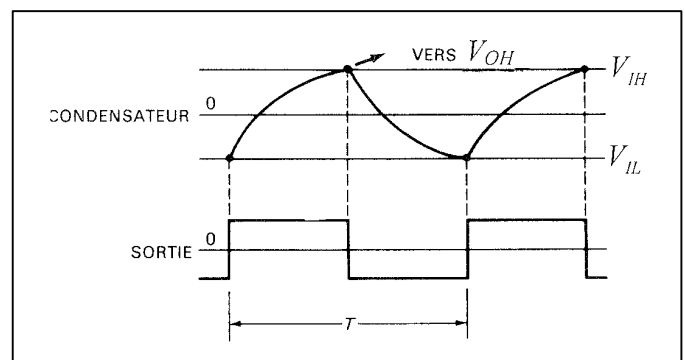
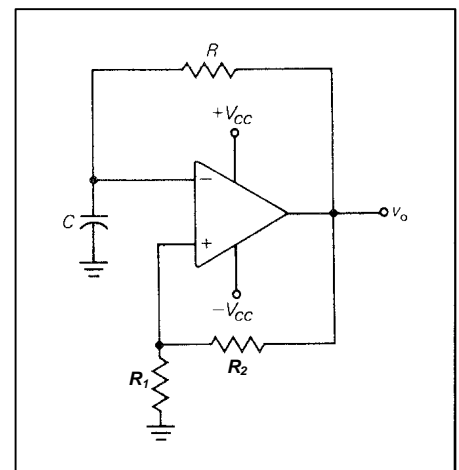
3.2.1 Principe de fonctionnement

Un oscillateur à relaxation comporte un élément **comparateur** et une **cellule de retard** (RC).

Le comparateur garantit un signal de sortie de type binaire ^[2] et, étant de type « à hystérésis » (réaction positive), il permet de définir 2 seuils de basculement. ^[3]

La commutation de v_o a lieu lorsque le signal d'entrée de l'élément comparateur atteint le seuil de basculement « actif », lequel est alors modifié par le nouvel état de sortie, ce qui entretient l'oscillation.

Les seuils de basculement sont atteints avec un certain retard, après le dernier basculement, défini par les caractéristiques de charge et décharge d'une cellule RC (cellule de retard) alimentée par la tension « rectangulaire » de sortie.



¹ Dû aux cellules RC présentes aussi bien dans la boucle de réaction que dans l'amplificateur.

² Un comparateur n'a que 2 états possibles en sortie : la saturation haute (V_{OH}) ou basse (V_{OL})

³ C'est donc le comparateur qui assure la présence de la réaction positive indispensable à tout oscillateur.

Lors de la mise sous tension, l'absence de signal devrait empêcher toute entrée en oscillation. Cependant, l'auto-amorçage de l'oscillateur est garanti par l'existence de l'offset du composant comparateur^[4], qui force sa sortie en saturation haute (V_{OH}) ou basse (V_{OL})^[5], dès la mise sous tension.

Quelle que soit la valeur prise au départ, le système oscillera, puisque c'est la tension de sortie qui à la fois alimente la cellule de retard et définit le seuil de basculement actif du comparateur.

3.2.2 Relations du montage

Pour le « comparateur inverseur à hystérésis », on a : $\left\{ \begin{matrix} V_{IH} = B \cdot V_{OH} \\ V_{IL} = B \cdot V_{OL} \end{matrix} \right\}$ avec: $B = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Pour la « cellule de retard » de type RC, alimentée en continu par $E = V_{OL}$ ou V_{OH} , on a :

$$v_i = v_C = E - (E - V_{C(initial)}) \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{avec } \tau = R \cdot C$$

Ainsi, on peut écrire (en régime établi) :

- $t \in [t_H]$ $\Rightarrow v_o = V_{OH} \Rightarrow V_I = V_{IH}$

$$V_{C(initial)} = V_{i(t)} \Rightarrow v_i = v_C = V_{OH} - (V_{OH} - V_{IL}) \cdot e^{-t/\tau} \quad \checkmark \text{ exponentiellement}$$

$$\text{En } t = t_H : v_{i(cmp)} = V_{i(t)} \Rightarrow t_H = \tau \cdot \ln \left(\frac{V_{OH} - V_{IL}}{V_{OH} - V_{IH}} \right) \quad \text{A ce moment : } v_o \rightarrow V_{OL}$$

- $t \in [t_L]$ $\Rightarrow v_o = V_{OL} \Rightarrow V_I = V_{IH}$

$$V_{C(initial)} = V_{i(t)} \Rightarrow v_i = v_C = V_{OL} - (V_{OL} - V_{IH}) \cdot e^{-t/\tau} \quad \checkmark \text{ exponentiellement}$$

$$\text{En } t = t_L : v_{i(cmp)} = V_{i(t)} \Rightarrow t_L = \tau \cdot \ln \left(\frac{V_{OL} - V_{IH}}{V_{OL} - V_{IL}} \right) \quad \text{A ce moment : } v_o \rightarrow V_{OH}$$

On obtient ainsi :

Fréquence de l'oscillateur : $f = \frac{1}{R \cdot C \cdot \left[\ln \left(\frac{V_{OH} - V_{IL}}{V_{OH} - V_{IH}} \right) + \ln \left(\frac{V_{OL} - V_{IH}}{V_{OL} - V_{IL}} \right) \right]}$ avec $\begin{cases} V_{IH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{OH} \\ V_{IL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{OL} \end{cases}$

$$\text{Si } V_{OL} = -V_{OH}, \text{ on a : } V_{IL} = -V_{IH} \Rightarrow \frac{V_{OH} - V_{IL}}{V_{OH} - V_{IH}} = \frac{V_{OL} - V_{IH}}{V_{OL} - V_{IL}} \Rightarrow t_L = t_H$$

⁴ Etant donné la présence de réaction positive, la tension d'offset nécessaire pour provoquer le basculement est réduite à une simple « tendance », ce qui assure l'auto-amorçage quelle que soit la valeur de cette tension d'offset.

⁵ Selon le signe de l'Offset.

$$\text{et : } \frac{V_{OH} - V_{IL}}{V_{OH} - V_{IH}} = \frac{1+B}{1-B} = \frac{2 \cdot R_1 + R_2}{R_2} \Rightarrow f = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot R_1 + R_2}{R_2}\right)}$$

La fréquence de l'oscillateur ne dépend donc plus des tensions d'alimentation, mais l'inconvénient est que le montage nécessite une tension d'alimentation de type symétrique.

| **Rapport cyclique** : $\delta = \frac{t_H}{T} = \frac{\ln\left(\frac{V_{OH} - V_{IL}}{V_{OH} - V_{IH}}\right)}{\left[\ln\left(\frac{V_{OH} - V_{IL}}{V_{OH} - V_{IH}}\right) + \ln\left(\frac{V_{OL} - V_{IH}}{V_{OL} - V_{IL}}\right)\right]}$ Si $V_{OL} = -V_{OH}$, on a : $\delta = 50\%$

3.3 Oscillateurs pour signaux triangulaires

3.3.1 Principe de fonctionnement

Du point de vue pratique, l'unique moyen analogique utilisé pour produire une évolution linéaire de tension est de prélever la tension aux bornes d'un condensateur dont les charges et décharges

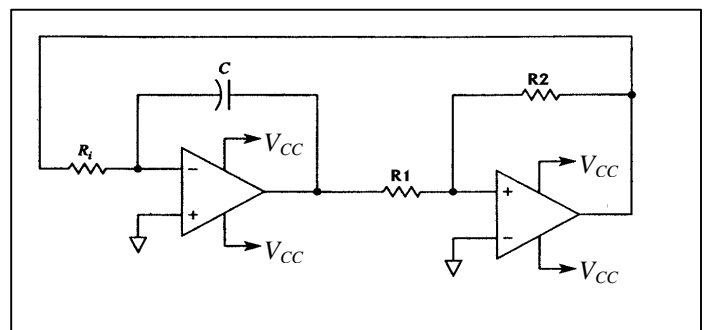
$$\text{sont effectuées à courant constant : } u_{c(t)} = U_{c(0)} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_c \cdot dt = U_{c(0)} + \frac{1}{C} \cdot I_c \cdot \int_0^t dt = U_{c(0)} + \frac{I_c}{C} \cdot t$$

En conséquence, les générateurs de signaux « triangulaires » sont en réalité des générateurs de signaux « rectangulaires » particuliers, dans lesquels on prélève la tension de sortie aux bornes du condensateur participant à la cellule de retard, dont les charges et décharges sont effectuées à courant constant.

Du point de vue pratique, on utilise un montage « intégrateur » pour réaliser l'injecteur de courant constant.

En outre, ce montage « intégrateur » permet de récolter, en sa sortie, la tension existant aux bornes du condensateur et ce, sous très faible impédance de sortie.

Le fonctionnement du montage ci-contre est le suivant.



Supposons que la tension de sortie du comparateur à « hystérésis » soit V_{OH} . Etant de type « non inverseur », son seuil de commutation est alors V_{IL} . En outre, sa tension de sortie étant celle d'entrée du montage « intégrateur », la tension de sortie de celui-ci évolue linéairement avec une

$$\text{pente négative : } v_{o_i} = v_{o_0} - \frac{1}{R_i \cdot C} \cdot \int_{t_0}^t v_i \cdot dt = v_{o_0} - \frac{V_{OH}}{R_i \cdot C} \cdot t \quad \left(i_c = \frac{V_{OH}}{R_i} = C^{ste} \right)$$

Cette tension étant elle-même celle d'entrée du montage « comparateur », lorsque elle atteint le seuil de commutation V_{IL} , la tension de sortie du « comparateur » bascule à V_{OL} . Le seuil de commutation devient alors V_{IH} et la tension de sortie du montage « intégrateur » évolue linéairement avec une pente positive, jusqu'à atteindre ce nouveau seuil de commutation V_{IH} í

Lors de la mise sous tension, l'absence de signal devrait empêcher toute entrée en oscillation. Cependant, l'auto-amorçage de l'oscillateur est encore ici garanti par l'existence de l'offset du composant comparateur, qui force sa sortie en saturation haute (V_{OH}) ou basse (V_{OL}), dès la mise sous tension.

Quelle que soit la valeur prise au départ, le système oscillera, puisque c'est la tension de sortie du montage « comparateur » qui à la fois définit le seuil de basculement actif et « pilote » la tension de sortie de l'intégrateur, c.à.d. son propre signal d'entrée.

3.3.2 Relations du montage

Pour le « comparateur non-inverseur à hystérésis », pour lequel $V_{réf} = 0$, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{IH} = -V_{OL} \cdot \frac{R_1}{R_2} \\ V_{IL} = -V_{OH} \cdot \frac{R_1}{R_2} \end{array} \right.$$

Pour l'intégrateur, attaqué par un signal continu, on a : $v_T = V_{T(initial)} - \frac{V_i}{R \cdot C} \cdot t$

Ainsi, on peut écrire (en régime établi) :

- $t \in [t_H]$ $\Rightarrow V_R = V_{OH} \Rightarrow V_{i_{intég}} = V_{OH}$ et $V_{I_{cmp}} = V_{IL}$

$$V_{T_{initial}} = V_{IH} \Rightarrow v_T = V_{IH} - \frac{V_{OH}}{R \cdot C} \cdot t \quad \neg \text{ linéairement}$$

$$\text{En } t = t_H : v_T = V_{IL} \Rightarrow t_H = \frac{H \cdot C}{V_{OH}} \cdot R \quad \text{í} \quad \text{à ce moment : } v_R \rightarrow V_{OL}$$

- $t \in [t_L]$ $\Rightarrow V_R = V_{OL} \Rightarrow V_{i_{intég}} = V_{OL}$ et $V_{I_{cmp}} = V_{IH}$

$$V_{T_{initial}} = V_{IL} \Rightarrow v_T = V_{IL} - \frac{V_{OL}}{R \cdot C} \cdot t \quad \vee \text{ linéairement}$$

$$\text{En } t = t_L : v_T = V_{IH} \Rightarrow t_L = \frac{H \cdot C}{|V_{OL}|} \cdot R \quad \text{í} \quad \text{à ce moment : } v_R \rightarrow V_{OH}$$

On obtient ainsi :

| **Fréquence de l'oscillateur** :
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_L + t_H} = \frac{1}{H \cdot C \cdot R \cdot \left[\frac{1}{V_{OH}} + \frac{1}{|V_{OL}|} \right]}$$
 avec
$$\begin{cases} H = V_{IH} - V_{IL} \\ V_{IH} = -V_{OL} \cdot \frac{R_1}{R_2} \\ V_{IL} = -V_{OH} \cdot \frac{R_1}{R_2} \end{cases}$$

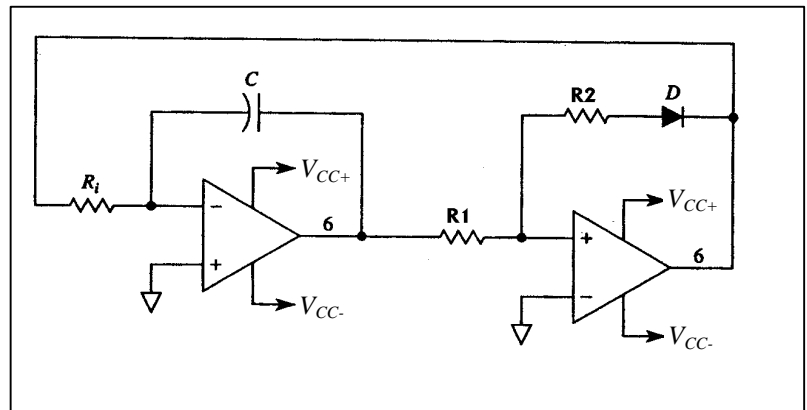
Si $V_{OL} = -V_{OH}$, la relation devient
$$f = \frac{V_{OH}}{2 \cdot R \cdot C \cdot H}$$

| **Rapport cyclique** (relatif au signal rectangulaire) :
$$\delta = \frac{t_H}{T} = \frac{\left[\frac{1}{V_{OH}} \right]}{\left[\frac{1}{V_{OH}} + \frac{1}{|V_{OL}|} \right]}$$

Si $V_{OL} = -V_{OH}$, on a : $\delta = 50\%$

3.3.3 Variante

Remarquons qu'une simple diode, placée comme le montre la figure ci-contre, permet de fixer : $V_{IL} = 0$, et ainsi forcer le montage à fournir un signal de sortie évoluant entre 0 et V_{IH} .



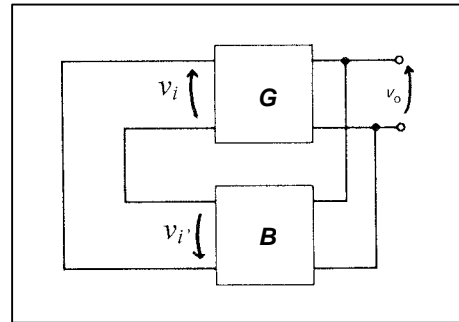
3.4 Oscillateur pour signaux sinusoïdaux ^[6]

3.4.1 Principe de fonctionnement

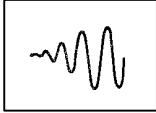
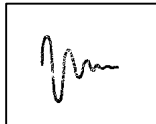
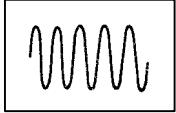
Un oscillateur sinusoïdal comporte un **amplificateur** de gain G et une **réaction positive** de taux de réaction B , formant un système bouclé privilégiant l'oscillation à une fréquence particulière.

La figure ci-contre illustre le principe de fonctionnement:

Dans ce système bouclé, on peut écrire que si une tension v_i existe à l'entrée de l'amplificateur, on récolte une tension $v_o = G \cdot v_i$ en sortie de celui-ci, laquelle est alors réinjectée à l'entrée de l'amplificateur (signal v_{i0}) via la boucle de réaction : $v_{i'} = B \cdot v_o = \underbrace{G \cdot B}_{A_L} \cdot v_i$ et $v_{o'} = G \cdot v_{i'} = \underbrace{G \cdot B}_{A_L} \cdot v_o$ ^[7]



L'amplificateur amplifie donc son propre signal de sortie et, selon la valeur du gain de boucle A_L , les 3 cas suivants peuvent se présenter :

- $A_L > 1 \Rightarrow$ "après une boucle", v_o devient $v_{o'} = A_L \cdot v_o > v_o$
 $\Rightarrow v_o$ s'accroît rapidement (jusqu'à atteindre la saturation si rien est fait pour réduire la valeur de A_L). 
- $A_L < 1 \Rightarrow$ "après une boucle", v_o devient $v_{o'} = A_L \cdot v_o < v_o$
 $\Rightarrow v_o$ diminue et s'annule rapidement. 
- $A_L = 1 \Rightarrow$ "après une boucle", v_o devient $v_{o'} = A_L \cdot v_o = v_o$
 \Rightarrow le signal de sortie v_o est juste entretenu par le système bouclé et l'oscillation est de forme sinusoïdale car la condition $A_L = 1$ ^[8] ne peut être remplie qu'à « une » fréquence. 

Par conséquent, si dans un montage « classique » on évite la condition d'instabilité ($\overline{A_L} \rightarrow -1$), un oscillateur pour signaux sinusoïdaux l'utilise par contre volontairement.

⁶ On peut utiliser différents types de filtres, ce qui donne naissance à différents oscillateurs. L'un des plus courants, utilisés pour des fréquences basses et moyennes, est l'oscillateur à « pont de Wien ». Il permet la génération de signaux sinusoïdaux à faible taux de distorsion (< 0.1%).

⁷ Pour rappel, A_L est le gain de boucle du système bouclé.

⁸ et $\Phi_L = 0^\circ$ car pour garantir l'entretien du signal, il est nécessaire que les signaux d'entrée v_i et de contre réaction $v_{CR} = A_L \cdot v_o$ soient en phase.

3.4.2 Amorçage de l'oscillateur

Lors de la mise sous tension, l'absence de signal devrait empêcher toute entrée en oscillation. Cependant, la présence inévitable (mais heureuse ici) de l'offset de l'ampli op permet de profiter du signal V_{IO} en entrée de l'élément amplificateur, dès la mise sous tension. Ce signal est continu mais sera rendu variable par la boucle du système (éléments G et B).

3.4.3 Oscillateur pour signaux sinusoïdaux à « pont de Wien »

3.4.3.1 Schéma de principe

Pour cet oscillateur, on peut écrire :

- Gain de l'organe amplificateur (« G ») :

$$G = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

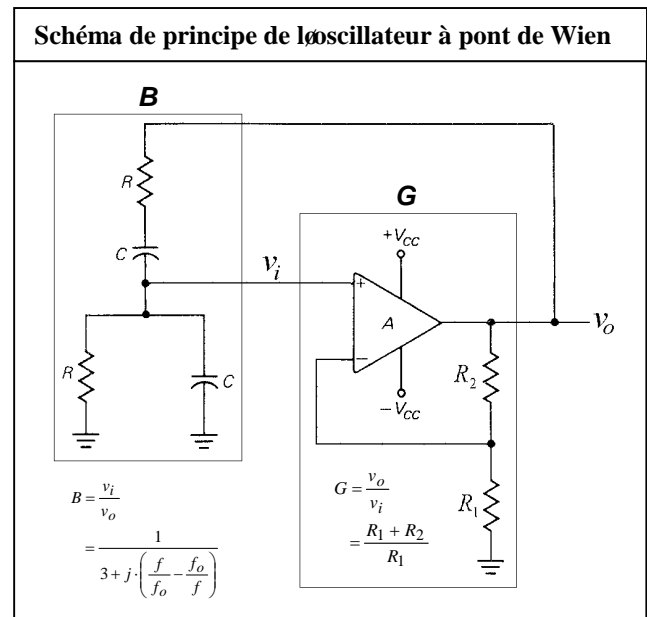
* Fonction de « amplificateur »

- Taux de réaction positif (« B ») :

$$B = \frac{v_i}{v_o} = \frac{1}{3 + j \cdot \left(\frac{X}{R} - \frac{R}{X} \right)}$$

$$= \frac{1}{3 + j \cdot \left(\frac{f}{f_o} - \frac{f_o}{f} \right)}$$

* Fonction de « filtre passe-bande »



3.4.3.2 Modification automatique du gain de boucle

Le signal d'entrée initial (V_{IO}) ayant une très faible amplitude (quelques mV), le montage pratique doit comporter un élément variable :

- garantissant $A_L > 1$ à la mise sous tension, pour permettre d'atteindre l'amplitude de sortie désirée
- mais ramenant et maintenant en permanence le gain de boucle A_L à 1, lorsque cette amplitude est atteinte.

Pour parvenir à ce résultat, la valeur de A_L devra donc être dépendante de l'amplitude de v_o .

Pour des raisons de facilité, du point de vue pratique, c'est le gain G de l'élément amplificateur qui sera rendu dépendant de cette amplitude.

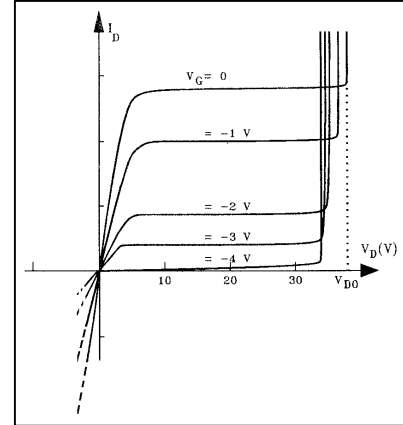
Pour ce faire, une des résistances déterminant le gain de l'amplificateur sera constituée d'un composant non-linéaire (JFET, petite ampoule à incandescence^[9], diodes^[10], etc.).

L'utilisation de la zone résistive d'un JFET offre une solution efficace :

Comme le montre sa caractéristique $I_D = f(V_{DS})$, un JFET utilisé dans sa zone résistive se comporte comme une résistance, dont la valeur est commandée par la tension V_{GS} entre grille et source.

Dans le montage oscillateur sinusoïdal, cette tension sera donc rendue dépendante de la valeur de crête de v_o , à l'aide d'un détecteur de crête négative^[11].

La tension de sortie v_o étant constante en régime établi (c.à.d. après la phase d'amorçage), le gain G et donc le gain A_L , le seront aussi, ce qui permet à l'oscillateur de produire une sinusoïde à très faible taux de distorsion.



Notons que l'équivalence d'un JFET à une résistance n'est envisageable que pour de faibles valeurs de v_{DS} ($< 1V$). En outre, la caractéristique du JFET en zone résistive est d'autant plus linéaire que l'excursion du signal V_{DS} est faible. En pratique, il faudra donc veiller à limiter v_o en conséquence.

Si nécessaire, on utilisera un montage amplificateur pour ajuster le niveau de la sinusoïde produite par le montage oscillateur.

Remarques :

- On observe que la valeur de R_{DS} est d'autant plus élevée que la tension de grille V_{GS} est plus négative (plus élevée en valeur absolue). Dans notre application, R_{DS} augmente donc en même temps que V_{Op} .

Par conséquent, puisque le gain G doit varier de manière inversement proportionnelle à V_{Op} , le JFET (résistance R_{DS}) doit être placé en série avec la résistance R_1 ^[12].

- Le régime est atteint lorsque : $V_{Op} = V_{Op(\text{régime})}$, tel que : $V_{GS(\text{régime})} = -V_{Op(\text{régime})} + 0,7V$ impose juste : $R_{DS} = R_{DS(\text{régime})}$,

valeur permettant d'obtenir juste :
$$G = \frac{R_1 + R_{DS} + R_2}{R_1 + R_{DS}} = 3$$

Cette amplitude de régime dépend des résistances R_1 et R_2 , ce qui offre la possibilité de la régler. Cependant, en pratique, il sera plus efficace de placer un module atténuateur, suivi d'un module amplificateur, en aval de l'oscillateur (d'une part pour des raisons de facilité de réglage et, d'autre part, afin de pouvoir réduire au minimum l'excursion de la tension V_{DS} , pour limiter la distorsion qu'engendrerait une résistance R_{DS} non linéaire.).

⁹ La résistance d'une ampoule à incandescence varie avec la température et donc en fonction de la tension qui lui est appliquée.

¹⁰ Procédé le plus simple et le moins coûteux, mais aussi le moins efficace, car les diodes se bloqueront au voisinage des passages par zéro, ce qui sera source de distorsion.

¹¹ Le fonctionnement du détecteur de crête est le suivant : la diode permet la charge du condensateur C_p jusqu'à la valeur $-V_{o(p)} + 0,7V$ et maintient cette valeur tant que $v_o > -V_{o(p)} + 0,7V$. La résistance R_d permet la décharge lente de C_p , afin d'assurer un suivi correct de l'amplitude de la tension de sortie v_o .

¹² Le gain d'un amplificateur non-inverseur ($G = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$) est inversement proportionnel à R_1 .

3.4.3.3 Filtrage du signal réinjecté

Afin d'obtenir une oscillation de forme sinusoïdale, c.à.d. se produisant à une composante de fréquence particulière, il est nécessaire de filtrer le signal réinjecté en entrée de l'amplificateur, à l'aide d'un filtre « passe bande » (idéalement « passe fréquence » !).

En effet, le gain A_L sera alors maximum à la fréquence centrale f_o de ce filtre. En régime, le gain A_L ne pourra donc être de 1 qu'à cette fréquence et inférieur à 1 aux autres fréquences, ce qui démontre la production d'un signal sinusoïdal de fréquence f_o en sortie du montage ^[13].

Analyse du filtre de l'oscillateur à « pont de Wien »

La fonction de transfert de la cellule ci-contre est :

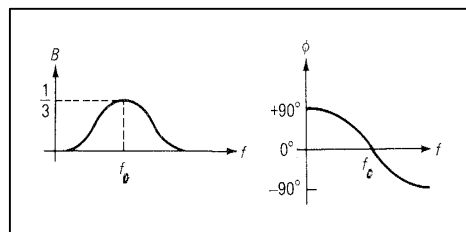
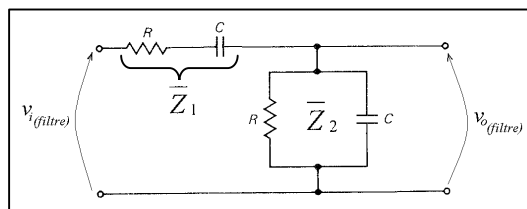
$$\bar{T}(f) = \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{\frac{R \cdot j \cdot X}{R + j \cdot X}}{R + j \cdot X + \frac{R \cdot j \cdot X}{R + j \cdot X}} = \frac{1}{3 + j \cdot \left(\frac{X}{R} - \frac{R}{X} \right)}$$

avec : $X = \frac{-1}{\omega \cdot C}$

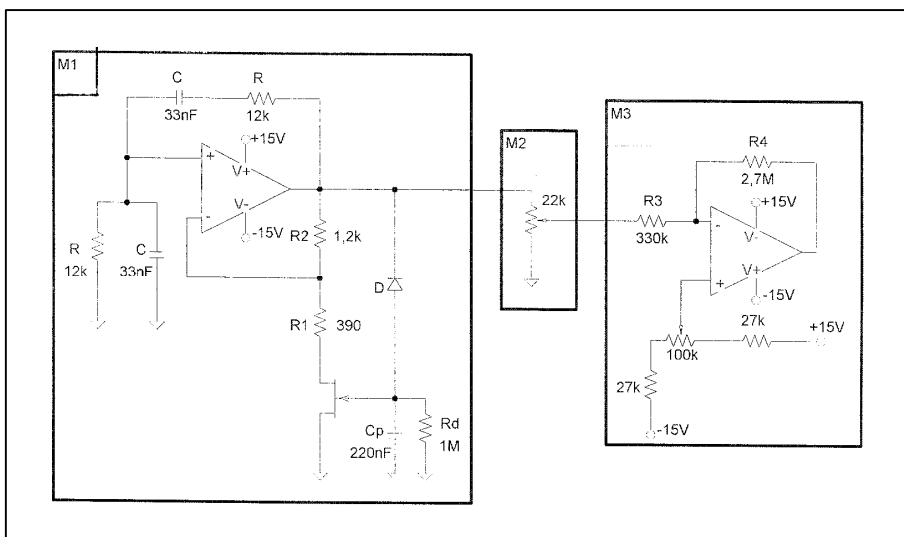
La réponse fréquentielle de ce filtre ^[14], illustrée ci-contre, est donc bien celle d'un filtre passe-bande, dont la valeur maximale du module (1/3) est obtenue lorsque

$$R = \|X\| = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\Rightarrow f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$



3.4.3.4 Exemple de réalisation pratique



¹³ En appliquant le théorème de Fourier, on peut dire que les signaux transitant dans le système bouclé sont dus à des générateurs sinusoïdaux et, le théorème de superposition précise que l'on peut étudier la réponse du système en superposant les réponses dues à ces différents générateurs sinusoïdaux, pris isolément.

¹⁴ Evolution du module et de la phase en fonction de la fréquence.