

A. Principe

La modulation est obtenue par la combinaison de deux ondes.

⇒ La première onde est la **porteuse**.

C'est une onde sinusoïdale de haute fréquence.

Elle est produite par l'émetteur qui délivre une tension de la forme :

$$u_p(t) = U_p \cos(2\pi f_p \cdot t)$$

où U_p est l'amplitude de l'onde et f_p sa fréquence.

⇒ La seconde onde est liée au **signal à transmettre ou signal modulant**.

Celle-ci n'est pas en général sinusoïdale (parole ou de la musique).

Mais elle peut être considérée comme une somme de fonctions sinusoïdales suivant une décomposition en série de Fourier.

Supposons, que l'information à transmettre se limite à une seule grandeur sinusoïdale d'amplitude U_s et de fréquence f_s .

Elle s'écrit : $u_s(t) = U_s \cos(2\pi f_s t)$

⇒ Pour pouvoir réaliser la modulation d'amplitude, on doit cependant lui ajouter une **composante continue U_0 appelée tension de décalage**. L'onde à transmettre s'écrit alors : $u_s(t) + U_0 = U_s \cos(2\pi f_s t) + U_0$

La combinaison des deux ondes est obtenue par un composant électronique appelé **multiplieur**.

Il donne en sortie une **tension modulée** $u_m(t)$ proportionnelle au produit des deux tensions $u_p(t)$ et $[U_0 + u_s(t)]$:

$$u_m(t) = k \underbrace{[u_s(t) + U_0]}_{\substack{\text{signal à transmettre} \\ \text{(signal modulant)}}} \cdot \underbrace{U_p \cos(2\pi f_p t)}_{\text{porteuse}} \text{ d'où } u_m(t) = k \cdot \underbrace{[U_s \cos(2\pi f_s t) + U_0]}_{\text{amplitude de la tension modulée}} \cdot U_p \cos(2\pi f_p t)$$

On écrit généralement cette tension modulée sous la forme : $u_m(t) = A [1 + m \cdot \cos(2\pi f_s t)] \cdot \cos(2\pi f_p t)$

1. Donner l'expression littérale de A et du taux de modulation m.

$$u_m(t) = k \cdot [U_s \cos(2\pi f_s t) + U_0] \cdot U_p \cos(2\pi f_p t) \Rightarrow \text{factorisons } U_0 : u_m(t) = \underbrace{k \cdot U_p \cdot U_0}_A \cdot \left[\underbrace{\frac{U_s}{U_0}}_m \cdot \cos(2\pi f_s t) + 1 \right] \cdot \cos(2\pi f_p t)$$

$$\text{ainsi : } \boxed{A = k \cdot U_p \cdot U_0} \text{ et } \boxed{m = \frac{U_s}{U_0}}$$

$$\text{d'où } u_m(t) = \underbrace{A [m \cdot \cos(2\pi f_s t) + 1]}_{\text{amplitude } U(t)} \cdot \cos(2\pi f_p t) = U(t) \cdot \cos(2\pi f_p t) \text{ d'où } U(t) = A \cdot [m \cdot \cos(2\pi f_s t) + 1]$$

2. Exprimer les valeurs maximale U_{\max} et minimale U_{\min} de cette amplitude $U(t)$.

$$U(t) = A \cdot [m \cdot \cos(2\pi f_s t) + 1] \text{ or } \cos(2\pi f_s t) \text{ varie entre } -1 \text{ et } +1$$

$$\text{Pour } \cos(2\pi f_s t) = -1, \text{ on obtient la valeur } \underline{\text{minimale}} \text{ de } U(t) \Rightarrow U_{\min} = A \cdot (1 - m)$$

$$\text{Pour } \cos(2\pi f_s t) = +1, \text{ on obtient la valeur } \underline{\text{maximale}} \text{ de } U(t) \Rightarrow U_{\max} = A \cdot (1 + m)$$

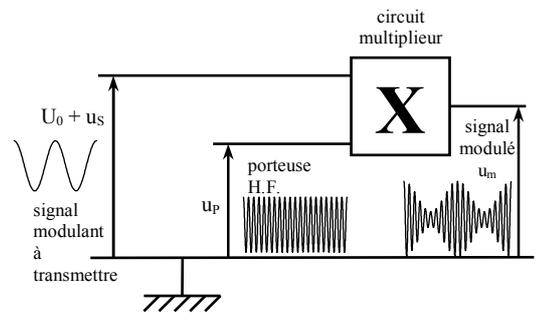
3. En déduire l'expression du rapport U_{\max} / U_{\min} pour en déduire l'expression littérale de m en fonction de U_{\max} et U_{\min} .

$$\frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1+m}{1-m} \text{ d'où } (1+m) \cdot U_{\min} = (1-m) \cdot U_{\max} \text{ soit } m \cdot (U_{\min} + U_{\max}) = U_{\max} - U_{\min} \text{ et } \boxed{m = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}}$$

Matériel :

- deux générateurs de fonctions GBF1 et GBF2 délivrant chacun une tension sinusoïdale
- un oscilloscope et un ordinateur muni d'une carte d'acquisition
- une alimentation électrique symétrique +15 V / 0 / -15 V pour alimenter le multiplieur
- un multiplieur

Le GBF1 (**Sefram**) délivre le signal porteur $u_p(t)$, le GBF2 (**Metrix**) délivre le signal modulant $u_s(t)$.



B. Réglages

① Oscilloscope

⇒ Régler le « 0 » des 2 voies (fonction GND)
 ⇒ base de temps : 2ms/DIV
 ⇒ sensibilités verticales :
 voie 1 : 1V/DIV
 voie 2 : 2V/DIV
 ⇒ position DC pour les 2 voies (la fonction AC supprime la composante continue U_0 du signal d'entrée)

② Signal porteur $u_p(t)$

⇒ Brancher le GBF1 (sefram) sur la voie 1 de l'oscilloscope. Visualiser sa tension (CH 1)
 ⇒ Régler la fréquence à $f_p = 2,0$ kHz et l'amplitude $U_p = 4,0V$.

③ Signal modulant $u_s(t)$

⇒ Brancher le GBF2 (metrix) sur la voie 2 de l'oscilloscope. Visualiser sa tension (CH 2)
 ⇒ Régler la fréquence à $f_s = 1,0 \cdot 10^2$ Hz et l'amplitude $U_s = 2,0V$.

④ Ajout de la tension de décalage : signal $u_s(t) + U_0$

Le bouton Offset du GBF2 permet d'ajouter une composante continue à la tension sinusoïdale $u_s(t)$.
 ⇒ Tirer le bouton Offset puis régler la composante continue du GBF2 à $U_0 = 3,0V$.
 ⇒ Visualiser les tensions des 2 voies.

Ne plus modifier les réglages des GBF et de l'oscilloscope.

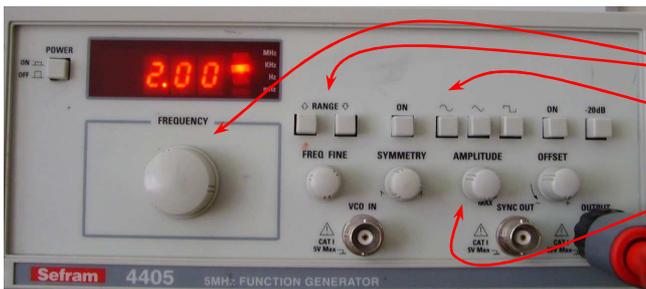
Débrancher le GBF1 de la voie 1 de l'oscilloscope.

Allumer l'oscilloscope, et régler :

- ⇒ valider AUTO et PP pour avoir les traces,
- ⇒ l'intensité et la finesse de la trace avec les boutons FOCUS et INTENSITY,
- ⇒ les traces au centre sur les voies 1 et 2 avec les boutons POSITION,
- ⇒ valider DC sur les 2 voies 1 et 2 (visualisation du signal complet : composante alternative + continue)

Relier le GBF sefram sur la voie 1 de l'oscilloscope et le GBF metrix sur la voie 2.

Signal porteur :



sélectionner DC sur les deux voies pour pouvoir visualiser les signaux complets (composante alternative + continue)

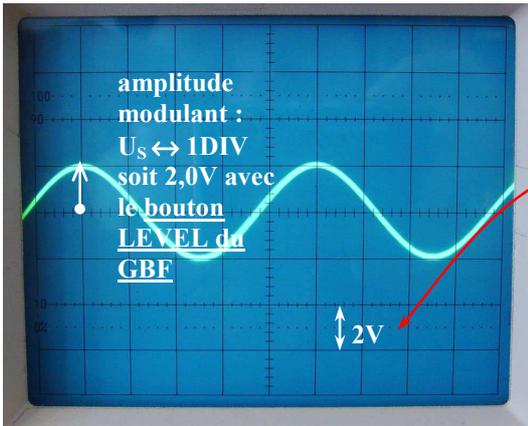
Signal modulant :



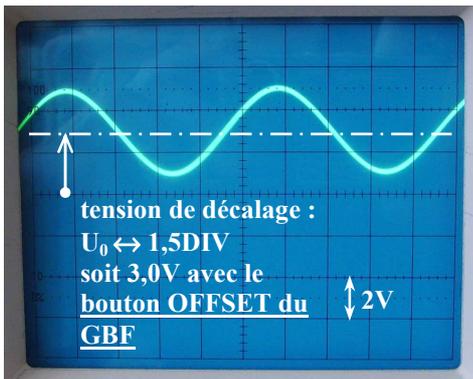
régler le signal modulant sur la voie 2 de l'oscilloscope :

- ⇒ fréquence à 100Hz : utiliser les boutons pour changer de gamme
- ⇒ signal sinusoïdal
- ⇒ amplitude à 2,0V en contrôlant sur l'écran de l'oscilloscope

utiliser les boutons pour sélectionner la voie 2



Ajout de la tension de décalage égal à 3,0V :



Ajout de la tension de décalage :

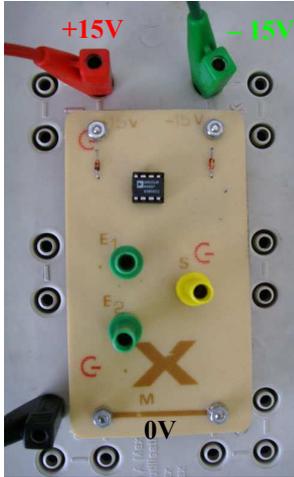
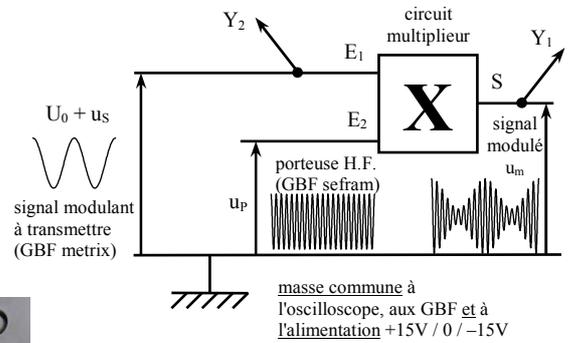
- ⇒ tirer sur le bouton OFFSET
- ⇒ puis le tourner pour régler la tension de décalage U_0 à 3,0V

C. Etudes de quelques signaux modulés en amplitude

1. Montage expérimental

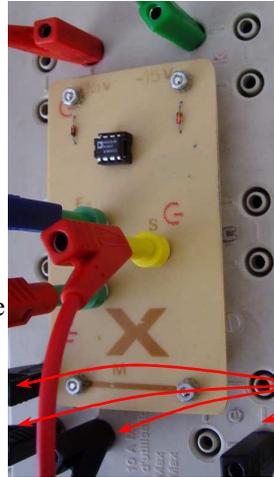
a. Oscilloscope

Réaliser le montage ci-contre.
Ne pas oublier d'alimenter le circuit multiplieur en -15V / 0V / +15V.



Circuit multiplieur

E₁ : signal modulant
E₂: porteuse

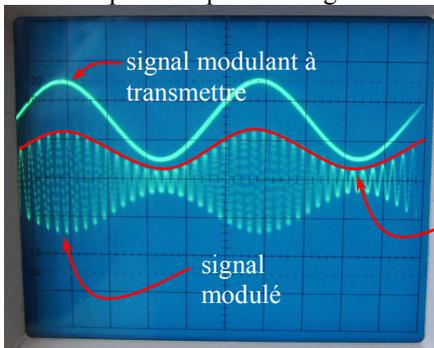


Relier toutes les masses (oscilloscope, alimentation, 2 GBF) ensemble sur la platine

Visualiser le signal modulé en amplitude : $\underbrace{u_m(t)}_{\text{signal modulé}} = k \underbrace{[u_s(t) + U_0]}_{\text{signal à transmettre (signal modulant)}} \cdot \underbrace{U_p \cos(2\pi f_p t)}_{\text{porteuse}}$ sur la voie 1 (ici $k = 1/10$)

Sur la voie 2 est toujours visualisé le signal modulant : $u_s(t) + U_0 = U_s \cos(2\pi f_s t) + U_0$

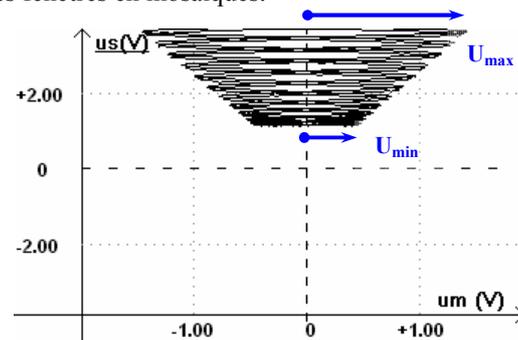
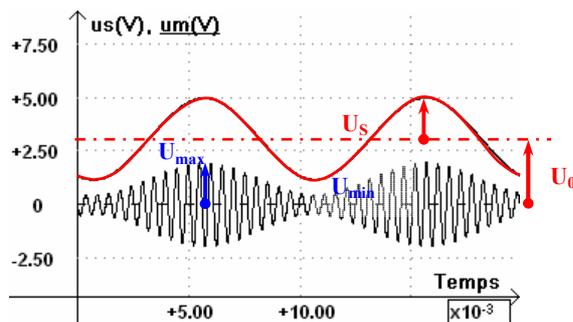
Observer puis comparer les signaux des 2 voies. Quel paramètre de la porteuse a-t-on modulé ?



L'amplitude de la porteuse a été modulée, elle reflète le signal à transmettre \Rightarrow modulation de qualité

b. LatisPro

Paramétrage \Rightarrow voie EA0 : signal modulant "us" en fenêtre 1 | EA1 : "um" en fenêtre 1 | durée totale : 20ms / 4000 points
Faire une acquisition.
En fenêtre 2, représenter "us" en fonction de um. Mettre les fenêtres en mosaïques.



2. Mesure du taux de modulation

En mode balayage, mesurer les tensions U_{\max} et U_{\min} de la tension $U(t)$ (amplitude de la tension modulée) puis calculer le taux de modulation m à l'aide de la formule vue précédemment. Vérifier que $m = U_s / U_0$.

Voie 1 : calibre 1V/DIV :

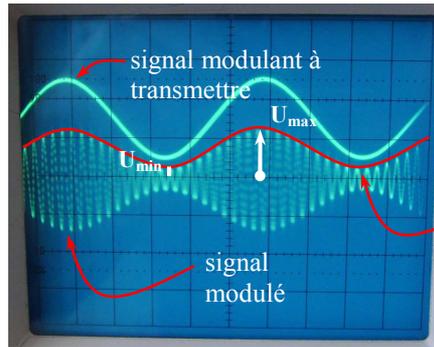
$$U_{\max} \leftrightarrow 1,3\text{DIV} \Rightarrow U_{\max} = 1,3\text{V}$$

$$U_{\min} \leftrightarrow 0,3\text{DIV} \Rightarrow U_{\min} = 0,3\text{V}$$

$$m_{\text{exp}} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} = \frac{1,3 - 0,3}{1,3 + 0,3} = 0,63$$

$$m_{\text{th}} = \frac{U_s}{U_0} = \frac{2,0}{3,0} = 0,67$$

⇒ bon accord entre les 2 valeurs



L'amplitude de la porteuse a été modulée, elle reflète le signal à transmettre ⇒ modulation de qualité

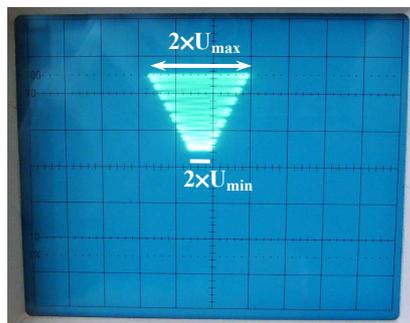
Sur l'oscilloscope en mode XY, le signal de la voie 2 (le modulant) est appliqué en Y et celui de la voie 1 (le modulé) en X. Mesurer, en mode XY, les valeurs maximale et minimale de la tension $U_m(t)$ puis retrouver la valeur du taux de modulation.

Voie 1 : calibre 1V/DIV :

$$2U_{\max} \leftrightarrow 2,4\text{DIV} \Rightarrow U_{\max} = 1,4\text{V}$$

$$2U_{\min} \leftrightarrow 0,7\text{DIV} \Rightarrow U_{\min} = 0,35\text{V}$$

$$m_{\text{exp}} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} = \frac{1,4 - 0,35}{1,4 + 0,35} = 0,60$$

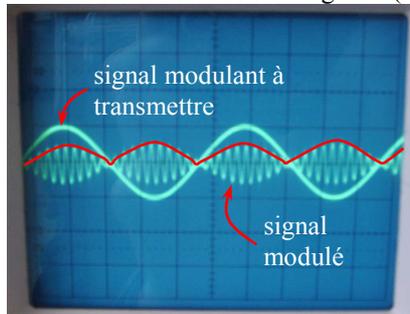


Pour passer en mode XY, tourner le bouton T/DIV sur la position XY

3. La surmodulation

Visualiser à nouveau les 2 tensions en mode balayage à l'oscilloscope.

Ramener la tension de décalage à 0 (modifier la position de l'offset) puis augmenter progressivement U_0 .



$$U_0 = 0$$

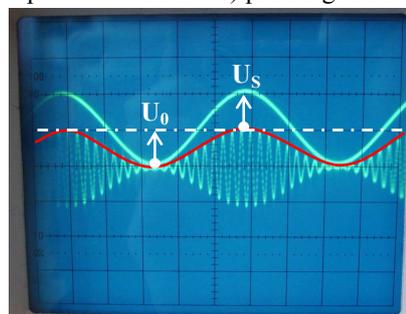
mauvaise modulation (surmodulation)

l'enveloppe supérieure ne reflète pas

le signal à transmettre



sablier en mode XY

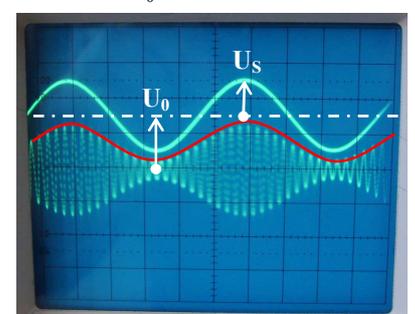


$$U_0 = U_s$$

cas limite : m = 1



triangle en mode XY



$$U_0 > U_s$$

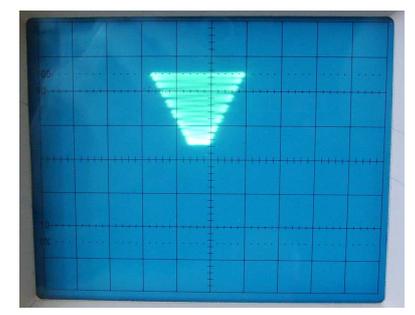
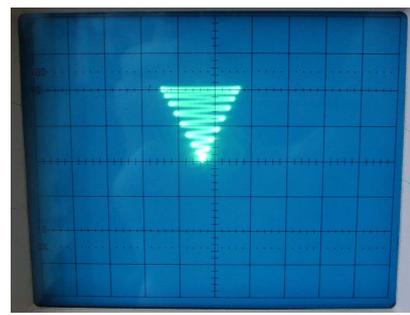
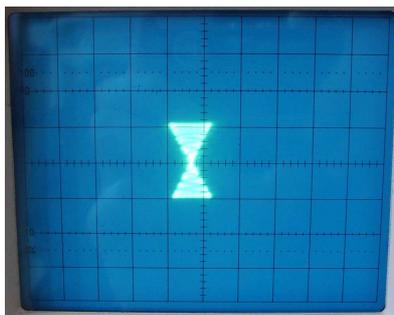
bonne modulation : m < 1

l'enveloppe supérieure reflète le

signal à transmettre



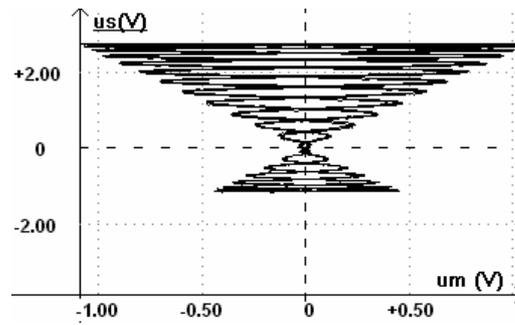
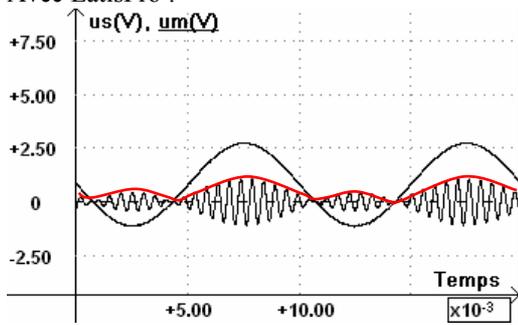
trapèze en mode XY



A partir de quelle valeur de U_0 le signal modulé $u_m(t)$ est-il satisfaisant ? Justifier.

Pour $U_0 \geq U_s = 2,0\text{V}$ la modulation est de qualité ⇒ l'enveloppe supérieure de la tension reflète le signal à transmettre.

Dans le cas contraire, il y a **surmodulation** : l'enveloppe supérieure ne reflète plus la tension à transmettre. Avec LatisPro :



Quel critère peut on donner sur U_s et U_0 pour qu'il n'y ait pas surmodulation ?

Le signal modulant doit être toujours strictement positif.

Il faut une tension de décalage suffisamment grande : $U_0 \geq U_s$

d'où un taux de modulation $m = \frac{U_s}{U_0} \leq 1$

En mode XY, comment voit-on que la modulation est de bonne qualité ?

L'oscillogramme doit avoir la forme d'un trapèze (et non d'un sablier).

4. Spectre en fréquence

Revenir aux réglages initiaux du paragraphe B. Refaire une acquisition.

Pour calculer la transformée de fourrier et ainsi visualiser le spectre en fréquence du signal,

⇒ cliquer sur Traitements / Calculs spécifiques / Analyse de Fourier.

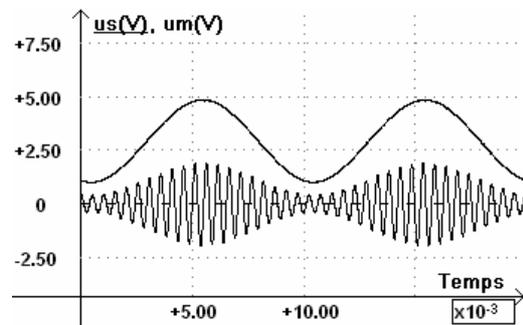
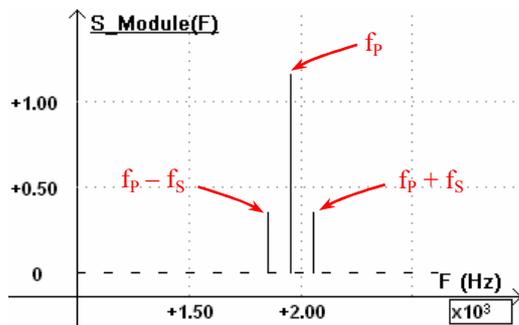
⇒ Courbe à analyser : signal modulé u_m (faire un glisser déplacer) ;

⇒ Cliquer sur options avancées : régler le niveau de validité à 5% puis "Calculer".

⇒ Tracer la courbe obtenue dans une nouvelle fenêtre et régler le min à 0 et le max à 3000Hz en abscisses (par un double-clic sur les valeurs de l'axe des abscisses par exemple).

Justifier l'aspect du spectre observé en transformant le produit de cosinus de la tension $u_m(t)$ en une somme

(on rappelle que $\cos(p) \cdot \cos(q) = \frac{1}{2} [\cos(p+q) + \cos(p-q)]$).



$$u_m(t) = k \cdot [U_s \cos(2\pi f_s t) + U_0] \cdot U_p \cos(2\pi f_p t)$$

$$u_m(t) = k \cdot U_0 \cdot U_p \cos(2\pi f_p t) + k \cdot U_s \cdot U_p \cdot \underbrace{\cos(2\pi f_p t)}_p \cdot \underbrace{\cos(2\pi f_s t)}_q$$

$$u_m(t) = k \cdot U_0 \cdot U_p \cos(2\pi f_p t) + \frac{1}{2} k \cdot U_s \cdot U_p \cdot \cos(2\pi (f_p + f_s) t) + \frac{1}{2} k \cdot U_s \cdot U_p \cdot \cos(2\pi (f_p - f_s) t)$$

Le signal modulé est la somme de 3 tensions sinusoïdales de fréquence $f_p - f_s$ / f_p / $f_p + f_s$ comme le montre l'analyse de Fourier du signal modulé.