

MODULATION ET DÉMODULATION DES SIGNAUX

13



La télécommunication a connu une grande révolution par l'avènement de la modulation et ne cesse de se développer grâce au même phénomène qui trouve d'ailleurs ses applications dans d'autres domaines comme la synthèse polyphonique.

- ◆ Les émissions télévisées sont-elles modulées en amplitude (AM) ou en fréquence (FM) et pourquoi ?
- ◆ La fréquence de l'onde porteuse des émissions d'une station radio en AM est égale à 150 kHz au minimum, tandis qu'en FM, elle tourne autour de 100 MHz, pourquoi ?

MODULATION ET DÉMODULATION DES SIGNAUX

Si les télécommunications deviennent de plus en plus présentes même dans la vie de tous les jours, c'est grâce à l'utilisation des ondes électromagnétiques et plus précisément les ondes hertziennes comme supports de transmission des informations. A ce propos, on a vu au chapitre précédent que, là où on a à télécommuniquer la voix humaine, la musique, l'image, etc, on recourt à des porteuses de fréquences élevées pour que leur portée soit suffisamment grande et pour que les antennes d'émission ou de réception soient de dimensions non encombrantes. Entre l'émetteur et le récepteur, l'onde porteuse se propage sous forme modulée. La modulation effectuée par le signal à transmettre peut se faire de trois manières différentes. Toutefois, on n'en traitera dans ce qui suit que deux, la modulation d'amplitude et la modulation de fréquence.

MODULATION D'AMPLITUDE

La modulation d'amplitude a été la première technique utilisée en radiodiffusion. L'information à transmettre est convertie en une tension électrique qui va moduler l'amplitude d'une autre tension de fréquence beaucoup plus élevée que celle de la tension modulante. Pour extraire l'information du signal modulé transmis, il faut lui faire subir une démodulation (ou le démoduler) à sa réception.

1 MODULATION

1.1- ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Matériel : - Deux générateurs BF dont l'un est à tension de décalage (ou offset) réglable.

- Un circuit intégré multiplieur de tension : AD633JN (Fig.1 et description détaillée dans la fiche technique de fin de chapitre).

- Une alimentation stabilisée symétrique ± 15 V pour alimenter le circuit intégré (Fig.2).

- Un oscilloscope bicourbe (numérique de préférence) ou un système d'acquisition et de traitement informatique des données comme VTT[⊙] (Fig.3).

1.1.1- Modulation d'une tension sinusoïdale

Manipulation

Soient $u(t)$ et $u_p(t)$ les tensions délivrées respectivement aux bornes du GBF₁ à offset et du GBF₂.

$$u(t) = U_o + U_m \cos 2\pi N t.$$

$$u_p(t) = U_{pm} \cos 2\pi N_p t.$$

On fixe la tension de décalage U_o à 4 V, la valeur maximale U_m de la composante sinusoïdale de u à 2,5 V et sa fréquence N à 5 kHz.

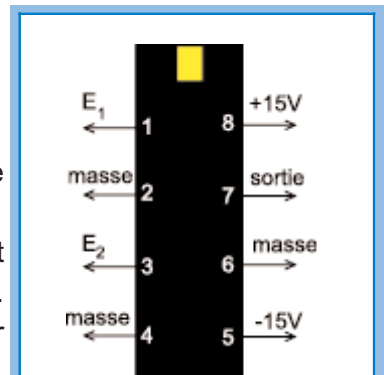


Fig.1 : Brochage du circuit intégré AD633JN

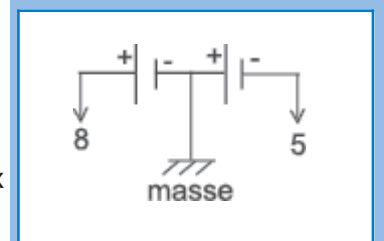


Fig.2 : Alimentation de AD633JN

⊙VTT : acronyme d'une interface sous forme de console graphique

En ce qui concerne $u_p(t)$, on fixe U_{pm} à 6 V et N_p à 180 kHz.
En appliquant les tensions $u(t)$ et $u_p(t)$ respectivement aux entrées Y_1 et Y_2 de la console VTT, on observe sur son écran, les chronogrammes de la figure 4.

Questions

Si l'on veut simuler une modulation d'amplitude avec les tensions $u(t)$ et $u_p(t)$:

- 1°) préciser celle qui va jouer le rôle de signal porteur tout en justifiant la réponse,
- 2°) donner le rôle de l'autre tension.

Pour simuler effectivement une modulation d'amplitude avec les tensions $u(t)$ et $u_p(t)$, on réalise le montage de la figure 5 où la tension $u(t)$ appliquée à l'entrée E_1 du multiplieur (entre sa broche 1 et la masse) est délivrée par le GBF muni d'une tension de décalage (GBF₁) et la tension $u_p(t)$ appliquée à son entrée E_2 (entre sa broche 3 et la masse) est délivrée par le GBF₂.

N.B : - Ne pas oublier d'alimenter le circuit intégré (non représenté sur le schéma).

- Les broches 2, 4 et 6 du circuit intégré doivent être reliées à la masse.

- La tension de sortie du multiplieur AD633JN est $u_S(t) = k.u_1.u_2$ avec $k = 0,1 \text{ V}^{-1}$.

Pour le montage de la figure 5, on applique les deux tensions $u_1(t) = u(t) + U_0$ et $u_2(t) = u_p(t)$.

Remarque

si le GBF n'est pas muni d'un offset, on peut mettre le GBF en série avec une alimentation stabilisée à condition que l'un de deux appareils soit à masse flottante. Dans le cas de la figure 6, c'est le GBF qui doit être à masse flottante. Sinon, il doit être du côté de la masse.

En visualisant simultanément $u_1(t)$ sur la voie Y_1 et $u_S(t)$ sur la voie Y_2 de l'oscilloscope, on obtient les oscillogrammes stables (1) et (2) de la figure 7.



Fig.3 : Console V.T.T

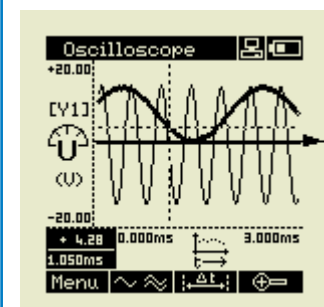


Fig.4 : Chronogrammes de $u(t)$ et de $u_p(t)$

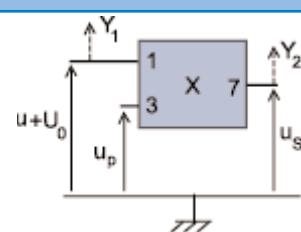


Fig.5 : Montage multiplieur

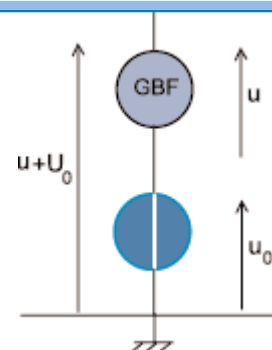


Fig.6 : Tension de décalage ajoutée par l'insertion d'un générateur de tension

Questions

1°) A l'aide de la figure 7 :

a) montrer qualitativement et de deux manières différentes que l'oscillogramme (1) est celui de la tension $u(t)$.

b) justifier la qualification de la tension de sortie comme tension modulée.

c) expliquer pourquoi on dit que le chronogramme du signal modulant $u(t)$ constitue l'enveloppe de celui du signal modulé $u_S(t)$.

2°) Analyser le spectre de la figure 9, spectre caractérisant u_S (obtenu avec un oscilloscope numérique) et vérifier qu'il représente le canal de transmission du signal $u(t)$.

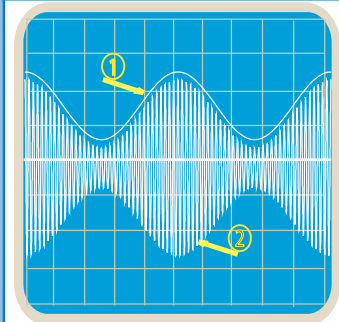


Fig.7 : Oscillogrammes des signaux $u_S(t)$ et $u(t)$

Analyse et commentaire

Si l'on compare les oscillogrammes de la figure 4 et de la figure 7, on peut remarquer que :

- le signal (1) de basse fréquence garde son intégrité après modulation.

- le signal de haute fréquence garde sa fréquence N_p constante mais son amplitude varie au cours du temps.

Cette variation en amplitude est pilotée par le signal de basse fréquence N .

- le signal de basse fréquence contourne celui de haute fréquence. C'est pour cette raison qu'on le qualifie d'enveloppe.

Au chapitre précédent, on a vu que les signaux électromagnétiques de haute fréquence ont une très grande portée. Ainsi, le signal de la figure 8a est qualifié de porteur.

Le signal de la figure 8b, étant lui-même le signal (1) de la figure 7 qui module l'amplitude du signal (2) ou de celui de la figure 8c, est appelé signal modulant.

On remarque que le spectre de la figure 9 est composé de trois raies situées aux fréquences $N_1 = 175$ kHz, $N_0 = 180$ kHz et $N_2 = 185$ kHz ; les raies ont les "hauteurs" respectives : 0,75 V, 2,4 V et 0,75 V.

Ce spectre montre alors que le signal de sortie u_S est composé de trois signaux :

- de fréquences respectives $N_1 = N_p - N$, $N_0 = N$ et $N_2 = N_p + N$,
- d'amplitudes respectives U_{1m} , U_{0m} et $U_{2m} = U_{1m}$.

Un tel spectre représentant les amplitudes des composantes sinusoïdales d'un signal est appelé spectre de fréquence.

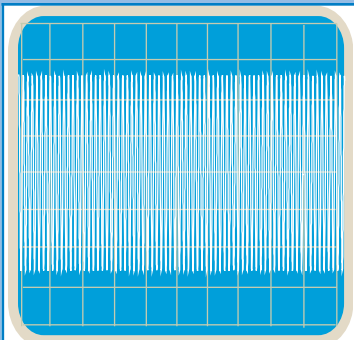


Fig.8a : Porteuse de fréquence N_p

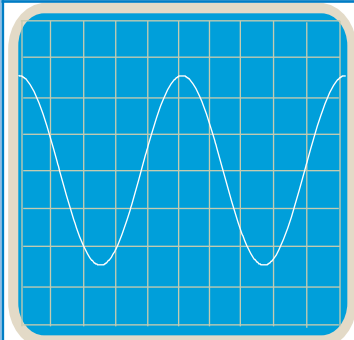


Fig.8b : Signal modulant

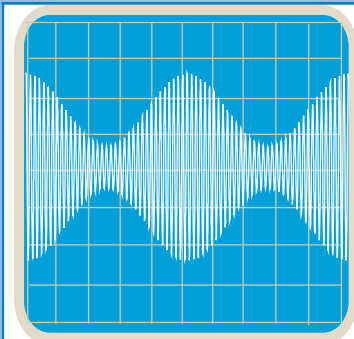


Fig.8c : Signal modulé

Conclusion

La modulation d'amplitude peut être simulée avec la multiplication d'une tension de haute fréquence (la porteuse) par une tension de basse fréquence (signal modulant).

Le signal de sortie ou signal modulé est caractérisé par une fréquence constante égale à celle de la porteuse et une amplitude qui varie périodiquement au cours du temps avec la période du signal modulant.

Le signal modulé en amplitude par un signal sinusoidal de fréquence N est composé de trois signaux dont la bande de fréquence associée est d'une largeur double de la valeur de la fréquence N du signal modulant.

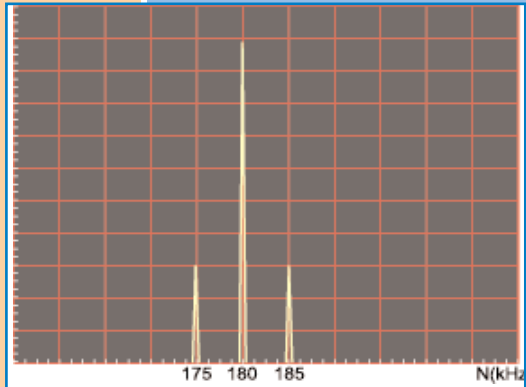


Fig.9 : Spectre de fréquence de la tension de sortie

1.1.2- Influence de la composante continue de la tension modulante

Manipulation

Avec le montage de la figure 6, on refait la même expérience mais pour différentes valeurs de U_o tout en maintenant U_m égale à 4 V, U_{pm} égale à 6 V et N égale à 5 kHz.

La tension de sortie change de forme suivant la valeur de U_o (Fig.10a, b et c).

A l'aide d'un oscilloscope numérique ou un analyseur de fréquence (Fig.11), on représente le spectre de fréquence correspondant (Fig.10a, b et c à droite).



Fig.11 : Oscilloscope numérique, analyseur de fréquence

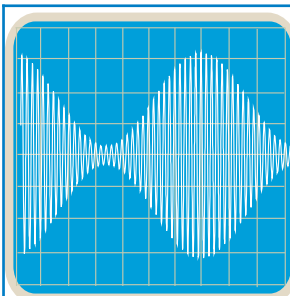
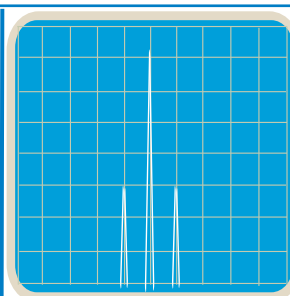


Fig.10b : $U_o = 4,8$ V



Spectre de fréquences pour $U_o = 4,8$ V

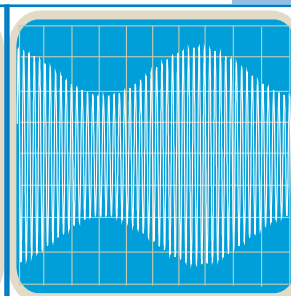
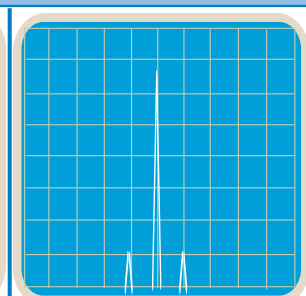
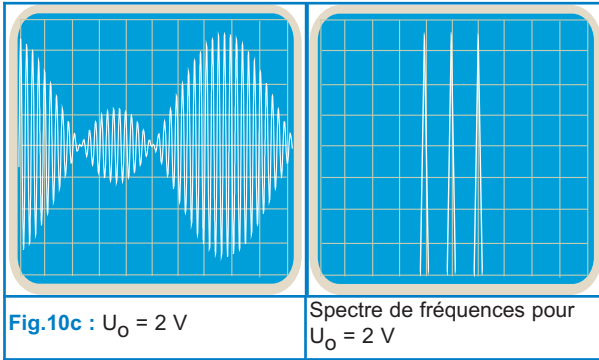


Fig.10a : $U_o = 13,8$ V



Spectre de fréquences pour $U_o = 13,8$ V



La modulation d'amplitude est satisfaisante lorsqu'on retrouve sur le chronogramme du signal modulé, toute l'information portée par le signal modulant. Pour plus de précision, on caractérise le phénomène par ce que l'on appelle taux de modulation. Il est noté m et s'exprime comme suit :

$$m = \frac{U_{Sm \text{ max}} - U_{Sm \text{ min}}}{U_{Sm \text{ max}} + U_{Sm \text{ min}}}$$

Pour mesurer le taux de modulation, on doit mesurer les tensions maximale et minimale de l'enveloppe comme l'indique la figure 12. On peut mesurer les valeurs maximale et minimale à la règle puisqu'on a un rapport de tensions.

Remarque

Pour mesurer le taux de modulation m , il est commode de recourir au signal trapèze obtenu en mode XY (Fig.14).

$$m = \frac{L - l}{L + l} = \frac{BC}{AD}$$

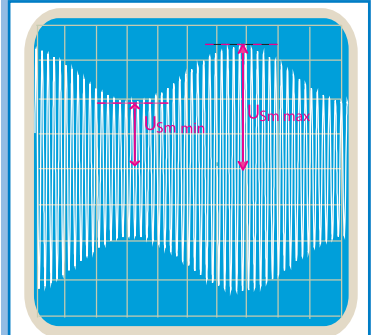


Fig.12 : Mesure graphique du taux de modulation: $m = 1,98$

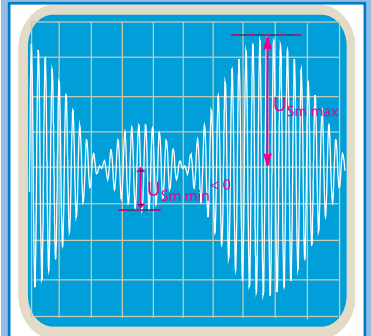


Fig.13 : Cas d'un taux de modulation $m = 1$.

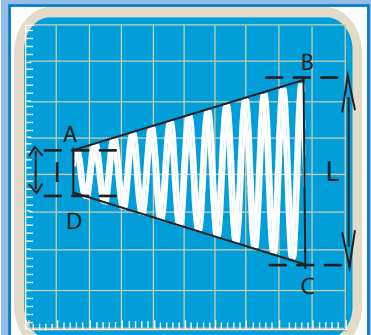


Fig.14 : Signal trapèze

Questions

- 1°) vérifier graphiquement que le taux de modulation m pour les figures 10a, b et c sont égaux respectivement à 0,29 ; 0,82 et 1,98.
- 2°) Comparer m au rapport U_m/U_0 .
- 3°) Quels sont les cas pour lesquels le taux de modulation est :
 - inférieur à 1.
 - égal à 1.
 - supérieur à 1.
- 4°) Dans le cas où $U_0 = 2 \text{ V}$, on dit que l'on a obtenu une surmodulation . Justifier cette affirmation en s'appuyant sur la figure 10c.

Analyse et commentaire

D'après les expériences précédentes on remarque que la tension de décalage influe sur le taux de modulation mais elle n'a aucune influence sur les valeurs des fréquences du spectre. Elle influe sur les amplitudes des deux fréquences latérales du spectre de fréquences.

Les calculs des taux de modulation dans les cas des figures 10a, b et c montrent que le taux m est égal au rapport U_m / U_o .

On remarque que si la tension minimale du signal de sortie est:

- positive, on a $m < 1$ (Fig.10a). La modulation est de bonne qualité
- nulle, on a : $m = 1$ (Fig.13).
- négative, on a : $m > 1$: c'est la surmodulation (Fig.12).

Le signal modulant perd son intégrité s'il y a une surmodulation.

Conclusion

La tension de décalage U_o influe sur le taux de modulation du signal modulé.

La modulation est de bonne qualité lorsque la composante continue U_o du signal modulant est supérieure à son amplitude U_m .

1-2-ETUDE THÉORIQUE

1.2.1- Expression de la tension de sortie

Soit : $u(t) = U_m \cos 2\pi Nt$, un signal de basse fréquence N .

U_o : tension constante de décalage ou d'offset .

$u_p(t) = U_{pm} \cos 2\pi N_p t$, un signal de haute fréquence N_p .

A l'une des entrées d'un circuit intégré multiplieur, on applique la tension $u(t) + U_o$ et à l'autre, on applique la tension $u_p(t)$ (Fig.15). La tension de sortie est de la forme :

$$u_s(t) = k.(u+U_o)u_p = k.(U_m \cos 2\pi Nt + U_o)U_{pm} \cos 2\pi N_p t.$$

On peut la mettre sous la forme :

$u_s(t) = kU_{pm}U_o(1 + \frac{U_m}{U_o} \cos 2\pi Nt) \cos 2\pi N_p t$. La tension de sortie a une fréquence N_p et une amplitude qui varie au cours du temps entre $U_{sm \max}$ et $U_{sm \min}$ dont les expressions sont :

$$U_{sm \max} = kU_{pm}U_o \left(1 + \frac{U_m}{U_o}\right) \quad \text{et} \quad U_{sm \min} = kU_{pm}U_o \left(1 - \frac{U_m}{U_o}\right)$$

L'oscillogramme de la figure16 visualise la tension de sortie en modulation d'amplitude .

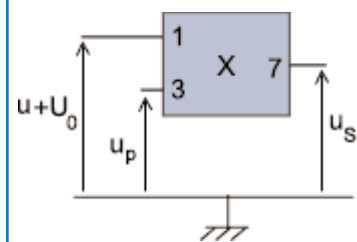


Fig.15 : Montage multiplieur.

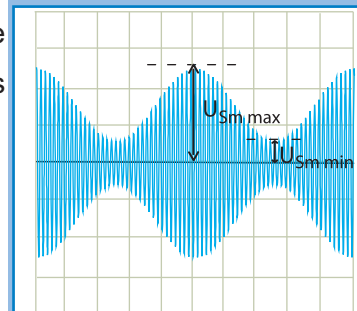


Fig.16 : Oscillogramme de la tension de sortie.

1.2.2- Expression du taux de modulation

On a défini le taux de modulation m comme étant :

$$m = \frac{U_{Sm \max} - U_{Sm \min}}{U_{Sm \max} + U_{Sm \min}}$$

En remplaçant $U_{sm \max}$ et $U_{sm \min}$ par leurs expressions, on obtient :

$$m = \frac{U_m}{U_o}$$

Conclusion

Le taux de modulation dépend de la valeur de l'amplitude du signal modulant U_m et de celle de la tension de décalage U_o .

Son expression est :

$$m = \frac{U_m}{U_o}$$

Application

Pour le cas de la figure 10a, $U_o = 13,8 \text{ V}$ et $U_m = 4 \text{ V}$, d'où $m = 0,29$.

Pour la figure 10b, $U_o = 4,8 \text{ V}$ et $U_m = 4 \text{ V}$ d'où $m = 0,83$.

Pour la figure 10c, $U_o = 2 \text{ V}$ et $U_m = 4 \text{ V}$, d'où $m = 2$: le signal de sortie est surmodulé.

Pour le cas de la figure 16, en mesurant $U_{Sm \max}$ et $U_{Sm \min}$, on trouve $m = 0,3$, d'où $U_o = 13,33 \text{ V}$.

1.2.3- Spectre de fréquences du signal modulé

Les analyses faites précédemment (Fig.9 et 10 a, b, c) montrent que le signal modulé est composé de trois signaux de fréquences et d'amplitudes différentes et dont la bande de fréquence allouée est de $2N$, N étant la fréquence du signal modulant.

Question

A partir de l'expression de $u_s(t)$ établie dans le sous paragraphe 1.2.1, déterminer les amplitudes et les fréquences de ces trois signaux en fonction de N et N_p .

⊙ On rappelle que :
 $\cos a \cdot \cos b = 1/2 [\cos(a + b) + \cos(a - b)]$.

Démonstration

A partir de $u_s(t) = kU_{pm}U_o \cdot (1 + m \cos 2\pi Nt) \cos 2\pi N_p t$, où m est le taux de modulation et par développement, on obtient :

$$u_s(t) = kU_{pm}U_o \cos 2\pi N_p t + mkU_{pm}U_o \cos 2\pi Nt \cdot \cos 2\pi N_p t.$$

Par un développement trigonométrique[⊙], on trouve :

$$u_s(t) = kU_{pm}U_o \cos 2\pi N_p t + 1/2 mkU_{pm}U_o \cos 2\pi (N_p + N)t + 1/2 mkU_{pm}U_o \cos 2\pi (N_p - N)t.$$

En posant $A = kU_{pm}U_o$, on écrit :

$$u_s(t) = A \cdot \cos 2\pi N_p t + 1/2 m A \cdot \cos 2\pi (N_p + N)t + 1/2 m A \cdot \cos 2\pi (N_p - N)t$$

Donc, le signal modulé est la somme de trois fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont N_p , $N_p + N$ et $N_p - N$ et dont le spectre de fréquences est celui de la figure 17.

La bande de fréquences du signal modulé est :

$$\Delta N = (N_p + N) - (N_p - N) = 2N.$$

Application

Les fréquences du spectre de la figure 10c ont la même amplitude. D'où $A = 1/2 \text{ mA}$, ce qui nous donne $m = 2$.

Attention : L'unité de A est le volt tandis que m (taux de modulation) est sans unité.

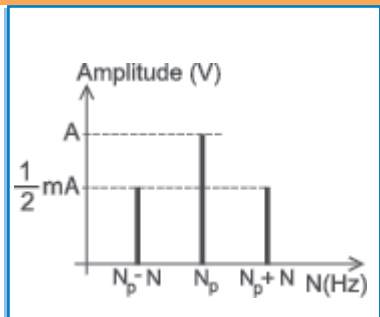


Fig.17 : Spectre en fréquence du signal modulé en amplitude

Conclusion

La tension de sortie d'un signal modulé en amplitude :

- est la somme de trois fonctions sinusoïdales d'amplitudes respectives $1/2 \text{ mA}$, A et $1/2 \text{ mA}$. ($A = kU_{pm}U_o$, où k est le facteur multiplicateur de circuit intégré)
- a un spectre de fréquences de bande $2N$, composé de : $N_p - N$, N_p et $N_p + N$.

2 DÉMODULATION

2.1- DÉTECTION D'ENVELOPPE

A sa réception, le signal modulé doit être décortiqué pour en extraire l'information intacte : **c'est la démodulation.**

Pour ce faire, il faut séparer le signal de haute fréquence (la porteuse) du signal de basse fréquence (l'enveloppe ou signal modulant).

2.1.1- Etude expérimentale

Matériel : un condensateur, une diode, un résistor et un oscilloscope bicourbe.

Manipulation

La tension de sortie $u_s(t)$ modulée en amplitude est appliquée à l'entrée du montage de la figure 18. A l'aide d'un oscilloscope bicourbe, on visualise simultanément les deux tensions d'entrée (le signal modulé) et celle de sortie (signal démodulé). Les oscillogrammes correspondants sont représentés sur la figure 19.

Sur la voie Y_1 , on observe le signal modulé et sur la voie Y_2 , on observe le signal démodulé : c'est un signal de forme semblable à celle du signal modulant, mais avec des ondulations.

En augmentant la fréquence N_p de la porteuse (tension u_p appliquée à la deuxième entrée du multiplieur), l'enveloppe visualisée sur la voie Y_2 devient moins ondulée.

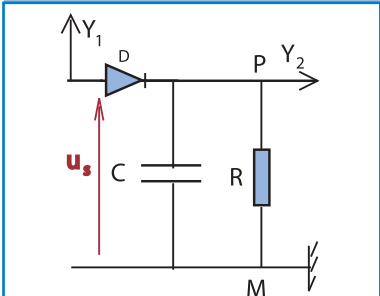


Fig.18 : Montage redresseur et détecteur d'enveloppe

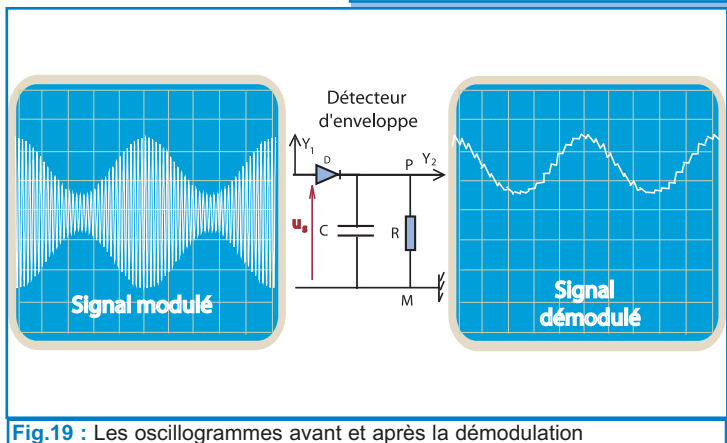


Fig.19 : Les oscillogrammes avant et après la démodulation

Questions

- 1°) Quels sont les rôles de la diode, du condensateur et du conducteur ohmique ?
- 2°) Les valeurs de C et de R influent-elles sur l'intégrité de l'enveloppe ?

2.1.2- Interprétation

La visualisation de la tension aux bornes du condensateur à l'aide d'un oscilloscope montre que lorsque la diode est conductrice pour une alternance positive et la tension modulée augmente au cours du temps, le condensateur se charge à travers la résistance.

Pendant la même alternance, la tension modulée décroît au cours du temps, le condensateur se décharge à travers la résistance.

Pendant l'alternance négative, la diode est bloquée, le condensateur continue sa décharge à travers la résistance.

Ainsi, la diode impose au condensateur de suivre l'évolution au cours du temps de l'enveloppe supérieure. Pour suivre l'évolution de l'enveloppe, la constante de temps $\tau = R.C$ doit vérifier une inégalité : $T_p < \tau = R.C \ll T$

T : période du signal modulant ; T_p : période de la porteuse.

Si cette inégalité est vérifiée, la charge et la décharge du condensateur reconstituent l'enveloppe (signal modulant). Par suite, une bonne détection d'enveloppe (avec le minimum d'ondulations) n'est possible que lorsque la fréquence N_p de la porteuse est très supérieure à celle du signal modulant : $N_p \gg N$.

2.2- LISSAGE DU SIGNAL

Pour obtenir un signal démodulé de bonne qualité, on doit débarrasser l'enveloppe de toute ondulation. Pour ce faire, on monte à la suite du détecteur d'enveloppe, entre les points P et M, un dipôle $R'C'$ comme sur le schéma de la figure 20.

Questions

- 1°) Expliquer le rôle du quadripôle $R'C'$ de la figure 20.
- 2°) Montrer qu'il s'en suit la double condition : $T_p \ll R'C' \ll T$, où T_p est la période de la porteuse et T , la période du signal modulant.

Interprétation

Pour supprimer intégralement la porteuse de fréquence N_p très supérieure à la fréquence N du signal modulant, il faut un filtre passe bas comme celui de la figure 20.

Or, on sait qu'un tel filtre passif est caractérisé par la fréquence de coupure haute $N_h = \frac{1}{2\pi R'C'}$

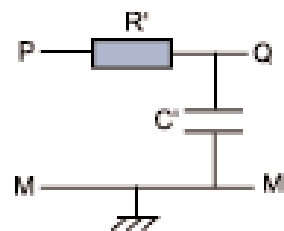


Fig.20 : Filtrage du signal

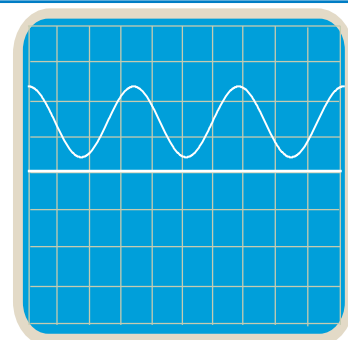


Fig.21 : L'enveloppe avec la composante continue

Donc, N_h doit être très inférieure à N_p tout en restant nettement supérieure à N , d'où l'inéquation, $T_p \ll R'C' \ll T$.

2.3- ÉLIMINATION DE LA COMPOSANTE CONTINUE

L'enveloppe est décalée par rapport à l'axe du temps de U_o (Fig.19 et 21). Pour en extraire le signal sinusoïdal que l'on veut capter, il suffit de supprimer la composante continue. Pour ce faire, on associe au montage formé par le détecteur d'enveloppe et le dipôle $R'C'$ de filtrage entre les points Q et M, un troisième étage constitué d'un autre dipôle $R''C''$ comme sur le schéma de la figure 22.

Questions

1°) Expliquer le rôle du quadripôle $R''C''$ de la figure 22.

2°) Montrer qu'il s'en suit la condition :

$$R''C'' \gg T$$

Interprétation

La tension de décalage est une tension continue, c'est-à-dire une tension de fréquence nulle. Pour l'éliminer, il faut alors un filtre passe haut comme celui de la figure 22, de fréquence de coupure basse $N_b = \frac{1}{2\pi R''C''}$.

Pour que le signal modulant ne soit pas affecté, il faut que N_b soit très inférieure à sa fréquence N , d'où la condition $R''C'' \gg T$.

Conclusion

La démodulation d'un signal modulé en amplitude s'effectue en trois phases :

- la détection d'enveloppe avec un condensateur C et un résistor R montés en parallèle tels que :
 $T_p < \tau = R.C \ll T$, où T_p est la période de la porteuse et T, la période du signal portant l'information ;
- le lissage du signal avec un filtre passe-bas $R'C'$ satisfaisant la condition :
 $T_p \ll R'C' \ll T$
- l'élimination de la composante continue avec un filtre passe-haut $R''C''$ satisfaisant la condition $R''C'' \gg T$.

Pour une démodulation de qualité, il faut une porteuse de fréquence très supérieure à celle du signal modulant : $N_p \gg N$.

Remarques

- La démodulation d'amplitude peut être réalisée avec un détecteur d'enveloppe et un filtre passe-haut seulement. Toutefois, elle sera d'une qualité inférieure.
- Pour la réception d'émissions radiophoniques transmises en AM, le poste radio doit être muni d'une antenne, d'un circuit d'accord constitué d'une bobine en parallèle avec un condensateur puis le circuit démodulateur. L'oscillateur (L,C) est un résonateur accordé sur la fréquence de la porteuse

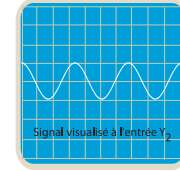
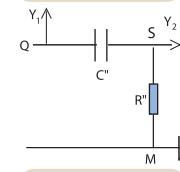
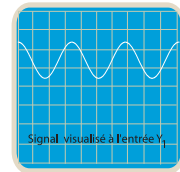


Fig.22 : Elimination de la composante continue

(pour sélectionner les stations en émission AM).

- Tous les postes radio sont dotés d'un condensateur à capacité variable pour raccorder la fréquence du résonateur à celle de la porteuse N_p .

3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

La modulation d'amplitude a beaucoup d'avantages :

- elle est simple à mettre en oeuvre (un multiplieur),
- la largeur de bande limitée à $2N$ [N étant la fréquence maximale du signal à transmettre (ou signal modulant)],
- sa démodulation qui ne demande qu'une diode, des condensateurs et des résistors est très pratique.

Toutefois, elle a quelques inconvénients :

- sensibilité aux parasites (les émetteurs d'ondes électromagnétiques à proximité du récepteur : au démarrage d'une voiture, au passage d'une motocyclette...).
- une grande partie de la puissance de l'émetteur sert à émettre la porteuse qui ne véhicule aucune information. Celle-ci, c'est-à-dire l'information, est entièrement véhiculée par les bandes latérales du spectre de fréquences.

MODULATION DE FRÉQUENCE

Par opposition à la modulation d'amplitude la modulation de fréquence consiste en la modification de la fréquence et non de la porteuse en fonction de la tension modulante.

1 MODULATION

1.1- ÉTUDE THÉORIQUE

On gardera les mêmes notations que précédemment :

$u(t) = U_m \cos 2\pi.N.t$ est l'expression du signal modulant.

$u_p(t) = U_{pm} \cos 2\pi.N_p.t$ est l'expression de la porteuse.

Le principe de la modulation de fréquence est de varier la fréquence de la porteuse en fonction de $u(t)$ (Fig.23).

Soit N_o la fréquence de la porteuse en absence de modulation

La fréquence du signal modulé en fréquence s'écrit sous la forme générale : $N_p(t) = N_o + k u(t) = N_o + k U_m \cos 2\pi.N.t$.

De cette expression de $N_p(t)$, résultent les définitions ci-dessous :

* $\Delta N_p = N_p - N_o = k.u(t)$: est l'excursion en fréquence.

Sa valeur maximale est appelée excursion crête de fréquence.

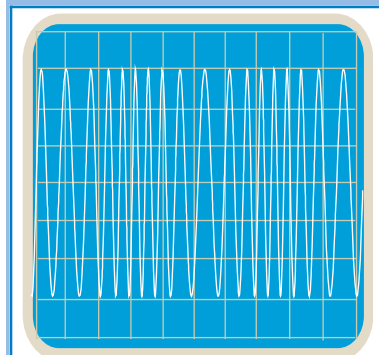


Fig.23 : Signal modulé en fréquence

* On appelle indice de modulation :

$$\beta = \frac{N_{pmax} - N_0}{N} = \frac{k U_m}{N}$$

On démontre que le signal modulé en fréquence prend la forme générale :

$$u_s(t) = U_{p_m} \cos \left[2.\pi.N_p t + \frac{k.U_m}{2.\pi.N} \cos 2.\pi.N t \right]$$

Conclusion

Un signal modulé en fréquence a :

- une amplitude constante, c'est celle de la porteuse,
- une fréquence qui varie au cours du temps.

1.2- Étude expérimentale

Pour faire varier expérimentalement la fréquence de la porteuse en fonction de la tension instantanée du signal modulant $u(t)$, on utilise par exemple une diode **varicap** (condensateur dont la capacité varie en fonction de la tension instantanée u appliquée entre ses bornes (Fig.24) comme suit : $C = k.u^a$, avec $a \simeq 1/2$ et k est une constante.

Le condensateur est un composant d'un résonateur (L,C) de fréquence propre : $N_0 = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{LC}}$

La fréquence N_p de la porteuse doit être très stable. On utilise alors un oscillateur à quartz à haute fréquence.

Pour réaliser un émetteur, on monte à la sortie de l'oscillateur, un amplificateur de puissance et une antenne (Fig. 25).

Remarque

L'étude de la démodulation de fréquence est hors programme.

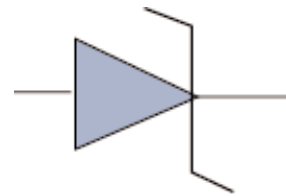


Fig.24 : Diode Varicap

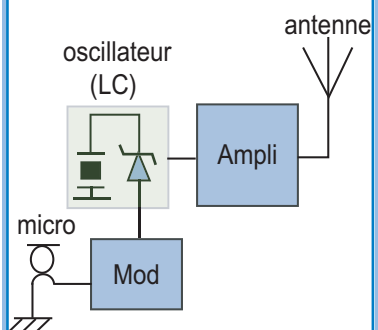


Fig.25 : Montage utilisant la modulation de fréquence

2

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Les avantages

- Une très faible sensibilité aux parasites électromagnétiques (les hautes tensions, les éclairs...).
- Une haute fidélité pour la reproduction des fréquences.
- La fréquence de sa porteuse peut être sélectionnée facilement par les récepteurs.

- Un excellent rendement énergétique : la majeure partie de l'énergie est portée par le signal modulant et non par la porteuse.

Les inconvénients

- Le signal modulé en fréquence se propage directement d'où la nécessité des relais d'amplification du signal.
- Le montage de modulation FM est plus compliqué qu'en AM.
- La démodulation est plus délicate qu'en AM.

3 FM AU QUOTIDIEN

- Les **modems** (mot issu de deux termes : modulation et démodulation) utilisent en bas débit la modulation de fréquence pour le transfert des données entre l'ordinateur et ses périphériques.
- Les téléphones analogiques utilisent la modulation de fréquence pour composer le numéro : chaque chiffre est codé par une composition de deux fréquences pour former un code DTMF (Dual Tone Multiple Frequency). il s'agit d'une modulation FSK (Frequency Shift Keying) qui utilise plus de deux fréquences. il s'agit d'une modulation MFSK (multiple frequency-shift keying) s'il s'agit de plusieurs fréquences.
- Les radios de la bande FM émettent, comme leur nom l'indique en modulation de fréquence sur la bande VHF.

La figure 26 représente un poste de radio (avec sa télécommande) utilisant la modulation de fréquence pour la réception des émissions.



Fig.26 : Poste radio captant en FM.

L'essentiel

■ La modulation d'amplitude consiste à modifier l'amplitude d'une onde porteuse de fréquence très élevée par le signal à transmettre, auquel on ajoute une tension continue (appelée tension de décalage ou d'offset).

■ Avec : $u(t) = U_o + U_m \cos 2\pi N t$ et $u_p(t) = U_{pm} \cos 2\pi N_p t$, la forme générale du signal modulé en amplitude est :

$$u_s(t) = U_{Sm} \cos 2\pi N_p t, \text{ où } U_{Sm} = kU_{pm}U_o \left(1 + \frac{U_m}{U_o} \cos 2\pi N t\right)$$

$$U_{Sm \max} = kU_{pm}U_o \left(1 + \frac{U_m}{U_o}\right)$$

$$U_{Sm \min} = kU_{pm}U_o \left(1 - \frac{U_m}{U_o}\right)$$

■ Chaque signal modulé en amplitude est caractérisé par son taux de modulation :

$$m = \frac{U_{Sm \max} - U_{Sm \min}}{U_{Sm \max} + U_{Sm \min}} = \frac{U_m}{U_o}$$

■ La démodulation d'un signal transmis par modulation d'amplitude consiste en sa récupération par trois opérations successives : la détection d'enveloppe, le lissage et l'élimination de la composante continue.

■ En modulation de fréquence, l'amplitude de la porteuse reste constante, mais sa fréquence varie autour de la valeur N_o en fonction de la fréquence N du signal modulant (Signal à transmettre).

- Sa fréquence est : $N_p(t) = N_o + K.u(t)$

$N_p(t)$: fréquence de la porteuse en excursion.

- L'excursion en fréquence s'écrit : $N_p - N_o = K.u(t)$.

- L'indice de modulation s'exprime :

$$\beta = \frac{N_{\max} - N_o}{N}$$

Exercices

Exercice résolu

ÉNONCÉ

On réalise, à l'aide du montage de la figure 1, une modulation d'amplitude en appliquant aux deux entrées du multiplieur les tensions $u_1(t) = U_o + u(t) = U_o + U_m \cos 2\pi Nt$ et $u_2 = u_p = U_{pm} \cos 2\pi N_p t$. On sait que la tension de sortie est de la forme $u_s(t) = k \cdot u_1 \cdot u_2$ si les broches 2, 4 et 6 sont connectées à la masse ; k est une constante.

Pour toutes les expériences, on ne fait varier que U_o .

Première expérience : $U_o = 4 \text{ V}$.

A l'aide d'un oscilloscope bicourbe, on visualise $u_s(t)$ (Fig.2).

1°) Préciser, sans calcul, si le signal est modulé ou surmodulé.

2°) Calculer le taux de modulation m et en déduire la valeur de U_m .

3°) A l'aide d'un analyseur de fréquence, on obtient le spectre de fréquences du signal précédent (Fig.3).

a) Etablir les expressions des amplitudes des trois fréquences du spectre.

b) Retrouver la valeur de m .

c) Sachant que le pic central du spectre a une fréquence $N' = 100 \text{ kHz}$, en déduire les valeurs de N_p et de N .

Deuxième expérience : U_o inconnue.

On visualise $u_s(t)$ (Fig.4).

4°) a) préciser, sans calcul, si on a augmenté ou on a diminué U_o .

b) Calculer la nouvelle valeur de m et en déduire U_o .

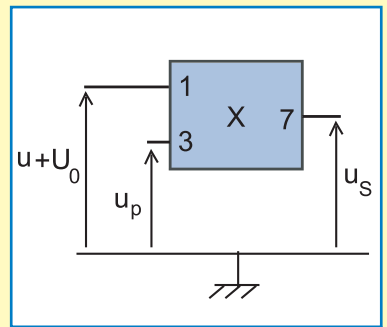


Fig.1: Montage multiplieur

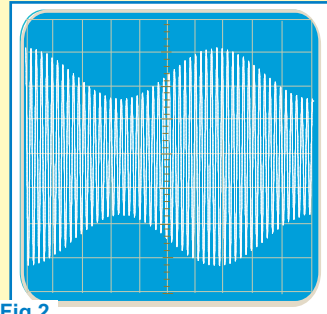


Fig.2

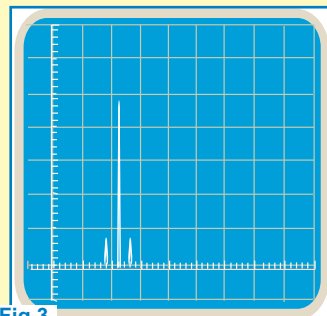


Fig.3

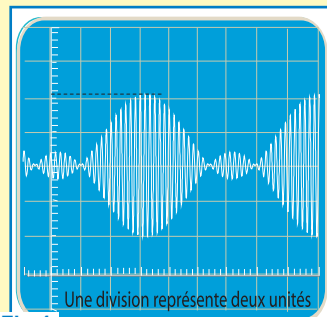


Fig.4

SOLUTION

1°) Exploitation graphique de l'oscillogramme de la figure 2 :

L'amplitude minimale de la tension de sortie est bien positive, d'où un taux de modulation m inférieur à 1. Ça signifie que le signal de sortie est correctement modulé.

2°) On doit mesurer $U_{Sm \max}$, $U_{Sm \min}$ et on applique la formule :

$$m = \frac{U_{Sm \max} - U_{Sm \min}}{U_{Sm \max} + U_{Sm \min}} = \frac{16 - 8}{16 + 8} = 0,33 \quad ; \quad m = 0,33$$

$$m = \frac{U_m}{U_o}. \text{ Donc, } U_m = mU_o$$

A.N. : $U_m \simeq 1,32 \text{ V}$.

3°) a) La tension de sortie peut se mettre sous la forme :

$$u_S(t) = kU_{pm}U_o \cos 2\pi N_p t + 1/2 m k U_{pm} U_o \cos 2\pi(N_p + N)t + 1/2 m k U_{pm} U_o \cos 2\pi(N_p - N)t.$$

En posant $A = kU_{pm}U_o$, on a :

$$u_S(t) = A \cos 2\pi N_p t + 1/2 m A \cos 2\pi(N_p + N)t + 1/2 m A \cos 2\pi(N_p - N)t.$$

On peut conclure alors que les deux pics latéraux ont la même amplitude $1/2 mA$ et le pic central a l'amplitude A .

b) Le rapport des amplitudes du pic central et d'un pic latéral est égal à **2/m**.

On calcule ce rapport à partir du spectre de la figure 3, dont le pic central et chacun des pics latéraux ont respectivement les longueurs 24 mm et 4 mm.

$$\frac{2}{m} = \frac{4}{24}, \text{ ce qui donne : } m = 0,33$$

c) Le pic central est celui de la porteuse dont la fréquence est $N_p = N' = 100 \text{ kHz}$.

Puisque le pic de la bande latérale inférieure est de fréquence $(N_p - N)$ et celui de la bande latérale supérieure est de fréquence $(N_p + N)$, on peut calculer N par recours au graphique spectral (Fig.3) qui donne :

$$\gamma = \frac{N_p}{N_p - N} = \frac{11}{9}.$$

$$\text{De } \gamma = \frac{N_p}{N_p - N} \text{ on déduit : } N = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) N_p$$

A.N. : $N_p = 18,2 \text{ kHz}$

4°) a) Il y a une surmodulation du signal de sortie. Donc, m augmente. Par suite, U_o a diminué.

$$b) m = \frac{U_{Sm \max} - U_{Sm \min}}{U_{Sm \max} + U_{Sm \min}} ;$$

$$\text{D'après le graphique de la figure 4, on a : } m = \frac{21 - 4}{21 + (-4)}$$

D'où, $m = 1,47$

$$m = \frac{U_m}{U_o}, \text{ d'où } m = U_o = \frac{U_m}{m}$$

A.N. : $U_o \simeq 0,90 \text{ V}$

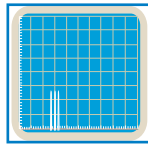
Exercices à résoudre

Tests rapides des acquis

1 Items "vrai ou faux"

Evaluer les propositions suivantes par vrai ou faux.

- 1- Le signal modulé en amplitude a une fréquence constante.
- 2- La modulation consiste à translater le signal à transmettre en hautes fréquences.
- 3- La porteuse constitue l'enveloppe du signal modulé.
- 4- La fréquence du signal modulant peut être supérieure à la fréquence de la porteuse.
- 5- La fréquence d'une station radio est celle de la porteuse.
- 6- Le spectre de fréquences de la figure 1 ci-contre montre que le signal est surmodulé.

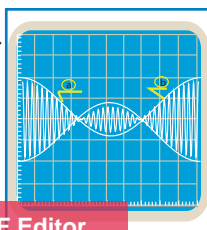


- 7- Le taux de modulation dépend de la fréquence de la porteuse.
- 8- Un signal modulé en fréquence a une amplitude constante.
- 9- Les émissions FM sont sensibles aux parasites .
- 10- Le spectre de fréquences d'un signal modulé en amplitude est composé de deux pics.
- 11- En modulation de fréquence, la fréquence du signal a pour expression $N_p(t) = N_o + K.u(t)$.
- 12- En modulation de fréquence, le terme $N_p - N_o$ est l'excursion en fréquence.
- 13- Le modem d'un ordinateur est un modulateur et démodulateur de signaux.
- 14- La forme générale d'un signal modulé en amplitude est $u_s = U_{sm}(1 + m \cos \omega t) \cos \omega_p t$.

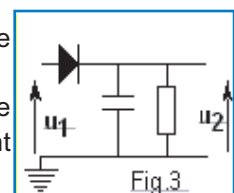
2 Questions à Choix Multiples

Préciser pour chacune des questions suivantes, la (ou les) proposition(s) juste(s).

- I- Un signal modulé en amplitude est :
 - a- le produit de deux tensions sinusoïdales.
 - b- la somme de trois tensions sinusoïdales.
 - c- caractérisé par une amplitude constante.
- II- Pour Radio-Tunis "chaîne internationale" qui émet en FM sous une fréquence de 92 MHz :
 - a- l'amplitude du signal est variable.
 - b- 92 MHz est la fréquence de sa porteuse.
 - c- la démodulation du signal nécessite un détecteur de crête.
- III- La transmission par modulation peut consister en la modification de :
 - a- l'amplitude de la porteuse.
 - b- la fréquence du signal modulant.
 - c- la phase du signal modulé
- IV- Le signal de la figure 2 ci-contre est :
 - a- modulé en fréquence.
 - b- modulé en amplitude.
 - c- en surmodulation.



- V- Pour le signal de la figure 2 de IV.
 - a- la courbe a est celle de la porteuse.
 - b- la courbe b est l'enveloppe.
 - c- la fréquence varie au cours du temps.
- VI- Un signal modulé ayant pour expression : $u_s(t) = 12 \cdot \cos[6 \cdot 10^8 t + 5 \cos 1250 t]$:
 - a- est un signal modulé en amplitude.
 - b- a une fréquence de porteuse $N_p = 6 \cdot 10^8$ Hz
 - c- est issu d'un signal modulant de pulsation $\omega = 1250 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.
 - d- peut être démodulé par un détecteur d'enveloppe.
- VII- Le montage de la figure 3 :
 - a- est le démodulateur d'un signal modulé en fréquence.
 - b- est un détecteur de crête.
 - c- délivre à sa sortie une tension $u_2(t)$ représentant le signal modulant.



Exercices d'application

3 On dispose de deux signaux modulés dont les expressions sont respectivement :

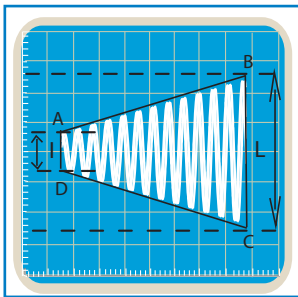
$$u_1(t) = 20 \cdot \cos [10^5 t + 10 \cos 6280 t]$$

$$\text{et } u_2(t) = 30 [3 + 2 \cos 1000 t] \cdot \cos 20 \cdot 10^4 t.$$

- 1°) Préciser pour chaque cas le mode de modulation considéré.
- 2°) Indiquer pour chaque cas les fréquences du signal modulant et de la porteuse.
- 3°) Calculer le taux de modulation du signal modulé en amplitude.
- 4°) Quelle est l'excursion de fréquence du signal modulé en fréquence.
- 5°) Quel est parmi $u_1(t)$ et $u_2(t)$, le signal le plus sensible aux parasites ?

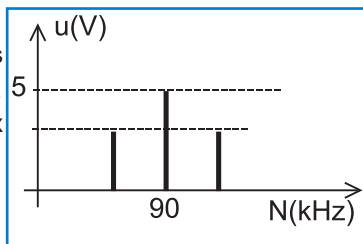
4 A l'aide d'un oscilloscope bicourbe, on traite un signal modulé. Sur la voie Y_1 , on visualise le signal modulant et sur la voie Y_2 , on visualise le signal modulé.

- 1°) Comment peut-on visualiser le trapèze de la figure ci-dessous ?
- 2°) S'agit-il d'un signal modulé en fréquence ou en amplitude ? justifier la réponse.
- 3°) Calculer le taux de modulation du signal.



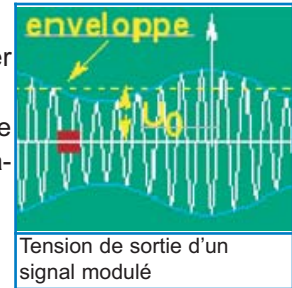
5 Le spectre de fréquences d'un signal modulé en amplitude est celui de la figure ci-dessous.

- 1°) En déduire les fréquences du signal modulant et de la porteuse.
- 2°) Mesurer les amplitudes des pics.
- 3°) Calculer le taux de modulation m .



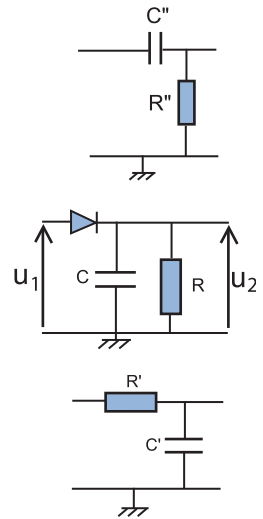
6 L'oscillogramme ci-dessous représente la tension de sortie d'un signal modulé.

- 1°) S'agit-il d'un signal modulé en amplitude ou en fréquence ? Justifier la réponse.
- 2°) Sachant que la fréquence du signal modulant est $N = 10$ kHz, déduire de l'oscillogramme, la fréquence de la porteuse.
- 3°) Calculer le taux de modulation m .
- 4°) On veut démoduler cette tension. Représenter le montage permettant cette opération de démodulation.



7 Dans le but de démoduler une tension $u_1 = U_{1m}(1 + m \cos \omega_0 t) \cos \omega_1 t$, où m est une constante positive inférieure à l'unité, on réalise les trois montages schématisés ci-contre.

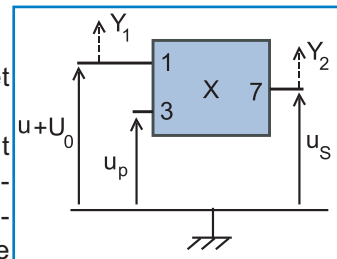
- 1°) La tension $u_1(t)$ est-elle modulée en fréquence ou en amplitude ?
- 2°) Quel est le rôle de chaque montage dans la démodulation envisagée.
- 3°) La tension $u_2(t)$ est-elle de basse ou de haute fréquence ?
- 4°) Faire le montage permettant une démodulation de bonne qualité.



8 On donne : $U_0 = 4$ V.

$$u(t) = 2 \cos 20 t \text{ et } u_p(t) = 3 \cos 2000 t.$$

- 1°) Quelles sont l'amplitude et la fréquence de l'oscillogramme de la voie Y_1 ?



- 2°) Répondre à la même question dans le cas de l'oscillogramme de la voie Y_2 .

◆ Exercices de synthèse

9 Une station radio émet sur la longueur d'onde $\lambda = 1827$ m, en modulation d'amplitude AM.

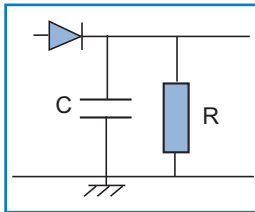
1°) Calculer la fréquence du signal émis. Que représente cette fréquence ?

On donne : $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹.

2°) Le signal modulant est un signal sonore de fréquence moyenne 1 kHz (voix humaine).

a) Calculer les périodes du signal modulant et de la porteuse.

b) A la réception, on doit démoduler le signal reçu par le détecteur d'enveloppe de la figure ci-contre. Sachant que pour avoir une bonne démodulation, l'inégalité ci-dessous doit être vérifiée :



$$T(\text{modulant}) > \tau = R \cdot C \gg T_p(\text{porteuse})$$

et sachant que $R = 15$ k Ω , donner un encadrement de C.

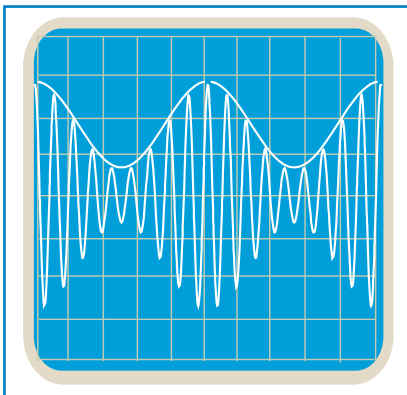
c) Déterminer alors, dans la liste suivante, la valeur de la capacité C permettant de respecter au mieux l'inégalité ci-dessus.

Liste : 1 pF ; 10 pF ; 100 pF ; 1 nF ; 10 nF ; 100 nF ; 1 μ F ; 10 μ F ; 100 μ F.

10 AD633JN est un multiplieur de tension. On applique entre ses deux entrées E1 et E2 les tensions respectives

$$u_1(t) = U_o + U_m \cos \omega t \quad \text{et} \quad u_2(t) = U_{pm} \cos \omega_p t.$$

A l'aide d'un oscilloscope bicourbe, on visualise la voie Y₁ le signal modulant et sur la voie Y₂ le signal modulé (Fig. 4 ci-dessous).



1°) S'agit-il d'une modulation en amplitude ou en fréquence ? Justifier la réponse.

2°) Identifier l'oscillogramme correspondant à chaque voie. 3°) Calculer le taux de modulation du signal.

4°) Sachant que la fréquence de la porteuse N_p est égale à 120 kHz, en déduire la fréquence du signal modulant.

11 On applique aux deux entrées d'un multiplieur les deux tensions $u(t) + U_o$ et $u_p(t)$. Sachant que

$$u_p(t) = 2 \cos 10^3 t.$$

A partir des oscillogrammes visualisés :

1°) préciser les tensions visualisées en trait plein et en trait fin.

2°) indiquer les branchements des fils de l'oscilloscope.

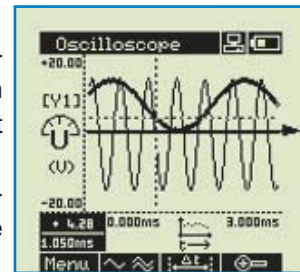
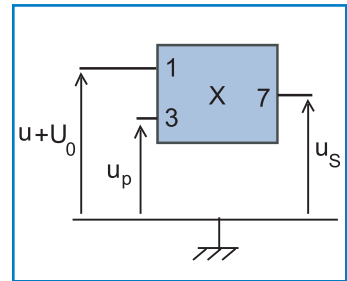
3°) déduire les valeurs de la tension de décalage U_o, la fréquence du signal modulant N et la fréquence de la porteuse N_p.

4°) a) Indiquer les branchements des fils pour visualiser $u_p(t)$ et $u_s(t)$.

b) Montrer que $u_s(t)$ s'écrit sous la forme : $u_s(t) = a(1 + \cos bt) \cos ct$.

Calculer a, b et c.

5°) Calculer le taux de modulation m du signal de sortie.



12 Étude de texte

L'oscillateur de Hertz

En télécommunication, l'onde porteuse peut être modulée en amplitude par les variations de fréquence et d'intensité d'un signal sonore tel qu'une note de musique. Cette forme de modulation d'amplitude (AM) est utilisée pour de nombreux services de radiotéléphonie, la radiodiffusion usuelle...

En modulation de fréquence, la fréquence de l'onde porteuse est modifiée dans les limites d'un intervalle donné (l'excursion de fréquence), à une vitesse correspondant à la fréquence du signal sonore. Cette forme de modulation, mise au point dans les années 1930, a l'avantage de produire des signaux peu affectés par le bruit et les parasites émis par des sources telles que les systèmes d'allumage des moteurs d'automobiles et les orages, qui perturbent profondément les signaux modulés en amplitude. Aussi la radiodiffusion adopte-t-elle la modulation de fréquence, les émetteurs utilisant des bandes de fréquences élevées (88 à 108 MHz), convenant à des signaux à large bande passante, mais dont la réception n'est possible qu'à des distances assez faibles.

L'onde porteuse peut également être modulée en faisant varier sa phase en fonction de l'amplitude du signal. Toutefois, l'utilisation de la modulation de phase reste en général réservée à certains équipements spéciaux, du fait de la bande passante très importante qu'elle requiert. Les ondes radio diffusées à basses et moyennes fréquences sont modulées en amplitude. A des fréquences plus élevées, on utilise des modulations en amplitude et en fréquence. Pour la télévision, le son, par exemple, peut être transmis par modulation de fréquence, tandis que l'image est transmise par modulation d'amplitude. Dans le domaine des hyperfréquences (au-delà du domaine des

fréquences ultra hautes, ou UHF), où de plus grandes largeurs de bande sont disponibles, l'image peut également être transmise par modulation de fréquence. Par ailleurs, on a mis au point des systèmes permettant de diffuser «son et images» sous forme numérique, en tirant parti de ces fréquences élevées.

De telles transmissions remplacent les techniques de diffusion de type analogique. Le «tout numérique», avec sa très large bande passante, permet d'envisager le multiplexage, une seule fréquence porteuse transmettant plusieurs signaux (et donc plusieurs émissions) simultanément.

D'après Microsoft Encarta - 2006

Questions

- 1°) Quels types de modulation, utilise-t-on en radiodiffusion ? Quel type préfère-t-on sur l'autre et pourquoi ?
- 2°) Qu'est-ce qui rend la modulation de fréquence impossible en radiodiffusion avec les porteuses de fréquences inférieures au mégahertz ?
- 3°) Relever dans le texte, ce qui montre que la transmission des images est caractérisée par une large bande de fréquences plus élevées que celles du son.
- 4°) Dans quelle gamme de fréquences, émet la télévision numérique ?
- 5°) En quoi consiste le multiplexage dans la transmission numérique des signaux ?

Fiche technique

Opérateur AD633JN

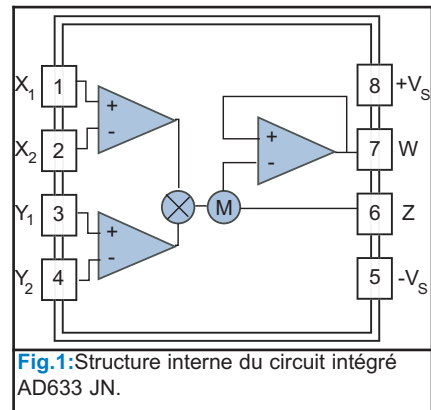
Caractéristiques

C'est un circuit intégré à huit broches.

Il est constitué de trois amplificateurs opérationnels montés comme l'indique la figure 1.

Suivant les connexions de ses broches, la tension de sortie (broche 7) prend une forme mathématique (multiplieur, multiplieur et sommateur.. ,etc).

Les broches 5 et 8 doivent être polarisées respectivement avec -15V et +15V.



AD633JN comme multiplieur

- Les broches 2, 4 et 6 sont reliées à la masse.
- Entre l'entrée 1 et la masse, on applique une tension u_1 .
- Entre l'entrée 3 et la masse, on applique une tension u_2 .

La tension de sortie (entre broche 7 et la masse) est :

$$u_S(t) = k.u_1.u_2 \text{ avec } k = 0,1 \text{ V}^{-1}.$$

On dit qu'il s'agit d'un montage multiplieur de tensions. (Fig.2)

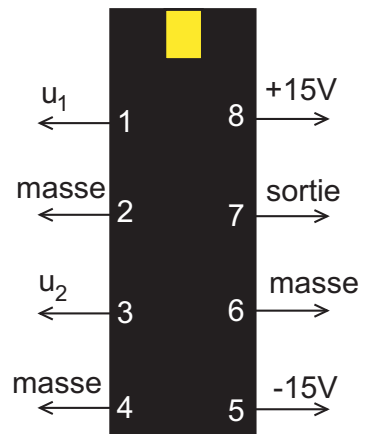
C'est le cas du montage de la figure 5 du cours.

On a utilisé ce montage en modulation d'amplitude avec une tension de décalage ou d'offset.

$$u_1(t) = U_o + U_m \cos 2\pi N t \quad \text{et} \quad u_2(t) = U_{pm} \cos 2\pi N_p t.$$

La tension de sortie est :

$$u_S(t) = k.U_{pm} \cos 2\pi N_{pm} t [U_o + U_m \cos 2\pi N t].$$



AD633JN comme multiplieur et sommateur

- Les broches 2 et 4 à la masse.
- Entre l'entrée 1 et la masse, on applique une tension u_1 .
- Entre l'entrée 3 et la masse, on applique une tension u_2 .
- Entre l'entrée 6 et la masse, on applique une tension u_3 .

La tension de sortie (entre broche 7 et la masse) est :

$$u_S(t) = k.u_1.u_2 + u_3$$

On dit qu'il s'agit d'un montage multiplieur-sommeur de tension.

C'est le cas du montage de la figure 3.

On peut réaliser une modulation d'amplitude en connectant la broche 3 à la broche 6.

$$u_2 = u_3 = U_{pm} \cos 2\pi N_p t ;$$

$u_1(t) = U_m \cos 2\pi N t$, d'où la tension $u_S(t)$ modulée en amplitude :

$$u_S(t) = U_{pm} \cos 2\pi N_p t . [1 + k.U_{pm} \cos 2\pi N_p t].$$

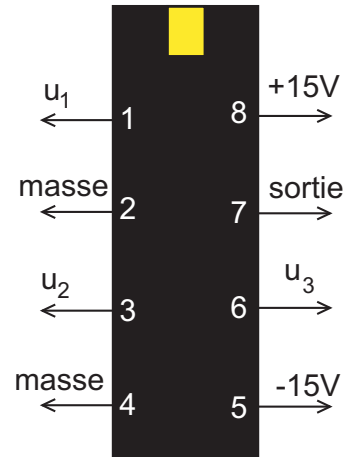


Fig.3

En savoir plus

TRANSMISSION PAR MODULATION

La transmission par ondes de signaux contenant des informations (audio ou vidéo) est couramment utilisée de nos jours, que ce soit pour retransmettre à la télévision un match de football, pour téléphoner de n'importe où en France, écouter la radio ou dans l'utilisation des télécommandes. Mais comment est-il possible d'envoyer ces informations à longue distance et comment fait-on pour décrypter ce signal sur le lieu de son utilisation.

Il est évident que tous les postes émetteurs de radio utilisent une plage de fréquences audibles pour nous faire entendre leurs programmes. Donc, si tous les émetteurs envoyaient directement ces fréquences, nous n'aurions que du bruit à la réception. En attribuant à chacun une porteuse différente, à la réception nous choisissons le programme voulu en sélectionnant sa porteuse (elle peut être définie par sa fréquence ou parfois par sa longueur d'onde). Il suffit alors de démoduler le signal pour avoir accès à l'information d'origine.

Tout signal modulé peut s'écrire sous la forme :

$s(t) = S(t) \cos[\theta(t)] = S(t) \cos[\Omega t + \varphi(t)]$, où $S(t)$ est l'amplitude du signal modulé,
 $\theta(t)$ est la phase instantanée du signal modulé,
 $d\theta/dt = \Omega + d\varphi(t)/dt$ est la pulsation

Deux cas peuvent se présenter :

- $S(t)$ est une fonction du temps et $\varphi(t)$ est une constante : C'est la modulation d'amplitude.
- $S(t)$ est une constante et $\varphi(t)$ est une fonction du temps : C'est la modulation de fréquence ou de phase.

I - MODULATION D'AMPLITUDE AM

Dans ce type de modulation, le signal source fait varier l'amplitude de la porteuse. On dit aussi que la source est l'enveloppe de la porteuse. Cette modulation est surtout utilisée en radio - ondes moyennes (AM ou MW d'environ 500 à 2000 kHz).

La modulation d'amplitude est très sensible aux perturbations électromagnétiques qui peuvent modifier l'amplitude de la porteuse et donc du signal source lors de la démodulation. La largeur de bande du signal modulé est de plus ou moins la fréquence de la source autour de la porteuse, soit pour une source à 3 kHz et une porteuse 600 kHz une largeur de bande de 6kHz (de 597 à 603 kHz) .

A l'analyseur de spectre, on voit trois raies : deux petites latérales (597 et 603 kHz) et une grande à 600 kHz. Les deux bandes latérales contiennent l'ensemble des informations du signal source. On peut donc transmettre une seule bande latérale. On parle alors de modulation à bande latérale unique (BLU).

De manière simplifiée, on peut dire que la valeur instantanée du signal transmis est égale au produit des signaux instantanés (porteuse x source)

1° - Modulation d'amplitude à porteuse supprimée

La tension sinusoïdale de la porteuse H.F s'écrit : $v(t) = V_m \cos \Omega t$

La tension du signal modulant s'écrit : $u(t) = U_m \cos \omega t$ avec $\omega \ll \Omega$.

On effectue la modulation à l'aide d'un multiplicateur analogique, on obtient $s(t)$, le produit de la porteuse par le signal modulant.

$s(t) = k.u(t).v(t) = k.U_m.V_m.\cos \omega t . \cos \Omega t$

On a $\cos(a) \cos(b) = 1/2 [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$.

$$s(t) = 1/2 \cdot k \cdot U_m \cdot V_m \cdot [\cos(\Omega - \omega)t + \cos(\Omega + \omega)t]$$

On obtient le spectre de fréquence ci-contre.

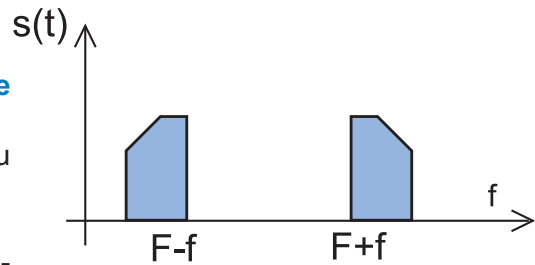
2° - Démodulation d'une modulation à porteuse supprimée

La démodulation est réalisée par multiplication du signal modulé $s(t)$ par la porteuse $v(t)$.

On obtient : $s(t) \cdot v(t) \propto [\cos(2\Omega - \omega)t + \cos \omega t]$

Le premier terme est éliminé grâce à un filtre passe-bas (car Ω est une pulsation élevée), reste alors $\propto \cos \omega t$ qui est proportionnel au signal modulant $u(t)$ initial.

L'inconvénient de ce montage est qu'il faut pouvoir disposer de la porteuse lors de la réception pour démoduler le signal modulé. L'avantage est que la puissance fournie par l'émetteur est consacrée uniquement au signal utile.



3° - Modulation d'amplitude avec porteuse

On utilise une porteuse H.F de la forme : $v(t) = V_m \cos \Omega t$

Le signal modulant BF est de la forme : $u(t) = U_o + U_m \cdot \cos \omega t$

avec $\omega \ll \Omega$ et U_o est une composante continue ajoutée.

On effectue une modulation dite " équilibrée " à l'aide d'un multiplieur analogique :

$$s(t) = k \cdot u(t) \cdot v(t) = k \cdot (U_o + U_m \cdot \cos \omega t) \cdot (V_m \cdot \cos \Omega t)$$

$$s(t) = k \cdot U_o (1 + U_m/U_o \cos \omega t) \cdot (V_m \cdot \cos \Omega t)$$

$$s(t) = A(1 + m \cdot \cos \omega t) \cdot \cos \Omega t$$

Avec $A = kU_oV_m$ et $m = U_m/U_o$, le taux de

modulation, l'amplitude du signal modulé est :

$$S(t) = A(1 + m \cdot \cos \omega t)$$

$S(t)$ varie en fonction du temps tel que :

$$A(1 - m) < S(t) < A(1 + m)$$

En développant $s(t)$, on obtient :

$$s(t) = A \cdot \cos \Omega t + (Am/2) \cdot \cos(\Omega + \omega)t + (Am/2) \cdot \cos(\Omega - \omega)t$$

Le spectre de fréquence est ci-contre.

L'inconvénient de ce type de montage est que la puissance P sert surtout à transmettre la porteuse.

$$P = ((V_m \cdot U_m)^2 / 2R) \cdot (1 + m^2/2)$$

Son avantage est qu'il est inutile de disposer de la porteuse lors de la réception.

4° - Démodulation à diode ou montage " détecteur de crêtes "

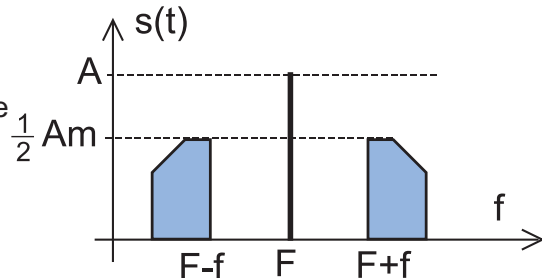
Il est possible d'utiliser ce type de démodulation uniquement avec une modulation positive avec porteuse ($m < 1$).

5° - Démodulation par détection synchrone

On multiplie $s(t)$ par la porteuse et on ajoute un filtre passe-bas. Cette méthode est idéale lorsque les signaux reçus sont faibles et elle fonctionne également dans le cas d'une modulation négative avec porteuse ou bien sans porteuse.

6° - Importance du spectre

L'antenne émettrice, l'antenne et le circuit récepteurs sont accordés sur la fréquence porteuse. Cet accord ne doit pas être trop sélectif pour ne pas éliminer les fréquences latérales, puisque ce sont justement elles qui transportent l'information : la largeur de la bande passante des différents dispositifs doit être proche de celle du spectre.



Chaque station émettrice occupe un certain domaine (canal) de fréquences. Les signaux émis par deux stations différentes ne doivent pas se recouvrir. On doit donc utiliser des fréquences porteuses suffisamment éloignées les unes des autres, et ce d'autant plus que les signaux modulant ont une fréquence élevée car le spectre est alors plus large (télévision).

L'amplitude et le taux de modulation doivent également être contrôlés, notamment mais pas uniquement en modulation de fréquence. En effet, s'ils sont trop élevés, des composantes latérales éloignées de f_p , situées hors du canal car normalement très faibles, peuvent devenir plus fortes et donc gênantes pour les stations voisines. En FM, l'élévation du taux de modulation augmente de plus la largeur du spectre.

II- MODULATION DE FRÉQUENCE FM

Le signal modulé en fréquence garde une amplitude constante, mais sa fréquence varie légèrement au cours du temps autour de la valeur F (fréquence de la porteuse). Les variations de fréquence reproduisent le signal modulant. Ce type de modulation est utilisé surtout en radio - ondes ultracourtes (FM d'environ 80 à 110 MHz).

La modulation de fréquences est peu sensible aux perturbations électromagnétiques, car ces dernières provoquent des variations d'amplitude du signal mais pas de sa fréquence. Le signal démodulé est donc identique à celui de la source.

1° - Modulation

Le signal modulant B.F est $s_m(t)$. La porteuse H.F possède la pulsation Ω_o . Le signal modulé s'écrit : $s(t) = A_o \cos [\Omega_o t + \varphi(t)] = A_o \cos [\theta(t)]$.

La pulsation instantanée du signal modulé est définie par : $\Omega = d\theta/dt = \Omega_o + d\varphi/dt$

Dans le cas de la modulation de fréquence :

$$\varphi(t) = 2\pi k \int_0^t s_m(t) dt$$

On en déduit : $\Omega = \Omega_o + 2\pi k s_m(t)$, ce qui justifie le nom de cette modulation.

Le signal modulé s'écrit alors :

$$s(t) = A_o \cos \left[\Omega_o t + 2\pi k \int_0^t s_m(t) dt \right]$$

Si le signal modulant est sinusoïdal, $s_m(t) = A_m \cdot \cos \omega t$, le signal modulé s'écrit :

$$s(t) = A_o \cos \left[\Omega_o t + \frac{2\pi k A_m}{\omega} \sin \omega t \right]$$

Avec f la fréquence du signal modulant, on peut déterminer m_f le taux de modulation en fréquence. f_{\max} est la fréquence maximal du signal modulé, f_{\min} sa fréquence minimal.

$$m_f = (f_{\max} - f_{\min})/2f$$

$$m_f = (1/2)T \cdot (1/T_{\min} - 1/T_{\max})$$

Le taux de modulation en fréquence est généralement très supérieur à 1.

2° - Démodulation

La démodulation d'un signal modulé en fréquence s'effectue en deux étapes : on transforme d'abord la modulation de fréquence en modulation d'amplitude, on utilise ensuite un montage redresseur-détecteur de crête puis un filtre passe haut comme on a vu dans la modulation d'amplitude.

V - MODULATION DE PHASE (PSK)

Cette modulation est principalement utilisée pour des transmissions de valeurs binaires. La porteuse est déphasée selon l'amplitude du signal source. Pour un signal binaire, la variation de phase est de 180 degrés à chaque transition.

On peut également définir 4 déphasages différents (tous les 90 degrés) pour transmettre les valeurs binaires : "00", "01", "10", "11".

Dès lors, le débit binaire sera 2 fois plus grand que le débit exprimé en Bauds. Cette unité de vitesse de transmission d'information caractérise la fréquence de démodulation, c'est-à-dire le nombre de changements d'états que le modem fait subir au signal par seconde. Ainsi, le débit en bauds n'est pas tout à fait égal au débit en bits par secondes, car plus d'un changement d'état du signal peuvent être nécessaires pour coder un bit.

VI - CONCLUSION

Nous avons vu trois techniques de modulation-démodulation. De nombreuses autres existent pourtant. Certaines obsolètes ont été abandonnées, d'autres apparaissent au fur à mesure des avancées technologiques et des découvertes scientifiques. Néanmoins, toutes reposent sur le même principe et ont le même but : transmettre l'information sans la modifier.

Extraits d'un document d'Etienne Guillier

Réponses aux exercices

Chapitre 1

3. 1°) $0.7 \mu\text{F}$, 2°) $8.8 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
 4. 1°) $18 \mu\text{C}$, 2°) a) 0.9V , b) $8.1 \cdot 10^{-6} \text{ J}$
 5. 1°) 0.24 s , 2°) a) 12 V , b) $3.6 \cdot 10^{-8} \text{ A}$
 6. 1°) $6 \cdot 10^{-4} \text{ A}$, 2°) 20 ms , 2°) 92 ms
 7. 2°) $1 \mu\text{s}$, 4°) 10^{-8} F
 8. 1°) 0.12 s , 2°) $12\text{k}\Omega$, 2°) $10 \mu\text{F}$
 9. 2°) 12 V , 150ms , 4°) $15\text{k}\Omega$

Chapitre 2

3. a-Nord, b-Sud, c-Sud; d-Nord.
 4. 1°) a) Bp et Ba sont opposés., b) La règle du bonhomme d' Ampère.
 2°) a) Bp et Ba ont le même sens, b) La règle du bonhomme d' Ampère.
 5. 1°) $\frac{di}{dt} = -\frac{e}{L} \cdot 2Y$ t $\in [0, 5 \text{ ms}]$, $i = (-6t + 30) \cdot 10^{-3} \text{ A}$,
 t $\in [5, 8 \text{ ms}] \Rightarrow i = (10t - 50) \cdot 10^{-3} \text{ A}$, 3Y) t $\in [0, 5 \text{ ms}]$,
 $i = f(t)$ décroissante.
 t $\in [5, 8 \text{ ms}] \Rightarrow i = f(t)$ croissante.
 6. 1°) $u_{AB} = (12.Lt + 6.r.t^2) \cdot 10^{-3} \text{ V}$. 2°) $u_{AB} \simeq 6,06 \text{ V}$.
 7. 1°) t $\in [0, 40 \text{ ms}] \Rightarrow u_{AB} = 3L$, - t $\in [40, 50 \text{ ms}] \Rightarrow$
 $u_{AB} = -12.L$, 2°) t $\in [0, 40 \text{ ms}] \Rightarrow u_{AB} = 0,3.V$
 - t $\in [40, 50 \text{ ms}] \Rightarrow u_{AB} = -1,2.V$
 8. 1°) $i(t)$ tend vers une limite I_0 . 2Y) $I_0 = \frac{E}{r + R_0}$.
 3°) $\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} \cdot i = \frac{E}{L}$. 4Y) On remplace i par son expres-
 sion. 5°) $A = \frac{E}{R}$; $\alpha = \frac{R}{L}$. 6Y) $\tau = \frac{L}{R}$; pour t = 5. τ le
 régime permanent s'établit.
 9. a) $I_0 = \frac{E}{R} = 0.1 \text{ A}$. b) $\tau = \frac{L}{R} = 0.83 \text{ ms}$.

10. 1°) $u_{AB} = L \cdot \frac{di}{dt} + r \cdot i$. 2°) $u_{BC} = R \cdot i$. 3°) courbe1: u_{BC} ,
 courbe2: u_{AB} . 4°) $I_0 = \frac{E}{r + R} = 28,6 \text{ mA}$.
 5°) $I_0 = \frac{U_{BC}}{r} = 28,5 \text{ mA}$. 6°) Méthode de tangente
 7°) $\tau = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. 8Y) $\tau = \frac{L}{r + R}$.
 Donc, $R = \tau \cdot (r + R) = 0,53 \text{ H}$.
 11. 2°) $u_{AB} = L \cdot \frac{di}{dt} + r \cdot i$. 3°) a- $I_0 = \frac{U_r}{r} = 0,1 \text{ A}$.
 b- $r = 10 \text{ ?}$. 4°) $\tau \leq 10^{-3} \text{ s}$. 5°) $L = (r + r') \tau = 60 \text{ mH}$.
 6°) $W = 0,3 \text{ m.J}$.

12. 1°) $I_0 = 50 \text{ mA}$. 2°) a) la méthode de la tangente
 donne $\tau = 22 \text{ ms}$. b) $i(t_{1/2}) = \frac{I_0}{2} \rightarrow \tau = 22 \text{ ms}$.
 3°) $L = R \cdot \tau = 1,1 \text{ H}$. 4°) $e = 2,5 \text{ V}$.

Chapitre 3

3. 1°) Oscillations libres amorties;
 2°) $E = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ J}$; 4°) $L = 2,67 \text{ H}$
 4. 1°) L'amplitude décroît au cours du temps
 2°) $T = 6,5 \text{ ms}$; 2°) $T_0 = 6,28 \text{ ms}$. 4°) $T_E = 3,3 \text{ ms}$;
 5°) $T = 2T_E$.
 7. 1°) $T_0 = 4,0 \text{ ms}$ et $T = 4,4 \text{ ms}$, donc $T > T_0$.
 2°) $E_1 = 1,485 \mu\text{J}$ et $E_7 = 0,145 \mu\text{J}$.
 3°b) L'énergie totale diminue au cours du temps.
 8. A. 3°) $\tau = 0,4 \text{ ms}$; 4°b) $u_1 = 0,993 E \simeq 5,96 \text{ V}$.
 Le condensateur est complètement chargé.
 B. 1°) La courbe (2) représente U_r .
 2°) $\frac{L}{2R} + \frac{du_2}{dt} + U_2 + \frac{1}{2RC} \int U_2 dt = 0$
 3°) $T = 25 \text{ ms}$, $T_0 = 24,8 \text{ ms}$. Donc : $T \simeq T_0$
 4°) Fig. 4 correspond à une augmentation de L.
 Fig.5 correspond à une augmentation de R.
 9. 1°) $Q_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ C}$;
 2°e) $U_m = 3 \text{ V}$, $\phi = \pi/2 \text{ rad}$; 2°f) $t_K = 0,75 T_0 + kT_0$.
 3°a) $T > T_0$; 3°c) $W_J = 32,2 \mu\text{J}$.
 10. 1°) L'amplitude des oscillations diminue.
 2°b) $L = 0,25 \text{ H}$; 25%
 11. 1°a) A t=0, $u_C = E$, donc (2) correspond à u_C .
 1°c) $\tau = 0,7 \text{ s}$; 1°d) $i \simeq 158 \mu\text{A}$.

Chapitre 4

3. 2°a) $i(t) = I_m \sin 2\pi Nt$, avec $I_m = 8 \text{ mA}$;
2°b) $L = 58,8 \text{ mH}$; c) $R \leq 250 \Omega$, car les oscillations sont autoentretenues pour $R'_{\min} = R$.

4. 1°) $N = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ **2°)** Plus C est grande, plus N et R sont petites. Donc, r augmente avec N.

5. 2°) $R' = R - E/I = 90 \Omega$;
3°a) Oui, car $R' > r$; **3°b)** $T = 3,14 \text{ ms}$.

6. 2°) A l'amorçage, la résistance négative est égale à $(-R_o - r)$. Donc, le circuit est équivalent à un dipôle LC.

2°) Expression de N_o est celle de **1°)** de l'exercice 4.

4°a) $E = (1/2)U_m^2$; **4°b)** E provient du dispositif d'entretien (dipôle à résistance négative).

7. 2°b) 25 ms ; **2°)** $T = 5 \text{ ms}$; **4°)** $T_{th} = 4,994 \text{ ms}$.
 Donc, T est pratiquement égale à T_{th} .

8. 1°) Oscillations libres ; **2°)** $T_o = (LC)^{1/2}$; **3°a)** k a la dimension du quotient U/I qui est celle d'une résistance ;

$$\mathbf{3°b)} \quad \frac{d^2i}{dt^2} + (r+k) \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0$$

3°c) $k < 0$; **3°d)** $k \leq -r$

9. 1°a) Oscillations libres amorties ; **1°b)** $T = 30 \text{ ms}$;

1°c) $C < T^2/4\pi^2L = 45,6 \cdot 10^{-6} \text{ F}$. Donc, $C = 35 \mu\text{F}$;

2°a) Oui, car $R' < r$; **2°b)** Augmenter R' car elle est inférieure à r ; **3°c)** Oscillogramme (2) dont $T = T_o$

10. 1°) $u = -R \cdot (R_1/R_2) \cdot i$. Donc, il faut $R_1 = R_2$ pour avoir $u = -Ri$; **2°a)** $R > r$; **2°b)**

$$\text{Avec } u_C = U_{Cm} \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}, \quad i = \frac{dq}{dt} = I_m \sin(2\pi \frac{t}{T} + \frac{\pi}{2}),$$

$$\text{où } I_m = \frac{2\pi}{T} C U_m = 5 \text{ mA.}$$

2°c) $L = T^2/4\pi^2C = 317 \text{ mH}$;

2°d) $E = (1/2)U_m^2 = 3,96 \cdot 10^{-6} \text{ J}$.

Chapitre 5

3. $C = 9,5 \cdot 10^{-7} \text{ F}$

5. 2°) $I = U/Z$; **3°a)** $N = 48 \text{ Hz}$;

3°b) $Z_o = 32,5 \Omega$; $I_o = 3,077 \text{ A}$.

6. 2°a) Résonance d'intensité. **2°b)** ω_o ne dépend que de L et de C. **2°c)** $Z = R$ et $\Delta\varphi = 0$.

7. 1°) $r = 15,4 \Omega$; **2°)** $Q = 10,445$; $P = 0,26 \text{ W}$.

9. 2°a) $L_o = 1\text{H}$; **2°b)** $Q = 6,28 > 1$; **2°)** $L < 1,6 \text{ H}$.

10. 1°) $E_o = 2\pi U^2 / \omega_o R$; **2°)** $E_t = LU^2 / R^2$.

3°) $E_t / E_o = Q / 2\pi$.

Chapitre 6

3. 1°) a) $G = 20 \log T$

N(Hz)	100	200	500	1000	2000	4000
T	25,14	25,14	17,79	12,60	6,31	3,17
G(dB)	28	28	25	22	16	10

2°) a) $G_o = 28 \text{ dB}$; **b)** $N_h = 500\text{Hz}$

4. 1°) $T = U_{Sm}/U_{Em}$; $G = 20 \log T$

2°) Valeur efficace maximale de la tension de sortie. **2°)** $U_{So}/U_S = 1,414$ soit

5. 1°) a) $G_o = 1\text{dB}$

$G_o = 20 \log T_o$, ce qui équivaut $T_o = 10^{Go/20}$

D'où, $T_o = 1,122$; **b)** Les fréquences de coupure:

$N_b = 12 \text{ Hz}$ et $N_h = 15 \text{ Hz}$.

La bande passante [12Hz, 15Hz]

La largeur de la bande passante : 3Hz

2°) $G_o = \log T_o$ et $T_o = U_{Smo}/U_{Em}$

$U_{Smo} = T_o \cdot U_{Em}$ soit 0,4488V

6.1°) Courbe 1 : $U_{Sm} = 0,8\text{V}$; $T = 1$; $G = 0 \text{ dB}$

Courbe 2 : $U_{Sm} = 0,45 \text{ V}$; $T = 0,56$; $G = -5 \text{ dB}$

Courbe 3 : $U_{Sm} = 1,4 \text{ V}$; $T = 1,75$; $G = 4,86 \text{ dB}$

2°) $G = 0$. L'amplitude du signal traité n'est pas affectée.

Chapitre 7

3.1°a) $u_S(t) = U_{Sm} \sin(\omega t + \varphi)$; **b)** $T = \frac{1}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$

c) $G = -10 \log(1 + (RC\omega)^2)$

2°c) $N_b \approx 1 \text{ kHz}$ et $\Delta N = 1 \text{ kHz}$

2°a) Pour $N = 1 \text{ kHz}$, on a : $\varphi = -45^\circ$;

b) $U_{Sm} \approx 1,4 \text{ V}$; $u_S(t) = 1,4 \sin(2000 \pi t - \pi/4)$

4.1°) Z_R indépendant de ω ; $Z_c = 1/C\omega$:

• Si $\omega \rightarrow 0$, $Z_c \rightarrow \infty$

Le condensateur se comporte comme un circuit ouvert, le signal d'entrée est atténué à la sortie.

• Si $\omega \rightarrow \infty$, $Z_c \rightarrow 0$

Le condensateur se comporte comme un circuit fermé, le signal d'entrée est transmis à la sortie.

Le filtre est passant pour les hautes fréquences : c'est un filtre passe haut.

$$2^{\circ}) \quad T = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(RC\omega)^2}}}$$

$$T(0) = 0; \quad T(\infty) = 1$$

$$2^{\circ}) \quad N_c = N_b = \frac{1}{2\pi RC} = 15,9 \text{ Hz}$$

La bande passante : [15,9 Hz, ∞ [

$$5.1^{\circ}) \quad T = \frac{\frac{N_2}{R_1}}{\sqrt{1 + (2\pi R_2 C N)^2}}$$

2°)

• Si $N \rightarrow 0$, $T \rightarrow \frac{R_2}{R_1}$

$U_{Sm} \neq 0$. Le filtre est passant.

• Si $N \rightarrow \infty$, $T \rightarrow 0$

$U_{Sm} = 0$. Le filtre n'est pas passant.

Il s'agit d'un filtre passe bas.

$$2^{\circ}) \quad N_h = 15,92 \text{ Hz}$$

$$4^{\circ}) \quad \text{a) } G = 20 \log \frac{\frac{N_2}{R_1}}{\sqrt{1 + (2\pi R_2 C N)^2}} \quad \text{b) } G_{Max} = 13,97$$

Le filtre est actif.

$$6. \quad 4^{\circ}) \quad \text{a) } Q = 2,77; \quad \text{b) } \Delta N \approx 813 \text{ Hz}$$

$$7. \quad 2^{\circ}) \quad \text{a) } z = \sqrt{(r+R)^2 + (L\omega - \frac{1}{C_0})^2}$$

$$\text{b) } Z = r + R$$

$$N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 712,12 \text{ Hz} \quad ; \quad c = Q_0 = \frac{L\omega_0}{R+r} = 4,472$$

$$2^{\circ}) \quad T(2N_0) = 0,186$$

$$4^{\circ}) \quad \text{a) } N_1 = \frac{N_0}{2Q} (-1 + \sqrt{1 + 4Q^2})$$

$$N_1 = \frac{N_0}{2Q} (+1 + \sqrt{1 + 4Q^2})$$

$$N_2 - N_1 = \frac{N_0}{Q}$$

$$N_1 = 1346,5 \text{ Hz} \quad ; \quad N_2 = 1505,7 \text{ Hz}$$

$$\Delta N = 159,2 \text{ Hz}$$

$$\text{b) } Q = \frac{N_0}{\Delta N}, \quad Q = 4,472; \quad Q = Q_0$$

8. 2°) Oui, il manque le générateur d'alimentation de l'amplificateur opérationnel.

2°) a) Pour la fréquence faible 100 Hz,

$$\frac{U_{Sm}}{U_{Em}} \approx 5, \text{ d'où } T > 1$$

Pour la fréquence très élevée 100 kHz,

$$\frac{U_{Sm}}{U_{Em}} \approx 0,25, \text{ d'où } T < 1$$

Il s'agit d'un filtre passe bas

$$\text{b- } T_{Max} \approx 5$$

$$\text{c- } G_{Max} = 13,979 \text{ dB} \approx 14 \text{ dB.}$$

$$4^{\circ}) \quad \text{a) } T = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (R_0 C \omega)^2}}$$

$$\text{b) } T(0) = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad ; \quad T(\infty) = 0$$

Chapitre 8

3. 1°) $A = -U_{DD}$; $B = U_{DD}$. ; 2°) a) $t_1 = RC \text{ Log} 2$

2°) b) $C = 9,6 \mu\text{F}$; 3°) b) $t_0 = 15,82 \text{ ms.}$

4. 1°) a) $\tau = 2,2 \text{ ms}$

b) $U_{HB} = 7,5 \text{ V}$; $U_{BH} = -7,5 \text{ V}$

c) $T_1 = T_2 = 3 \text{ ms}$

2°) $d = 0,5$

4°) $R = 22 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 14,55 \text{ k}\Omega$

5. 1°) $U_2 = (R/R + R_2)(U_{sat} - U_{D2})$;

2°) $U_1 = (R/R + R_1)(U_{D1} - U_{sat})$

2°) $U_2 = 2,33 \text{ V}$; $U_1 = -4,67 \text{ V.}$

6. 1°) $U_0 = R_1 U_s / (R_1 + R_2)$; 2°) $U_{02} = -U_{01} = 6 \text{ V.}$

4°a) $T_1 = (R + R_A) C \text{ Log}(1 + 2R_1/R_2)$

$$T_2 = (R + R_B) C \text{ Log}(1 + 2R_1/R_2)$$

4°b) $T = (R + R_v) C \text{ Log}(1 + 2R_1/R_2) = 3,3 \text{ ms.}$

7. 1°) Comparateur; 2°a) $u_F = (R_1 + R_2 / R_1)(u_E - \varepsilon)$;

2°b) $R_2 = 2,5 \text{ k}\Omega.$

Chapitre 9

3. 1°) $I = a_0 E / R$. 2°) $u_S = -(R'E/R)N$. 3°) $q = -R'E/R$,
 $q = -1 \text{ V}$, P.E. = -7 V .

4. 1°) $n = 28 = 256$. 2°) $q = (P.E.)/2n - 1 = 39 \text{ mV}$.
 3°) $v_S = 7,84 \text{ V}$.

5. 1°) a) $I_o = -(a_0 E_{\text{ref}})/128R$, b) $u_S = (a_0 R/128R)E_{\text{ref}}$.
 2°) $a_1 = a_3 = a_6 = a_7 = 1$ et $a_0 = a_2 = a_4 = a_5 = 0$.
 3°) $u_S = 7,88 \text{ V}$. 4°) $U_{S \text{ max}} < U_{\text{Sat}}$ de l'amplificateur.

6. 1°) $u_S = -(R'E_{\text{ref}}/4R)N$. 2°) $q = 143 \text{ mV}$.
 2°) $U_{S \text{ max}} = 1 \text{ V}$. 4°) $N_{\text{max}} = 7$. 5°) $r = 1/2n = 1/8$.

7. 1°) Donner une tension à partir d'un courant.
 2°) $I_A = V_A/R_A$, $I_B = V_B/R_B$. 3°) $I_o = -u_S/R_o$.
 5°) $u_S = 0,1(8V_D + 4V_C + 2V_B + V_A)$.

8. 1°) $u_S = -a \cdot a_0 \cdot E$. 2°) $u_S = -a \cdot E \cdot N$. 3°) $q = -a \cdot E$.
 4°) $a = 0,22$; 5°) insérer un amplificateur opérationnel.

Chapitre 10

3. 1°) $N = 50 \text{ Hz}$, $\lambda = 0,2 \text{ m}$. 2°) b - M_1 et S vibrent en opposition de phase, M_2 et S vibrent en phase.
 3°) $N_e = 25 \text{ Hz}$: immobilité; $N_e = 49 \text{ Hz}$: mouvement ralenti dans le sens réel; $N_e = 51 \text{ Hz}$: mouvement ralenti dans le sens inverse.

4. 1°) $y_S(t) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(100 \pi t)$.
 2°) a) $y_M(t) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(100 \pi t - 2 \pi d/\lambda)$,
 b) $y_M(t) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(100 \pi t - \pi)$.

5. 1°) a) $v = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. b) $\lambda = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. 2°)
 a) $y_M(t) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(200 \pi t - \pi)$. c) $t = 6,75 \cdot T + k \cdot T$.

6. 1°) $\lambda = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, 2°) $v = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 3°) $t_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ s}$.
 4°) $y_S(t) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(100 \pi t + \pi)$, 5°) Points sur les

cercles de rayons : $x_1 = \lambda/2$; $x_2 = 3\lambda/2$; $x_3 = 5\lambda/2$.

7. 1°) b- $\lambda = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. 2°) a) $y_M(t) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(100 \pi t)$

b) $v = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. c- $y_o(t) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(100 \pi t + \pi)$.

3°) Deux cercles de rayons $x_1 = \lambda$ et $x_2 = 2\lambda$.

4°) a) $\lambda = 0,3 \text{ m}$; $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $N = 100 \text{ Hz}$.

b) $y_S(t) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(200 \pi t)$.

c) $y_A(t) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(200 \pi t - \pi)$.

9. I. 1°) $T = 0,01 \text{ s}$; $\lambda = 0,2 \text{ m}$. 2°) $v = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;

$x_A = 0,40 \text{ m}$; $t_1 = 0,02 \text{ s}$.

3°) $y_S(t) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(200 \pi t)$;

$y_A(t) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(200 \pi t - \frac{\pi}{2})$

4°) c) 3 points situés à $x = 5\lambda/12 + k\lambda$ ($k = 0, 1, \text{ ou } 2$).

II-1) $y_M(t) = 10^{-3} \sin(628t - 2\pi \cdot x/\lambda)$, 2°) $v = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4°) immobilité : $N_e = N/k$, pour $k=1$: $N_e = N = 100 \text{ Hz}$.

10. 1°) a) $N = 50 \text{ Hz}$; $\lambda = 0,2 \text{ m}$. b) $v = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c) $x_1 = 0,55 \text{ m}$; $t_0 = 0,055 \text{ s}$.

2°) S et M_1 en quadrature de phase.

3°) $t = (6,75 \cdot 10^{-2} + 0,02k) \text{ s}$; $t_1 = 6,75 \cdot 10^{-2} \text{ s}$.

4°) 3 points situés à $x = \lambda/8 + k\lambda$, avec $k = 0, 1, \text{ ou } 2$.

11. 1°) a) 10^{-4} s/div , b) dilution de l'énergie.

2°) b) $d = 34 \text{ cm}$; base de temps : $2 \cdot 10^{-4} \text{ s/div}$.

12. 1°) $N = 500 \text{ Hz}$. 2°) $\lambda = 0,68 \text{ m}$, 3°) $v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

13. b) $N = 1000 \text{ Hz}$, c) $\lambda = 0,34 \text{ m}$. d) $v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

14. 1°) a) $T \simeq 68 \text{ ms}$, $s \simeq 0,1 \text{ ms/div}$. b) $\theta \simeq 0,15 \text{ ms}$;
 $\Delta t = n \cdot T + \theta = n/f + \theta$.

2°) $U_R = 300 \text{ mV}$; $U_B = 250 \text{ mV}$.

3°) $\lambda = d_2 - d_1 = 23 \text{ cm}$. $v = \lambda \cdot f = 338 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4°) $d = v \cdot \Delta t = v(n/f + \theta) = \lambda \cdot n + \lambda \cdot f \cdot \theta$,

$d = 23 \cdot n + 5,1 \text{ (cm)}$; $d = 51,1 \text{ cm}$.

5°) Célérité constante, l'air est un milieu non dispersif.

Chapitre 11

3. 1°) 60°, 2°) 0,50 m.s⁻¹, 3°) $r = 60^\circ$.

4.1°) $\lambda \gg \lambda$, 2°) rides circulaires, 3°) diffraction, 4°) $\lambda \ll \lambda$, pas de diffraction.

5.1°) oui, 2°) $\lambda_2 = v_2 / N_2 = v_1 / N_2 = 7,25 \cdot 10^{-3} \text{m}$.

6. 1°) a) Oui, b) transmission avec changement de célérité, 2°) a) $\lambda_1 = v_2 / N = 2 \cdot 10^{-2} \text{m}$, $\lambda_2 = v_2 / N = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{m}$, b) $\lambda_2 < \lambda_1$, 4°) non, car $v_2 \neq v_1$, pour $N = \text{Cte}$.

7.1°) $\lambda_1 = v_1 / N = 2 \cdot 10^{-2} \text{m}$, 2°) $\lambda_2 = v_2 / N = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{m}$, 3°) $\sin(i_2) = v_2 \sin(i_1) / v_1$ ce qui donne $i_2 = 19,47^\circ$.

8.1°) $n = c/v$, 2°) $\sin(i_1) = n \cdot \sin(i_2)$, 4°) une tache, 5°) oui, on obtient le spectre de la lumière blanche.

9.1°) Une seule radiation, 2°) a) Tache centrale de largeur L , b) $\lambda/a = 6,3 \cdot 10^{-6} < 0,174$, 2°) $L' = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{m}$, 4°) $L' < L$, 5°) $L = 0,63 \cdot 10^{-3} \text{m}$, on mesure difficilement L .

10.1°) $\theta = \lambda/a$, 4°) $\theta = L / 2D$, 5°) $L = 2\lambda \cdot D/a$, 6°) $\lambda = L \cdot a / 2D$, $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$.

11.1°) Une droite, 2°) $r = k/a = 36,7 \cdot 10^{-7} / a$, 4°) $\theta = 1,22 \cdot \lambda/a$, $\theta = r/a$, $r = 1,22 \cdot \lambda D/a$, 5°) $\lambda = 0,67 \mu\text{m}$.

12.2°) $\theta_1 = X_1 / 2D$, $3 - \theta_1 = \lambda/a$, 4°) $\lambda = a \cdot X_1 / 2D = 0,675 \mu\text{m}$, 5°) $L_1 = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{m}$, $L_2 = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{m}$, $L_1 = 2L_2$, 6°) $X_1 = 2\lambda \cdot D/a = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{m}$.

13.1°) $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$, 2°) $\sin(r_j) = \sin(i) / n_j$, $r_j = 19,67^\circ$, 2°) $i_j > r_j$ par la suite $D = i_j - r_j = 10,3^\circ$. 4°) $r_b = 19^\circ$, 2° et $D' = 10,8^\circ$, ainsi la radiation bleue est la plus déviée, la dispersion de la lumière.

Chapitre 12

3. 1°) Pour E_1 , c'est 101 et pour E_2 c'est 110 ; 2°) L'onde est électromagnétique ; 3°) Le canal de transmission pour E_1 est la Led jaune et pour E_2 , c'est la LED rouge.

4.1°) - L'amplitude de la porteuse varie au cours du temps : modulation d'amplitude.

- La fréquence de porteuse varie au cours du temps : modulation de fréquence.

2°) Fig.a : AM et Fig.b : FM.

5. 1°) Ondes électromagnétiques ; 2°) De hautes fréquences se propageant directement ; 3°) de 1mm à 10 mm . 4°) de 30 à 300 GHz.

6. 1°) $\lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{rouge}}$;

2°) Les fréquences des ondes hertziennes sont inférieures aux fréquences ultraviolettes.

7. 1°) Ondes kilométriques ou grandes ondes ; 2°) Ondes porteuses ; 3°) $2,77 \text{ m} < \lambda < 3,44 \text{ m}$; 4°) $l = 79,5 \text{ cm}$.

8. 1°) Détecteur d'ondes électromagnétiques de hautes fréquences situé à l'infini ; 2°) Satellite géostationnaire ; 3°) $\Delta t = 24 \cdot 10^{-2} \text{s}$ plus tard ; 4°) Le signal émis par satellite parcourt une distance plus grande.

9. 1°) On mesure i_1 puis on translate le laser de d et on mesure i_2 ; 2°) $d_2 - d_1 = d = h(1/\text{tgi}_2 - 1/\text{tgi}_1)$; 3°) oui $d_1 = h/\text{tgi}_1$; 4°) Mesurer les dimensions à distance. 5°) oui via les satellite équipés de laser.

10. 1°) L'étincelle entre les extrémités de la boucle. 2°) Emetteur: conducteur fermé sur (B_1) avec éclateur

Récepteur : boucle métallique non fermée.

2°) (B_1) est la bobine, l'éclateur est le condensateur.
4°) $N = 33,3$ MHz.

Chapitre 13

3. 1°) $u_1(t)$: FM et $u_2(t)$: AM ; 2°) $N_{p1} = 15,9$ kHz ;
 $N_1 = 999$ Hz ; $N_{p2} = 31,8$ kHz ; $N_2 = 159$ Hz.

3°) $m = 66,66\%$; 4°) $N_p - N_o = k.u(t)$.

5°) C'est le signal modulé en amplitude.

4. 1°) En utilisant le mode XY ; 2°) Modulation en amplitude ; 3°) $m = 0,63 = 63\%$

5. 1°) $N_p = 90$ kHz et $N = \Delta N/2 = 38,25$ kHz ;
2°) L'amplitude des pics latéraux est de 2,94 V ;
3°) $m = 117,6\%$: sur modulation d'amplitude.

6. 1°) C'est une modulation en amplitude ;
2°) $N_p = 10.N = 100$ kHz ; 3°) $m = 0,294 = 29,4\%$;
4°) Voir la figure 18 du cours.

7. 1°) Le premier est un filtre passe-haut ; le second est un détecteur d'enveloppe et le troisième est un filtre passe-bas ; 2°) $u_1(t)$ est modulée en amplitude ; 3°) de basse fréquence : signal modulant ;
4°) Détecteur d'enveloppe, filtre passe haut, filtre passe bas.

8. 1°) L'amplitude est 2 V et la fréquence est $N = 3,18$ Hz.

3°) L'amplitude est 0,6 V et la fréquence est $N = 318,3$ Hz.

9. 1°) $N_p = 164,2.106$ Hz : fréquence de la porteuse ;

2°a) $T_p = 0,609.10^{-5}$ s ; $T = 10^{-3}$ s ;

2°b) $0,406$ nF < $C \ll 66,66$ nF ; 2°c) $C = 10$ nF.

10. 1°) Modulation en amplitude ; 2°) a correspond à Y_1 et b à Y_2 ; 3°) $m = 60\%$;

4°) $N = N_p/15 = 8$ kHz.

11. 1°) $u+U_o$: trait plein ; $u_p(t)$: trait fin ; 2°) $u+U_o$: entre broche 1 et masse. u_p : entre broche 3 et masse ; 3°) $U_o = 1$ V ; $N_p = 159$ Hz ; $N = 32,8$ Hz ;

4°a) u_p : entre broche 3 et masse, $u_s(t)$: entre broche 7 et masse. 4°b) $u_s(t) = k.(u+U_o)u_p =$

$kU_oU_{pm}(1+U_m/U_o \cos \omega t) \cos \omega_p t$

$U_m = 1$ V ; $U_o = 1$ V ; $U_{pm} = 2$ V ;

$a = kU_oU_{pm} = 0,2$ V ; $b = 206$ rad.s⁻¹ et

$c = 103$ rad.s⁻¹ ; 5°) $m = 1 = 100\%$.

12. 1°) Modulation AM et FM ; On préfère la FM qui est moins sensible aux parasites ; 2°) La large bande passante ; 3°) Pour la télévision, le son...

tandis que l'image ...par modulation d'amplitude ;

4°) En UHF (ultra-haute fréquence) ;

5°) Une seule fréquence porteuse transmettant plusieurs signaux.

Sites Web intéressants

Pour l'ensemble du programme

<http://www.web-sciences.com>
<http://www.phys.free.fr/sommaire.htm>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:Physique>
<http://www.ac-orleans-tours.fr/physique/default.htm>
<http://www.perso-orange.fr/physique.chimie/>
<http://perso.orange.fr/jf.noblet/index.htm>
<http://www.futura-sciences.com>
<http://formation.etud.u-psud.fr>
<http://freephysique.free.fr>
<http://www.walter-fendt.de/ph14f/>
<http://www.ac-versailles.fr/etabliss/lyt/soutien/DPhysChimieT.htm>
<http://www.discip.ac-caen.fr/physapp/lycee/1ie.htm>
<http://www.ac-creteil.fr/mathsciences-lp/VECTEURS/InventCrocodileClips>
<http://www.chimix.com>
<http://perso.orange.fr/gilbert.gastebois/java/accueil.htm>

Evolution de systèmes électriques

<http://www.physique-appliquee.net/>
<http://www.lectronique.com>
<http://www.discip.ac-caen.fr/physapp/lycee>
<http://www.ac-grenoble.fr/phychim/term/tp/dipolerl.htm>
http://www.maxicours.com/soutien-scolaire/electricite/bac-pro/index_1.html
http://www.discip.crdp.ac-caen.fr/phch/lycee/terminale/COURS/4DIPOLE_RL/
http://www.ac-poitiers.fr/sc_phys/formatio/staglabo/elect1_2/inductif/inductif.htm
<http://www4.ac-lille.fr/~physiquechimie/lycee/termS/proaca/schauing/circuirrl.xls>
<http://www.physique.edunet.tn/gabes.html>
<http://wwwphysique.edunet.tn/nabeul.html>
<http://wwwphysique.edunet.tn/kébili.html>
<http://perso.orange.fr/f5zv/RADIO/RM/RM23/RM23I/RM23i06.html>
<http://lyc-renaudeau-49.ac-nantes.fr/physap/spip.php?article418>
<http://lsiwww.epfl.ch/LSI2001/teaching/physiciens/lecon08/lec8.html>
<http://www.epsic.ch/Branches/electronique/toros/index.html>
<http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Physique/Tp-phys/lesp/iesp.htm>
<http://perso.orange.fr/gilbert.gastebois/java/can/can.htm>

Ondes

<http://www.chimix.com/ifrance/pages/diffraction.htm>.
<http://www.sciences.univ-ntes.fr/physique/perso/blanquet/synophys/36opfer/36opfe>.
http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doschim/decouv/couleurs/loupe_spect_lum.html
<http://www.md.ucl.ac.be/didac/physique/didacphys/animations/animations.html>
<http://www.montblancsciences.free.fr/terms/physique/cours/p3.htm>.
<http://www.chimix.com/T-fiches/ondes2.htm>.
<http://www.cours.cegep-st-jerome.qc.ca/203-301-r.f/partie1/chap2/section5.htm>.
[http://www.perso.orange.fr/physique.chimie/TS_Physique/Physique-ondes progressives.htm](http://www.perso.orange.fr/physique.chimie/TS_Physique/Physique-ondes_progressives.htm)
<http://www.ncf.ca/ch865/frenchdescr/movingwaves.html>.
<http://www.edunet.tn/ressources/sitetabl/sites/siliana/boarada/cours/Physique.html>.
www.chimix.com/T-fiches/spe3.htm
<http://membres.lycos.fr/bnathalieb/sp-cialit--terminale/physique/ModulA/odyframe.htm>
<http://www.epsic.ch/pagesperso/schneiderd/Telec/modulation.htm>
<http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/tribollet/RegionR-A/Rubriques/ac-niceAM-FM/modamfm.htm>
http://www.inrp.fr/Access/JIPSP/phymus/m_sons/etude1/ac_etud1.htm
<http://perso.orange.fr/tsf/brico/brico.htm>
<http://transmissions-radio.chez-alice.fr>