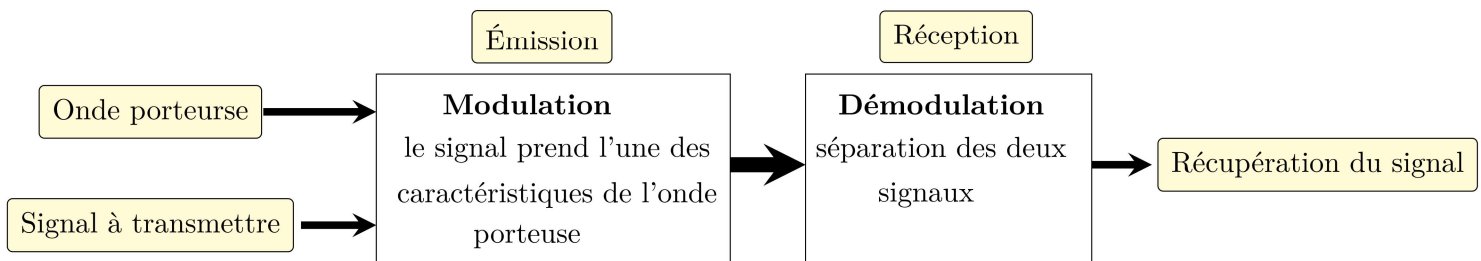


1 Ondes électromagnétiques.

Messagers porteurs, pigeons voyageurs, signaux de fumée, signaux audibles, télégraphe, téléphone, radio, télévision sans fil, internet... Depuis toujours, l'Homme a cherché à transmettre des messages, le plus vite et le plus loin possible... Nous étudierons dans ce chapitre comment peuvent être transmises les informations d'un bout à l'autre du monde ou même dans l'espace, ainsi que la nécessité de coder puis décoder l'information pour pouvoir la transmettre.

La transmission rapide d'information sans fil est devenue une banalité : sur quel principe repose-t-elle ?

On s'intéressera dans ce cours aux transmissions de type radio (sans fil) encore appelées transmissions hertziennes. Le support est une onde, appelée onde porteuse, sur laquelle, on greffe l'information à transporter. On dit que l'onde porteuse a été **modulée** par le signal à transmettre.



1.1 Définition.

Une onde électromagnétique est composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propagent tous deux à la même vitesse. Dans le vide, les ondes électromagnétiques se propagent à la célérité de la lumière : $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Les ondes électromagnétiques n'ont pas besoin de support matériel pour se propager. On observe des phénomènes de diffraction, d'interférence, elles se réfléchissent et se réfractent comme les ondes lumineuses ce qui montre que les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques.

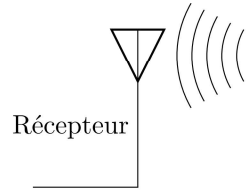
1.2 Signal et onde porteuse.

- L'information est transformée en un signal électrique (tension électrique) de **basse fréquence BF**.
- L'**onde porteuse** est le moyen de transporter l'information, elle (onde porteuse) est sinusoïdale de **haute fréquence HF**.

★ L'onde porteuse peut être une onde lumineuse ou une onde hertzienne (téléphone, radio, TV, ...).

2 Modulation d'une tension sinusoïdale.

- ★ l'information est un signal **fortement atténuée** car sa fréquence est faible, c'est pour cela on utilise une autre onde de haute fréquence (de longue portée) pour transmettre l'information.
- ★ il est difficile pour un récepteur de distinguer les différents signaux vu le domaine restreint de basses fréquences (BF).
- ★ Les dimensions de l'antenne réceptrice est de dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ . Il faut une antenne de très grandes dimensions pour les basses fréquences.



⇒ D'où la nécessité de **Moduler**.

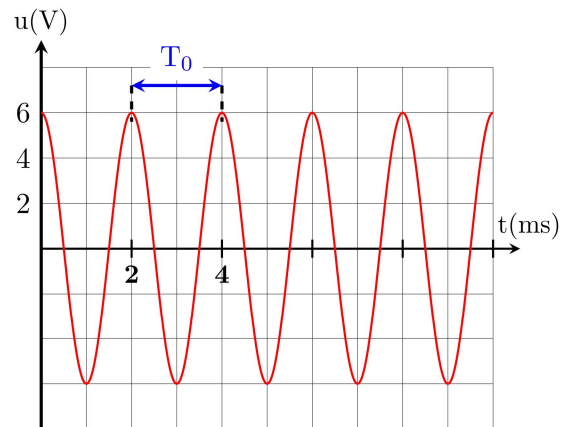
2.1 Tension sinusoïdale

Une tension sinusoïdale est un signal électrique qui est décrit par une fonction sinus ou cosinus :

$$u(t) = U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

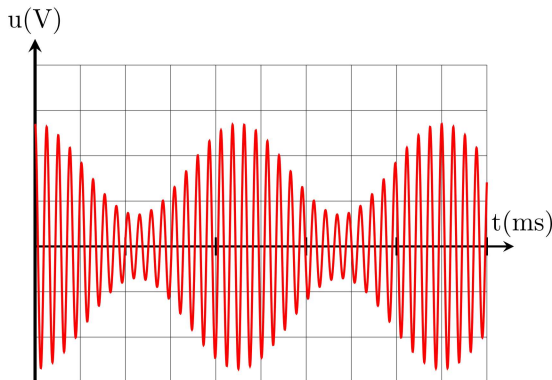
- U_m : Amplitude (V).
- f : fréquence (Hz).
- φ : phase à l'origine (rad) .

Pour la tension représentée ci-contre : $U_m = 6 \text{ V}$, $T = 2 \text{ ms}$,
 $f = \frac{1}{T} = 500 \text{ Hz}$ et $\varphi = 0 \text{ rad}$



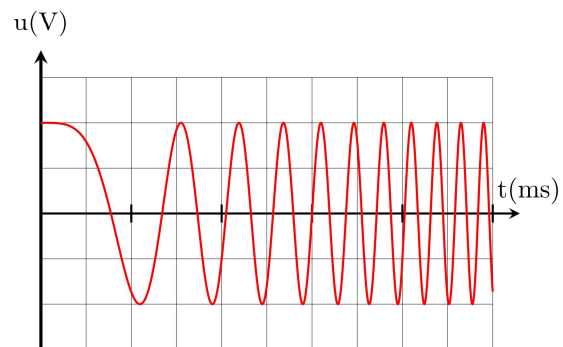
2.2 Types de modulation.

Modulation d'amplitude



$$u(t) = U_m(t) \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi)$$

Modulation de fréquence



$$u(t) = U_m \cdot \cos(2\pi f(t) \cdot t + \varphi)$$

★ Il existe un autre type de modulation appelée **modulation de phase** : $u(t) = U_m \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi(t))$

3 Modulation d'amplitude.

3.1 Multiplication de deux signaux.

- Moduler l'amplitude (obtenir une fonction dont l'amplitude dépend du temps) d'une tension sinusoïdale est effectué par le produit de deux tensions $u_1(t)$ et $u_2(t)$. Pour cela, on utilise un circuit intégré appelé **Multiplieur** (ex. AD633 JN).
- L'expression du signal modulé $u_s(t)$ à la sortie du multiplieur est : $u_s(t) = k \cdot u_1(t) \cdot u_2(t)$
 - avec k constante qui dépend du multiplieur, exprimée en V^{-1} .

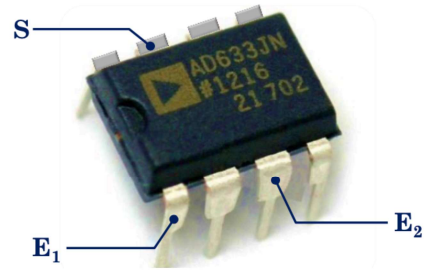
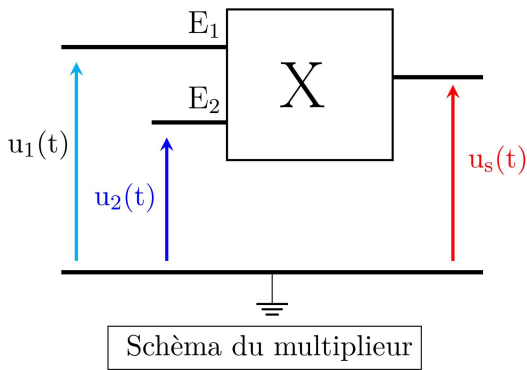
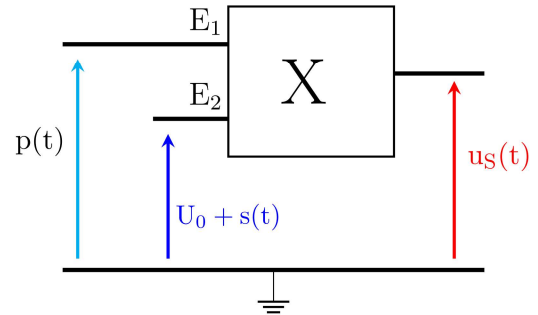


FIGURE X.1 – Multiplieur

3.2 Modulation d'amplitude d'une tension sinusoïdale.

- On applique à l'entrée E1, une tension p(t) qui représente l'onde porteuse de haute fréquence fp telle que : $p(t) = P_m \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$.
- On applique à l'entrée E2, une tension U0 + s(t) avec U0 la composante continue de la tension et s(t) le signal à transmettre de basse fréquence fs telle que : $s(t) = S_m \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)$.
- La tension de sortie us(t) :



$$u_s(t) = k \cdot p(t) \cdot [U_0 + s(t)]$$

$$u_s(t) = k \cdot P_m \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t) \cdot [U_0 + S_m \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)]$$

$$u_s(t) = k \cdot P_m \cdot U_0 \cdot [1 + \frac{S_m}{U_0} \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)] \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$$

$$u_s(t) = A \cdot [1 + m \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)] \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$$

$$u_s(t) = U_m(t) \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$$

L'amplitude de la tension modulée Um(t) telle que : $U_m(t) = A \cdot [1 + m \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)]$
 Avec : $A = k \cdot P_m \cdot U_0$ et $m = \frac{S_m}{U_0}$ appelé **taux de modulation**.

3.3 Taux de modulation.

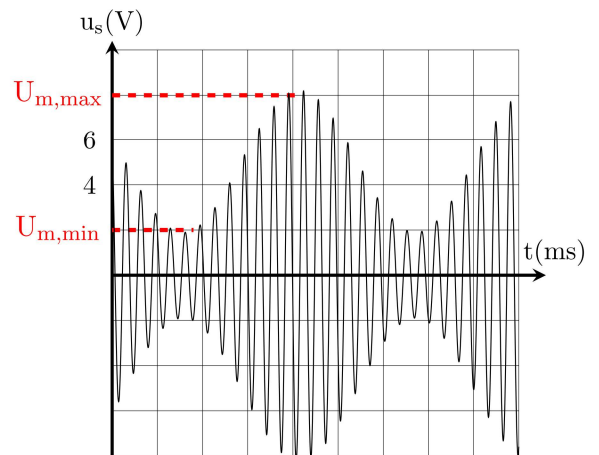
On a : $U_m(t) = A \cdot [1 + m \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)]$

L'amplitude modulée Um(t) varie entre des valeurs extrémales Um,min et Um,max, puisque $-1 \leq \cos(\alpha) \leq 1$

$$U_{m,min} = A(1 - m) \quad \text{et} \quad U_{m,max} = A(1 + m)$$

- $U_{m,max} + U_{m,min} = A(1 + m) + A(1 - m) = 2 \cdot A$
- $U_{m,max} - U_{m,min} = A(1 + m) - A(1 - m) = 2 \cdot A \cdot m$

Donc :
$$m = \frac{U_{m,max} - U_{m,min}}{U_{m,max} + U_{m,min}}$$



Exemple :

D'après la courbe, on a : $m = \frac{8 - 2}{8 + 2} = 0,6$

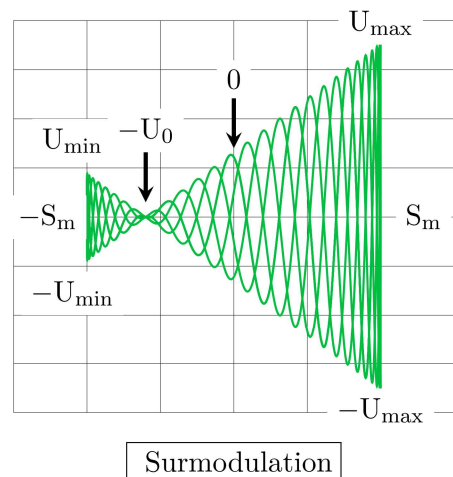
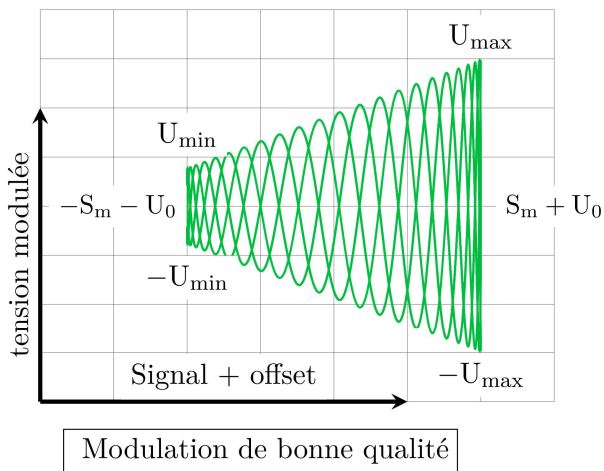
3.4 Qualité de modulation.

Pour avoir une modulation de bonne qualité, il faut satisfaire les conditions suivantes :

- La fréquence de la tension porteuse f_p doit être très grande devant la fréquence de la tension modulante f_s : $f_p \gg f_s$ (au moins $f_p > 10.f_s$).
- Le taux de modulation m inférieur à 1 : $m = \frac{S_m}{U_0} < 1$, pour éviter le phénomène de **surmodulation**.

Remarques

- La surmodulation est l'état où la forme de l'enveloppe du signal modulé $u_s(t)$ est différente de celle du signal modulant $s(t)$. Pour remédier à ce problème, on ajoute la composante continue U_0 au signal $s(t)$.
- L'oscilloscope, utilisé en mode XY, permet d'avoir un **trapèze** dans le cas d'une modulation de bonne qualité.



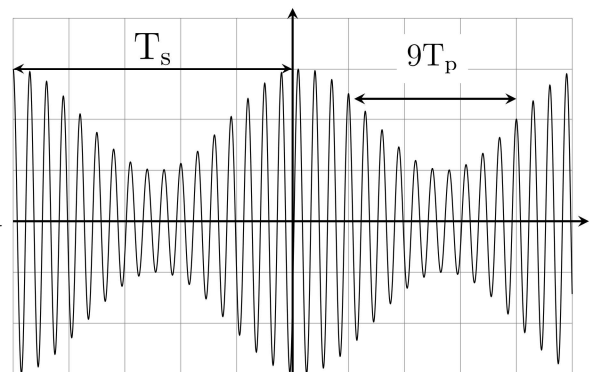
Application

On donne :

- Sensibilité horizontale : $S_h = 1 \text{ ms/div}$.
- Sensibilité verticale : $S_v = 2 \text{ V/div}$.

En exploitant la courbe ci-contre :

1. Calculer la fréquence de l'onde porteuse F et la fréquence du signal f .
2. Calculer le taux de modulation m .
3. Commenter la qualité de modulation.



Réponses

1. Pour calculer les fréquence F et f , on calcule d'abord les périodes T_p et T_s :

$$\bullet F = \frac{1}{T_p} = \frac{3}{10^{-3}} = 3000 \text{ Hz}$$

$$\bullet f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{5.10^{-3}} = 200 \text{ Hz}$$

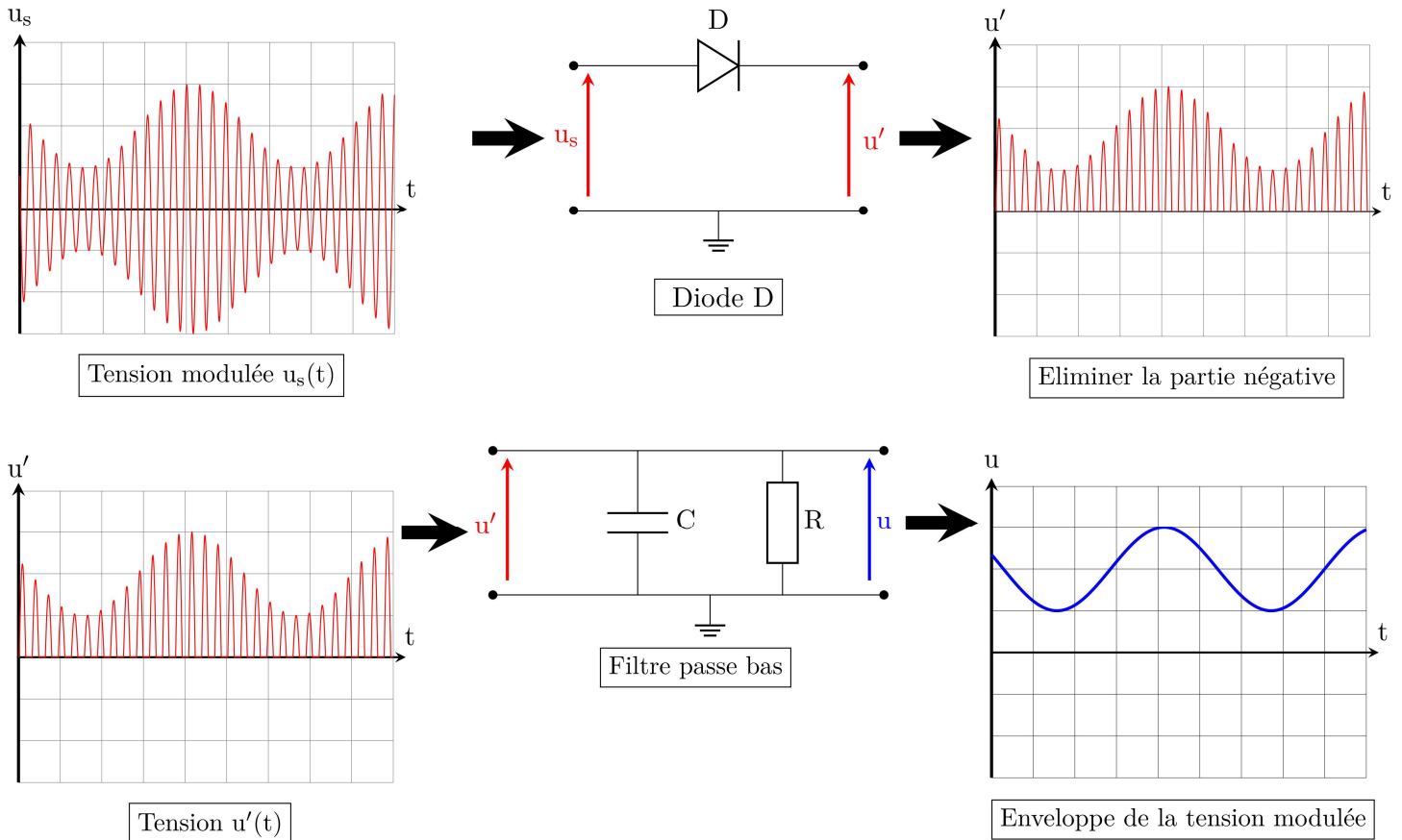
$$2. \text{ Taux de modulation : } m = \frac{U_{m,\max} - U_{m,\min}}{U_{m,\max} + U_{m,\min}} = \frac{6 - 2}{6 + 2} = 0,5$$

3. On a : $m < 1$ et $F \gg f \Rightarrow$ Modulation de bonne qualité.

4 Démodulation.

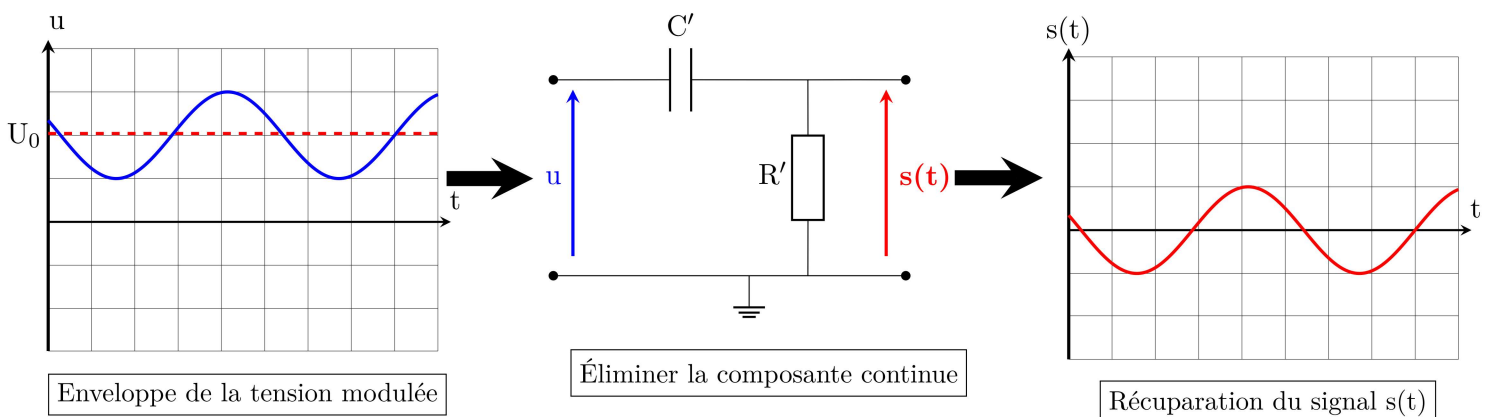
4.1 Détecteur d'enveloppe.

- Le détecteur d'enveloppe est un quadripôle, qui permet d'éliminer la partie négative de la tension modulée $u_s(t)$ grâce à la diode D, et le dipôle RC **parallèle** permet d'obtenir une tension identique à l'enveloppe $s(t)$.
- Pour obtenir un bon détecteur d'enveloppe, il faut que $\tau = RC$ vérifie la condition : $T_p \ll RC < T_s$ telle que T_p est la période de la tension modulée $u_s(t)$ et T_s est la période du signal $s(t)$.



4.2 Filtre RC série passe-haut.

- Le filtre passe-haut est un montage qui ne permet le passage que des signaux de haute fréquence. (ex. filtre RC série)
- Le dipôle RC série (passe-haut) empêche le passage des tensions continues.
- La tension u obtenue à la sortie du détecteur d'enveloppe contient une composante continue U_0 qui sera éliminée par le filtre passe-haut.



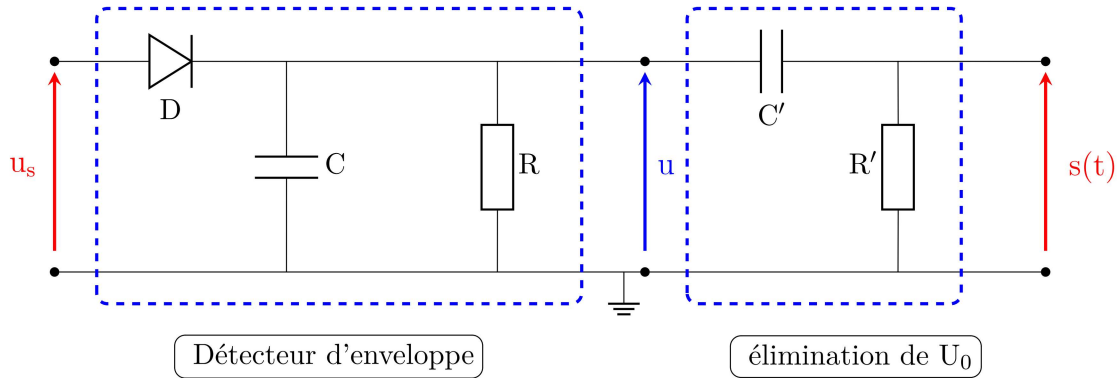
4.3 Circuit du démodulation.

Le circuit de la démodulation est l'association en parallèle respective des deux montages précédents.

- Le détecteur d'enveloppe de la tension modulée, la détection est meilleure pour la condition :

$$T_p \ll \tau = RC < T_s$$

- Éliminer la composante continue U_0 via un filtre R'C' passe-haut.



5 Réalisation d'appareil de réception par modulation AM.

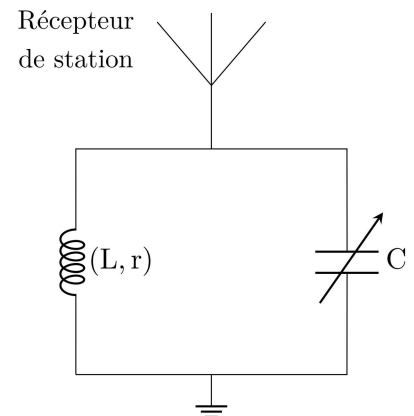
5.1 Circuit parallèle LC passe-bande.

- Le circuit parallèle LC est un filtre passe-bande, qui ne permet le passage que d'un intervalle de fréquences autour de la fréquence propre f_0 du circuit LC.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

- Lorsque le circuit LC est relié à une antenne, on peut sélectionner une station telle que la fréquence soit correspondante à la fréquence de la station, en agissant sur la capacité C du condensateur ou l'inductance L de la bobine (contenant un entrefer) : $f_0 = f_p$

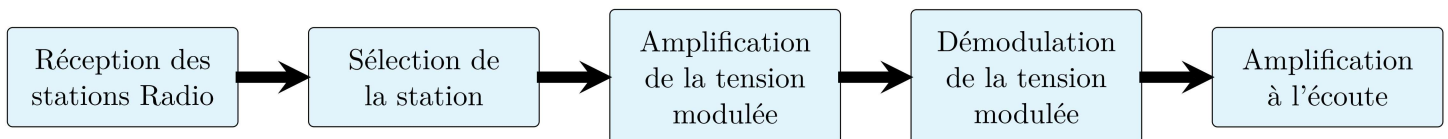
* f_0 fréquence propre du circuit LC et f_p fréquence de l'onde porteuse.

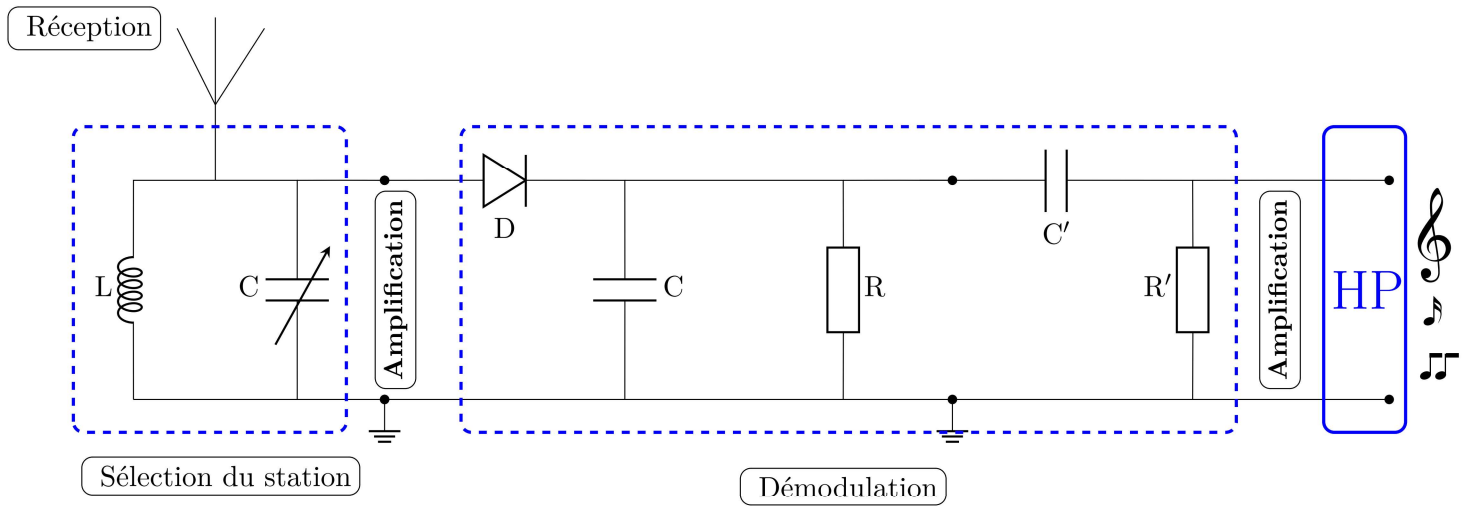


5.2 Réalisation d'un récepteur radio simple.

Pour recevoir des stations radio envoyées sur les ondes porteuses modulées en amplitude AM, on utilise une série électronique formée essentiellement de :

- Antenne pour recevoir les ondes électromagnétiques.
- Circuit LC pour sélectionner la fréquence de l'onde porteuse.
- Circuit d'amplification, Pour amplifier l'onde porteuse.
- Circuit de démodulation.
- Amplification à l'écoute.





Annexe : analyse spectrale

On a : $u_s(t) = k.p(t) \cdot [U_0 + s(t)] = A[m \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t) + 1] \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$

$$u_s(t) = A \cdot m \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t) + A \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$$

Rappel : $\cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2} \cos(a + b) + \frac{1}{2} \cos(a - b)$

$$u_s(t) = \frac{A \cdot m}{2} \cdot \cos(2\pi(f_p - f_s) \cdot t) + \frac{A \cdot m}{2} \cdot \cos(2\pi(f_p + f_s) \cdot t) + A \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$$

