

Électronique 5

Modulation, démodulation

COMPÉTENCES

A la fin de ce chapitre, je saurai :

- Définir un signal modulé en amplitude, en fréquence, en phase.
- Citer les ordres de grandeur des fréquences utilisées pour les signaux radio AM, FM, la téléphonie mobile.
- Interpréter le signal modulé comme le produit d'une porteuse par une modulante.
- Décrire le spectre d'un signal modulé.
- À partir de l'analyse fréquentielle, justifier la nécessité d'utiliser une opération non linéaire.
- Expliquer le principe de la démodulation synchrone.
- ✎ Réaliser une modulation d'amplitude et une démodulation synchrone avec un multiplieur analogique.

RÉSUMÉ DU COURS

1 Le principe de la modulation

1.1 Présentation

L'objectif de ce chapitre est de comprendre comment un signal peut-être transmis sur un canal.

EXEMPLE

Un son, des données numériques, ... sont des signaux.

EXEMPLE

Un câble coaxial, une ligne bifilaire, des ondes électromagnétiques, ... sont des canaux

La modulation permet de

- transporter plusieurs signaux sur un canal
- adapter la fréquence du signal pour qu'elle soit compatible avec le canal.

La modulation consiste à combiner

- le signal qu'on souhaite transmettre
- un signal sinusoïdal dont la fréquence est adaptée au canal appelé « porteuse »

1.2 Les différents types de modulation

Porteuse

$$s_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + \phi_p)$$

Avec

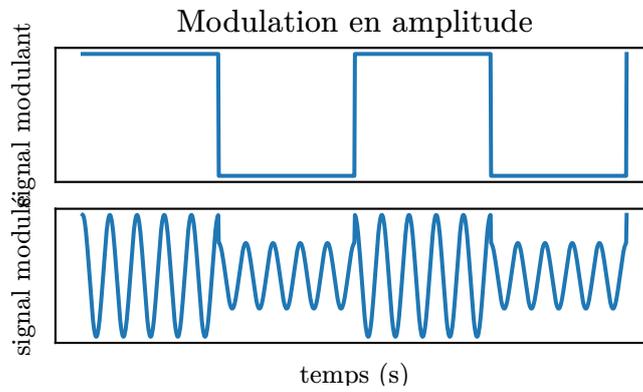
- $s_p(t)$ la porteuse
- A_p l'amplitude de la porteuse
- f_p la fréquence de la porteuse
- ϕ_p la phase de la porteuse

Les trois types de modulation consistent à faire varier un de ces paramètres au cours du temps.

1.2.1 La modulation d'amplitude

La modulation d'amplitude consiste à faire varier l'amplitude de la porteuse : A_p devient $A(t)$.

$$s_{AM}(t) = A(t) \cos(2\pi f_p t + \phi_p)$$



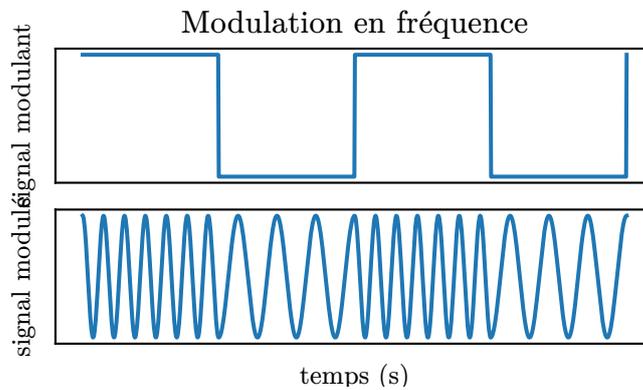
EXEMPLE

La radio en mode grandes ondes (GO) utilise la modulation d'amplitude avec une porteuse entre 150 kHz et 300 kHz.

1.2.2 La modulation de fréquence

La modulation de fréquence consiste à faire varier la fréquence de la porteuse : f_p devient $f(t)$.

$$s_{FM}(t) = A_p \cos(2\pi f(t)t + \phi_p)$$



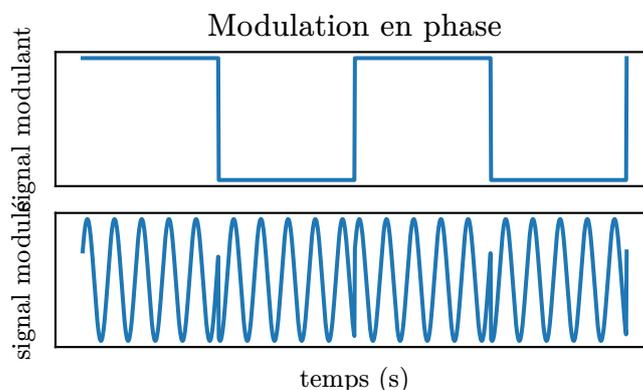
EXEMPLE

La radio en mode FM utilise la modulation de fréquence avec une porteuse entre 87 MHz et 108 MHz.

1.2.3 La modulation de phase

La modulation de phase consiste à faire varier la phase de la porteuse : ϕ_p devient $\phi(t)$.

$$s_{PM}(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + \phi(t))$$



EXEMPLE

La téléphonie mobile utilise la modulation de phase avec une porteuse à environ 900 MHz.

2 Modulation d'amplitude

2.1 Principe

Signal modulé en amplitude

$$s_{AM}(t) = (1 + ks(t)) s_p(t)$$

Avec

- $s_{AM}(t)$ le signal modulé en amplitude (en V)
- $s_p(t)$ la porteuse (en V)
- $s(t)$ le signal à transmettre (en V)
- k un coefficient positif (en V^{-1})
- $(1 + ks(t))$ appelé la modulante (sans unité)

APPLICATION

Quelle valeur maximale peut avoir k pour que la modulante ne s'annule jamais ? On l'exprimera en fonction de $\max(s(t))$. On supposera s symétrique, c'est-à-dire que $\max(s) = -\min(s)$

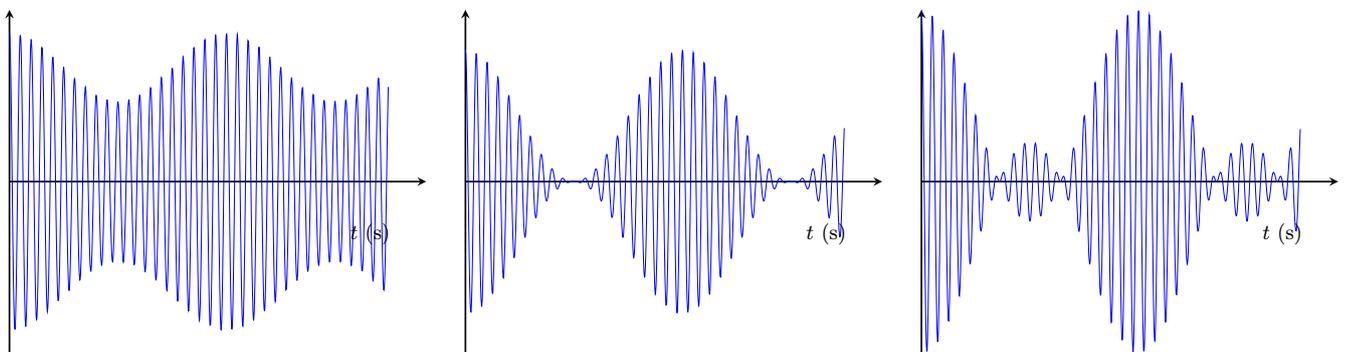
Taux de modulation

$$h = k \times \max s$$

Avec

- h le taux de modulation (sans unité)
- $s(t)$ le signal à transmettre (en V)
- k un coefficient positif (en V^{-1})

Pour que le signal modulé puisse être démodulé « correctement », le taux de modulation doit être inférieur à 1. Lorsque le taux de modulation dépasse 1, il y a **surmodulation**.



(a) Taux de modulation $h = 0.3$

(b) Taux de modulation $h = 1$

(c) Taux de modulation $h = 1.6$

FIG. 1 : Signaux modulés en amplitude avec différents taux de modulation.

La modulation en amplitude est la multiplication de deux signaux. La multiplication est une opération non-linéaire qui modifie leur spectre.

2.2 Point de vue spectral

Spectre d'un signal sinusoïdal modulé en amplitude



Hypothèses

- $s(t)$ est un signal sinusoïdal
- $f_p \gg f$

SCHÉMA

Avec

- A_p l'amplitude de la porteuse (en V)
- A_s l'amplitude du signal à transmettre (en V)
- k le facteur multiplicatif du multiplieur (en V^{-1})
- f_p la fréquence de la porteuse (en Hz)
- f_s la fréquence du signal à transmettre (en Hz)

Spectre d'un signal quelconque modulé en amplitude



Hypothèses

- $f_p \gg f$

SCHÉMA

Avec

- A_p l'amplitude de la porteuse (en V)
- k le facteur multiplicatif du multiplieur (en V^{-1})
- f_p la fréquence de la porteuse (en Hz)
- f_{max} la fréquence maximale présence dans le spectre du signal à transmettre (en Hz)

La **largeur de bande** est la plage de fréquence occupée par le signal modulé.

APPLICATION



Combien peut-il y avoir de stations de radio en grandes ondes (GO)? Et dans le bande FM?

3 Démodulation

3.1 Principe

La démodulation est l'opération inverse de la modulation. La démodulation permet de retrouver le signal à transmettre à partir du signal modulé.

La démodulation ne peut pas être une opération linéaire car il faut modifier le spectre pour retrouver celui du signal à transmettre.

3.2 Démodulation synchrone

3.2.1 Première étape : multiplication par la porteuse

5

Spectre du signal après multiplication par la porteuse

Hypothèses

- $f_p \gg f$
- le signal à transmettre est sinusoïdal

SCHÉMA

Avec

- A_p l'amplitude de la porteuse (en V)
- k le facteur multiplicatif du multiplieur (en V^{-1})
- f_p la fréquence de la porteuse (en Hz)
- f_{max} la fréquence maximale présente dans le spectre du signal à transmettre (en Hz)

3.2.2 Deuxième étape : filtrage passe-bas

6

Spectre du signal après multiplication par la porteuse et filtrage passe bas

Hypothèses

- $f_p \gg f$
- le signal à transmettre est sinusoïdal

SCHÉMA

Avec

- A_p l'amplitude de la porteuse (en V)
- k le facteur multiplicatif du multiplieur (en V^{-1})
- f_p la fréquence de la porteuse (en unitHz)
- f_{max} la fréquence maximale présente dans le spectre du signal à transmettre (en unitHz)

Quelle fréquence le filtre passe-bas peut-il avoir pour démoduler la radio en grandes ondes (GO) ?

3.2.3 Troisième étape : filtrage passe-haut

Spectre du signal après démodulation

Hypothèses

- $f_p \gg f$
- le signal à transmettre est sinusoïdal

SCHÉMA

Avec

- A_p l'amplitude de la porteuse (en V)
- k le facteur multiplicatif du multiplieur (en V^{-1})
- f_p la fréquence de la porteuse (en unitHz)
- f_{max} la fréquence maximale présence dans le spectre du signal à transmettre (en unitHz)

Quelle fréquence le filtre passe-haut peut-il avoir pour démoduler la radio en grandes ondes (GO) ?

3.2.4 Schéma récapitulatif

SCHÉMA Démodulation synchrone

MÉTHODES

1 Linéariser le produit de fonction trigonométriques

On utilise les formules $\sin(a)\sin(b) = \frac{1}{2}(\cos(a-b) - \cos(a+b))$, $\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}(\cos(a-b) + \cos(a+b))$ et $\sin(a)\cos(b) = \frac{1}{2}(\sin(a-b) + \sin(a+b))$.

2 Déterminer le spectre de produits et sommes de sinus

1. S'il y a des produits de fonctions trigonométriques dépendant du temps, les linéariser.
2. Pour chaque terme, représenter un pic à la fréquence et l'amplitude correspondante sur le spectre.

TD

1 Modulation d'amplitude

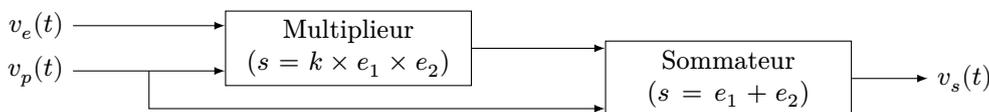
On cherche à transmettre un signal audio par ondes électromagnétiques.

1. À quelle plage de fréquences correspond le domaine audible?

Pour émettre et recevoir une onde électromagnétique, il est nécessaire d'avoir une antenne dont la taille est une demi longueur d'onde.

2. Calculer la taille de l'antenne qui serait nécessaire sans modulation.

On module le signal $v_e(t)$ (appelé signal modulant) en amplitude avec la porteuse $v_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t)$ avant de l'émettre. La modulation peut se schématiser ainsi :

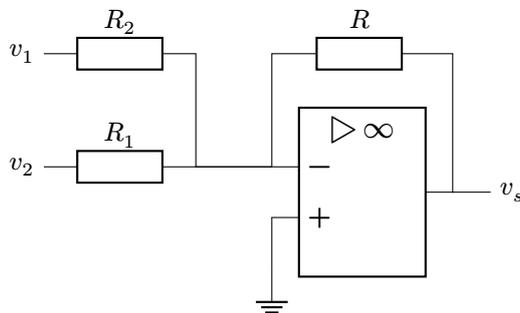


Pour démoduler correctement le signal, il ne faut pas que son enveloppe s'annule.

3. Exprimer $v_s(t)$ en fonction de $v_e(t)$ et $v_p(t)$.
4. Dans le cas où $v_e(t)$ est sinusoïdal ($v_e(t) = A_e \cos(2\pi f_e t)$), quelle valeur faut-il choisir pour k ?
5. Toujours pour v_e sinusoïdal, tracer le spectre du signal modulé $v_s(t)$ dans ce cas particulier.
6. On suppose maintenant que $v_e(t)$ est un signal audio. Tracer un spectre possible de v_e . Tracer alors le spectre de v_s en prenant $f_p = 520$ kHz.
7. Les ondes moyennes s'étendent de 520 kHz à 1620 kHz. Combien de canaux audios peuvent être émis sur cette bande.

2 Summing amplifier

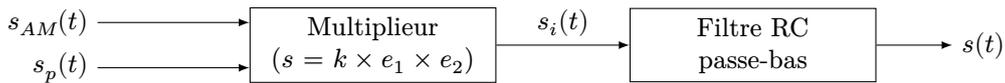
In the previous exercise, we have seen the necessity for a summing system in order to realize an amplitude modulation. This system can be realized by the following assembly.



1. Ascertain the expression of V_- as a function of v_1 and v_2 and v_s .
2. Deduce an expression of v_s as a function of v_1 and v_2 .
3. Under which condition does $v_s = -(v_1 + v_2)$.
4. The aim is to have $v_{s2} = v_1 + v_2$. Which transfer function needs to be placed after the previous system to obtain v_{s2} ? Suggest an electronic assembly that would have this transfer function.

3 Démodulation synchrone

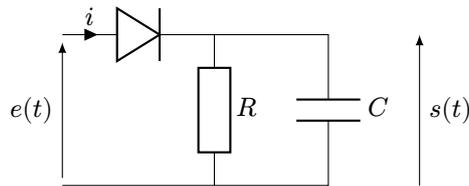
On souhaite démoduler un signal modulé en amplitude $s_{AM}(t)$ avec une porteuse $s_p(t)$ de fréquence 200 kHz. Le signal original a une largeur spectrale de 10 kHz. On utilise pour cela le montage suivant.



1. Représenter qualitativement les spectres de $s_{AM}(t)$, $s_p(t)$, $s_i(t)$ et $s(t)$.
2. Proposer des valeurs réalistes pour R et C afin que le signal démodulé $s(t)$ s’approche convenablement du signal modulant.

4 Démodulation par détection d’enveloppe

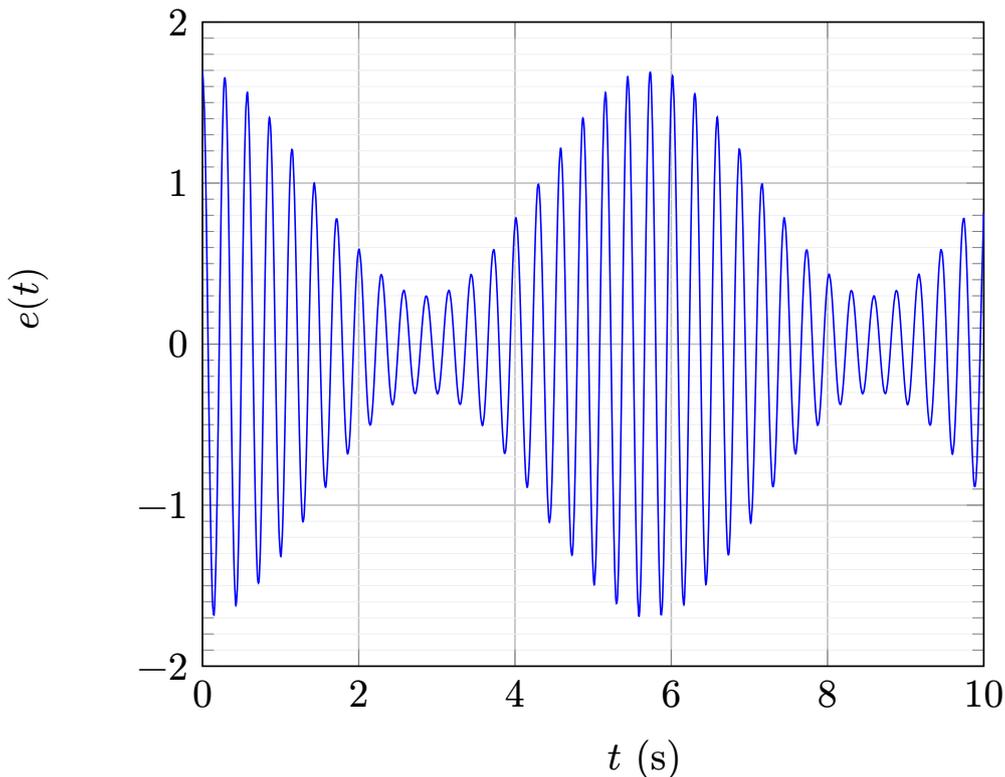
On souhaite démoduler un signal modulé en amplitude $e(t) = A_0[1 + m \cos(2\pi f_s t)] \cos(2\pi f_p t)$. On utilise pour cela le montage ci-dessous appelé détecteur d’enveloppe.



1. Montrer que lorsque la diode est passante (i.e. qu’elle se comporte comme un fil) $s(t) = e(t)$.
2. Déterminer l’équation différentielle vérifiée sur $s(t)$ lorsque la diode est bloquée (i.e. qu’elle se comporte comme un interrupteur ouvert).
3. On utilise Python pour simuler l’évolution de $s(t)$ pour deux signaux de taux de modulation différents. Se rendre sur Capytale (code 0b1c-7216837) et compléter le code.
4. Lequel des deux signaux sera correctement démodulé ?

5 Taux de modulation

Mesurer le taux de modulation du signal ci-dessous.



6 Thérémine

On s'intéresse à un Thérémine constitué de deux oscillateurs à relaxation de périodes d'oscillation $T_1 = 4 \frac{R_a}{R_b} RC_1$ et $T_2 = 4 \frac{R_a}{R_b} RC_2$. Le condensateur C_2 est constitué d'un condensateur identique à C_1 en parallèle d'un condensateur C' , lui-même constitué de la main et de l'antenne et variant entre 0 et 10 pF.

Les signaux issus des deux oscillateurs sont envoyés dans un multiplieur dont on note $s(t)$ la sortie.

1. Exprimer C_2 en fonction de C_1 et C' .
2. En supposant $C' \ll C_1$, quelle est la fréquence la plus petite contenue dans le spectre de s ? Elle sera exprimée en fonction de R_a , R_b , R , C_1 et C' .
3. Quel montage faut-il placer après s pour isoler cette fréquence? On notera $s'(t)$ la sortie de ce filtre.
4. Quelle valeur doit avoir C_1 pour que la fréquence du signal en sortie varie entre 0 et 2 kHz?

Données : $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$; $R = 100 \text{ k}\Omega$; $C' \in [0, 10 \text{ pF}]$



7 J'explique à ma grand-mère

Le but de cet exercice est de vous faire expliquer un concept/-phénomène avec des mots simples et courants (pas de vocabulaire technique ou scientifique) à une personne de votre entourage. Tachez de faire simple et court, utilisez des analogies avec des choses connues. Vous pouvez vous inspirer de Ma thèse en 180 secondes. Profitez-en pour prendre des nouvelles!

1. Comment peut-on diffuser plein de stations de radio sur les ondes sans qu'elles se mélangent et comment fait mon poste de radio pour sélectionner celle que je veux écouter?