

## TP 9 – Transmission de l'information : Modulation et démodulation d'amplitude

---

La transmission à longue distance par voie hertzienne d'un signal (émission radio par exemple) exige une fréquence élevée. En particulier, l'énergie rayonnée par un dipôle émetteur (correspondant à une portion d'antenne) varie comme la puissance quatrième de la fréquence (cf ChEM8). Le signal véhiculant l'information à transmettre est, en général, de trop faible fréquence. On utilise alors un signal de fréquence beaucoup plus élevée, appelé **porteuse** (*par exemple, les émetteurs de radiodiffusion FM utilisent des porteuses de fréquences proches de 100 MHz*). Le signal qui contient l'information est appelé **signal modulant** : il est utilisé pour moduler une des grandeurs caractéristiques (amplitude (AM), fréquence (FM)) de la porteuse.

Dans ce TP, on étudie la **modulation en amplitude (AM)\*** : l'**amplitude de la porteuse** (signal Haute Fréquence) **varie à l'image du signal modulant** (informatif Basse Fréquence), cf DOC 1.

\* la modulation AM est plus simple mais moins robuste au bruit lors de la transmission que la modulation FM.

### Problématique :

Quels « traitements » sont adaptés pour transmettre et recevoir un signal informatif BF par modulation d'amplitude ?

### Compétences expérimentales au programme :

Mesurer une tension : mesure directe à l'oscilloscope numérique.	Définir la nature de la mesure effectuée (valeur efficace, valeur moyenne, amplitude, valeur crête à crête,...)
Produire un signal électrique analogique périodique simple à l'aide d'un GBF. Agir sur un signal électrique par filtrage.	Obtenir un signal de valeur moyenne, de forme, d'amplitude et de fréquence données. Mettre en œuvre les fonctions de base de l'électronique.
Fréquence : mesure directe à l'oscilloscope ou via une carte d'acquisition. Analyse spectrale.	Choisir de façon cohérente la fréquence d'échantillonnage, et la durée totale d'acquisition. Effectuer l'analyse spectrale d'un signal périodique à l'aide d'une carte d'acquisition.

### Objectifs :

1. Elaborer et caractériser un signal modulé en amplitude.
2. Démoduler ce signal et comparer le résultat au signal informatif de départ.

////////////////////////////////////  
/ **A faire pour le jeudi 09/01 :** \

**Lire entièrement le sujet et répondre aux questions** ✍.

////////////////////////////////////

# A) Elaboration et caractérisation du signal modulé en amplitude

## 1) Signal informatif (BF) et porteuse (HF)

Le **signal informatif à transmettre**, appelé **signal modulant BF**, correspond à la tension :

$$u(t) = U_m \cos(2\pi f t) \quad \text{avec l'amplitude } U_m = 2,0 \text{ V et } f = 100 \text{ Hz.}$$

La **porteuse HF** est de la forme :

$$u_p(t) = U_{pm} \cos(2\pi f_p t) \quad \text{avec l'amplitude } U_{pm} = 4,0 \text{ V et } f_p = 10 \text{ kHz i.e. } f_p \gg f.$$

Avant de réaliser l'opération de modulation, on ajoute au signal modulant BF une **composante continue**  $U_0 = 3 \text{ V}$ .

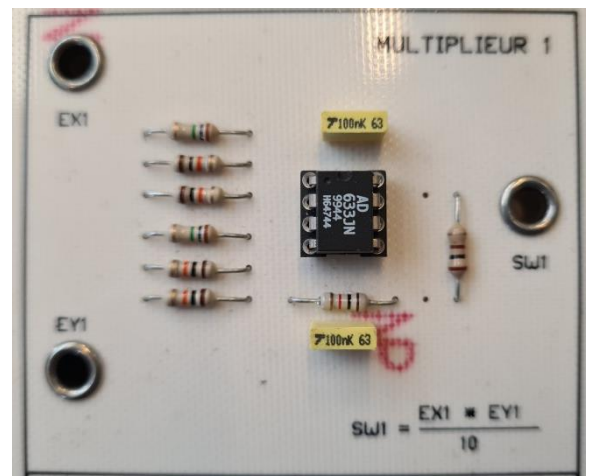
✎ Régler l'un des GBF pour qu'il délivre le signal modulant BF décalé de  $U_0$  et l'autre GBF pour qu'il délivre la tension porteuse HF.

## 2) Obtention du signal modulé en amplitude - Multiplieur

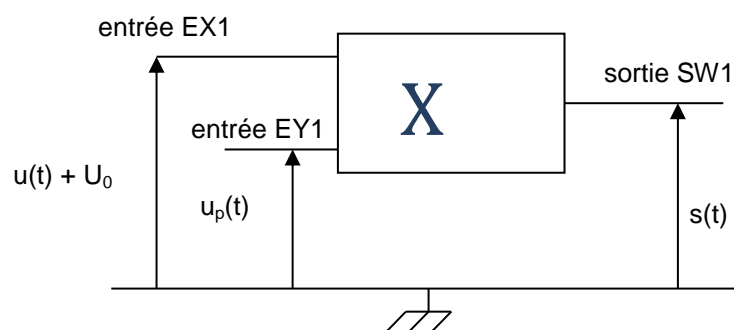
Comme au TP « Electronique numérique », on utilise un multiplieur présent sur une plaquette préalablement alimentée en  $\pm 15 \text{ V}$ .

### ✎ Utilisation du multiplieur :

- Alimenter la plaquette (bornes +15V, -15V) avec l'alimentation de tension continue. On connectera leurs masses (bornes noires). On pensera à connecter les masses des différents appareils utilisés au cours du TP (GBF, oscilloscope...).
- Connecter le signal modulant BF sur la voie EX1 et la porteuse sur la voie EY1.
- Le signal modulé correspond à la borne de sortie SW1.



### Schéma correspondant :



✎ Visualiser sur l'oscilloscope :

- le signal modulant BF  $u(t)$  sur la voie 1 ;
- le signal modulé  $s(t)$  sur la voie 2.
- la porteuse  $u_p(t)$  sur la voie 3.

### 3) Caractérisation du signal modulé en amplitude

Il s'agit de confronter les résultats théoriques rassemblés dans le DOC 1 aux résultats expérimentaux.

#### Taux de modulation

Visualiser en mode XY à l'oscilloscope : X = signal modulant BF et Y = signal modulé.

1. Déterminer le taux de modulation  $m$ . Analyser le résultat.

#### Analyse spectrale du signal modulé

2. En partant de l'expression  $s(t) = A \cdot [1 + m \cos(2\pi f t)] \cdot \cos(2\pi f_p t)$ . Justifier les 3 fréquences apparaissant dans le spectre du signal  $s(t)$  donné dans le DOC 1.

Avec Latis Pro, faire l'acquisition du signal modulant BF et du signal modulé.

Vous choisirez une durée d'acquisition correspondant à 2 périodes du signal modulant BF.

3. Comment doit-on choisir la fréquence d'échantillonnage ? Noter la valeur retenue.

Visualiser les spectres des 2 signaux.

4. Analyser les spectres obtenus. L'opération réalisée par le multiplieur est-elle linéaire ? Justifier.

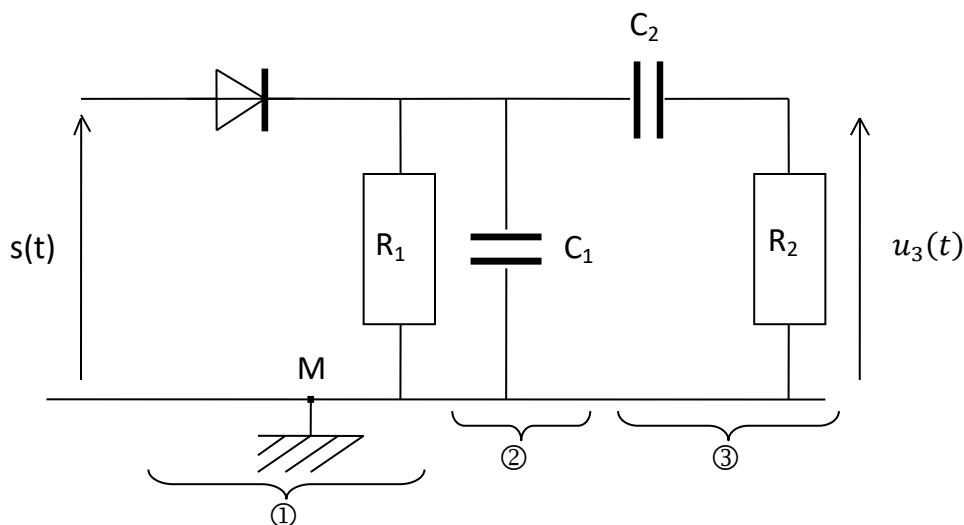
5. Les caractéristiques (fréquences, amplitudes, composante continue) choisies permettent-elles d'obtenir une modulation d'amplitude de bonne qualité ? Justifier.

### B) Démodulation d'amplitude par détection d'enveloppe

Une fois le signal modulé transmis, on souhaite récupérer l'information initiale correspondant au signal  $u(t)$ . Pour cela, on réalise la « démodulation » du signal modulé, constituée de 3 étapes :

- ① la suppression des alternances négatives de la tension modulée  $s(t)$  ;
- ② la suppression de la porteuse  $u_p(t)$  ;
- ③ la suppression de la composante continue  $U_0$ .

#### Montage de démodulation :



## 1) Montage redresseur ①

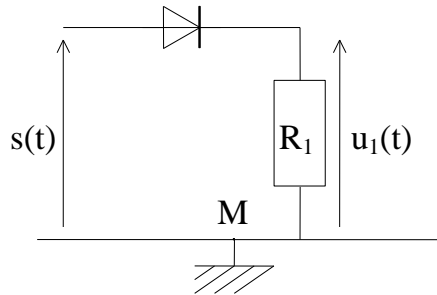


Figure 1

Cette partie du circuit met en jeu une diode, dipôle non linéaire et polarisé, cf DOC 2.

🔧 6. Donner les schémas équivalents d'une diode idéale lorsqu'elle est bloquante et passante.

🔧 7. Proposer un protocole mettant en évidence le caractère non linéaire de la diode.

👉 Réaliser le montage de la figure 1 avec  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ .

👉 Visualiser sur l'oscilloscope :

- le signal modulant BF  $u(t)$  sur la voie 1 ;
- le signal modulé  $s(t)$  sur la voie 2.
- la tension  $u_1(t)$  sur la voie 3.

👉 8. Commenter.

👉 9. Pourquoi est-il suffisant de s'intéresser à la seule partie positive de la tension  $s(t)$  ?

## 2) Détecteur d'enveloppe ②

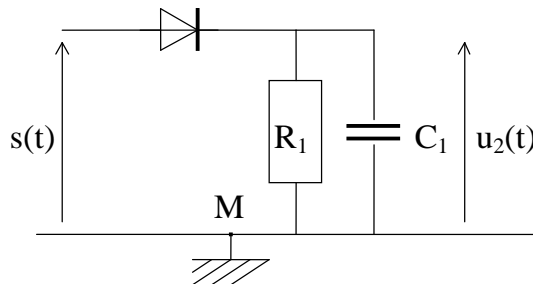


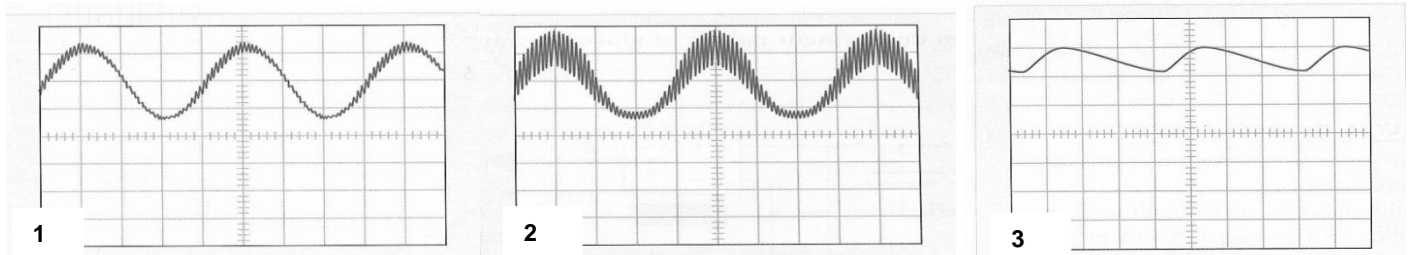
Figure 2

👉 Ajouter au montage précédent un condensateur de capacité variable  $C_1$ .

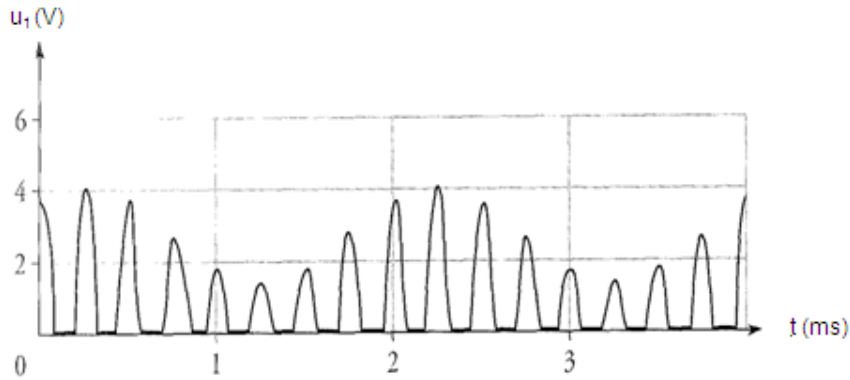
👉 Visualiser sur l'oscilloscope :

- le signal modulant BF  $u(t)$  sur la voie 1 ;
- le signal modulé  $s(t)$  sur la voie 2.
- la tension  $u_2(t)$  sur la voie 3 pour des valeurs de capacités variant entre : **0,01  $\mu\text{F}$  et 1  $\mu\text{F}$ .**

👉 10. Chacune des courbes ci-dessous correspond à différentes valeurs de  $C_1$ . Donner une valeur de la capacité  $C_1$  pour laquelle on observe chacune de ces courbes. Quelle courbe faut-il obtenir pour que le circuit soit effectivement un « détecteur d'enveloppe » ? Relever la valeur de la capacité  $C_1$  retenue. **Par la suite, vous utiliserez un condensateur de capacité fixe égale à la valeur retenue de  $C_1$ .**



➡ 11. Représenter, sur le schéma ci-dessous, ce qui se passe au niveau du détecteur d'enveloppe.



➡ 12. Pour les trois valeurs différentes de  $C_1$  relevées qt°10, comparer la valeur de la constante de temps  $\tau_1 = R_1 C_1$  avec les périodes  $T_p$  de la porteuse et  $T$  du signal modulant BF.

👉 Avec Latis Pro, faire l'acquisition du signal modulant BF et de la tension  $u_2(t)$ . Visualiser les spectres des 2 signaux.

➡ 13. Commenter.

➡ 14. Quelles conditions (*inégalités*) doivent être vérifiées par  $\tau_1$  pour obtenir un signal  $u_2(t)$  qui reflète au mieux le signal modulant BF initial.

### 3) Suppression de la composante continue ③

👉 15. Quelle est nature du filtre permettant de supprimer la composante continue  $U_0$  de la tension  $u_2(t)$  ? Vérifier que la partie ③ de la figure 3 assure ce rôle.

👉 16. Quelle condition doit être vérifiée par les valeurs de  $R_2$  et  $C_2$  pour obtenir un signal  $u_3(t)$  qui reflète au mieux le signal modulant BF initial ?

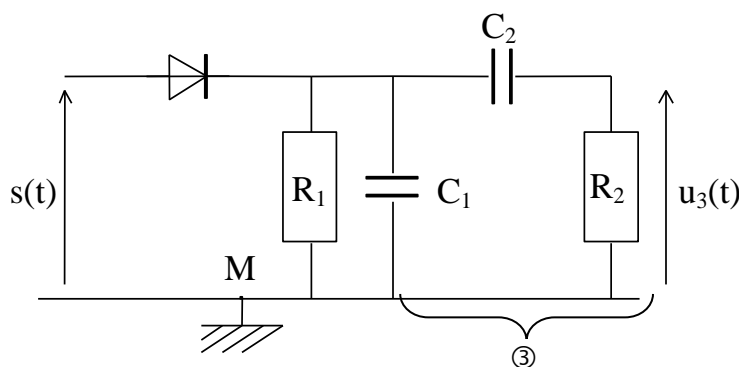


Figure 3

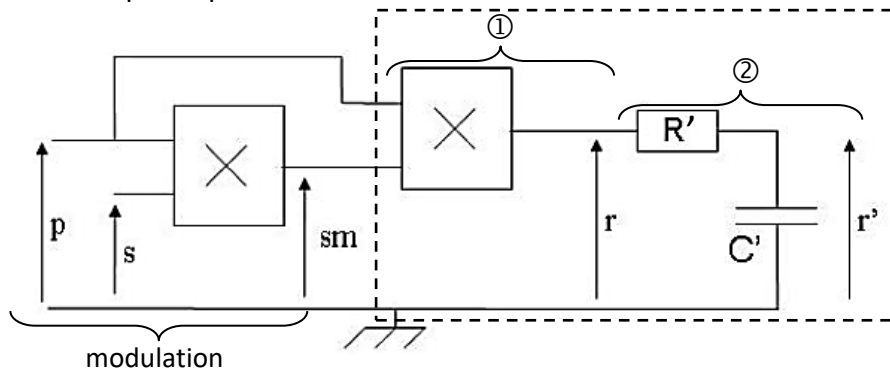
👉 Ajouter au montage précédent une résistance  $R_2$  variable et un condensateur de capacité variable  $C_2$ .

👉 Visualiser à l'oscilloscope le signal modulant  $u(t)$  sur la voie 1 et le signal démodulé  $u_3(t)$  sur la voie 2.

➡ 17. Noter les valeurs de  $R_2$  et  $C_2$  qui, d'après l'expérience, sont adaptées pour démoduler. Commenter.

## C) Démodulation d'amplitude par détection synchrone

On peut utiliser un 2<sup>nd</sup> multiplieur pour démoduler selon le circuit ci-dessous :



Les notations du circuit correspondent aux grandeurs suivantes :

$p(t) = U_{pm} \cos(2\pi f_p t)$  la **porteuse**

$s(t) = U_m \cos(2\pi f t + \varphi_0) + U_0$  le **signal modulant BF décalé par la composante continue  $U_0$**

$sm(t) = k \cdot p(t) \cdot s(t) = A \cdot [1 + m \cos(2\pi f t)] \cos(2\pi f_p t)$  le **signal modulé**.

On a  $r(t) = k \cdot p(t) \cdot sm(t) = k \cdot U_{pm} \cdot A [1 + m \cos(2\pi f t)] \cos^2(2\pi f_p t)$

✍️ 18. Montrer que l'on peut écrire  $r(t)$  sous la forme :

$$r(t) = \frac{k \cdot U_{pm} \cdot A}{2} \left[ 1 + m \cos(2\pi f t) + \cos(2\pi \cdot 2 \cdot f_p t) + \frac{m}{2} \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_p - f) t) + \frac{m}{2} \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_p + f) t) \right]$$

$r(t)$  est ensuite injecté dans le filtre passe-bas  $R'C'$ , dont la fréquence de coupure  $f_c$  est telle que :

$$f < f_c \ll 2 \cdot f_p - f$$

✍️ 19. Justifier que la tension de sortie du filtre  $r'(t)$  permet de reconstituer le signal modulant :

$$r'(t) = \frac{k \cdot U_{pm} \cdot A}{2} [1 + m \cos(2\pi f t)]$$

👉 Câbler la partie ① du montage et avec Latis Pro, faire l'acquisition de  $r(t)$  et visualiser son spectre.

👉 20. Commenter.

✍️ 21. Proposer des valeurs adaptées pour  $R'$  et  $C'$ .

👉 Câbler la partie ② du montage et avec Latis Pro, acquérir les signaux modulant BF et démodulé  $r'(t)$ .

👉 22. Commenter.

👉 23. Choisir un taux de modulation  $m > 1$  et analyser à nouveau les signaux modulant BF et démodulé  $r'(t)$ . Quel est l'avantage de la démodulation par détection synchrone par rapport à la démodulation par détection de crête ?

## DOC 1 : Modulation d'amplitude

On se limite à des signaux sinusoïdaux, sachant que le signal réel peut toujours être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux (cf ChE1).

### ◆ Expression mathématique du signal à transmettre

Le signal informatif à transmettre, appelé **signal modulant BF**, correspond à la tension :

$$u(t) = U_m \cos(2\pi f t + \varphi_0)$$
 avec  $U_m$  l'amplitude,  $f$  la fréquence et  $\varphi_0$  la phase à l'origine.

Dans la suite, on pose  $\varphi_0 = 0$ .

La **porteuse** est de la forme :

$$u_p(t) = U_{pm} \cos(2\pi f_p t) \quad \text{avec } f_p \gg f.$$

Afin de moduler le message à transmettre, on peut modifier :

- la fréquence de la porteuse : on parle de modulation de fréquence ;
- l'amplitude de la porteuse : on parle de **modulation d'amplitude étudiée dans ce TP. C'est dans l'amplitude du signal modulé que l'on retrouve l'information à transmettre.**

Avant de réaliser l'opération de modulation en amplitude, on ajoute au signal modulant BF une **composante continue**  $U_0$ .

### ◆ Signal modulé en amplitude (produit de la porteuse et du signal à transmettre)

La modulation d'amplitude est obtenue par multiplication des tensions  $u_p(t)$  et  $[u(t) + U_0]$ .

Un circuit électronique appelé multiplieur permet d'obtenir une tension  $s(t)$ , tension modulée, proportionnelle au produit des tensions qui lui sont appliquées :

$$s(t) = k \cdot u_p(t) \cdot [u(t) + U_0]$$

Avec  $k$  est un coefficient caractéristique du circuit multiplieur utilisé.

Ainsi :

$$\begin{aligned} s(t) &= k \cdot U_{pm} \cos(2\pi f_p t) \cdot U_0 + k \cdot U_{pm} \cos(2\pi f_p t) \cdot U_m \cos(2\pi f t) \\ \Leftrightarrow s(t) &= k \cdot U_{pm} \cdot U_0 \cos(2\pi f_p t) \left[ 1 + \frac{U_m}{U_0} \cos(2\pi f t) \right] \end{aligned}$$

On pose  $A = k \cdot U_{pm} \cdot U_0$  et  $m = \frac{U_m}{U_0}$  appelé **taux de modulation** il vient :

$$s(t) = A \cdot [1 + m \cos(2\pi f t)] \cos(2\pi f_p t) = S_m(t) \cos(2\pi f_p t)$$

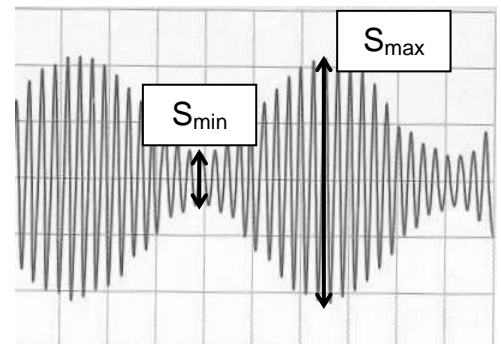
avec  $S_m(t) = A \cdot [1 + m \cos(2\pi f t)]$

On identifie  $S_m(t)$  comme étant l'**amplitude du signal modulé** : cette amplitude dépend du temps, elle oscille à la fréquence du signal modulant BF entre deux valeurs  $S_{min}$  et  $S_{max}$  qui sont fonctions de  $U_0$  et  $U_m$  :

$$S_{min} = A \cdot [1 - m] \quad \text{et} \quad S_{max} = A \cdot [1 + m]$$

Ainsi :

$$m = \frac{U_m}{U_0} = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}}$$

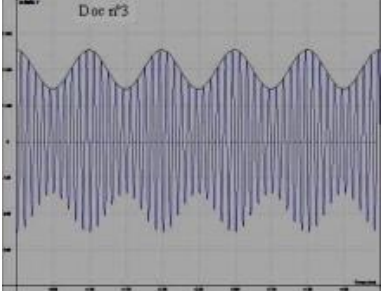
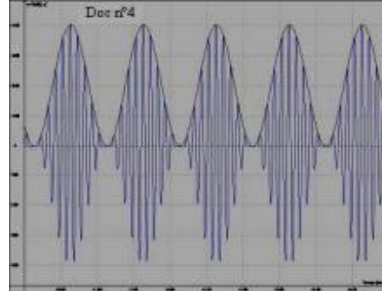
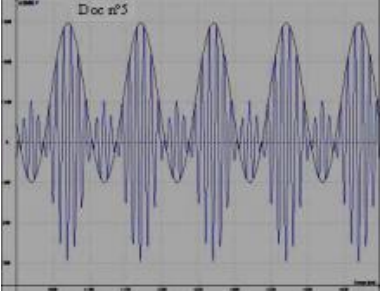


### ◆ Influence du taux de modulation

La modulation est de bonne qualité lorsque  $m < 1$ .

La tension  $U_0$  joue un rôle important dans la qualité de la modulation. Pour que la tension modulée  $s(t)$  contienne intégralement l'information de la tension modulante, il faut que le terme  $[u(t) + U_0]$  conserve le même signe au cours du temps donc  $U_0 > U_m$ .

Si  $[u(t) + U_0]$  change de signe (pour  $m > 1$ ) les parties inférieures et supérieures de l'enveloppe du signal modulé, qui sont symétriques, vont se croiser. Les enveloppes ainsi obtenues ne permettent plus de retrouver le signal à transmettre d'origine. Dans ces conditions, on a **surmodulation**.

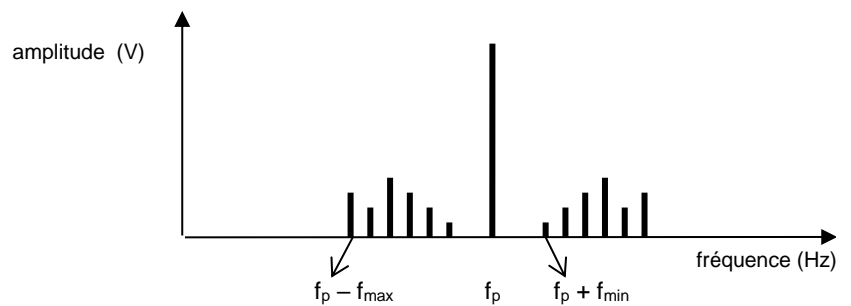
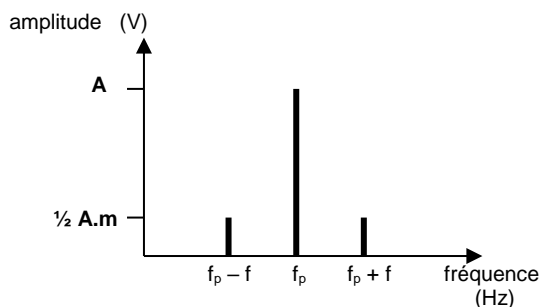
	① $U_m = 1 V$ et $U_0 = 2 V$	② $U_m = 2 V$ et $U_0 = 2 V$	③ $U_m = 2 V$ et $U_0 = 1 V$
Taux de modulation	$m = 0,5 < 1$	$m = 1$	$m = 2 > 1$
Courbe obtenue			

♦ **Analyse spectrale du signal modulé  $s(t)$**

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

Une bande de fréquence de largeur minimale  $2 \times f$ , centrée sur la fréquence de la porteuse  $f_p$ , est nécessaire à la propagation et à la réception du signal.

En radio, les signaux de la voix ont une fréquence comprise entre  $f_{\min} = 20 \text{ Hz}$  et  $f_{\max} = 20 \text{ kHz}$  (ou moins si on diminue la qualité). Le spectre en fréquence de la tension modulée occupe une bande de fréquences de largeur  $2 \times f_{\max}$  centrée sur la fréquence de la porteuse  $f_p$ . Chaque radio ayant sa fréquence de porteuse, on en déduit l'écart minimal de 40 kHz entre deux porteuses.



**DOC 2 : Caractéristique d'une diode – Modèle de la diode idéale**

Caractéristique d'une diode :

$u_s$  est la tension seuil de la diode,  $u_s \geq 0$  et  $r_d$  est sa résistance interne.

Une **diode idéale** est un modèle tel que :  $r_d = 0$  et  $u_s = 0$ .

