

# Les ondes électromagnétiques – Modulation d'amplitude

## Cadre de référence de la leçon

- PH3.4.1** Connaître les éléments d'une chaîne de transmission de l'information et le rôle de chacun d'eux.
- PH3.4.2** Savoir qu'une onde électromagnétique se propage dans le vide et dans les milieux matériels, et connaître sa célérité dans le vide.
- PH3.4.3** Connaître les domaines des ondes électromagnétiques, les longueurs d'onde correspondantes et quelques applications.
- PH3.4.4** Connaître le rôle de l'antenne d'émission dans le rayonnement d'une onde électromagnétique.
- PH3.4.5** Connaître le rôle de l'antenne de réception et la condition de réception d'une onde électromagnétique.
- PH3.4.6** Connaître et exploiter l'expression d'une tension sinusoïdale : amplitude, fréquence, période et phase.
- PH3.4.7** Savoir qu'une onde électromagnétique résulte de la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique variables.
- PH3.4.8** Connaître la relation entre la longueur de l'antenne et la longueur d'onde de l'onde émise ou reçue.
- PH3.4.9** Connaître le principe de la modulation d'amplitude et la nécessité d'une onde porteuse de haute fréquence.
- PH3.4.10** Définir le taux de modulation et connaître la condition d'une bonne modulation.
- PH3.4.11** Reconnaître les constituants d'une chaîne d'émission et le rôle de chaque étage.
- PH3.4.12** Déterminer le taux de modulation à partir d'un oscillogramme, notamment par la méthode du trapèze.
- PH3.4.13** Établir et exploiter l'expression de la tension modulée en amplitude.
- PH3.4.14** Connaître le rôle de chaque étage d'un détecteur d'enveloppe et la condition portant sur la constante de temps.
- PH3.4.15** Exploiter le spectre de fréquences d'une tension modulée en amplitude.
- PH3.4.16** Connaître le principe de la démodulation d'amplitude.
- PH3.4.17** Exploiter des oscillogrammes pour reconnaître une modulation d'amplitude et juger de sa qualité.
- PH3.4.18** Reconnaître les différents étages d'un récepteur radio à modulation d'amplitude.
- PH3.4.19** Proposer ou réaliser le schéma d'un récepteur radio à modulation d'amplitude.

## Compétence ciblée

- CC3** L'électricité. Modéliser le comportement du condensateur et de la bobine dans un circuit électrique et analyser leurs réponses à un échelon de tension ; étudier les oscillations libres dans un circuit RLC série. Interpréter les constituants et le rôle des éléments d'une chaîne d'émission, et être conscient de son intérêt dans la communication.

# 1

## Les ondes électromagnétiques

Cadre de référence : PH3.4.2, PH3.4.3, PH3.4.7

### 1) Définition

Cadre de référence : PH3.4.3, PH3.4.7

Une **onde électromagnétique** est la propagation d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$ , perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation. Elle se propage dans toutes les directions dans un milieu homogène et isolant, et **ne nécessite pas de milieu matériel** : elle se propage aussi dans le vide.

La transmission d'une information par une onde électromagnétique se fait par **transport d'énergie sans transport de matière**.

Vitesse de propagation dans le vide (célérité) :

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

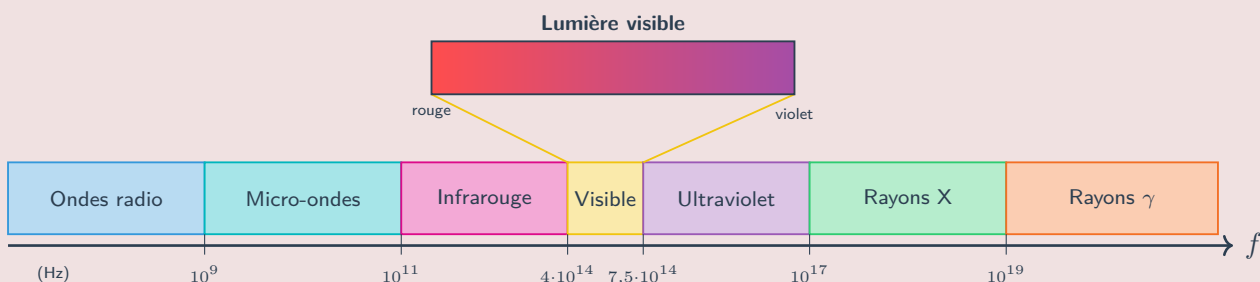
C'est aussi la **vitesse de transmission de l'information** par onde électromagnétique.

Cadre de référence : PH3.4.2

### 2) Le domaine des ondes électromagnétiques

Cadre de référence : PH3.4.3

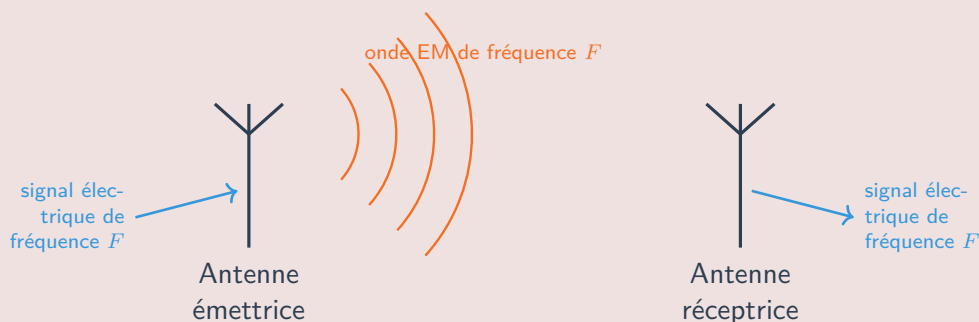
La **lumière visible** fait partie des **ondes électromagnétiques** : elle correspond à un domaine restreint de fréquences, compris approximativement entre  $4 \times 10^{14}$  Hz et  $7,5 \times 10^{14}$  Hz.



### 3) Rôle des antennes

Cadre de référence : PH3.4.4, PH3.4.5, PH3.4.8

- **Antenne émettrice** : elle transforme un signal électrique en onde électromagnétique. L'onde émise a la **même fréquence** que celle du signal électrique qui lui est transmis.
- **Antenne réceptrice** : l'onde électromagnétique qu'elle capte y engendre un **signal électrique de même fréquence** que l'onde reçue.
- Une **même antenne** peut servir d'émetteur **et** de récepteur : c'est le cas de l'antenne d'un téléphone portable.



## 4) Expression d'une tension sinusoïdale

Cadre de référence : PH3.4.6

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

- $U_m$  : amplitude (V)       $f$  : fréquence (Hz)       $\varphi$  : phase à l'origine (rad)
- $2\pi f = \omega$  : pulsation ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )       $T = \frac{1}{f}$  : période (s)

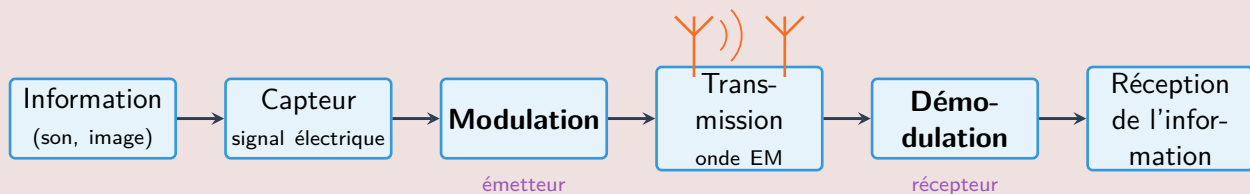
Pour transmettre un tel signal, on peut moduler **l'une** de ses trois caractéristiques :

- l'amplitude  $U_m \rightarrow$  **modulation d'amplitude (AM)** ;
- la fréquence  $f \rightarrow$  modulation de fréquence (FM) ;
- la phase à l'origine  $\varphi \rightarrow$  modulation de phase.

## 5) La chaîne de transmission de l'information

Cadre de référence : PH3.4.1, PH3.4.11

La transformation d'une information (son, image, texte) en un message transmissible puis sa restitution comportent les opérations suivantes :



## 2 Modulation d'amplitude

Cadre de référence : PH3.4.9 à PH3.4.13, PH3.4.15

### 1) Principe de la modulation

Cadre de référence : PH3.4.9

Le principe de la modulation d'amplitude consiste à transmettre une onde de **basse fréquence** à l'aide d'une onde électromagnétique **porteuse de haute fréquence**.

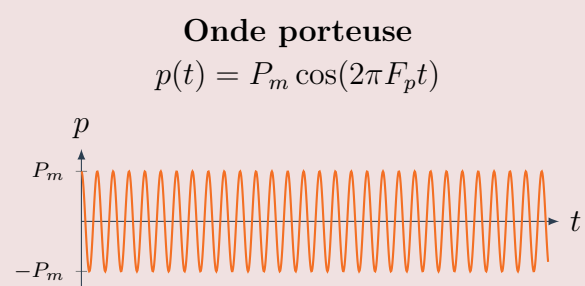
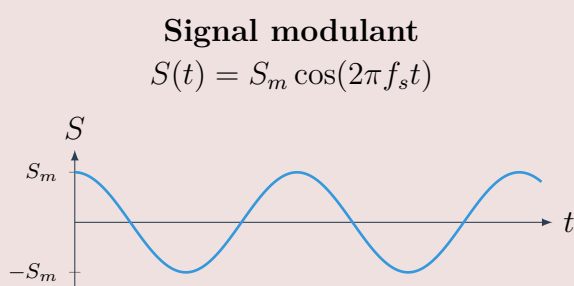
Moduler en amplitude, c'est rendre **l'amplitude** du signal modulé **fonction affine** de la tension modulante.

### 2) Signal modulant et onde porteuse

Cadre de référence : PH3.4.6, PH3.4.9

Soit  $S(t)$  le signal sinusoïdal de basse fréquence à transmettre (**signal modulant**), de fréquence  $f_s$ .

Pour le transmettre on utilise une onde électromagnétique **porteuse**  $p(t)$  de fréquence  $F_p$  telle que  $F_p \gg f_s$ .



### 3) Expression de la tension modulée en amplitude

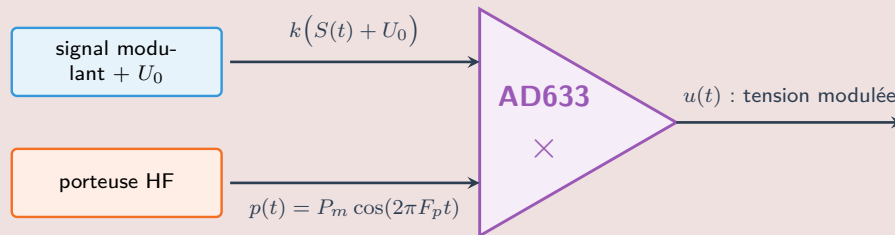
Cadre de référence : PH3.4.9, PH3.4.13

Pour qu'une tension soit modulée en amplitude, son expression doit être de la forme :

$$u(t) = U_m(t) \times \cos(2\pi F_p t)$$

où l'amplitude  $U_m(t)$  dépend du temps.

En pratique on utilise un **multiplieur** (composant **AD633**). On obtient la tension modulée  $u(t)$  en multipliant les deux tensions  $k(S(t) + U_0)$  et  $p(t)$ , où  $U_0$  est une **tension de décalage** constante.



Établissement de l'expression :

$$u(t) = k(S(t) + U_0) \cdot p(t) = kP_m [S_m \cos(2\pi f_s t) + U_0] \cos(2\pi F_p t)$$

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

On pose  $A = kP_m U_0$  et  $m = \frac{S_m}{U_0}$  (**taux de modulation**) :

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

$$\text{soit } u(t) = U_m(t) \cos(2\pi F_p t) \quad \text{avec} \quad U_m(t) = A [m \cos(2\pi f_s t) + 1]$$

L'amplitude  $U_m(t)$  est bien une **fonction affine** du signal modulant  $S(t)$ .

### 4) Qualité de la modulation – taux de modulation

Cadre de référence : PH3.4.10, PH3.4.12, PH3.4.17

Le **taux de modulation**  $m$  se détermine expérimentalement sur l'oscillogramme :

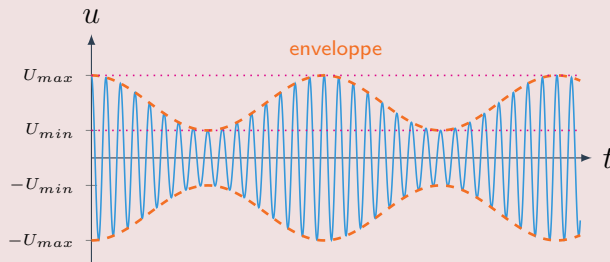
$$m = \frac{S_m}{U_0} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}$$

Conditions d'une modulation de bonne qualité :

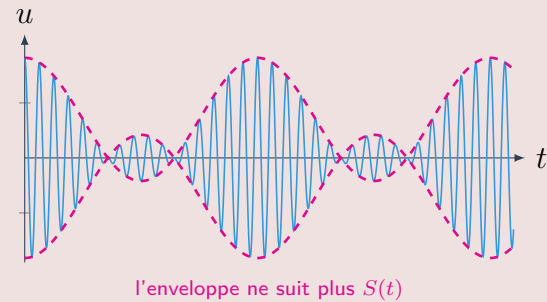
$$m < 1 \quad \text{et} \quad F_p \gg f_s$$

Si  $m > 1$ , il y a **surmodulation** : l'enveloppe ne reproduit plus le signal modulant et l'information est déformée.

Bonne modulation :  $m < 1$



Surmodulation :  $m > 1$



## 5) Spectre de fréquences de la tension modulée

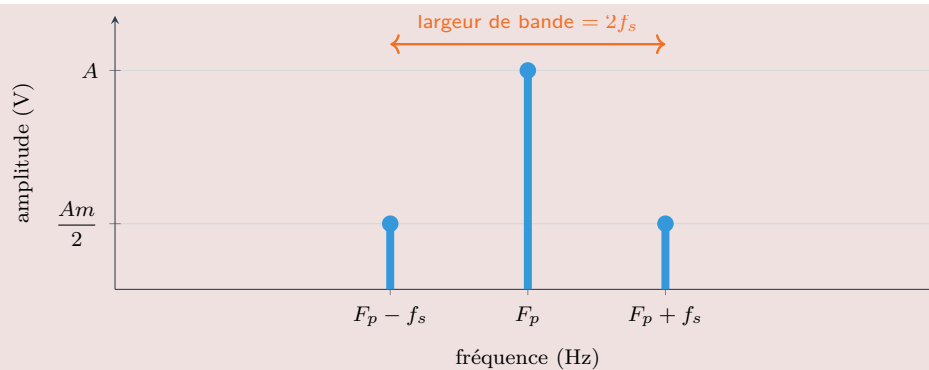
Cadre de référence : PH3.4.15

En développant l'expression de  $u(t)$  :

$$u(t) = A \cos(2\pi F_p t) + \frac{Am}{2} \cos(2\pi(F_p - f_s)t) + \frac{Am}{2} \cos(2\pi(F_p + f_s)t)$$

Le spectre de la tension modulée comporte donc **trois raies** :

$$F_p - f_s \quad ; \quad F_p \quad ; \quad F_p + f_s$$



La **largeur de bande** occupée par le signal modulé vaut  $\Delta f = 2f_s$ . Elle impose l'écart minimal entre deux stations émettrices voisines.

## 3 Démodulation d'amplitude

Cadre de référence : PH3.4.14, PH3.4.16, PH3.4.17

### 1) Principe

Cadre de référence : PH3.4.16

La **démodulation** consiste à extraire le signal modulant  $S(t)$  de la tension modulée  $u(t)$ .

Elle se fait en **deux étapes** :

1. la **détection d'enveloppe** : on récupère l'enveloppe  $U_m(t) = A[m \cos(2\pi f_s t) + 1]$  ;
2. l'**élimination de la tension de décalage**  $U_0$  : on ne conserve que la partie variable, c'est-à-dire le signal modulant.

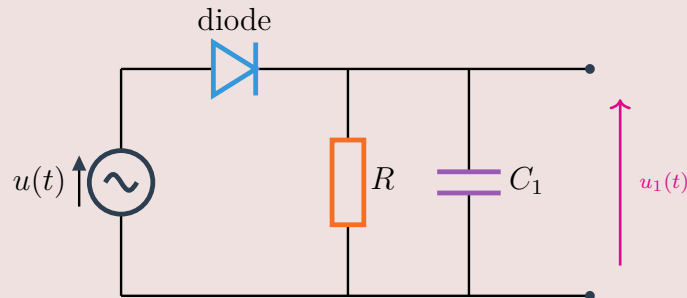


### 2) La détection d'enveloppe

Cadre de référence : PH3.4.14, PH3.4.17

Le détecteur d'enveloppe est constitué d'une **diode** suivie d'une association **RC parallèle**, qui joue le rôle d'un **filtre passe-bas**.

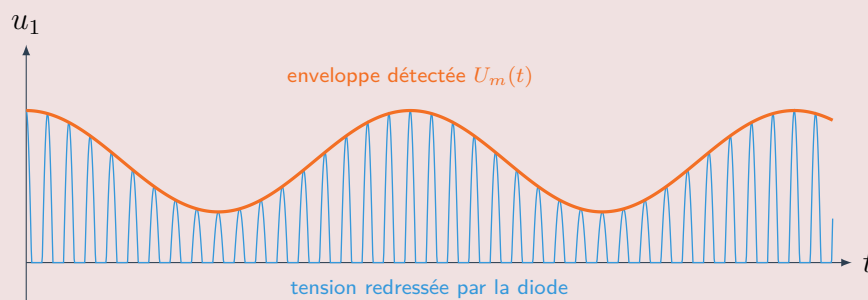
- La **diode** supprime les alternances négatives de la tension modulée (redressement).
- Le **circuit RC** élimine la composante due à la porteuse (haute fréquence) et ne laisse subsister que l'enveloppe.



Condition d'une bonne détection d'enveloppe :

$$T_p < \tau = RC_1 < T_s \quad \text{avec} \quad T_p = \frac{1}{F_p} \quad \text{et} \quad T_s = \frac{1}{f_s}$$

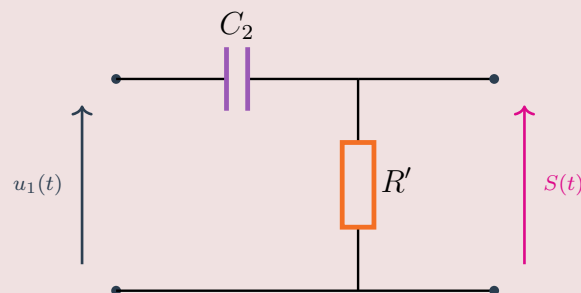
- Si  $\tau$  est **trop petit**, la tension suit les oscillations de la porteuse : l'enveloppe est mal détectée.
- Si  $\tau$  est **trop grand**, la décharge est trop lente : l'enveloppe est déformée (« écrêtée »).



### 3) Élimination de la tension de décalage $U_0$

Cadre de référence : PH3.4.14

La tension  $u_1(t)$  obtenue contient encore la composante continue  $A$  (liée à  $U_0$ ). Pour l'éliminer on utilise un **filtre passe-haut**, constitué d'un condensateur  $C_2$  en série et d'une résistance  $R'$  : il laisse passer les signaux de **hautes fréquences** et bloque la composante continue.



En sortie on retrouve le **signal modulant**  $S(t)$ , de fréquence  $f_s$  : l'information a été restituée.

**Condition :**  $\frac{1}{2\pi R'C_2} \ll f_s$  ; on prend en pratique  $\tau' = R'C_2 \gg T_s$ .

## 4

## Réalisation d'un récepteur radio AM

Cadre de référence : PH3.4.18, PH3.4.19

Un récepteur radio AM est composé des éléments essentiels suivants :

1. une **antenne** qui capte les ondes radio et les convertit en signal électrique ;
2. un **circuit bouchon LC** (circuit d'accord) qui **sélectionne** la fréquence de l'onde porteuse que l'on veut capter ;
3. un **circuit de démodulation d'amplitude** (détecteur d'enveloppe + filtre passe-haut) ;
4. un **amplificateur** et un **haut-parleur** qui restituent le son.

**Rôle sélectif du circuit bouchon LC :** le circuit LC n'est le siège d'oscillations d'amplitude notable que pour les tensions dont la fréquence est voisine de sa **fréquence propre**  $f_0$ . Pour sélectionner l'émetteur voulu, on règle  $C$  jusqu'à ce que :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = F_p \quad \left\{ \begin{array}{l} f_0 : \text{fréquence propre du circuit LC} \\ F_p : \text{fréquence de l'onde porteuse} \end{array} \right.$$

