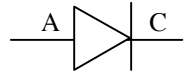


La diode : un exemple de dipôle non linéaire

On se propose d'étudier expérimentalement la diode, composant non linéaire. Il s'agit de déduire de l'étude de sa caractéristique ses principales propriétés afin d'en envisager quelques applications simples (démodulation, redressement).

La représentation symbolique de ce dipôle est donnée ci-contre ; le petit anneau gris sur le composant correspond à la cathode C, l'autre borne étant l'anode A.



I Diode à jonction

1) Caractéristique

Plusieurs méthodes permettent d'obtenir la caractéristique du dipôle :

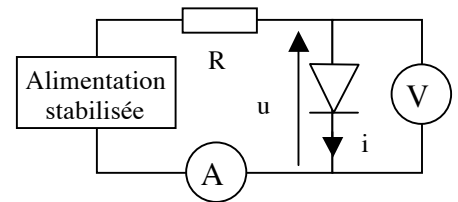
* Le montage proposé ci-contre permet de relever expérimentalement point par point la caractéristique de la diode à jonction en mesurant à l'aide de deux multimètres la tension u à ses bornes ainsi que l'intensité i du courant la traversant (en convention récepteur, précisée sur le schéma).

La résistance interne de la diode étant relativement faible comme nous le verrons par la suite, on choisit un montage « courte dérivation » (revoir le cas échéant le TP-cours « L'instrumentation électrique au laboratoire » sur ce point).

Le résistor de résistance $R = 220 \Omega$ est destiné à protéger la diode en limitant l'intensité du courant la traversant.

À l'aide de l'alimentation stabilisée, on envisage différentes valeurs de tensions u positives, puis de tensions négatives en inversant ses bornes.

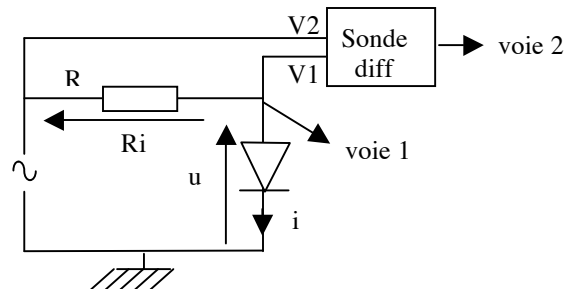
On dresse le tableau des intensités (en mA) et des tensions (en V), puis on trace la caractéristique $i = f(u)$.



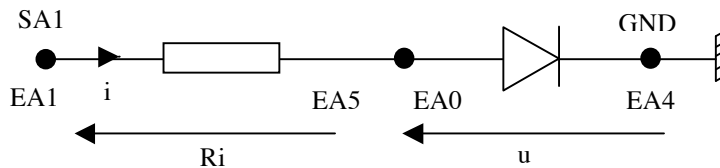
* Le montage proposé ci-contre permet d'obtenir automatiquement la caractéristique de la diode sur l'écran d'un oscilloscope, mais nécessite l'utilisation d'une sonde différentielle pour éviter un "problème de masse" (on se reportera le cas échéant pour plus de détails au 1.3 du TP sur le circuit RLC).

La voie 1 prélève la tension u aux bornes de la diode tandis que la voie 2 mesure $k(V_2 - V_1) = kRi$ donc donne une image de l'intensité i du courant traversant la diode.

La caractéristique est alors obtenue en mode XY.



* Dans le même esprit que le montage précédent, on peut utiliser une carte d'acquisition en mode différentiel reliée à un ordinateur suivant le schéma ci-dessous :



La sortie SA1 (sortie analogique) est utilisée pour générer une rampe de tension afin de rendre automatique l'acquisition des données. Les entrées analogiques seront utilisées en mode différentiel pour s'affranchir du problème de masse en l'absence de transformateur d'isolement : EA1 – EA5 donne Ri et EA0 – EA4 donne u . On se reportera à la notice explicative fournie.

À partir de cette caractéristique, on peut résumer le fonctionnement de la diode : elle ne laisse passer le courant que dans un sens (intensité positive, rappelée par la flèche que symbolise le schéma du composant).

Pour aller plus loin, on note qu'il s'agit d'un dipôle :

- **passif** : la caractéristique passe par l'origine;
- **non symétrique** : la caractéristique ne présente pas de symétrie par rapport à l'origine (les deux bornes ne jouent pas le même rôle ce qui se répercute sur le schéma du composant avec des bornes différenciées);
- **non linéaire** : la caractéristique n'est pas une droite.

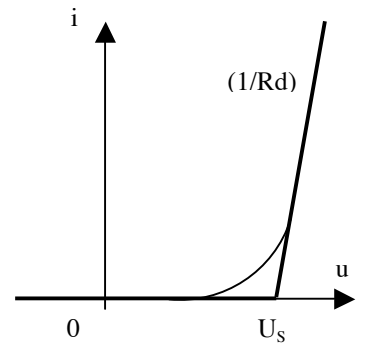
2) Modélisation

La diode n'étant pas un dipôle linéaire, il faut linéariser la caractéristique pour se ramener à que l'on sait traiter. Cette linéarisation se fera en deux parties, la droite résultant d'une linéarisation en une fois s'éloignant beaucoup trop de la caractéristique réelle :

- une partie horizontale quand la diode est bloquée et qu'elle ne laisse pas passer le courant;
- une partie oblique (tangente à la courbe pour i suffisamment élevée) quand elle est passante, c'est-à-dire quand un courant la traverse.

La diode est alors caractérisée par :

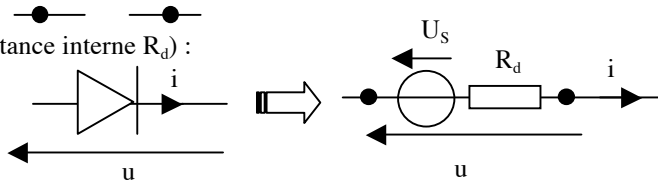
- sa tension de seuil U_s (positive) : tension à partir de laquelle elle conduit dans ce modèle, abscisse de l'intersection des deux demi-droites;
- sa résistance dynamique R_d : inverse du coefficient directeur de la demi-droite correspondant à la partie passante.



À partir de la caractéristique précédemment tracée, donner les valeurs de U_s et de R_d et vérifier que leurs ordres de grandeur sont respectivement de 0,65 V (cette valeur ne dépend que de la nature du semi-conducteur constituant la diode, ici du silicium) et de quelques Ω .

La diode admet donc une représentation de Thévenin pour chaque partie correspondant aux relations obtenues à partir des équations des deux demi-droites :

- $i = 0$ pour $u < U_s$:
- $u = R_d i + U_s$ pour $u > U_s$ (f.e.m. U_s et résistance interne R_d) :



U_s est généralement faible devant les autres tensions mises en jeu dans les circuits électriques, de même que R_d est généralement faible devant les autres résistances. On peut donc souvent les négliger, ce qui conduit au modèle de la diode dite « idéale » (voir caractéristique ci-contre).

Elle se comporte alors comme :

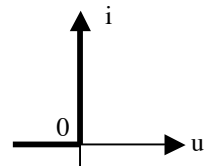
- un coupe-circuit (interrupteur ouvert) quand elle est bloquée : $i = 0$ pour $u < 0$:



- un court-circuit (fil ou interrupteur fermé) quand elle est passante : $u = 0$ pour $i > 0$:



Son fonctionnement peut alors se résumer à celui d'un simple interrupteur commandé en tension.

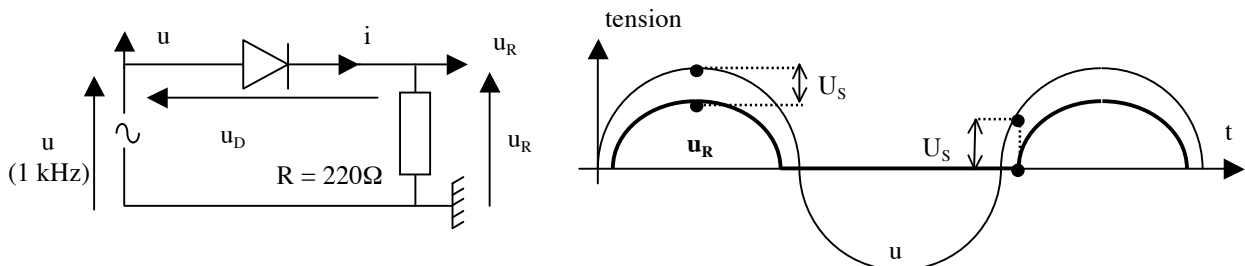


II Redressement

Pour réaliser une alimentation continue à partir d'une tension alternative, les deux étapes sont successivement le redressement et le filtrage.

1) Redressement simple alternance

À partir du montage ci-dessous, observer les deux courbes obtenues à l'oscilloscope avec la même échelle et la même origine des tensions (on veillera à ce que l'amplitude de la tension délivrée par le générateur ne soit pas trop forte de façon à bien voir l'effet de seuil, c'est-à-dire le décalage de valeur U_s entre $u(t)$ et $u_R(t)$).

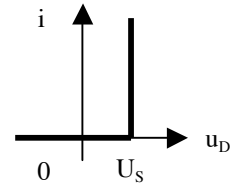


La diode possédant deux régimes de fonctionnement distincts, l'interprétation de ces courbes sera obtenue en utilisant un raisonnement conditionnel analogue à celui précédemment utilisé pour le comparateur à hystérésis (TP-cours AO) : on se place a priori dans un des deux régimes, on en déduit les relations caractérisant le fonctionnement du circuit dans ce cas, puis enfin on regarde à quelle condition ce mode de fonctionnement est valide.

Dans ce qui suit, on négligera la résistance dynamique R_d de la diode devant R . Par contre, elle possède une tension de seuil U_s . Sa caractéristique est alors celle indiquée ci-contre.

Les équations relatives au circuit sont les suivantes : $u = u_D + u_R$ et $u_R = Ri$.

- Lorsque la diode est passante : $u_D = U_s$ et donc $u_R = u - U_s$.
 La diode est passante si $i > 0$, donc si $u_R = u - U_s > 0$.
 Donc la diode est **passante si $u > U_s$** .
- Lorsque la diode est bloquée : $i = 0$ et donc $u_R = 0$.
 La diode est bloquée si $u_D < U_s$, donc si $u - u_R < U_s$.
 Donc la diode est **bloquée si $u < U_s$** .



Si l'on compare u_R à u , on dit que le signal a été redressé.

En effet, on a supprimé les alternances négatives tout en conservant les alternances positives.

2) Redressement double alternance avec un pont de diodes (pont de Graetz)

a) Principe

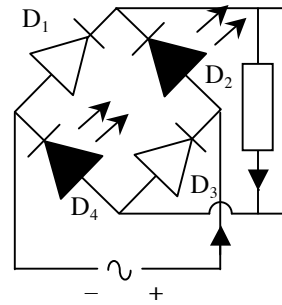
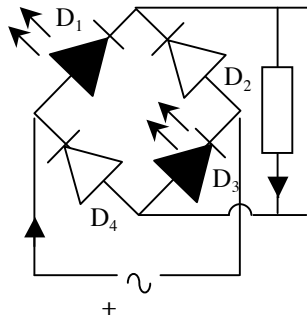
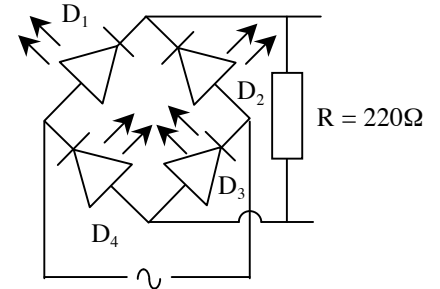
Le pont est d'abord réalisé avec quatre diodes électroluminescentes.

Ces diodes s'éclairent lorsqu'elles sont parcourues par un courant, c'est-à-dire lorsqu'elles sont passantes.

Alimenter le pont avec un GBF délivrant une tension sinusoïdale de très basse fréquence (≈ 1 Hz).

Observer l'ordre d'allumage des diodes.

On peut en déduire le cheminement du courant dans le montage lors des alternances positives du signal délivré par le GBF et celui lors des alternances négatives :



Comme indiqué précédemment, une diode se comporte comme un interrupteur commandé en tension. La polarisation des diodes est commandée par la polarité du générateur. Sur le schéma de gauche, le pôle + du générateur étant à gauche et le pôle - à droite, les diodes D_1 et D_3 sont passantes pendant que D_2 et D_4 sont bloquées. La situation est inverse sur le schéma de droite pendant la demi-période suivante (D_2 et D_4 passantes, D_1 et D_3 bloquée) car la polarité du générateur a été inversée.

Le courant traversant la résistance est donc toujours de même sens.

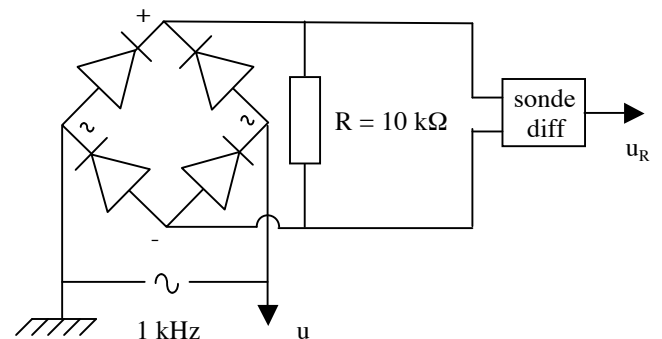
b) Application

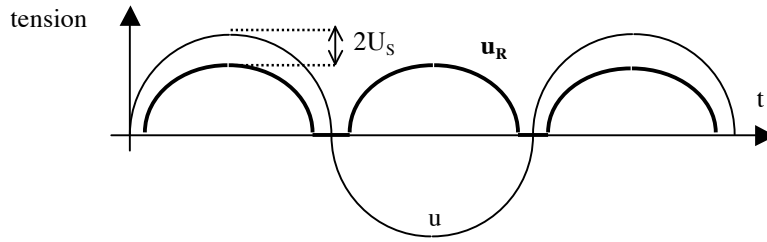
On utilise pour ce montage un pont de diodes intégré; l'entrée se fait sur les deux bornes repérées par le signe ~ et la sortie se fait entre les deux bornes + et - (tension aux bornes de R).

Observer simultanément à l'oscilloscope le signal d'entrée fourni par le GBF et le signal de sortie. On veillera à utiliser la sonde différentielle pour éviter un "problème de masse".

Comparer les signaux de sortie d'entrée et de sortie. On remarquera la faible valeur de seuil obtenue avec ce type de pont intégré.

Noter la différence de résultat par rapport à l'utilisation d'une seule diode en 1).



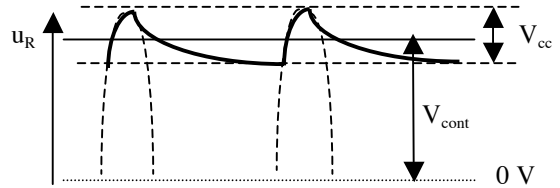
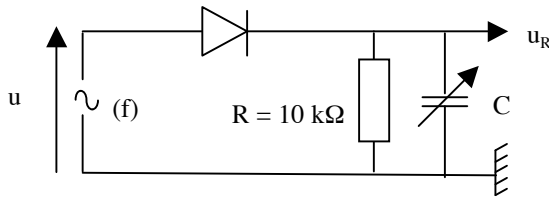


Le signal a été redressé « double alternance » car l'alternance négative n'a pas été supprimée, comme dans le redressement « simple alternance », mais elle a été inversée et transformée en alternance positive.

III Filtrage

1) Observation

Observer, sur le montage du II 1), l'effet d'un condensateur (boîte à décades) placé en parallèle sur R pour $C = 0,1 \mu\text{F}$ et $f = 1 \text{ kHz}$.

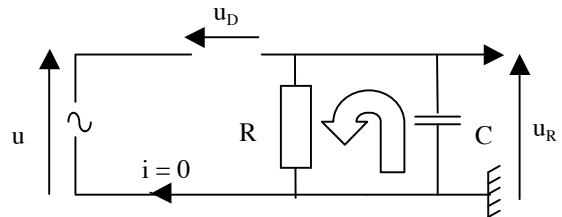
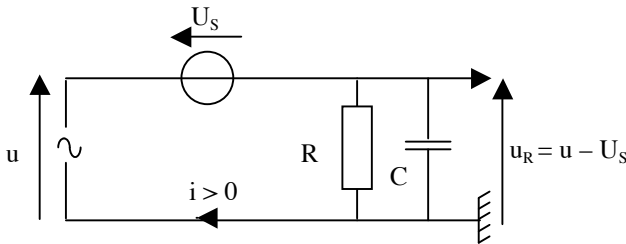


2) Interprétation temporelle

L'interprétation, compte tenu de la représentation équivalente de la diode dans chacun de ses deux régimes et en se servant des résultats du II 1) est la suivante :

Diode passante : $u_R = u - U_s$ si $i > 0$
comme avant (sans C)

Diode bloquée : décharge de C dans R si $u_D < U_s$
au lieu de $u_R = 0$



Il s'agit d'une succession de charges du condensateur lorsque la diode est passante (u_R "suit" alors u à U_s près), et de décharges dans le résistor lorsque la diode est bloquée. On peut en donner une interprétation plus précise en remarquant que le circuit (R, C) ainsi constitué forme un « détecteur de crête » (voir IV).

On définit le taux d'ondulation du signal $u_R(t)$ par :

$$r = \frac{\text{valeur crête à crête de l'ondulation en tension}}{\text{valeur de la tension continue}} = \frac{V_{cc}}{V_{cont}} \text{ (voir graphe du paragraphe 1 pour les notations)}$$

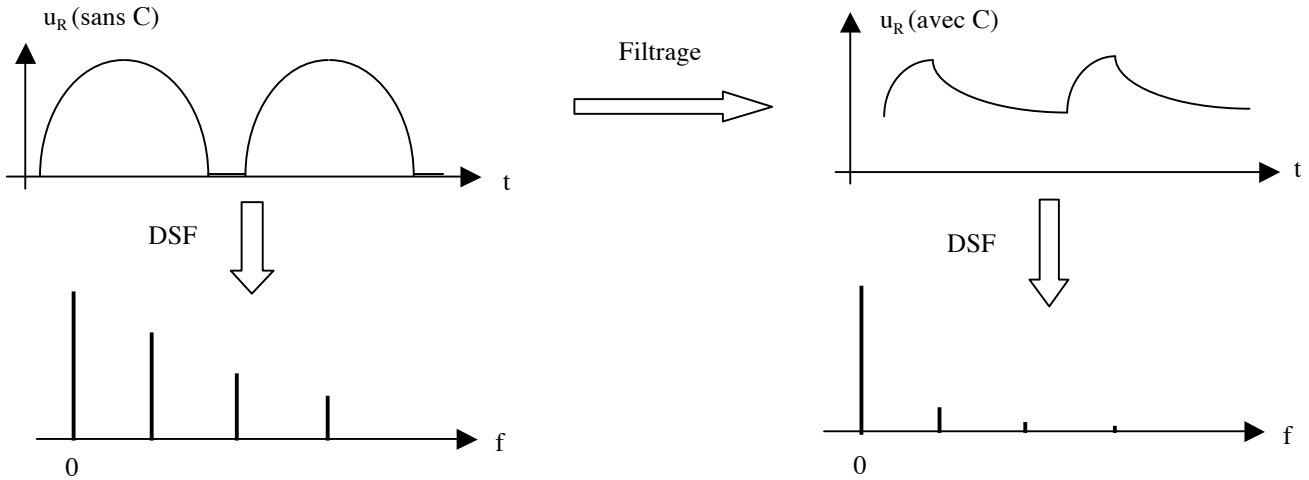
Il caractérise la qualité du filtrage et doit être le plus petit possible (le cas idéal serait $r = 0$ pour produire une tension parfaitement continue).

Déterminer sa valeur pour $C = 0,01 \mu\text{F}$, $C = 0,1 \mu\text{F}$, puis pour $C = 1 \mu\text{F}$.

Conclusion : le filtrage est d'autant meilleur (r petit) à R et f fixés que C est grand, ce que l'on peut résumer en général par la condition $\tau \gg T$, en notant $\tau = RC$ la constante de temps du filtre et $T = \frac{1}{f}$ la période du signal.

3) Interprétation fréquentielle

On peut aussi expliquer l'intérêt du circuit en interprétation fréquentielle : l'association RC constitue un filtre passe-bas qui ne garde pratiquement du signal redressé par la diode que sa composante continue ($f = 0$ Hz). On peut le vérifier expérimentalement en effectuant la décomposition en série de Fourier (DSF) de u_R d'abord sans condensateur puis avec.



Reprendre la manipulation précédente avec les valeurs initiales : $C = 0,1 \mu\text{F}$ et $f = 1 \text{ kHz}$ (on prendra toujours $R = 10 \text{ k}\Omega$). Observer l'effet d'une diminution de la fréquence à 100 Hz sur le taux d'ondulation r .

Conclusion : le filtrage est d'autant meilleur (r petit) à R et C fixés que f est grande, ce que l'on peut résumer en général par la condition $f \gg f_c$, en notant $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ la fréquence de coupure du filtre. Ecrite autrement, c'est la même condition que celle donnée pour l'interprétation temporelle.

Remarque : on peut améliorer le résultat en diminuant encore la valeur de r par l'ajout d'une étape supplémentaire : « la stabilisation ». On peut utiliser pour cela une diode particulière, la diode Zéner, ou encore un régulateur intégré de tension (RIT).

IV Modulation d'amplitude – Démodulation par détection de crête

Le but de cette partie est de montrer le principe de la transmission d'une information par modulation d'amplitude.

1) Intérêt

La transmission d'une information (la voix par exemple dans une bande de fréquence typiquement comprise entre 20 Hz et 20 kHz donc de largeur $\Delta f \approx 20 \text{ kHz}$) par une onde électromagnétique (onde radio par exemple) s'effectue entre un émetteur et un récepteur.

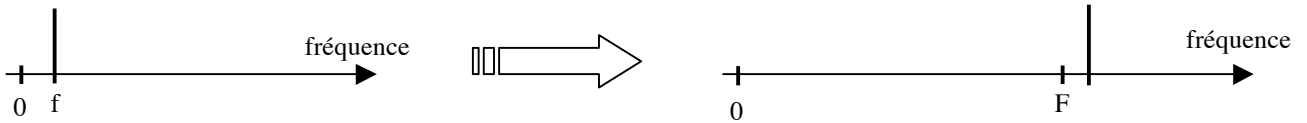
Pour diverses raisons, il n'est pas possible de transmettre directement les signaux transportant l'information. L'existence de plusieurs émetteurs (plusieurs stations de radio) émettant dans la même bande de fréquence provoquerait d'une part des interférences entre les différents signaux (un mélange, une superposition des différentes émissions). D'autre part s'ajouteraient des difficultés dues à des considérations physiques sur la propagation des ondes basse fréquence dans l'atmosphère et sur les conditions de leur réception (trop grande taille des antennes).

On peut éviter ces problèmes si les émetteurs émettent des ondes de haute fréquence, et dans des bandes de fréquence distinctes, car il suffit alors de concevoir les récepteurs de façon à n'être sensibles qu'à la bande de fréquence (donc la station) que l'on désire recevoir. C'est le principe de la modulation dont il existe plusieurs types.

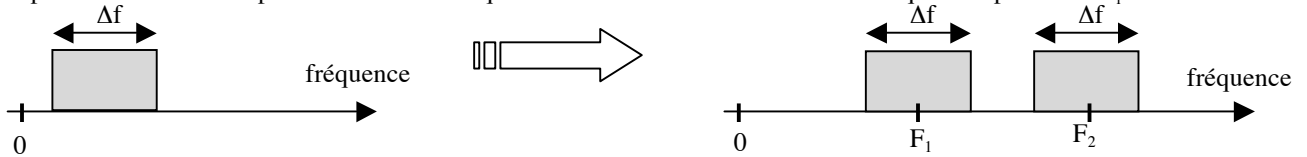


La modulation d'amplitude (AM) consiste à moduler une porteuse sinusoïdale $p(t) = a \cos (2\pi Ft + \varphi)$ par un signal $s(t)$ de fréquence f ($f \ll F$) contenant l'information en rendant variable son amplitude a suivant une fonction linéaire du signal $s(t)$. Ci-dessus l'allure d'un signal sinusoïdal modulé en amplitude, pour faire simple par un autre signal sinusoïdal de plus faible fréquence.

Comme nous allons le détailler dans les paragraphes suivants, la modulation est obtenue par une opération multiplicative entre les deux signaux $p(t)$ et $s(t)$, et conduit à une translation de la basse fréquence f au voisinage de la haute fréquence F :



De manière plus générale, on va émettre le signal électrique de basse fréquence (BF) associé à l'information par l'intermédiaire d'un dispositif destiné à transposer la bande de fréquence couverte autour des diverses fréquences porteuses F_i :



Il existe d'autres types de modulation, par exemple la modulation de fréquence (FM) ci-dessous, qui consiste cette fois-ci à "coder" l'information dans une variation de la fréquence F de la porteuse :

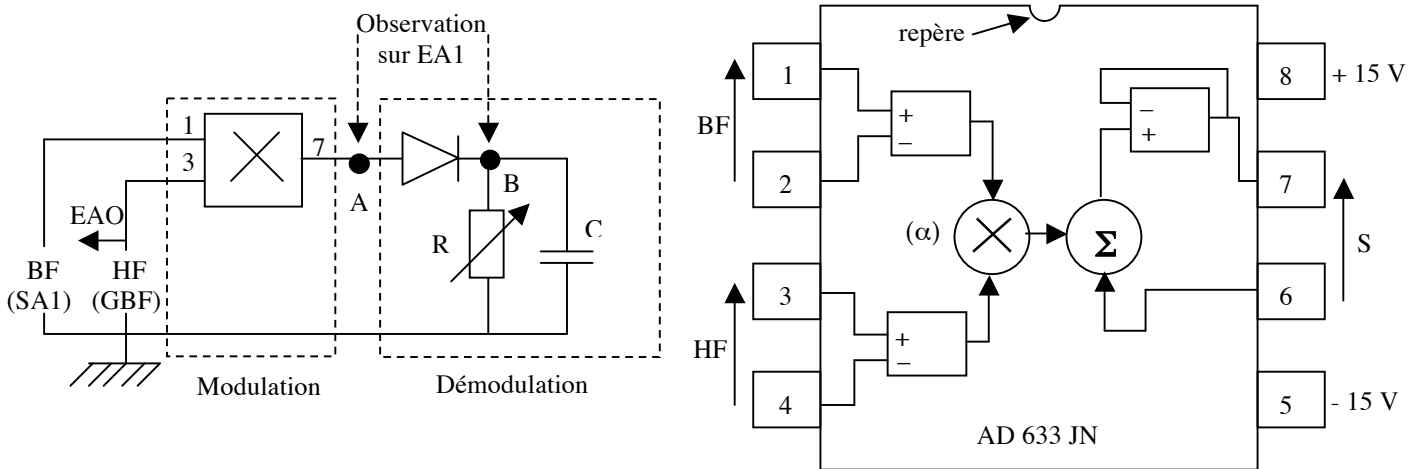


La modulation de fréquence présente deux avantages par rapport à la modulation d'amplitude. D'une part les parasites qui sont en général des variations ponctuelles d'amplitudes sont alors sans incidence sur l'information. D'autre part, la fréquence de la porteuse étant plus élevée, elle permet une bande passante plus large, donc une meilleure qualité du signal transporté.

À la réception, et quel que soit le type de modulation, il faut réaliser l'opération inverse pour extraire le signal voulu de l'ensemble des signaux transmis; c'est la détection ou démodulation : le récepteur est "calé" sur la fréquence de la porteuse de la station que l'on souhaite recevoir et on extrait l'information contenue dans la bande Δf en supprimant la porteuse.

2) Réalisation

Pour le principe, on réalise successivement dans le même montage la modulation d'amplitude à l'aide d'un multiplieur, partie du montage à gauche de A, puis la démodulation du signal à l'aide d'un détecteur de crête (ou d'enveloppe), partie du montage à droite de A. En pratique, l'émetteur et le récepteur sont évidemment séparés d'une distance pouvant être très importante.



On utilise la carte d'acquisition « Eurosmart[®] » couplée au logiciel « Synchronie[®] » pour l'enregistrement des signaux et leurs décompositions en série de Fourier. On applique au multiplieur des signaux de fréquences très différentes : l'un de 20 kHz jouera le rôle de porteuse (HF), sera fourni par un GBF et appliqué à l'entrée EAO de la carte; l'autre de 100 Hz correspondant à la modulation (BF) sera fourni par la carte d'acquisition elle-même (sortie SA1). Le signal à analyser (A puis B) sera appliqué à l'entrée EA1 de la carte. On se reportera à la notice explicative fournie pour plus de détails sur le paramétrage.

La multiplication sera réalisée à l'aide du multiplieur analogique intégré AD 633 JN.

Le câblage est le suivant (attention à l'orientation du composant définie par le repère) :

- ↪ + 15 V sur la borne 8 et - 15 V sur la borne 5 pour son alimentation ;

↪ bornes 2 et 4 à la masse ;

↪ signal BF appliqué sur 1 et HF sur 3 : on réalise alors l'opération $\alpha \cdot \text{BF} \cdot \text{HF}$ conformément au schéma fonctionnel ci-dessus ($\alpha = 0,1 \text{ V}^{-1}$) ;

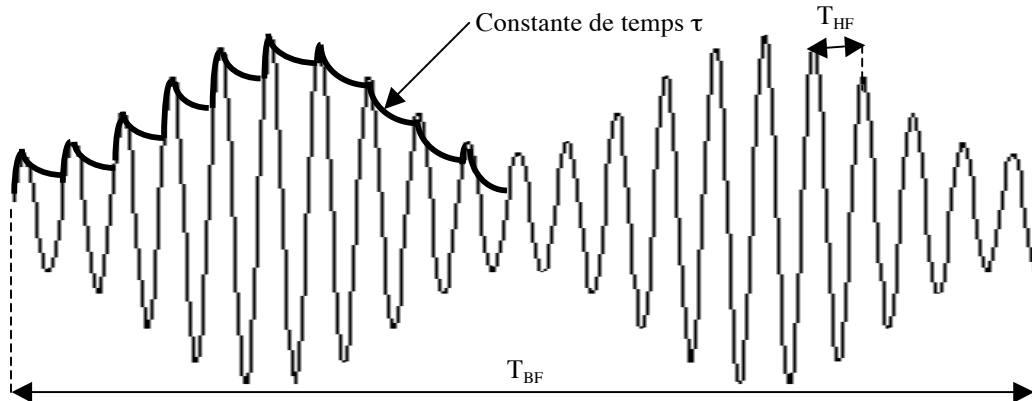
↪ borne 6 reliée à la borne 3, sortie en 7 : on obtient alors $S = \alpha \cdot \text{BF} \cdot \text{HF} + \text{HF}$ (modulation avec porteuse).

On prendra pour commencer $R = 18 \text{ k}\Omega$ (boîte à décades) et $C = 0,1 \mu\text{F}$.

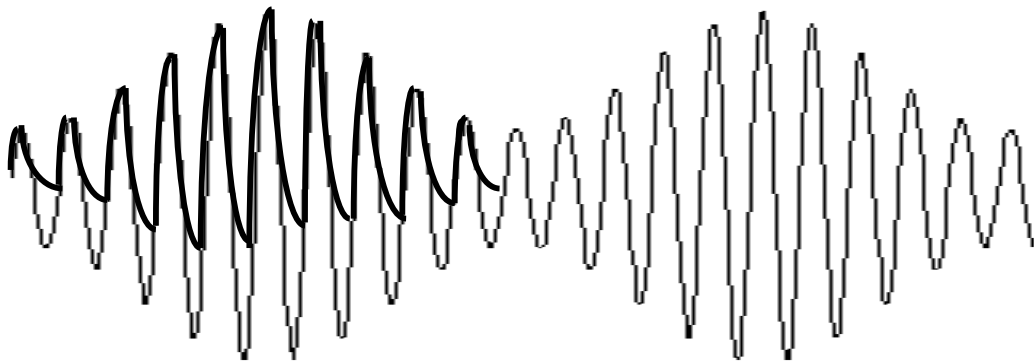
3) Interprétation temporelle de la démodulation

Observer le signal modulé en A, puis le signal démodulé (BF) en B. Pour cela, l'échantillonnage du logiciel sera réglé à 2000 points de mesure sur une durée d'environ deux périodes de la basse fréquence.

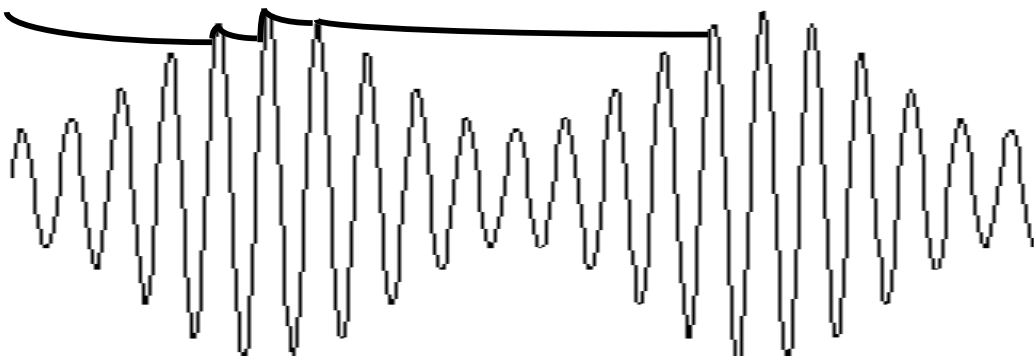
Le détecteur de crête est capable de restituer en B l'enveloppe du signal modulé obtenu en A, donc d'extraire le signal basse fréquence, si cette décharge se fait avec une constante de temps $\tau = RC$ appropriée comme le montre la représentation graphique ci-dessous ($R = 18 \text{ k}\Omega$ et $C = 0,1 \mu\text{F}$).



Si la constante de temps τ est trop faible (on pourra prendre $R = 3,3 \text{ k}\Omega$ avec la même valeur de C), la décharge est trop rapide et le dispositif ne modifie presque pas le signal appliqué :



Si la constante de temps τ est trop forte (on pourra prendre $R = 100 \text{ k}\Omega$ avec la même valeur de C), la décharge est trop lente et le signal sortant reste quasiment constant :



Il faut donc que la constante de temps ne soit donc ni trop petite, ni trop grande. Précisément, elle doit être comprise entre les périodes des deux signaux : $T_{HF} \ll \tau \ll T_{BF}$ soit numériquement $0,05 \text{ ms} \ll 1,8 \text{ ms} \ll 10 \text{ ms}$. Cette condition est la même, sous une forme différente, que celle donnée dans le paragraphe précédent.

4) Interprétation fréquentielle

Pour comprendre le fonctionnement du dispositif, on observe trois signaux ainsi que les trois décompositions en série de Fourier correspondantes.

a) Signal en A

On vérifie que son spectre comporte les fréquences HF (20 kHz), HF - BF (19,9 kHz) et HF + BF (20,1 kHz).

Pour le justifier, prenons $x = A \cos \omega_{BF} t$ et $y = B \cos \omega_{HF} t$.

On a alors $S = \alpha xy = \alpha AB \cos \omega_{BF} t \cos \omega_{HF} t + B \cos \omega_{HF} t$.

On utilise ensuite la relation $\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$.

Le signal s'écrit alors : $S = \frac{\alpha AB}{2} [\cos(\omega_{HF} + \omega_{BF})t + \cos(\omega_{HF} - \omega_{BF})t] + B \cos \omega_{HF} t$.

D'où la présence dans le spectre des fréquences HF, HF - BF et HF + BF.

b) Signal en B en l'absence du condensateur

On vérifie que la diode a coupé les alternances négatives du signal.

On vérifiera que le spectre comporte plus de fréquences qu'en A. On relève en effet, en plus des pics précédents, des harmoniques de plus hautes fréquences, mais aussi une composante continue et un pic à 100 Hz correspondant à la modulation BF. La diode, composant à caractéristique non linéaire, permet donc d'enrichir le signal, c'est-à-dire de créer des harmoniques qui n'étaient pas présentes initialement dans le signal d'entrée (c'est une règle générale).

c) Signal en B en présence du condensateur

On vérifie qu'il ne reste pratiquement plus, à part la composante continue, que la modulation BF. C'est bien le résultat souhaité. Le quadripôle (R, C) agit comme un filtre passe-bas et ne garde que la modulation BF en coupant la porteuse HF si sa fréquence de coupure se situe entre les deux : $f_{BF} \ll 1/RC \ll f_{HF}$ soit $100 \text{ Hz} \ll 556 \text{ Hz} \ll 20\,000 \text{ Hz}$.

* * *

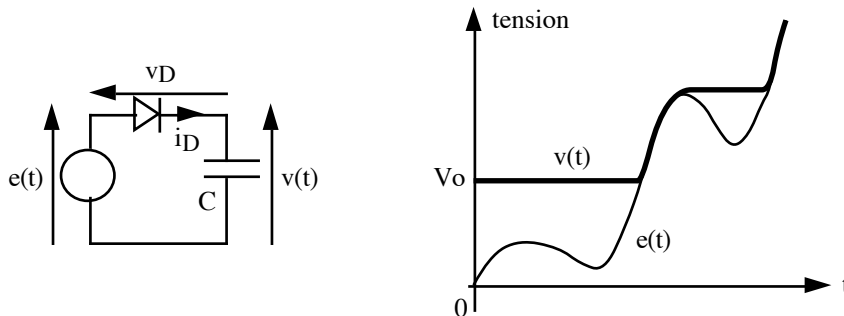
En complément (facultatif), on peut s'intéresser à l'étude théorique du fonctionnement du détecteur de crête, en s'appuyant sur la modélisation de la diode. Considérons tout d'abord le circuit ci-dessous.

En supposant la diode idéale, le montage a alors le comportement suivant :

* La diode est passante si elle est parcourue par un courant $i_D(t)$ positif; or $i_D = C \frac{dv}{dt}$, $v(t)$ est donc croissante. Or $v = e$ car $v_D = 0$. La diode ne peut donc conduire que si $e(t)$ est croissante et on a alors $v(t) = e(t)$.

* La diode est bloquée si $v(t) > e(t)$, soit $v_D < 0$. On a alors $i_D = 0$ et donc $v(t) = \text{Cte}$.

⇒ $v(t)$ ne peut donc qu'augmenter si $e(t)$ augmente en étant supérieur à $v(t)$; sinon $v(t)$ reste constant.



La courbe ci-dessus donne l'évolution de $v(t)$ pour un signal $e(t)$ donné, en supposant que le condensateur est initialement chargé sous une tension V_0 à $t = 0$. Le circuit se comporte donc comme un "mémorisateur" de crête absolue : il mesure la valeur maximale prise par une tension, non forcément périodique, cette crête pouvant même être fugitive.

En fait, on cherche rarement à mémoriser indéfiniment une crête, il suffit d'avoir le temps de la mesurer. De plus, tout condensateur présente une résistance de fuite plus ou moins forte. Dans tous les cas, qu'il s'agisse d'un effet voulu ou subi, on est conduit à rajouter dans le schéma une résistance placée en parallèle sur le condensateur. En conséquence, lors des phases de blocage de la diode, le condensateur tend à se décharger dans le résistor.

Le détecteur de crête sera ainsi capable de restituer l'enveloppe du signal modulé, donc d'extraire le signal basse fréquence, si cette décharge se fait avec une constante de temps $\tau = RC$ appropriée comme expliqué plus haut.