BURHAN

Résumé : 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/resume

Chapitre	Semestre
Ondes électromagnétiques et modulation d'amplitude	Semestre 2

De la chaîne de transmission aux antennes

À retenir : Une onde électromagnétique porte le message

Un capteur transforme le message en signal électrique. Ce signal est confié à une onde électromagnétique, qui voyage sans support matériel. À l'arrivée, une antenne le restitue en signal électrique. L'onde transporte de l'énergie, jamais de la matière.

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 $\Delta t = \dfrac{d}{c}$.

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.

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. Une onde de fréquence $f = 1{,}2\,\mathrm{MHz} = 1{,}2 \times 10^{6}\,\mathrm{Hz}$ a pour longueur d'onde $\lambda = \dfrac{3{,}00 \times 10^{8}}{1{,}2 \times 10^{6}} = 2{,}5 \times 10^{2}\,\mathrm{m}$.

Durée de propagation. Sur une liaison de $d = 360\,\mathrm{km}$, deux chiffres significatifs : $\Delta t = \dfrac{3{,}6 \times 10^{5}}{3{,}00 \times 10^{8}} = 1{,}2 \times 10^{-3}\,\mathrm{s}$.

Antennes. Parcourue par un courant de $1{,}2\,\mathrm{MHz}$, l'antenne émettrice rayonne cette onde ; dans l'antenne réceptrice, l'onde crée une tension de $1{,}2\,\mathrm{MHz}$.

Amplitude et fréquence 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 : Mesurer amplitude et période sur l'écran

1. **Sensibilités** : note celle de la voie (en $\mathrm{V/div}$) et le balayage (en $\mathrm{ms/div}$).
2. **Amplitude** : compte les divisions du zéro de la voie au sommet, puis multiplie par la sensibilité.
3. **Période** : mesure la durée de plusieurs périodes entières, puis divise par leur nombre.

4. **Expression** : $f = \dfrac{1}{T}$, puis $u(t) = U_m \cos(2\pi f\, t + \varphi)$, valeurs approchées.

Exemple

Amplitude. Le sommet est à $3{,}2$ divisions, avec $0{,}5\ \mathrm{V/div}$: $U_m \approx 3{,}2 \times 0{,}5 \approx 1{,}6\ \mathrm{V}$.

Période. Quatre périodes occupent $8{,}0$ divisions à $0{,}1\ \mathrm{ms/div}$: $T \approx \dfrac{8{,}0 \times 0{,}1}{4} \approx 0{,}20\ \mathrm{ms}$.

Fréquence. $f = \dfrac{1}{T} \approx 5{,}0 \times 10^{3}\ \mathrm{Hz}$.

Pourquoi et comment moduler en amplitude

À retenir : Confier le son à une porteuse de haute fréquence

Un son a une fréquence de quelques kilohertz : son onde aurait une longueur d'onde de l'ordre de cent kilomètres, et l'antenne aussi. Tous les sons occupent le même domaine de fréquences et se mêleraient. Une porteuse de haute fréquence règle ces deux difficultés.

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.

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**.

Exemple

Données. $k = 0{,}20\,\text{V}^{-1}$, $P_m = 5{,}0\,\text{V}$, $U_0 = 3{,}0\,\text{V}$ et $S_m = 1{,}5\,\text{V}$.

Amplitude de référence. $A = k\,P_m\,U_0 = 0{,}20 \times 5{,}0 \times 3{,}0 = 3{,}0\,\text{V}$.

Taux. $m = \dfrac{S_m}{U_0} = \dfrac{1{,}5}{3{,}0} = 0{,}50$, inférieur à 1.

Attention : Le message est dans l'enveloppe

Seule, la porteuse garde une amplitude constante : elle ne dit rien. Le message est porté par les variations de l'amplitude de la tension modulée, au rythme de la modulante. C'est l'enveloppe qu'il faudra récupérer à la réception.

Mesurer un taux de modulation, éviter la surmodulation

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 :

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

Méthode : Taux de modulation à partir de l'enveloppe

1. **Bords de l'enveloppe** : repère où elle s'écarte le plus et le moins de l'axe.
2. **Lectures** : $U_{\max}$ et $U_{\min}$ en divisions, multipliées par la sensibilité de la voie.
3. **Calcul** : $m = \dfrac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}$, nombre sans unité.
4. **Contrôle** : si les deux bords de l'enveloppe se touchent ou se croisent, m atteint ou dépasse 1.

Exemple

Sur un écran, $U_{\max} \approx 3{,}5\ \text{V}$ et $U_{\min} \approx 1{,}5\ \text{V}$. Alors $m \approx \dfrac{3{,}5 - 1{,}5}{3{,}5 + 1{,}5} \approx 0{,}40$: aucune surmodulation.

Méthode : Taux de modulation en mode XY

1. **Mode XY** : envoie la modulante en X et la tension modulée en Y.
2. **Figure** : sans surmodulation, un trapèze aux deux côtés verticaux.
3. **Bases** : la grande base vaut $2U_{\max}$, la petite $2U_{\min}$, mesurées en divisions.
4. **Calcul** : $m = \dfrac{L - \ell}{L + \ell}$; une petite base réduite à un point donne $m = 1$.

Exemple

Les côtés verticaux mesurent $L = 5{,}0$ divisions et $\ell = 3{,}0$ divisions. Le taux vaut $m = \dfrac{5{,}0 - 3{,}0}{5{,}0 + 3{,}0} = 0{,}25$.

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 $U_0 > S_m$.

Exemple

Pour $S_m = 0{,}90\ \text{V}$, le décalage $U_0 = 1{,}2\ \text{V}$ donne $m = 0{,}75$, sans surmodulation ; $U_0 = 0{,}60\ \text{V}$ donnerait $m = 1{,}5$, avec surmodulation.

Attention : Une modulante trop forte abîme le message

Une modulante plus forte ne rend pas le message plus audible. Avec $S_m = 4{,}0\ \text{V}$ et $U_0 = 2{,}5\ \text{V}$, le taux vaut $m = 1{,}6$: l'enveloppe se déforme. Pour corriger, augmente U_0 au-dessus de S_m.

Attention : Taux de modulation lu sur le trapèze en mode XY

Sur le trapèze, seules comptent les longueurs des deux côtés verticaux. Sa largeur horizontale change avec la sensibilité de la voie X : elle ne renseigne pas sur le taux de modulation.

Les trois raies d'une tension modulée

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 $2f_s$.

Méthode : Du spectre aux grandeurs de la modulation

1. **Lecture de l'expression** : relève A, m, F_p et f_s.
2. **Fréquences** : une raie centrale à F_p, deux raies latérales à $F_p - f_s$ et $F_p + f_s$.
3. **Hauteurs** : A au centre, $\dfrac{m\,A}{2}$ sur les côtés.
4. **Sens inverse** : sur un spectre, l'écart entre deux raies voisines donne f_s ; m vaut deux fois la hauteur d'une raie latérale divisée par la hauteur centrale.

Exemple

Données. $A = 2{,}0\,\text{V}$, $m = 0{,}60$, $F_p = 180\,\text{kHz}$ et $f_s = 4{,}5\,\text{kHz}$.

Raies. À $175{,}5\,\text{kHz}$, $180\,\text{kHz}$ et $184{,}5\,\text{kHz}$; les raies latérales ont la hauteur $\dfrac{m\,A}{2} = 0{,}60\,\text{V}$.

Largeur. Le spectre occupe $2f_s = 9{,}0\,\text{kHz}$.

À retenir : Répartir les stations sur une gamme d'ondes

Deux émetteurs voisins ne doivent pas mêler leurs raies. Leurs fréquences porteuses doivent donc différer d'au moins $2f_s$, si chacun module jusqu'à la fréquence f_s. C'est ainsi qu'on répartit les stations sur une gamme d'ondes.

Détecter l'enveloppe, puis filtrer

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,

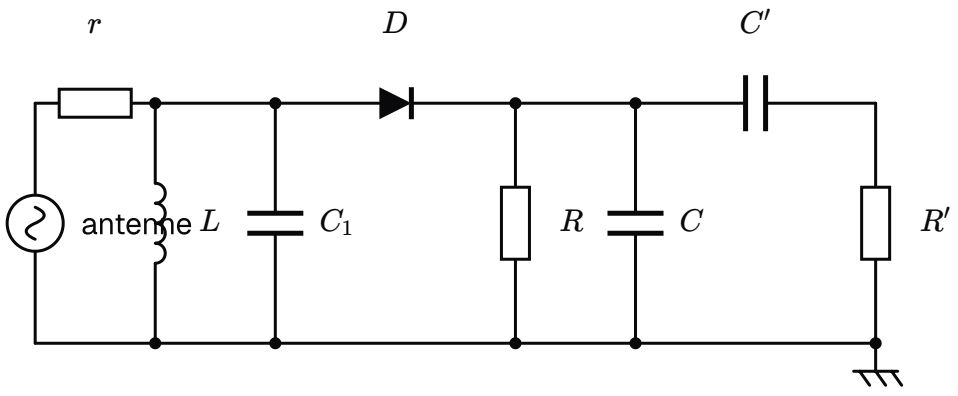
$$T_p \ll RC < T_s.$$

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.

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.



Chaîne de réception d'un récepteur AM simple ; le résistor r modélise la résistance de l'antenne et de sa liaison

Exemple

Si la tension détectée vaut $u_D(t) = 2{,}0 + 0{,}70\cos(2\pi f_s\, t)$, en volts, le filtre passe-haut ne garde que $0{,}70\cos(2\pi f_s\, t)$: le message, sans la composante continue de $2{,}0\,\mathrm{V}$.

Méthode : Dimensionner le dipôle RC du détecteur

1. **Périodes** : $T_p = \dfrac{1}{F_p}$ et $T_s = \dfrac{1}{f_s}$, en secondes.
2. **Constante de temps** : $\tau = RC$, avec R en ohms et C en farads.
3. **Comparaison** : τ vaut au moins dix fois T_p et reste inférieure à T_s.
4. **Choix** : parmi plusieurs couples, garde celui qui vérifie les deux inégalités.

Exemple

Périodes. Avec $F_p = 250\,\mathrm{kHz}$ et $f_s = 5{,}0\,\mathrm{kHz}$: $T_p = 4{,}0\,\mu\mathrm{s}$ et $T_s = 0{,}20\,\mathrm{ms}$.

Constante de temps. Pour $R = 15\,\mathrm{k\Omega}$ et $C = 3{,}3\,\mathrm{nF}$: $\tau = 1{,}5\times10^{4}\times3{,}3\times10^{-9} \approx 5{,}0\times10^{-5}\,\mathrm{s}$.

Verdict. $50\,\mu\mathrm{s}$ vaut environ douze fois T_p et reste sous T_s : le couple convient.

Attention : Le filtre passe-haut n'est pas facultatif

Après le détecteur, la tension garde une composante continue égale à A. Elle ne porte aucun message et décalerait la membrane du haut-parleur. Le condensateur en série du filtre passe-haut la bloque.

Attention : Une constante de temps ni trop petite ni trop grande

Si RC est trop petit, le condensateur se vide entre deux alternances : il reste des pointes à la fréquence de la porteuse. Si RC est trop grand, la tension détectée ne redescend pas assez vite quand l'enveloppe baisse.

Choisir une station et l'écouter

Remarque : La période propre du circuit LC

Rappel : un circuit formé d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C oscille avec la période propre $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

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.

Méthode : Régler le condensateur sur une station

1. **Accord** : écris $f_0 = F_p$.
2. **Inconnue** : élève au carré, puis isole C ou L.
3. **Unités** : fréquence en hertz, inductance en henrys ; convertis le résultat en pF ou en nF.
4. **Plage** : compare la valeur trouvée aux limites du condensateur réglable.

Exemple

Données. $L = 0{,}60\,\mathrm{mH}$ et $F_p = 810\,\mathrm{kHz}$.

Capacité.

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L\,F_p^2}$$
$$C \approx 6{,}4 \times 10^{-11}\,\mathrm{F}$$
$$C \approx 64\,\mathrm{pF}$$

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

Pour la station de $810\,\mathrm{kHz}$: l'antenne capte toutes les ondes, le circuit bouchon accordé choisit la station, le détecteur et le filtre extraient le message, l'amplificateur et le haut-parleur le restituent.

Formulaire et gestes de rédaction

Méthode : Choisir la bonne méthode

- **Onde** : $\lambda = \dfrac{c}{f}$ et $\Delta t = \dfrac{d}{c}$.
- **Oscillogramme** : divisions multipliées par la sensibilité ; plusieurs périodes pour T.
- **Multiplieur** : $A = k\,P_m\,U_0$ et $m = \dfrac{S_m}{U_0}$.
- **Enveloppe lue** : m à partir de $U_{\max}$ et $U_{\min}$.
- **Mode XY** : m à partir des deux bases du trapèze.
- **Spectre** : trois raies, largeur $2f_s$.
- **Détection** : comparer RC à T_p et à T_s.
- **Accord** : $f_0 = F_p$.

Longueur d'onde

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

Propagation

$$\Delta t = \frac{d}{c}$$

Multiplieur

$$u_s = k\,u_1\,u_2$$

Amplitude A

$$A = k\,P_m\,U_0$$

Taux

$$m = \frac{S_m}{U_0}$$

Taux lu

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

Raies latérales

$$F_p \pm f_s, \quad \frac{m\,A}{2}$$

Détection

$$T_p \ll RC < T_s$$

Accord

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

À retenir : Rédiger une lecture d'écran

Pour une lecture d'écran, écris le nombre de divisions, la sensibilité, puis le résultat avec $\approx$. Nomme la relation avant chaque calcul. Convertis les kilohertz, les nanofarads et les millihenrys en unités SI. Garde les chiffres significatifs de la donnée la moins précise.