Rapport du Printemps des Sciences: La réception des ondes radio

Sabrina BECHET Priscilla HARDAS

19 avril 2005

Table des matières

1 Introduction **3**

2 La modulation d'amplitude **4**

3 La réception **5**

3.1 Analyse du circuit LC résonnant 5

3.1.1 Le condensateur 5

3.1.2 La bobine d'induction 8

3.1.3 La résonance 9

3.2 Le redressement 12

3.2.1 Constitution d'une diode 12

3.2.2 Principe de fonctionnement d'une diode 14

3.2.3 Effet de la diode dans le circuit 16

3.3 Le filtre passe-bas 17

3.3.1 Fonctionnement d'un filtre passe-bas 17

3.3.2 Fonctionnement dans le circuit 20

3.4 L'écouteur 21

4 Bibliographie **22**

1 Introduction

Durant l'exposition, nous avons présenté la réception des ondes radio.
Nous avons construit un petit récepteur AM très simple qui permettait aux visiteurs de comprendre le principe de la résonance et de la démodulation par un filtre passe-bas.
Nous avons introduit de façon très légère la notion de modulation AM, sujet qui était plus longuement traité par le groupe présentant l'émission, pour ensuite se lancer dans l'étude détaillée du circuit.

On commence donc par expliquer ce que sont un condensateur et une bobine d'induction, et en quoi leur association en parallèle forme ce que l'on appelle un filtre passe-bande.
Ensuite, on détaille le fonctionnement de la diode et son rôle en tant que redresseur de courant, en analysant sa structure et en étudiant sa caractéristique I-V.
Enfin, nous voyons comment un condensateur en parallèle avec la résistance de l'écouteur peut démoduler le signal reçu et redressé.
On termine par le fontionnement d'un écouteur, avec le passage d'un courant alternatif dans une bobine qui crée un champ magnétique variable à l'origine de la vibration de la membrane.

2 La modulation d'amplitude

Un récepteur AM est un circuit qui reçoit des ondes modulées en amplitude.
Le but de cette modulation est de fixer une information de basse fréquence sur une onde porteuse de haute fréquence pour la transmettre sur de grandes distances.
Pour ce faire, on fait varier l'amplitude de la porteuse en fonction du signal à transporter.

Appelons $x(t)$ l'information audio et $u(t) = \cos(\omega t)$ la sinusoïde de fréquence élevée. Lorsqu'on multiplie les deux, nous obtenons :

$$y(t) \quad = \quad x(t)\cos(\omega t)$$

A chaque instant, $x(t)$ donnera l'amplitude de $u(t)$.

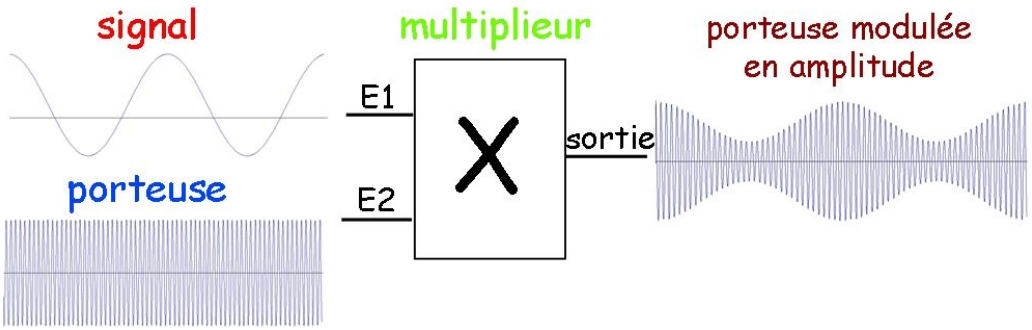

Fig.1

3 La réception

Le récépteur AM qui a été construit est le circuit suivant :

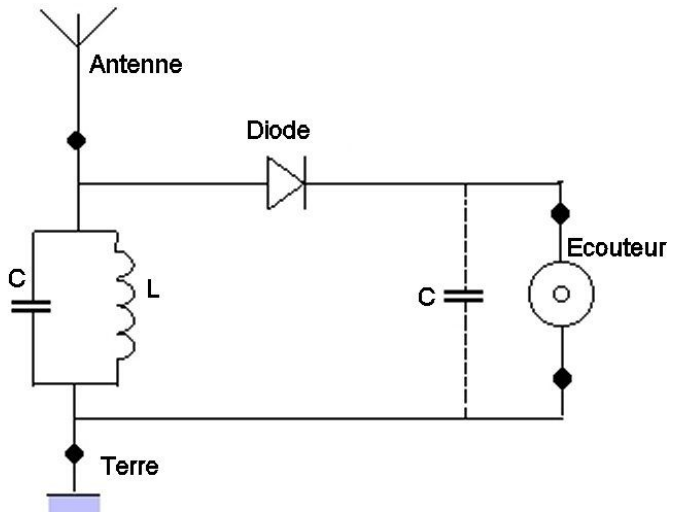

Fig.2

Pour expliquer son fonctionnement, nous le regardons comme étant constitué de deux parties.
Premièrement, la partie résonnante, constituée d'un condensateur et d'une bonbine d'induction, qui permettra la sélection des stations.
Ensuite la partie filtrant la signal reçu afin de le démoduler, constituée de la diode, d'un condensateur et de l'écouteur.

3.1 Analyse du circuit LC résonnant

3.1.1 Le condensateur

La structure d'un condensateur est celle de deux plaques conductrices séparées par un diélectrique.
Il est caractérisé par sa capacité, mesurée en Farad, qui est une grandeur dépendant de paramètres géométriques comme l'aire A des conducteurs ou de la distance d qui les sépare.
Elle est définie comme étant le nombre de charges que peut accumuler le condensateur par unité de volt, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{V} \\ &= \epsilon_0 \frac{A}{d} \end{aligned}$$

Le circuit construit pour l'exposition comportait un condensateur à air variable, c'est à dire qu'il utilisait l'air comme diélectrique et qu'on modifiait le valeur de A pour changer C.

Le signal qui traverse le circuit est une signal monofréquentiel sinusoïdal de pulsation $\omega = 2\pi f$.
On peut écrire la tension v_c aux bornes du condensateur et le courant i_c qui le parcourt comme suit :

$$\begin{aligned} v_c(t) &= V_c \cos(\omega t + \varphi_{v_c}) \\ &= \Re\{V_c \exp(j\varphi_{v_c}) \exp(j\omega t)\} \\ &= \Re\{\hat{v}_c \exp(j\omega t)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_c(t) &= I_c \cos(\omega t + \varphi_{i_c}) \\ &= \Re\{I_c \exp(j\varphi_{i_c}) \exp(j\omega t)\} \\ &= \Re\{\hat{i}_c \exp(j\omega t)\} \end{aligned}$$

où $\hat{v}_c = V_c \exp(j\varphi_{v_c})$ et $\hat{i}_c = I_c \exp(j\varphi_{i_c})$ sont respectivement les phaseurs de la tension et du courant.
Le courant étant le flux de la charge par unité de temps, on a la relation entre i_c et v_c suivante :

$$i_c(t) = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dv_c}{dt}$$

or

$$\begin{aligned} \frac{dv_c}{dt} &= \Re\{\hat{v}_c \frac{d}{dt} \exp(j\omega t)\} \\ &= \Re\{\hat{v}_c j\omega \exp(j\omega t)\} \end{aligned}$$

donc, la relation devient

$$\Re\{\hat{i}_c \exp(j\omega t)\} = \Re\{\hat{v}_c j\omega C \exp(j\omega t)\}$$

et, par extention

$$\begin{aligned}\hat{i}_c &= j\omega C\hat{v}_c \\ \\ \hat{v}_c &= \frac{1}{j\omega C}\hat{i}_c \\ &= Z_c\hat{i}_c\end{aligned}$$

où $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$ est l'impédance complexe du condensateur.
Cette dernière équation n'est autre que la loi d'Ohm généralisée au cas des condensateurs.
L'impédance peut être réécrite sous la forme d'une exponentielle :

$$\begin{aligned}Z_c &= \frac{1}{j\omega C} \\ &= \frac{-j}{\omega C} \\ &= \frac{1}{\omega C}\exp\left(-(\pi/2)j\right)\end{aligned}$$

et,en reprenant la définition des phaseurs et l'extention de la loi d'Ohm, on a

$$\begin{aligned}\hat{v}_c &= Z_c\hat{i}_c \\ V_c\exp\left(j\varphi_{v_c}\right) &= \frac{I_c}{\omega C}\exp\left(j(\varphi_{i_c} - (\pi/2)\right)\end{aligned}$$

où l'on peut voir que la tension aux borne du condensateur est en fait en retard de $\pi/2$ sur le courant.

3.1.2 La bobine d'induction

La structure d'une self est celle d'un fil conducteur bobiné.
Une bobine est caractérisée par son inductance L.
Comme pour le condensateur on peut écrire le courant i_L et la tension v_L à ses bornes par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} v_L(t) &= V_L \cos(\omega t + \varphi_{v_L}) \\ &= \Re\{\hat{v}_L \exp(j\omega t)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_L \cos(\omega t + \varphi_{i_L}) \\ &= \Re\{\hat{i}_L \exp(j\omega t)\} \end{aligned}$$

où $\hat{i}_L = I_L \exp(j\varphi_{i_L})$ est le phaseur de courant de la bobine et $\hat{v}_L = V_L \exp(j\varphi_{v_L})$ celui de la tension.

Ici, la relation i_L - v_L est donnée par :

$$\begin{aligned} v_L &= L\frac{di_L}{dt} \\ &= L\Re\{\hat{i}_L j\omega \exp(j\omega t)\} \\ \Re\{\hat{v}_L \exp(j\omega t)\} &= \Re\{\hat{i}_L j\omega L \exp(j\omega t)\} \end{aligned}$$

donc,

$$\begin{aligned} \hat{v}_L &= j\omega L \hat{i}_L \\ &= Z_L \hat{i}_L \end{aligned}$$

où $Z_L = j\omega L$ est l'impédance complexe de la bobine. Comme précédemment, on établit la différence entre les phases φ_{i_L} et φ_{v_L} en regardant celle de l'impédance :

$$\begin{aligned} Z_c &= j\omega L \\ &= j\omega L \exp((\pi/2)j) \\ V_L \exp(j\varphi_{v_L}) &= \omega L I_L \exp(j\varphi_{i_L} + (\pi/2)) \end{aligned}$$

Donc, la tension aux bornes de la self est en avance de $(\pi/2)$ par rapport au courant qui la traverse.

3.1.3 La résonance

Le circuit constitué de la self et du condensateur en parallèle est un circuit dit résonnant.
Ce comportement particulier a lieu à une fréquence déterminée par les valeurs de L et de C, lorsque les impédances Z_L et Z_c s'égalisent :

$$\begin{aligned} |Z_c| &= |Z_L| \\ \frac{1}{j\omega_R C} &= j\omega_R L \\ \omega_R &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{aligned}$$

où ω_R est la fréquence de résonance.
Pour étudier le circuit, nous allons calculer la fonction de transfert aux bornes de la partie LC. On tient compte de la résistance du fil de l'antenne qui est non négligeable à cause de sa longueur (environ 30 mètres).
L'étude de la fonction de transfert se fait en réalisant le graphique $\log|f_{LC}| = f(\log(\omega)$.

Premièrement, évaluons l'impédance de la partie LC Z_{LC} et l'impédance total Z_{RLC} :

$$\begin{aligned} Z_{LC} &= \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} \\ &= \frac{j\omega L}{1-\omega^2 LC} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{RLC} &= R + \frac{j\omega L}{1-\omega^2 LC} \\ &= \frac{R(1-\omega^2 LC + j\omega L)}{1-\omega^2 LC} \end{aligned}$$

Ensuite, on trouve les expressions de la fonction de transfert et de sa norme :

$$\begin{aligned} f_{LC}(\omega) &= \frac{Z_{LC}}{Z_{RLC}} \\ &= \frac{-\omega^2 L + j(R\omega L(1-\omega^2 LC))}{R^2(1-\omega^2 LC)^2 - \omega^2 L} \end{aligned}$$

$$|f_{LC}|(\omega) = \sqrt{\frac{\omega^4 L^2 + R^2\omega^2 L^2(1-\omega^2 LC)^2}{\left(R^2(1-\omega^2 LC)^2 - \omega^2 L\right)^2}}$$

Regardons son comportement pour les différentes valeurs de ω :

1. $\omega << \omega_R$:

$$\begin{aligned} |f_{LC}| &= \frac{\omega L}{R} \\ \log|f_{LC}| &= \log\omega + \log(\frac{L}{R}) \end{aligned}$$

2. $\omega = \omega_R$:

$$\begin{aligned} |f_{LC}| &= 1 \\ \log|f_{LC}| &= 0 \end{aligned}$$

3. $\omega >> \omega_R$:

$$\begin{aligned} |f_{LC}| &= \frac{1}{\omega RC} \\ \log|f_{LC}| &= -\log\omega + \log(\frac{1}{RC}) \end{aligned}$$

Nous portons ces résultats graphiquements et nous obtenons le graphique suivant :

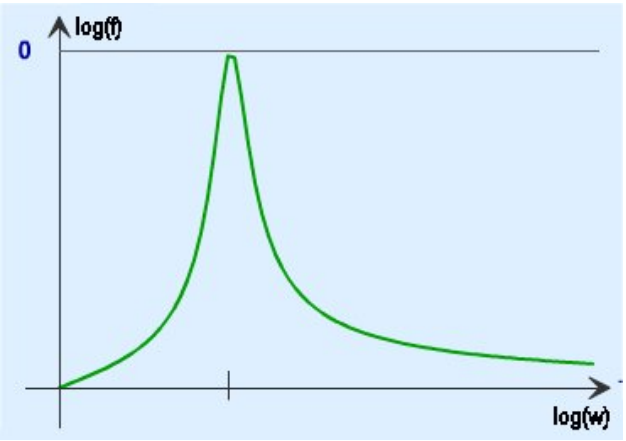

Fig.3

Nous pouvons donc conclure que le filtre passe-bande ainsi construit permet aux signaux, à la fréquence de résonance et à des fréquences comprises dans un certain intervalle autour de la valeur de résonance, de passer de l'entrée (c'est à dire l'antenne) vers la sortie (ici, la sortie est prise aux bornes du LC parallèle).
Les signaux dont la fréquence sort de cet intervalle sont filtrés.
Cette action filtrante est due à la caractéristique de l'impédance Z_{LC}. Comme nous l'avons déterminée plus haut,

$$Z_{LC} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

tend vers l'infini lorsque $\omega = \omega_R$ car le dénominateur s'annule. Cela signifie que la résistance de cette partie du circuit devient tellement grande, que nous pouvons la considérer comme un circuit ouvert.
Le signal reçu par l'antenne passera vers la diode.

Comme nous l'avons déjà signalé, le valeur de ω_R est déterminée par les valeurs de L et de C.
Comme nous utilisons un condensateur dont la capacité est variable, nous pouvons modifier la valeur de la fréquence de résonance.
C'est comme cela que l'on change de poste lorsque l'on écoute la radio. Qand ω_R correspond à la fréquence d'émission de la station, le signal est démodulé et rendu audible.

3.2 Le redressement

3.2.1 Constitution d'une diode

Une diode est un composant à semi-conducteur faite d'une jonctoin PN. Expliquons ce qu'est une jonction PN.

Les semi-conduteurs intrinsèques ne conduisent pas très bien le courant du fait de leur nombre limité d'électrons libres dans la bande de conduction. Les semi-conducteurs comme le silicium ou le germanium se cristallisent sous forme d'une structure tétraédrique dans laquelle chaque atome est entouré de quatre voisins directs.
Leur conductibilité peut être augmentée de façon importante et controlée par l'addition d'impuretés en très faible quantité dans la structure cristalline.
Ce procédé ,appelé dopage, augmente le nombre de porteurs de courant (c'est à dire des électrons ou bien des trous) en intégrant des atomes pentavalents ou des atomes trivalents.

1. Un semiconducteur dopé par des atomes "donneurs" :

   Pour augmenter le nombre d'électrons dans le bande de conduction du silicium, on lui ajoute des atomes ayant 5 électrons de valence.
   Ces atomes pentavalents vont former des liens covalents avec 4 atomes de silicium adjacents, y impliquant 4 de leurs électrons de valence et laissant ainsi un électron de libre.
   Celui-ci devient un électron de conduction puisqu'il n'est attaché à aucun atome.
   On dit que le semi-conducteur ainsi transformé est dopé N.

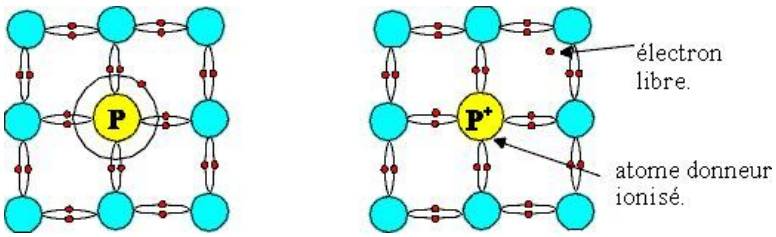

Fig.4

2. Un semiconducteur dopé par des atomes "accepteurs" :

   En ajoutant des atomes d'impureté de trois électrons de valence(trivalent) on augmentera le nombre de "trous" du silicium intrinsèque.

En effet les 3 électrons de valence de l'atome d'impureté sont utilisés dans des liens covalents avec 4 atomes adjacents du silicium , mais 4 électrons etant requis un "trou" est formé à chaque atome trivalent et on a alors un semi-conducteur dopé P.

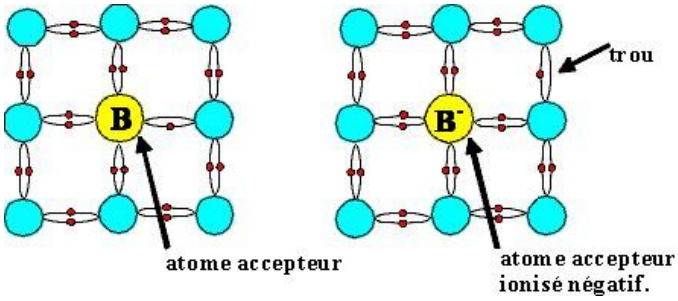

Fig.5

On remarque que le nombre d'électrons de conduction et le nombre de "trous" dans des semiconducteurs dopés N ou P peut être controlé par la quantité d'atomes pentavalent ou trivalent ajoutée au silicium.

Si on prend un bloc de silicium et qu'on en dope une moitié avec une impureté trivalente et l'autre moitié avec une impureté pentavalente, il se forme une frontière entre la portion dopée P et celle dopée N appelée jonction PN.

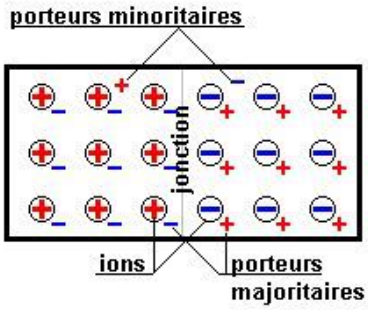

Fig.6

3.2.2 Principe de fonctionnement d'une diode

Les électrons libres, porteurs majoritaires du semiconducteur N, se déplacent à l'intérieur de celui-ci.
Certains d'entre eux, à proximité de la jonction, vont pénétrer le semiconducteur P et ils se trouvent alors en présence d'un nombre important de "trous" libres. Ils vont se recombiner, créant des paires dipolaires fixes dans la zone de transition entre les semiconducteurs que forme une barrière de potentiel. Lorsque cette barrière devient assez grande que pour empêcher les électrons de la traverser, le phénomène de recombinaison s'arrête.

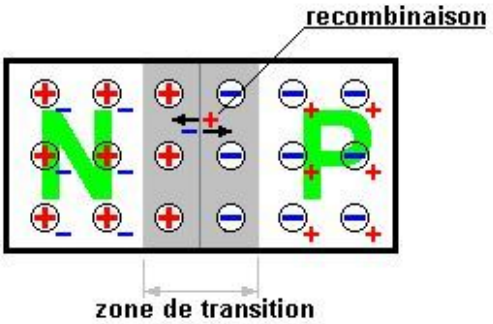

Fig.7

La barrière de potentiel est l'énergie requise pour déplacer les électrons à travers le champs électrique, à 25°C.Pour le silicium cette barrière est de 0.7V.
Il n'y a aucun courant dans une jonction PN en condition d'équilibre.

L'utilité principale de la jonction PN est sa capacité de permettre au courant de passer dans une seule direction et d'empêcher le passage du courant dans l'autre direction.
Ce sens est determiné par la polarisation.

Lorsqu'un courant positif arrive à la borne positive de la jonction(c'est ce qu'on appelle la polarisatoin directe), les électrons de la région N vont être poussés vers la jonction et les "trous" de la région P également.
Si la tension est supérieure à 0.7V (jonction Si) les électrons de la région N ont assez d'énergie pour franchir la barrière de potentiel et traverser la jonction où ils vont se combiner avec les "trous" de la région P.
A mesure que les électrons quittent la région N, d'autres arrivent par la source.

Le courant dans la région N est formé par les mouvements des électrons libres vers la jonction.
Une fois que les électrons de conduction entrent dans la région P et se combinent à des trous, ils deviennent des électrons de valence et se déplacent alors de trou à trou formant n courant de trou.
Le courant de la région P est donc formé par le mouvement de trous.

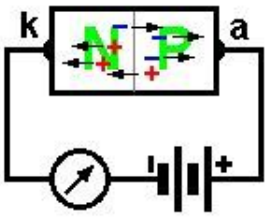

Fig.8

La condition pour que le courant passe est donc que la tension du signal soit supérieure à 0.7V pour une jonction au silicium.
On dit alors qu'on polarise la diode en directe.
Une jonction PN unique constitue une diode.

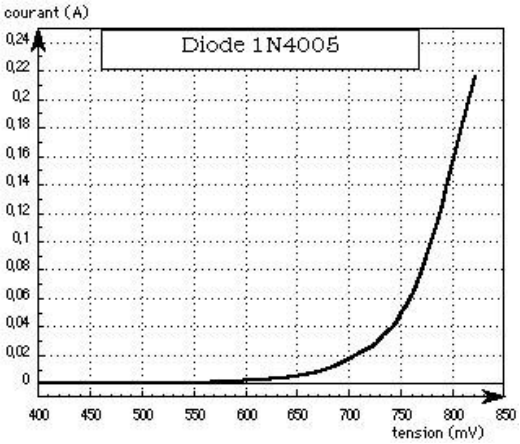

Fig.9

3.2.3 Effet de la diode dans le circuit

La diode ne laissant passer que les tensions supérieures à sa barrière de potentiel (0.7V pour les diodes au silicium, 0.3V pour les diodes au germanium), le signal sort de la diode "redressé", c'est-à-dire que seules alternances positives sont conservées.

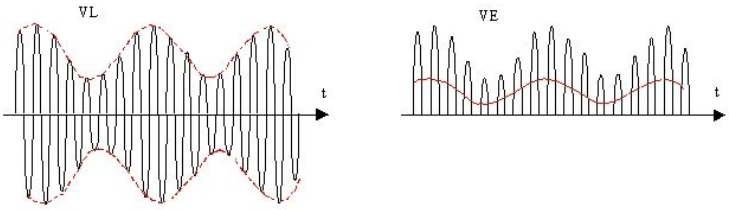

Fig.10

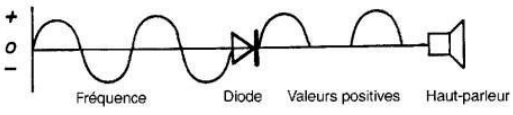

Fig.11

Cependant avant d'arriver dans le haut-parleur, les alternances positives devront passer par un filtre passe-bas.
En effet la membrane du haut-parleur ne peut pas vibrer à la fréquence imposée par la porteuse pour des raisons d'inertie.
En pratique celle-ci ne réagira donc qu'à la variataion d'amplitude du signal et vibrera en fonction de cette variation.
L'association du redressement et du filtre passe-bas s'appelle la "détection d'enveloppe".

3.3 Le filtre passe-bas

3.3.1 Fonctionnement d'un filtre passe-bas

Un filtre est un système électronique linéaire, caractérisé par une fonction de transfert, dont le but est de modifier les propriétés spectrales d'un signal. Le filtre passe-bas transmet une bande de fréquence comprise entre la fréquence nulle et une borne supérieure qu'on apelle la fréquence de coupure et atténue ("coupe") les fréquences supérieures à cette fréquence de coupure.

Le filtre passe-bas de notre circuit est constitué des résistances du fil nous servant d'antenne et de la diode, en série avec un condensateur mis en parallèle avec la résistance de l'écouteur.

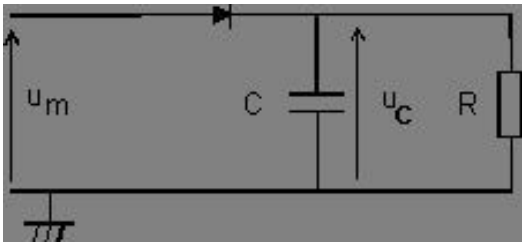

Fig. 12

Soit

$Z_R = R$ l'impédance du fil et de la diode

$Z_{RE} = R_E$ la résistance de l'écouteur

$Z_C = \frac{1}{j\omega_C}$ l'impédance du condensateur

$Z_{RE\|C} = \frac{R_E}{1+R_E j\omega C}$ l'impédance du condensateur en parallèle avec la résistance de l'écouteur

La fonction de transfert de notre circuit sera donc

$$\begin{aligned} f_C &= \frac{V_{in}}{Vout} \\ &= \frac{Z_{RE\|C}}{Z_R + Z_{RE\|C}} \\ &= \frac{R_E}{R + R_E + RR_E j\omega C} \\ &= \frac{1}{\frac{R}{R_E} + 1 + Rj\omega C} \end{aligned}$$

Cette fonction étant une fonction complexe, elle a une norme

$$|f_C| = \frac{1}{\sqrt{(\omega RC)^2 + (1 + \frac{R}{R_E})^2}}$$

et une phase

$$\begin{aligned} \varphi_C &= \arctan \frac{\Im(f_C)}{\Re(f_C)} \\ &= \arctan(\frac{R + R_E}{RR_E\omega C}) \end{aligned}$$

Dans les calculs qui suivent nous allons supposer $\frac{R}{R_E}$ beaucoup plus petit que 1 et donc négligeable.(En effet $R_E \gg R$)

si $\omega = \frac{1}{RC}$:
$\Longrightarrow |f_C| = \frac{1}{\sqrt{2}}$
$\varphi_C = \frac{\pi}{4}$

ω est alors ce qu'on appelle la pulsation de coupure

si $\omega \gg \frac{1}{RC}$:
$\Longrightarrow |f_C| = \frac{1}{R\omega C}$ et
$\varphi_C = \arctan \infty = \frac{\pi}{2}$

Intuitivement si la pulsation est grande, le condensateur lui oppose une petite "résistance" car son impédance $\frac{1}{j\omega_C}$ diminue, le signal passe donc majoritairement dans le condensateur.

si $\omega \ll \frac{1}{RC}$:
$\Longrightarrow |f_C| = 1$ et $\varphi_C = \arctan 0 = 0$

Intuitivement si la pulsation est petite, le condensateur lui oppose une grande "résistance" et le signal passera majoritairement dans la résistance.

On peut représenter la norme et la phase de la fonction de transfert en fonction de la pulsation dans le plan de Bode : il faut pour cela calculer le logarithme de $|f_C|$ et le porter en fonction de celui de ω ainsi que calculer la phase φ_C en fonction de $\log \omega$.

Voici l'allure de ces fonctions :

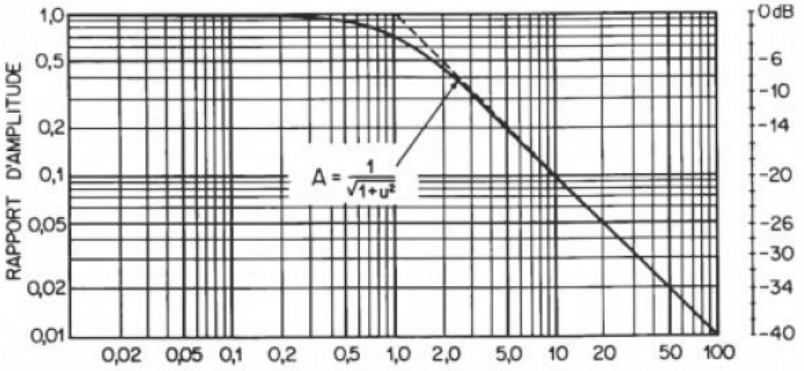

Fig.13

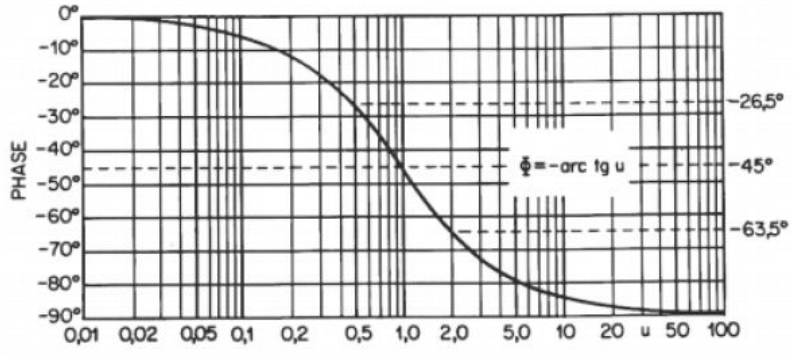

Fig.14

3.3.2 Fonctionnement dans le circuit

Lors du demi-cycle positif du signal d'entrée $s(t)$, la diode est polarisée en direct et la capacité C se charge rapidement à la valeur de crête du signal d'entrée.
Quand le signal chute en dessous de cette valeur, la diode est polarisée en inverse et la capacité se décharge lentement dans la résistance.
La décharge se poursuit jusqu'au demi-cycle positif suivant du signal d'entrée.
Quand celui-ci devient plus grand que la tension aux bornes de la capacité, la diode conduit à nouveau et le procesus recommence.
On peut décomposer l'action du filtre en 3 étapes :

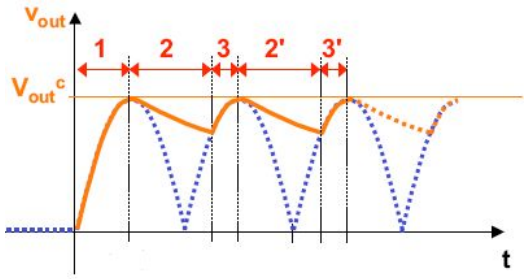

Fig.15

1. Transitoire initial(on suppose qu'il n'y a rien avant $t = 0$) :La diode est passante et le condensateur se charge. Il faut que la constante de temps de charge $\tau = RC$ soit petite par rapport à la période la porteuse T_0 pour que le condensateur soit vite chargé à la valeur de crête du signal.
   $\Rightarrow RC \leq T_0$

2. Décharge du condensateur via la résistance :
   La diode est alors bloquante et le condensateur se décharge dans la résistance de l'écouteur(R_E).
   Le temps de décharge $\tau = R_E C$doit être assez grand pour pouvoir assurer une décharge lente entre deux demi-cycle positifs du signal d'entrée et assez petit pour que la tension aux bornes de la capacité puisse suivre "l'enveloppe" du signal d'entrée même quand celle-ci diminue.
   $\Rightarrow T_0 \leq R_E C \leq \frac{1}{W}$ où W est la bande passante du message

3. Charge du condensateur :
   Quand la tension du signal d'entré est plus grande que celle aux bornes

du condensateur, la diode est passante et le condensateur se charge à nouveau.

3.4 L'écouteur

Un écouteur est connstitué d'une bobine de fil enroulée autour d'un aimant dans laquelle les variations de courant créent un champ magnétique qui exercent une force sur le parois des hauts-parleurs, produisant ainsi une onde acoustique.

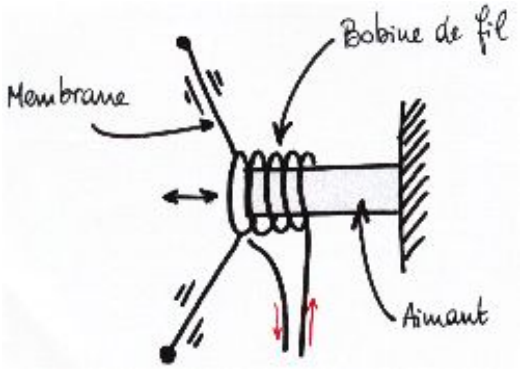

Fig.16

4 Bibliographie

Références

[1] http ://www.ulb.ac.be/polytech/soa/cours/phys026.html

[2] http ://perso.wanadoo.fr/f6crp/elec/radio/modul.htm

[3] http ://www.ulg.ac.be/telecom/teaching/notes/total1/elen008/

[4] http ://perso.wanadoo.fr/avrj.cours/

[5] http ://www.phytem.ens-cachan.fr/

[6] http ://pedagogie.ac-toulouse.fr/

[7] Radio.Radar.Télévision. ;Boll Marcel ;Librairir Larousse - Paris ;1950

[8] La radio ?.. mais c'est très simple ! ;E.Aisenberg ;Société des éditions radio ;1969

[9] Physique Générale tome 2 Electricité et Magnétisme ;Giancoli ;De Boeck-Wesmael

[10] Fondements d'électroniques : circuits, composants et applications ;Floyd ;Goulet ;2004