

De nombreux appareils électroniques font intervenir des signaux oscillants à des fréquences variables, ou différentes de la fréquence d’alimentation de l’appareil (le plus souvent, la fréquence du réseau électrique, à 50 ou 60 Hz). Dans ces appareils, il est nécessaire de pouvoir produire **en interne** un signal oscillant à une fréquence voulue, fixe ou modifiable.

Dans ce chapitre, on réutilise les composants actifs non-linéaires abordés dans le chapitre précédent (l’ALI) afin de réaliser des oscillateurs auto-entretenus grâce à des montages simples qui permettent la création de signaux oscillants de forme variée.

Oscillateur auto-entretenu

Un oscillateur électronique auto-entretenu est un circuit électrique permettant de générer **en sortie une tension oscillante périodique**, en étant alimenté en entrée par une tension constante.

L’objectif sera alors d’étudier leur fonctionnement, ainsi que les caractéristiques spectrales des signaux obtenus. Via des exemples classiques, nous aborderons deux types d’oscillateurs : les **oscillateurs quasi-sinusoïdaux**, puis les **oscillateurs à relaxation**.

TABLE DES MATIERES

I - OSCILLATEUR QUASI-SINUSOIDAL - EXEMPLE DE L'OSCILLATEUR DE WIEN ----- 1 -

 I.1 - Circuit de l'oscillateur de Wien et principe de fonctionnement ----- 1 -

 I.2 - Comportement oscillant ----- 2 -

 I.3 - Bilan : allure des oscillations ----- 4 -

II - OSCILLATEUR A RELAXATION - EXEMPLE DU MULTIVIBRATEUR ASTABLE ----- 5 -

 II.1 - Circuit et principe de fonctionnement ----- 6 -

 II.2 - Comportement oscillant ----- 6 -

I - OSCILLATEUR QUASI-SINUSOIDAL - EXEMPLE DE L'OSCILLATEUR DE WIEN

Oscillateur quasi-sinusoïdal

Un oscillateur quasi-sinusoïdal est un oscillateur auto-entretenu permettant de générer un signal proche d’une sinusoïde (dans certaines limites d’utilisation).

Les oscillateurs quasi-sinusoïdaux sont toujours composés de deux blocs au rôle défini :

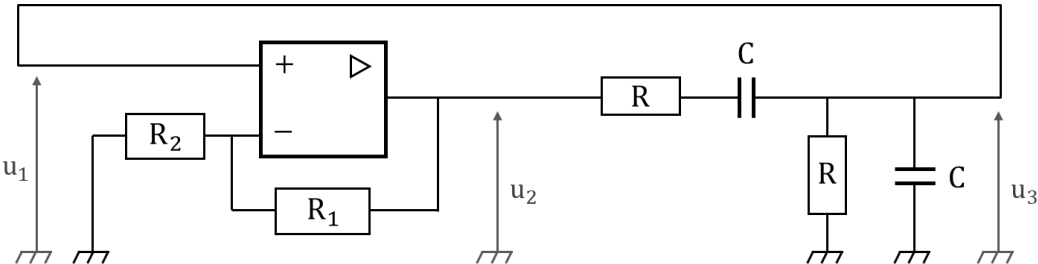
Principe général de l'oscillateur quasi-sinusoïdal

Un oscillateur sinusoïdal est en général un circuit composé de deux étages :

Il est possible de réaliser autant d’oscillateurs quasi-sinusoïdaux qu’il existe de passe-bandes et d’amplificateurs. Dans la suite, on prend l’exemple de l’**oscillateur de Wien**.

I.1 - Circuit de l'oscillateur de Wien et principe de fonctionnement

L’oscillateur de Wien (prononcé « vinne ») est l’un des premiers oscillateur, réalisé en 1940¹ par W. Hewlett. En raison de limitations que nous étudierons à la fin de cette partie, cet oscillateur n’est plus utilisé aujourd’hui, mais reste un exemple didactique important, et un classique des problèmes d’électrocinétique. L’oscillateur de Wien prend la forme suivante :



¹ W. Hewlett fonde avec D. Packard une société qui commercialise cet oscillateur sous le nom de « HP 200A », vendu à une cinquantaine de dollars (soit environ 1000 dollars de 2022). Cette société vend aujourd’hui des composants informatiques sous le nom bien connu de « HP ».

On identifie deux blocs dans ce circuit :

- Un étage **d'amplification** réalisé avec un ALI, d'impédance d'entrée infinie et d'impédance de sortie nulle ;
- Un étage de **filtrage passif**, réalisé par deux résistances et deux condensateurs.

Les fonctions de transfert de chacun de ces blocs (qui doivent savoir être retrouvées sans hésitation) sont :

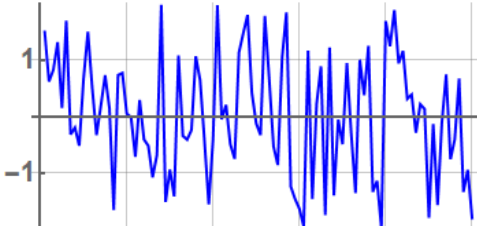

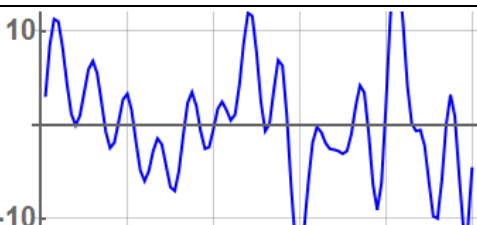
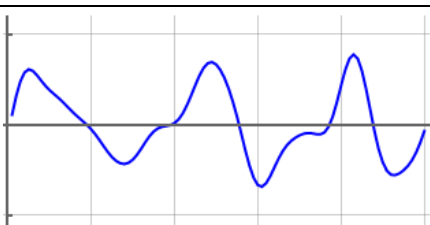
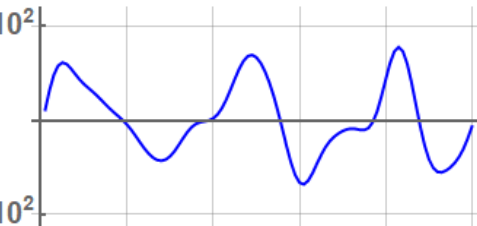
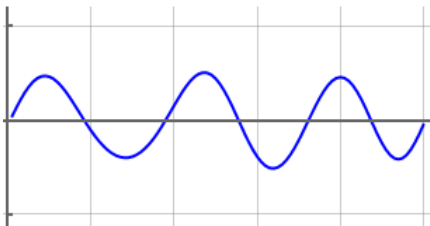
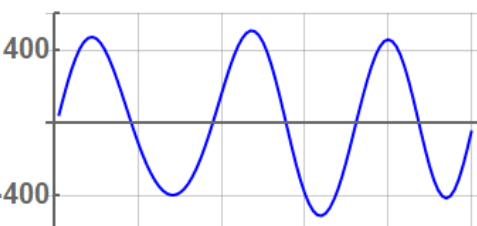
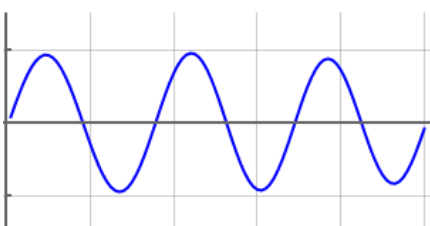
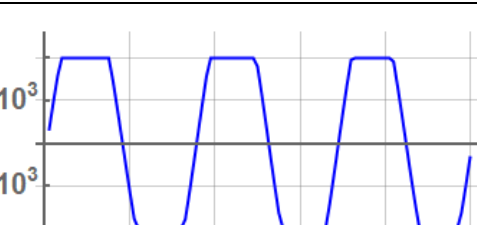
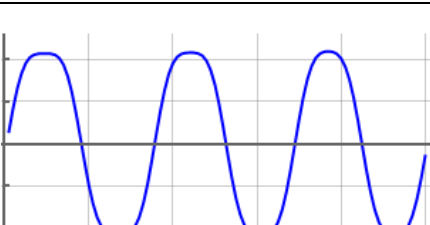

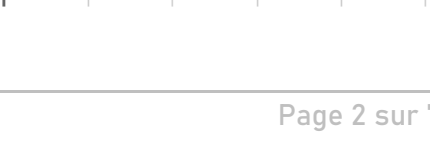
$$\underline{H}_{\text{amp}} = \underline{u}_2 / \underline{u}_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad \underline{H}_{\text{filtre}} = \underline{u}_3 / \underline{u}_2 = \frac{1}{3 + jRC\omega + \frac{1}{jRC\omega}} = \frac{H_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} H_0 = 1/3 \\ \omega_0 = 1/RC \\ Q = 1/3 \end{cases}$$

Attention : il n'est possible de considérer ces deux blocs indépendamment que si le premier présente une impédance de sortie négligeable, et une impédance d'entrée quasi-infinie, ce qui est le cas ici. Dans le cas contraire, la connaissance de la fonction de transfert de chaque étage ne permet pas de caractériser correctement le comportement de l'ensemble du montage.

I.2 - Comportement oscillant

I.2.A - Etude qualitative du comportement

Dans cette partie, on explique de manière intuitive l'apparition des oscillations dans un oscillateur quasi-sinusoïdal. On considérera un oscillateur dont le gain de l'étage amplificateur est $G_0 = 10$, et dont la fréquence centrale de l'étage passe-bande est f_0 .

Explication	Signal en sortie de l'ALI (entrée passe-bande)	Signal en sortie du passe-bande (entrée ALI)
La sortie de l'ALI comporte toujours un bruit électronique, aléatoire, comportant une large gamme de fréquences, d'une amplitude de quelques nanovolts.		
En passant par le passe-bande, la plupart des fréquences sont filtrées, pour favoriser la fréquence centrale f_0 .		
L'ALI amplifie la sortie du passe-bande d'un facteur G_0 , puis le signal repasse par le passe-bande, qui sélectionne encore une fois les fréquences proches de f_0 .		
On refait le même raisonnement sur plusieurs cycles : l'ALI amplifie la sortie du passe-bande, puis celui-ci sélectionne à nouveau les fréquences proches de f_0 , si bien que le signal gagne en amplitude et en harmonicité.		
Au bout d'un certain temps (très court, dans la réalité), on voit apparaître un signal quasi-sinusoïdal de grande amplitude.		
Mais une fois le signal harmonique atteint, les cycles continuent ! Le signal est amplifié, et on atteint la saturation de l'ALI.		
L'ALI est partiellement saturé : cela induit l'apparition de nouvelles fréquences (puisque le signal n'est plus une sinusoïde parfaite). Le passe-bande filtre une partie de ces nouvelles fréquences, mais le signal de sortie garde une trace d'anharmonicité : il est quasi-sinusoïdal.		

Le signal final est le fruit d'un équilibre entre l'amplification du premier étage, qui tend à faire croître le signal au-delà du fonctionnement linéaire de l'ALI, et le filtrage du second étage, qui tend à retirer les fréquences supplémentaires induites par la saturation de l'ALI. Ainsi, **plus l'amplification est forte (c'est-à-dire G_0 grand), plus le signal sera anharmonique. Inversement, plus le passe-bande est sélectif, plus le signal sera harmonique.** Dans la limite d'un passe bande parfait, qui laisserait uniquement passer la fréquence f_0 , on obtiendrait une sinusoïde parfaite.

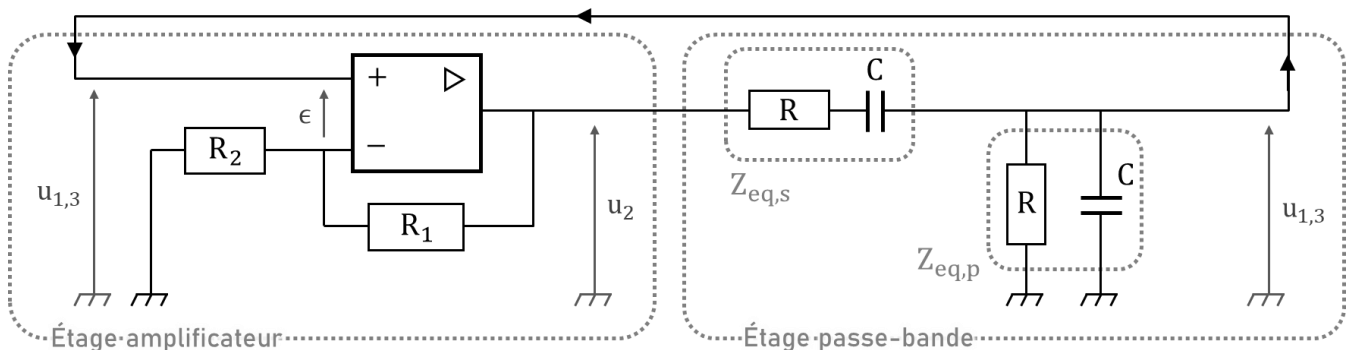
Ce raisonnement qualitatif permet de prévoir les principales caractéristiques d'un oscillateur quasi-sinusoïdal :

- **Démarrage des oscillations** : le gain de l'amplificateur doit être supérieur à l'atténuation de la fréquence f_0 du passe-bande ;
- **Fréquence des oscillations** : principalement à la fréquence centrale f_0 du passe-bande ;
- **Amplitude des oscillations** : inférieure ou égale à la tension de sortie saturée, $\pm V_{\text{sat}}$;
- **Harmonicité des oscillations** : meilleures si le gain est faible, et si le passe-bande sélectif.

1.2.B - Phase linéaire : apparition des oscillations

Tant que l'ALI est en régime linéaire, on peut étudier le système de manière équivalente en représentation **temporelle** ou **complexe**. On peut alors établir des fonctions de transfert complexes, et en déduire des équations différentielles via l'équivalence $j\omega \leftrightarrow d/dt$.

On étudie le montage en séparant les deux étages :



Pour l'étage passe-bande, on peut associer la résistance et le condensateur en série dans un dipôle équivalent d'impédance $Z_{\text{eq},s}$, et la résistance et le condensateur en parallèle dans un dipôle équivalent $Z_{\text{eq},p}$:

$$Z_{\text{eq},s} = R + \frac{1}{jC\omega} = \frac{1 + jRC\omega}{jC\omega} \quad Z_{\text{eq},p} = \left(\frac{1}{R} + jC\omega \right)^{-1} = \frac{R}{1 + jRC\omega}$$

On peut alors exprimer \underline{u}_3 via un diviseur de tension :

$$\underline{u}_3 = \frac{Z_{\text{eq},p}}{Z_{\text{eq},p} + Z_{\text{eq},s}} \underline{u}_2 \quad \text{i. e.} \quad \underline{u}_3 (Z_{\text{eq},p} + Z_{\text{eq},s}) = Z_{\text{eq},p} \underline{u}_2 \quad \text{i. e.} \quad \underline{u}_3 \left(\frac{1 + jRC\omega}{jC\omega} + \frac{R}{1 + jRC\omega} \right) = \frac{R}{1 + jRC\omega} \underline{u}_2$$

On multiplie par $jC\omega(1 + jRC\omega)$:

$$\underline{u}_3 ((1 + jRC\omega)^2 + jRC\omega) = jRC\omega \underline{u}_2 \quad \text{i. e.} \quad \underline{u}_3 (1 - R^2 C^2 \omega^2 + 3jRC\omega) = jRC\omega \underline{u}_2$$

On repasse en représentation temporelle :

Pour l'étage amplificateur, on reconnaît un amplificateur non-inverseur, dont la sortie s'écrit $u_2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_3$

On peut alors récrire l'équation différentielle précédente comme :

L'équation différentielle ci-dessus décrit un comportement différent selon la valeur du terme d'ordre 1 :

- Si $R_1 < 2 R_2$: _____
- Si $R_1 > 2 R_2$: _____
- Si $R_1 = 2 R_2$: _____

Remarque : l’annulation du terme d’ordre 1 est impossible à réaliser parfaitement. Dans la pratique, pour générer des oscillations, on se placera dans des cas légèrement instables ($R_1 > 2 R_2$), ce qui conduit l’ALI en régime de saturation (à certains moments).

Puisque l’ALI entre en régime de saturation, on doit étudier la manière dont il sort de ce régime (puisque l’existence d’oscillations quasi-sinusoïdales implique un fonctionnement en régime linéaire une partie du temps, lorsque $u_s \neq \pm V_{sat}$)

I.2.C - Phase non-linéaire : saturation de l’amplitude des oscillations

On rappelle ci-dessous la méthode à appliquer, selon qu’on suppose un fonctionnement en saturation ou en linéarité de l’ALI :

	Régime linéaire	Régime de saturation
On peut supposer que	$\epsilon = 0$	$v_s = \pm V_{sat}$
On cherche à calculer	v_s en fonction de v_e	ϵ en fonction de v_s et v_e
On obtient alors	Une relation entrée-sortie sous forme d’une équation diff. ou d’une fonction de transfert	Une condition à vérifier pour qu’il y ait basculement : si l’ALI est en saturation ..., il y reste jusqu’à ...

On peut alors appliquer la méthode qui convient pour étudier le retour à la linéarité de l’ALI saturé.

Démonstration – Passage de la saturation à la linéarité de l’oscillateur de Wien

On suppose que la saturation positive est atteinte à $t = 0^-$. Déterminer la condition de retour à la linéarité.
Faire ensuite de même pour la saturation négative.

Nous avons montré que les oscillations quasi-sinusoïdales se font en partie en régime linéaire, et en partie en régime de saturation. Le régime de saturation intervient lorsque les tensions sont près des maximums et des minimums.

I.3 - Bilan : allure des oscillations

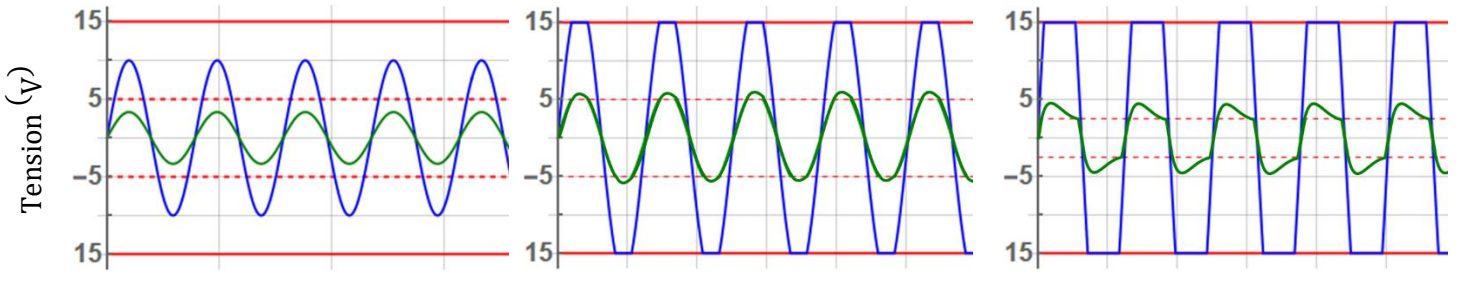
Dans le tableau récapitulatif suivant, on appelle :

- G_0 le gain de l’étage d’amplification (précédemment égal à $1 + R_1/R_2$) ;
- $A(f_0)$ le gain de l’étage passe-bande à la fréquence centrale f_0 .

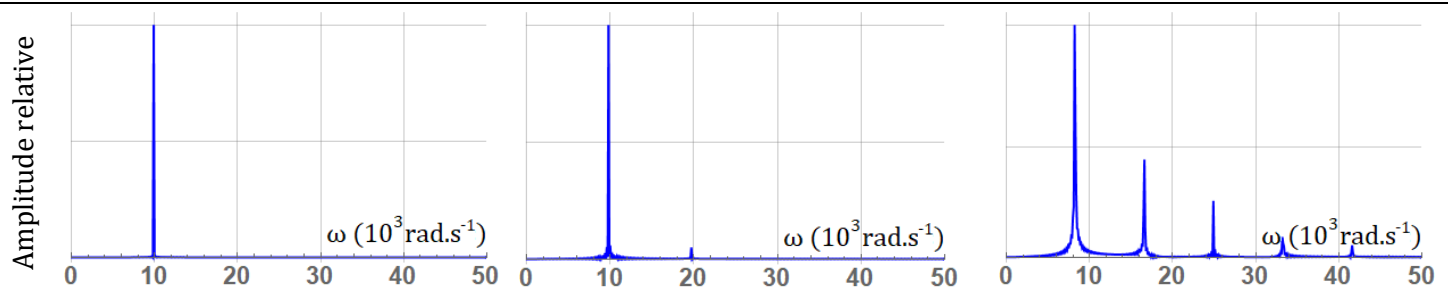
Dans les graphiques tracés ci-dessous, on prendra les valeurs de l’oscillateur de Wien étudié plus haut : $A(f_0) = 1/3$ (facteur d’amplification de la fréquence centrale du passe-bande), $Q = 1/3$, et G_0 reste variable de sorte à pouvoir faire varier le produit $G_0 \cdot A(f_0)$.

$G_0 \cdot A(f_0) = 1$	$G_0 \cdot A(f_0) \approx 1$	$G_0 \cdot A(f_0) \gg 1$
Dans cette situation inatteignable , l’ALI ne satura pas, et les oscillations sont purement sinusoïdales à la fréquence f_0 .	L’ALI sature pendant de courtes durées. Les oscillations sont quasi sinusoïdales, contenant des fréquences proches de f_0 .	L’ALI sature pendant de longues durées. Les oscillations ne sont pas sinusoïdales, et la fréquence fondamentale est $f < f_0$.

Dans les graphiques ci-dessous, la sortie en régime permanent de l’ALI est représentée en bleu. La sortie du filtre (u_1 ou u_3) en vert. La zone linéaire (dans laquelle la sortie du passe-bande est une sinusoïde) est située entre les pointillés rouge.



On représente ci-dessous les spectres de la sortie du passe-bande, dans le cas où le régime linéaire est atteint pendant un temps court, et pendant un temps long (devant la période du signal). La pulsation propre du passe-bande a été choisie à 10^4 rad.s^{-1} .



Le démarrage des oscillation (non-représenté ici) est d'autant plus rapide que la valeur l'amplification est élevée (et donc que le signal est anharmonique). Dans la pratique, le régime transitoire dure un temps très court : il est nécessaire de faire une acquisition déclenchée automatiquement pour l'observer à l'oscilloscope.

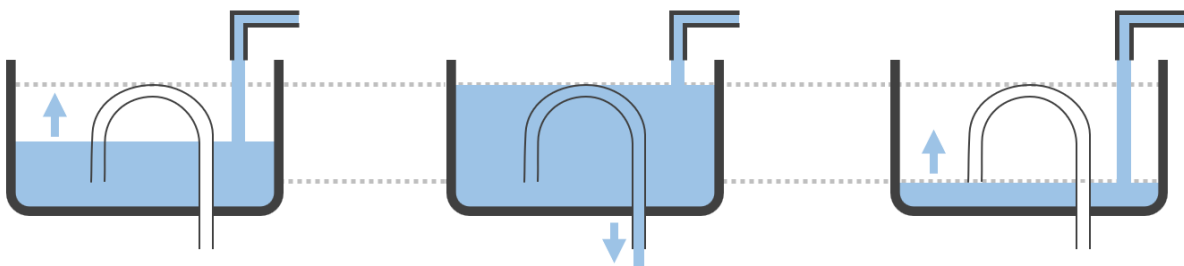
II - OSCILLATEUR A RELAXATION - EXEMPLE DU MULTIVIBRATEUR ASTABLE

L'oscillateur de Wien, présenté dans la première section de ce chapitre, est le principal représentant des oscillateurs quasi-sinusoïdaux, dont le principe de fonctionnement implique toujours une amplification bouclée avec un passe-bande. Dans cette partie, on aborde une nouvelle catégorie d'oscillateurs, qui produisent des oscillations via un principe totalement différent : les **oscillateurs à relaxation**. On prendra l'exemple du **multivibrateur astable**.

Oscillateur à relaxation

Un oscillateur à relaxation est un oscillateur auto-entretenu dans lequel la phase de croissance du signal est liée à un phénomène d'accumulation, et la phase de décroissance est liée à une relaxation, lorsqu'une valeur seuil est atteinte.

La définition ci-dessus ne fait pas référence à des grandeurs propres à l'électrocinétique. Il est ainsi possible de trouver des oscillateurs à relaxation dans divers domaines de la physique. Par exemple, on définit ci-dessous un oscillateur à relaxation dans le domaine de la mécanique des fluides, nommé « vase de Tantale », dont le rôle est de déclencher à intervalles réguliers la vidange d'un récipient continuellement rempli :



L'eau monte dans le récipient et dans le tube de vidange. Le tube de vidange est ouvert vers l'extérieur du récipient.

L'eau atteint le haut du tube de vidange, et se met à couler en entraînant le liquide.

La vidange se fait jusqu'à ce que le tube de vidange ne soit plus au contact de l'eau. On revient à la situation de départ ; l'eau monte progressivement.

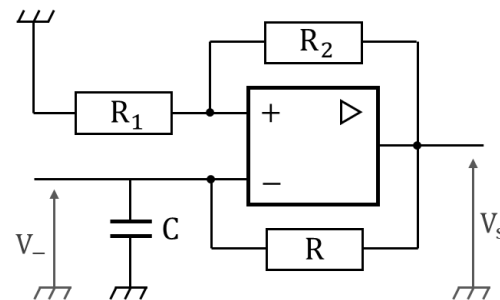
Ce système verra sa hauteur d'eau osciller périodiquement entre une altitude minimale et maximale. On remarque une propriété importante des oscillateurs à relaxation : les principes physiques qui régissent la charge et la décharge sont différents, si bien que les courbes de charge et de décharge peuvent avoir des profils très différents (ici, la décharge en liquide se fait en principe bien plus rapidement que la charge).

En électrocinétique, la grandeurs accumulée et relaxée est usuellement la charge d'un condensateur ou d'une bobine.

II.1 – Circuit et principe de fonctionnement

L'un des oscillateurs à relaxation les plus classiques est le **multivibrateur astable**, représenté ci-contre.

Il se compose d'un ALI bouclé par les deux entrées : le bouclage par l'entrée non-inverseuse rappelle le montage de l'amplificateur inverseur, et le bouclage par l'entrée inverseuse, moins classique, fait intervenir une résistance et un condensateur.



II.2 – Comportement oscillant

Puisque l'ALI est bouclé par les deux entrées, il est probable qu'il fonctionne en régime de saturation (on supposera que c'est le cas dans toute la suite). Dans ce cas, il faut uniquement étudier le passage d'une saturation à l'autre, et éventuellement le démarrage des oscillations.

Dans les deux sous parties suivantes, on tente simplement de décrire :

- Le démarrage des oscillations (lorsqu'on branche le circuit avec le condensateur initialement déchargé) ;
- Le passage de la saturation négative à positive (allure de la tension V_- , temps de bascule, ...)
- Le passage de la saturation positive à négative (allure de la tension V_- , temps de bascule, ...)

II.2.A – Démarrage des oscillations

Démonstration – Démarrage des oscillations du multivibrateur

On supposera que le condensateur est initialement déchargé : $V_- = q/C = 0$, et que l'ALI est en saturation haute : $V_s = V_{sat}$. Montrer que l'ALI entre en saturation au bout d'un certain temps.

II.2.B – Bascule de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$

Démonstration – Bascule ($\ominus \rightarrow \oplus$) du multivibrateur

On prend pour origine du temps l'instant auquel l'ALI passe en saturation négative, et on a donc $V_-(0) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}$. Déterminer le temps au bout duquel on sort de la saturation (pour repasser en saturation positive).

On connaît donc le temps nécessaire à l'ALI pour passer de la saturation négative à la saturation positive. Si on peut ensuite montrer que l'ALI repasse en saturation négative, alors ce cycle se répètera à l'infini, et on aura montré que le système est bien un oscillateur.

II.2.C – Bascule de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$

On refait le raisonnement de la partie précédente, avec la nouvelle origine des temps fixée au moment où l'ALI passe en saturation positive. On a donc $V_-(0) = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat} = -U_0$, et la saturation négative est atteinte lorsque $V_- > U_0$. Comme au démarrage des oscillations, on connaît l'équation différentielle régissant l'évolution de V_- , et l'expression de V_- :

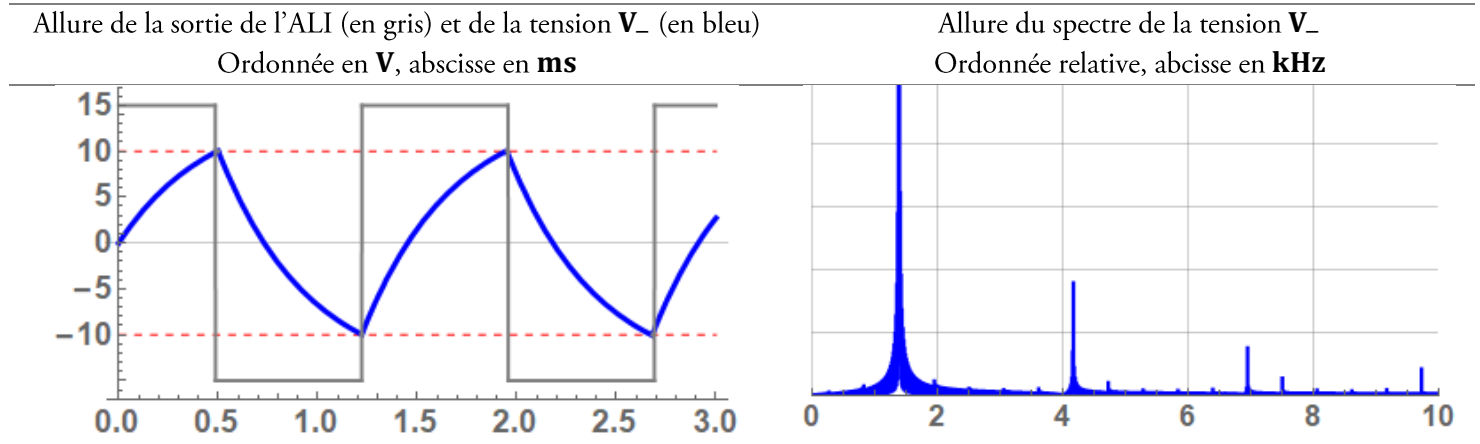
$$\frac{dV_-}{dt} + \frac{1}{RC} V_- = \frac{V_{sat}}{RC} \quad \rightarrow \quad V_-(t) = -(U_0 + V_{sat}) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + V_{sat}$$

Et la condition de bascule négative est réalisée pour $V_-(t_{bn}) = U_0$, ce qui donne : $t_{bn} = RC \ln\left(\frac{V_{sat} + U_0}{V_{sat} - U_0}\right) = RC \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$. On reconnaît la même expression que t_{bp} , c'est-à-dire que la phase de croissance de V_- est de même durée que la phase de décroissance.

On peut alors exprimer la période totale du signal, simplement égale à la somme des deux demi-périodes :

On constate que la période du signal généré dépend du produit RC , et du rapport R_1/R_2 . L'ajustement de ces paramètres (éventuellement à l'aide de potentiomètres) permet d'obtenir des signaux périodiques de fréquence réglable.

On peut alors tracer l'allure des deux signaux : la sortie de l'ALI $V_s(t)$, ainsi que la tension $V_-(t)$:



On a généré deux types de signaux : un signal carré, et un signal d'allure approximativement triangulaire (il est possible de jouer sur les différents paramètres du système afin d'améliorer la qualité de ce signal triangulaire).

On peut ensuite imaginer divers dispositifs pour modifier l'allure de ces signaux. Par exemple, un passe-bande très sélectif permettra de transformer le signal « triangle » en une quasi-sinusoïde.