

# 1. La transmission des informations

Il est possible actuellement de communiquer de manière quasiment instantanée sur de très grandes distances.



Doc. 1 Les ondes électromagnétiques : fréquences et longueurs d'onde dans le vide.

Les informations, peuvent être transmises par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques (Doc. 1) comme par exemple :

- un signal sonore transporté par de la lumière visible (voir page 92) ;
- La lumière visible, dont la longueur d'onde dans le vide est comprise entre 400 nm et 800 nm, fait partie de la gamme des ondes électromagnétiques.
- une information envoyée grâce à des ondes infrarouges dans le cas des télécommandes ;
- un signal numérisé transmis par des ondes électromagnétiques qui se propagent par fibres optiques dans la téléphonie ;
- un signal sonore transporté par les ondes hertziennes dans le cas de la radio.

Ces ondes électromagnétiques se propagent dans le vide ou dans l'air avec la célérité  $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Elles sont caractérisées par leur fréquence  $f$  et par leur longueur d'onde  $\lambda$  dans l'air ou le vide.

Ces grandeurs sont liées par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

avec  $\lambda$  exprimé en mètre (m),  $c$  en mètre par seconde ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et  $f$  en hertz (Hz).



Doc. 2 Antennes d'émission de Radio-Vatican.

## 2. Les ondes hertziennes

En 1888, Heinrich HERTZ réussit à l'aide d'un circuit oscillant à produire des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est un million de fois plus grande que celle de la lumière. On leur donna le nom d'ondes radio ou ondes hertziennes (Doc. 1).

Les ondes hertziennes utilisées en radio, dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 1 cm et 2 000 m, se propagent depuis une antenne d'émission (Doc. 2) jusqu'à une antenne de réception (Doc. 3).

Dans le cas de la radio, l'information est transmise à distance, sans déplacement de matière en modulant une onde hertzienne qui se propage entre un émetteur et un récepteur.



Doc. 3 Antenne de réception.

### 3. La transmission d'informations par modulation d'une tension

Une onde sonore est transformée en signal électrique de même fréquence par un microphone.

Ce signal électrique ne peut être transmis directement par voie électromagnétique. En effet, les ondes électromagnétiques, de faibles et de mêmes fréquences que les ondes sonores, se propagent mal dans l'air

[Doc. 4].

On transmet l'information (signal modulant) en modulant une onde électromagnétique de haute fréquence (porteuse).

Cette onde électromagnétique est engendrée par une tension sinusoïdale que l'on modélise par une fonction mathématique de la forme :

$$u(t) = U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \phi_0) \quad \text{[Doc. 5].}$$

Ses paramètres sont :

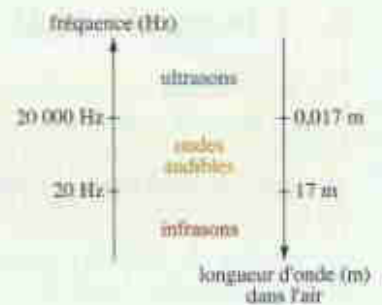
- $U_m$ , l'amplitude ;

- $f$ , la fréquence ( $f = \frac{1}{T}$ ) ;

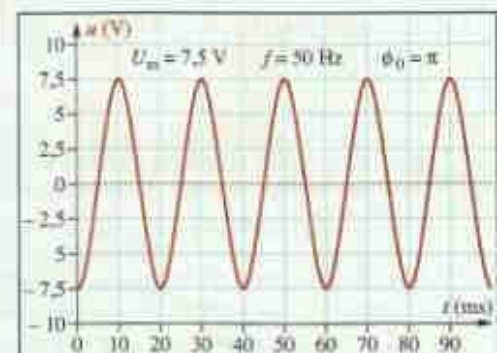
- $\phi_0$ , la phase à l'origine des dates. Sa valeur dépend de la date de déclenchement de l'acquisition.

La transmission de l'information peut être réalisée par modulation de l'amplitude, de la fréquence ou de la phase à l'origine de l'onde porteuse par le signal informatif à transmettre.

On étudiera la transmission par modulation d'amplitude.



Doc. 4. Fréquences des ondes sonores.



Doc. 5 Tension modélisée par la fonction mathématique :  $u(t) = 7,5 \cdot \cos(2\pi \cdot 50t + \pi)$ .

### 4. La modulation d'amplitude

#### 4.1 Le montage multiplieur

On utilise un circuit intégré appelé multiplieur afin de réaliser une modulation d'amplitude. Le multiplieur comporte deux entrées. On applique sur l'une des entrées la tension modulante  $u_1(t)$ , somme de la tension  $u(t)$  (signal à transmettre) et d'une tension continue  $U_0$  nommée tension de décalage.

On applique la tension porteuse  $u_2(t)$  de haute fréquence  $F$  sur la deuxième entrée [Doc. 6].

Pour simplifier, nous supposons que l'information à transmettre se limite à une seule grandeur sinusoïdale de fréquence  $f$ .

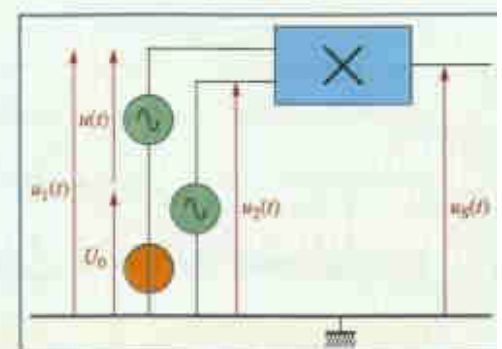
Le circuit multiplieur donne en sortie une tension  $u_3(t)$  telle que :

$$u_3(t) = k \cdot u_1(t) \cdot u_2(t) = k \cdot [u(t) + U_0] \cdot u_2(t).$$

Le coefficient multiplicateur  $k$  dépend du multiplieur, il est exprimé en  $V^{-1}$ .

Cette tension  $u_3$  engendre des oscillations électriques dans l'antenne reliée à la sortie du multiplieur.

Ces oscillations électriques créent une onde électromagnétique qui se propage alors dans tout l'espace.

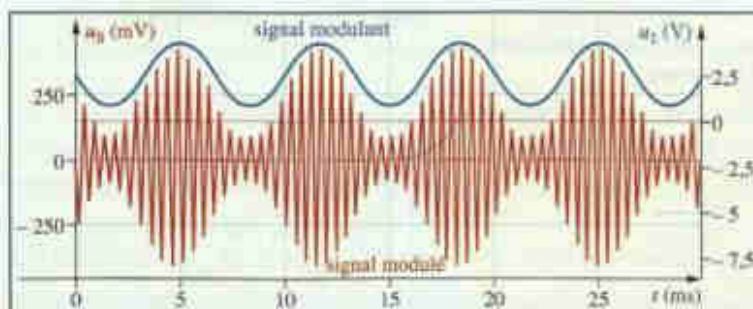


Doc. 6 Montage multiplieur.  
 $u_2(t)$  : porteuse de fréquence  $F = 2\,000\text{ Hz}$  ;  
 $u(t)$  : signal à transmettre de fréquence  $f = 150\text{ Hz}$ .

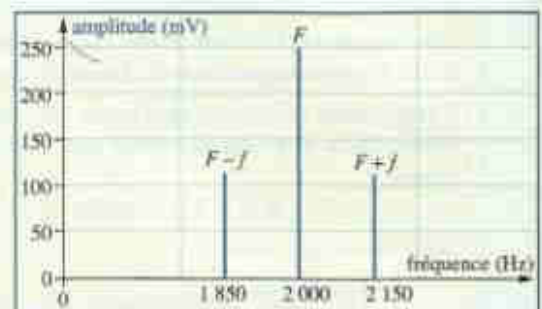
## 4.2 Le signal modulé

La modulation est satisfaisante lorsque l'enveloppe supérieure du signal modulé (représenté en rouge) « suit » les variations du signal modulant (représenté en bleu) (Doc. 7). L'amplitude du signal modulé est alors fonction affine du signal modulant.

Une analyse de FOURIER permet d'obtenir le spectre de fréquences du signal modulé  $u_s(t)$  (Doc. 8).



Doc. 7 Le signal modulant  $u_1$  de fréquence  $f = 150$  Hz et le signal modulé  $u_s$ . Pour une meilleure lisibilité, les échelles verticales des courbes  $u_1$  et  $u_s$  sont différentes.



Doc. 8 Spectre de fréquences.

On observe trois fréquences. Le signal modulé est donc composé de la somme de trois signaux sinusoïdaux de fréquences respectives (Doc. 8) :

$$F - f = 1\,850 \text{ Hz}, \quad F = 2\,000 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad F + f = 2\,150 \text{ Hz}.$$

Retrouvons ces fréquences en calculant l'expression de la tension modulée dans le cas de tensions sinusoïdales. L'expression de la tension modulante est :

$$u_1(t) = U_0 + U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t).$$

L'expression de la tension porteuse est :

$$u_2(t) = U_{2m} \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t).$$

Afin de simplifier les calculs, on considère que les phases à l'origine sont égales à zéro.

$$u_s(t) = k (U_0 + U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)) \cdot U_{2m} \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t).$$

On écrit généralement :

$$u_s(t) = A (1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)) \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)$$

en posant  $A = k \cdot U_0 \cdot U_{2m}$  et  $m = \frac{U_m}{U_0}$  (taux de modulation).

On développe :

$$u_s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) + A \cdot m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t).$$

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

$$u_s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) + A \cdot m \cdot \frac{1}{2} [\cos(2\pi(F + f)t) + \cos(2\pi(F - f)t)].$$

On obtient bien une tension  $u_s(t)$ , somme de trois fonctions sinusoïdales de fréquences :

$$F, F - f \quad \text{et} \quad F + f.$$

### 4.3 Les signaux réels modulés

En réalité, pour un émetteur radio dont la porteuse est  $F = 162 \text{ kHz}$ , les fréquences des signaux réels à transmettre (Doc. 9) vont de  $100 \text{ Hz}$  à  $5 \text{ kHz}$  (signaux audio).

Le spectre va donc, outre la porteuse, comporter deux bandes latérales (Doc. 10)  $[162 - 5 ; 162 - 0,1]$  et  $[162 + 0,1 ; 162 + 5]$ .

Chaque station d'émission radio en modulation d'amplitude peut légalement émettre sur une bande de  $9 \text{ kHz}$  de largeur centrée sur la porteuse.

Les fréquences supérieures à  $4,5 \text{ kHz}$  ne pourront donc pas être transmises. La modulation d'amplitude ne permet donc pas de reproduire fidèlement des signaux sonores complexes.

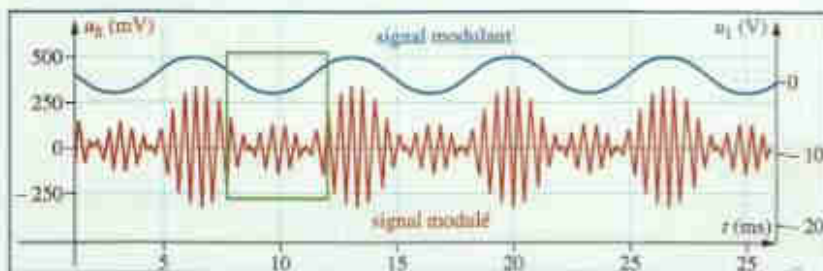
### 4.4 La surmodulation

Pour obtenir une modulation satisfaisante, la tension de décalage  $U_0$  doit être supérieure à l'amplitude de la tension du signal  $u(t)$  (signal à transmettre) transportant l'information : dans ce cas, le taux de modulation  $m$  est tel que :

$$m = \frac{U_{\max}}{U_0} < 1.$$

Si le taux de modulation est supérieur à 1, on observe un phénomène de surmodulation (Doc. 11).

L'enveloppe supérieure du signal modulé ne « suit » plus les variations du signal modulant.



Doc. 11 Surmodulation. Pour une meilleure lisibilité, les échelles verticales des courbes  $u_1$  et  $u_2$  sont différentes.

Dans l'encadré vert, l'enveloppe supérieure du signal modulé ne « suit » pas les variations du signal modulant.

Dans ce cas, l'émission radio est de mauvaise qualité. La réception radio sera également de mauvaise qualité.

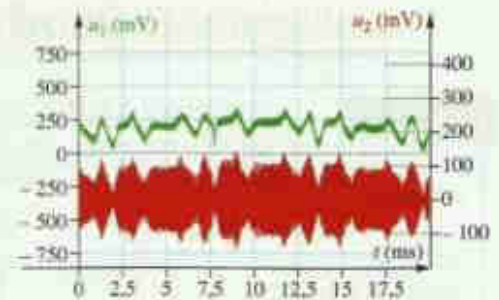
### 4.5 La qualité de la modulation

Afin de vérifier si la modulation est satisfaisante, on utilise la méthode du « trapèze ».

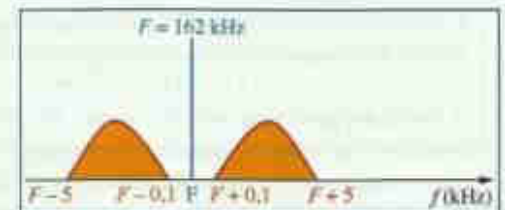
On représente le graphique de la tension de sortie  $u_3(t)$  en fonction de la tension modulante  $u_1(t)$ .

La modulation est satisfaisante lorsque le graphique obtenu a la forme d'un trapèze (Doc. 12. a).

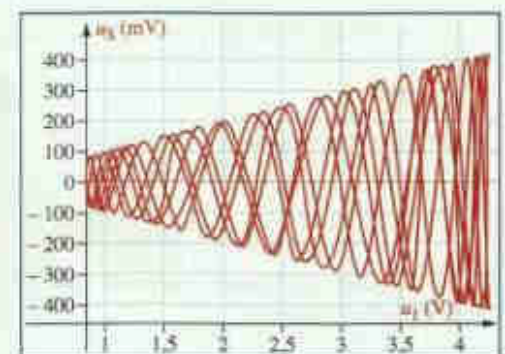
En revanche, lorsqu'il y a surmodulation le graphique n'a plus la forme d'un trapèze (Doc. 12. b).



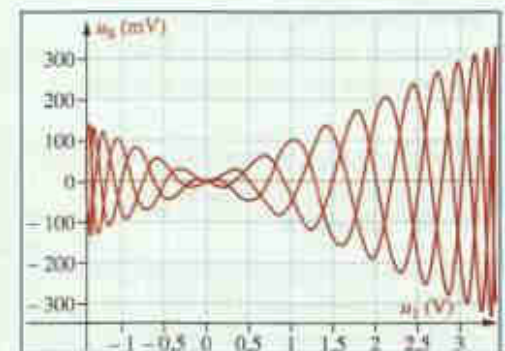
Doc. 9 Un exemple de signal réel modulé. Le signal modulant est représenté en vert et le signal modulé en rouge. Pour une meilleure lisibilité, les échelles des courbes  $u_1$  et  $u_2$  sont différentes.



Doc. 10 Spectre de fréquences dans le cas d'une modulation réelle.



Doc. 12. a Modulation correcte.



Doc. 12. b Modulation incorrecte.

## S'autoévaluer

### 1. QCM : Tension sinusoïdale

Une tension a pour expression  $u = 3\cos(2\pi \cdot 200 t)$ . Dans cette expression  $t$  est le temps exprimé en seconde. Quelles sont les propositions exactes se rapportant à cette tension ?

- Son amplitude est de 6 V.
- Sa valeur moyenne est nulle.
- Sa période est de 5 ms.
- Elle est sinusoïdale.

### 2. QCM : Ondes hertziennes

Quelles sont les propositions exactes ?

- Les ondes hertziennes sont des ondes mécaniques.
- Comme les ondes sonores, les ondes hertziennes ne se propagent pas dans le vide.
- Une onde de fréquence  $f = 40$  kHz peut être une onde de lumière visible.
- Les ondes hertziennes se propagent dans le vide à  $3,00 \times 10^8$  m . s<sup>-1</sup>.

### 3. QCM : Modulation d'amplitude

Deux tensions d'équation :

$$u_1(t) = 3 + 2 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t) \text{ et } u_2(t) = 4 \cdot \cos(2\pi \cdot f_2 \cdot t)$$

sont appliquées aux entrées d'un multiplieur. On a  $f_1 \ll f_2$ .

La tension obtenue à la sortie du multiplieur est notée  $u_s$ .

Quelles sont les propositions exactes ?

- La tension de fréquence  $f_2$  est la tension modulante.
- L'amplitude de  $u_s$  est une fonction affine de la tension modulante.
- L'amplitude de  $u_s$  est constante.
- La fréquence de  $u_s$  est égale à la moyenne de  $f_1$  et de  $f_2$ .

### 4. QCM : Qualité d'une modulation

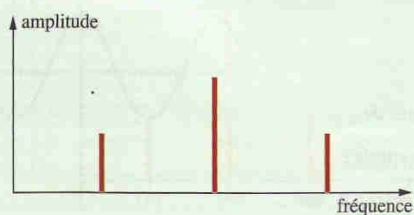
Une tension modulée est obtenue à partir de la multiplication de deux tensions  $u_1$  et  $u_2$  dont les expressions en fonction du temps sont :

$$u_1(t) = U_0 + U_{1\max} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) ;$$

$$u_2(t) = U_{2\max} \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) \text{ avec } F \text{ très supérieure à } f.$$

Quelles sont les propositions exactes ?

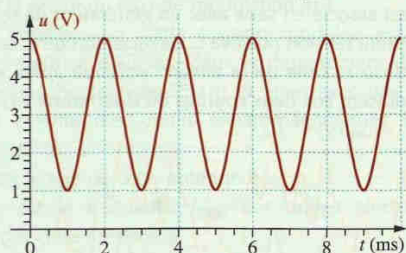
- $U_0$  est appelée « tension de décalage ».
- Le taux de modulation est  $m = \frac{U_{2\max}}{U_{1\max}}$ .
- Il y a surmodulation lorsque  $U_0 < U_{1\max}$ .
- Le spectre en fréquences de la tension modulée à l'allure suivante.



## Utiliser les acquis

### 5. De la courbe à l'équation

La courbe ci-dessous représente l'enregistrement d'une tension permettant de réaliser une modulation d'amplitude.



- L'équation d'une telle tension sinusoïdale peut être écrite :

$$u_s(t) = U_{\max} \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \phi_0) + U_0.$$

Comment appelle-t-on les grandeurs  $U_{\max}$ ,  $f$ ,  $\phi_0$  et  $U_0$  ?

- Déterminer les valeurs de  $f$ ,  $U_0$  et  $U_{\max}$  correspondant au graphique de la tension représentée ci-dessus.

- Quelle est la valeur numérique de la tension à la date  $t = 0$  s ?

- En utilisant l'expression donnée à la question 1, établir l'expression littérale de  $u_s(0)$ .

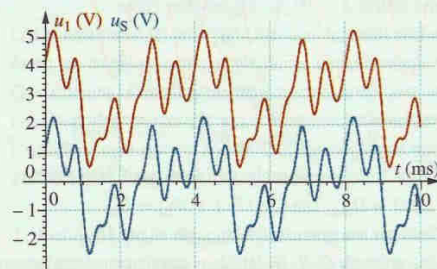
- Déduire des résultats précédents la valeur de  $\phi_0$ .

- Donner l'expression numérique de la tension  $u_s$  en fonction du temps.

### 7. Émission radio au lycée

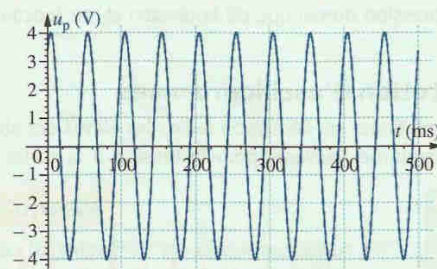
Un groupe d'élèves souhaite réaliser une expérience d'émission d'ondes électromagnétiques lors d'une séance de Travaux pratiques. Pour cela ils captent, avec un microphone, le son produit par un instrument de musique et ils utilisent un générateur de tension continue, un G.B.F., un circuit multiplieur, un amplificateur et une antenne.

- Le micro est associé en série avec un générateur de tension continue délivrant une tension positive  $E$ . L'acquisition de la tension produite par le micro et celle de la tension obtenue après ajout de la tension  $E$  conduisent aux deux courbes du document 1 ci-dessous.



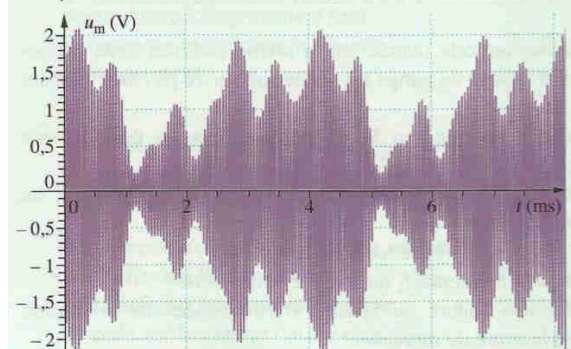
Doc. 1

- Quelle est la fréquence  $f_{\text{son}}$  du son produit par l'instrument ?
  - Quelle est la tension correspondant au signal produit par le micro ?
  - Quelle est la valeur de la tension  $E$  ?
- Le G.B.F. produit une tension dont l'enregistrement est donné sur le document 2.



Doc. 2

- Quel sera le rôle de cette tension dans l'expérience que souhaitent réaliser les élèves ?
- Quelle est la fréquence  $f_p$  de cette tension ? Quelle est son amplitude  $U_p$  ?
- Les deux tensions précédentes sont appliquées sur les entrées du multiplieur. L'enregistrement de la tension obtenue à la sortie du multiplieur conduit au document 3.



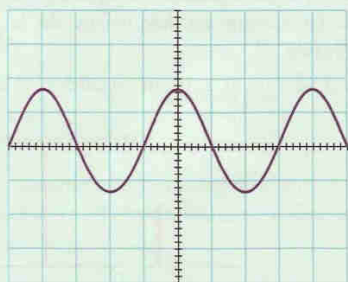
Doc. 3

- Quelle opération mathématique réalise le multiplieur ?
  - En utilisant la courbe du Doc. 1, expliquer pourquoi la modulation est satisfaisante ?
  - Pourquoi l'utilisation du générateur continu, délivrant la tension  $E$ , est indispensable dans cette expérience ?
- L'amplificateur est intercalé entre la sortie du multiplieur et l'antenne.
- Quel est le rôle de l'antenne ?
  - Quel est le rôle de l'amplificateur ?

## 9. Qualité d'une modulation

On réalise une expérience de modulation à partir de deux tensions sinusoïdales.

L'oscillogramme de la tension correspondant à la porteuse est donné sur le **document 1**.



**Doc. 1** Réglages de l'oscilloscope :

- échelle horizontale :  $5 \mu\text{s} \cdot \text{div}^{-1}$  ;
- échelle verticale :  $2 \text{ V} \cdot \text{div}^{-1}$ .

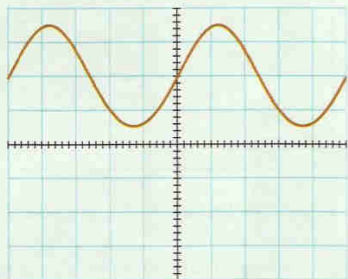
1. Quelle est la fréquence  $f_p$  de la porteuse ?

Quelle est son amplitude  $U_{p\text{max}}$  ?

2. Pour moduler l'amplitude de la porteuse on utilise une tension modulante sinusoïdale de fréquence  $f_s$ , d'amplitude  $U_{s\text{max}}$  et de décalage  $U_{s0}$ .

On note  $m$  le taux de modulation de la tension modulée en amplitude. Rappeler l'expression de  $m$  en fonction des caractéristiques de la tension modulante.

3. L'oscillogramme de la tension modulante utilisée est donné sur le **document 2**.



**Doc. 2** Réglages de l'oscilloscope :

- échelle horizontale :  $1 \text{ ms} \cdot \text{div}^{-1}$  ;
- échelle verticale :  $0,5 \text{ V} \cdot \text{div}^{-1}$ .

Le zéro des tensions est réglé au centre de l'écran.

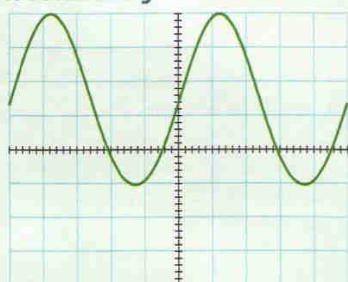
a. Quelle est la fréquence  $f_s$  de la tension modulante ?

Quelle est son amplitude  $U_{s\text{max}}$  ? Quel est son décalage  $U_{s0}$  ?

b. Quelle est la valeur du taux de modulation ?

c. La modulation est-elle de bonne qualité ?

4. On utilise maintenant une tension modulante sinusoïdale dont l'oscillogramme est donné sur le **document 3**.



**Doc. 3** Réglages de l'oscilloscope :

- échelle horizontale :  $1 \text{ ms} \cdot \text{div}^{-1}$  ;
  - échelle verticale :  $1 \text{ V} \cdot \text{div}^{-1}$ .
- Le zéro des tensions est réglé au centre de l'écran.

a. Quelle est la fréquence  $f'_s$  de la tension modulante ?

Quelle est son amplitude  $U'_{s\text{max}}$  ? Quel est son décalage  $U'_{s0}$  ?

b. Quelle est la valeur du taux de modulation ?

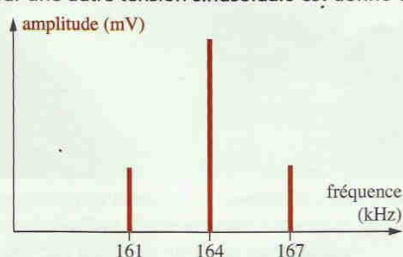
c. La modulation est-elle de bonne qualité ?

5. On utilise enfin une tension modulante dont les caractéristiques sont  $f_s = 40 \text{ kHz}$ ,  $U_{s\text{max}} = 1 \text{ V}$  et  $U_{s0} = 2 \text{ V}$ .

La modulation est-elle de bonne qualité ?

## 10. Exploitation d'un spectre

Le spectre en fréquences d'une tension sinusoïdale modulée en amplitude par une autre tension sinusoïdale est donné ci-dessous.



1. Quelle est la fréquence :

- de la porteuse ?
- du signal modulant ?

2. En notant  $A$  l'amplitude de la composante centrale, les composantes latérales ont une amplitude  $a = \frac{m \cdot A}{2}$ .

Quelle est la valeur du taux de modulation  $m$  ?

3. Après amplification, cette tension modulée est envoyée sur l'antenne émettrice d'Allouis, dans le département du Cher. Cette antenne a une hauteur de 350 m et émet avec une puissance de 2 MW. La célérité des ondes électromagnétiques dans l'air est  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

a. Quel est le rôle de cette antenne ?

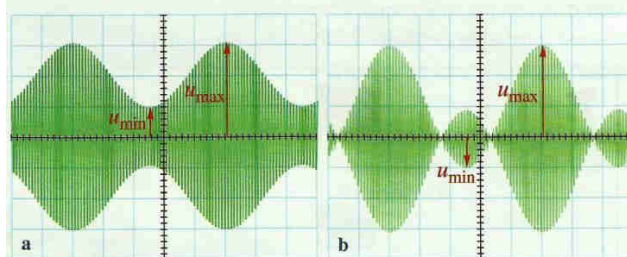
b. Quelle est la fréquence  $f_{\text{OEM}}$  des ondes électromagnétiques produites par cette antenne ?

c. Ces ondes ont-elle une amplitude constante ?

d. Quelle est, dans l'air, leurs longueurs d'onde ?

## 11. Méthode du trapèze

Lors d'expériences sur la modulation d'amplitude on a obtenu, à partir de deux tensions sinusoïdales, les enregistrements **a** et **b** ci-dessous.



1. Que peut-on dire de la qualité de la modulation dans chaque cas ?

Comment nomme-t-on le phénomène mis en évidence sur l'oscillogramme **b** ?

2. Le taux de modulation de la tension modulée, noté  $m$ , est égal à :

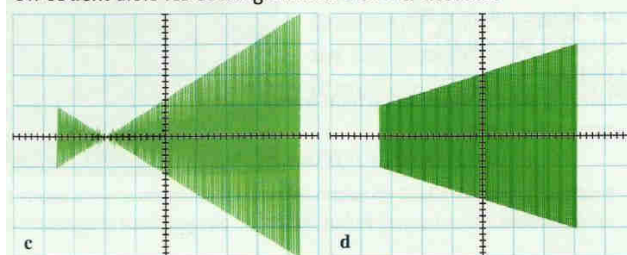
$$m = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}$$

a. Rappeler la condition sur  $m$  pour avoir une modulation de bonne qualité.

b. Calculer la valeur de  $m$  dans chaque cas. Ces résultats confirment-ils la réponse donnée à la question 1 ?

3. Pour observer différemment la tension modulée on utilise la méthode du trapèze.

On obtient alors les oscillogrammes **c** et **d** ci-dessous.



a. Décrire en quelques lignes la méthode du trapèze.

b. Quelle est la figure obtenue par cette méthode lorsque la modulation est de bonne qualité ?

c. Associer à chaque oscillogramme **a** et **b** la figure **c** ou **d** obtenue par la méthode du trapèze.