BURHAN

Ondes électromagnétiques et modulation d'amplitude

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

Version en ligne : burhan.ma/2bac/pc/physique-chimie/ondes-electromagnetiques-et-modulation-d-amplitude/cours

Chapitre	Semestre
Ondes électromagnétiques et modulation d'amplitude	Semestre 2

Transmettre une information à distance

Un concert entendu très loin

Un soir, une élève écoute à la radio un concert joué en direct dans une ville située à $450\,\mathrm{km}$ de chez elle. Entre la scène et son poste, il n'y a aucun câble.

La musique a pourtant traversé tout ce trajet. Sous quelle forme, et en combien de temps ?

Devine : La durée du trajet par la radio

Le concert est retransmis en direct. Combien de temps la musique met-elle pour aller de la scène au poste de radio, à $450\,\mathrm{km}$?

A. Une vingtaine de minutes.

Faux.

C'est la durée d'un son qui voyagerait dans l'air ; la radio ne transporte pas le son lui-même.

B. Quelques millisecondes.

Juste.

Juste : l'information voyage sous forme d'onde électromagnétique, à une célérité immense.

C. Plusieurs secondes.

Faux.

Ce serait vrai pour une distance des milliers de fois plus grande.

D. Une durée nulle : l'arrivée est instantanée.

Faux.

Aucune information ne voyage instantanément : la durée est très courte, mais pas nulle.

Correction

La radio ne transporte pas le son : elle transporte une **onde électromagnétique**, qui se propage à $3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ dans l'air. Sur $450\,\mathrm{km}$, la durée est de l'ordre de la milliseconde. Le calcul exact vient plus bas.

Dans ce chapitre, tu suis le trajet d'un son, du microphone de l'émetteur au haut-parleur du récepteur. Tu verras comment une onde électromagnétique transporte l'information, comment on la module en amplitude, puis comment le récepteur la démodule.

Les quatre opérations de la chaîne

En clair. Le son du concert ne voyage pas tel quel. Un microphone le change en tension électrique. Cette tension est adaptée, puis confiée à un émetteur et à son antenne.

L'onde traverse l'air jusqu'au poste. Le poste la capte, puis la retransforme en son.

Définition : Chaîne de transmission d'une information

Une **chaîne de transmission** achemine une information (son, image, texte) d'un émetteur vers un récepteur éloigné. Elle comporte quatre opérations :

1. le **codage** : un capteur (microphone, caméra, clavier) transforme l'information en un signal électrique ;
2. l'**émission** : le signal électrique, adapté à la transmission, est confié à un émetteur ;
3. la **propagation** : le signal se propage dans un canal de transmission (câble, fibre optique, air, vide) ;
4. le **décodage** : le récepteur reconstitue le signal électrique, puis un transducteur (haut-parleur, écran) restitue un message oral ou écrit.

La **vitesse de transmission** est la célérité du signal dans le canal. Dans le vide, et pratiquement dans l'air, une onde électromagnétique se propage à $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$: une information parcourt une distance d en une durée $\Delta t = \dfrac{d}{c}$.

Exemple : La chaîne du concert, opération par opération

- **Codage** : le microphone de la scène change la musique en tension électrique.
- **Émission** : l'émetteur de la station adapte cette tension et l'envoie dans son antenne.
- **Propagation** : une onde électromagnétique traverse l'air, le canal de transmission.
- **Décodage** : le poste de radio reconstitue la tension électrique, et son haut-parleur restitue la musique.

Vérifie : Le canal d'une visioconférence

Deux amis se parlent en visioconférence. Leurs ordinateurs sont reliés par une fibre optique. Quel est le canal de transmission ?

A. La caméra de l'ordinateur.
Faux.
La caméra assure le codage : elle change l'image en signal électrique.

B. L'écran du correspondant.

Faux.

L'écran assure le décodage : il restitue l'image.

C. La voix des deux amis.

Faux.

La voix est l'information à transmettre, pas le canal.

D. La fibre optique.

Juste.

Juste : c'est le milieu dans lequel le signal se propage.

Correction

Le canal de transmission est le milieu où le signal se propage : ici, la fibre optique. La caméra et le microphone codent l'information ; l'écran et le haut-parleur la décodent.

Canaux et vitesse de transmission

Trois sortes de canaux. Un câble électrique guide un signal électrique. Une fibre optique guide de la lumière. L'air et le vide laissent passer une onde électromagnétique libre, sans aucun support à poser.

La vitesse de transmission dépend du canal : la célérité c dans le vide, un peu moins dans l'air, nettement moins dans une fibre.

Vérifie : Une transmission par fibre optique

Dans une fibre optique, le signal lumineux se propage à environ $2{,}0 \times 10^{8}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Sur une même distance, comparée à une onde dans l'air, la durée de propagation est :

A. plus courte.

Faux.

Une célérité plus petite allonge la durée : Δt est le quotient de la distance par la célérité.

B. la même.

Faux.

La durée dépend de la célérité, qui n'est pas la même dans les deux canaux.

C. nulle.

Faux.

Aucun signal ne se propage instantanément.

D. plus longue.

Juste.

Juste : la célérité est plus petite dans la fibre.

Correction

La durée de propagation vaut $\Delta t = \dfrac{d}{v}$. Dans la fibre, $v \approx 2{,}0 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, plus petit que c : la durée est environ $1{,}5$ fois plus longue que dans l'air.

Durée de propagation et chiffres significatifs

Chiffres significatifs. Une mesure de longueur ou de durée a une précision limitée, et un calcul ne l'améliore pas. Compte les chiffres significatifs de chaque donnée : le résultat calculé en garde autant que la plus pauvre d'entre elles. À gauche, les zéros ne comptent pas : $0{,}045\,\mathrm{m}$ en a deux.

Un réglage d'appareil, comme la sensibilité d'un oscilloscope, est une valeur exacte. Une lecture sur un écran se donne à la précision de la graduation. Ces règles valent pour tout le chapitre.

Exemple : La durée du trajet du concert

La distance vaut $d = 450\,\mathrm{km} = 4{,}5 \times 10^{5}\,\mathrm{m}$, avec deux chiffres significatifs. L'onde se propage dans l'air à $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{d}{c} \\ &= \frac{4{,}5 \times 10^{5}\,\mathrm{m}}{3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}} \\ &= 1{,}5 \times 10^{-3}\,\mathrm{s} \end{aligned}$$

Soit $1{,}5\,\mathrm{ms}$. Le son lui-même, à $340\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ dans l'air, mettrait plus de vingt minutes.

Un relais par satellite

Pour une émission entre deux continents, l'onde passe par un satellite de télécommunication. Il se trouve à $3{,}6 \times 10^{4}\,\mathrm{km}$ d'altitude, au-dessus de l'équateur.

L'onde monte de l'antenne émettrice jusqu'au satellite. Le satellite la renvoie vers une antenne réceptrice au sol.

À toi : La durée d'un trajet par satellite

On assimile le trajet à deux fois l'altitude du satellite : la montée, puis la descente. Calcule la durée de propagation, avec $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Calcule d'abord la distance totale parcourue, en mètres.
Indice 2
Applique $\Delta t = \dfrac{d}{c}$.
Indice 3
Point délicat : $1\,\mathrm{km} = 10^{3}\,\mathrm{m}$; garde deux chiffres significatifs, ceux de l'altitude.

Réponse

L'altitude vaut $3{,}6 \times 10^{7}\,\mathrm{m}$. La distance totale vaut $d = 7{,}2 \times 10^{7}\,\mathrm{m}$.

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{d}{c} \\ &= \frac{7{,}2 \times 10^{7}\,\mathrm{m}}{3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}} \\ &= 0{,}24\,\mathrm{s}\end{aligned}$$

Presque un quart de seconde : ce retard s'entend lors d'un dialogue en direct entre deux continents.

Ondes électromagnétiques et antennes

Une onde qui traverse le vide

La lumière du Soleil traverse le vide de l'espace pour nous parvenir. Un réveil qui sonne dans une enceinte dont on a retiré l'air devient muet : le son ne traverse pas le vide.

Qu'en est-il des ondes radio ?

Devine : Un message radio dans l'espace

Une astronaute, en sortie dans l'espace, parle à son équipe par radio. Le message traverse-t-il le vide qui les sépare ?

A. Non : le vide arrête toutes les ondes.
Faux.
Le vide arrête le son, pas la lumière : toutes les ondes ne se comportent pas de la même façon.

B. Oui, sous forme de son.
Faux.
Le son a besoin d'un milieu matériel ; il ne traverse pas le vide.

C. Oui, comme la lumière.
Juste.
Juste : une onde radio est une onde électromagnétique, comme la lumière.

Correction
L'onde radio est une **onde électromagnétique**, comme la lumière. Elle se propage sans milieu matériel : le vide ne l'arrête pas. Le son de la voix est d'abord changé en signal électrique, puis transmis par l'onde.

Rappel : pour la lumière, la longueur d'onde dans le vide et la fréquence sont liées par $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$.

Dans ce chapitre, la fréquence d'une onde se note f : la même relation s'écrit $\lambda = \dfrac{c}{f}$.

Propriétés d'une onde électromagnétique

Définition : Onde électromagnétique

Une **onde électromagnétique** est la propagation d'une perturbation électrique et magnétique. Elle se propage dans le vide, sans milieu matériel, à la célérité $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

- Une onde électromagnétique périodique de fréquence f a pour longueur d'onde dans le vide $\lambda = \dfrac{c}{f}$.
- Elle transporte de l'**énergie** sans transport de **matière** : c'est ainsi qu'elle transmet une information.
- La **lumière** visible est une onde électromagnétique ; elle n'occupe qu'un domaine restreint de fréquences, de $3{,}75 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$ à $7{,}50 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$ environ (longueurs d'onde dans le vide de $800\,\mathrm{nm}$ à $400\,\mathrm{nm}$). Les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, l'ultraviolet et les rayons X en sont d'autres domaines.

Exemple : Longueur d'onde d'une émission en ondes moyennes

Une station fictive émet en ondes moyennes à $f = 900\,\mathrm{kHz}$, soit $9{,}00 \times 10^{5}\,\mathrm{Hz}$.

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f}\\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{9{,}00 \times 10^{5}\,\mathrm{Hz}}\\ &= 333\,\mathrm{m}\end{aligned}$$

C'est plus que la longueur de trois terrains de football mis bout à bout.

Vérifie : Ce qu'apporte la lumière à un panneau solaire

Un panneau solaire reçoit la lumière du Soleil et produit de l'électricité. Que lui apporte l'onde lumineuse ?

A. De l'énergie, sans matière.
Juste.
Juste : une onde électromagnétique transporte de l'énergie sans transporter de matière.

B. De la matière venue du Soleil.
Faux.
Une onde ne transporte pas de matière : rien ne voyage du Soleil au panneau, sinon l'énergie.

C. De l'énergie et de la matière.
Faux.
L'onde transporte de l'énergie seulement.

D. Rien : la lumière n'est pas une onde.
Faux.

La lumière est une onde électromagnétique ; elle apporte l'énergie que le panneau convertit.

Correction
Une onde électromagnétique transporte de l'énergie, sans transport de matière. Le panneau convertit une partie de cette énergie en énergie électrique.

Les domaines des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques se classent en domaines, selon leur fréquence. Les limites sont des ordres de grandeur.

Domaine	Fréquence (Hz)	Un usage
ondes radio	moins de 3×10^{8}	radio
micro-ondes	3×10^{8} à 3×10^{11}	téléphone
infrarouge	3×10^{11} à $3{,}75 \times 10^{14}$	télécommande
visible	$3{,}75 \times 10^{14}$ à $7{,}50 \times 10^{14}$	vision
ultraviolet	$7{,}50 \times 10^{14}$ à 3×10^{16}	stérilisation
rayons X	plus de 3×10^{16}	radiographie

La lumière, un petit domaine. Dans le visible, la plus grande fréquence est seulement le double de la plus petite. Les ondes radio, elles, s'étendent sur plusieurs puissances de dix.

Nos yeux ne détectent donc qu'une très petite partie des ondes électromagnétiques.

À toi : Fréquence et domaine d'une onde de 2,5 m

Une onde électromagnétique a une longueur d'onde $\lambda = 2{,}5\,\mathrm{m}$ dans le vide. Calcule sa fréquence, puis donne son domaine. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Isole f dans la relation entre λ, c et f.
Indice 2
Calcule $f = \dfrac{c}{\lambda}$, en hertz.
Indice 3
Point délicat : compare le résultat aux limites du tableau, puissance de dix par puissance de dix ; garde deux chiffres significatifs.

Réponse

$$\begin{aligned} f &= \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{2{,}5\,\mathrm{m}} \\ &= 1{,}2 \times 10^{8}\,\mathrm{Hz} \end{aligned}$$

> Cette fréquence est inférieure à $3 \times 10^8\ \mathrm{Hz}$: c'est une onde radio.

Émettre et capter à la même fréquence

Un téléphone portable échange des informations avec une antenne-relais. Pendant un appel, il envoie ta voix et reçoit celle de ton correspondant.

Son antenne, cachée dans le boîtier, fait les deux à tour de rôle.

Devine : La fréquence du signal capté

L'antenne-relais émet une onde de fréquence f. Quelle est la fréquence de la tension créée dans l'antenne du téléphone ?

A. $2f$

Faux.
Rien ne double la fréquence : l'antenne réceptrice suit les variations de l'onde.

B. Une fréquence plus petite que f, car l'onde s'affaiblit.

Faux.
L'onde s'affaiblit en amplitude, pas en fréquence.

C. La même fréquence f.

Juste.
Juste : l'antenne réceptrice donne un signal de même fréquence que l'onde captée.

D. Aucune : une antenne ne crée pas de tension.

Faux.
Une antenne réceptrice transforme l'onde captée en signal électrique.

Correction
L'onde captée crée dans l'antenne réceptrice une tension de **même fréquence** f. De même, l'antenne émettrice de la station rayonne une onde de même fréquence que le courant qui la parcourt.

Propriété : Antennes émettrice et réceptrice

- Une **antenne émettrice** parcourue par un courant électrique variable de fréquence f émet une onde électromagnétique de **même fréquence** f.
- Dans une **antenne réceptrice**, une onde électromagnétique de fréquence f engendre un signal électrique (tension, courant) de **même fréquence** f.
- Une même antenne peut servir d'émetteur et de récepteur, à des instants différents : c'est le cas de l'antenne d'un téléphone portable.

Exemple : Longueur d'onde reçue par un téléphone portable

Un téléphone échange avec l'antenne-relais à $f = 1{,}8\,\mathrm{GHz}$, soit $1{,}8 \times 10^{9}\,\mathrm{Hz}$. L'onde émise par l'un est captée par l'autre à cette même fréquence.

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{1{,}8 \times 10^{9}\,\mathrm{Hz}} \\ &= 0{,}17\,\mathrm{m}\end{aligned}$$

D'après le tableau, c'est une micro-onde. L'antenne du téléphone mesure quelques centimètres : une fraction de la longueur d'onde.

Un constat admis. Ces propriétés des antennes ne s'établissent pas dans ce chapitre : on les admet, car l'expérience les vérifie.

On constate aussi qu'une antenne est efficace quand sa taille est de l'ordre de la longueur d'onde ; sinon elle rayonne mal. La section suivante en tire une conséquence.

Tension sinusoïdale et nécessité de la modulation

Deux tensions sur un même écran

Au laboratoire, deux générateurs basses fréquences (GBF) délivrent chacun une tension sinusoïdale. On les observe ensemble sur un oscilloscope : la première sur la voie Y_1, la seconde sur la voie Y_2.

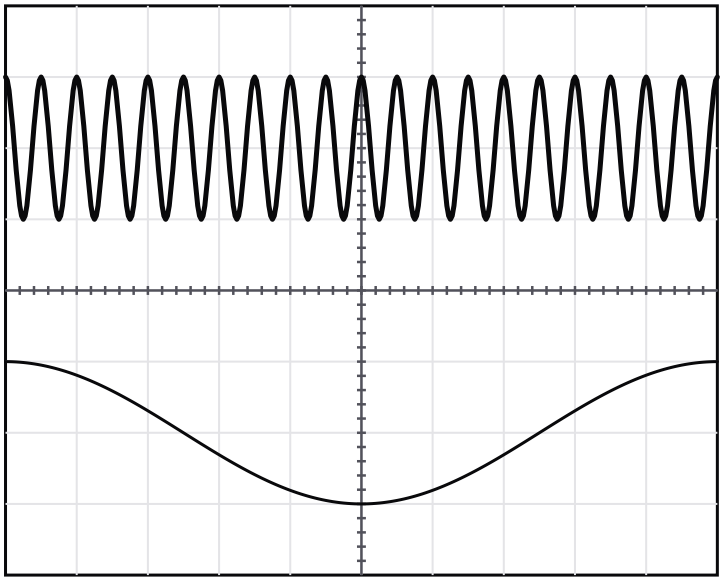
Rappel : une division verticale vaut la sensibilité de la voie ; une division horizontale vaut le balayage.

> **Devine : Deux fréquences sur le même balayage**
>
> La tension de la voie Y_1 a une fréquence vingt fois plus grande que celle de la voie Y_2. Les deux voies ont le même balayage. Que montre l'écran ?
>
> **A.** La voie Y_1 a une amplitude vingt fois plus grande.
> **Faux.**
> La fréquence ne dit rien de l'amplitude : celle-ci se règle à part.
>
> **B.** Les deux voies montrent autant de périodes.
> **Faux.**
> Sur une même durée, la tension de plus grande fréquence fait plus de périodes.
>
> **C.** La voie Y_1 fait vingt périodes quand Y_2 en fait une.
> **Juste.**
> Juste : sa période est vingt fois plus courte.
>
> **D.** La voie Y_2 fait vingt périodes quand Y_1 en fait une.
> **Faux.**

C'est l'inverse : la plus grande fréquence donne la plus petite période.

Correction

La période est l'inverse de la fréquence : $T = \dfrac{1}{f}$. Une fréquence vingt fois plus grande donne une période vingt fois plus courte. Pendant une période de Y_2, la voie Y_1 en fait vingt.



Voie Y_1 : 5 $\mathrm{V/div}$, zéro 2 divisions au-dessus du centre — Voie Y_2 : 2 $\mathrm{V/div}$, zéro 2 divisions au-dessous du centre

Balayage : 0,05 $\mathrm{ms/div}$

Deux tensions sinusoïdales délivrées par deux GBF et observées avec le même balayage.

Expression d'une tension sinusoïdale

Définition : Tension sinusoïdale

Une **tension sinusoïdale** s'écrit

$$u(t) = U_m \cos\left(2\pi f\, t + \varphi\right),$$

où $U_m > 0$ est son **amplitude** (en V), f sa **fréquence** (en Hz), $T = \dfrac{1}{f}$ sa **période** (en s) et φ sa **phase à l'origine** (en rad). La tension varie entre $-U_m$ et U_m.

Méthode : Lire amplitude et fréquence sur un écran d'oscilloscope

1. **Relève les réglages** : la sensibilité verticale de la voie, en $\mathrm{V/div}$, et le balayage, en $\mathrm{ms/div}$.
2. **Amplitude** : compte les divisions entre l'axe de la voie et un maximum, puis multiplie par la sensibilité verticale.

3. **Période** : mesure la durée de plusieurs périodes, divisions multipliées par le balayage, puis divise par leur nombre. Calcule $f = \dfrac{1}{T}$.
4. **Expression** : écris $u(t) = U_m \cos(2\pi f\, t + \varphi)$; une valeur lue est approchée.

Exemple : Amplitude et fréquence de la voie Y1

La voie Y_1 a une sensibilité de $5\ \mathrm{V/div}$; le balayage vaut $0{,}05\ \mathrm{ms/div}$. Un maximum est à $1{,}0$ division au-dessus de l'axe de la voie : $U_m \approx 1{,}0 \times 5 = 5{,}0\ \mathrm{V}$.

On compte 20 périodes sur les 10 divisions de l'écran :

$$\begin{aligned} T &= \frac{10 \times 0{,}05\ \mathrm{ms}}{20} \\ &\approx 2{,}5 \times 10^{-2}\ \mathrm{ms} \end{aligned}$$

Soit $T \approx 2{,}5 \times 10^{-5}\ \mathrm{s}$ et $f = \dfrac{1}{T} \approx 4{,}0 \times 10^{4}\ \mathrm{Hz}$. La tension est maximale au bord gauche, donc $\varphi = 0$.

À toi : Amplitude, fréquence et expression de la voie Y2

Sur le même écran, la voie Y_2 a une sensibilité de $2\ \mathrm{V/div}$. Lis son amplitude et sa période, puis écris son expression $s(t)$. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Compte les divisions entre l'axe de la voie et un maximum.
Indice 2
Compte les divisions occupées par une période complète, puis multiplie par le balayage.
Indice 3
Point délicat : convertis la période en secondes avant de calculer $f = \dfrac{1}{T}$.

Réponse
Amplitude : $S_m \approx 1{,}0 \times 2 = 2{,}0\ \mathrm{V}$.

Période :

$$\begin{aligned} T_s &= 10 \times 0{,}05\ \mathrm{ms} \\ &= 5{,}0 \times 10^{-4}\ \mathrm{s} \end{aligned}$$

Fréquence :

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{1}{T_s} \\ &\approx 2{,}0 \times 10^{3}\ \mathrm{Hz} \end{aligned}$$

La tension est maximale au bord gauche : $\varphi = 0$. En volts et en secondes, $s(t) = 2{,}0 \cos(2\pi \times 2{,}0 \times 10^{3}\, t)$.

Pourquoi moduler

Devine : Une antenne pour un son

Un son de $1{,}0\,\mathrm{kHz}$ est changé en onde électromagnétique de même fréquence. Quelle serait sa longueur d'onde dans l'air ?

A. $0{,}34\,\mathrm{m}$

Faux.
C'est la longueur d'onde du son lui-même, qui se propage à $340\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, et non celle d'une onde électromagnétique.

B. $300\,\mathrm{m}$

Faux.
La fréquence a été prise égale à $1{,}0\times10^{6}\,\mathrm{Hz}$: $1\,\mathrm{kHz}$ vaut $10^{3}\,\mathrm{Hz}$.

C. $3{,}0\times10^{11}\,\mathrm{m}$

Faux.
La célérité a été multipliée par la fréquence au lieu d'être divisée.

D. $3{,}0\times10^{5}\,\mathrm{m}$

Juste.
Juste : $\lambda=\dfrac{c}{f}$, soit $300\,\mathrm{km}$.

Correction

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f}\\ &= \frac{3{,}00\times10^{8}\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}}{1{,}0\times10^{3}\,\mathrm{Hz}}\\ &= 3{,}0\times10^{5}\,\mathrm{m}\end{aligned}$$

Une antenne de l'ordre de $300\,\mathrm{km}$: impossible à construire.

Trois obstacles. D'abord, l'antenne serait bien trop grande. Ensuite, toutes les stations émettraient dans le même domaine de fréquences, celui des sons : leurs ondes se mélangeraient au récepteur.

Enfin, une antenne de taille raisonnable rayonne très mal une onde de si basse fréquence.

La solution : moduler. On confie l'information, de basse fréquence, à une tension sinusoïdale de haute fréquence : la **porteuse**. La tension qui contient l'information est la **tension modulante**.

Sur l'écran précédent, la voie Y_1 montre la porteuse du laboratoire et la voie Y_2 la modulante.

Choisir la fréquence de la porteuse

Ordres de grandeur. Une voix occupe les fréquences de $300\,\mathrm{Hz}$ à $3\,400\,\mathrm{Hz}$; une musique, de $20\,\mathrm{Hz}$ à $20\,\mathrm{kHz}$.

La porteuse d'une station est bien plus haute : de $150\,\mathrm{kHz}$ à $280\,\mathrm{kHz}$ en grandes ondes, de $530\,\mathrm{kHz}$ à $1\,600\,\mathrm{kHz}$ en ondes moyennes. Au laboratoire, une porteuse de $40\,\mathrm{kHz}$ suffit pour observer le principe.

Exemple : La porteuse d'une station en ondes moyennes

La station fictive de la section précédente émet à $900\,\mathrm{kHz}$: sa longueur d'onde vaut $333\,\mathrm{m}$. Une antenne de quelques dizaines à quelques centaines de mètres convient : c'est la taille d'un pylône d'émission.

Chaque station reçoit sa propre fréquence porteuse. Le récepteur peut alors les distinguer.

Vérifie : Le rôle de chaque tension

Dans une émission de radio, laquelle de ces phrases est juste ?

A. La porteuse, de haute fréquence, transporte la modulante.
Juste.
Juste : la porteuse sert de support ; l'information est dans la modulante.

B. La modulante a une fréquence plus haute que la porteuse.
Faux.
C'est l'inverse : la porteuse a la plus haute fréquence.

C. Porteuse et modulante ont la même fréquence.
Faux.
Leurs fréquences sont très différentes : des centaines de kilohertz contre quelques kilohertz.

D. La porteuse seule suffit à transmettre la voix.
Faux.
Une porteuse seule, d'amplitude constante, ne contient aucune information.

Correction
La porteuse est une tension sinusoïdale de haute fréquence. La modulante, de basse fréquence, contient l'information. La modulation inscrit la modulante dans la porteuse : c'est l'objet de la section suivante.

Modulation d'amplitude par un multiplieur

Faire varier l'amplitude de la porteuse

On veut que la porteuse transporte la modulante. L'idée : faire varier l'amplitude de la porteuse au rythme de la modulante.

Devine : L'allure d'une porteuse modulée

Sur l'écran d'un oscilloscope, à quoi ressemble une porteuse dont l'amplitude suit une modulante sinusoïdale ?

A. Une sinusoïde rapide dont l'amplitude ne change jamais.

Faux.

C'est la porteuse seule, avant la modulation.

B. Une sinusoïde rapide dont les sommets dessinent une sinusoïde lente.

Juste.

Juste : l'amplitude varie au rythme de la modulante.

C. Une sinusoïde lente seule, sans la porteuse.

Faux.

C'est la modulante seule ; la porteuse rapide a disparu.

D. Une suite de créneaux.

Faux.

Rien ici ne produit de créneaux : les deux tensions sont sinusoïdales.

Correction

La tension modulée oscille à la fréquence de la porteuse. Son amplitude varie au rythme de la modulante : ses sommets dessinent une courbe de même forme que la modulante, l'**enveloppe**.

Définition : Modulation d'amplitude

On transmet un signal de basse fréquence, la **tension modulante** $s(t)$ (l'information), à l'aide d'une tension sinusoïdale de haute fréquence, la **porteuse** $p(t) = P_m \cos(2\pi F_p\, t)$, avec $F_p \gg f_s$.

Moduler en amplitude, c'est rendre l'amplitude $U_m(t)$ de la **tension modulée** $u_s(t) = U_m(t)\cos(2\pi F_p\, t)$ fonction affine de la tension modulante :

$$U_m(t) = a\, s(t) + b,$$

où a et b sont des constantes. La courbe qui joint les maximums successifs de $u_s(t)$ est l'**enveloppe** de la tension modulée.

Exemple : Une amplitude affine de la modulante

Pour la modulante du laboratoire, $s(t) = 2{,}0\cos(2\pi f_s\, t)$, en volts. On choisit une amplitude $U_m(t) = 0{,}50\, s(t) + 2{,}0$: ici $a = 0{,}50$ et $b = 2{,}0\,\text{V}$.

L'amplitude varie alors entre $1{,}0\,\text{V}$ et $3{,}0\,\text{V}$. Elle reste positive et suit la modulante.

Le multiplieur et la tension de décalage

Le multiplieur. C'est un composant électronique à deux entrées E_1 et E_2 et une sortie S, toutes repérées par rapport à la masse. On admet sa propriété : il délivre $u_s = k\,u_1\,u_2$, où k est une constante, en V^{-1}.

On applique la porteuse sur E_2 : $u_2 = p(t)$. Sur E_1, on applique la modulante décalée par une tension continue U_0 : $u_1 = U_0 + s(t)$.

Pourquoi est-ce vrai ? La sortie du multiplieur est un produit. En mettant U_0 en facteur, on fait apparaître une amplitude qui dépend de $s(t)$ de façon affine. La preuve, sous l'énoncé, le fait en quatre étapes.

Propriété : Tension modulée délivrée par un multiplieur

Un **multiplieur** de constante $k > 0$ délivre la tension $u_s = k\,u_1\,u_2$. On applique sur ses entrées $u_1(t) = U_0 + s(t)$, somme d'une **tension continue de décalage** $U_0 > 0$ et de la modulante $s(t) = S_m\cos(2\pi f_s\,t)$, et $u_2(t) = p(t) = P_m\cos(2\pi F_p\,t)$. La tension de sortie s'écrit :

$$u_s(t) = A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)] \times \cos(2\pi F_p\,t),$$

avec

$$A = k\,P_m\,U_0 \quad \text{et} \quad m = \frac{S_m}{U_0}.$$

Son amplitude $U_m(t) = A + A\,m\cos(2\pi f_s\,t) = A + k\,P_m\,s(t)$ est une fonction affine de $s(t)$: c'est une modulation d'amplitude. Le nombre m est le **taux de modulation**.

Démonstration

Étape 1. D'après la relation du multiplieur, $u_s(t) = k\,u_1(t)\,u_2(t) = k\,[U_0 + S_m\cos(2\pi f_s\,t)]\,P_m\cos(2\pi F_p\,t)$.

Étape 2. Comme $U_0 \neq 0$, on met U_0 en facteur dans le crochet :

$$U_0 + S_m\cos(2\pi f_s\,t) = U_0\left[1 + \frac{S_m}{U_0}\cos(2\pi f_s\,t)\right].$$

Étape 3. En reportant, $u_s(t) = k\,P_m\,U_0\left[1 + \dfrac{S_m}{U_0}\cos(2\pi f_s\,t)\right]\cos(2\pi F_p\,t)$, soit la forme annoncée avec $A = k\,P_m\,U_0$ et $m = \dfrac{S_m}{U_0}$.

Étape 4. Le facteur qui multiplie $\cos(2\pi F_p\,t)$ vaut $A + k\,P_m\,S_m\cos(2\pi f_s\,t) = A + k\,P_m\,s(t)$: il est de la forme $a\,s(t) + b$ avec $a = k\,P_m$ et $b = A$, constantes. C'est la définition d'une modulation d'amplitude.

À retenir : Le produit, puis la mise en facteur

Le geste : écrire le produit $k\,u_1\,u_2$, puis mettre U_0 en facteur dans $U_0 + S_m\cos(2\pi f_s\,t)$.

Le facteur placé devant le crochet est $A = k\,P_m\,U_0$. Le coefficient du cosinus dans le crochet est le taux de modulation $m = \dfrac{S_m}{U_0}$.

Vérifie : Sans tension de décalage

On supprime la tension de décalage : $U_0 = 0$. Que délivre alors le multiplieur ?

A. La porteuse seule.

Faux.

La porteuse est encore multipliée par $s(t)$: elle ne sort pas seule.

B. Une tension nulle.

Faux.

$u_1 = s(t)$ n'est pas nulle : le produit ne l'est pas non plus.

C. Le produit $k\,s(t)\,p(t)$.

Juste.

Juste : avec $U_0 = 0$, $u_1 = s(t)$.

D. La modulante seule.

Faux.

La porteuse reste dans le produit : la sortie oscille à sa fréquence.

Correction

Avec $U_0 = 0$, $u_1 = s(t)$ et $u_s = k\,s(t)\,p(t)$. Le facteur $k\,P_m\,s(t)$ devient négatif une demi-période sur deux : les sommets de u_s suivent $|s(t)|$, et non $s(t)$. La tension de décalage garde ce facteur positif.

Les constantes du montage

Exemple : A et m pour le montage du laboratoire

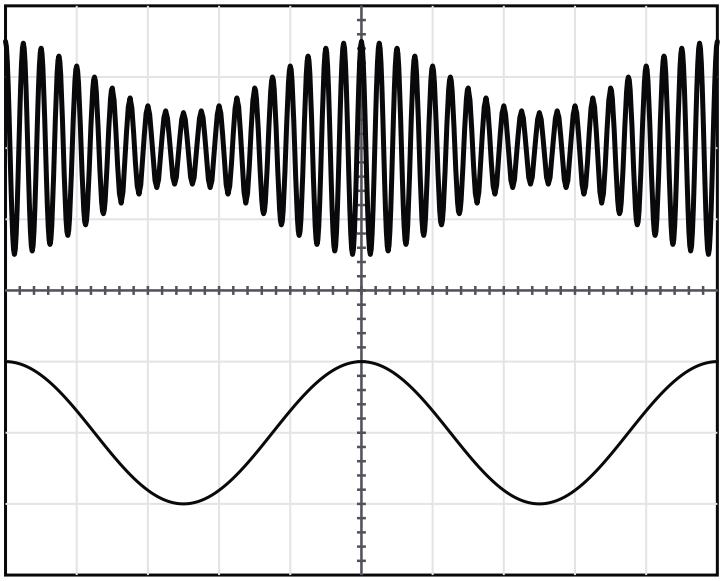
Données : $k = 0{,}10\,\mathrm{V}^{-1}$, $P_m = 5{,}0\,\mathrm{V}$, $U_0 = 4{,}0\,\mathrm{V}$ et $S_m = 2{,}0\,\mathrm{V}$.

$$\begin{aligned} A &= k\,P_m\,U_0 \\ &= 0{,}10\,\mathrm{V}^{-1} \times 5{,}0\,\mathrm{V} \\ &\quad \times 4{,}0\,\mathrm{V} \\ &= 2{,}0\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m &= \frac{S_m}{U_0} = \frac{2{,}0\,\mathrm{V}}{4{,}0\,\mathrm{V}} \\ &= 0{,}50 \end{aligned}$$

En volts :

$$u_s(t) = 2{,}0\,[1 + 0{,}50\cos(2\pi f_s\,t)] \times \cos(2\pi F_p\,t)$$



Voie u_s : 2 V/div, zéro 2 divisions au-dessus du centre — Voie u_1 : 2 V/div, zéro 4 divisions au-dessous du centre

Balayage : 0,1 ms/div

Tension u1 appliquée à la première entrée et tension modulée us délivrée par le multiplieur.

Lecture de l'écran. Les sommets de u_s dessinent deux courbes symétriques : l'enveloppe. L'enveloppe est la plus large quand u_1 est maximale, et la plus étroite quand u_1 est minimale.

L'enveloppe a la forme de la modulante : l'information est inscrite dans l'amplitude de la tension modulée.

Où se trouve l'information

Attention : L'information est dans l'amplitude, pas dans la porteuse

✗ « La porteuse contient le message de la station. »

✓ La porteuse seule a une amplitude constante : elle ne transmet rien. L'information est portée par les **variations de l'amplitude** de la tension modulée, à la fréquence f_s de la modulante.

À toi : A et m pour un autre réglage

On garde le multiplieur et la porteuse : $k = 0{,}10\,\text{V}^{-1}$ et $P_m = 5{,}0\,\text{V}$. On règle $U_0 = 5{,}0\,\text{V}$ et $S_m = 1{,}5\,\text{V}$. Calcule A et m. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Utilise l'expression de la tension délivrée par un multiplieur.

Indice 2

A est le produit de k, de P_m et de U_0.

Indice 3

Point délicat : m est le quotient de deux tensions ; il n'a pas d'unité.

Réponse

$$\begin{aligned} A &= k\,P_m\,U_0 \\ &= 0{,}10 \times 5{,}0 \times 5{,}0 \\ &= 2{,}5\ \mathrm{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m &= \frac{S_m}{U_0} \\ &= \frac{1{,}5\ \mathrm{V}}{5{,}0\ \mathrm{V}} \\ &= 0{,}30 \end{aligned}$$

Le taux est plus faible qu'au réglage précédent : l'amplitude varie moins autour de A.

Réaliser la modulation au laboratoire

Méthode : Montage, protocole et exploitation de la modulation

Montage. Un GBF délivre la porteuse ($40\,\mathrm{kHz}$, $P_m = 5{,}0\ \mathrm{V}$) sur l'entrée E_2. Un second GBF délivre la modulante ($2{,}0\,\mathrm{kHz}$, $S_m = 2{,}0\ \mathrm{V}$), en série avec une source continue $U_0 = 4{,}0\ \mathrm{V}$, sur l'entrée E_1. Les masses sont communes. La voie Y_1 observe u_1 ; la voie Y_2, la sortie S.

Protocole.

1. Régler et vérifier chaque tension seule.
2. Brancher le multiplieur, puis observer u_1 et u_s.
3. Faire varier U_0, puis S_m, en notant l'allure de l'enveloppe.

Exploitation. Mesurer les amplitudes extrêmes de u_s, calculer m, puis comparer à $\dfrac{S_m}{U_0}$.

Vérifie : La tension affichée par la voie Y1

Dans ce montage, la voie Y_1 est branchée sur l'entrée E_1. Quelle tension affiche-t-elle ?

A. $U_0 + s(t)$

Juste.

Juste : l'entrée E_1 reçoit la modulante décalée.

B. $s(t)$ seule

Faux.

La source continue U_0 est en série avec le GBF : elle s'ajoute à $s(t)$.

C. $p(t)$

Faux.
La porteuse est appliquée sur l'autre entrée, E_2.

D. $u_s(t)$
Faux.
La tension modulée se prend sur la sortie S, observée par l'autre voie.

Correction
L'entrée E_1 reçoit $u_1 = U_0 + s(t)$: la modulante, décalée vers le haut de U_0. Sur l'écran, cette voie reste positive, entre $U_0 - S_m$ et $U_0 + S_m$.

Taux de modulation et surmodulation

Les amplitudes extrêmes

Devine : La plus grande amplitude sur l'écran

Au laboratoire, le multiplieur reçoit toujours la porteuse et la modulante décalée de la section précédente ; l'oscilloscope affiche la tension modulée u_s qu'il délivre. Sur cet écran, la voie u_s a une sensibilité de $2\,\mathrm{V/div}$. D'une crête à l'autre, l'enveloppe mesure $3{,}0$ divisions au plus large. Que vaut l'amplitude maximale $U_{\max}$?

A. $6{,}0\,\mathrm{V}$
Faux.
C'est la hauteur d'une crête à l'autre, soit $2U_{\max}$.

B. $3{,}0\,\mathrm{V}$
Juste.
Juste : la moitié de $3{,}0 \times 2 = 6{,}0\,\mathrm{V}$.

C. $1{,}5\,\mathrm{V}$
Faux.
La sensibilité de la voie a été oubliée : 1,5 est un nombre de divisions.

D. $2{,}0\,\mathrm{V}$
Faux.
C'est A, l'amplitude moyenne autour de laquelle l'amplitude varie.

Correction
D'une crête à l'autre, la hauteur vaut $2U_{\max} = 3{,}0 \times 2 = 6{,}0\,\mathrm{V}$. Donc $U_{\max} \approx 3{,}0\,\mathrm{V}$.

Pourquoi est-ce vrai ? L'amplitude $A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]$ dépend d'un cosinus, compris entre -1 et 1. Ses valeurs extrêmes s'obtiennent pour ces deux valeurs du cosinus.

Propriété : Taux de modulation et amplitudes extrêmes

Pour une tension modulée $u_s(t) = A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]\cos(2\pi F_p\,t)$ avec $A > 0$ et $0 < m \leq 1$, l'amplitude varie entre

$$U_{\max} = A(1+m)$$

et

$$U_{\min} = A(1-m),$$

et le taux de modulation se calcule à partir de ces deux valeurs :

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

Démonstration

Étape 1. L'amplitude de la tension modulée est $U_m(t) = A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]$. Comme $-1 \leq \cos(2\pi f_s\,t) \leq 1$ et $A\,m > 0$, elle varie entre $A(1-m)$ et $A(1+m)$, valeurs atteintes quand le cosinus vaut -1 et 1.

Étape 2. Avec $0 < m \leq 1$, ces deux valeurs sont positives ou nulles : $U_{\max} = A(1+m)$ et $U_{\min} = A(1-m)$.

Étape 3. On forme la différence et la somme : $U_{\max} - U_{\min} = 2A\,m$ et $U_{\max} + U_{\min} = 2A$.

Étape 4. Le quotient vaut $\dfrac{2A\,m}{2A} = m$, d'où la relation annoncée.

À retenir : Encadrer le cosinus pour les amplitudes extrêmes

Le geste : encadrer le cosinus, puis former la différence $U_{\max} - U_{\min} = 2A\,m$ et la somme $U_{\max} + U_{\min} = 2A$. Leur quotient élimine A : le taux se mesure sans connaître A.

Le taux lu sur l'écran

Exemple : Le taux de modulation du montage

D'une crête à l'autre, l'enveloppe mesure $3{,}0$ divisions au plus large et $1{,}0$ division au plus étroit, à $2\ \mathrm{V/div}$. Donc $U_{\max} \approx 3{,}0\ \mathrm{V}$ et $U_{\min} \approx 1{,}0\ \mathrm{V}$.

$$\begin{aligned} m &= \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \\ &= \frac{3{,}0\ \mathrm{V} - 1{,}0\ \mathrm{V}}{3{,}0\ \mathrm{V} + 1{,}0\ \mathrm{V}} \\ &\approx 0{,}50 \end{aligned}$$

On retrouve $m = \dfrac{S_m}{U_0} = 0{,}50$, calculé à partir des réglages.

Méthode : Mesurer un taux de modulation sur un écran

1. **Repère l'enveloppe** de la tension modulée.
2. **Lis** $U_{\max}$ et $U_{\min}$: divisions multipliées par la sensibilité verticale. D'une crête à l'autre, on lit $2U_{\max}$ et $2U_{\min}$.
3. **Calcule** $m = \dfrac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}$, un nombre sans unité.
4. **Conclus** : $m < 1$ signale une modulation sans surmodulation.

Vérifie : Un taux lu d'une crête à l'autre

Sur un autre écran, d'une crête à l'autre, l'enveloppe mesure $4{,}0$ divisions au plus large et $2{,}0$ divisions au plus étroit. Que vaut m ?

A. $0{,}50$

Faux.
Le dénominateur est la somme $4{,}0 + 2{,}0$, et non $4{,}0$.

B. $2{,}0$

Faux.
C'est le quotient $\dfrac{4{,}0}{2{,}0}$, qui n'est pas le taux.

C. $0{,}33$

Juste.
Juste : $\dfrac{4{,}0 - 2{,}0}{4{,}0 + 2{,}0}$.

D. $3{,}0$

Faux.
C'est la demi-somme $\dfrac{4{,}0 + 2{,}0}{2}$, en divisions.

Correction
La sensibilité et le facteur 2 des crêtes se simplifient : on peut calculer avec les divisions.

$$\begin{aligned} m &= \frac{4{,}0 - 2{,}0}{4{,}0 + 2{,}0} \\ &\approx 0{,}33 \end{aligned}$$

Baisser la tension de décalage

Devine : L'enveloppe quand m dépasse 1

À $S_m = 2{,}0\ \text{V}$ fixée, on abaisse la tension de décalage à $U_0 = 1{,}0\ \text{V}$. Le taux devient $m = \dfrac{S_m}{U_0} = 2{,}0$.

Que devient l'enveloppe de u_s ?

A. Elle garde la forme de la modulante, en plus grand.

Faux.

Au-delà de 1, l'amplitude passe par zéro : la forme de la modulante est perdue.

B. Elle disparaît : u_s devient nulle.

Faux.

u_s ne s'annule qu'à certains instants.

C. Elle devient une droite.

Faux.

L'amplitude varie toujours au rythme de la modulante.

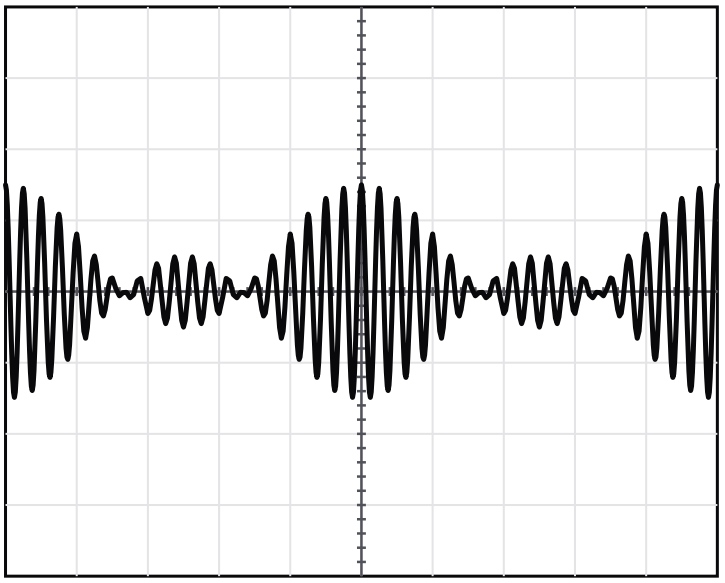
D. Elle se déforme : ses deux bords se touchent et se croisent.

Juste.

Juste : c'est la surmodulation.

Correction

Avec $m = 2{,}0$, le facteur $A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]$ change de signe deux fois par période de la modulante. L'amplitude tombe alors à zéro : les deux bords de l'enveloppe se touchent, et l'enveloppe ne reproduit plus la modulante.



Voie u_s : 1 V/div Balayage : 0,1 ms/div

Tension modulée obtenue après avoir abaissé la tension de décalage : surmodulation.

Le seuil de la surmodulation

Propriété : Condition d'absence de surmodulation

Soit $u_s(t) = A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]\cos(2\pi F_p\,t)$ avec $A > 0$ et $m > 0$.

- Si $m \leq 1$, le facteur $A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]$ reste positif ou nul : l'enveloppe de la tension modulée reproduit la forme de la modulante.
- Si $m > 1$, ce facteur change de signe : l'enveloppe ne reproduit plus la modulante. C'est la **surmodulation**.

Pour une modulation de bonne qualité, on impose $m < 1$; avec un multiplieur, cela revient à choisir une tension de décalage $U_0 > S_m$.

Démonstration

Étape 1. Le minimum de $1 + m\cos(2\pi f_s\,t)$ est $1 - m$, atteint quand le cosinus vaut -1 (encadrement du cosinus).

Étape 2. Si $m \leq 1$, alors $1 - m \geq 0$: le facteur $A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]$ est positif ou nul à chaque instant. Les maximums de u_s valent ce facteur, qui est fonction affine de la modulante : l'enveloppe a la forme de la modulante.

Étape 3. Si $m > 1$, alors $1 - m < 0$: le facteur devient négatif aux instants où $\cos(2\pi f_s\,t) < -\dfrac{1}{m}$. Les maximums de u_s valent alors sa valeur absolue, qui n'est plus une fonction affine de la modulante : l'enveloppe est déformée.

Étape 4. Avec le multiplieur, $m = \dfrac{S_m}{U_0}$ et $U_0 > 0$: la condition $m < 1$ s'écrit $S_m < U_0$.

À retenir : Le signe du minimum de l'amplitude

Le geste : le minimum de $1 + m\cos(2\pi f_s\,t)$ vaut $1 - m$. Son signe décide de tout : positif ou nul si $m \leq 1$, négatif si $m > 1$. Avec le multiplieur, $m < 1$ s'écrit $U_0 > S_m$.

Vérifie : Une tension de décalage qui convient

La modulante a une amplitude $S_m = 2{,}0\ \text{V}$. Quelle tension de décalage évite la surmodulation ?

A. $U_0 = 1{,}0\ \text{V}$

Faux.
$m = 2{,}0$: c'est la surmodulation de l'écran ci-dessus.

B. $U_0 = 3{,}0\ \text{V}$

Juste.
Juste : $m \approx 0{,}67$, inférieur à 1.

C. $U_0 = 1{,}5\ \text{V}$

Faux.
$m \approx 1{,}3$, supérieur à 1.

D. $U_0 = 0{,}50\ \text{V}$

Faux.
$m = 4{,}0$: surmodulation encore plus forte.

Correction
Il faut $U_0 > S_m = 2{,}0\ \text{V}$. Seul $U_0 = 3{,}0\ \text{V}$ convient :

$$m = \frac{2{,}0\ \text{V}}{3{,}0\ \text{V}} \approx 0{,}67$$

Attention : Une modulante plus forte n'améliore pas le message

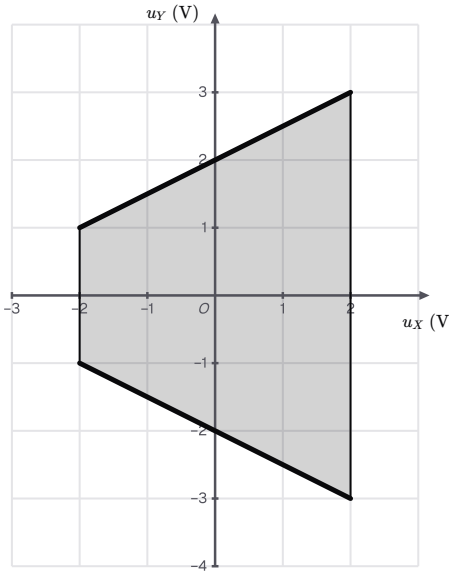
✗ « Pour que le message soit plus fort, j'augmente S_m au-delà de U_0. »

✓ Si $S_m > U_0$, le taux m dépasse 1 : l'enveloppe se déforme et le message démodulé est altéré. Avec un multiplieur, on garde $S_m < U_0$.

La méthode du trapèze

Méthode : Exploiter le trapèze obtenu en mode XY

1. **Branche** la modulante $s(t)$ sur la voie X et la tension modulée $u_s(t)$ sur la voie Y, puis passe en mode XY : le spot trace u_s en fonction de s.
2. **Observe** un trapèze, sans surmodulation. Ses côtés verticaux sont les bases : $L = 2U_{\max}$ et $\ell = 2U_{\min}$.
3. **Calcule** $m = \dfrac{L - \ell}{L + \ell}$, les deux bases dans la même unité.
4. **Interprète** : une petite base réduite à un point donne $m = 1$.



bord haut — bord bas ------ grande base L ------ petite base ℓ

Trapèze de modulation observé en mode XY : modulante sur la voie X, tension modulée sur la voie Y.

À toi : Le taux de modulation lu sur le trapèze

Le trapèze ci-dessus est celui du montage du laboratoire. Mesure ses deux bases sur les graduations, puis calcule le taux de modulation. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Les bases sont les deux côtés verticaux du trapèze.

Indice 2

Applique $m = \dfrac{L - \ell}{L + \ell}$.

Indice 3

Point délicat : la largeur horizontale du trapèze n'entre pas dans le calcul.

Réponse

La grande base va de $-3{,}0\ \text{V}$ à $3{,}0\ \text{V}$: $L \approx 6{,}0\ \text{V}$. La petite base va de $-1{,}0\ \text{V}$ à $1{,}0\ \text{V}$: $\ell \approx 2{,}0\ \text{V}$.

$$\begin{aligned} m &= \frac{L - \ell}{L + \ell} \\ &= \frac{6{,}0 - 2{,}0}{6{,}0 + 2{,}0} \\ &\approx 0{,}50 \end{aligned}$$

Les deux méthodes donnent le même taux.

Attention : Mesurer les côtés verticaux du trapèze

X « Je mesure la largeur du trapèze pour calculer m. »

✓ Le taux se calcule avec les deux côtés **verticaux**, les bases L et ℓ. La largeur horizontale dépend seulement de l'amplitude de la modulante et de la sensibilité de la voie X.

Spectre de fréquences d'une tension modulée

Une tension, plusieurs fréquences

La tension modulée du laboratoire n'est pas sinusoïdale : son amplitude varie. Un analyseur de spectre, branché à la sortie du multiplieur, la décompose en tensions sinusoïdales.

Il affiche une raie pour chacune : sa fréquence en abscisse, son amplitude en ordonnée.

Devine : Le nombre de raies de la tension modulée

Combien de raies l'analyseur affiche-t-il pour cette tension modulée ?

$$u_s(t) = A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)] \times \cos(2\pi F_p\,t)$$

A. Une seule, à F_p.

Faux.

Une seule raie correspondrait à une sinusoïde d'amplitude constante.

B. Deux, à F_p et à f_s.

Faux.

Aucune raie n'apparaît à f_s : la modulante n'est pas ajoutée, elle multiplie.

C. Trois, groupées autour de F_p.

Juste.

Juste : la raie de la porteuse et deux raies latérales.

D. Une infinité de raies.

Faux.

Pour une modulante sinusoïdale, le nombre de raies est fini.

Correction

L'analyseur affiche trois raies : une à F_p, et deux de part et d'autre, à $F_p - f_s$ et $F_p + f_s$. L'énoncé qui suit l'établit.

Pourquoi est-ce vrai ? Développe le produit : tu obtiens un terme $A\cos(2\pi F_p\,t)$, plus un produit de deux cosinus. La formule de transformation, vue en mathématiques, change ce produit en une somme de deux cosinus.

Les trois raies du spectre

Propriété : Spectre de fréquences d'une tension modulée en amplitude

La tension modulée $u_s(t) = A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]\cos(2\pi F_p\,t)$ est la somme de trois tensions sinusoïdales :

$$\begin{aligned} u_s(t) &= A\cos(2\pi F_p\,t) \\ &\quad + \frac{m\,A}{2}\cos\left(2\pi(F_p + f_s)\,t\right) \\ &\quad + \frac{m\,A}{2}\cos\left(2\pi(F_p - f_s)\,t\right). \end{aligned}$$

Son **spectre de fréquences** comporte trois raies : la raie de la porteuse, à F_p, d'amplitude A, et deux raies latérales, à $F_p - f_s$ et $F_p + f_s$, d'amplitude $\dfrac{m\,A}{2}$. La tension modulée occupe la bande de fréquences $[F_p - f_s\,;\,F_p + f_s]$, de largeur $2f_s$.

Démonstration

Étape 1. On développe : $u_s(t) = A\cos(2\pi F_p\,t) + A\,m\cos(2\pi f_s\,t)\cos(2\pi F_p\,t)$.

Étape 2. Formule de transformation d'un produit en somme (mathématiques, acquis) :

$$\begin{aligned} &\cos a\cos b \\ &= \frac{1}{2}\left[\cos(a+b) + \cos(a-b)\right]. \end{aligned}$$

Étape 3. Avec $a = 2\pi F_p\,t$ et $b = 2\pi f_s\,t$: $A\,m\cos(2\pi f_s\,t)\cos(2\pi F_p\,t) = \dfrac{m\,A}{2}\cos\left(2\pi(F_p + f_s)\,t\right) + \dfrac{m\,A}{2}\cos\left(2\pi(F_p - f_s)\,t\right)$.

Étape 4. La tension modulée est donc la somme de trois tensions sinusoïdales de fréquences F_p, $F_p + f_s$ et $F_p - f_s$ (positive, car $F_p > f_s$), d'amplitudes A, $\dfrac{m\,A}{2}$ et $\dfrac{m\,A}{2}$: ce sont les trois raies du spectre. Les fréquences extrêmes diffèrent de $(F_p + f_s) - (F_p - f_s) = 2f_s$.

À retenir : Du produit de cosinus à trois raies

Le geste : développer, puis appliquer la formule de transformation avec $a = 2\pi F_p\,t$ et $b = 2\pi f_s\,t$:

$$\begin{aligned} &\cos a\cos b \\ &= \frac{1}{2}\left[\cos(a+b) + \cos(a-b)\right] \end{aligned}$$

Les fréquences s'ajoutent et se retranchent ; le facteur $\dfrac{1}{2}$ donne l'amplitude $\dfrac{m\,A}{2}$ des raies latérales.

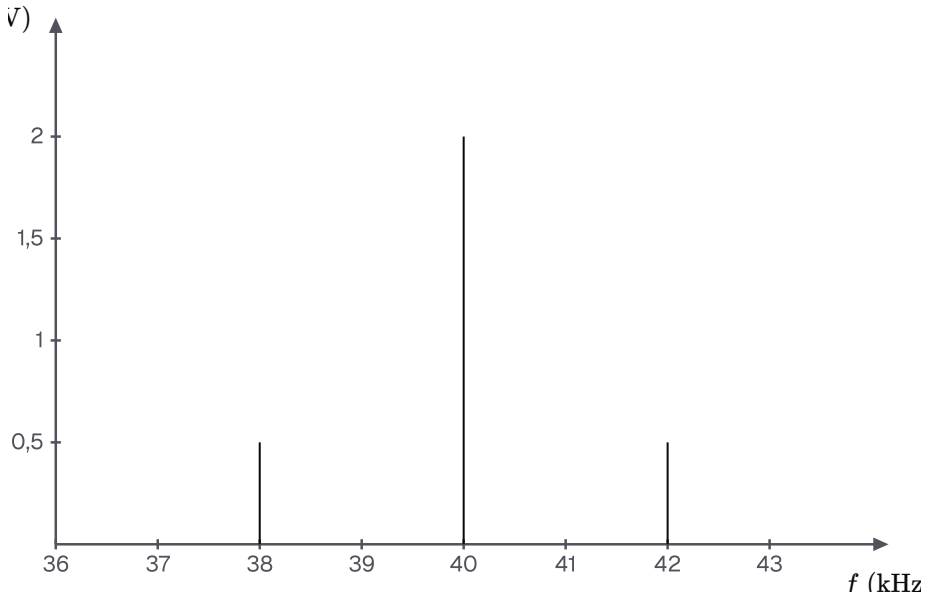
Exemple : Les raies de la tension du laboratoire

Avec $A = 2{,}0\,\mathrm{V}$, $m = 0{,}50$, $F_p = 40\,\mathrm{kHz}$ et $f_s = 2{,}0\,\mathrm{kHz}$:

- raie de la porteuse à $40\,\mathrm{kHz}$, d'amplitude $2{,}0\,\mathrm{V}$;
- raies latérales à $38\,\mathrm{kHz}$ et $42\,\mathrm{kHz}$, d'amplitude

$$\frac{m\,A}{2} = \frac{0{,}50 \times 2{,}0\,\mathrm{V}}{2} = 0{,}50\,\mathrm{V}$$

La bande occupée va de $38\,\mathrm{kHz}$ à $42\,\mathrm{kHz}$: sa largeur vaut $2f_s = 4{,}0\,\mathrm{kHz}$.



Spectre de fréquences de la tension modulée du laboratoire : la raie de la porteuse et deux raies latérales.

Construire et lire un spectre

Méthode : Tracer ou lire les trois raies d'un spectre

1. **Identifie** A, m, F_p et f_s dans l'expression de la tension modulée.
2. **Place** les trois raies aux fréquences $F_p - f_s$, F_p et $F_p + f_s$.
3. **Donne** la hauteur A à la raie centrale, et $\dfrac{m\,A}{2}$ à chaque raie latérale.
4. **En sens inverse**, sur un spectre donné : F_p est la raie centrale, f_s l'écart entre deux raies voisines, et m vaut deux fois la hauteur latérale divisée par la hauteur centrale.

Vérifie : Le taux lu sur un spectre

Un spectre montre une raie centrale de $3{,}0\,\mathrm{V}$ et deux raies latérales de $0{,}60\,\mathrm{V}$. Que vaut le taux de modulation m ?

A. $0{,}40$

Juste.

Juste : $m = \dfrac{2 \times 0{,}60}{3{,}0}$.

B. $0{,}20$

Faux.

Le facteur 2 a été oublié : une raie latérale vaut $\dfrac{m\,A}{2}$, et non $m\,A$.

C. $5{,}0$

Faux.

Le quotient a été inversé : le taux est un nombre inférieur à 1 ici.

D. $0{,}29$

Faux.

La hauteur centrale a été ajoutée aux deux raies latérales au dénominateur.

Correction

Une raie latérale a pour hauteur $\dfrac{m\,A}{2}$, la raie centrale A.

$$\begin{aligned} m &= \frac{2 \times 0{,}60\,\text{V}}{3{,}0\,\text{V}} \\ &= 0{,}40 \end{aligned}$$

À toi : Les raies d'une tension modulée donnée

Une tension modulée a pour constantes $A = 4{,}0\,\text{V}$, $m = 0{,}60$, $F_p = 250\,\text{kHz}$ et $f_s = 3{,}0\,\text{kHz}$. Donne la fréquence et l'amplitude de chacune des trois raies, puis la largeur de la bande occupée. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Place d'abord la raie de la porteuse.

Indice 2

Les raies latérales sont à $F_p - f_s$ et à $F_p + f_s$; leur hauteur vaut $\dfrac{m\,A}{2}$.

Indice 3

Point délicat : la largeur de la bande vaut $2f_s$, et non f_s.

Réponse

Raie de la porteuse : $250\,\text{kHz}$, d'amplitude $4{,}0\,\text{V}$. Raies latérales : $247\,\text{kHz}$ et $253\,\text{kHz}$, d'amplitude

$$\begin{aligned} \frac{m\,A}{2} &= \frac{0{,}60 \times 4{,}0}{2} \\ &= 1{,}2\,\text{V} \end{aligned}$$

Largeur de la bande : $2f_s = 6{,}0\,\text{kHz}$.

Partager les fréquences entre stations

Des stations sans recouvrement. Chaque station occupe une bande de largeur $2f_s$ autour de sa porteuse. Deux stations voisines ne se gênent pas si leurs bandes ne se recouvrent pas.

En ondes moyennes, la modulante est limitée à $4{,}5\,\mathrm{kHz}$ environ : chaque station occupe $9\,\mathrm{kHz}$, et les porteuses voisines sont espacées d'autant.

Vérifie : L'écart entre deux porteuses voisines

Deux stations ont des modulantes limitées à $5{,}0\,\mathrm{kHz}$. Quel écart minimal entre leurs porteuses évite le recouvrement de leurs bandes ?

A. $5{,}0\,\mathrm{kHz}$
Faux.
Chaque bande s'étend de part et d'autre de sa porteuse : la moitié de la bande voisine déborderait.

B. $10\,\mathrm{kHz}$
Juste.
Juste : deux demi-bandes de 5,0 kHz chacune.

C. $2{,}5\,\mathrm{kHz}$
Faux.
Les bandes se recouvriraient largement.

D. $20\,\mathrm{kHz}$
Faux.
Cet écart évite le recouvrement, mais il n'est pas le plus petit.

Correction
Chaque bande s'étend de $f_s = 5{,}0\,\mathrm{kHz}$ de part et d'autre de sa porteuse. Deux porteuses voisines doivent donc être distantes d'au moins $2f_s = 10\,\mathrm{kHz}$.

La condition $F_p \gg f_s$. Les raies latérales restent groupées près de la porteuse si f_s est petite devant F_p. Au laboratoire, $F_p = 20\ f_s$; en ondes moyennes, F_p dépasse cent fois la plus haute fréquence de la modulante.

La raie basse $F_p - f_s$ reste alors positive, loin de zéro.

Démodulation d'amplitude

Retrouver le message

Au poste récepteur, l'antenne fournit une tension modulée. Le haut-parleur, lui, a besoin d'une tension qui reproduit la modulante.

Il faut donc séparer l'information de la porteuse : c'est la **démodulation**.

Devine : Ce qu'il faut extraire de la tension modulée

Pour retrouver la modulante, quelle partie de la tension modulée faut-il extraire ?

A. La porteuse.

Faux.

La porteuse a une amplitude constante : elle ne contient pas l'information.

B. L'enveloppe.

Juste.

Juste : l'enveloppe a la forme de la modulante.

C. La composante de plus haute fréquence.

Faux.

La raie la plus haute est une raie latérale du spectre, pas le message.

D. La valeur moyenne.

Faux.

La valeur moyenne de la tension modulée est nulle.

Correction

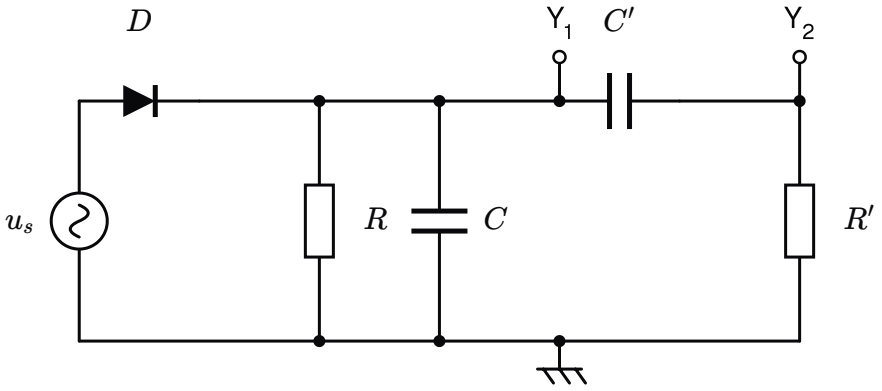
L'enveloppe de la tension modulée reproduit la modulante, à une constante près. La démodulation commence donc par une **détection d'enveloppe**.

Définition **: Démodulation d'amplitude : détection d'enveloppe et filtrage**

Démoduler, c'est extraire de la tension modulée $u_s(t) = A\,[1 + m\cos(2\pi f_s\,t)]\cos(2\pi F_p\,t)$ une tension proportionnelle à la modulante. La démodulation se fait en deux étapes :

1. la **détection d'enveloppe** : une diode ne laisse passer que les alternances positives, puis un dipôle RC parallèle conserve les maximums ; la tension obtenue suit l'enveloppe $A + A\,m\cos(2\pi f_s\,t)$, qui contient une composante continue A ;
2. l'**élimination de la composante continue** : un **filtre passe-haut**, formé d'un condensateur en série et d'un résistor, bloque la composante continue et laisse passer la composante variable $A\,m\cos(2\pi f_s\,t)$, proportionnelle à la modulante.

Le détecteur d'enveloppe



Détecteur d'enveloppe suivi du filtre passe-haut ; le générateur représente la tension modulée appliquée à l'entrée.

Rôle de chaque dipôle. La diode D conduit seulement pendant les alternances positives. Le condensateur C se charge alors jusqu'au sommet de chaque alternance. Entre deux sommets, il se décharge lentement dans le résistor R.

La voie Y_1 montre la tension détectée u_d ; la voie Y_2, la tension aux bornes de R'. Rappel : la décharge d'un condensateur dans un résistor a pour constante de temps $\tau = RC$.

Vérifie : Un détecteur sans diode

On remplace la diode du détecteur par un simple fil. Que se passe-t-il ?

A. Rien ne change.

Faux.

La diode a un rôle : elle trie les alternances.

B. Le dipôle RC reçoit aussi les alternances négatives.

Juste.

Juste : rien n'empêche plus le condensateur de suivre la tension modulée.

C. La tension de sortie devient continue.

Faux.

Sans diode, la sortie suit la tension modulée tout entière.

D. La porteuse disparaît de la sortie.

Faux.

C'est l'inverse : la porteuse reste dans la sortie.

Correction

Sans diode, le dipôle RC est branché directement sur la tension modulée : il en suit les alternances positives et négatives. Les sommets ne sont plus conservés, et l'enveloppe n'est pas extraite.

Bien choisir la constante de temps

Propriété : Conditions d'une modulation et d'une détection de bonne qualité

- **Modulation** de bonne qualité : le taux de modulation vérifie $m < 1$, et la fréquence de la porteuse est grande devant celle de la modulante, $F_p \gg f_s$ (en pratique, au moins dix fois plus grande).
- **Détection d'enveloppe** de bonne qualité par une diode suivie d'un dipôle RC parallèle : la constante de temps $\tau = RC$ est grande devant la période de la porteuse et inférieure à la période de la modulante,

$$T_p \ll RC < T_s.$$

  Si RC est trop petit, la tension détectée suit les alternances de la porteuse ; si RC est trop grand, le condensateur se décharge trop lentement et la tension détectée ne suit plus l'enveloppe quand elle diminue.

Un constat admis. Ces conditions ne s'établissent pas ici : on les admet. Ce sont des ordres de grandeur, vérifiés par l'expérience.

En pratique, « grand devant » signifie au moins dix fois plus grand. La condition reste d'ordre de grandeur : quand F_p n'est que vingt fois f_s, la tension réelle descend un peu moins vite que l'enveloppe, et les écrans tracent le modèle idéal.

Méthode : Vérifier la constante de temps d'un détecteur

1. **Calcule** les périodes $T_p = \dfrac{1}{F_p}$ et $T_s = \dfrac{1}{f_s}$.
2. **Écris** la condition $T_p \ll RC < T_s$.
3. **Calcule** RC en unités SI : les $\mathrm{k\Omega}$ en Ω, les nF en F.
4. **Conclus** : RC doit valoir au moins dix fois T_p et rester inférieur à T_s.

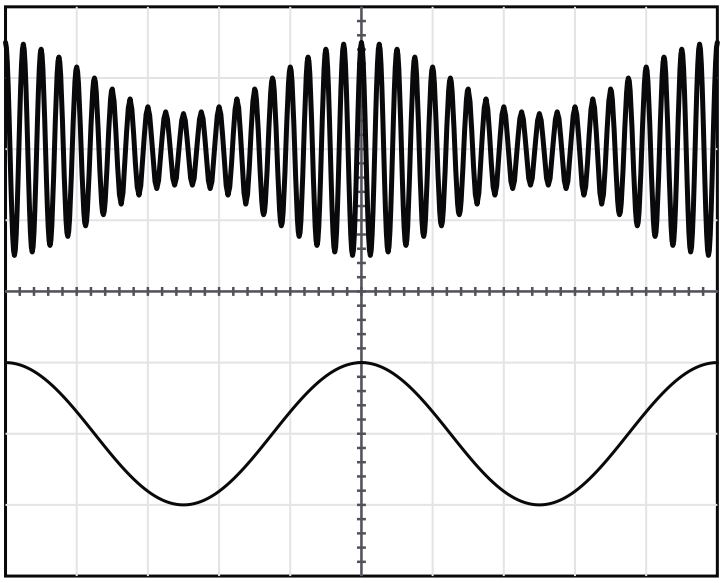
Exemple : Le détecteur du laboratoire

La porteuse de $40\,\mathrm{kHz}$ a pour période $T_p = 2{,}5 \times 10^{-5}\,\mathrm{s}$; la modulante de $2{,}0\,\mathrm{kHz}$, $T_s = 5{,}0 \times 10^{-4}\,\mathrm{s}$. Le dipôle a pour valeurs $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$ et $C = 27\,\mathrm{nF}$.

$$\begin{aligned} \tau = RC &= 1{,}0 \times 10^{4}\,\Omega \\ &\times 2{,}7 \times 10^{-8}\,\mathrm{F} \\ &= 2{,}7 \times 10^{-4}\,\mathrm{s} \end{aligned}$$

Alors τ vaut environ onze fois T_p, et reste inférieur à T_s : la condition est remplie, et la tension détectée suit l'enveloppe à peu près.

La tension détectée



Voie u_s : 2 V/div, zéro 2 divisions au-dessus du centre — Voie u_d : 1 V/div, zéro 4 divisions au-dessous du centre

Balayage : 0,1 ms/div

Tension modulée et tension détectée ; la tension détectée est tracée par son modèle idéal, l'enveloppe, sans ses petites ondulations.

Attention : Une constante de temps se règle dans les deux sens

✗ « Plus RC est grand, meilleure est la détection. »

✓ La condition $T_p \ll RC < T_s$ compte dans les deux sens. Trop petite, la constante de temps laisse des ondulations à la fréquence de la porteuse. Trop grande, elle empêche la tension détectée de re-descendre avec l'enveloppe.

Éliminer la composante continue

La composante continue. Sur l'écran, la tension détectée oscille entre $1{,}0\,\mathrm{V}$ et $3{,}0\,\mathrm{V}$ environ, autour de $A = 2{,}0\,\mathrm{V}$. Le condensateur C', en série, bloque cette composante continue ; le résistor R' recueille la composante variable.

Aux bornes de R', la tension oscille autour de zéro, d'amplitude $A\,m = 1{,}0\,\mathrm{V}$: c'est $k\,P_m\,s(t)$, proportionnelle à la modulante.

Attention : La tension détectée n'est pas encore la modulante

✗ « La tension de sortie du détecteur est directement le message. »

✓ Elle contient encore la composante continue A, qui ne porte aucune information. Sans le filtre passe-haut, le haut-parleur la recevrait aussi.

À toi : Un dipôle RC à juger

Pour la tension modulée du laboratoire, on essaie un détecteur avec $R = 4{,}7\,\text{k}\Omega$ et $C = 10\,\text{nF}$. Calcule RC et dis si la détection est de bonne qualité. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Calcule RC en unités SI.
Indice 2
Compare RC à $T_p = 2{,}5 \times 10^{-5}\,\text{s}$ et à $T_s = 5{,}0 \times 10^{-4}\,\text{s}$.
Indice 3
Point délicat : « grand devant T_p » demande au moins dix fois T_p.

Réponse

$$\begin{aligned} RC &= 4{,}7 \times 10^{3}\,\Omega \\ &\quad \times 1{,}0 \times 10^{-8}\,\text{F} \\ &= 4{,}7 \times 10^{-5}\,\text{s} \end{aligned}$$

La constante de temps est inférieure à T_s, mais elle ne vaut qu'environ deux fois T_p : elle est trop petite. La tension détectée suit en partie les alternances de la porteuse, et de fortes ondulations restent.

Réaliser la démodulation au laboratoire

Méthode : Montage, protocole et exploitation de la démodulation

Montage. La sortie du multiplieur de la modulation alimente le détecteur : diode, puis $R = 10\,\text{k}\Omega$ et $C = 27\,\text{nF}$ en parallèle. Le filtre suit : $C' = 1{,}0\,\mu\text{F}$ en série, puis $R' = 10\,\text{k}\Omega$. La voie Y_1 observe la tension détectée ; la voie Y_2, la tension aux bornes de R'.

Protocole.

1. Observer la tension modulée seule.
2. Brancher le détecteur et observer la voie Y_1.
3. Remplacer C par $1{,}0\,\text{nF}$, puis par $1{,}0\,\mu\text{F}$, et noter chaque allure.
4. Brancher le filtre et observer la voie Y_2.

Exploitation. Comparer la voie Y_1 à l'enveloppe et la voie Y_2 à la modulante ; relier chaque allure à la valeur de RC.

Vérifie : Un condensateur trop grand

Dans le protocole, on remplace $C = 27\,\mathrm{nF}$ par $C = 1{,}0\,\mu\mathrm{F}$, avec $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$. Qu'observe-t-on sur la voie Y_1 ?

A. La tension détectée suit l'enveloppe mieux qu'avant.

Faux.

RC dépasse maintenant T_s : la condition n'est plus remplie.

B. La tension détectée suit les alternances de la porteuse.

Faux.

Ce défaut vient d'une constante de temps trop petite.

C. La tension détectée ne redescend plus avec l'enveloppe.

Juste.

Juste : $RC = 1{,}0 \times 10^{-2}\,\mathrm{s}$, bien plus grand que T_s.

D. La voie affiche une tension nulle.

Faux.

Le condensateur se charge toujours aux sommets : la tension n'est pas nulle.

Correction

Avec $C = 1{,}0 \times 10^{-6}\,\mathrm{F}$:

$$\begin{aligned} RC &= 1{,}0 \times 10^{4} \times 1{,}0 \times 10^{-6} \\ &= 1{,}0 \times 10^{-2}\,\mathrm{s} \end{aligned}$$

C'est vingt fois T_s. Le condensateur se décharge trop lentement : la tension détectée reste presque au niveau des sommets les plus hauts et ne suit plus l'enveloppe quand elle diminue.

Circuit bouchon et récepteur radio AM

Choisir une station parmi toutes

L'antenne d'un poste capte en même temps les ondes de toutes les stations. Pourtant, le poste ne joue qu'une station à la fois : celle que tu choisis en tournant un bouton.

Un circuit fait ce tri : le **circuit bouchon**.

Devine : Le réglage qui choisit une station

Rappel : un circuit LC idéal oscille librement avec la période propre $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$. Pour choisir la station de fréquence porteuse F_p, comment régler ce circuit ?

A. $\dfrac{1}{T_0} = F_p$

Juste.

Juste : la fréquence propre du circuit est celle de la porteuse choisie.

B. $T_0 = F_p$

Faux.

Une période et une fréquence ne s'égalent pas : leurs unités diffèrent.

C. $\dfrac{1}{T_0} = f_s$

Faux.

Le récepteur choisit une station par sa porteuse, pas par sa modulante.

D. $\dfrac{1}{T_0} = 2F_p$

Faux.

Rien ne justifie ce facteur 2.

Correction

La fréquence propre du circuit vaut $f_0 = \dfrac{1}{T_0} = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. On règle le circuit pour que $f_0 = F_p$: il sélectionne alors la station de porteuse F_p.

Propriété : Rôle sélectif du circuit bouchon LC

Un **circuit bouchon** est formé d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C montés en **parallèle**, reliés à l'antenne réceptrice. Parmi toutes les ondes captées, la tension à ses bornes n'est importante que pour celles dont la fréquence est voisine de sa **fréquence propre**

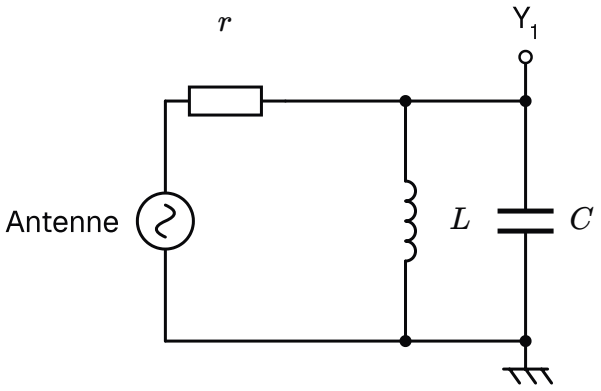
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Le circuit bouchon **sélectionne** ainsi la station émettrice de fréquence porteuse $F_p = f_0$; un condensateur de capacité réglable permet de choisir la station.

Accorder le circuit sur une station

Un constat admis. On constate, sans l'établir ici, que la tension aux bornes du circuit bouchon est importante seulement pour les ondes de fréquence voisine de f_0.

Les autres stations ne donnent qu'une tension très faible : elles sont écartées.



Circuit d'accord : l'antenne, modélisée par un générateur alternatif en série avec un résistor (résistance de l'antenne et de sa liaison), alimente le circuit bouchon.

Exemple : La fréquence propre du récepteur du laboratoire

La bobine a pour inductance $L = 1{,}0\,\text{mH}$; le condensateur réglable est placé sur $C = 470\,\text{pF}$.

$$\begin{aligned} LC &= 1{,}0 \times 10^{-3}\,\text{H} \\ &\quad \times 4{,}7 \times 10^{-10}\,\text{F} \\ &= 4{,}7 \times 10^{-13}\,\text{s}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ &= 2{,}3 \times 10^{5}\,\text{Hz} \end{aligned}$$

Soit environ $230\,\text{kHz}$: le poste reçoit une station en grandes ondes.

Vérifie : Une capacité plus grande

On augmente la capacité du condensateur réglable, sans toucher à la bobine. La fréquence propre du circuit bouchon :

A. augmente.

Faux.

C est au dénominateur de f_0 : quand C grandit, f_0 diminue.

B. ne change pas.

Faux.

f_0 dépend de C : c'est tout l'intérêt du condensateur réglable.

C. diminue.

Juste.

Juste : f_0 varie comme $\frac{1}{\sqrt{C}}$.

Correction

$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ diminue quand C augmente. Pour passer à une station de porteuse plus basse, on augmente la capacité.

Changer de station

Méthode : Isoler la capacité dans la condition d'accord

1. **Écris** la condition d'accord $f_0 = F_p$.
2. **Isole** la capacité : $C = \dfrac{1}{4\pi^2 L\, F_p^2}$.
3. **Calcule** en unités SI, puis convertis en pF ou en nF.
4. **Vérifie** que la valeur trouvée est dans la plage du condensateur réglable.

À toi : La capacité pour une autre station

Avec la même bobine, $L = 1{,}0\,\mathrm{mH}$, on veut recevoir une station en grandes ondes de porteuse $F_p = 180\,\mathrm{kHz}$. Calcule la capacité d'accord, en picofarads. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Écris la condition d'accord $f_0 = F_p$.
Indice 2
Isole C : $C = \dfrac{1}{4\pi^2 L\, F_p^2}$.
Indice 3
Point délicat : F_p en hertz et L en henrys ; $1\,\mathrm{pF} = 10^{-12}\,\mathrm{F}$.

Réponse
Avec $L = 1{,}0 \times 10^{-3}\,\mathrm{H}$ et $F_p = 1{,}80 \times 10^{5}\,\mathrm{Hz}$, le dénominateur vaut $4\pi^2 L\, F_p^2 \approx 1{,}28 \times 10^{9}$ en unités SI.

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{4\pi^2 L\, F_p^2} \\ &= 7{,}8 \times 10^{-10}\,\mathrm{F} \end{aligned}$$

Soit $C \approx 7{,}8 \times 10^{2}\,\mathrm{pF}$: plus grande qu'à $230\,\mathrm{kHz}$, car la porteuse est plus basse.

Les étages d'un récepteur AM

Définition : Récepteur radio AM

Un **récepteur radio AM** simple comporte, dans l'ordre :

1. une **antenne réceptrice**, qui capte les ondes de toutes les stations ;

2. un **circuit bouchon LC** d'accord, qui sélectionne la station choisie ;
3. un **détecteur d'enveloppe** (diode et dipôle RC parallèle) ;
4. un **filtre passe-haut**, qui élimine la composante continue ;
5. un **amplificateur** et un **haut-parleur**, qui restituent le message sonore.

Exemple **: Le poste du laboratoire, étage par étage**

- **Antenne** : le long fil capte les ondes de toutes les stations.
- **Circuit bouchon** : la bobine et le condensateur réglable, accordés sur $230\,\mathrm{kHz}$, ne retiennent qu'une station en grandes ondes.
- **Détecteur et filtre** : la diode et le dipôle RC extraient l'enveloppe ; le filtre passe-haut retire sa composante continue.
- **Amplificateur et écouteur** : ils rendent le message audible.

Vérifie : L'étage qui choisit la station

Dans un récepteur AM, quel étage choisit la station écoutée ?

A. L'antenne réceptrice.
Faux.
L'antenne capte les ondes de toutes les stations, sans choisir.

B. Le détecteur d'enveloppe.
Faux.
Le détecteur extrait l'enveloppe de la station déjà choisie.

C. Le filtre passe-haut.
Faux.
Il élimine la composante continue, après la détection.

D. Le circuit bouchon.
Juste.
Juste : il est accordé sur la porteuse de la station.

Correction
Le circuit bouchon, accordé sur la porteuse de la station, la sélectionne. Le détecteur, le filtre puis l'amplificateur traitent ensuite cette seule tension modulée.

Méthode **: Montage, protocole et exploitation du récepteur AM**

Montage. Un long fil sert d'antenne. Il est relié au circuit bouchon : $L = 1{,}0\,\mathrm{mH}$ et un condensateur réglable de $0{,}30\,\mathrm{nF}$ à $1{,}2\,\mathrm{nF}$, avec une prise de terre. Suivent un détecteur, avec $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$ et $C_d = 10\,\mathrm{nF}$, le filtre passe-haut, puis un amplificateur et un écouteur.

Protocole.

1. Observer à l'oscilloscope la tension aux bornes du circuit bouchon.
2. Tourner le condensateur jusqu'à obtenir une tension modulée nette.
3. Observer la tension détectée, puis écouter.

Exploitation. Relever la capacité, calculer f_0, puis vérifier qu'elle est en grandes ondes.

Ce qu'il faut savoir faire.

- calculer une durée de propagation ou une longueur d'onde, avec unités et chiffres significatifs ;
- lire une tension sinusoïdale sur un oscillogramme et écrire son expression ;
- établir la tension délivrée par un multiplieur, puis calculer A et m ;
- mesurer un taux de modulation sur un écran ou un trapèze, et reconnaître une surmodulation ;
- construire et lire le spectre d'une tension modulée ;
- choisir le dipôle RC d'un détecteur et accorder un circuit bouchon.

Le mot du prof. Tu sais maintenant suivre un son de l'émetteur au haut-parleur.

SOURCES

Référentiel BURHAN du chapitre « Ondes électromagnétiques et modulation d'amplitude » (2bac · pc · physique-chimie)