Chapitre 2 : La modulation d'amplitude

I. Principe de la modulation d'une tension sinusoïdale

I.1. Expression d'une tension sinusoïdale

Une tension sinusoïdale s'écrit sous la forme suivante :

$$\mathbf{u(t)} = \mathbf{U_m} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot \mathbf{t} + \varphi_0)$$

u(t), en **V**, tension sinusoïdale
U_m, en **V**, amplitude de la tension sinusoïdale
f, en **Hz**, fréquence de la tension sinusoïdale
t, en **s**, temps
φ_0, en **rad**, phase à l'origine des dates

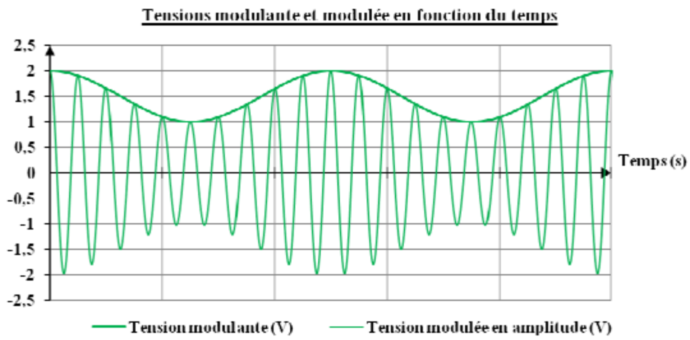
Dans toute la suite du chapitre nous considèrerons que la phase à l'origine des dates est nulle : $\varphi_0 = 0$ et donc l'expression de la tension sinusoïdale est : $\mathbf{u(t)} = \mathbf{U_m} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot \mathbf{t})$

I.2. Principe

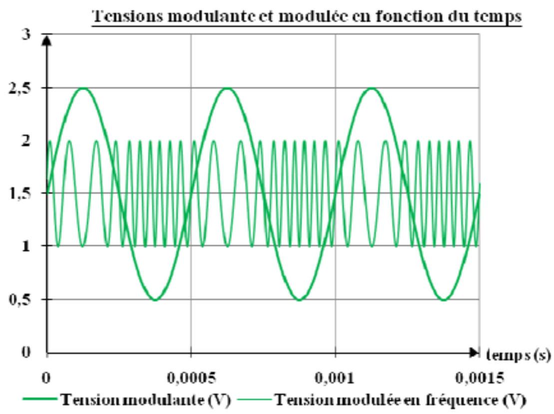
Dans le chapitre précédent nous avons vu que les ondes de basses fréquences ne se transmettent pas bien (amortissements importants → faible portée, dimension des antennes trop importantes…).
Pour remédier à ces problèmes, on réalise une **modulation** qui consiste à **coupler** un **signal de haute fréquence (HF)** (support) avec un **signal de basse fréquence (BF)** (information à transmettre).
Le **signal de haute fréquence** est appelé **onde porteuse** ou « porteuse », le **signal de basse fréquence** est appelé **signal modulant**.
La porteuse assure le transport de l'information du signal modulant.

La modulation d'une porteuse sinusoïdale d'expression $\mathbf{v(t)} = \mathbf{V_m} \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot \mathbf{t})$ consiste à **faire varier** :

- Soit **l'amplitude de la porteuse V_m** (en V) : on parle alors de **modulation d'amplitude** ;



- Soit **la fréquence de la porteuse F_P** (en Hz) : on parle alors de **modulation de fréquence**.

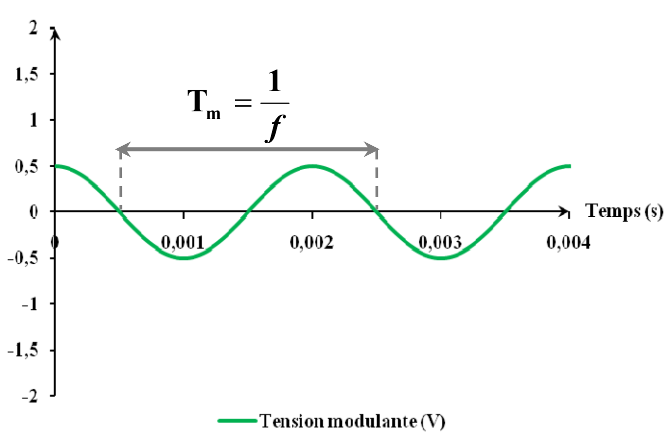


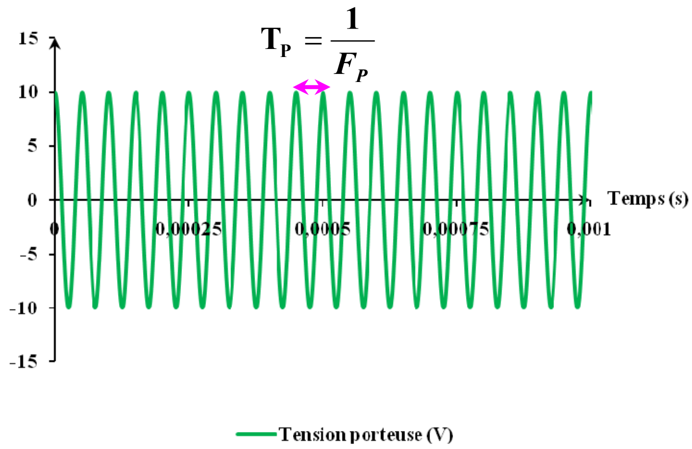
II. La modulation d'amplitude (TP N° 7)

Lorsqu'on effectue la modulation d'amplitude d'un signal sinusoïdal de haute fréquence (porteuse) celui-ci est modifié, on dit **modulé**, afin que son **amplitude varie comme celle du signal BF**.

II.1. Multiplication de deux signaux sinusoïdaux

Pour réaliser la modulation en amplitude d'une porteuse sinusoïdale de fréquence $\mathbf{F_P}$ par une tension modulante de fréquence $\boldsymbol{f}$, on utilise un **multiplieur** de tension (circuit intégré).
La fréquence de la porteuse doit être très supérieure à celle du signal modulant : $\boldsymbol{f \ll F_P}$





Sur la voie X_1 du multiplieur on fait entrer le signal modulant **u(t)** (de basse fréquence, $\boldsymbol{f}$) auquel on ajoute une tension continue de décalage notée $\mathbf{U_0}$ soit une tension égale à $\mathbf{u(t) + U_0}$;

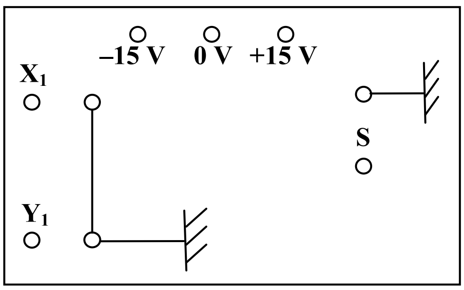
Sur la voie Y_1 du multiplieur on fait entrer le signal porteur **v(t)** (de haute fréquence, $\mathbf{F_P}$) ;

Le multiplieur de tension donne sur la voie de sortie S une tension **s(t)** qui est **proportionnelle au produit des deux tensions** $\mathbf{(u(t) + U_0)}$ **et v(t)**.

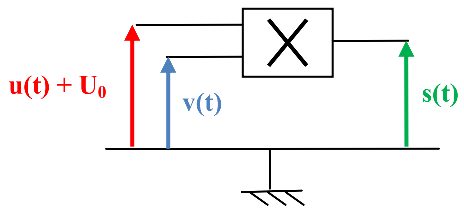
La **tension modulée** en amplitude a pour expression :

$$\mathbf{s(t) = k \times (u(t) + U_0) \times v(t)}$$

u(t), en **V**, tension sinusoïdale de basse fréquence = tension modulante
$\mathbf{U_0}$ en **V**, tension de décalage
v(t), en **V**, tension sinusoïdale de haute fréquence = porteuse
k, en $\mathbf{V^{-1}}$, constante de proportionnalité $k \approx 0{,}1\ V^{-1}$



Le multiplieur



Schéma

L'expression du signal de sortie s(t) est :

$$s(t) = k \times \left(U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) + U_0\right) \times V_m \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t)$$

avec $\mathbf{U_m}$ amplitude et $\boldsymbol{f}$ fréquence du signal modulant ;
$\mathbf{V_m}$ amplitude et $\boldsymbol{F_P}$ fréquence de la porteuse.

En développant on obtient : $s(t) = k \cdot U_m \cdot V_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t) + k \cdot U_0 \cdot V_m \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t)$

En factorisant par le terme $k \cdot U_0 \cdot V_m \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t)$ on obtient :

$$s(t) = k \cdot U_0 \cdot V_m \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t) \times \left[1 + \frac{U_m}{U_0} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)\right]$$

Que l'on peut mettre sous la forme : $\mathbf{s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t) \times [1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)]}$

avec $\mathbf{A = k \cdot U_0 \cdot V_m}$ exprimé en **V**

$\mathbf{m = \frac{U_m}{U_0}}$ appelé **taux de modulation** et **sans unité**

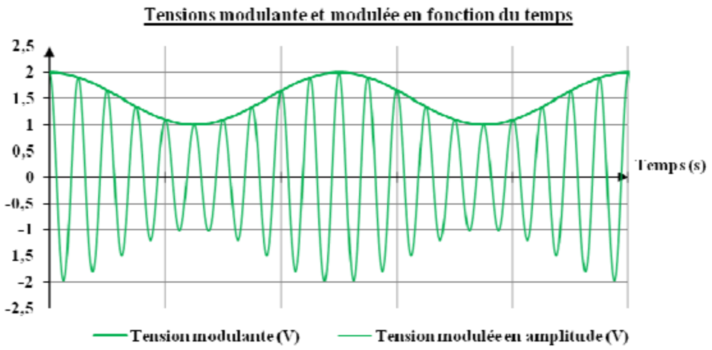
On peut alors interpréter le signal de sortie s(t) comme étant le signal de la porteuse dont l'amplitude V_m est remplacée par le terme $\mathbf{A \times [1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)] = S_m(t)}$ correspondant à une **amplitude modulée par le signal informatif**.

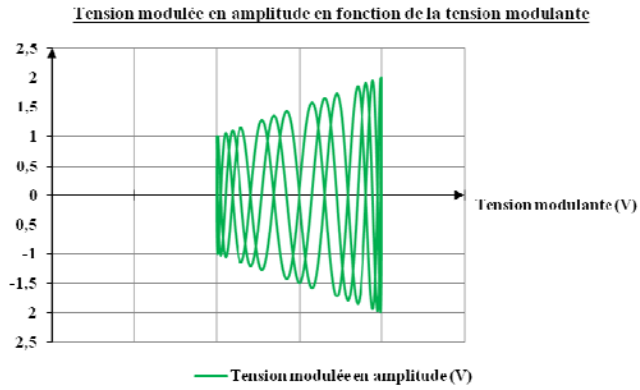
L'expression de la tension modulée s(t) devient alors : $\mathbf{s(t) = S_m(t) \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t)}$

II.2. Qualité de la modulation et taux de modulation

En faisant varier le taux de modulation **m** (en modifiant l'amplitude du signal modulant U_m ou la valeur de la tension de décalage U_0), on peut obtenir 3 types de signaux en sortie du multiplieur (tensions modulées) :

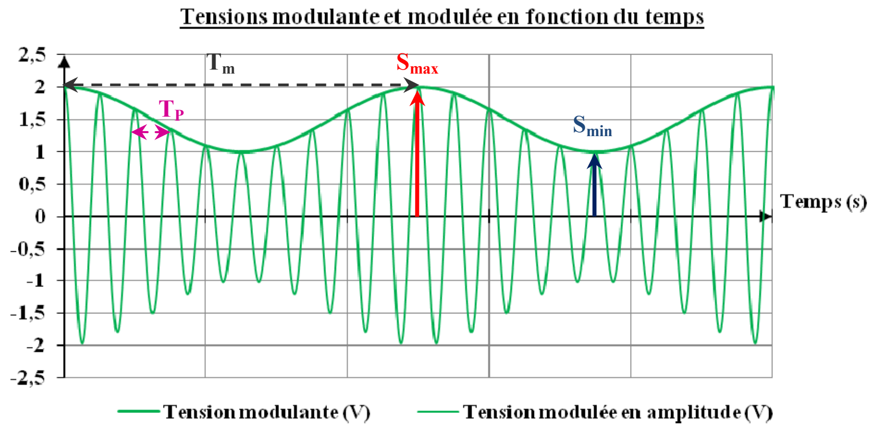
- **Cas où m < 1 :**





L'enveloppe (positive) de la tension modulée reproduit bien celle de la tension modulante.
En **mode XY** de l'oscilloscope, on obtient un **trapèze plein**.
Dans ce cas la **modulation d'amplitude** est de **bonne qualité**.

L'amplitude des oscillations du signal modulé s(t) varie entre deux valeurs notées $\mathbf{S_{min}}$ et $\mathbf{S_{max}}$.



La détermination du taux de modulation **m** peut se faire par lecture graphique de l'oscillogramme :

$$\boxed{\mathbf{m = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}}}}$$

On sait que $\mathbf{s(t)} = \mathbf{S_m(t) \cdot \cos(2\pi \cdot \mathit{F_P} \cdot t)}$

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

Comme la fonction cosinus varie entre +1 et –1 alors :

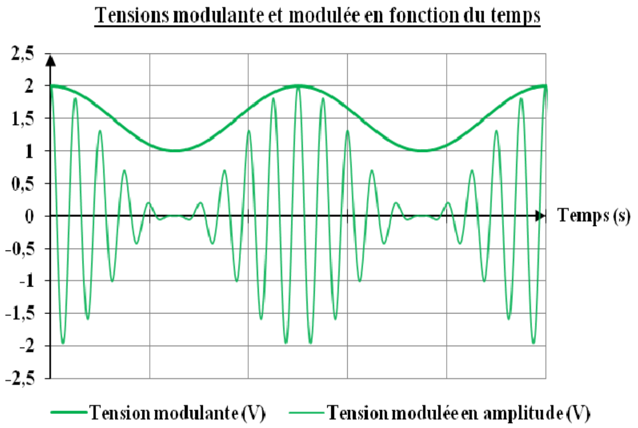
$S_{max} = A \cdot [1 + m]$ et $S_{min} = A \cdot [1 - m]$

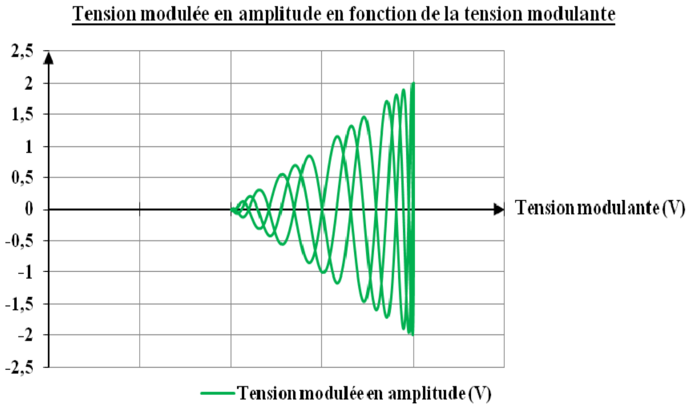
$S_{max} - S_{min} = A \cdot [1 + m] - A \cdot [1 - m] = \mathbf{2 \cdot A \cdot m}$

$S_{max} + S_{min} = A \cdot [1 + m] + A \cdot [1 - m] = \mathbf{2 \cdot A}$

$$\text{Soit } \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}} = \frac{2 \cdot A \cdot m}{2 \cdot A} = \mathbf{m}$$

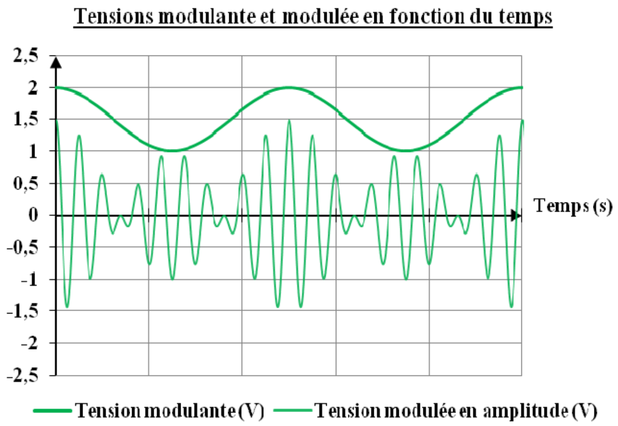
• **Cas où m = 1 :**

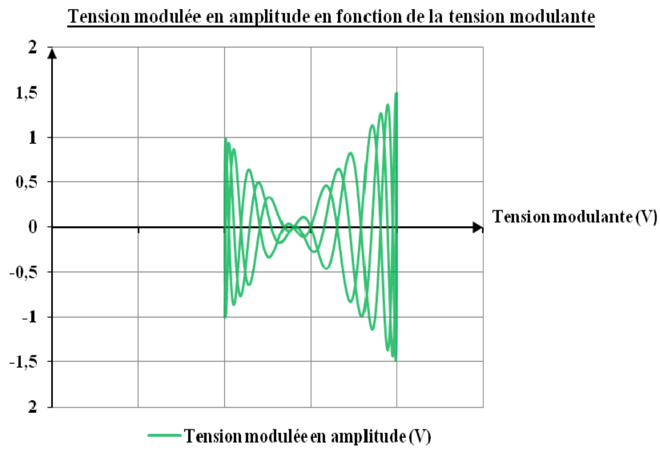




L'enveloppe (positive) de la tension modulée reproduit tout juste celle de la tension modulante.
Dans ce cas la **modulation d'amplitude** est dite **critique**.
En **mode XY** de l'oscilloscope, on obtient un **triangle plein**.

• **Cas où m > 1 :**





L'enveloppe (positive) de la tension modulée ne reproduit plus celle de la tension modulante.
Dans ce cas on parle de **surmodulation d'amplitude**.
En **mode XY** de l'oscilloscope, on obtient **deux triangles pleins avec un sommet commun**.

Une modulation d'amplitude sera de bonne qualité si $m \leq 1$ et si la fréquence de la porteuse est très supérieure à celle du signal modulant : $f \ll F_P$

II.3. Bande de fréquence pour la transmission du signal basse fréquence

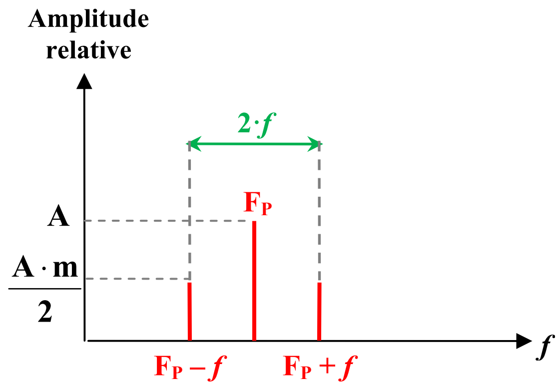
L'expression de la tension modulée peut encore s'écrire autrement en utilisant les relations trigonométriques :

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

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t) + A \cdot m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t)$$

Or $\cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot [\cos(2\pi \cdot (F_P + f) \cdot t) + \cos(2\pi \cdot (F_P - f) \cdot t)]$

Donc $\mathbf{s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot F_P \cdot t) + \frac{A \cdot m}{2} \cdot [\cos(2\pi \cdot (F_P + f) \cdot t) + \cos(2\pi \cdot (F_P - f) \cdot t)]}$



Ainsi la tension modulée s(t) est la somme de trois fonctions sinusoïdales de fréquence F_P, $F_P + f$ et $F_P - f$.

La différence $(F_P + f) - (F_P - f) = 2 \cdot f$ est appelée **largeur de bande**.

Pour transmettre et recevoir les informations d'un signal à l'aide d'une porteuse de fréquence $\mathbf{F_P}$, il est nécessaire d'avoir une bande de fréquence de largeur minimale $\mathbf{2 \cdot f}$ centrée autour de $\mathbf{F_P}$.

En modulation d'amplitude la largeur de bande autorisée est de 9 kHz (= $2 \cdot f$), ainsi pour les fréquences f > 4,5 kHz le signal ne peut être transmis et la qualité musicale en modulation d'amplitude est médiocre (cas des grandes et moyennes ondes).

Exemple : RTL émet sur FP = 242 kHz, la largeur de bande entraîne un encadrement de :
242 – 4,5 = 237,5 à 242 + 4,5 = 246,5 kHz.

Les largeurs de bande des différents émetteurs ne doivent pas se chevaucher sinon il y aurait brouillage d'une station par une autre.